

การจำลองความสมดุลของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทาง

โดยใช้โปรแกรม MSC ADAMS

DYNAMICS BALANCING SIMULATION OF AN ALPHA-TYPE DOUBLE

ACTING STIRLING ENGINE USING MSC ADAMS SOFTWARE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อปีการศึกษา 2562 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

DYNAMICS BALANCING SIMULATION OF AN ALPHA-TYPE DOUBLE ACTING STIRLING  
ENGINE USING MSC ADAMS SOFTWARE



A PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE BACHELOR DEGREE IN MECHANICAL ENGINEERING

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2019

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเชิงพาณิชย์เท่านั้น เมื่อนำไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอย่างจงใจของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2562

การจำลองความสมดุลของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทาง โดยใช้

โปรแกรม MSC ADAMS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผศ.ดร.สุตาภรณ์ แคว้นเขาเม็ง

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญาโทปีการศึกษา 2562

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การจำลองความสมดุลของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทาง

โดยใช้โปรแกรม MSC ADAMS

ผู้จัดทำ

1. นาย กรกต สัจจพรหม รหัสนักศึกษา 59010006
2. นาย กฤษณ์ ทิฆัมพรวิภา รหัสนักศึกษา 59010047
3. นาย กิตติพิช แม่นมั่น รหัสนักศึกษา 59010121 (ปีการศึกษา 2563)



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง)



อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผศ.ดร.ปัญญา ชันธุ์สุวรรณ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



การจำลองความสมดุลของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทาง  
โดยใช้โปรแกรม MSC ADAMS

นาย กรกต                      สัจพรหม  
นาย กฤษณ์                    ทิฆัมพรวิภา  
นาย กิตติพช                  แม่นมั่น (ปีการศึกษา 2563)  
ผศ.ดร.สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2562

**บทคัดย่อ**

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทางซึ่งมีการสั่นสะเทือน ขนาดการสั่นสะเทือน และความถี่ธรรมชาติ จะถูกคำนวณด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข และพบว่าความเร่ง ในระนาบ XY มีค่ามากกว่าแกน Z ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพิจารณาค่าความเร่งในระนาบ XY เท่านั้น จากการเปรียบเทียบค่าความสั่นสะเทือนในระนาบ XY ได้ผลการเปรียบเทียบมีความแตกต่างกัน และจากการศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลขนั้นพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์คือ มวลส่วนเกินเยื้องศูนย์กับแนวการหมุน ,มวลของข้อเหวี่ยง และความเร็รรอบในการทำงานของเครื่องยนต์ ทำให้เกิดแรงที่ไม่สมดุลจึงเกิดการสั่น ปริญญานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีต่างๆในการลดการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ และพิจารณาความคุ้มค่าว่าสมควรใช้วิธีการใดในการลดการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# Dynamics Balancing Simulation of an Alpha-type Double Acting Stirling Engine Using MSC ADAMS Software

Mr. Goragot Sajjaprom

Mr. Krish Tekumpornvepa

Mr. Kittiphot Manmun

Asst.Prof.Dr.Sutapat Kwankaomeng Advisor

## ABSTRACT

This thesis presents a numerical simulation to study the balancing of the alpha-type stirling engine. The vibration, natural frequency and calculate by numerical simulation. The results of the normal stirling engine vibration will be compared with the results of the engine vibration with balancing load. Find the vibration in x and y axis are greater than z axis. Therefore this thesis is determined only XY-plane vibration. Compare the vibration in normal stirling engine and the vibration with balancing load. The result of this comparison in terms of the loaded and unload engine is differ and , the study of the numerical simulation , the factor affect to the magnitude of vibration to the stirling engine are the unbalancing mass as crank ,speed of engine, engine mass. So we study the effect of these parameter on acceleration in the XY-plane of the stirling engine. We will optimized the vibration of stirling engine by adjust load in the opposite side of crank

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่าง ที่เป็นประโยชน์ต่อปริญญาโทฉบับนี้มาด้วยดีโดยตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ปัญญา ชันธุ์สุวรรณ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ช่วยให้ข้อเสนอแนะ ข้อคิดเห็น สอนการใช้งานโปรแกรม MSC ADAMS และอนุเคราะห์พื้นที่ และอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการเพื่ออำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงาน

ขอขอบพระคุณพี่นักศึกษาปริญญาเอก ในห้องทดลองที่คอยให้ข้อเสนอแนะ และคอยช่วยเหลือเกี่ยวกับการทดสอบการใช้งานเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติงานที่ให้ข้อเสนอแนะต่างๆ รวมไปถึงช่วยแก้ปัญหา และแลกเปลี่ยนความคิดเห็นที่ดีมาโดยตลอด

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่คอยสั่งสอนให้ความรู้ตลอดมาจนกระทั่งปริญญาโทฉบับนี้ประสบความสำเร็จ ทำวันนี้คณะผู้จัดทำ

ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงิน และให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นายกรกต                      สัจจพรหม

นายกฤษณ์                    ทิฆัมพรวิภา

นายกิตติพงษ์                แม่ณ่มั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	1
1.3 ขอบสมมติฐานของการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิง รูปแบบแอลฟา กลไกผลิตกำลังสองทางและกลไก รอสเซอร์ก	4
2.1.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟา กลไกผลิตกำลังสองทาง	4
2.1.2 กลไกรอสเซอร์ก	5
2.2 รูปแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค	5
2.2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงคชนิดแกรมม่า	5
2.2.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงคชนิดเบต้า	6
2.2.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงคชนิดแอลฟา	7
2.3 โมเดลการสัน	8
2.4 สมการการเคลื่อนที่และพลศาสตร์	9
2.5 การสันสะท้อนแบบบังคับ	10
2.6 ความไม่สมดุลของการหมุน	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อผู้จัดทำ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7 Whirling of rotating shafts	13
2.8 Synchronous whirl	15
2.9 สมดุลของมวลเคลื่อนที่ไปกลับ	17
2.10 สมดุลของเครื่องยนต์สี่สูบ	21
2.11 การตรวจวัดการสั่นสะเทือน	23
บทที่ 3 การสร้างแบบจำลองและการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาการค่าความสั่นสะเทือน ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทาง	27
3.1 การสร้างแบบจำลองและการจำลองเชิงตัวเลข	27
3.1.1 การสร้างแบบจำลอง	27
3.1.2 การสร้างรูปแบบลักษณะการหมุนของเครื่องเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	30
3.1.3 ตำแหน่งที่ทำการวัดการสั่นสะเทือนจากแบบจำลอง	30
3.2 การจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	30
3.2.1 ผลการจำลองเลขของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงกรณีไม่มีมวลถ่วง	31
บทที่ 4 การวิเคราะห์ระดับการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์	34
4.1 วิเคราะห์กราฟความเร่งที่ตำแหน่งต่างๆ กรณีไม่มีมวลติดตั้ง	34
4.1.1 วิเคราะห์ค่าความสั่นสะเทือนในแนวแกน X กรณีไม่มีมวลติดตั้ง	34
4.1.2 วิเคราะห์ค่าความสั่นสะเทือนในแนวแกน Y กรณีไม่มีมวลติดตั้ง	35
4.1.3 วิเคราะห์ค่าความสั่นสะเทือนในแนวแกน Z กรณีไม่มีมวลติดตั้ง	35
4.2 วิเคราะห์กราฟความเร่งที่ตำแหน่งต่างๆ กับค่าระดับการสั่นสะเทือน ISO10816-1	36
4.3 วิเคราะห์กราฟความเร่งที่ตำแหน่งต่างๆ กรณีมีมวลติดตั้ง	36
4.3.1 วิเคราะห์ค่าความสั่นสะเทือนในแนวแกน X กรณีมีมวลติดตั้ง	36
4.3.2 วิเคราะห์ค่าความสั่นสะเทือนในแนวแกน Y กรณีมีมวลติดตั้ง	37
4.3.3 วิเคราะห์ค่าความสั่นสะเทือนในแนวแกน Z กรณีมีมวลติดตั้ง	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด **บรรณานุกรม** ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่ามาตรฐาน ISO 10816-1	24
2.2 เปรียบเทียบการวัดความสั่นสะเทือนในแต่ละหน่วย	25
3.1 ค่าเริ่มต้นต่างๆ ของชิ้นส่วนเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทาง	27



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and vi cite the document when use.

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ รูปแบบแอลฟาไกลโผลิตกำลังสองทาง	4
2.2 ลักษณะเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแกรมมา	6
2.3 ลักษณะเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดเบต้า	6
2.4 ลักษณะเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟา	7
2.5 ลักษณะเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟาและกลรอสส์ยอร์ก	7
2.6 ลักษณะเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟาไกลโผลิตกำลังสองทางแบบ 4 ครอบอกสูบ	8
2.7 ระบบมวลติดสปริงที่ไม่มีการหน่วง ซึ่งสมมติให้เคลื่อนที่ได้เฉพาะในแนวตั้ง X มีระดับ ความอิสระเป็นหนึ่ง	8
2.8 ระบบของการหน่วงและการกระตุ้นแบบฮาร์โมนิค	10
2.9 พล็อตของสมการที่ 2.9 Amplitude	11
2.10 แสดงพล็อตของสมการที่ 2.9 Phase	12
2.11 การกระตุ้นทางฮาร์โมนิคโดยความไม่สมดุลของการหมุน	12
2.12 การเหวี่ยงของเพลลาหมุน	14
2.13 สามเหลี่ยมของเวกเตอร์	16
2.14 แสดงระบบภายใต้ความเร็วต่างๆ กัน 3 แบบ	17
2.15 ระบบมวลสมมูลเชิงพลวัต	19
2.16 การวิเคราะห์แรงในกลไกข้อเหวี่ยง-สไลเดอร์โดยใช้ระบบมวลสมมูลเชิงพลวัต	20
2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยวัดการสั่นสะเทือนกับความถี่	25
2.18 ตัวอย่างทิศทางการวัดการสั่นสะเทือน บริเวณแบร์ริง (H-Horizontal, V-Vertical, A-Axial)	26
3.1 แบบจำลองของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทางด้านหน้า	28
3.2 แบบจำลองของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทางด้านบน	29
3.3 แบบจำลองของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทางด้านข้าง	29
3.4 ตำแหน่งที่ทำการวัดการสั่นสะเทือน	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นโดยสถาบันการค้ำ

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันการค้ำ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, or cite the document when use.

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 กราฟความเร่งที่ตำแหน่งต่างๆ ในแกน Z จากแบบจำลองเชิงตัวเลขกรณีไม่มีมวลถ่วง	33
4.1 กราฟความเร่งที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนวแกน X จากแบบจำลองเชิงตัวเลขกรณีไม่มีมวลติดตั้ง	34
4.2 กราฟความเร่งที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนวแกน Y จากแบบจำลองเชิงตัวเลขกรณีไม่มีมวลติดตั้ง	35
4.3 กราฟความเร่งที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนวแกน Z จากแบบจำลองเชิงตัวเลขกรณีไม่มีมวลติดตั้ง	35
4.4 กราฟความเร่งที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนวแกน X จากแบบจำลองเชิงตัวเลขกรณีมีมวลติดตั้ง	36
4.5 กราฟความเร่งที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนวแกน Y จากแบบจำลองเชิงตัวเลขกรณีมีมวลติดตั้ง	37
4.6 กราฟความเร่งที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนวแกน Z จากแบบจำลองเชิงตัวเลขกรณีมีมวลติดตั้ง	37



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

การวิเคราะห์วิจัยพัฒนาประสิทธิภาพของเครื่องยนต์หลากหลายประเภทรวมทั้งสิ่งก่อสร้างต่างๆ จะมีระบบทางกลมาเกี่ยวข้องด้วยเสมอ ซึ่งระบบทางกลนี้จะมีพลังงานศักย์และพลังงานจลน์มาเกี่ยวข้องทำให้เกิดการสั่นสะเทือนเชิงกล ทำให้ระบบไม่สมดุลอาจจะเกิดความเสียหายอย่างมากต่อชีวิตและทรัพย์สินได้ จากที่กล่าวมาข้างต้น ระบบต่างๆ ที่อยู่รอบตัวเราล้วนมีความเกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนเชิงกลทั้งสิ้น หากไม่มีการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนเชิงกลในการออกแบบสิ่งต่างๆ อาจเกิดความเสียหายอย่างมาก อาทิ เช่น ระบบรองรับแผ่นดินไหวของตึกอาคาร ดังนั้นการศึกษาหาความรู้ในด้านการสั่นสะเทือนเชิงกลจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

ในปัจจุบันได้มีการใช้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงคิกกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากกำลังของเครื่องยนต์สามารถนำแปลงเป็นกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งเป็นพลังงานทางเลือกและยังสามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลาย ซึ่งการใช้งานแต่ละครั้งย่อมมีการสั่นสะเทือน การสั่นสะเทือนเกิดจากการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของลูกสูบ เนื่องจากแรงกระทำจากความดันในกระบอกสูบ แรงที่เกิดจากการสั่นสะเทือนอาจส่งผ่านฐานเครื่องหรือชิ้นส่วนที่อยู่ข้างเคียง ทำให้เกิดเสียง เกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์และความไม่ปลอดภัยต่อการใช้งาน ทำให้อายุการใช้งานของเครื่องยนต์สั้นลง

ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาค่าความสั่นสะเทือนในแนวแกนต่างๆ ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทาง เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของเครื่องยนต์แบบมีมวลถ่วงและลดการสั่นสะเทือนโดยการทำสมดุลด้วยมวลถ่วง เช่น ออกแบบโดยเพิ่มหรือลดน้ำหนักส่วนเกินของมวลถ่วง มวลของเครื่องยนต์ มวลของเพลลา และมวลของฟลายวีล .นั้นจะสามารถลดความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XYZ ของเครื่องยนต์ได้ จะได้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาเพื่อลดการสั่นสะเทือนต่อไปในอนาคต

#### 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทางในแนวแกน X, Y และ Z ที่ตำแหน่งต่างๆ

1.2.2 เพื่อจำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาแบบส่งกำลัง

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.2.3 เพื่อศึกษาวิธีการต่างๆ ที่สามารถลดการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ ชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทาง

1.2.4 เลือกรูปวิธีการลดการสั่นสะเทือนที่เหมาะสมกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์และนำมาวิเคราะห์

1.2.5 เพื่อศึกษาข้อดีของการสร้างแบบจำลองมาทดแทนการทดลองด้วยวัสดุจริง

### 1.3 ข้อสมมติฐานของการศึกษา

การสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์จะมีขนาดความสั่นสะเทือนอยู่ในระดับเริ่มสั่นเทือน และวิธีการลดการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ คือ เพิ่มหรือลดน้ำหนักส่วนเกินของมวลถ่วง มวลของเครื่องยนต์ มวลของเพลลา และมวลของฟลายวีล

### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 การคำนวณการเคลื่อนที่ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทางกลไกโรตอร์ด้วยโปรแกรม MSC ADAMS เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ในรูปแบบ 3 มิติ

1.4.2 ศึกษาลักษณะการสั่นสะเทือนในช่วงความเร็วรอบคงที่ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทางกลไกโรตอร์ ควบคุมในแนวแกน X Y Z

1.4.3 ศึกษาวิธีการลดการสั่นสะเทือนแบบต่างๆ

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถใช้ความรู้ที่เรียนและประสบการณ์ที่ได้เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ด้านเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ต่อไป

1.5.2 เครื่องยนต์ต้นแบบที่จำลองขึ้นจะสามารถเป็นแบบในการศึกษาเพื่อพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์แบบแอลฟาต่อไปได้

1.5.3 เป็นต้นแบบในการศึกษาเพื่อพัฒนาเครื่องยนต์ให้มีอายุการใช้งานนานขึ้นและลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากตัวเครื่องยนต์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การศึกษาเริ่มต้นจากการรวบรวมองค์ความรู้ที่เกี่ยวกับการสันสะเทือนทางกลของ เครื่องยนต์ สเตอริงค์ชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทาง จากนั้นสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของ เครื่องยนต์ด้วยโปรแกรม MSC ADAMS จากนั้นดูพฤติกรรมการสันสะเทือนและปัจจัยต่างๆ ที่ ก่อให้เกิดการสันสะเทือน

1.6.1 รวบรวมและศึกษาบทความหรือวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

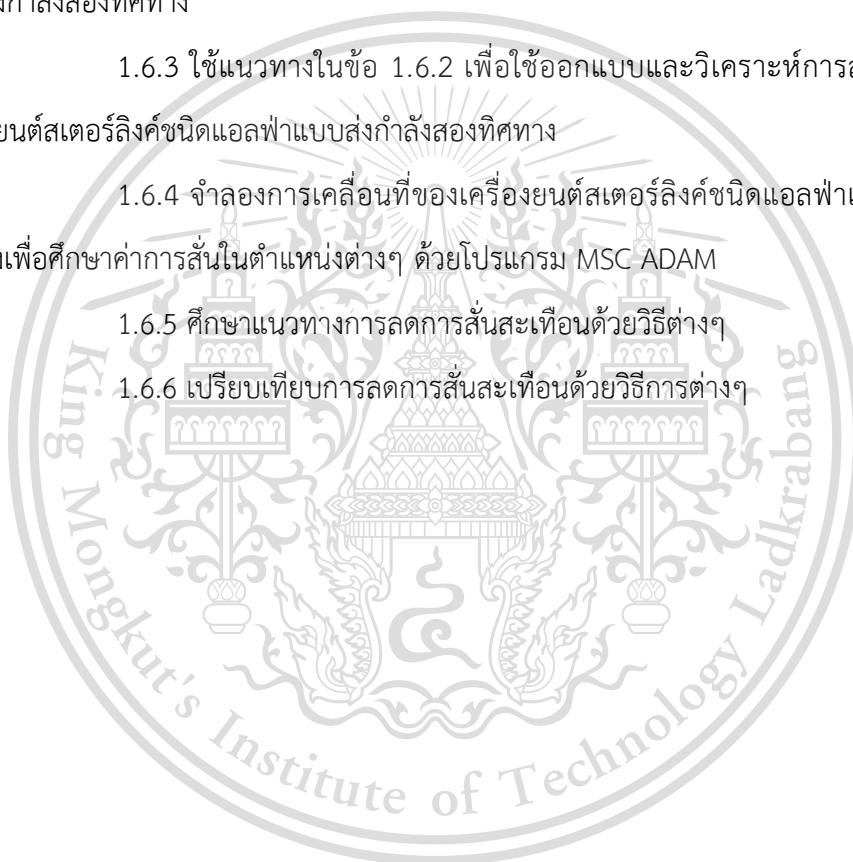
1.6.2 ศึกษาทฤษฎีการสันสะเทือนและรูปแบบเครื่องยนต์สเตอริงค์ชนิดแอลฟา แบบส่งกำลังสองทิศทาง

1.6.3 ใช้แนวทางในข้อ 1.6.2 เพื่อใช้ออกแบบและวิเคราะห์การสันสะเทือนของ เครื่องยนต์สเตอริงค์ชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทาง

1.6.4 จำลองการเคลื่อนที่ของเครื่องยนต์สเตอริงค์ชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสอง ทิศทางเพื่อศึกษาค่าการสันในตำแหน่งต่างๆ ด้วยโปรแกรม MSC ADAM

1.6.5 ศึกษาแนวทางการลดการสันสะเทือนด้วยวิธีต่างๆ

1.6.6 เปรียบเทียบการลดการสันสะเทือนด้วยวิธีการต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 2

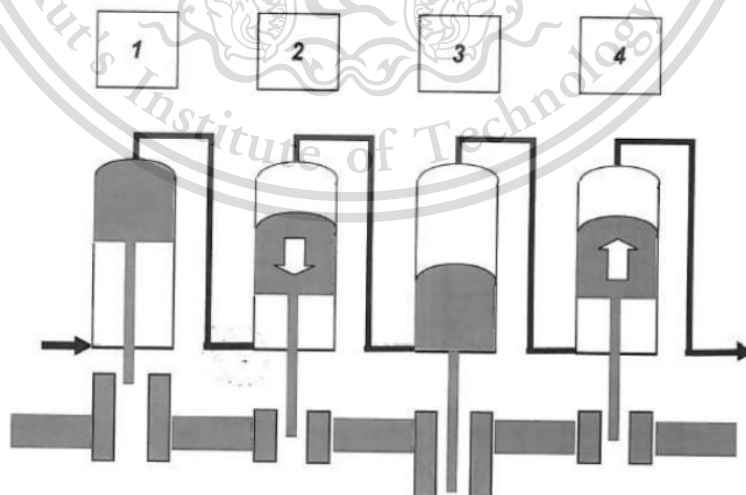
### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นจะมีส่วนประกอบสำคัญโดยหลักคือจะมีการแบ่งเครื่องยนต์ออกเป็นส่วนรับความร้อน (Hot zone) และส่วนระบายความร้อน (Cold zone) ซึ่งจะมีลูกสูบดิสเพลสเซอร์ (Displacer piston) ที่อยู่ในด้านร้อนคอยทำหน้าที่ไล่สารทำงานภายในเครื่องยนต์ให้ไหลสลับจากด้านร้อนและด้านเย็น และลูกสูบกำลัง (Power piston) ซึ่งเป็นลูกสูบที่ให้งานจากระบบองค์ประกอบโดยทั่วไปของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2

เนื่องจากเครื่องยนต์จะใช้เวลาไหลเวียนของสารทำงานจึงต้องการอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างรวดเร็วเพื่อให้เครื่องยนต์สามารถทำงานให้เป็นไปตามวัฏจักรได้ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงจึงมีการติดตั้งรีเจนเนอเรเตอร์ (Regenerator) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีลักษณะพรุนทำหน้าที่ดึงความร้อนจากสารทำงานขณะเคลื่อนจากส่วนร้อนไปส่วนเย็นและเก็บไว้ และทำหน้าที่มอบความร้อนที่เก็บไว้คืนให้สารทำงานขณะเคลื่อนที่จากส่วนเย็นไปส่วนร้อนซึ่งช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนของสารทำงาน

#### 2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิง รูปแบบแอลฟาไกลโผลิตกำลังสองทางและกลไกรอสเซอร์ก

2.1.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาไกลโผลิตกำลังสองทาง (Alpha-type Double acting Stirling engine)



รูปที่ 2.1 การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง รูปแบบแอลฟาไกลโผลิตกำลังสองทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาไกลโพลิตกำลังสองทางถูกคิดค้นและพัฒนาขึ้นจนได้รับการจดทะเบียนสิทธิบัตรโดยบริษัทเคจจำกัด

ทำงานโดยการแบ่งพื้นที่กระบอกสูบเป็นส่วนร้อนและส่วนเย็นใน 1 กระบอกสูบเป็นกลไกที่ประกอบไปด้วยกระบอกสูบและลูกสูบเป็นคู่ที่สมมาตรกันคู่ละ 1 ชุดส่วนที่ร้อนของกระบอกสูบหนึ่งจะถูกต่อท่อกับส่วนที่เป็นของอีกกระบอกสูบหนึ่งวนเวียนการไหลของอากาศร้อนและเย็นกันจนครบทั้งหมดกระบอกในลักษณะสมมาตรประสานการทำงานกันทำให้การเคลื่อนที่ของลูกสูบสอดคล้องกันและส่งกำลังทำให้เพลาลมวน

### 2.1.2 กลไกรอสส์ยอร์ก

รอสส์ยอร์กเป็นกลไกการส่งกำลังที่ทำหน้าที่เปลี่ยนการเคลื่อนที่ของลูกสูบแนวเส้นตรงให้เป็นการเคลื่อนที่เชิงมุมผ่านเพลามีข้อดีคือทำให้แรงกระทำแนวอนต่อลูกสูบต่ำและเพิ่มประสิทธิภาพการส่งกำลัง

ลูกสูบจะมีการเชื่อมโยงผ่านก้านสูบสู่กลไกรอสส์ยอร์กจุด A และ C จุด B และจุด D เชื่อมต่อกับพินซึ่งจะเป็นตัวทำให้เกิดการเปลี่ยนการเคลื่อนที่กลไกรอสส์ยอร์กเกิดการเคลื่อนที่เมื่อปริมาตรเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นฟังก์ชันกับมุมการเคลื่อนที่ของเพลาลมวน

รอสส์ยอร์กเป็นกลไกส่งกำลังส่งกำลังจากการเคลื่อนที่แนวเส้นตรงของกระบอกสูบให้เป็นการเคลื่อนที่เชิงมุมของเพลามีข้อดีจากการส่งกำลังคือลดภาระแรงเสียดทานกระทำระหว่างผนังกระบอกสูบและลูกสูบเนื่องจากลูกสูบจะเคลื่อนที่ขึ้นลงเป็นแนวเส้นตรงกันรั้วก้านสูบ (Rod seal) ทำให้เกิดการสึกน้อยลงและลดปัญหาการรั่วของสารทำงานภายในกระบอกสูบ

## 2.2 รูปแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์

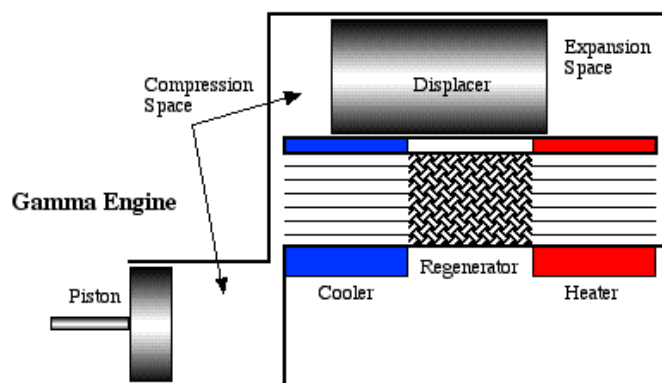
### 2.2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแกรมมา

เครื่องยนต์ชนิดนี้จะทำงานโดยใช้ดีสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลังที่ถูกติดตั้งแยกกันคนละกระบอกสูบแต่ส่งกำลังไปยังเพลาลมวนเดียวกัน เนื่องจากลูกสูบทั้ง 2 ชนิดอยู่แยกกันและมีหน้าที่การทำงานแตกต่างกันอย่างชัดเจนทำให้กลไกชนิดแกรมมาสามารถสร้างได้ง่ายและมีการทำงานที่ไม่ซับซ้อนด้วยเช่นกัน โดยความต่างเฟสที่เหมาะสมของกลไกชนิดนี้อยู่ที่ 100 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

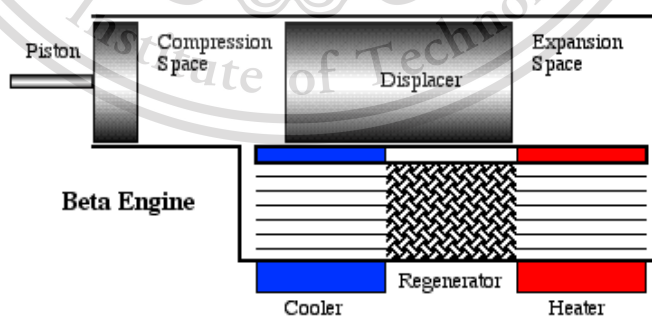
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.2 ลักษณะเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกรมม่า

### 2.2.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้า

สำหรับกลไกเบตานั้นมีหลักการทำงานคล้ายกับกลไกแกรมม่านั้นคือมีลูกสูบดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลังทำงานแยกหน้าที่กันอย่างชัดเจนเพียงแต่ว่ากลไกชนิดเบตานั้นลูกสูบทั้ง 2 จะวางตัวอยู่ในกระบอกสูบเดียวกันเครื่องยนต์จึงเป็นลักษณะ 1 กระบอกสูบโดยที่ดิสเพลสเซอร์จะวางตัวอยู่ในส่วนร้อนและลูกสูบกำลังจะวางตัวอยู่ในส่วนเย็นและจากการที่มีกระบอกสูบร่วมกันนี้ทำให้เครื่องยนต์มีอัตราการอัดตัวที่สูงมากอีกทั้งยังลดปริมาตรที่ไม่ถูกใช้งานได้ (Dead Volume) ทำให้เครื่องยนต์ชนิดเบต้าเป็นเครื่องยนต์ที่ทำกำลังได้สูงสุดโดยความต่างเฟสระหว่างลูกสูบทั้ง 2 จะให้กำลังสูงสุดอยู่ที่ 30 องศาแต่ทว่าเนื่องจากทั้งส่วนให้ความร้อนและส่วนระบายความร้อนอยู่ต่อกันทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนโดยไม่จำเป็นได้อีกทั้งหากอุณหภูมิส่วนเย็นเพิ่มขึ้นจากความร้อนที่ถูกส่งมาจากส่วนรับความร้อนจะทำให้งานที่ได้จากเครื่องยนต์ลดลงได้ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.3 ลักษณะเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้า

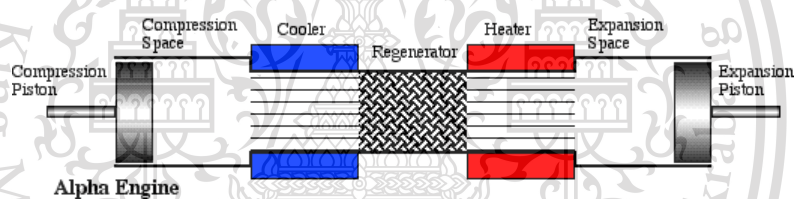
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

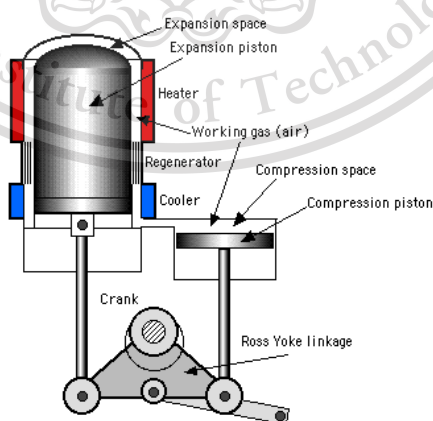
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 2.2.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา

กลไกแอลฟาเป็นกลไกที่มีโครงสร้างของส่วนประกอบง่ายที่สุดโดยมีลูกสูบ 2 ลูกอยู่แยกกันคนละกระบอกสูบเช่นเดียวกับกลไกแกรมมาแต่ส่วนที่เป็นเอกลักษณ์ของกลไกชนิดนี้คือลูกสูบทั้ง 2 จะทำหน้าที่เป็นทั้งดีสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลังทั้งคู่โดยลูกสูบที่อยู่ในส่วนรับความร้อนจะเป็นลูกสูบขยายตัวโดยเมื่อสารทำงานเข้ามาในส่วนนี้จะรับความร้อนจากแหล่งและขยายตัวดันลูกสูบออกไปจากนั้นลูกสูบจะเคลื่อนที่กลับมาด้วยโมเมนตัมความเฉื่อยของเพลลาและทำหน้าที่ดีสเพลสเซอร์ไล่สารทำงานไปสู่ส่วนระบายความร้อนและเมื่อสารทำงานเข้ามาสู่ส่วนระบายความร้อนลูกสูบในส่วนนี้จะทำหน้าที่อัดสารทำงานให้มีความดันสูงสุดก่อนจะผลักระบบทำงานนี้กลับไปรับความร้อนและขยายตัวต่อไปเกิดเป็นวัฏจักรของเครื่องยนต์โดยงานที่ได้จากเครื่องยนต์แอลฟาจะเกิดขึ้น ณ จังหวะการขยายตัวที่ลูกสูบขยายตัวฝั่งรับความร้อนกลไกแอลฟานั้นสามารถสร้างอัตราการอัดได้เทียบเท่ากับเครื่องยนต์เบต้าแต่กลไกมีขนาดเล็กและซับซ้อนน้อยกว่ามากโดยความต่างเฟสที่เหมาะสมของเครื่องยนต์ชนิดแอลฟาอยู่ที่ 80 องศา



รูปที่ 2.4 ลักษณะเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา

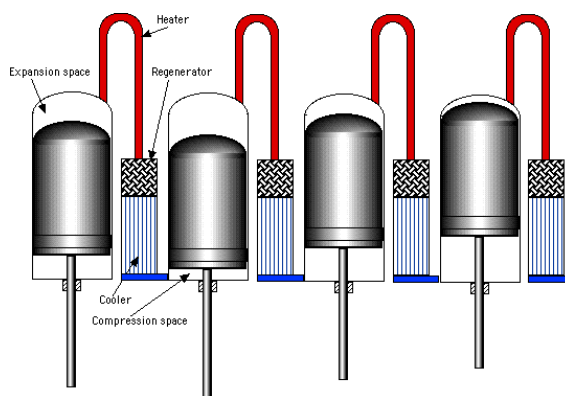


รูปที่ 2.5 ลักษณะเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาและกลรอสส์ยอร์ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

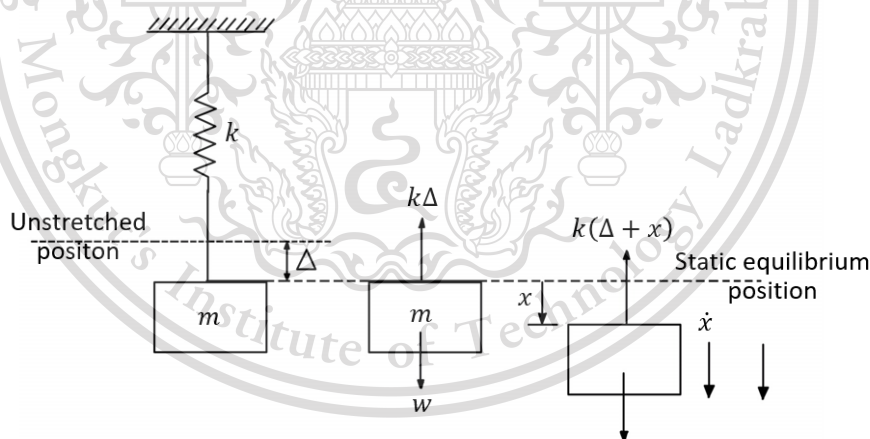


รูปที่ 2.6 ลักษณะเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาผลิตกำลังสองทางแบบ 4 กระบอกสูบ

### 2.3 โมเดลการสั่น

โมเดลการสั่นพื้นฐานประกอบด้วย มวล สปริง และตัวหน่วง สปริงที่ต่อกับมวลให้สมมติว่าไม่มีมวล ความสัมพันธ์ของแรงและระยะยืดให้สมมติว่าเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตามกฎของฮุก (Hook' Law)  $F = kx$  โดยที่  $k$  คือ ค่าคงสปริง มีหน่วยเป็น นิวตันต่อเมตร (N/m)

การหน่วง ถูกอธิบายโดยแรงที่เป็นสัดส่วนกับความเร็วหรือ  $F = cv$  สัมประสิทธิ์การหน่วง  $C$  อยู่ในหน่วย นิวตัน.วินาที/เมตร (N.s/m)



รูปที่ 2.7 ระบบมวลติดสปริงที่ไม่มีการหน่วง ซึ่งสมมติให้เคลื่อนที่ได้เฉพาะในแนวตั้ง  $X$  มีระดับความอิสระเป็นหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.4 สมการการเคลื่อนที่และความถี่ธรรมชาติ

กฎข้อที่สองของนิวตันเป็นขั้นตอนแรกในการตรวจสอบการเคลื่อนที่ของระบบอย่างที่ยกตัวอย่างในรูป 2.7 การยืดของสปริงในสมดุลที่ตำแหน่ง  $D$  และแรงสปริง  $k\Delta$  จะเท่ากับแรงโน้มถ่วง  $W$  ที่กระทำต่อมวล  $m$

$$k\Delta = w = mg \quad (2.1)$$

จากการวัดระยะการกระจัด  $x$  จากตำแหน่งสมดุล แรงที่กระทำต่อมวล  $m$  คือ  $k(\Delta + x)$  และ  $w$  ซึ่ง  $x$  ถูกกำหนดทิศทางลงเป็นบวก แรง ความเร็ว และความเร่งจึงถูกกำหนดทิศทางลงเป็นบวกเช่นกัน

เราจึงสามารถประยุกต์กฎข้อที่สองของนิวตันได้

$$m\ddot{x} = \sum F = w - k(\Delta + x)$$

เนื่องจาก  $k\Delta = w$ ; จึงได้ว่า

$$m\ddot{x} = -kx \quad (2.2)$$

ถ้าเราจะตัดแรงจากแรงโน้มถ่วงและแรงสปริงสถิต  $k\Delta$  จากสมการการเคลื่อนที่ จะเหลือแค่ผลลัพธ์จากแรงที่กระทำต่อมวล  $m$  ให้เคลื่อนที่ตามแกน  $x$  เท่านั้น เรากำหนดความถี่ธรรมชาติได้ดังนี้

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m} \quad (2.3)$$

สมการที่ 2.3 สามารถเขียนได้ในรูป

$$\ddot{x} + \omega_n^2 x = 0 \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม กรุณาแจ้งให้ชัดเจนก่อนใช้งาน และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่ใช้

และเราสรุปได้ว่าสมการที่ 2.4 เป็นสมการฮาร์โมนิค สมการอนุพันธ์ลำดับที่สอง มีคำตอบทั่วไปดังนี้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$x = A \sin \omega_n t + B \cos \omega_n t \quad (2.5)$$

ให้ A,B เป็นค่าคงที่ หาได้จากค่าเริ่มต้น  $x(0), v(0)$  สมการที่ 2.5 จึงแทนรูปได้เป็น

$$x = \frac{\dot{x}(0)}{\omega_n} \sin \omega_n t + x(0) \cos \omega_n t \quad (2.6)$$

และความถี่ธรรมชาติหาได้จาก

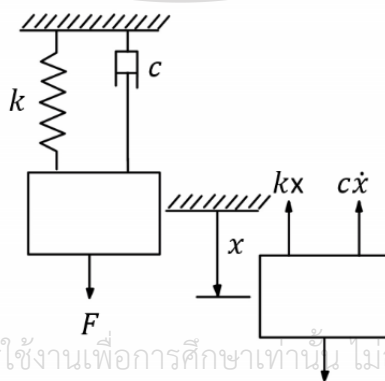
$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.7)$$

## 2.5 การสั่นสะเทือนแบบบังคับ

การสั่นสะเทือนแบบบังคับพบได้ในวงการวิศวกรรม ส่วนมากเกิดขึ้นจากความไม่สมดุลของเครื่องจักรหมุน ถึงแม้ว่าการสั่นแบบฮาร์มอนิกจะเกิดขึ้นน้อยกว่าการสั่นประเภทอื่น แต่การทำความเข้าใจการสั่นแบบฮาร์มอนิกนั้นสำคัญในการที่จะเข้าใจในการตอบสนองต่อการสั่นประเภทอื่นๆ

เราจะพิจารณาในระดับความอิสระเดียวและมีการหน่วง ถูกกระตุ้นโดยแรงฮาร์มอนิก  $F_0 \sin \omega t$  แบบที่เห็นในรูป สมการอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่หาได้จากการหาแผนผังวัตถุอิสระ

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (2.8)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.8 ระบบของการหน่วงและการกระตุ้นแบบฮาร์มอนิก

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \text{ความถี่ธรรมชาติ}$$

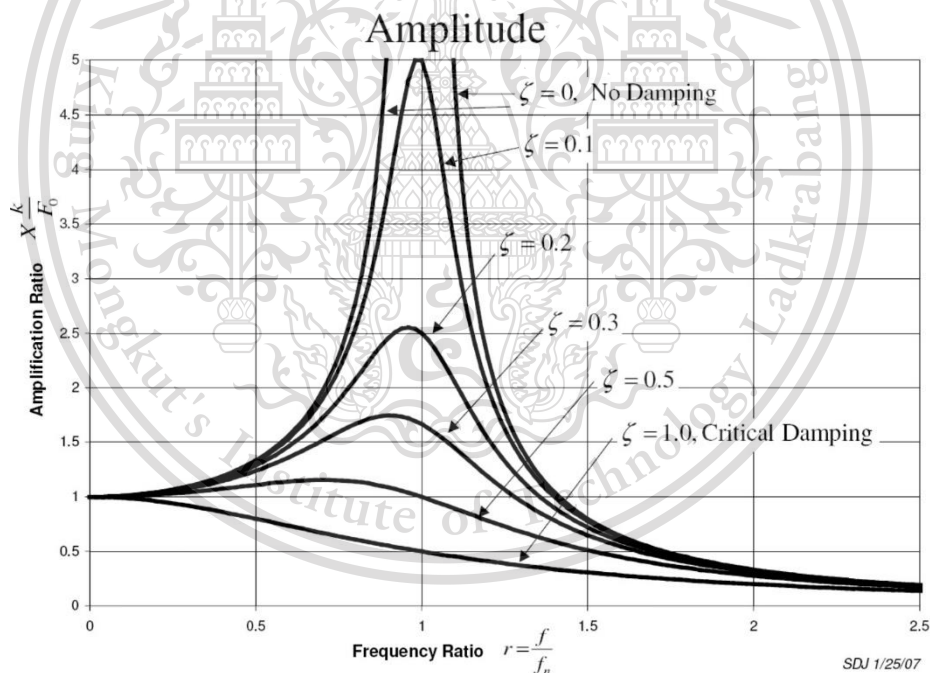
$$c_c = 2m\omega_n = \text{ค่าการหน่วงวิกฤต}$$

$$\zeta = \frac{c}{c_c} = \text{สัมประสิทธิ์การหน่วง}$$

$$\frac{c\omega}{k} = \frac{c}{c_c} \frac{c_c\omega}{k} = 2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}$$

ความสัมพันธ์ของ แอมพลิจูด, แรง, ค่านิจสปริง และความถี่ธรรมชาติ

$$\frac{Xk}{F_0} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right]^2}} \quad (2.9)$$

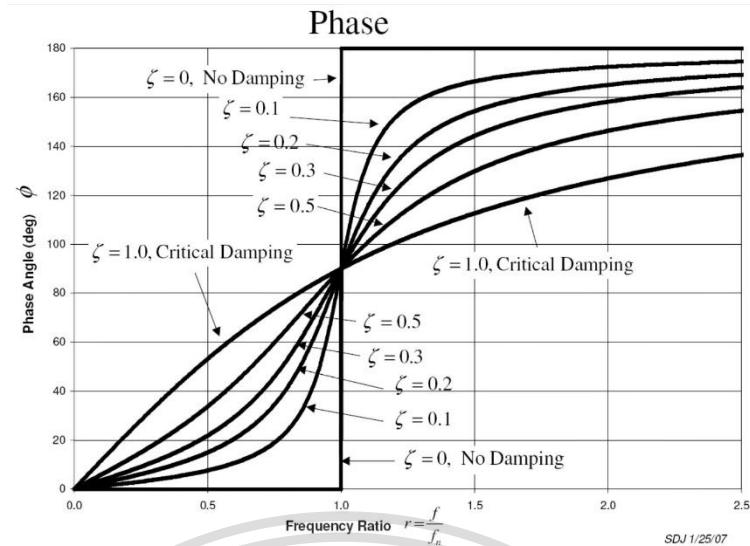


รูปที่ 2.9 พล็อตของสมการที่ 2.9 Amplitude

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

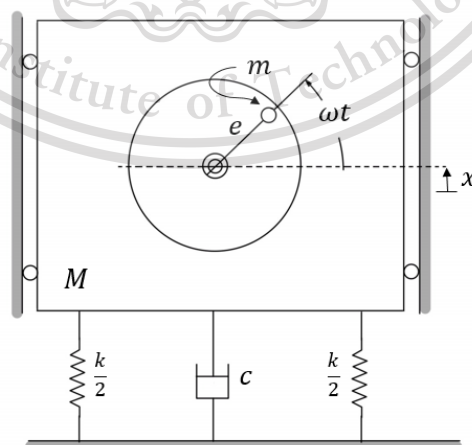


รูปที่ 2.10 แสดงพล็อตของสมการที่ 2.9 Phase

### 2.6 ความไม่สมดุลของการหมุน

ความไม่สมดุลในเครื่องจักรหมุนเป็นเหตุผลปกติของการสั่นสะเทือน เราพิจารณา ระบบมวลติดสปริงในแนวดิ่งและถ่วงกระตุ้นโดยเครื่องจักรหมุนนั่นคือ ความไม่สมดุล ที่แสดงในรูป ความไม่สมดุลถูกแทนด้วยมวล  $m$  ระยะเยื้องศูนย์กลาง  $e$  ที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่  $\omega$  ให้  $x$  เป็น ระยะการกระจัดของมวลที่ไม่หมุน (M.m) จากตำแหน่งสมดุลสถิต ระยะการกระจัดของมวล  $m$  คือ

$$x = e \sin \omega t$$



รูปที่ 2.11 การกระตุ้นทางฮาร์มอนิกโดยความไม่สมดุลของการหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไข ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สมการการเคลื่อนที่ คือ

$$(M - m)\ddot{x} + m \frac{d^2}{dt^2} (x + e \sin \omega t) = -kx - c\dot{x}$$

ซึ่งจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = (m\omega^2) \sin \omega t \quad (2.10)$$

แอมพลิจูดของการสั่นในแนวดิ่งหาได้จาก

$$X = \frac{m\omega^2}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \quad (2.11)$$

และ

$$\tan \phi = \frac{c\omega}{k - M\omega^2} \quad (2.12)$$

## 2.7 Whirling of rotating shafts

เพลลาที่หมุนจะโค้งออกที่บางความเร็วและเหวี่ยง (whirl) ในลักษณะที่ซับซ้อนการเหวี่ยงคือการหมุนของระนาบซึ่งเกิดจากเพลลาโค้ง และแนวศูนย์กลางของ bearing เกิดจากหลายสาเหตุ เช่น ความไม่สมดุลของมวล, damping ในเพลลา, ความเสียดทานของของไหลใน bearing และสาเหตุอื่น การเหวี่ยงของเพลลาอาจเกิดขึ้นในทิศทางเดียวกันหรือทิศทางตรงข้ามกับการหมุนของเพลลา และความเร็วในการเหวี่ยงอาจจะเท่ากับความเร็วในการหมุนหรือไม่ก็ได้

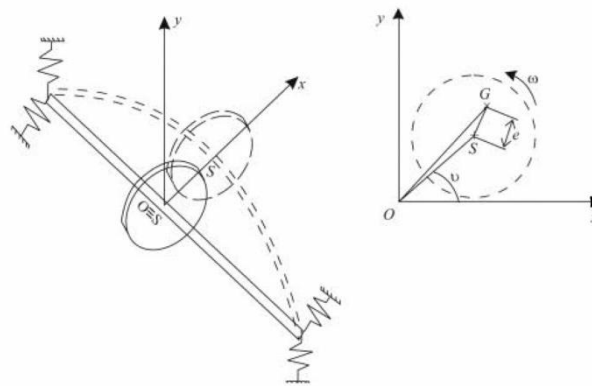
เราพิจารณาจาน (disk) ซึ่งมีมวล  $m$  ติดอยู่อย่างสมมาตรบนแกนเพลลา ซึ่งรองรับด้วย bearing 2 ตัว ตามรูป จุดศูนย์กลางมวลของจาน  $G$  อยู่ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง  $e$  จากจุดศูนย์กลางทางเรขาคณิต  $S$  ของจาน เส้นศูนย์กลางของ bearing ตัดกับระนาบของจานที่  $O$  และศูนย์กลาง

เพลลาเพียงเบนไปจากเดิมเป็นระยะทาง  $r = OS$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.12 การเหวี่ยงของเพลาหมุน

เราสมมติว่าเพลา (แนว  $e = SG$ ) หมุนด้วยความเร็วคงที่  $\omega$  และโดยทั่วไป แนว  $r = OS$  จะเหวี่ยงด้วยความเร็ว  $\dot{\theta}$  ซึ่งไม่เท่ากับความเร็ว  $\omega$  สำหรับสมการการเคลื่อนที่ เราสามารถหาความเร่งของจุดศูนย์กลางมวลได้ดังนี้

$$a_G = a_S + a_{G/S} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $a_S$  เป็นความเร่งของจุด  $S$  และ  $a_{G/S}$  เป็นความเร่งของ  $G$  สัมพันธ์กับ  $S$  พจน์หลังเป็นความสัมพันธ์โดยตรงของ  $G$  กับ  $S$  เพราะ  $\omega$  คงที่ แก๊สมการหาค่า  $a_G$  ในทิศทางรัศมี และทิศทางสัมผัส (radial and tangential direction) เราจะได้

$$a_G = [(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2) - e\omega^2 \cos(\omega t - \theta)] + [(r\ddot{\theta} + 2r\dot{\theta}) - e\omega^2 \sin(\omega t - \theta)]j \quad (2.14)$$

เนื่องจากแรงที่สะสมอยู่ในเพลา เราจะสมมติว่ามีแรง viscous damping กระทำที่  $S$  สมการของการเคลื่อนที่ถูกแก้ในทิศทางรัศมีและทิศทางสัมผัสเป็น

$$-kr - c\dot{r} = m[\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 - e\omega^2 \cos(\omega t - \theta)] \quad (2.15)$$

$$-c\dot{\theta} = m[r\ddot{\theta} - 2r\dot{\theta} - e\omega^2 \sin(\omega t - \theta)] \quad (2.16)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\ddot{r} + \left(\frac{c}{m}r + 2\dot{r}\right)\dot{\theta} = e\omega^2 \cos(\omega t - \theta) \quad (2.17)$$

$$r\ddot{\theta} + \left(\frac{c}{m}r + 2\dot{r}\right)\dot{\theta} = e\omega^2 \sin(\omega t - \theta) \quad (2.18)$$

ในกรณีทั่วๆ ไปของการเหวี่ยง เราใช้สมการข้างบนอธิบายได้ ภายใต้การแบ่งแยก การเคลื่อนที่ กระตุ้นด้วยตัวเอง ( self-excited ) ซึ่งแรงกระตุ้นทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่ถูกควบคุมโดยการเคลื่อนที่ของตัวเอง ถ้าตัวแปรในสมการนี้เป็น  $r$  และ  $\theta$  ปัญหาจะเป็นแบบ 2 DOF อย่างไรก็ตามในการเหวี่ยงแบบ steady - state synchronous ซึ่ง  $\dot{\theta} = \omega$  และ  $\ddot{\theta} = \dot{r} = \ddot{r} = 0$  ปัญหาจะกลายเป็น 1-DOF

## 2.8 Synchronous whirl

สำหรับการเหวี่ยงแบบ Synchronous ความเร็วในการเหวี่ยงเท่ากับความเร็วในการหมุน  $\omega$  ซึ่งเราสมมติว่าคงที่ จะได้  $\dot{\theta} = \omega$  ผลจากการอินทิเกรตเราได้ว่า  $\ddot{\theta} = \dot{r} = \ddot{r} = 0$  สมการและลดรูปเป็น

$$\left(\frac{k}{m} - \omega^2\right)r = e\omega^2 \cos \phi \quad (2.19)$$

$$\frac{c}{m}\omega r = e\omega^2 \sin \phi \quad (2.20)$$

เอาสองสมการมาหารกันจะได้

$$\tan \phi = \frac{\frac{c}{m}\omega}{\frac{k}{m} - \omega^2} = \frac{2\xi\frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

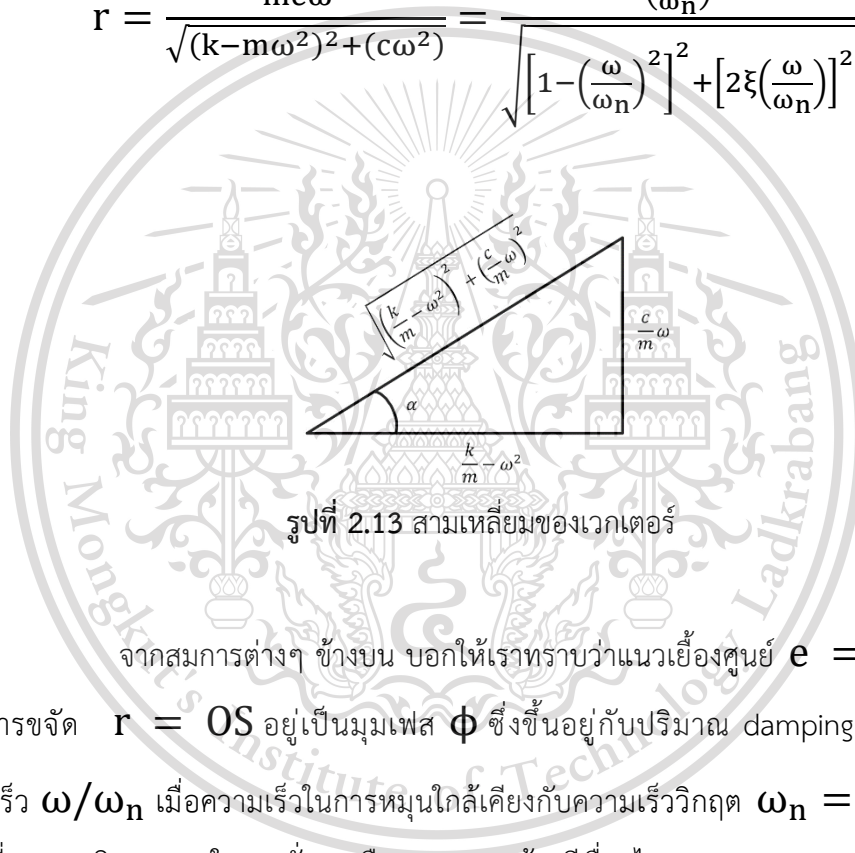
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อ  $\omega_n = \sqrt{k/m}$  เป็นความเร็ววิกฤต และ  $\xi = c/c_e$  จากสามเหลี่ยมของเวกเตอร์ในรูป

$$\cos \phi = \frac{\frac{k}{m} - \omega^2}{\sqrt{\left(\frac{k}{m} - \omega^2\right)^2 + \left(\frac{c}{m}\omega\right)^2}} \quad (2.22)$$

แทนลงในสมการแรกของสมการ จะได้สมการของแอมพลิจูด

$$r = \frac{me\omega^2}{\sqrt{(k-m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} = \frac{e\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}} \quad (2.23)$$



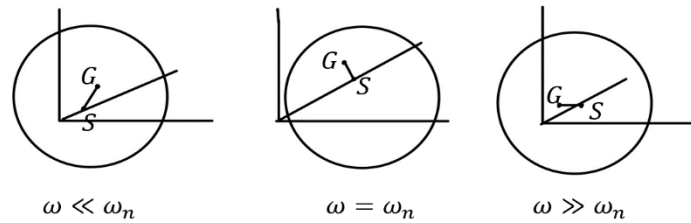
รูปที่ 2.13 สามเหลี่ยมของเวกเตอร์

จากสมการต่างๆ ข้างบน บอกให้เราทราบว่าแอมพลิจูด  $e = SG$  มีเฟสนำแนวการขจัด  $r = OS$  อยู่เป็นมุมเฟส  $\phi$  ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณ damping และอัตราส่วนความเร็ว  $\omega/\omega_n$  เมื่อความเร็วในการหมุนใกล้เคียงกับความเร็ววิกฤต  $\omega_n = \sqrt{k/m}$  หรือความถี่ธรรมชาติของเพลลาในการสั่นสะเทือนแนวขวางต้องมีเงื่อนไขของการ resonance ซึ่งแอมพลิจูดจะถูกกำหนดโดย damping เท่านั้น รูป แสดงระบบที่ประกอบด้วยจานและเพลลาภายใต้เงื่อนไขของความเร็วต่างๆ กัน 3 แบบ ที่ความเร็วสูงๆ  $\omega \gg \omega_n$  จุดศูนย์กลางมวลมีแนวโน้มที่จะเข้าหาจุด  $O$  และจุดศูนย์กลางของเพลลา  $S$  หมุนอยู่ใกล้กับ  $G$  เป็นวงกลมรัศมี  $e$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.14 แสดงระบบภายใต้ความเร็วต่างๆ กัน 3 แบบ

สังเกตได้ว่า สมการสำหรับการเหวี่ยงแบบ synchronous คล้ายกับ Rotating Unbalance เพราะทั้ง 2 แบบมีแรงกระตุ้นให้เกิดการหมุนมีค่าเท่ากับ  $m\omega^2$

อย่างไรก็ตามใน Rotating Unbalance ความไม่สมดุลอยู่ในเทอมของมวลไม่สมดุลขนาดเล็ก  $m$  แต่ในเครื่องการเหวี่ยงนี้ความไม่สมดุลกำหนดโดยมวลทั้งหมด  $m$  และระยะเยื้องศูนย์กลาง  $e$  รูป อาจจะใช้ในปัญหานี้ได้โดยใช้  $r/e$  แทน  $MX/me$

## 2.9 สมดุลของมวลเคลื่อนที่ไปกลับ

กลไกข้อเหวี่ยง-สไลเดอร์เป็นหนึ่งในกลไกพื้นฐานที่มีการประยุกต์ใช้งานมากที่สุด เช่นเครื่องยนต์ของรถยนต์เครื่องต้นกำลังต่างๆ ตลอดจนถึงแบบลูกสูบเคลื่อนที่ไป-กลับ การเคลื่อนที่ของกลไกข้อเหวี่ยง-สไลเดอร์ส่งผลให้เกิดแรงและโมเมนต์เฉย้าเช่นเดียวกันกับระบบมวลเยื้องศูนย์กลาง หมุนรอบแกนคงที่ เนื้อหาในส่วนนี้เป็นการวิเคราะห์ความสมดุลในระบบเครื่องจักรที่มีกลไกข้อเหวี่ยง-สไลเดอร์เป็นกลไกหลัก ประกอบด้วยเครื่องยนต์ทุกสูบ เครื่องยนต์สี่สูบ เครื่องยนต์ห้าสูบและเครื่องยนต์แปดสูบแบบตัววี (V-engines)

การวิเคราะห์แรงในกลไกข้อเหวี่ยง-สไลเดอร์ด้วยเทคนิคมวลสมมูลเชิงพลวัต

ระบบมวลสมมูลเชิงพลวัต (dynamically equivalent masses) [5] คือระบบอนุภาค (นักศึกษาเคยศึกษาระบบอนุภาคในวิชาฟิสิกส์มาก่อน [2,4]) ที่มีอนุภาคสองอันใช้เป็นตัวแทนของวัตถุแข็งที่เคลื่อนที่ในระนาบ เมื่อระบบอนุภาคหรือระบบมวลนี้มีการเคลื่อนที่ คุณลักษณะเชิงพลวัตจะต้องสมมูลกับวัตถุแข็งต้นแบบของระบบอนุภาคนี้ รูปที่ .... แสดงวัตถุในระนาบที่มีมวล  $m$  และมีโมเมนต์ความเฉื่อยรอบจุดศูนย์กลางมวล  $G$  คือ  $I_G$  รูปที่ ... แสดงระบบ

มวลสองก้อนที่สมมูลกับวัตถุในรูปที่ ... วัตถุถูกแทนด้วยอนุภาคสองก้อนที่ตำแหน่ง  $P$  และ  $Q$  ซึ่งมีมวลเป็น  $m_p$  และ  $m_q$  และระยะห่างระหว่างมวลทั้งสองกับจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ  $G$  คือ  $I_p$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

และ  $I_Q$  ตามลำดับ เพื่อให้ระบบมวลนี้มีคุณสมบัติทางพลศาสตร์สมมูลกับวัตถุเมื่อมีการเคลื่อนที่จะได้ว่า

มวลรวมของระบบอนุภาคต้องมีค่าเท่ากับมวลของวัตถุ

$$m_p + m_Q = m \quad (2.24)$$

จุดศูนย์กลางมวลของระบบอนุภาคต้องอยู่ที่จุด  $G$  เช่นเดียวกับกับวัตถุ

$$m_p l_p + m_Q l_Q = 0 \quad (2.25)$$

และโมเมนต์ความเฉื่อยเทียบกับแกน  $G$  ของระบบอนุภาคต้องมีค่าเท่ากับโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุเทียบกับแกน  $G$

$$m_p l_p^2 + m_Q l_Q^2 = I_G \quad (2.26)$$

จากคุณสมบัติทั้งสามข้อนี้ การประยุกต์ใช้สมการของการเคลื่อนที่ ( ) และ ( ) ในระบบอนุภาคในรูปที่ ... จะได้ผลเช่นเดียวกันกับการประยุกต์ใช้สมการของการเคลื่อนที่กับวัตถุเกร็งในระนาบในรูปที่ ... จากสมการที่ ( ) และ ( ) สามารถหาค่ามวล  $m_p$  และ  $m_Q$  ได้ดังนี้

$$m_p = m \left( \frac{l_Q}{l_Q + l_p} \right), m_Q = m \left( \frac{l_p}{l_Q + l_p} \right) \quad (2.27)$$

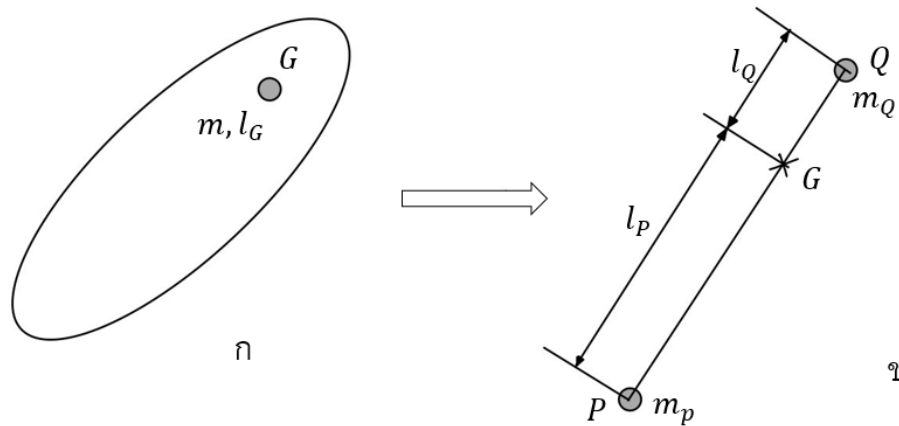
แทนค่า  $m_p$  และ  $m_Q$  ใน ( ) จะได้

$$m l_p l_Q = I_G \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.15 ระบบมวลสมมูลเชิงพลวัต

การประยุกต์ใช้ระบบมวลสมมูลเชิงพลวัตสำหรับวิเคราะห์แรงในกลไกข้อเหวี่ยง-สไลเดอร์แสดงในรูปที่ 2.15 กำหนดให้ข้อเหวี่ยงมีความยาว  $R$  คือชิ้นส่วนตัวขับเคลื่อนด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่  $\omega$  ชิ้นส่วนก้านเชื่อมมีความยาว  $L$  ดังแสดงในรูป เพื่อความง่ายในการวิเคราะห์แรง ทำการประยุกต์ใช้หลักการมวลสมมูลกับชิ้นส่วนหมายเลข 3 โดยแทนที่ชิ้นส่วนนี้ด้วยมวล 2 ก้อน  $m_{B,2}$  และ  $m_{C,3}$  ที่จุดปลาย  $B$  และ  $C$  ของวัตถุตามลำดับ ดังนั้นระยะทางของมวลทั้งสองเทียบกับจุดศูนย์กลางมวลของชิ้นส่วนหมายเลข 3  $G_3$  คือ

$$\begin{aligned} l_{b,3} &= \overline{G_3 B} \\ l_{c,3} &= \overline{G_3 C} \end{aligned} \quad (2.29)$$

ข้อดีของการแทนที่วัตถุหมายเลข 3 ด้วยมวลสองก้อนนี้คือ เมื่อวิเคราะห์แรงพลวัตในกลไก มวล  $m_{B,3}$  จะยึดติดกับจุดของข้อต่อหมุน  $B$  เนื่องจากจุด  $B$  หมุนรอบแกนคงที่  $O_2$  ด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ ดังนั้นเราสามารถหาขนาดของแรงเฉื่อยเนื่องจากมวลก้อนนี้กระทำกับกลไกซึ่งมีขนาดเป็น

$$F_{B,3} = m_{B,3} a_B \quad (2.30)$$

และมีทิศทางพุ่งจากจุด  $O_2$  ไปยังจุด  $B$  ดังแสดงในสมการที่ 6.27 เป็นแรงเขย่าที่กระทำกับแกนหมุน  $O_2$  จากหลักการการทำให้สมดุลของมวลเยื้องศูนย์กลางในหัวข้อที่ผ่านมา เราสามารถ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ห้กล้างแรงเขย้านี้ได้โดยการเพิ่มมวล  $m_{c,2}$  เข้าไปในระบบในทิศทางตรงข้ามกับจุด B ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ขนาดของ  $m_{c,2}r_{c,2}$  หาได้จากความสัมพันธ์

$$m_{c,2}r_{c,2} = m_{c,3}R \tag{2.31}$$

ที่ข้อต่อหมุน C ของกลไก ขณะมีการเคลื่อนที่นอกจากมวลของวัตถุหมายเลข 4 แล้วยังมีมวลสมมูล  $m_{c,3}$  เพิ่มเข้าไปด้วย ดังนั้นแรงเฉื่อยที่กระทำที่จุดนี้คือ

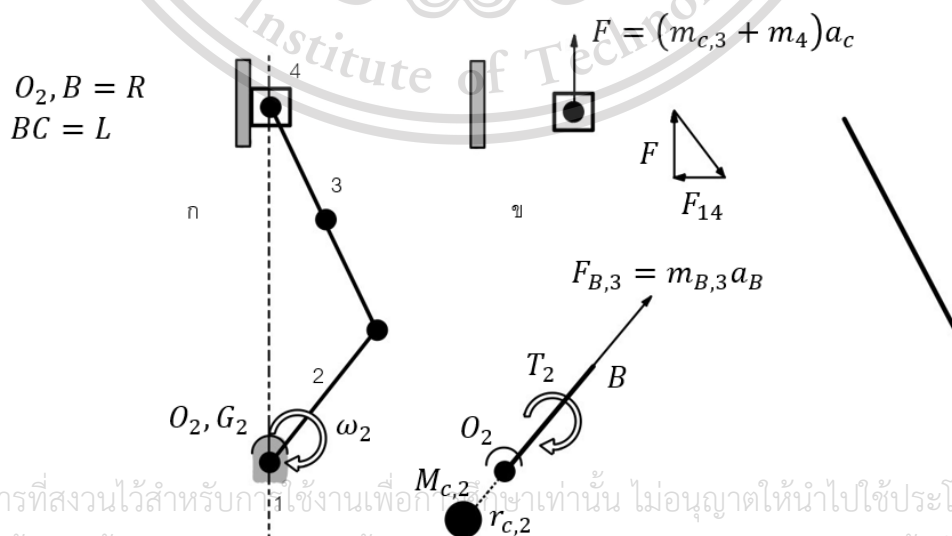
$$F = (m_{c,3} + m_4)a_c \tag{2.32}$$

จากสมการที่

$$a = R\omega^2 \left[ \cos \theta + \frac{R}{L} \cos 2\theta \right]$$

ขนาดของแรงเฉื่อยที่ลูกสูบหมายเลข 4 คือ (ภายใต้สมมติฐาน  $R \ll L$ )

$$F = (m_{c,3} + m_4)R\omega^2 \left( \cos \theta + \frac{R}{L} \cos 2\theta \right) = MR\omega_2^2 \left( \cos \theta + \frac{R}{L} \cos 2\theta \right) \tag{2.33}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.16 การวิเคราะห์แรงในกลไกข้อเหวี่ยง-สไลเดอร์โดยใช้ระบบมวลสมมูลเชิงพลวัต

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากกระบวนการวิเคราะห์ที่ผ่านมารู้ได้ว่าเราสามารถใช้เทคนิคมวลสมมูลเชิงพลวัตช่วยในการออกแบบกลไกข้อเหวี่ยง สไลเดอร์ ได้โดยเริ่มต้นจากการแทนที่ชิ้นส่วนก้านเชื่อมหมายเลข 3 ด้วยระบบอนุภาคที่มีอนุภาคสองก้อนที่ตำแหน่งของจุด **B** และ **C** ระยะทางของอนุภาคทั้งสองเทียบกับจุดศูนย์กลางมวล  $G_3$  หาได้จากความสัมพันธ์ใน 2.25 จากนั้นแทนค่าระยะทางทั้งสองในสมการ 6.24 ทำให้เราสามารถกำหนดมวลและโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนก้านสูบหมายเลข 3 ได้ เมื่อทราบมวลของวัตถุแล้วเราสามารถหาค่ามวลสมมูล  $m_{B,2}$  และ  $m_{C,3}$  ได้ ต่อจากนั้นทำการเพิ่มมวล  $M_{B,2}$  เข้าไปในกลไกเพื่อหักล้างแรงเฉยเนื่องจากมวลสมมูล  $m_{C,3}$  ดังนั้นเราจะกล่าวได้ว่า กลไกข้อเหวี่ยง สไลเดอร์ที่ชิ้นส่วนข้อเหวี่ยงหมายเลข 2 เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ สามารถทำสมดุลเพื่อหักล้างแรงเฉยเนื่องจากการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนหมายเลข 3 ได้บางส่วน ( $m_{C,3}$ ) และยังเหลือแรงเฉยที่กระทำกับระบบคือแรงเฉยเนื่องจากการเคลื่อนที่ไป กลับของลูกสูบหมายเลข 4 และมวลสมมูล  $m_{C,3}$  ซึ่งมีค่าประมาณ

$$F = MR\omega_2^2 \cos \theta_2 + M \frac{R^2}{L} \omega_2^2 \cos 2\theta_2 \quad (2.34)$$

รูปที่ 2.16 แสดงแผนภาพวัตถุอิสระของกลไกข้อเหวี่ยง สไลเดอร์ และแผนภาพเชิงจลนคณิตศาสตร์ของกลไกพร้อมฐานรองรับ จากการวิเคราะห์แรงในรูปที่ 2.6 พบว่าแรงปฏิกิริยาที่กระทำกับโครงสร้างรองรับเครื่องยนต์หรือชิ้นส่วนหมายเลข 1 นั้นมีสองส่วนคือ แรงเฉยเนื่องจากการเคลื่อนที่ไป กลับ ของลูกสูบดังแสดงในสมการ 2.30 และแรงคู่ควบเฉย  $F_{14}$  และ  $F_{12,x}$  ซึ่งมีขนาดเป็น  $hF_{14}$  แรงและโมเมนต์เฉยทั้งสองนี้ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนของฐานรองรับเครื่องยนต์ซึ่งสามารถถ่ายไปยังผู้ขับขี่ยานยนต์หรือผู้ที่กำลังใช้งานเครื่องจักรกลที่มีชุดข้อเหวี่ยง-สไลเดอร์ เป็นเครื่องต้นกำลัง โหมดของการสั่นสะเทือนในกรณีนี้มีสองโหมดดังแสดงในรูปที่ 6.19 เนื้อหานี้จะพิจารณาเฉพาะความไม่สมดุลและการทำสมดุลของเครื่องยนต์หลายสูบอันเนื่องมาจากแรงเฉยในสมการ (2.30) เท่านั้น ส่วนความไม่สมดุลเนื่องจากโมเมนต์เฉย ในทางปฏิบัติเราสามารถแก้ปัญหาตรงนี้ได้ด้วยการออกแบบทางการสั่นสะเทือน

## 2.10 สมดุลของเครื่องยนต์สี่สูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในวงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ในเชิงพาณิชย์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุมัติจากผู้เกี่ยวข้องถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องยนต์สี่สูบแสดงในรูปที่ 2.11 มีค่าตำแหน่งเชิงมุมของชิ้นส่วนข้อเหวี่ยงทั้งสองเทียบกับชิ้นส่วนข้อเหวี่ยงหมายเลข 1 ดังนี้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\phi_i = \{0^\circ \ 180^\circ \ 180^\circ \ 0^\circ\}$$

และมีผลการคำนวณพจน์ที่มีผลกระทบต่อขนาดของแรงเขย่าดังนี้

$$\sum_i \cos \phi_i = 1 - 1 - 1 + 1 = 0$$

$$\sum_i \sin \phi_i = 0 + 0 + 0 + 0 = 0$$

$$\sum_i \cos 2\phi_i = 1 + 1 + 1 + 1 = 4$$

$$\sum_i \sin 2\phi_i = 0 + 0 + 0 + 0 = 0$$

แสดงว่าการติดตั้งตำแหน่งลูกสูบของเครื่องยนต์สี่สูบดังรูปที่ 6.22 ไม่สามารถหักล้างแรงเขย่าลัพท์ที่กระทำกับเครื่องยนต์ได้ จากรูปที่ 6.22 กำหนดให้ระยะห่างระหว่างกลไกย่อยคือ  $a$  ทำการเลื่อนระนาบ  $x$ - $y$  จากรองเพลาด้านขวามือไปไว้ที่ระนาบของการเคลื่อนที่ของกลไกชุดที่สี่ จะได้ระยะทางในแนวแกน  $Z$  ของเส้นของการกระทำของแรงเฉื่อยต่างๆ กับระนาบ  $x$ - $y$  ใหม่ดังนี้

$$a_i = \{3a \ 2a \ a \ 0\}$$

ผลการคำนวณพจน์ที่มีผลกระทบต่อขนาดของโมเมนต์เขย่าลัพท์มีดังนี้

$$\sum_i a_i \cos \phi_i = 3a - 2a - a + 0 = 0$$

$$\sum_i a_i \sin \phi_i = 0 + 0 + 0 + 0 = 0$$

$$\sum_i a_i \cos 2\phi_i = 3a + 2a + a + 0 = 6a$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการวิจัยที่ไม่ใช่ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เราสามารถสรุปได้ว่า เครื่องยนต์สี่สูบในรูปที่ 6.22 เมื่อมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ จะเกิดแรงเฉยกระทำกับเครื่องยนต์มีขนาดเป็น

$$s = F_s = \frac{4MR^2\omega^2}{L} \cos 2\theta_1$$

และมีโมเมนต์เฉยาลัพธ์เป็น

$$C = C_s = \frac{6aMR^2\omega^2}{L} \cos 2\theta_1$$

ระยะทางของเส้นของการกระทำของแรงเฉยาลัพธ์  $S$  เทียบกับระนาบ  $x-y$  คือ

$$a_s = \frac{C}{S} = \frac{6a}{4}$$

## 2.11 การตรวจวัดการสั่นสะเทือน

ปัจจุบันเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนแบบพกพา (vibration meter) เป็นเครื่องมือที่ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบความผิดปกติของเครื่องจักรโดยอาศัยขนาดการสั่นสะเทือน (vibration amplitude) กับ มาตรฐานการสั่นสะเทือน แล้วนำมาประเมินว่า เครื่องจักรนั้นทำงานปกติหรือผิดปกติเพื่อจะได้วางแผนงานบำรุงรักษา ต่อไป โดยเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนแบบพกพา (vibration meter) หรือ ที่หลายๆ คนรู้จักกันในชื่อ Vibration Meter เป็นเครื่องมือที่ ใช้งานง่าย และ สะดวก จึงเหมาะกับผู้เริ่มต้นตรวจสอบสภาพเครื่องจักร แต่ถึงกระนั้น ผู้ที่จะใช้เครื่องมือวัดชนิดนี้ ควรเตรียมตัวเบื้องต้น เพื่อจะได้ใช้เครื่องมือได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้ใช้ควรเตรียมตัวอะไรบ้าง ผมขอ แนะนำ เบื้องต้นดังนี้

ควรมีความรู้เกี่ยวกับ มาตรฐานการวัดการสั่นสะเทือน อาทิเช่น ISO 2373:1974, ISO 10816-1 หรือ ISO 10816-3 ในที่นี้ขอแนะนำ มาตรฐาน ISO 10816-1 เป็น

มาตรฐานในการบอกระดับความรุนแรงด้านการสั่นสะเทือน โดยมีเงื่อนไขการใช้งานเบื้องต้น คือ

a. ย่านความถี่  $10 - 1000$  Hz

b. แอมพลิจูด หน่วย mm/sec, rms (ความเร็ว)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.  
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- c. โดยเครื่องจักรต้องมีความเร็วของเพลาน้อยกว่า 120 รอบต่อนาที  
โดยค่าระดับของ ISO 10816 part 1 ดังแสดงตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงค่ามาตรฐาน ISO 10816-1

R.M.S Vibration Velocity RMS	Class I Up to 15 kW	Class II	Class III	Class IV
0.28	A	A	A	A
0.45				
0.71				
1.12	B	B	B	A
1.8				
2.8	C	C	B	B
4.5				
7.1	D	C	C	C
11.2				
18	D	D	D	D
28				
45				

A	เครื่องจักรใหม่เพิ่งใช้งาน
B	เครื่องจักรเริ่มมีการสั่นสะเทือน จะส่งผลเสียในระยะยาว
C	เครื่องจักรมีการสั่นสะเทือนรุนแรง ถ้าปล่อยไว้จะมีผลเสียกับเครื่องจักร ในระยะเวลานานขึ้น
D	เครื่องจักรมีการสั่นสะเทือนมาก อาจทำให้เครื่องจักรมือขาด ล้มลง

โดยมาตรฐาน ISO 10816-1 จะจำแนกเครื่องจักรตาม กำลัง(Power, kW) ของ  
เครื่องจักร โดยแบ่งเป็น 4 class

Class I : สำหรับเครื่องจักรที่มี กำลัง ไม่เกิน 15 kW

Class II : สำหรับเครื่องจักรขนาดกลางที่มี กำลัง ตั้งแต่ 15 kW ถึง 75 kW

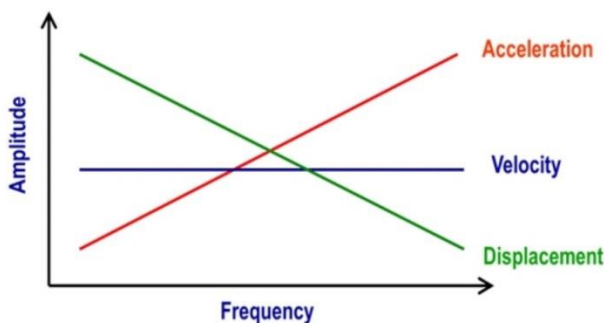
Class III : สำหรับเครื่องจักรขนาดใหญ่ที่มีฐานแบบ rigid มี กำลัง ไม่เกิน 300 kW

Class IV : สำหรับเครื่องจักรขนาดใหญ่ที่ฐานเป็นแบบ soft อาทิ gas turbine,  
turbo generator ที่มีกำลัง ไม่เกิน 10MW โดย Criteria

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ควรมีความเข้าใจพื้นฐานการตรวจวัดการสั่นสะเทือน โดยเฉพาะเรื่องหน่วยในการ  
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม สิ่งนี้เป็นการให้ข้อมูลเบื้องต้น และข้อมูลอ้างอิงถึงว่าเอกสารฉบับนี้มีการนำไปใช้  
วัดการสั่นสะเทือน ว่ามีความเหมาะสมกับ อุปกรณ์ หรือ สภาพความเสียหายแบบใด ดังรูปที่ 2.17

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยวัดการสั่นสะเทือนกับความถี่

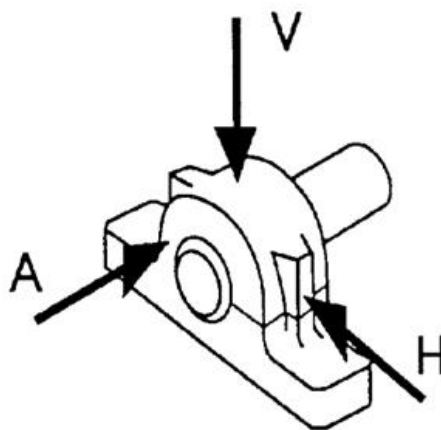
จากรูป ในการประเมินความเสียหายของเครื่องจักรด้วยการตรวจวัดการสั่นสะเทือน ในหน่วยความเร็วเหมาะสำหรับการประเมินระดับความเสียหายตามมาตรฐาน ISO 10860 เนื่องจาก ความถี่ไม่มีผลกับ ขนาดการสั่นสะเทือน ส่วนหน่วยความเร่ง ใช้ตรวจสอบความผิดปกติของ ตลับ ลูกปืน และ ชุดเกียร์ ว่ามีความเสียหายเกิดขึ้นหรือยังเพราะความเสียหายของ ตลับลูกปืน และ ชุด เกียร์ เมื่อเริ่มเสียหาย จะส่งสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่สูง ซึ่งจะสูงกว่า 500 เฮิรตซ์ออกมา ถ้า สามารถตรวจพบได้ก่อน จะทำให้เราเตรียมตัว วางแผนงานได้ดียิ่งขึ้น ถ้าผู้ใช้ใช้แต่หน่วยความเร็ว อาจจะไม่ทันการในการป้องกันความเสียหายของตลับลูกปืนก็เป็นได้ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบการวัดความสั่นสะเทือนในแต่ละหน่วย

หน่วยวัดการสั่นสะเทือน		จุดประสงค์	สมมติฐานความเสียหาย
หน่วยความเร็ว	mm/sec, rms Inch/sec, rms	ประเมินระดับการสั่นสะเทือนตามมาตรฐาน ISO	การเสียสมดุล (Unbalance), การเอียง (Misalignment), Looseness (การหลวมคลอน) เป็นต้น
หน่วยความเร่ง (10-10000 Hz)	G's, peak mm/sec <sup>2</sup>	ตรวจสอบสภาพแบบริ่ง, การทำงานของชุดเกียร์	การขาดสารหล่อลื่น, ความเสียหายของลูกปืน, ความเสียหายเกียร์
หน่วยสำหรับตรวจสอบแบบริ่ง (Band pass filter or high pass filter)	gE (Envelope) BDU (Bearing Damage Unit)	ตรวจสอบสภาพแบบริ่ง, ความผิดปกติของเกียร์ ตั้งแต่ความเสียหายยังไม่รุนแรง	การขาดสารหล่อลื่น, ความเสียหายของลูกปืน, ความเสียหายเกียร์ ในช่วงเริ่มต้นของความเสียหาย

จากตารางที่ 2.3 การกำหนดตำแหน่งการวัด และ ทิศทางการวัดให้เหมาะสม ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ปกติตำแหน่งการวัดการสั่นสะเทือน จะทำการวัดที่ตำแหน่ง แบบริ่ง ในทิศทาง แบบ 3 แกน คือ แกน ไม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทงห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวนอน (Horizontal), แกนแนวตั้ง (Vertical) และ แนวแกน (Axial) ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างทิศทางการวัดการวัดการสันสะเทือน บริเวณแบร์ริง (H-Horizontal, V-Vertical, A-Axial)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### บทที่ 3

## การสร้างแบบจำลองและการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาการค่าความสั่นสะเทือนของ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทาง

### 3.1 การสร้างแบบจำลองและการจำลองเชิงตัวเลข

การสร้างแบบจำลองของระบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทางนั้นมีขั้นตอนหลักๆ คือ ขั้นตอนแรกคือการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ซึ่งใช้โปรแกรม SolidWorks แล้วนำไฟล์มาเข้าสู่โปรแกรม MSC Adams ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของระบบเชิงกล ในการสร้างแบบจำลองอ้างอิงแบบจากเครื่องยนต์ต้นแบบที่มีผู้ให้ข้อมูลและค่าเริ่มต้นให้แก่ชิ้นส่วนต่างๆ ขั้นตอนที่สองกำหนดรูปแบบลักษณะการหมุนและการเคลื่อนที่ขึ้นลงของแบบจำลองให้เหมือนกับการเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจริง

#### 3.1.1 การสร้างแบบจำลอง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทางจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่สำคัญหลักๆ ดังตารางที่ 5.1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 3.1 ค่าเริ่มต้นต่างๆ ของชิ้นส่วนเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทาง

ค่าเริ่มต้นต่างๆ ของชิ้นส่วนเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทาง	
Arm center	0.139 kg
Link2	0.283 kg
Main shaft	2.854 kg
Shaft link	0.118 kg
Connecting rod	0.0206 kg
Piston rod	0.118 kg
Piston	0.187 kg
Piston base	0.166 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ค่าเริ่มต้นต่างๆ ของชิ้นส่วนเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทาง	
Piston ring	0.00843/0.00726 kg
Cross head	0.031 kg
Case cross head	0.683/0.676 kg

จากตารางที่ 3.1 จะเป็นตารางค่าเริ่มต้นของชิ้นส่วนเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทาง โดยค่าเริ่มต้นของชิ้นส่วนต่างๆ นั้นมาจากมาจากการวัดและศึกษาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ต้นแบบ

จากแบบทางวิศวกรรมของชิ้นส่วนต่างๆ ในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์นั้นสามารถนำมาเขียนรูปแบบ 3 มิติ ในโปรแกรมวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของระบบเชิงกลได้ดังรูป

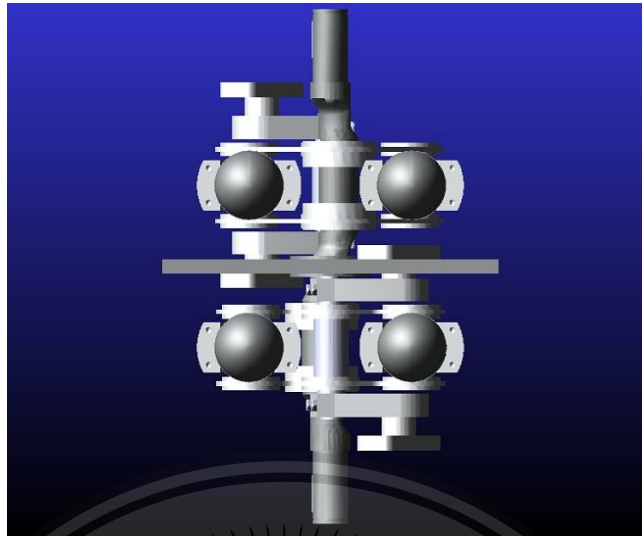


รูปที่ 3.1 แบบจำลองของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทางด้านหน้า

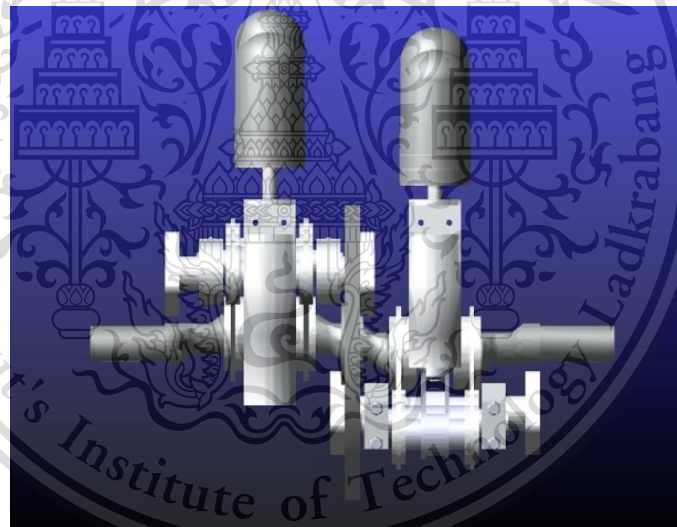
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.2 แบบจำลองของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทางด้านบน



รูปที่ 3.3 แบบจำลองของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทางด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

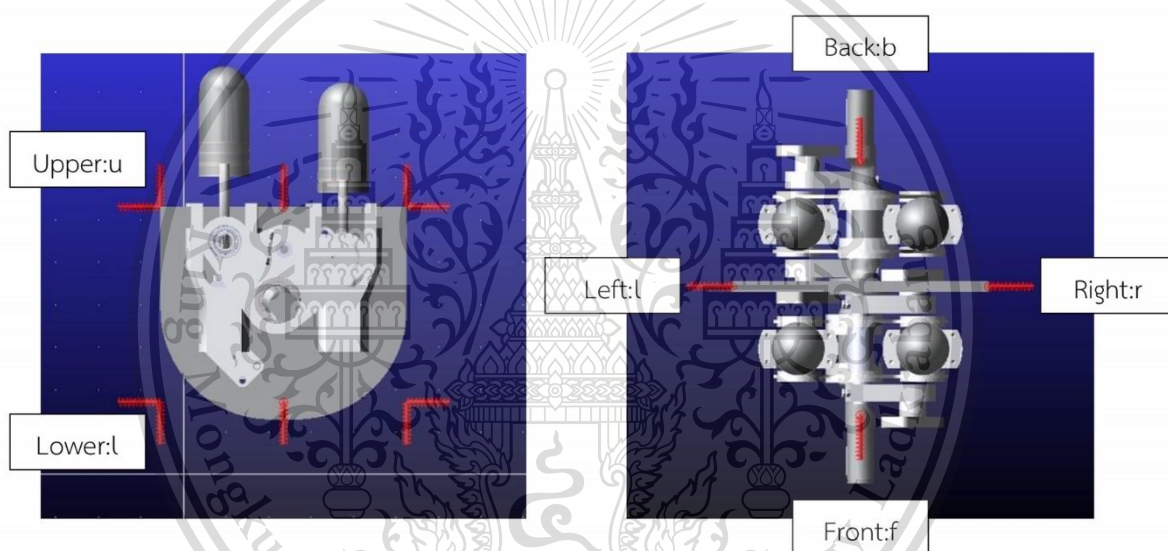
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.1.2 การสร้างรูปแบบลักษณะการหมุนของเครื่องเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์

รูปแบบลักษณะการหมุนของเพลลาของเครื่องเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟาแบบส่งกำลังสองทิศทางในการจำลองเรากำหนดให้ความเร็วรอบคงที่โดยความเร็วรอบที่สภาวะความเร็วรอบคงที่นั้นมีค่าอยู่ประมาณ 1200 รอบต่ออนาที ซึ่งเวลาที่ใช้ในการจำลองเท่ากับ 10 วินาที และความละเอียดในการจำลองทั้งหมดเท่ากับ 1000 ครั้งต่อวินาที

### 3.1.3 ตำแหน่งที่ทำการวัดการสั่นสะเทือนจากแบบจำลอง

การวัดค่าความสั่นสะเทือนของแบบจำลองของเครื่องเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์นั้นจะถูกวัดออกมาในรูปของค่าความเร่ง ซึ่งตำแหน่งที่ทำการวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์นั้น จะทำการวัดทั้งหมด 8 จุด ดังรูป



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งที่ทำการวัดการสั่นสะเทือน

### 3.2 การจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์

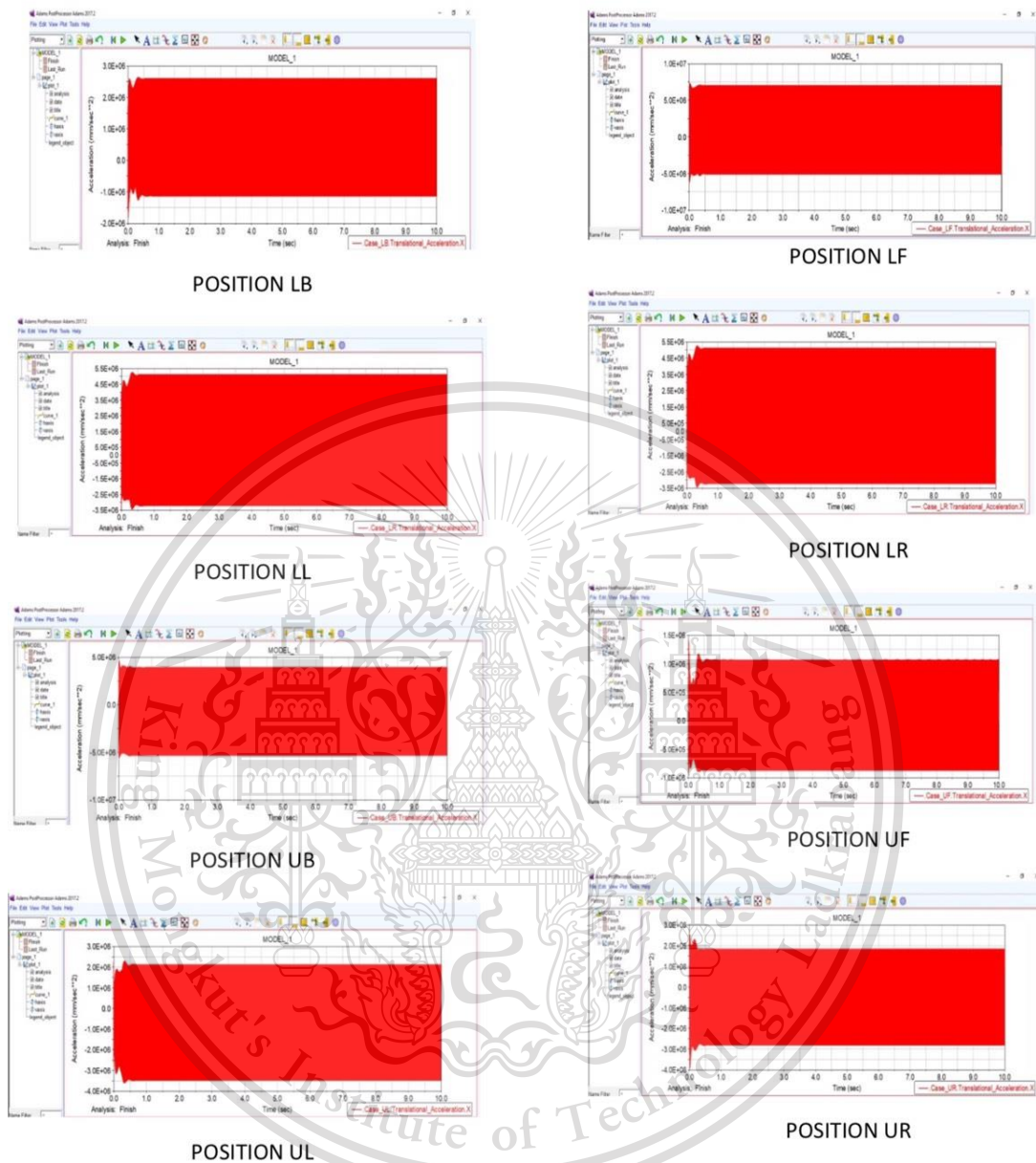
เมื่อทำการสร้างแบบจำลองและใส่ค่าเริ่มต้นของชิ้นส่วนต่างๆ ให้แก่แบบจำลอง พร้อมทั้งใส่ค่ารูปแบบลักษณะการหมุนของเครื่องเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ หลังจากนั้นให้ทำการจำลองเชิงตัวเลขหาค่าอัตราเร่งของแกน X, Y และ Z ในทุกๆ ตำแหน่งจะได้ค่าความเร่งของเครื่องเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ในลักษณะแอมพลิจูดเทียบกับเวลาดังตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.2.1 ผลการจำลองเลขของเรื่งยนต์เตอร์ลิงกรณีไม่มีมวลถ่วง

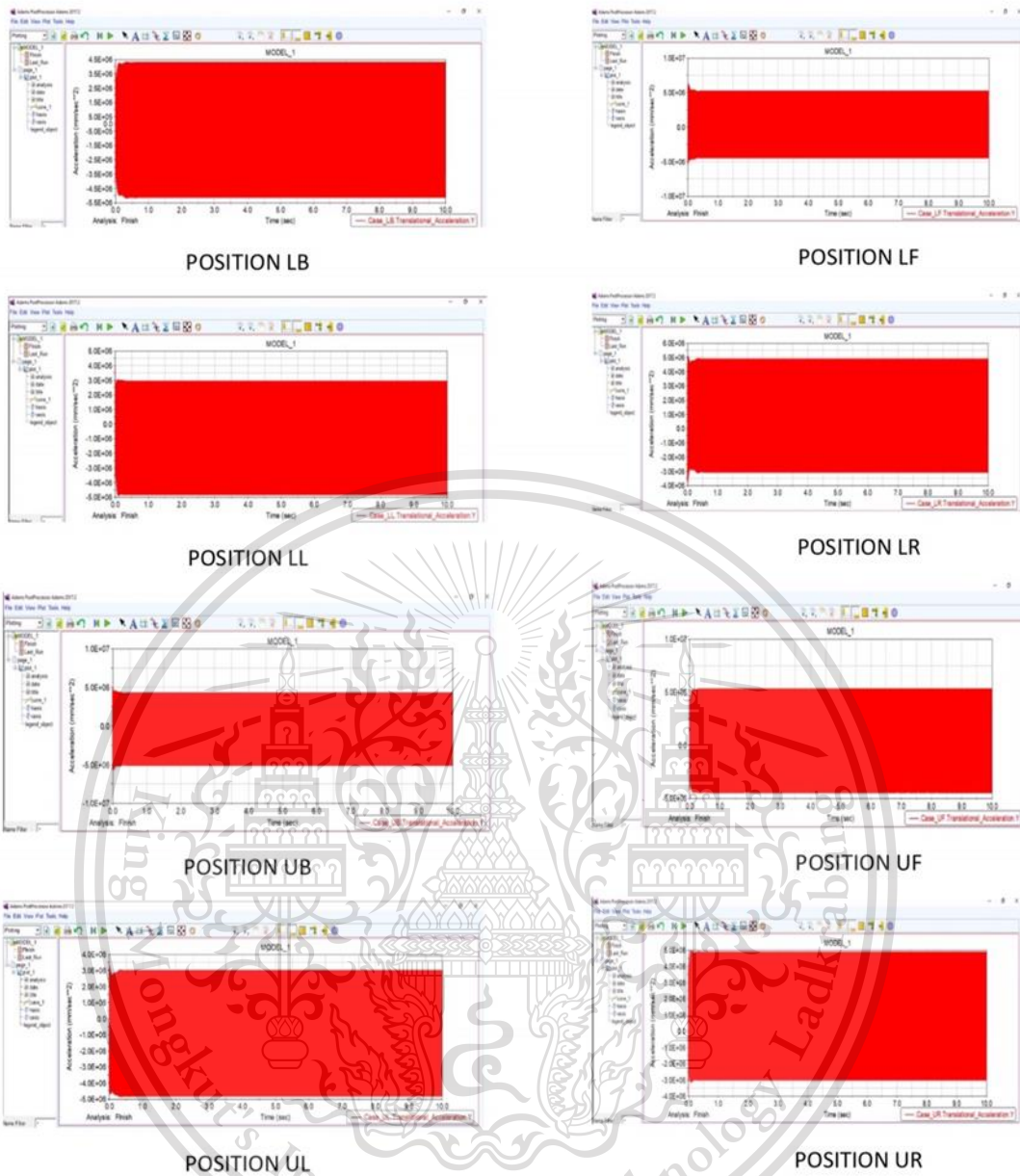


รูปที่ 3.5 กราฟความเร่งที่ตำแหน่งต่างๆ ในแกน X จากแบบจำลองเชิงตัวเลขกรณีไม่มีมวลถ่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

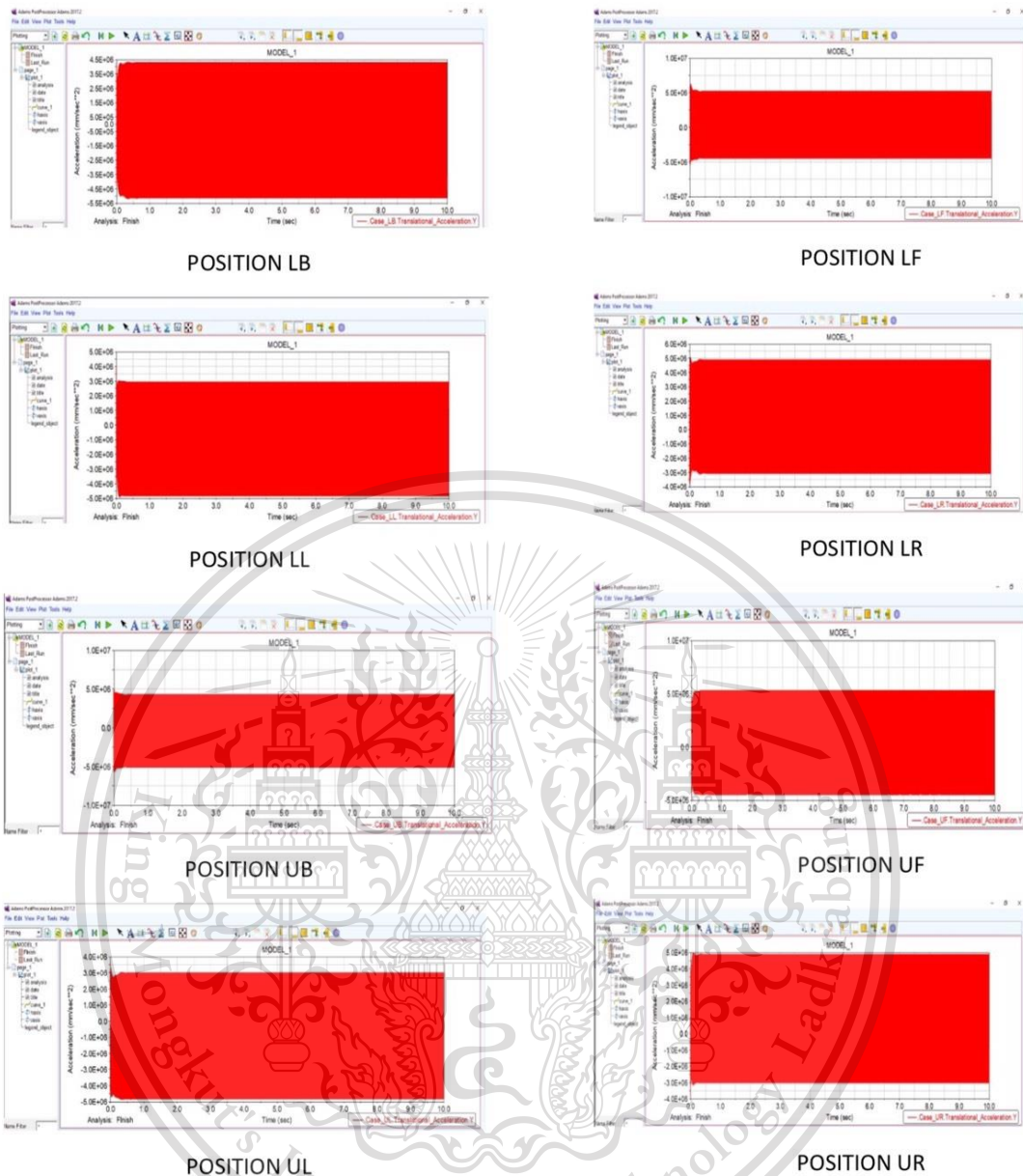
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

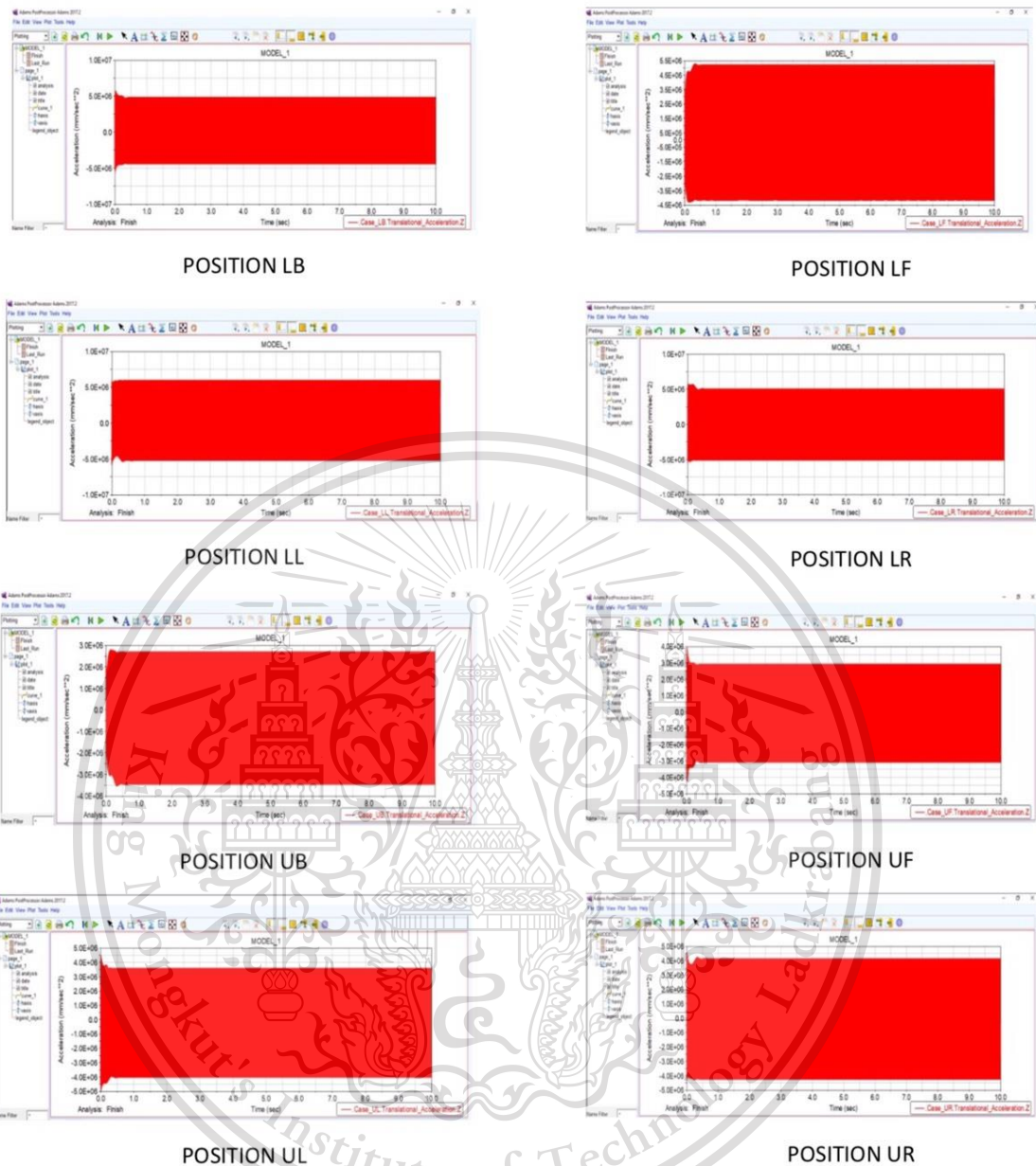


รูปที่ 3.6 กราฟความเร่งที่ตำแหน่งต่างๆ ในแกน Y จากแบบจำลองเชิงตัวเลขกรณีไม่มีมวลถ่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.7 กราฟความเร่งที่ตำแหน่งต่างๆ ในแกน Z จากแบบจำลองเชิงตัวเลขกรณีไม่มีมวลถ่วง

จากรูปที่ 3.6 – 3.8 นั้นจะพบว่าผลการจำลองเชิงตัวเลข ความเร่งในช่วงความเร็วรอบไม่คงที่ นั้นจะมีค่าแปรผันอยู่ตลอดเวลาขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ ถูกตั้งไว้ด้วยโปรแกรม และเมื่อพิจารณาความเร่งในช่วงความเร็วรอบคงที่นั้นจะมีความเร่งสูงสุดและมีค่าคงที่ ดังนั้นค่าความเร่งในช่วงความเร็วคงที่ถูกนำมาศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

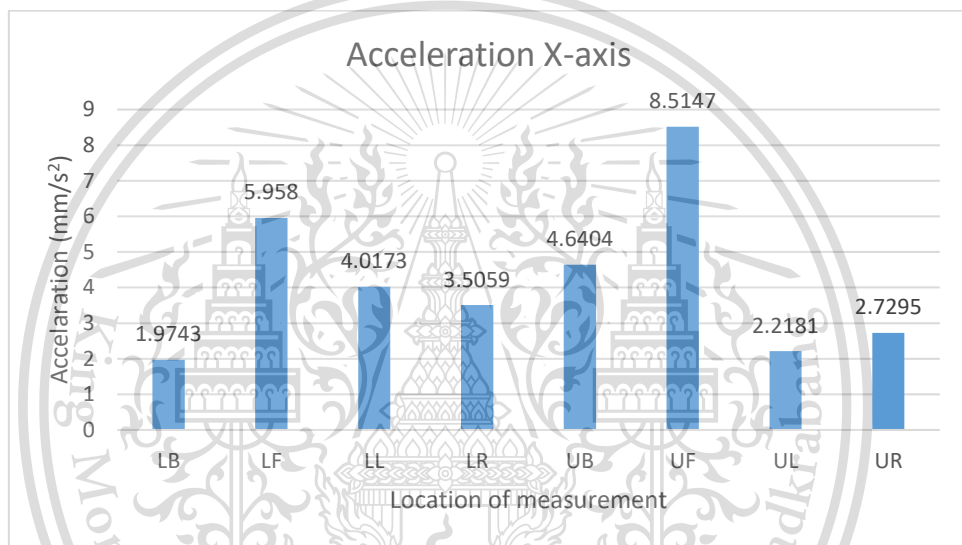
## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ระดับการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์

#### 4.1 วิเคราะห์กราฟความเร่งที่ตำแหน่งต่างๆ กรณีไม่มีมวลติดตั้ง

จากกราฟความเร่งที่ได้ทำการวัดที่ตำแหน่ง X Y และ Z เราสามารถหาค่าเฉลี่ยออกมาได้เป็น 4.195, 4.501 และ 4.551  $\text{mm/s}^2$  ตามลำดับ แล้วนำมาประเมินค่าความสั่นสะเทือนตามระดับของ ISO 10816-1

##### 4.1.1 วิเคราะห์ค่าความสั่นสะเทือนในแนวแกน X กรณีไม่มีมวลติดตั้ง



รูปที่ 4.1 กราฟความเร่งที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนวแกน X จากแบบจำลองเชิงตัวเลขกรณีไม่มีมวลติดตั้ง

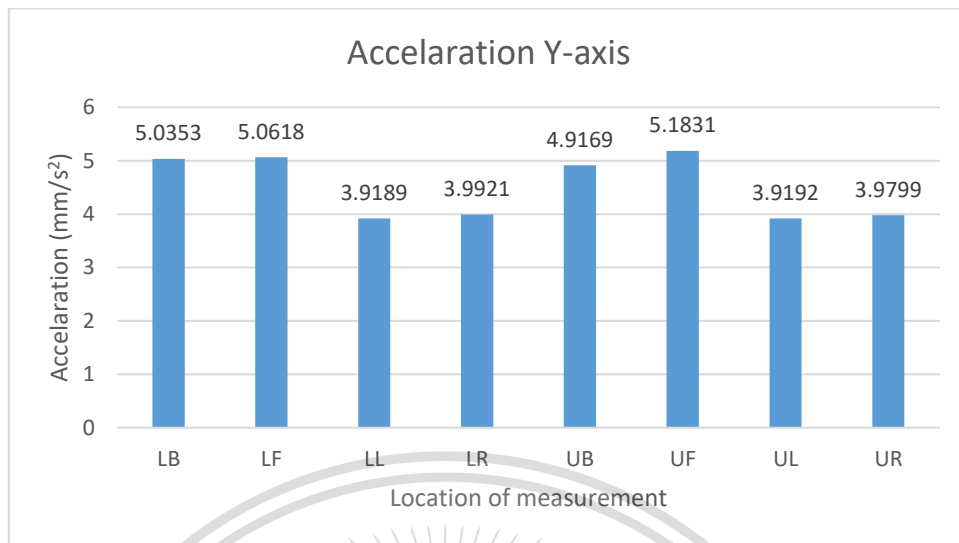
จากรูปที่ 4.1 ค่าความเร่งของเครื่องยนต์ที่มีค่ามากที่สุดในแนวแกน x เป็น 8.5147  $\text{mm/s}^2$  ที่ตำแหน่ง UF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

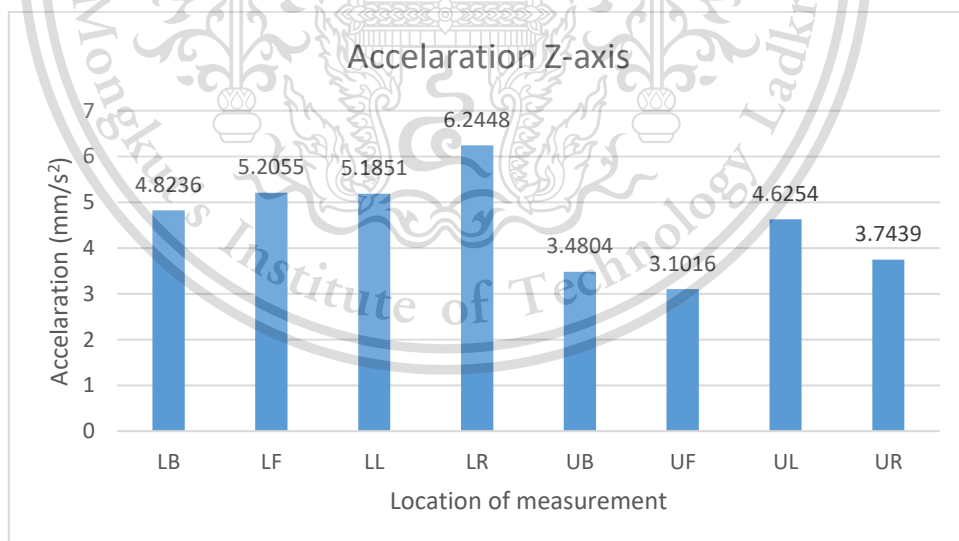
#### 4.1.2 วิเคราะห์ค่าความสั่นสะเทือนในแนวแกน Y กรณีไม่มีมวลติดตั้ง



รูปที่ 4.2 กราฟความเร่งที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนวแกน Y จากแบบจำลองเชิงตัวเลขกรณีไม่มีมวลติดตั้ง

จากตารางที่ 4.2 ค่าความเร่งของเครื่องยนต์ที่มีค่ามากที่สุดในแนวแกน Y เป็น 5.1831 mm/s<sup>2</sup> ที่ตำแหน่ง UF

#### 4.1.3 วิเคราะห์ค่าความสั่นสะเทือนในแนวแกน Z กรณีไม่มีมวลติดตั้ง



รูปที่ 4.3 กราฟความเร่งที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนวแกน Z จากแบบจำลองเชิงตัวเลขกรณีไม่มีมวลติดตั้ง

จากรูปที่ 4.3 ค่าความเร่งของเครื่องยนต์ที่มีค่ามากที่สุดในแนวแกน Z เป็น 6.2448 mm/s<sup>2</sup> ที่ตำแหน่ง LR

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.2 วิเคราะห์กราฟความเร่งที่ตำแหน่งต่างๆ กับค่าระดับการสั่นสะเทือน ISO10816-1

สำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนี้เป็นเครื่องจักรขนาดใหญ่ที่มีฐานแบบ rigid มีกำลังไม่เกิน 300 kw ซึ่งตรงกับ class III ตาราง ISO 10816-1

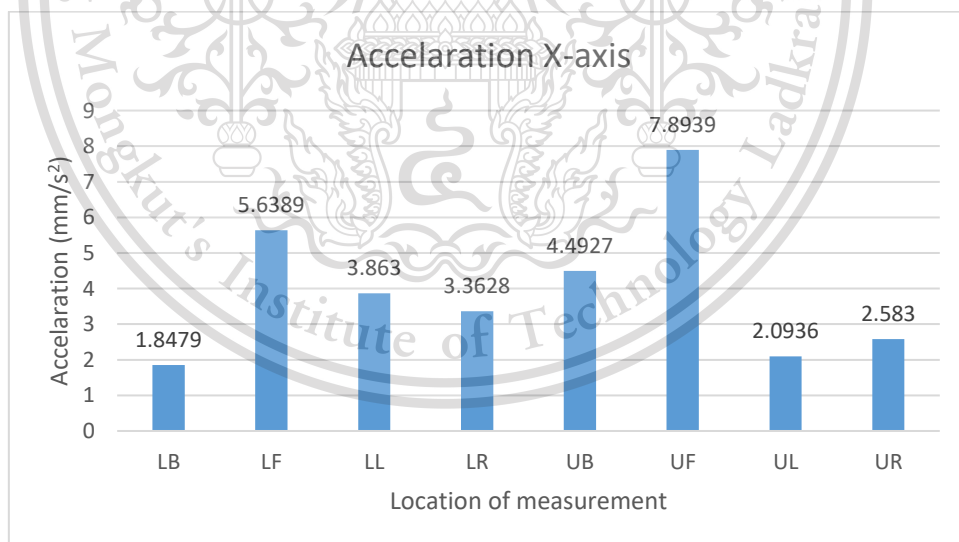
จากรูปที่ 4.1 ค่าความเร่งของเครื่องยนต์ที่มีค่ามากที่สุดในแนวแกน x เป็น 8.5147 mm/s<sup>2</sup> ที่ตำแหน่ง UF ทำการเทียบกับตาราง ISO 10816-1 ผลที่ได้คือเครื่องจักรเริ่มมีการสั่นสะเทือน จะส่งผลเสียในระยะยาว

จากรูปที่ 4.2 ค่าความเร่งของเครื่องยนต์ที่มีค่ามากที่สุดในแนวแกน Y เป็น 5.18305 mm/s<sup>2</sup> ที่ตำแหน่ง UF ทำการเทียบกับตาราง ISO 10816-1 ผลที่ได้คือเครื่องจักรเริ่มมีการสั่นสะเทือน จะส่งผลเสียในระยะยาว

จากรูปที่ 4.3 ค่าความเร่งของเครื่องยนต์ที่มีค่ามากที่สุดในแนวแกน Y เป็น 6.24475 mm/s<sup>2</sup> ที่ตำแหน่ง LR ทำการเทียบกับตาราง ISO 10816-1 ผลที่ได้คือเครื่องจักรเริ่มมีการสั่นสะเทือน จะส่งผลเสียในระยะยาว

#### 4.3 วิเคราะห์กราฟความเร่งที่ตำแหน่งต่างๆ กรณีมีมวลติดตั้ง

##### 4.3.1 วิเคราะห์ค่าความสั่นสะเทือนในแนวแกน X กรณีมีมวลติดตั้ง



รูปที่ 4.4 กราฟความเร่งที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนวแกน X จากแบบจำลองเชิงตัวเลขกรณีมีมวลติดตั้ง

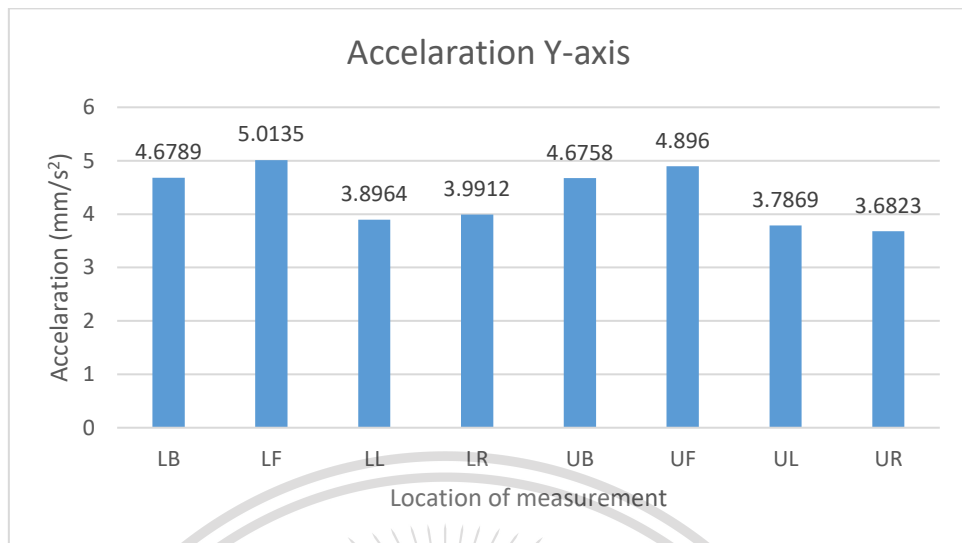
จากรูปที่ 4.4 ค่าความเร่งของเครื่องยนต์ที่มีค่ามากที่สุดในแนวแกน x เป็น 7.8939 mm/s<sup>2</sup> ที่ตำแหน่ง UF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

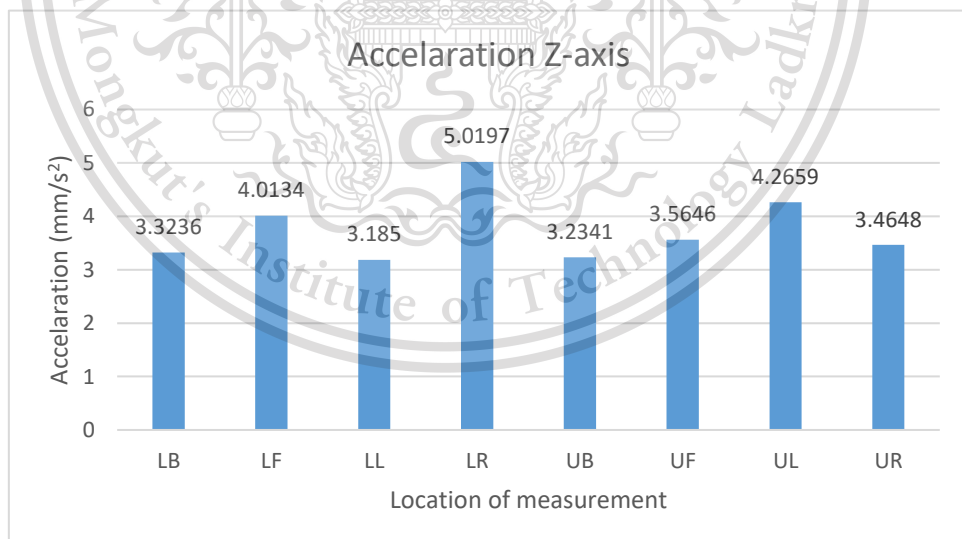
#### 4.3.2 วิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ในแนวแกน Y กรณีมีมวลติดตั้ง



รูปที่ 4.5 กราฟความเร่งที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนวแกน Y จากแบบจำลองเชิงตัวเลขกรณีมีมวลติดตั้ง

จากตารางที่ 4.5 ค่าความเร่งของเครื่องยนต์ที่มีค่ามากที่สุด ในแนวแกน Y เป็น  $5.0135 \text{ mm/s}^2$  ที่ตำแหน่ง UF

#### 4.3.3 วิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ในแนวแกน Z กรณีมีมวลติดตั้ง



รูปที่ 4.3 กราฟความเร่งที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนวแกน Z จากแบบจำลองเชิงตัวเลขกรณีมีมวลติดตั้ง

จากรูปที่ 4.3 ค่าความเร่งของเครื่องยนต์ที่มีค่ามากที่สุด ในแนวแกน Z เป็น  $5.0197 \text{ mm/s}^2$  ที่ตำแหน่ง LR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิเคราะห์

#### 5.1 สรุปผลการวิเคราะห์

จากการจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ทำการวัดในแนวแกน X Y และ Z ค่าความเร่งเฉลี่ยได้เป็น 4.195, 4.501 และ 4.551 mm/s<sup>2</sup> ตามลำดับ และค่าความเร่งสูงสุดในแนวแกน X เป็น 8.5147 mm/s<sup>2</sup> ที่ตำแหน่ง UF ค่าความเร่งสูงสุดในแนวแกน Y เป็น 5.18305 mm/s<sup>2</sup> ที่ตำแหน่ง UF และค่าความเร่งสูงสุดในแนวแกน Z เป็น 6.24475 mm/s<sup>2</sup> ที่ตำแหน่ง LR เมื่อนำค่าความเร่งสูงสุดในแนวแกนต่างๆ มาเทียบกับตารางค่าระดับความรุนแรงการสั่นสะเทือน ISO 10816-1 ผลที่ได้คือเครื่องจักรเริ่มมีการสั่นสะเทือนและจะส่งผลเสียในระยะยาว และแนวทางในการลดการสั่นสะเทือนคือ การใส่มวลถ่วงเข้าไปที่เพลาส่งกำลัง ซึ่งเราทดลองใช้มวลในช่วง 0.1-0.2 kg และได้ค่าการสั่นที่ลดลงมากที่สุดในน้ำหนัก 0.13 จากการทดลองซึ่งลดการสั่นสะเทือนในแกน xy ได้ ~8% และแกน z ถึง 14 % ทำให้ชุดเครื่องยนต์สเตอร์ลิงกลับมาอยู่ในช่วงการสั่น B โชนซึ่งมีผลเสียกับเครื่องจักรน้อยลงเป็นอย่างมาก ซึ่งการทดลองมีผลออกมาคลาดเคลื่อนกับทางทฤษฎี ทำให้เราเห็นความสำคัญของโปรแกรมจำลองมากขึ้น

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

การดัดแปลงเครื่องจักรนั้นไม่ว่าจะทำตามทฤษฎีหรือทำตามsimulation ล้วนมีการคลาดเคลื่อน จึงต้องมีการทดลองจำนวนมาก การมีโปรแกรม simulation จึงจำเป็นต่อวิศวกรเป็นอย่างมาก โดยข้อเสนอแนะการทดลองคือใช้การทดลองจำนวนมากใน simulation เพื่อหาขอบเขตที่แคบลงมา ในการทดลองกับตัวเครื่องจักรจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บรรณานุกรม

- [1] จิตกร ศรีสายชล, “รายงานวิจัยเรื่องการออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง,” **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549
- [2] พงษ์นรินทร์ สว่างวงศ์, “การออกแบบและทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดลูกสูบอิสระขนาดเล็ก,” **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558
- [3] G. Walker, **Stirling Engine**, Oxford University Press, 1980
- [4] M. Fanni, Ali K. Abdel-Rahman and S. Abdel Rasoul, “Dynamic Simulation and Optimization of Rhombic Drive Stirling Engine Using MSC ADAMS Software,” **Procedia Technology**, Vol.22, 2015, pp. 754-761
- [5] Ying-JuYu, “Dynamic simulation of beta-type Stirling engine with cam-drive mechanism via the combination of the thermodynamic and dynamic models,” **Renewable Energy**, Vol.36, No.2, 2011, pp. 714-725
- [6] กลวัชร เฉลิมพงศ์ ก่อกานต์ เมธาลักษณ์ และ นัทพงษ์ ชูธนสุนทร, “การปรับปรุงและพัฒนากลไก Ross Yoke สำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา,” **ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556
- [7] กวิน ทองหล่ม พชรพล พันธุ์วิเศษ และ วรายุทธ ตาส้อย, “การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา กลไกผลิตกำลังสองทาง,” **ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555
- [8] ธนดล มงคลกำจรกุล นัฐพล จุ้ยทรัพย์ และ เมืองนนท์ โรจนพงศ์สถาพร, “การศึกษาพฤติกรรมการสั่นของเครื่องชักผ้าชนิดฝabanเพื่อลดการสั่นสะเทือน,” **ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ James R. Senft, “Optimum Stirling engine geometry”, **Int. J. Energy Research**, การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น Vol.26, No.12, 2002, pp.1087-1101 อย่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.