สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดในสภาวะปั่นแห้ง

VIBRATION ANALYSIS OF PULSATOR TYPE WASHING MACHINE IN THE SPINNING MODE

T123122

รัชพล รัศมีโรจน์
RATCHAPOL RATSAMEEROJ

วศ.
ร345ก
2555

เลขหมู่ 123122
เลขทะเบียน
วัน,เดือน,ปี 18 ต.ค. 2555

b.12478510
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2555
KMITL-2012-EN-M-030-057

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VIBRATION ANALYSIS OF PULSATOR TYPE WASHING MACHINE IN SPINNING MODE

RATCHAPOL RATSAMEEROJ

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012

KMITL-2012-EN-M-030-057

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2012
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดในสภาวะปั่นแห้ง
Thesis Title Vibration Analysis of Pulsator Type Washing Machine in Spinning Mode
นักศึกษา นายรัชพล รัศมีโรจน์
รหัสประจำตัว 52610515
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.อุนนัต พิณโสภณ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์(ร่วม) ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เดไปวา
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2012-EN-M-030-057

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ	เดไปวา	
ดร.เอกพจน์	ตันตราภิวัฒน์	
ดร.ฐิตะพล	หุยะนันท์	
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์	พิมสาร	
ผศ.ดร.อุนนัต	พิณโสภณ	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ห้อง E12-304

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)
คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดในสภาวะปั่นแห้ง
นักศึกษา	นายรัชพล รัศมีโรจน์
รหัสนักศึกษา	52610515
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. อุนนัต พิณโสภณ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร. ณัฐวุฒิ เดไปวา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดในสภาวะปั่นแห้งซึ่งเป็นสภาวะที่มีการสั่นสะเทือนสูงที่สุด การสั่นสะเทือน ความถี่ธรรมชาติ และขนาดการสั่นกำทอนได้ถูกคำนวณด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข จากผลการคำนวณและจากการวัดค่าในการทำงานจริงพบว่า ค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ในแกน X และ Z มีค่ามากกว่าค่าในแกน Y มาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ค่าความเร่งที่พิจารณาจึงเป็นค่าความเร่งในระนาบ XZ เท่านั้น ค่าความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ จากการคำนวณด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขมีความแตกต่างจากการวัดไม่เกิน ±2.94% และจากการจำลองเชิงตัวเลขนั้นพบว่า ปัจจัยที่มีสามารถลดการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าคือ มวลตัวทำสมดุลชนิดของเหลว (liquid balancer) มวลตะกร้าใส่ผ้าและมวลของถัง แต่เนื่องจากการเพิ่มมวลให้แก่ปัจจัยข้างต้นนั้นจะทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มสูงขึ้นมาก ดังนั้นจึงได้ศึกษาการติดตั้งมวลถ่วงที่ฐานของถัง จากการคำนวณด้วยแบบจำลองพบว่าการติดตั้งมวลถ่วงขนาด 3 กิโลกรัมที่ฐานของถังนั้นสามารลดค่าความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ ลงได้ 8.086% นอกจากนี้ยังได้ทำการออกแบบค่าปัจจัยต่างๆที่สามารถลดการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าด้วยวิธีการแบบ exhaustive search ปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบได้แก่ มวลถ่วง ตำแหน่งในการติดตั้งมวลถ่วง ค่านิจของสปริง และสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วง โดยมวลถ่วงขนาดเท่ากับ 5 กิโลกรัม ตำแหน่งในการติดตั้งมวลถ่วง 0 องศา ค่านิจของสปริงเท่ากับ 1 N/mm และสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงเท่ากับ 0.1 N-s/mm นั้นจะสามารถลดค่าความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ ของเครื่องซักผ้าในสภาวะปั่นแห้งได้ 12.81%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Vibration Analysis of Pulsator Type Washing Machine in Spinning Mode
Student	Mr.Ratchapol Ratsameeroj
Student ID.	52610515
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2012
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Unnat Pinsopon
Thesis Co-Advisor	Asst. Prof. Dr. Nattawoot Depaiwa

ABSTRACT

This thesis presents the numerical simulation of the spinning mode vibration of a pulsator-type washing machine. The spinning mode was found to be the highest among all vibration modes. Vibration behavior, natural frequency and vibration mode were calculated by numerical simulations and compared with the experimental results. It was found from simulations and experiments that the RMS values of accelerations in the X and Z axes were much larger than one in the Y axe. Therefore, only the accelerations in the XZ plane are considered in this research study. The simulation results were found to be $\pm$ 2.94% accurate. The factors that affect vibration found in this study are the masses of liquid balancer, basket and tub. However increasing these masses is impossible to apply in manufacturing because it would lead to a higher production cost. Therefore, a balancing mass is proposed to be attached at the bottom plate of the tub. From the simulations, adding a 3 kg balancing mass yielded 8.086% reduction of the average acceleration in the XZ plane. Lastly, the balancing mass, balancing mass position, spring stiffness and damper coefficient of the suspension system were optimized by exhaustive search principle in order to reduce the vibration. The results of the parameter values from optimization are as follow: 5 kg of balancing mass, 0 degree of balancing mass position, 1 N/mm of spring stiffness and 0.1 N-s/mm of damper coefficient. The average acceleration in the XZ plane was reduced by 12.81% after the optimization.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี โดยมี ผศ.ดร.อุนนัต พิณโสภณ และ ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เดไปวา เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาได้ให้คำแนะนำ สั่งสอน และเสนอแนะแนวทางการแก้ไขปัญหาตลอดเวลาในการทำวิจัย ผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ และขอขอบคุณ พี่ๆ และน้องๆ รวมถึงเจ้าหน้าที่ของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ทุกท่านที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำดีๆในการวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ คุณ Jung Jin Woo คุณสุมาตร แววนกยูง และคุณธาราพงษ์ ขำเขียว จาก บริษัท แอลจี อิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความสนับสนุนในด้านข้อมูลที่ใช้ในการทำวิจัยเป็นอย่างยิ่ง

คุณค่าและประโยชน์ใดๆ อันเกิดจากงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

รัชพล รัศมีโรจน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
รายการสัญลักษณ์	XIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	5
2.1 บทนำ	5
2.2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	5
บทที่ 3 หลักการและทฤษฎี	9
3.1 บทนำ	9
3.2 ความไม่สมดุลขณะทำการหมุน	10
3.3 การสั่นสะเทือนเชิงกลที่มีระดับความอิสระเท่ากับสอง	15
3.4 ความถี่ธรรมชาติและ Mode shape	18
3.5 ผลการตอบสนองแบบเสรีของระบบเชิงกลที่มีระดับความอิสระเท่ากับสองแบบไม่มีตัวหน่วง	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
3.6	ผลการตอบสนองแบบบังคับของระบบเชิงกลที่มีระดับความอิสระเท่ากับสองแบบไม่มีตัวหน่วงภายใต้แรงภายนอกที่มากระทำในลักษณะ sinusoidal	21
3.7	การสั่นสะเทือนแบบเสรีของระบบเชิงกลที่มีระดับความอิสระเท่ากับสองแบบมีตัวหน่วงที่ไม่มีแรงจากภายนอกมากระทำ	22
3.8	ผลการตอบสนองในสภาวะคงที่ของระบบเชิงกลที่มีระดับความอิสระเท่ากับสองแบบมีตัวหน่วงและมีแรงกระทำจากภายนอกแบบ sinusoidal	24
บทที่ 4	ค่าความสั่นสะเทือนในแนวแกนต่างๆและการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าแบบใบพัด	27
4.1	บทนำ	27
4.2	ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดและค่าเริ่มต้นของปัจจัยต่างๆ	27
4.3	การวัดค่าความสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าในสภาวะปั่นแห้ง	29
4.3.1	อุปกรณ์ต่างๆและโปรแกรมประมวลผลที่ใช้ในการวัดค่าความสั่นสะเทือน	29
4.3.2	วิธีการวัดค่าความสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้า	30
4.3.3	ค่าความเร่งของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดในสภาวะปั่นแห้ง	31
4.4	การสร้างแบบจำลองและการจำลองเชิงตัวเลข	34
4.4.1	การสร้างแบบจำลอง	34
4.4.2	การสร้างรูปแบบลักษณะการหมุนของเครื่องซักผ้าในสภาวะปั่นแห้ง	36
4.4.3	ตำแหน่งที่ทำการวัดการสั่นสะเทือนจากแบบจำลอง	37
4.5	การจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องซักผ้า	38
4.6	ผลการจำลองเชิงตัวเลขเปรียบเทียบกับการวัดค่าความเร่งในขณะหมุนที่ความเร็วรอบคงที่ทั้งสามแกน	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 อิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนและการออกแบบปัจจัยที่สามารถลดการสั่นสะเทือนให้แก่เครื่องซักผ้า	54
5.1 การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้า	54
5.2 การศึกษาค่าความเร่งเมื่อติดตั้งมวลถ่วงที่ฐานของเครื่องซักผ้า	58
5.3 การออกแบบปัจจัยต่างๆที่สามารถลดการสั่นสะเทือนให้แก่เครื่องซักผ้าในสภาวะปั่นแห้ง	60
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	69
6.1 สรุปผลการวิจัย	69
6.2 ข้อเสนอแนะ	70
เอกสารอ้างอิง	72
ภาคผนวก	74
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	75
ภาคผนวก ข. การคำนวณหาค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกนต่างๆ	76
ภาคผนวก ค. สมการการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าแบบใบพัด	80
ประวัติผู้เขียน	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 4.1	ค่าเริ่มต้นของปัจจัยต่างๆของเครื่องซักผ้าขนาดความจุ 9.5 กิโลกรัม	29
ตารางที่ 4.2	ตารางแสดงความเร่งเฉลี่ย RMS ในตำแหน่งต่างๆและค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกน X	49
ตารางที่ 4.3	ตารางแสดงความเร่งเฉลี่ย RMS ในตำแหน่งต่างๆและค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกน Z	49
ตารางที่ 4.4	ความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ จากการวัดและจากการจำลองเชิงตัวเลข	50
ตารางที่ 4.5	ความถี่ธรรมชาติของเครื่องซักผ้าจากแบบจำลองทั้งในแกน X, Y และ Z	53
ตารางที่ 5.1	ปัจจัยต่างๆที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าเพื่อศึกษาผลการสั่นสะเทือน	54
ตารางที่ 5.2	ปัจจัยต่างๆและขนาดระดับที่จะใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติศาสตร์	61
ตารางที่ 5.3	ความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ ของเครื่องซักผ้าก่อนและหลังการออกแบบค่าปัจจัย	62
ตารางที่ 5.4	ความถี่ธรรมชาติของเครื่องซักผ้าจากแบบจำลองทั้งในแกน X, Y และ Z หลังจากการออกแบบค่าปัจจัยต่างๆ	68
ตารางที่ ข.1	ความเร่งเฉลี่ย RMS ในแกน X, Y และ Z ที่ตำแหน่งต่างๆในช่วงความเร็วรอบคงที่ที่สภาวะปั่นแห้งจากการวัด	76
ตารางที่ ข.2	ความเร่งเฉลี่ย RMS ในแนวแกน X, Y และ Z ที่ตำแหน่งต่างในช่วงความเร็วรอบคงที่ที่สภาวะปั่นแห้งจากผลการจำลองเชิงตัวเลข	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
รูปที่ 1.1	เครื่องซักผ้าอัตโนมัติแบบถังนอน	1
รูปที่ 1.2	เครื่องซักผ้าอัตโนมัติแบบใบกวน	2
รูปที่ 1.3	เครื่องซักผ้าอัตโนมัติแบบใบพัด	2
รูปที่ 1.4	ข้อมูลการร้องเรียนของลูกค้าที่รวบรวมโดยบริษัท แอลจี อิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด	3
รูปที่ 3.1	ระบบสปริง-มวล-ตัวหน่วงที่มีมวลไม่สมดุล	10
รูปที่ 3.2	ขนาดของแอมพลิจูดที่สภาวะคงที่ เมื่อมีความไม่สมดุลขณะทำการหมุนที่อัตราความหน่วงต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความถี่	14
รูปที่ 3.3	ค่ามุมเฟสที่อัตราความหน่วงต่างๆเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความถี่	15
รูปที่ 3.4	ระบบเชิงกลที่มีระดับความอิสระเท่ากับสอง	16
รูปที่ 3.5	ผังวัตถุอิสระของระบบเชิงกลที่มีระดับความอิสระเท่ากับสอง	17
รูปที่ 4.1	ส่วนประกอบหลักต่างๆของเครื่องซักผ้าแบบใบพัด	28
รูปที่ 4.2	การ์ดรวบรวมข้อมูล (Data acquisition) รุ่น DEWE - 43	29
รูปที่ 4.3	รายละเอียดความสามารถของเซนเซอร์วัดค่าความเร่ง	30
รูปที่ 4.4	การวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าในตำแหน่งต่างๆ	31
รูปที่ 4.5	กราฟแอมพลิจูดของความเร่งเทียบกับเวลา	31
รูปที่ 4.6	ความถี่ขณะทำการหมุนในช่วงความเร็วรอบคงที่	32
รูปที่ 4.7	ค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ในแกน X จากการวัดค่าความเร่งจากเครื่องซักผ้าในช่วงความเร็วรอบคงที่	33
รูปที่ 4.8	ค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ในแกน Y จากการวัดค่าความเร่งจากเครื่องซักผ้าในช่วงความเร็วรอบคงที่	33
รูปที่ 4.9	ค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ในแกน Z จากการวัดค่าความเร่งจากเครื่องซักผ้าในช่วงความเร็วรอบคงที่	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 4.10	แบบจำลองของเครื่องซักผ้าแบบใบพัด	35
รูปที่ 4.11	ตำแหน่งด้านปลายของก้านโลหะที่ถูกกำหนดให้เป็นจุดที่ไม่มีการเคลื่อนที่	36
รูปที่ 4.12	รูปแบบลักษณะการหมุนของเครื่องซักผ้าในสภาวะปั่นแห้งในแบบจำลอง	36
รูปที่ 4.13	รูปแบบลักษณะการหมุนของเครื่องซักผ้าในสภาวะปั่นแห้งของเครื่องซักผ้าจริง (A) เปรียบเทียบกับรูปแบบลักษณะการหมุนของเครื่องซักผ้าในสภาวะปั่นแห้งในแบบจำลอง (B)	37
รูปที่ 4.14	ตำแหน่งที่ทำการวัดการสั่นสะเทือนจากแบบจำลอง จากภาพด้านหน้า	37
รูปที่ 4.15	ตำแหน่งที่ทำการวัดการสั่นสะเทือนจากแบบจำลอง จากภาพด้านข้าง	38
รูปที่ 4.16	ตำแหน่งที่ทำการวัดการสั่นสะเทือนจากแบบจำลอง จากภาพด้านบน	38
รูปที่ 4.17	กราฟความเร่งที่ทุกตำแหน่งในแกน X จากแบบจำลองเชิงตัวเลข	39
รูปที่ 4.18	กราฟความเร่งที่ทุกตำแหน่งในแกน Y จากแบบจำลองเชิงตัวเลข	40
รูปที่ 4.19	กราฟความเร่งที่ทุกตำแหน่งในแกน Z จากแบบจำลองเชิงตัวเลข	41
รูปที่ 4.20	การเปรียบเทียบค่าความเร่งจากการวัดที่เครื่องซักผ้าขณะความเร็วรอบคงที่กับผลการจำลองเชิงตัวขณะความเร็วรอบคงที่ที่ทุกตำแหน่งภายณ วินาทีที่ 200 - 201 ในแกน X	43
รูปที่ 4.21	การเปรียบเทียบค่าความเร่งจากการวัดที่เครื่องซักผ้าขณะความเร็วรอบคงที่กับผลการจำลองเชิงตัวขณะความเร็วรอบคงที่ที่ทุกตำแหน่งภายณ วินาทีที่ 200 - 201 ในแกน Y	44
รูปที่ 4.22	การเปรียบเทียบค่าความเร่งจากการวัดที่เครื่องซักผ้าขณะความเร็วรอบคงที่กับผลการจำลองเชิงตัวขณะความเร็วรอบคงที่ที่ทุกตำแหน่งภายณ วินาทีที่ 200 - 201 ในแกน Z	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 4.23	ผลการวัดค่าความเร่งจริงของเครื่องซักผ้าที่สภาวะปั่นแห้ง (A) เปรียบเทียบกับค่าความเร่งที่หาจากการจำลองเชิงตัวเลข (B)	46
รูปที่ 4.24	ความเร่งเฉลี่ย RMS ในแนวแกน X ของเครื่องซักผ้าจากการวัดและจากการจำลอง	47
รูปที่ 4.25	ความเร่งเฉลี่ย RMS ในแนวแกน Y ของเครื่องซักผ้าจากการวัดและจากการจำลอง	47
รูปที่ 4.26	ความเร่งเฉลี่ย RMS ในแนวแกน Z ของเครื่องซักผ้าจากการวัดและจากการจำลอง	48
รูปที่ 4.27	ตำแหน่งที่ทำการจำลองค่าความเร่งที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้าง	50
รูปที่ 4.28	ความเร่ง RMS ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้างในแนวแกน X	51
รูปที่ 4.29	ความเร่ง RMS ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้างในแนวแกน Y	51
รูปที่ 4.30	ความเร่ง RMS ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้างในแนวแกน Z	52
รูปที่ 4.31	ระยะการกระจัดของถังในแนวแกน X จากการจำลองเชิงตัวเลข	52
รูปที่ 4.32	ระยะการกระจัดของถังในแนวแกน X จากการจำลองเชิงตัวเลข	53
รูปที่ 5.1	ค่าความเร่งฉลี่ยในแกน X และ Z เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่านิจของสปริง	55
รูปที่ 5.2	ค่าความเร่งฉลี่ยในแกน X และ Z เมื่อมีการปรับเปลี่ยนสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วง	56
รูปที่ 5.3	ค่าความเร่งฉลี่ยในแกน X และ Z เมื่อมีการปรับเปลี่ยนมวลของตะกร้าใส่ผ้า	56
รูปที่ 5.4	ค่าความเร่งฉลี่ยในแกน X และ Z เมื่อมีการปรับเปลี่ยนมวลของตัวทำสัมดุลชนิดของเหลว (ไม่รวมมวลของน้ำเกลือที่บรรจุอยู่ภายใน)	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ [illegible] ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 5.5	ค่าความเร่งฉลี่ยในแกน X และ Z เมื่อมีการปรับเปลี่ยนมวลของถัง	57
รูปที่ 5.6	ตำแหน่งในการติดตั้งของมวลถ่วงที่ฐานของเครื่องซักผ้า	58
รูปที่ 5.7	ตำแหน่งในการติดตั้งของมวลถ่วงที่ฐานของแบบจำลอง	59
รูปที่ 5.8	ค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ในแกน X จากผลการจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องซักผ้าแบบมีมวลถ่วงเปรียบเทียบกับการวัดความเร่งของเครื่องซักผ้าแบบก่อนและหลังติดมวลถ่วง	59
รูปที่ 5.9	ค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ในแกน Z จากผลการจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องซักผ้าแบบมีมวลถ่วงเปรียบเทียบกับการวัดความเร่งของเครื่องซักผ้าแบบก่อนและหลังติดมวลถ่วง	60
รูปที่ 5.10	ตำแหน่งในการติดตั้งมวลทำสุมดลที่ตำแหน่งต่างๆที่ด้านล่างของถัง	62
รูปที่ 5.11	ปัจจัยต่างๆที่ถูกออกแบบเพื่อลดความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ	63
รูปที่ 5.12	กราฟเปรียบเทียบความเร่งเฉลี่ย RMS ที่ทุกตำแหน่งในแกน X จากการวัดความเร่งก่อนและหลังการออกแบบค่าปัจจัยต่างๆ	63
รูปที่ 5.13	กราฟเปรียบเทียบความเร่งเฉลี่ย RMS ที่ทุกตำแหน่งในแกน Z จากการวัดความเร่งก่อนและหลังการออกแบบค่าปัจจัยต่างๆ	64
รูปที่ 5.14	ตำแหน่งที่ทำการจำลองค่าความค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้างจากแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ได้รับการออกแบบค่าปัจจัยต่างๆ	65
รูปที่ 5.15	ความเร่งเฉลี่ย RMS ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้างในแนวแกน X ก่อนและหลังการออกแบบค่าปัจจัยต่างๆ	65
รูปที่ 5.16	ความเร่งเฉลี่ย RMS ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้างในแนวแกน Y ก่อนและหลังการออกแบบค่าปัจจัยต่างๆ	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 5.17	ความเร่งเฉลี่ย RMS ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้างในแนวแกน Z ก่อนและหลังการออกแบบค่าปัจจัยต่างๆ	66
รูปที่ 5.18	ระยะการกระจัดของถังในแนวแกน X จากการจำลองเชิงตัวเลข	67
รูปที่ 5.19	ระยะการกระจัดของถังในแนวแกน Z จากการจำลองเชิงตัวเลข	67
รูปที่ ค.1	โครงสร้างของเครื่องซักผ้าแบบใบพัด	80
รูปที่ ค.2	จุดศูนย์กลางของน้ำเกลือที่การหมุน ณ ตำแหน่งต่างๆ	81
รูปที่ ค.3	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจุดศูนย์กลางของน้ำเกลือเทียบกับตำแหน่ง S กับระยะห่างการเยื้องศูนย์เมื่อเทียบกับตำแหน่ง S	83
รูปที่ ค.4	แบบจำลองการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าแบบใบพัด	85
รูปที่ ค.5	ตำแหน่งพิกัดต่างๆที่ตัวทำสมดุลชนิดของเหลว	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

k_{eq}	ค่านิจของสปริงทั้งระบบ, N/mm
A	แอมพลิจูด, m
m_{eq}	มวลรวมทั้งระบบ, kg
g	แรงโน้มถ่วงของโลก, m/s^2
x	การกระจัดในแนวแกน x, m
$\dot{x}$	ความเร็วในแนวแกน x, m/s
$\ddot{x}$	ความเร่งในแนวแกน x, m/s^2
c_{eq}	สัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงรวมทั้งระบบ, N-s/m
c_c	สัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงวิกฤต, N-s/m
ω_n	ความถี่ธรรมชาติของระบบ, Hz
ξ	อัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วง
ω_d	ความถี่ทำงานของระบบ, Hz
t	เวลา, s
$\emptyset$	มุมเฟสเริ่มต้น, rad
f_0	ขนาดของแรงเริ่มต้นที่มากระทำ, N
ω	ความถี่ทำงานของระบบ, Hz
r	อัตราส่วนความถี่
m_u	มวลที่ทำให้เกิดความไม่สมดุล, kg
e	ระยะเยื้องศูนย์, m
$\mathbf{X}(t)$	เมทริกซ์การกระจัดในแนวแกน x, m
$\dot{\mathbf{X}}(t)$	เมทริกซ์ความเร็วในแนวแกน x, m/s
$\ddot{\mathbf{X}}(t)$	เมทริกซ์ความเร่งในแนวแกน x, m/s^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

$\mathbf{f}(t)$	เมทริกซ์ของแรงภายนอกที่มากระทำ, N
$f_1(t)$	แรงภายนอกที่มากระทำตัวที่หนึ่ง, N
$f_2(t)$	แรงภายนอกที่มากระทำตัวที่สอง, N
k_1	ค่านิจของสปริงตัวที่หนึ่ง, N/s
k_2	ค่านิจของสปริงตัวที่สอง, N/s
k_3	ค่านิจของสปริงตัวที่สาม, N/s
c_1	สัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงตัวที่หนึ่ง, N-s/m
c_2	สัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงตัวที่สอง, N-s/m
m_1	มวลของวัตถุที่หนึ่ง, kg
m_2	มวลของวัตถุที่สอง, kg
x_1	การกระจัดนับจากจุดอ้างอิงจุดที่หนึ่ง, m
x_2	การกระจัดนับจากจุดอ้างอิงจุดที่สอง, m
$\dot{x}_1$	ความเร็วนับจากจุดอ้างอิงจุดที่หนึ่ง, m/s
$\dot{x}_2$	ความเร็วนับจากจุดอ้างอิงจุดที่สอง, m/s
$\ddot{x}_1$	ความเร่งนับจากจุดอ้างอิงจุดที่หนึ่ง, m/s^2
$\ddot{x}_2$	ความเร่งนับจากจุดอ้างอิงจุดที่สอง, m/s^2
$\boldsymbol{M}$	เมทริกซ์ของมวล, kg
$\boldsymbol{C}$	เมทริกซ์ของสัมประสิทธิ์ตัวหน่วง, N-s/mm
$\boldsymbol{K}$	เมทริกซ์ค่านิจของสปริง, N/mm
$\mathbf{V}$	เมทริกซ์ของ mode shape
α_1, α_2	ค่าคงที่
f_{10}	แรงที่มากระทำจากภายนอกตัวที่หนึ่ง, N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

f_{20}	แรงที่มากระทำจากภายนอกตัวที่สอง, N
R_o	รัศมีภายนอกของตัวทำสมดุลชนิดของเหลว, m
R_i	รัศมีภายในของตัวทำสมดุลชนิดของเหลว, m
V	ปริมาตรของน้ำเกลือ, m^3
S	จุดศูนย์กลางของรูปทรง
c	ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรูปทรงเทียบกับตำแหน่ง S, m
O	จุดศูนย์กลางของการหมุน
e	ระยะห่างการเยื้องศูนย์เมื่อเทียบกับตำแหน่ง S, m
R_s	รัศมีภายในของผิวน้ำเกลือ, m
ρ	ความหนาแน่นของน้ำเกลือ, kg/m^3
c^*	ระยะห่างที่มากที่สุดระหว่างจุดศูนย์กลางของน้ำเกลือเทียบกับตำแหน่ง S, m
T	พลังงานจลน์ของระบบ, joule
m_b	มวลของตะกร้าใส่ผ้า, kg
m_t	มวลของถัง, kg
$\dot{x}_b$	ความเร็วของตะกร้าใส่ผ้า, m/s
$\dot{x}_t$	ความเร็วของถัง, m/s
$\dot{x}_u$	ความเร็วของมวลไม่สมดุล, m/s
$\dot{\psi}_b$	ความเร็วในการหมุนเชิงมุมของตะกร้าใส่ผ้า, rad/s
$\dot{\psi}_t$	ความเร็วในการหมุนเชิงมุมของตะกร้าใส่ผ้า, rad/s
I_b	โมเมนต์ความเฉื่อยของตะกร้าใส่ผ้า, $kg\text{-}m^2$
I_t	โมเมนต์ความเฉื่อยของถัง, $kg\text{-}m^2$
V_g	พลังงานศักย์ของระบบ, joule

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

x_3^b	การกระจัดของตะกร้าใส่ผ้าในแนวแกน x_3, m
x_3^t	การกระจัดของถังในแนวแกน x_3, m
x_3^u	การกระจัดของมวลไม่สมดุลในแนวแกน x_3, m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

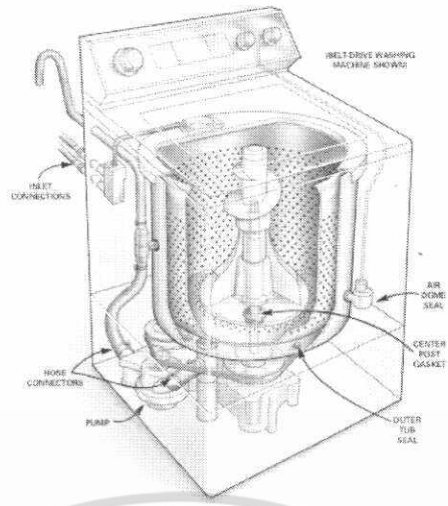
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันได้มีเครื่องใช้ไฟฟ้าหลากหลายประเภทเพื่อความสะดวกสบายและความบันเทิงเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค ซึ่งเครื่องใช้ไฟฟ้าที่แทบจะขาดไม่ได้กันทุกๆครัวเรือนนั้นคือเครื่องซักผ้า โดยเครื่องซักผ้านั้นสร้างความสะดวกสบายให้แก่ผู้ใช้งานคือ สามารถลดความเมื่อยล้าในการซักผ้าที่มีการซับน้ำได้ดีเช่น ผ้านวม กางเกงยีนส์ เพราะในการซักผ้าที่มีการซับน้ำต้องใช้พลังงานอย่างมากในการซักแต่ละครั้ง และเครื่องซักผ้ายังสามารถซักผ้าได้ทีละจำนวนมากๆ โดยขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องซักผ้า

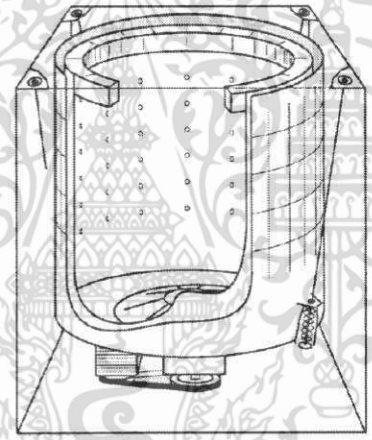
เครื่องซักผ้าแบบอัตโนมัติในปัจจุบันสามารถแบ่งออกตามมาตราฐาน มอก.1463-2540 [1] ได้เป็น 3 ประเภท คือ เครื่องซักผ้าแบบถังนอน (horizontal drum type washing machine), เครื่องซักผ้าแบบใบกวน (agitator type washing machine) และเครื่องซักผ้าแบบใบพัด (pulsator type washing machine) โดยเครื่องซักผ้าแบบถังนอนจะมีการหมุนในแนวนอน ส่วนแบบเครื่องซักผ้าแบบใบกวนและเครื่องซักผ้าแบบใบพัดจะมีการหมุนในแนวตั้ง ซึ่งทั้งสองแบบนี้แตกต่างกันที่ลักษณะการกวนผ้าโดยแบบเครื่องซักผ้าแบบใบกวนจะมีแกนกลางทำหน้าที่ในการกวนผ้า ส่วนเครื่องซักผ้าแบบใบพัดจะมีใบพัดอยู่ด้านล่างของตะกร้าใส่ผ้าเพื่อทำหน้าที่ในการกวนผ้าเช่นกัน

รูปที่ 1.1 เครื่องซักผ้าอัตโนมัติแบบถังนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



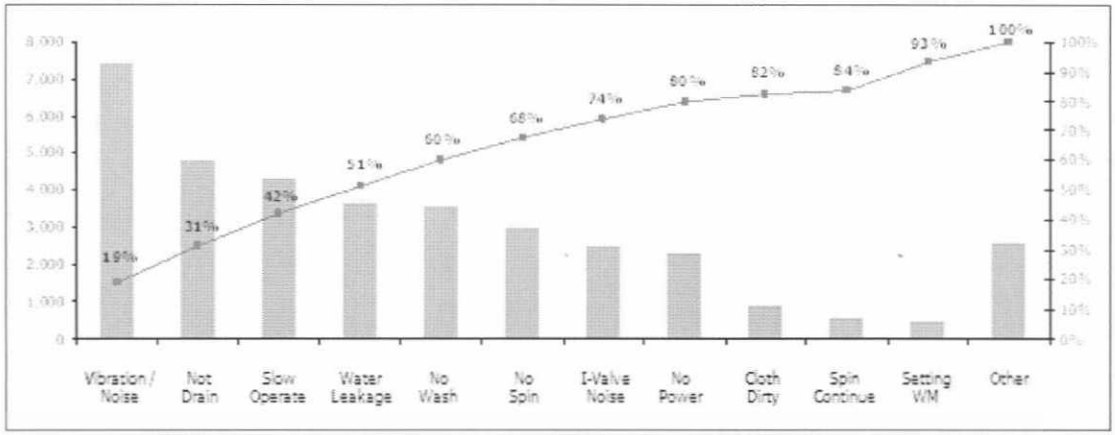
รูปที่ 1.2 เครื่องซักผ้าอัตโนมัติแบบใบกวน



รูปที่ 1.3 เครื่องซักผ้าอัตโนมัติแบบใบพัด

ระบบการทำงานของเครื่องซักผ้าแบบอัตโนมัติจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ คือ ขั้นตอนการซัก ขั้นตอนการล้าง และขั้นตอนการปั่นแห้ง ตามลำดับ ซึ่งขั้นตอนการซักและขั้นตอนการล้างนั้นจะทำให้เกิดความไม่สมดุลจากผ้าที่ซักเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มเป็นก้อน และเมื่อเข้าสู่ขั้นตอนการปั่นแห้งที่ความเร็วสูงๆจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนแก่เครื่องซักผ้า ซึ่งการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลกระทบหลายๆอย่าง เช่น อายุการใช้งานของตลับลูกปืนลดลง ทำให้เกิดเสียงดังรบกวนแก่ผู้ใช้งาน เป็นต้น และทางบริษัทผู้ผลิตเครื่องซักผ้าทุกบริษัทได้รวบรวมข้อมูลการร้องเรียนจากลูกค้าเพื่อใช้ในการปรับปรุงและพัฒนาคุณภาพของเครื่องซักผ้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยรูปที่ 1.4 แสดงตัวอย่างการสรุปข้อมูลการร้องเรียนและปัญหาจากการใช้งานเครื่องซักผ้าของบริษัท แอลจี อิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Worst Item	ETT		ECB		ECL		EML		EIN		Total	
	PPM	Ratio	PPM	Ratio	PPM	Ratio	PPM	Ratio	PPM	Ratio	PPM	Ratio
Spin vibration/noise	10,846	22%	10,044	25%	8,268	19%	4,035	12%	5,460	15%	7,443	19%
Water leak	9,529	20%	4,695	12%	1,826	4%	1,968	6%	1,966	5%	3,647	9%
No spin	6,583	14%	1,079	3%	1,428	3%	3,223	10%	3,420	9%	2,970	8%
Slow operate	3,574	7%	5,969	15%	4,549	10%	4,627	14%	3,122	9%	4,317	11%
No wash	3,480	7%	3,454	9%	5,221	12%	3,936	12%	3,510	10%	3,528	9%
Not drain	3,041	6%	4,024	10%	17,499	39%	2,731	8%	2,169	6%	4,788	12%
Enters water flow noise	2,069	4%	2,633	7%	1,083	2%	1,599	5%	3,638	10%	2,501	6%
No power	1,693	3%	2,767	7%	1,096	2%	2,436	7%	2,672	7%	2,325	6%
Cloth dirty	1,536	3%	973	2%	199	0%	615	2%	1,075	3%	922	2%
Supply continue	376	0.8%	486	1.2%	1,029	2.3%	492	1.5%	812	2%	581	1%
Setting WM	31	0.1%	34	0.1%			246	0.7%	1,349	4%	483	1%
Other	4,420	9%	572	1%	1,727	4%	5,143	15%	2,356	7%	2,582	7%
Total	48,745		40,025		44,395		33,434		36,243		39,420	

รูปที่ 1.4 ข้อมูลการร้องเรียนของลูกค้าที่รวบรวมโดยบริษัท แอลจี อิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด

(ด้วยความอนุเคราะห์ข้อมูลจากบริษัท แอลจี อิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด)

จากรูปที่ 1.4 นั้นจะพบว่าปัญหาที่ถูกร้องเรียนมาจากลูกค้านั้น ส่วนใหญ่คือปัญหาจากการสั่นสะเทือนที่ถูกร้องเรียนมาเป็นอันดับแรก ดังนั้นปัญหาการสั่นสะเทือนจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดและการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้า จึงเป็นที่มาของการวิจัยในครั้งนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการพฤติกรรมสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดในแกน X , Y และ Z ที่ตำแหน่งต่างๆ ในขั้นตอนการปั่นแห้งและความถี่ธรรมชาติของเครื่องซักผ้า

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาลักษณะการสั่นสะเทือนในช่วงความเร็วรอบคงที่ของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดในสภาวะปั่นแห้ง โดยรุ่นเครื่องซักผ้าที่ใช้ในการศึกษาคือ LG WF-T9575TD

1.3.2 ในการศึกษาลักษณะการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดได้ทำการใช้มวลทดลองแทนมวลของผ้าที่ใช้ในการซักจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของค่าปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับเครื่องซักผ้าในสภาวะปั่นแห้ง ได้แก่ มวลของตะกร้าใส่ผ้า มวลของตัวทำสมดุลชนิดของเหลว มวลของถัง ค่านิจของสปริง และค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยเริ่มต้นจากการรวบรวมองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนทางกลและการเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์เป็นหลัก หลังจากนั้นทำการจำลองแบบทดลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MSC ADAMS เปรียบเทียบกับค่าการสะเทือนที่วัดได้จากชุดเครื่องมือวัดในตำแหน่งเดียวกัน และใช้โปรแกรมทางสถิติศาสตร์ MINITAB เพื่อออกแบบค่าปัจจัยต่างๆที่สามารถลดการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าได้ โดยรายละเอียดขั้นตอนการวิจัยมีดังนี้

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้แก่การสั่นสะเทือนเชิงกลและ Modal Analysis เพื่อใช้ออกแบบและวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าแบบใบพัด

1.4.2 สืบค้นวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.3 รวบรวมข้อมูลการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าในระนาบ XY , XZ และ YZ ที่สภาวะปั่นแห้งด้วยชุดเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือน

1.4.4 จำลองการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าเพื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนในตำแหน่งต่างๆด้วยโปรแกรม MSC ADAMS

1.4.5 ศึกษาการออกแบบค่าปัจจัยต่างๆของเครื่องซักผ้าที่สามารถลดการสั่นสะเทือนลงได้

1.4.6 วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบค่าปัจจัยต่างๆ

1.4.7 สรุปผลการวิจัยและจัดทำรายงาน

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.5.1 เพื่อเป็นพื้นฐานในการออกแบบและพัฒนาเครื่องซักผ้าแบบใบพัดและเป็นองค์ความรู้ในการพัฒนาเครื่องซักผ้าในรุ่นต่อไป

1.5.2 ทำให้ทราบอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าที่สภาวะการปั่นแห้ง

1.5.3 ทำให้สามารถออกแบบค่าของปัจจัยต่างๆของเครื่องซักผ้าที่สามารถลดการสั่นสะเทือนได้อย่างเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 บทนำ

ในการออกแบบและการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดนั้นจำเป็นต้องที่ศึกษาหลักการวิเคราะห์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ รวมทั้งการศึกษารายงานการวิจัยของผู้ที่ได้ศึกษามาในอดีต เพื่อให้ทราบถึงการประยุกต์ใช้ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และหลักการคิดวิเคราะห์ ที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้า ซึ่งการศึกษาและวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องซักผ้านั้นได้ถูกริเริ่มมาตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องซักผ้าให้เพิ่มขึ้นยิ่งๆเรื่อยไปและมีรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนเนื่องจากการปั่นแห้งของเครื่องซักผ้าดังต่อไปนี้

2.2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Hai-Wei Chen และ Qiu-Ju Zhang [2] ได้วิจัยเรื่อง "Stability analyses of a vertical axis automatic washing machine without balancer" โดยใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าที่สภาวะการปั่นแห้ง ซึ่งมุ่งเน้นศึกษาที่ค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงของระบบรองรับการสั่นสะเทือนในแนวแกนสัมผัส โดยใช้หลักการ Hopf bifurcation โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการหน่วงระบบรองรับการสั่นสะเทือนมีความเกี่ยวข้องกับความเร็วรอบของเครื่องซักผ้า มวลของผ้าที่จะนำมาซัก รัศมีไจเรชั่นของมวลที่ทำให้เกิดความไม่สมดุล ค่าสัมประสิทธิ์ของระบบรองรับการสั่นสะเทือนในแนวแกน และค่านิจของสปริง

S. Bae และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าอัตโนมัติที่มีการติดตั้งตัวทำสมดุลชนิดของเหลวในเรื่อง "Dynamic analysis of automatic washing machine with a hydraulic balancer" พบว่าแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากตัวทำสมดุลชนิดของเหลวนั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดเซนทรอยด์ของน้ำเกลือในตัวทำสมดุลชนิดของเหลวและตำแหน่งของจุดเซนทรอยด์ยังเป็นฟังก์ชั่นของการเยื้องศูนย์ของจุดกึ่งกลางรูปร่างของตัวทำสมดุลชนิดของเหลว นอกจากนั้นคณะผู้วิจัยยังได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับค่าของปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้านั้นพบว่าการเพิ่มมวลในอุปกรณ์ต่างๆของเครื่องซักผ้า การลดอัตราส่วนปริมาตรของน้ำเกลือกับตัวทำสมดุลชนิดของเหลว และการเพิ่มรัศมีภายในของตัวทำสมดุลชนิดของเหลว สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วยลดการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าในสภาวะปั่นแห้งได้

D.C. Conrad และ W.Soedel [4] ได้สรุปเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าที่สภาวะการปั่นแห้งในงานวิจัย "On the problem walk of automatic washing machines" ไว้ว่าการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดนั้นจะมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาอยู่ในขอบเขตที่สามารถระบุได้ที่สภาวะการปั่นแห้ง ส่วนเครื่องซักผ้าแบบถังนอนนั้นจะมีการเคลื่อนที่ที่ไม่สามารถระบุขอบเขตได้ และนอกจากนี้มวลที่ทำให้เกิดไม่สมดุล จะมีผลต่อการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาในสภาวะการปั่นแห้งอีกด้วย โดยค่าการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้านั้นจะแปรผันตรงกับค่าของมวลไม่สมดุล

ในปี ค.ศ. 2001 บริษัท ซัมซุง อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด ได้เข้าร่วมการประชุมทางวิชาการ 2001 Korea ADAMS User Conference ในหัวข้อ "A study on the dynamic behavior of an automatic washing machine" [5] ซึ่งทางบริษัท ซัมซุง อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของเครื่องซักผ้าโดยผ่านโปรแกรม MSC ADAMS และนำค่าความเร่งมาเปรียบเทียบกับค่าความเร่งจริงของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดที่ตำแหน่งเดียวกัน โดยพบว่าค่าความเร่งของแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของเครื่องซักผ้านั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเร่งของเครื่องซักผ้าจริง ดังนั้นแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์นี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อคาดคะเนลักษณะการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าจริงได้

F.F. Yap , N. Vahdati และ H. Harmoko [6] ได้ทำการวิจัยในเรื่อง "Design and analysis of vibration isolation systems for hard disk drives" ที่มุ่งเน้นไปในการพัฒนาระบบแยกความสั่นสะเทือนใน HDD ที่ใช้ในอุปกรณ์ทางทหาร การพัฒนาระบบแยกความสั่นสะเทือนนี้เป็นไปตามข้อกำหนดทางทหาร MIL-STD-810E ซึ่งพบว่าระบบแยกความสั่นสะเทือนนั้นทำให้ความถี่ธรรมชาติของระบบ HDD อยู่ในช่วง 10-20 Hz และสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบสัมพัทธ์มากกว่า 10 %

C. Cristalli , N. Paone และ R.M. Rodriguez [7] ได้ทำการศึกษาเรื่องคุณภาพสัญญาณแบบ real time ของหัววัดความสั่นสะเทือนแบบความเร่งและเครื่องวัดความสั่นสะเทือนแบบเลเซอร์ในงานวิจัยเรื่อง "Mechanical fault detection of electric motors by laser vibrometer and accelerometer measurements" โดยเครื่องวัดความสั่นสะเทือนแบบเลเซอร์วัดค่าการกระจัดและความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า ส่วนหัววัดความสั่นสะเทือนแบบความเร่งวัดความเร่งของมอเตอร์ไฟฟ้า โดยนำค่าการกระจัด ความเร็ว และความเร่งไปคำนวณค่า RMS ซึ่งได้ผลลัพธ์ว่าคุณภาพสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของค่าความเร็วมีความแม่นยำใกล้เคียงกับผลการทดสอบ ส่วนคุณภาพสัญญาณของค่าการกระจัดและความเร่งมีความแม่นยำน้อยเพราะมีการรบกวนจากสิ่งแวดล้อม การรบกวนจากสิ่งแวดล้อมของสัญญาณการกระจัดคือ ค่าความละเอียดของสัญญาณไม่เพียงพอ และค่าแอมพลิจูดมีค่าต่ำมาก ส่วนการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมของสัญญาณของความเร่งนั้นเกิดจากลักษณะการติดตั้งหัววัดความเร่งที่มอเตอร์ไฟฟ้า

Takayuki Koizumi, Nobutaka Tsujiuchi และ Yutaka Nishimura ได้ทำการศึกษาเรื่อง "Modeling and Vibration Analysis of a Drum type Washing Machine" [8] โดยได้สร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าเปรียบเทียบกับการเคลื่อนที่จริงของเครื่องซักผ้าชนิดแบบถังนอน พบว่าการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงของชุดรองรับการสั่นสะเทือนนั้นสามารถลดการสั่นสะเทือนในแนวหน้าตัดได้ถึง 20 เปอร์เซ็นต์และในแนวตั้งลดลงได้ถึง 35 เปอร์เซ็นต์ของถังและการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงของยางรองแท่นเครื่องซักผ้านั้นสามารถลดการสั่นสะเทือนในแนวหน้าตัดได้ถึง 40 เปอร์เซ็นต์และในแนวนอนได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ของโครงเครื่องซักผ้า

Chung-Hyo Jung, Chang-Sub Kim และ Yun-Ho Choi ได้ทำการศึกษาและวิจัยในเรื่อง "A Dynamic model and numerical study on the liquid balancer in an automatic washing machine" [9] โดยมุ่งเน้นการศึกษาพฤติกรรมของตัวทำชนิดของเหลวในเครื่องซักผ้า นั้นพบว่า การเพิ่มปริมาณน้ำเกลือนั้นสามารถลดการสั่นสะเทือนในช่วงความเร็วรอบไม่คงที่ได้ แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณน้ำเกลือจะต้องใช้เวลานานในการเข้าสู่สภาวะสมดุล นอกจากนั้นผู้วิจัยยังได้ทำการศึกษาการติดตั้งแผ่นโลหะไว้ที่กึ่งกลางของตัวทำสมดุลชนิดของเหลวนั้นจะทำให้เกิดความดันสมดุลสถิตมากขึ้นซึ่งส่งผลให้เกิดแรงต้านการสั่นสะเทือนได้ในช่วงความเร็วรอบคงที่

B.Kiray , A.K Tugcu และ I.T.Sumer ได้ศึกษาในเรื่อง "Formulation and implementation of parametric optimization of a washing machine suspension system" [10] โดยทำการออกแบบปัจจัยต่างๆของชุดรองรับการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าแบบถังนอน นอกจากนั้นยังได้สรุปว่า ระบบเชิงกลของเครื่องซักผ้าแบบถังนอนนั้นเป็นระบบเชิงกลแบบ underdameped อีกด้วย เนื่องจากเหตุผลที่ว่าการกระจัดในช่วงความเร็วรอบคงที่ไม่มีความสัมพันธ์กับความหนืดของระบบรองรับและแรงเสียดทานต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาวรรณกรรมที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นนั้นจะพบว่าการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้านั้นจะเกิดขึ้นสูงสุดที่สภาวะปั่นแห้ง และ วิธีการลดการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าในสภาวะปั่นแห้งซึ่งมีสองแนวทาง คือ การเพิ่มสัมประสิทธิ์การหน่วงของระบบรองรับให้แก่เครื่องซักผ้า [8] และการเพิ่มขนาดของมวลตะกร้าใส่ผ้า ถัง และตัวทำสมดุลชนิดของเหลว [3] ที่สามารถลดการสั่นสะเทือนให้แก่เครื่องซักผ้าได้ นอกจากนั้นยังทำให้เข้าใจพฤติกรรมของตัวทำสมดุลชนิดของเหลวที่จะสร้างแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพื่อลดแรงที่เกิดจากความไม่สมดุลขณะปั่นแห้งและยังเป็นเป็นแนวทางในการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของตัวทำสมดุลชนิดของเหลวกับแบบจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องซักผ้าอีกด้วย แต่จากการศึกษาวรรณกรรมที่กล่าวมานั้นยังพบว่าส่วนมากนั้นการวัดค่าความสั่นสะเทือนจะเป็นเพียงแกนเดียวเท่านั้น และยังมีปัจจัยบางปัจจัยที่ไม่ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยนั้นที่สามารถลดการสั่นสะเทือนลงได้ อาทิเช่น ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วง มวลของตัวทำสมดุลชนิดของเหลว เป็นต้น จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าในช่วงสภาวะปั่นแห้งในแกน X, Y และ Z และทำการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าเพิ่มเติมอีกเช่นกัน ซึ่งจากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จึงเป็นที่มาของหัวข้อในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
หลักการและทฤษฎี

3.1 บทนำ

ในการวิจัยพัฒนาประสิทธิภาพของเครื่องยนต์หลากหลายประเภทและสิ่งก่อสร้างต่างๆ อาทิ เช่น เครื่องยนต์สำหรับยานพาหนะ เครื่องยนต์เจ็ท กระสวยอวกาศ สะพาน มอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องปั่นไฟฟ้า อาคารระฟ้า เป็นต้น จะมีระบบทางกลมาเกี่ยวข้องเสมอ โดยระบบทางกลนี้จะมีพลังงานศักย์และพลังงานจลน์เข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งเป็นต้นกำเนิดของการสั่นสะเทือนเชิงกลในปัจจุบันปัญหาที่เกิดจากการสั่นสะเทือนเชิงกลนี้ได้มีการมุ่งเน้นศึกษามากขึ้น เช่น ปัญหาจากการสั่นพ้อง (resonance) ของเครื่องจักรที่มีการหมุนที่เกิดจากโรเตอร์มีความไม่สมดุล นอกจากนี้ยังมีปัญหาที่เกิดจากการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงกระตุ้นภายใน (internal excitation) เช่น การพังทลายของสะพานแขวนทาโคมาในเดือนพฤศจิกายน ปี ค.ศ.1970 ที่มลรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา และการกระพือของปีกเครื่องบิน

ลักษณะการสั่นสะเทือนนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นแบ่งออกสองประเภทโดยใช้ระดับความอิสระเป็นเกณฑ์ ซึ่งประเภทที่หนึ่งคือ ระบบที่มีระดับความอิสระเท่ากับหนึ่ง (single degree of freedom –SDOF) ซึ่งระบบนี้จะมีแกนอิสระเพียงแค่หนึ่งแกนและประกอบด้วย พลังงานจลน์อิสระหนึ่งค่าที่เกิดขึ้นจากมวล พลังงานศักย์อิสระหนึ่งค่าที่เกิดขึ้นจากสปริง และการเสื่อมสลายของพลังงานอีกหนึ่งค่าที่เกิดขึ้นจากตัวหน่วง ส่วนประเภทที่สองคือ ระบบที่มีระดับความอิสระมากกว่าหนึ่ง (Multiple degree of freedom-MDOF) จะมีความซับซ้อนมากกว่าระบบที่มีระดับความอิสระเท่ากับหนึ่ง เพราะจะมีแนวแกนอิสระมากกว่าหนึ่งและพลังงานต่างๆที่เกิดขึ้นแก่ระบบมากกว่าหนึ่งค่า ยกตัวอย่างระบบที่มีระดับความอิสระมากกว่าหนึ่ง เช่น ระบบการสั่นสะเทือนของเชือก คานยาว (longitudinal bars) เพลาที่รองรับแรงบิด (torsional shaft) เป็นต้น

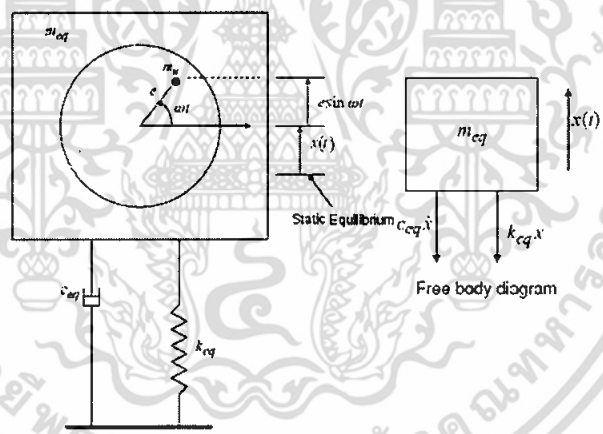
จากที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าระบบต่างๆที่อยู่รอบๆตัวเรานั้นล้วนเกี่ยวข้องกับระบบการสั่นสะเทือนเชิงกลแทบทั้งนั้น หากไม่มีการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนเชิงกลในการออกแบบสิ่งต่างอาจจะเกิดความเสียหายอย่างมากได้ อาทิ เช่น ตึกอาคารที่ไม่ได้ออกแบบเพื่อรองรับในการเกิดแผ่นดินไหว ดังนั้นการศึกษาความรู้ในด้านการสั่นสะเทือนเชิงกลจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ความไม่สมดุลขณะทำการหมุน

ในเครื่องจักรหมุนแทบทุกชนิดจะเกิดความไม่สมดุลขณะทำการหมุน เพราะว่า จุดศูนย์กลางของการหมุนจะเยื้องศูนย์กับจุดศูนย์กลางมวล ตัวอย่างเครื่องจักรที่เกิดความไม่สมดุลขณะทำการหมุน เช่น มอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ เทอร์ไบน์ เป็นต้น โดยถึงแม้ว่าค่าการเยื้องศูนย์ (eccentricity) จะมีค่าเล็กน้อยแต่ก็ก่อให้เกิดขนาดของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมาก เพราะว่า ขนาดของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางแปรผันกับกำลังสองของความเร็วเชิงมุม นอกจากนั้นความไม่สมดุลขณะทำการหมุนยังเปรียบเสมือนมีแรงกระทำจากภายนอกในลักษณะ sinusoidal อีกด้วย และอาจนำไปสู่การสั่นสะเทือนแบบสั่นพ้องอีกด้วย

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นว่ามวลที่ทำให้เกิดความไม่สมดุล m_u จะมีค่าการเยื้องศูนย์ e และมีความเร็วเชิงมุมเท่ากับ ω โดยมวลทั้งหมด m_{eq} นั้นได้ทำการรวมค่ามวลที่ทำให้เกิดความไม่สมดุล m_u ไว้ด้วย ดังนั้นจึงเขียนแผนผังอิสระได้ออกมาดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบสปริง-มวล-ตัวหน่วงที่มีมวลไม่สมดุล

จากรูปที่ 3.1 ความเร่งของมวล $(m_{eq} - m_u)$ เท่ากับ $\ddot{x}$ ส่วนการกระจัดของมวลที่ทำให้เกิดความไม่สมดุลเท่ากับ $x + e\sin\omega t$ และจากกฎข้อที่สองของนิวตันจะได้

$$-k_{eq} - c_{eq}\dot{x} = (m_{eq} - m_u)\ddot{x} + m_u \frac{d^2}{dt^2}(x + e\sin\omega t)$$

$$-k_{eq} - c_{eq}\dot{x} = m_{eq}\ddot{x} - m_u\ddot{x} + m_u\ddot{x} + m_u e\omega^2 \sin\omega t$$

$$m_{eq}\ddot{x} + c_{eq}\dot{x} + k_{eq}x = m_u e\omega^2 \sin\omega t \qquad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ “ค่าคำตอบ particular” $x_p(t)$ ที่แสดงดังสมการที่ (2)

$$m_{eq}\ddot{x}_p + c_{eq}\dot{x}_p + k_{eq}x_p = f_0 \sin \omega t \tag{2}$$

โดยสมมติให้

$$x_p(t) = A\sin(\omega t - \phi) \tag{3}$$

นำสมการที่ (3) แทนลงในสมการที่ (2) จะได้

$$-m_{eq}\omega^2 A\sin(\omega t - \phi) + c_{eq}\omega A\cos(\omega t - \phi) + k_{eq}A\sin(\omega t - \phi) = f_0 \sin \omega t$$

หรือ

$$\left[\left(k_{eq} - m_{eq}\omega^2\right)A\cos\phi + c_{eq}\omega A\sin\phi\right] + \left[c_{eq}\omega A\cos\phi - \left(k_{eq} - m_{eq}\omega^2\right)A\sin\phi\right]\cos\omega t = f_0 \sin \omega t \tag{4}$$

ทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของ $\sin\omega t$ และ $\cos\omega t$ จะได้สมการดังนี้

$$(k_{eq} - m_{eq}\omega^2)A\cos\phi + c_{eq}\omega A\sin\phi = f_0 \tag{5}$$

และ

$$c_{eq}\omega A\cos\phi - (k_{eq} - m_{eq}\omega^2)A\sin\phi = 0 \tag{6}$$

นำสมการที่ (5) และสมการที่ (6) มาเขียนในรูปเมทริกซ์

$$\begin{bmatrix} k_{eq} - \omega^2 m_{eq} & c_{eq}\omega \\ c_{eq}\omega & -(k_{eq} - \omega^2 m_{eq}) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} A\cos\phi \\ A\sin\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} A\cos\phi \\ A\sin\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{eq} - \omega^2 m_{eq} & c_{eq}\omega \\ c_{eq}\omega & -(k_{eq} - \omega^2 m_{eq}) \end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix} f_0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$\begin{bmatrix} A\cos\phi \\ A\sin\phi \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta}\begin{bmatrix} -(k_{eq}-\omega^2 m_{eq}) & c_{eq}\omega \\ c_{eq}\omega & k_{eq}-\omega^2 m_{eq} \end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix} f_0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

โดยที่

$$\Delta = -(k_{eq}-\omega^2 m_{eq})^2 - (c_{eq}\omega)^2 \tag{8}$$

จากสมการที่ (7) และ (8) จะได้

$$A\cos\phi = \frac{\left(k_{eq}-\omega^2 m_{eq}\right) f_0}{(k_{eq}-\omega^2 m_{eq})^2 + (c_{eq}\omega)^2} \tag{9}$$

$$A\sin\phi = \frac{c_{eq}\omega f_0}{(k_{eq}-\omega^2 m_{eq})^2 + (c_{eq}\omega)^2} \tag{10}$$

ดังนั้นค่าแอมพลิจูด A และค่า ϕ จึงหาได้ดังสมการ

$$A = \sqrt{\left(A\cos\phi\right)^2 + \left(A\sin\phi\right)^2} = \frac{f_0}{\sqrt{(k_{eq}-\omega^2 m_{eq})^2 + (c_{eq}\omega)^2}} \tag{11}$$

และ

$$\tan\phi = \frac{A\sin\phi}{A\cos\phi} = \frac{c_{eq}\omega}{(k_{eq}-\omega^2 m_{eq})} \tag{12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (11) และ (12) ให้นำค่า k_{eq} มาหารทั้งเศษและส่วนทางด้านขวาของสมการจะได้สมการใหม่ดังนี้

$$A = \frac{f_0 / k_{eq}}{\sqrt{(k_{eq} - \omega^2 \frac{m_{eq}}{k_{eq}})^2 + \left(\frac{c_{eq}\omega}{k_{eq}}\right)^2}} \tag{13}$$

และ

$$\tan\phi = \frac{c_{eq}\omega / k_{eq}}{\left[1 - \omega^2\left(\frac{m_{eq}}{k_{eq}}\right)\right]} \tag{14}$$

กำหนดให้ r คืออัตราส่วนความถี่ โดยเท่ากับ

$$r = \frac{excitation\ frequency}{natural\ frequency} = \frac{\omega}{\omega_n} \tag{15}$$

จากนั้นนำสมการที่ (15) แทนลงในสมการที่ (13) และ (14) จะได้

$$\frac{A}{f_0 / k_{eq}} = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \tag{16}$$

และ

$$\tan\phi = \frac{2\xi r}{1 - r^2} \tag{17}$$

หลังจากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์จากสมการที่ (1) เปรียบเทียบกับสมการที่ (2) ซึ่งจะพบว่า

$$f_0 = m_u e \omega^2 \tag{18}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

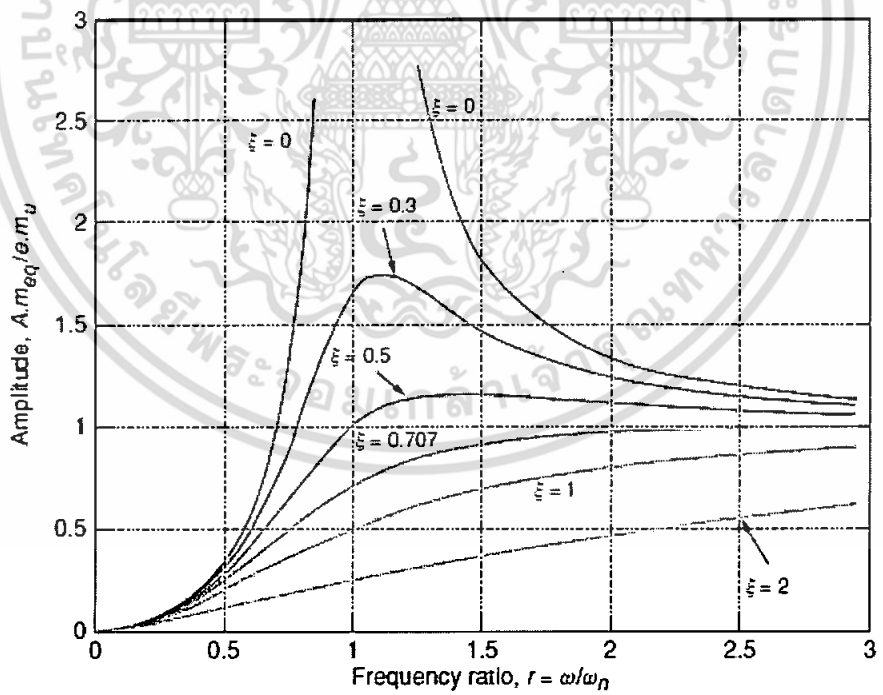
นำค่า k_{eq} มาหารทั้งสองข้างของสมการที่ (18) จะได้

$$\frac{f_0}{k_{eq}} = \frac{m_u e\omega^2}{k_{eq}} = \frac{em_u}{m_{eq}} \frac{m_{eq}\omega^2}{k_{eq}} = \frac{em_u}{m_{eq}} \frac{\omega^2}{\omega_n^2} = \frac{em_u}{m_{eq}} r^2 \tag{19}$$

นำสมการที่ (19) แทนในสมการที่ (16) จะได้

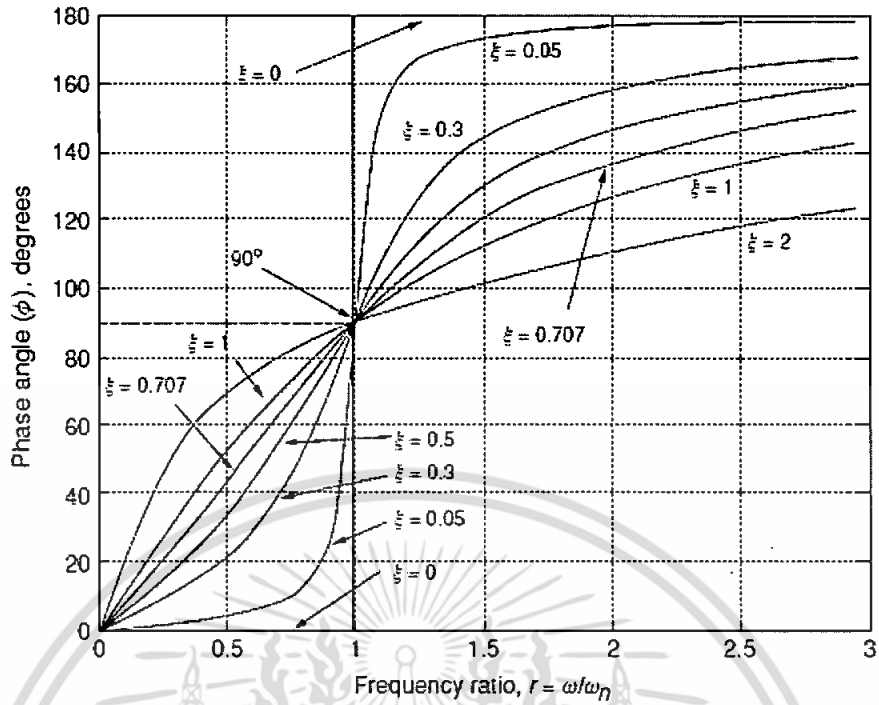
$$\frac{m_{eq}}{m_u} \frac{A}{e} = \frac{r^2}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \tag{20}$$

รูปที่ 3.2 แสดงถึงขนาดของแอมพลิจูดที่สภาวะคงที่ เมื่อมีความไม่สมดุลขณะทำการหมุนที่อัตราความหน่วงต่างๆ ส่วนค่าของมุมเฟส ϕ ที่สภาวะคงที่ เมื่อมีความไม่สมดุลจะถูกแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ขนาดของแอมพลิจูดที่สภาวะคงที่ เมื่อมีความไม่สมดุลขณะทำการหมุนที่อัตราความหน่วงต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความถี่ [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ค่ามุมเฟสที่อัตราความหน่วงต่างๆเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความถี่ [12]

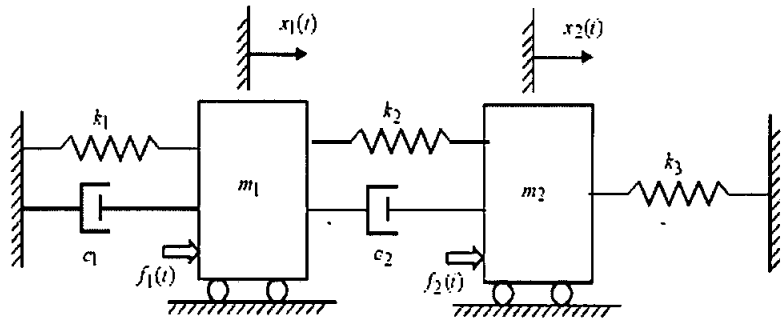
จากรูปที่ 3.3 เป็นกราฟระหว่างค่ามุมเฟสที่อัตราความหน่วงต่างๆเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความถี่ จากกราฟจะพบว่า

1. เมื่อมุมเฟส $\phi = 90^0$ ทุกๆอัตราส่วนความหน่วงโดยค่าอัตราส่วนความหน่วงต้องมากกว่าศูนย์ จะมีค่า $\omega = \omega_n$ ซึ่งหมายถึงที่มุม เฟส $\phi = 90^0$ ของทุกๆอัตราส่วนความหน่วงความถี่ของระบบ ω จะเท่ากับความถี่ธรรมชาติ ω_n ของระบบแบบไม่มีการหน่วง ($\xi = 0$)
2. มุมเฟสของระบบแบบไม่มีการหน่วงจะมีค่าเท่ากับ 0^0 และ 180^0 ก็ต่อเมื่อค่า $\omega < \omega_n$ และ $\omega > \omega_n$ ตามลำดับ ซึ่งหมายถึงระบบแบบไม่มีการหน่วงจะมีการเปลี่ยนเฟสอย่างทันทีทันได้จาก 0^0 เป็น 180^0

3.3 การสั่นสะเทือนเชิงกลที่มีระดับความอิสระเท่ากับสอง

ในการสั่นสะเทือนเชิงกลที่มีระดับความอิสระเท่ากับสอง นั้นหมายถึงจะมีแกนอิสระอยู่สองค่าในระบบเชิงกลนั้น ดังรูปที่ 3.4 ที่มีแกนอิสระอยู่สองแกนคือ แกน $x_1(t)$ และ $x_2(t)$ นอกจากนั้น ค่ามวล ค่าสปริง และแรงกระทำจากภายนอกมากกว่าหนึ่ง ดังนั้นจึงได้นำเวคเตอร์มาใช้ในการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ระบบเชิงกลที่มีระดับความอิสระเท่ากับสอง

จากรูปที่ 3.4 ค่า $x_1(t)$ และ $x_2(t)$ คือการกระจัดของระบบสามารถนำเขียนในรูปเวคเตอร์ได้ดังสมการ (21)

$$\mathbf{X}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \tag{21}$$

ดังนั้นความเร็วและความเร่งจึงหาได้ดังสมการนี้

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} \tag{22}$$

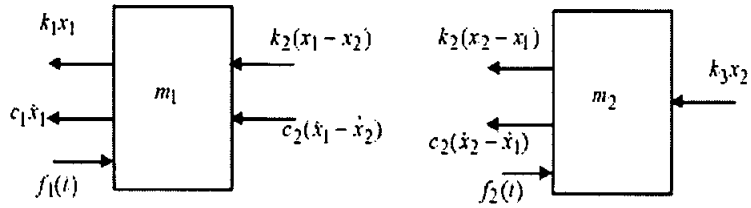
$$\ddot{\mathbf{X}}(t) = \begin{bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \end{bmatrix} \tag{23}$$

และจากรูปที่ 3.4 แรงจากภายนอก $f_1(t)$ และ $f_2(t)$ ก็จะถูกนำมาเขียนในรูปเวคเตอร์เช่นเดียวกัน ดังสมการที่ (24)

$$\mathbf{f}(t) = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \end{bmatrix} \tag{24}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 3.5 ผังวัตถุอิสระของระบบเชิงกลที่มีระดับความอิสระเท่ากับสอง

จากรูปที่ 3.5 พิจารณาผังวัตถุอิสระของมวล m_1 และ m_2 หลังจากนั้นใช้กฎข้อที่สองของนิวตันจะได้สมการที่ (25) และ (26)

$$f_1(t)-k_1x_1-c_1\dot{x}_1-k_2(x_1-x_2)-c_2(\dot{x}_1-\dot{x}_2)=m_1\ddot{x}_1 \tag{25}$$

$$f_2(t)-k_3x_2-k_2(x_2-x_1)-c_2(\dot{x}_2-\dot{x}_1)=m_2\ddot{x}_2 \tag{26}$$

นำสมการที่ (25) และ (26) มาจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$m_1\ddot{x}_1+(c_1+c_2)\dot{x}_1-c_2\dot{x}_2+(k_1+k_2)x_1-k_2x_2=f_1(t) \tag{27}$$

และ

$$m_2\ddot{x}_2-c_2\dot{x}_1+c_2\dot{x}_2-k_2x_1+(k_2+k_3)x_2=f_2(t) \tag{28}$$

นำสมการที่ (27) และ (28) มาเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์จะได้

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} c_1+c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2+k_3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \end{bmatrix} \tag{29}$$

นำสมการที่ (29) มาเขียนในรูปสมการทั่วไปของระบบเชิงกลที่มีระดับความอิสระเท่ากับสองดังสมการที่ (30) ซึ่งจะอยู่ในรูปเมทริกซ์

$$\boldsymbol{M}\ddot{\mathbf{x}}+\boldsymbol{C}\dot{\mathbf{x}}+\boldsymbol{K}\mathbf{x}=\mathbf{f}(t) \tag{30}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
123122

เมื่อค่า $\boldsymbol{M}$, $\boldsymbol{C}$ และ $\boldsymbol{K}$ คือเมทริกซ์ของมวล ตัวหน่วงและความนิจของสปริงตามลำดับ โดยมีค่าดังสมการ

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \tag{31}$$

$$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \tag{32}$$

$$\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \tag{33}$$

3.4 ความถี่ธรรมชาติและ Mode shape

ความถี่ธรรมชาติของระบบเชิงกลที่มีระดับความอิสระเท่ากับสองนั้นจะใช้สมการที่(30) มาใช้กับระบบแบบไม่มีการหน่วง จึงทำให้ได้สมการในรูปดังนี้

$$\boldsymbol{M}\ddot{\mathbf{x}} + \boldsymbol{K}\mathbf{x} = 0 \tag{34}$$

เมื่อ

$$\mathbf{X}(t) = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} \sin(\omega t + \phi) \tag{35}$$

และ

$$\ddot{\mathbf{X}}(t) = -\omega^2 \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} \sin(\omega t + \phi) \tag{36}$$

นำสมการที่ (35) และ (36) แทนลงในสมการที่ (34) จะได้

$$(\boldsymbol{K} - \omega^2 \boldsymbol{M}) \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{37}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (37) จะพบว่าค่า A_1 และ A_2 ไม่สามารถเท่ากับศูนย์ได้ดังนั้น

$$\det(\boldsymbol{K} - \omega^2 \boldsymbol{M}) = 0 \tag{38}$$

จากสมการที่ (38) เป็นสมการ quadratic จึงทำให้ค่า ω นั้นมีสองค่าคือ ω_1 และ ω_2 ซึ่งหมายความว่าในระบบเชิงกลที่มีระดับความอิสระเท่ากับสองนั้นจะมีความถี่ธรรมชาติสองค่า โดยค่าความถี่ธรรมชาติแต่ละค่ามีความเกี่ยวข้องกับ mode shape และสมการของ mode shape สามารถหาได้ดังนี้

$$\boldsymbol{P}_i \begin{bmatrix} A_{1,i} \\ A_{2,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \; i = 1,2 \tag{39}$$

เมื่อ

$$\boldsymbol{P}_i = (\boldsymbol{K} - \omega_i^2 \boldsymbol{M}) = \begin{bmatrix} p_{11,i} & p_{12,i} \\ p_{21,i} & p_{22,i} \end{bmatrix}; \; i = 1,2 \tag{40}$$

นำสมการที่ (39) ลงไปแทนในสมการที่ (40) นั้นจะได้ดังสมการ

$$p_{11,i} A_{1,i} + p_{12,i} A_{2,i} = 0 \tag{41}$$

$$p_{21,i} A_{1,i} + p_{22,i} A_{2,i} = 0 \tag{42}$$

จากสมการที่ (41) และ (42) นั้นไม่สามารถหาคำตอบได้เพราะว่าสมการนั้นมีเพียงหนึ่งสมการแต่มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าถึงสองตัว ดังนั้นจึงได้กำหนดอัตราส่วนระหว่าง $A_{1,i}$ และ $A_{2,i}$ ดังนี้

$$\frac{A_{2,i}}{A_{1,i}} = -\frac{p_{11,i}}{p_{12,i}} \tag{43}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และให้ทำการกำหนดค่า $A_{1,i}$ หรือ $A_{2,i}$ ขึ้นเพียงหนึ่งค่า โดยส่วนมากจะกำหนดค่า $A_{1,i} = 1$ ดังนั้นจึงทำให้

$$A_{2,i} = -\frac{p_{11,i}}{p_{12,i}} \tag{44}$$

จากที่กล่าวมาจึงทำให้ได้เวคเตอร์ของ mode shape ที่ความถี่ ω เท่ากับความธรรมชาติ ω_n ดังสมการที่ (31)

$$\mathbf{V}_i = \begin{bmatrix} A_{1,i} \\ A_{2,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -\dfrac{p_{11,i}}{p_{12,i}} \end{bmatrix} \; ; \; i = 1,2 \tag{45}$$

3.5 ผลการตอบสนองแบบเสรีของระบบเชิงกลที่มีระดับความอิสระเท่ากับสองแบบไม่มีตัวหน่วง

เนื่องจากระบบเชิงกลที่มีระดับความอิสระเท่ากับสองแบบไม่มีตัวหน่วงนั้นจึงทำให้สมการดิฟเฟอร์เรนเชียลเหลือตัวแปรดังนี้

$$\boldsymbol{M}\ddot{\mathbf{x}} + \boldsymbol{K}\mathbf{x} = 0 \tag{46}$$

เมื่อ

$$\mathbf{X}(t) = \alpha_1 \mathbf{V}_1 \sin(\omega_1 t + \phi_1) + \alpha_2 \mathbf{V}_2 \sin(\omega_2 t + \phi_2) \tag{47}$$

จากสมการที่ (45) $\mathbf{V}_1$ และ $\mathbf{V}_2$ คือเวคเตอร์รูปแบบฐานนิยมโดยค่าทั้งสองนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่ธรรมชาติ ω_1 และ ω_2 ตามลำดับ ส่วนค่า α_1, α_2, ϕ_1 และ ϕ_2 เป็นค่าคงที่โดยขึ้นอยู่กับสภาวะการเริ่มต้นของการกระจัด $\mathbf{X}(0)$ และความเร็ว $\dot{\mathbf{X}}(0)$
ที่สภาวะเริ่มต้น $t = 0$ จะได้การกระจัดที่จุดเริ่มต้นดังนี้

$$\mathbf{X}(0) = \alpha_1 \mathbf{V}_1 \sin\phi_1 + \alpha_2 \mathbf{V}_2 \sin\phi_2 \tag{48}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$\mathbf{X}(0) = \boldsymbol{Q}\begin{bmatrix} \alpha_1 \sin\phi_1 \\ \alpha_2 \sin\phi_2 \end{bmatrix} \tag{49}$$

เมื่อ $\boldsymbol{Q}$ เป็นเมทริกซ์ขนาด 2 x 2 ดังนี้

$$\boldsymbol{Q} = [\mathbf{V}_1 \quad \mathbf{V}_2] \tag{50}$$

ที่สภาวะเริ่มต้น $t = 0$ จะได้ความเร็วที่จุดเริ่มต้นดังนี้

$$\dot{\mathbf{X}}(0) = \alpha_1 \mathbf{V}_1\, \omega_1 \cos\phi_1 + \alpha_2 \mathbf{V}_2\, \omega_2 \sin\phi_2 \tag{51}$$

หรือสามารถเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\dot{\mathbf{X}}(0) = \boldsymbol{Q}\begin{bmatrix} \omega_1\alpha_1 \sin\phi_1 \\ \omega_2\alpha_2 \sin\phi_2 \end{bmatrix} \tag{52}$$

3.6 ผลการตอบสนองแบบบังคับของระบบเชิงกลที่มีระดับความอิสระเท่ากับสองแบบไม่มีตัวหน่วงภายใต้แรงภายนอกที่มากระทำในลักษณะ sinusoidal

จากระบบเชิงกลที่มีระดับความอิสระเท่ากับสองแบบไม่มีตัวหน่วงภายใต้แรงภายนอกที่มากระทำในลักษณะ sinusoidal นั้นจึงทำให้สมการดิฟเฟอร์เรนเชียลเหลือตัวแปรดังนี้

$$\boldsymbol{M}\ddot{\mathbf{x}} + \boldsymbol{K}\mathbf{x} = \mathbf{f}(t) \tag{53}$$

หรือสามารถเขียนในรูปเมทริกซ์ได้

$$\boldsymbol{M}\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \boldsymbol{K}\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{10} \\ f_{20} \end{bmatrix} \sin\omega t \tag{54}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากผลตอบสนองในส่วน particular ในรูปสมการเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} \sin \omega t \tag{55}$$

นำสมการที่ (55) แทนลงใน (54) จะได้ดังสมการดังนี้

$$(\boldsymbol{K} - \omega^2 \boldsymbol{M}) \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{10} \\ f_{20} \end{bmatrix} \tag{56}$$

3.7 การสั่นสะเทือนแบบเสรีของระบบเชิงกลที่มีระดับความอิสระเท่ากับสองแบบมีตัวหน่วงที่ไม่มีแรงจากภายนอกมากระทำ

จากระบบเชิงกลที่มีระดับความอิสระเท่ากับสองแบบมีตัวหน่วงที่ไม่มีแรงจากภายนอกมากระทำนั้นจึงทำให้สมการดิฟเฟอร์เรนเชียลเหลือตัวแปรดังนี้

$$\boldsymbol{M}\ddot{\mathbf{x}} + \boldsymbol{C}\dot{\mathbf{x}} + \boldsymbol{K}\mathbf{x} = 0 \tag{57}$$

เมื่อ $\boldsymbol{M}$, $\boldsymbol{C}$ และ $\boldsymbol{K}$ คือเมทริกซ์ของมวล สัมประสิทธิ์ความหนืดและค่านิจของสปริงตามลำดับ โดยที่สภาวะการเริ่มต้นการกระจัด $x(0)$ และความเร็ว $\dot{x}(0)$ ไม่เท่ากับศูนย์ และจากสมการของ Boyce และ DriPima เขียนในรูปเมทริกซ์จะได้

$$\mathbf{X}(t) = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} e^{st} \tag{58}$$

นำสมการที่ (58) แทนลงในสมการที่ (57) จะได้

$$(\boldsymbol{M}s^2 + \boldsymbol{C}s + \boldsymbol{K}) \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{59}$$

ดังนั้นค่าดีเทอร์มิแนนต์ของ $(\boldsymbol{M}s^2 + \boldsymbol{C}s + \boldsymbol{K})$ จึงเท่าให้เท่ากับศูนย์

$$\det(\boldsymbol{M}s^2 + \boldsymbol{C}s + \boldsymbol{K}) = 0 \tag{60}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (61) นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นอีก 2 กรณี โดย

กรณีที่ 1 $\boldsymbol{C} = 0$

จากค่า $s = \pm j\omega$ ให้แทนในสมการที่(61)ซึ่งจะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\det(-\boldsymbol{M}\omega^2 + \boldsymbol{K}) = 0 \tag{61}$$

กรณีที่ 2 $\boldsymbol{C} \neq 0$

สมมติให้

$$\mathbf{y}_1 = \mathbf{x}(t) \text{ และ } \mathbf{y}_2 = \dot{\mathbf{x}}(t) \tag{62}$$

และ

$$\dot{\mathbf{y}}_1 = \mathbf{y}_2 \tag{63}$$

จากสมการที่ (62) และ (63) แทนลงในสมการที่ (57) จะได้

$$\dot{\mathbf{y}}_2 = \ddot{\mathbf{x}} = -\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{K}\,\mathbf{x}(t) - \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{C}\,\mathbf{x}(t)$$

$$= -\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{K}\,\mathbf{y}_1(t) - \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{C}\,\mathbf{y}_2(t) \tag{64}$$

จากสมการที่ (64) นั้นสามารถลดรูปสมการให้เหลือเพียง

$$\dot{\mathbf{y}}(t) = \boldsymbol{R}\,\mathbf{y}(t) \tag{65}$$

เมื่อ

$$\mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1(t) \\ \mathbf{y}_2(t) \end{bmatrix} \tag{66}$$

และ

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \boldsymbol{I} \\ -\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{K} & -\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{C} \end{bmatrix} \tag{67}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเมทริกซ์ $\boldsymbol{R}$ นั้นจะถูกเรียกว่าค่า Eigenvalue ซึ่งค่า Eigenvalue นี้จะเป็นได้ทั้งจำนวนจริงหรือจำนวนเชิงซ้อนก็ได้ ซึ่งคำตอบในรูปแบบจำนวนเชิงซ้อนจะเป็นลักษณะ conjugate ดังสมการ

$$-\sigma \pm j\omega = -\xi\omega_n \pm \omega_n\sqrt{1-\xi^2}\,j \tag{68}$$

เมื่อ ξ และ ω_n คือค่าอัตราส่วนความหน่วงและความถี่ธรรมชาติแบบไม่มีตัวหน่วง ดังนั้น

$$\omega_n = \sqrt{\sigma^2+\omega^2} \tag{69}$$

และ

$$\xi = \frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2+\omega^2}} \tag{70}$$

3.8 ผลการตอบสนองในสภาวะคงที่ของระบบเชิงกลที่มีระดับความอิสระเท่ากับสองแบบมีตัวหน่วงและมีแรงกระทำจากภายนอกแบบ sinusoidal

จากสมการที่ (16) รูปสมการทั่วไปของระบบเชิงกลที่มีระดับความอิสระเท่ากับสองที่มีแรงกระทำจากภายนอกแบบ sinusoidal จะแสดงได้ดังนี้

$$\boldsymbol{M}\ddot{\mathbf{x}} + \boldsymbol{C}\dot{\mathbf{x}} + \boldsymbol{K}\mathbf{x} = \mathbf{f}(t) \tag{71}$$

โดยที่

$$\mathbf{f}(t) = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \end{bmatrix} \tag{72}$$

$f_1(t)$ และ $f_2(t)$ ถูกกำหนดให้เป็นแรงกระทำที่มีลักษณะ sinusoidal จึงสามารถเขียนในรูป sine หรือ cosine ได้ดังสมการ

$$f_1 = \hat{\boldsymbol{F}}_1 \sin(\omega t + \psi_1) \quad \text{และ} \quad f_2 = \hat{\boldsymbol{F}}_2 \sin(\omega t + \psi_2) \tag{73}$$

หรือ

$$f_1 = \hat{\boldsymbol{F}}_1 \cos(\omega t + \psi_1) \quad \text{และ} \quad f_2 = \hat{\boldsymbol{F}}_2 \cos(\omega t + \psi_2) \tag{74}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือเขียนในรูปเมทริกซ์ได้

$$\mathbf{f}(t)=\begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_1 \\ \boldsymbol{F}_2 \end{bmatrix}e^{j\omega t} \quad ; j=\sqrt{-1} \tag{75}$$

เมื่อ

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_1 \\ \boldsymbol{F}_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \hat{F}_1 e^{j\psi 1} \\ \hat{F}_2 e^{j\psi 2} \end{bmatrix} \tag{76}$$

กำหนดให้ผลตอบสนองในสภาวะคงที่ในรูปเมทริกซ์ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_1 \\ \boldsymbol{X}_2 \end{bmatrix}e^{j\omega t} \tag{77}$$

ดังนั้น

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_1 \\ \boldsymbol{X}_2 \end{bmatrix}je^{j\omega t} \tag{78}$$

และ

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_1 \\ \boldsymbol{X}_2 \end{bmatrix}(-\omega^2)e^{j\omega t} \tag{79}$$

นำสมการที่ (75) และสมการที่ (77) ถึง (79) แทนลงในสมการที่ (71) จะได้

$$\left[(\boldsymbol{K}-\omega^2\boldsymbol{M})+j\boldsymbol{C}\omega\right]\begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_1 \\ \boldsymbol{X}_2 \end{bmatrix}e^{j\omega t}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_1 \\ \boldsymbol{F}_2 \end{bmatrix}e^{j\omega t}$$

หรือ

$$\left[(\boldsymbol{K}-\omega^2\boldsymbol{M})+j\boldsymbol{C}\omega\right]\begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_1 \\ \boldsymbol{X}_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_1 \\ \boldsymbol{F}_2 \end{bmatrix} \tag{80}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_1 \\ \boldsymbol{X}_2 \end{bmatrix} = \left[(\boldsymbol{K} - \omega^2 \boldsymbol{M}) + j\boldsymbol{C}\omega \right]^{-1} \begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_1 \\ \boldsymbol{F}_2 \end{bmatrix} \tag{81}$$

โดยค่าผลตอบสนองสามารถเขียนออกมาในรูปของฟังก์ชั่น sine หรือ cosine ได้ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \sin(\omega t + \phi_1) \\ A_2 \sin(\omega t + \phi_2) \end{bmatrix} \tag{82}$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \cos(\omega t + \phi_1) \\ A_2 \cos(\omega t + \phi_2) \end{bmatrix} \tag{83}$$

เมื่อ

$$A_1 = |\boldsymbol{X}_1| \tag{84}$$

$$A_2 = |\boldsymbol{X}_2| \tag{85}$$

$$\phi_1 = \angle \boldsymbol{X}_1 \tag{86}$$

$$\phi_2 = \angle \boldsymbol{X}_2 \tag{87}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ค่าความสั่นสะเทือนในแนวแกนต่างๆและการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าแบบใบพัด

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอถึงการศึกษาค่าความสั่นสะเทือนในแนวแกนต่างๆของเครื่องซักผ้าที่สภาวะปั่นแห้งจากการวัดค่าความสั่นสะเทือนจากชุดเครื่องมือวัดและการประยุกต์ใช้กับทฤษฎีพื้นฐานทางด้านการสั่นสะเทือนเชิงกล เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดในสภาวะปั่นแห้งที่เงื่อนไขต่างๆ อาทิ เช่น การปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของตัวหน่วงเพื่อศึกษาขนาดความเร่งทั้งในแกน X, Y และ Z โดยการจำลองเชิงตัวเลขนี้เป็นการจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดขนาดความจุ 9.5 กิโลกรัม ซึ่งจะมีรายละเอียดในการจำลองเชิงตัวเลขดังนี้

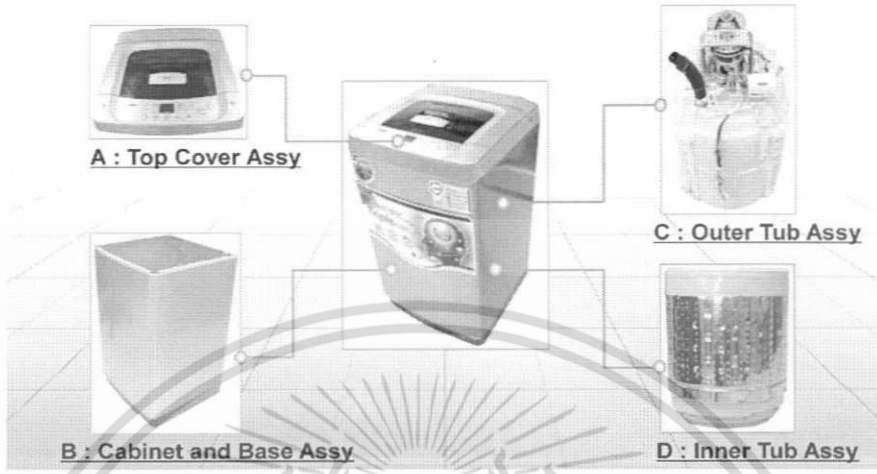
4.2 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดและค่าเริ่มต้นของปัจจัยต่างๆ

เครื่องซักผ้าแบบใบพัดนั้นจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่สำคัญหลักๆ ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งชิ้นส่วนหลักทั้งสี่จะมีหน้าที่แตกต่างกันไป โดยมีรายละเอียดดังนี้

- ชิ้นส่วนประกอบฝาบน (Top cover assy) ซึ่งจะถูกแสดงในชิ้นส่วน A ของรูปที่ 4.1 โดยภายในชิ้นส่วนฝาบนนี้จะประกอบไปด้วยแผงวงจรอิเลคทรอนิกส์ที่มีโปรแกรมการทำงานต่างๆของเครื่องซักผ้า
- ชิ้นส่วนด้านโครงสร้าง (Cabinet and base assy) ซึ่งจะถูกแสดงในชิ้นส่วน B ของรูปที่ 4.1 ซึ่งจะทำหน้าที่เชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆเข้าด้วยกันและเป็นฐานสำหรับการวางที่พื้น
- ชิ้นส่วนด้านถังภายนอก (Outer tub assy) ซึ่งจะถูกแสดงในชิ้นส่วน C ของรูปที่ 4.1 จะประกอบไปด้วยชิ้นส่วนต่างๆมากมายทั้งที่ทำหน้าที่เป็นชุดขับเคลื่อน เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า คลัตช์ พูลเล่ย์ และ สายพาน นอกจากนั้นยังประกอบด้วยชุดท่ออ่อนสำหรับระบายน้ำทิ้งจากการซักผ้าอีกด้วย
- ชิ้นส่วนด้านถังภายใน (Inner tub assy) ซึ่งจะถูกแสดงในชิ้นส่วน D ของรูปที่ 4.1 จะประกอบด้วยชุดตัวทำสมดุลชนิดของเหลวทำหน้าที่ในการสร้างแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้กับเครื่องซักผ้าเพื่อเป็นแรงต้านการเกิดความไม่สมดุลขณะทำการหมุน นอกจากนั้นยังประกอบด้วยถังแสตนเลสเพื่อไว้บรรจุผ้าที่ต้องการทำการซักด้วย



รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบหลักต่างๆของเครื่องซักผ้าแบบใบพัด
(ด้วยความอนุเคราะห์ข้อมูลจากบริษัท แอลจี อิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด)

ตารางที่ 4.1 จะเป็นตารางค่าเริ่มต้นของปัจจัยต่างๆของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดขนาดความจุ 9.5 กิโลกรัม โดยค่าเริ่มต้นของปัจจัยต่างๆนั้นเป็นข้อมูลจากบริษัท แอลจี อิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งมวลของผ้าที่ซักนั้นทางผู้ผลิตจะกำหนดปัจจัยนี้ให้มีพฤติกรรมเสมือนผ้าที่ต้องการซักที่ไปรวมตัวอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของเครื่องซักผ้าขณะปั่นแห้ง ที่จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนมากที่สุด โดยมวลของผ้าที่ซักนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดความจุของเครื่องซักผ้า ถ้าขนาดความจุมากขึ้นก็จะต้องเพิ่มค่ามวลของผ้าที่ซักขึ้นด้วย สำหรับในการออกแบบและทดสอบเครื่องซักผ้าแบบใบพัดขนาดความจุ 9.5 กิโลกรัมนั้น ทางผู้ผลิตจะกำหนดให้ใช้มวลทดลองที่มีขนาดมวลเท่ากับ 1.2 กิโลกรัมแทนมวลของผ้าที่ใช้ซัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าเริ่มต้นของปัจจัยต่างๆของเครื่องซักผ้าขนาดความจุ 9.5 กิโลกรัม

ค่าเริ่มต้นของปัจจัยต่างๆของเครื่องซักผ้า	
มวลของตะกร้าใส่ผ้า	4 กิโลกรัม
มวลของถัง	5 กิโลกรัม
มวลของมอเตอร์	7 กิโลกรัม
มวลของระบบส่งกำลัง	5 กิโลกรัม
มวลทดลอง	1.2 กิโลกรัม
มวลของตัวทำสมดุลชนิดของเหลว (ไม่รวมมวลของน้ำเกลือ)	1.1 กิโลกรัม
ค่านิจของสปริง	2.5 นิวตัน / มิลลิเมตร
ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วง	0.1 นิวตัน - วินาที/มม.

4.3 การวัดค่าความสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าในสภาวะปั่นแห้ง

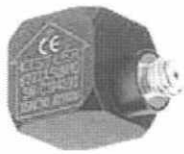
4.3.1 อุปกรณ์ต่างๆและโปรแกรมประมวลผลที่ใช้ในการวัดค่าความสั่นสะเทือน

การวัดค่าความสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าที่สภาวะปั่นแห้งนั้นจะต้องทำการวัดค่าความเร่งที่ตำแหน่งเดียวกับแบบจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งตำแหน่งในการวัดความเร่งของเครื่องซักผ้าและแบบจำลองจะถูกแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.15 - 4.17 ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความเร่งนั้นประกอบไปด้วยเซนเซอร์วัดค่าความเร่งการ์ดรวบรวมข้อมูลรุ่น DEWE - 43 และคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการบันทึกข้อมูล ซึ่งรูปที่ 4.2 และ 4.3 จะแสดงการ์ดรวมรวมข้อมูลและรายละเอียดของเซนเซอร์วัดค่าความเร่งที่ใช้ในการวัด ตามลำดับ

รูปที่ 4.2 การ์ดรวบรวมข้อมูล (Data acquisition) รุ่น DEWE - 43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ceramic Shear TEDS Accelerometer, 10 g



▸ Downloads

Specifications			Type 8772A10T
Model (Single axis or triaxial)			Single axis linear
Range		g	±10
Sensitivity		mV/g	500
Frequency Range		Hz	1...5000
Resolution, Threshold		mgrms	0.5
Temp. coef. of sensitivity		%/°C	-0.1
Transverse Sensitivity		%	<5
Non linearity		% FSO	±1
Shock	0.2 ms half sine	g	7000
Operating temperature range		°C	0...65
Supply		mA	2...20
Voltage		V	20...30
Housing/Base	type		Hard anodized Aluminium
Sealing			epoxy
Ground isolation			Yes
Mass		g	8
Connector			10-32 neg.
PiezoSmart (TEDS)			yes
Diameter		mm	12.7
Height		mm	12.7
Mounting			wax/adhesive

รูปที่ 4.3 รายละเอียดความสามารถของเซนเซอร์วัดค่าความเร่ง

4.3.2 วิธีการวัดค่าความสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้า

เมื่อทำการติดตั้งโปรแกรมและเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆเข้าด้วยกัน จะทำการวัดค่าความเร่งทั้งหมด 4 ด้าน 2 ตำแหน่ง คือ ด้านหน้า ด้านซ้าย ด้านขวา และด้านหลังของเครื่องซักผ้า ซึ่งทุกๆ ด้านจะทำการวัดที่ด้านละ 2 ตำแหน่ง คือ ด้านบน และด้านล่าง ดังรูปที่ 4.4 โดยในการบอกตำแหน่งนั้นจะบอกเป็นตัวอักษรภาษาอังกฤษสองตัวติดกัน โดยตัวอักษรตัวแรกแทนด้านต่างๆของเครื่องซักผ้า เช่น Rx อักษร R นั้นหมายถึงด้านขวาของเครื่องซักผ้า ซึ่งอักษร R นั้นย่อมาจากคำว่า Right ส่วนตัวอักษรตัวที่สองแทนตำแหน่งของการวัด เช่น xU อักษร U นั้นหมายถึงตำแหน่งด้านบนของเครื่องซักผ้า ซึ่งอักษร U นั้นย่อมาจากคำว่า Upper ดังนั้นการวัดการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่ง RU จึงหมายถึง การวัดการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งบนทางด้านขวาของเครื่องซักผ้า

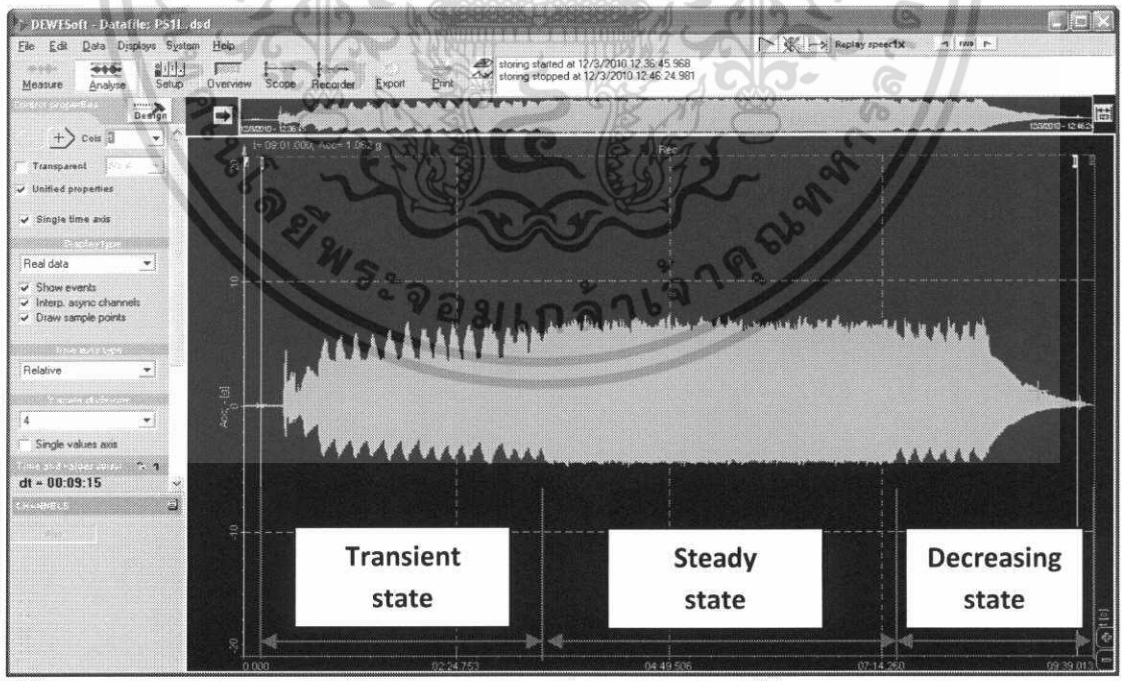
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LEFT VIEW RIGHT VIEW FRONT VIEW BACK VIEW

รูปที่ 4.4 การวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าในตำแหน่งต่างๆ

4.3.3 ค่าความเร่งของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดในสภาวะปั่นแห้ง

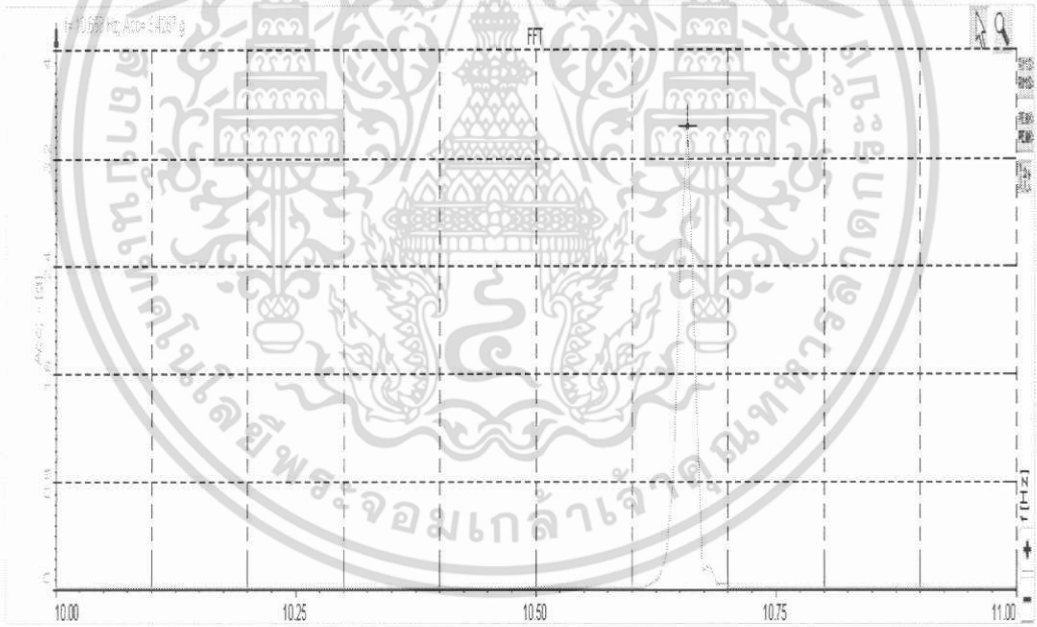
จากการวัดค่าความเร่งของเครื่องซักผ้าชนิดแบบใบพัดในสภาวะการปั่นแห้งนั้นจะถูกรวบรวมข้อมูลในลักษณะของแอมพลิจูดเทียบกับเวลาดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟแอมพลิจูดของความเร่งเทียบกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

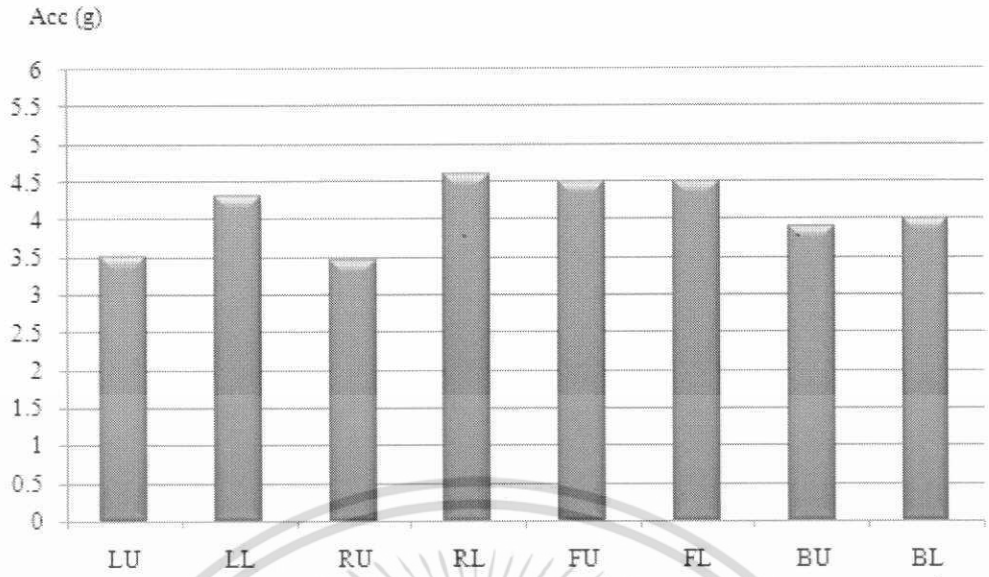
จากรูปที่ 4.5 กราฟแอมพลิจูดของความเร่งเทียบกับเวลานั้นสามารถแบ่งการหมุนของเครื่องซักผ้าชนิดปั่นแห้งออกได้สามช่วง ซึ่งช่วงแรกจะมีลักษณะการหมุนที่ความเร็วรอบไม่คงที่และจะค่อยๆเพิ่มความเร็วรอบขึ้นไปเรื่อย โดยจะเรียกช่วงนี้ว่าช่วงความเร็วรอบไม่คงที่ (Transient state) หลังจากเมื่อเพิ่มความเร็วรอบจนถึงระดับหนึ่ง ตะกร้าใส่ผ้านั้นจะหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ เรียกช่วงที่มีการหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่นี้ว่า ช่วงความเร็วรอบคงที่ (Steady state) ซึ่งในช่วงจะมีค่าความเร่งสูงที่สุดโดยความเร็วรอบของตะกร้านั้นจะมีความเร็วรอบประมาณ 700 รอบต่อนาที และช่วงสุดท้ายคือ ช่วงลดความเร็วรอบ (Decreasing state) ซึ่งจะเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการซักผ้า โดยโปรแกรมของเครื่องซักผ้านั้นจะคอยสั่งงานให้ค่อยๆชะลอลดความเร็วรอบอย่างช้าๆจนหยุดนิ่ง เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการซักผ้าด้วยเครื่องซักผ้า และจากข้อมูลในช่วงความเร็วรอบคงที่มาวิเคราะห์ด้วยวิธีการ FFT analysis จะได้ความถี่ขณะทำการหมุนเท่ากับ 10.68 Hertz ดังรูปที่ 4.6



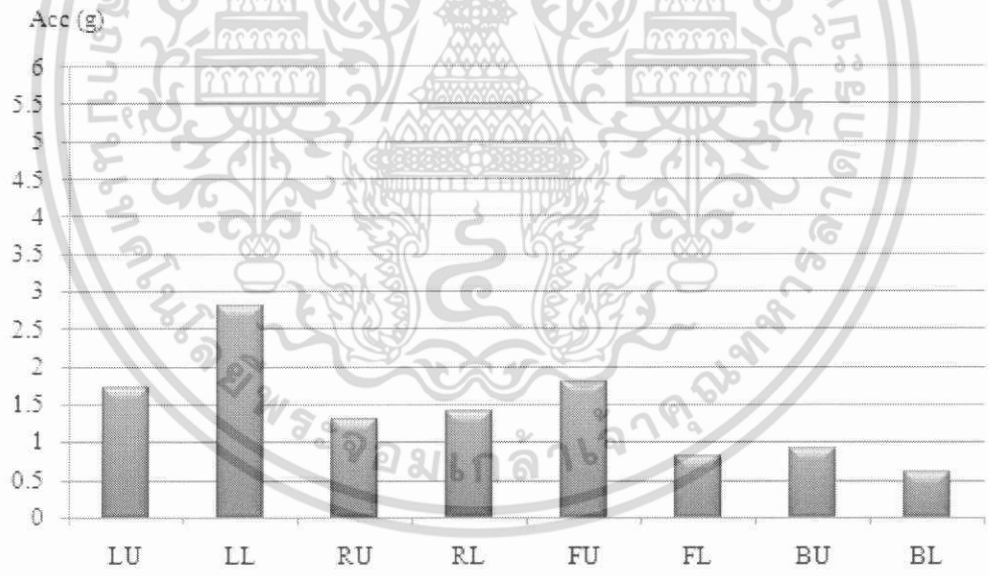
รูปที่ 4.6 ความถี่ขณะทำการหมุนที่ในช่วงความเร็วรอบคงที่

จากรูปที่ 4.5 จะพบว่าค่าความเร่งในช่วงความเร็วรอบคงที่นั้นมีค่ามากที่สุดและมีความต่อเนื่อง ดังนั้นจึงทำการนำค่าความเร่งในทุกๆตำแหน่งที่ช่วงความเร็วรอบคงที่นี้มาหาค่าเฉลี่ยRMS และแสดงผลออกมาในรูปของกราฟแท่งดังรูปที่ 4.7 - 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

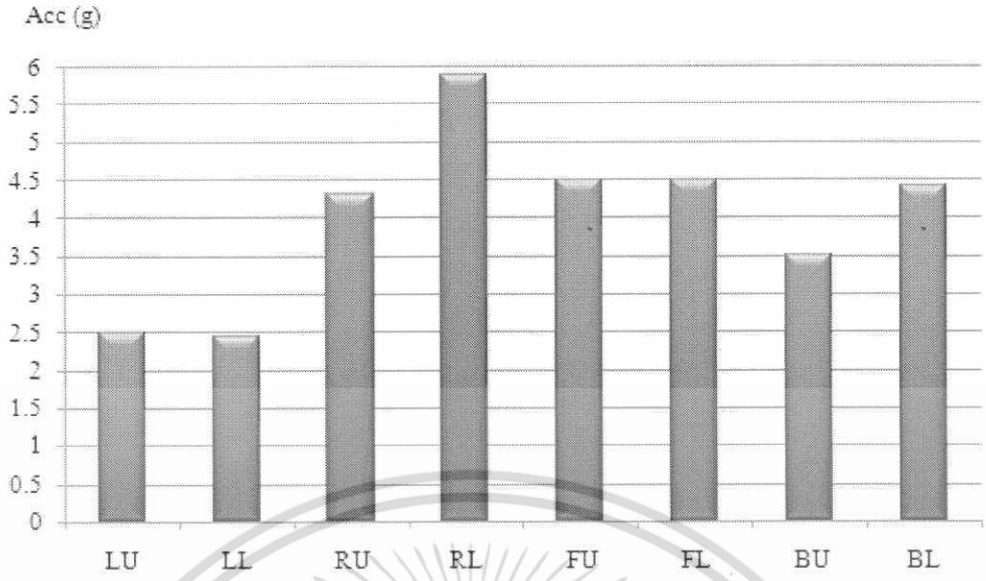


รูปที่ 4.7 ค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ในแกน X จากการวัดค่าความเร่งจากเครื่องซักผ้า ในช่วงความเร็วรอบคงที่



รูปที่ 4.8 ค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ในแกน Y จากการวัดค่าความเร่งจากเครื่องซักผ้า ในช่วงความเร็วรอบคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ในแกน Z จากการวัดค่าความเร่งจากเครื่องซักผ้าในช่วงความเร็วรอบคงที่

จากรูปที่ 4.7 - 4.9 จะพบว่าในแกน X และ Z จะเกิดค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ในช่วงความเร็วรอบคงที่นั้นมีค่าสูงเมื่อเทียบกับแกน Y ดังนั้นจึงทำให้ทราบว่าระนาบที่เกิดการสั่นสะเทือนมากในช่วงสภาวะปั่นแห้งคือระนาบ XZ

4.4 การสร้างแบบจำลองและการจำลองเชิงตัวเลข

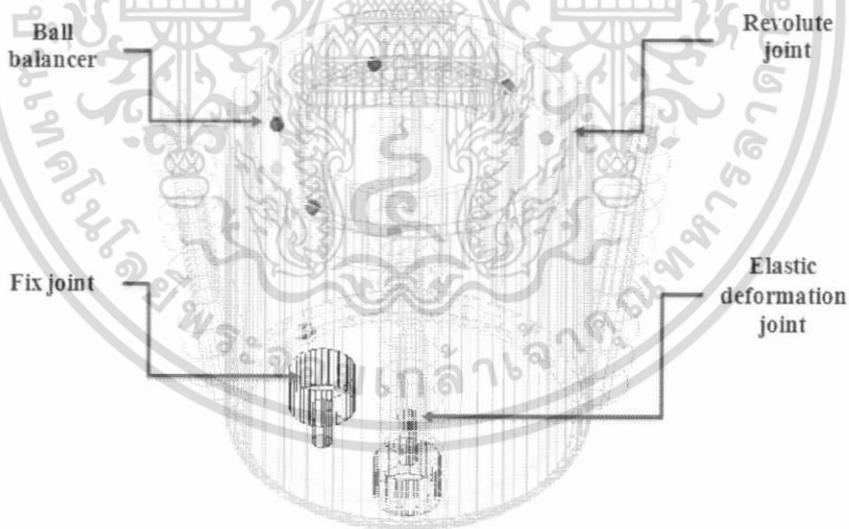
การสร้างแบบจำลองของระบบเครื่องซักผ้านั้นมีอยู่ 3 ขั้นตอนหลักๆ คือ ขั้นตอนแรกทำการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ซึ่งใช้โปรแกรมวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของระบบเชิงกลในการสร้างแบบจำลองโดยอ้างอิงจากแบบทางวิศวกรรมที่ผู้ผลิตเป็นผู้ให้ข้อมูลและใส่ค่าเริ่มต้นให้แก่ชิ้นส่วนต่างๆ ขั้นตอนที่สองนำชิ้นส่วนต่างๆมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกันเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างถูกต้อง ขั้นตอนที่สามกำหนดรูปแบบลักษณะการหมุนของแบบจำลองให้เหมือนกับการหมุนที่สภาวะปั่นแห้งของเครื่องซักผ้าจริง

4.4.1 การสร้างแบบจำลอง

จากแบบทางวิศวกรรมของชิ้นส่วนต่างๆในเครื่องซักผ้านั้นสามารถนำมาเขียนรูปแบบ 3 มิติในโปรแกรมวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของระบบเชิงกลได้ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องซักผ้านั้นจะถูกเชื่อมต่อด้วยการเชื่อมต่อที่มีความสัมพันธ์ที่มีความแตกต่างกันออกไป โดยถังกับมอเตอร์จะ

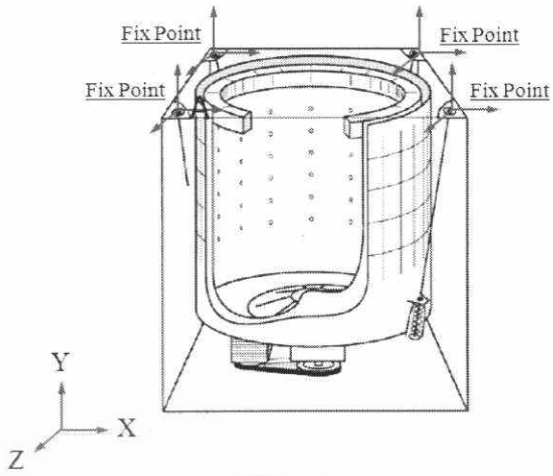
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อชนิดอยู่กับที่ (fix joint) ตะกร้าใส่ผ้ากับถังเชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อชนิดเปลี่ยนรูปทรงแบบยืดหยุ่น (elastic deformation joint) ตัวทำสมดุลชนิดของเหลวกับตะกร้าใส่ผ้าจะเชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อชนิดหมุนรอบ (revolute joint) ซึ่งแบบจำลองนี้มีจุดสำคัญอยู่หนึ่งจุด คือ เนื่องจากโปรแกรมวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของระบบเชิงกลที่จำลองการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็งจึงไม่สามารถจำลองพฤติกรรมการสร้างแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากน้ำเกลือในตัวทำสมดุลชนิดของเหลวได้ จึงได้ทำการสร้างแบบจำลองของลูกบอลจำนวนแปดลูกที่มีลักษณะการทำงานเหมือนตัวทำสมดุลแบบลูกบอล (ball balancer) ขึ้นมาเพื่อให้เกิดการสร้างแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเช่นเดียวกับตัวทำสมดุลชนิดของเหลว โดยน้ำหนักของลูกบอลทั้งแปดลูกรวมกันจะเท่ากับน้ำหนักของน้ำเกลือในตัวทำสมดุลชนิดของเหลว และรูปที่ 4.11 จะแสดงตำแหน่งที่กำหนดให้เป็นจุดที่ไม่มีการเคลื่อนที่ในสามแนวแกนในแบบจำลองเชิงตัวเลข หลังจากนั้นกำหนดค่าเริ่มต้นของปัจจัยต่างๆให้แก่ชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องซักผ้า



รูปที่ 4.10 แบบจำลองของเครื่องซักผ้าแบบใบพัด

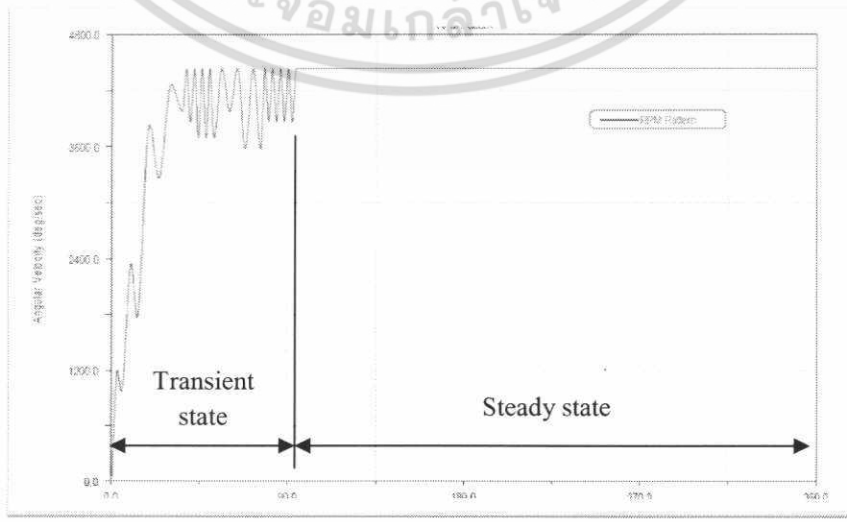
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ตำแหน่งด้านปลายของก้านโลหะที่ถูกกำหนดให้เป็นจุดที่ไม่มีการเคลื่อนที่

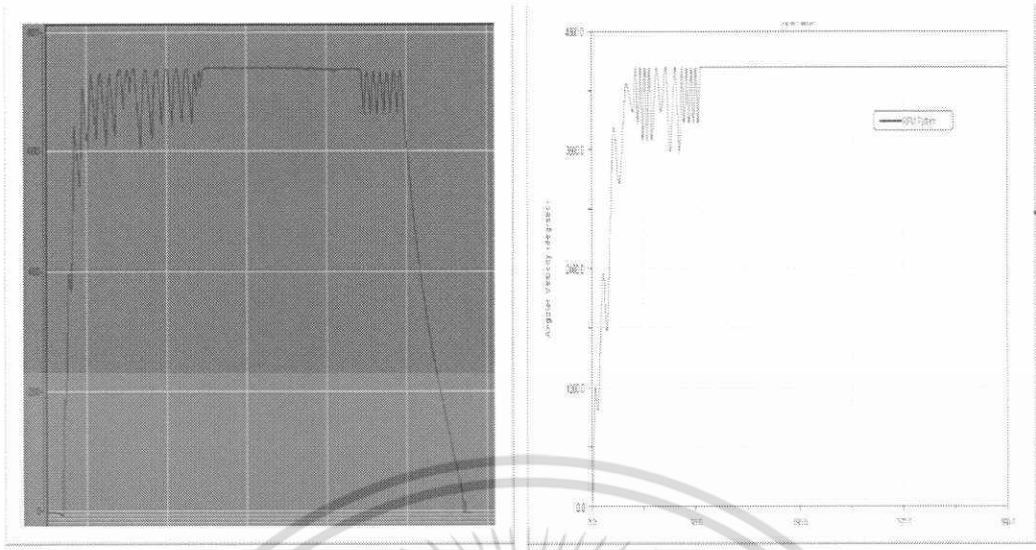
4.4.2 การสร้างรูปแบบลักษณะการหมุนของเครื่องซักผ้าในสภาวะปั่นแห้ง

รูปแบบลักษณะการหมุนของเครื่องซักผ้าในสภาวะปั่นแห้งจะถูกแสดงดังรูปที่ 4.12 การหมุนของเครื่องซักผ้าในสภาวะปั่นแห้งสามารถแบ่งออกได้เป็นสองช่วง คือ ช่วงความเร็วรอบไม่คงที่ ซึ่งความเร็วรอบของเครื่องซักผ้าในช่วงนี้จะแปรผันตามเวลาและจะค่อยๆเพิ่มความเร็วรอบไปเรื่อยๆ จนเข้าสู่ความเร็วรอบคงที่โดยความเร็วรอบที่สภาวะความเร็วรอบคงที่นั้นมีค่าอยู่ประมาณ 700 รอบต่อนาที ซึ่งเวลาที่ในการจำลองเท่ากับ 5 นาทีและความละเอียดในการจำลองทั้งหมดเท่ากับ 10,000 ครั้ง ส่วนช่วงลดความเร็วนั้นจะไม่ถูกนำมาพิจารณาเนื่องจากเป็นการชะลอความเร็วรอบการหมุนทำให้ค่าความเร่งค่อยๆลดลงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.12 รูปแบบลักษณะการหมุนของเครื่องซักผ้าในสภาวะปั่นแห้งในแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

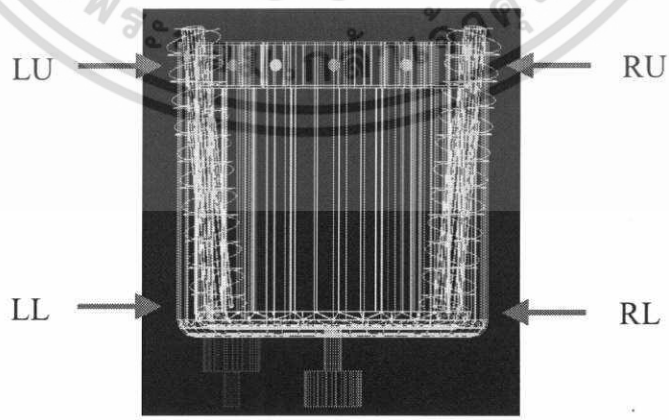


A B

รูปที่ 4.13 รูปแบบลักษณะการหมุนของเครื่องซักผ้าในสภาวะปั่นแห้งของเครื่องซักผ้าจริง (A) เปรียบเทียบกับรูปแบบลักษณะการหมุนของเครื่องซักผ้าในสภาวะปั่นแห้งในแบบจำลอง (B) (ด้วยความอนุเคราะห์ข้อมูลจากบริษัท แอลจี อิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด)

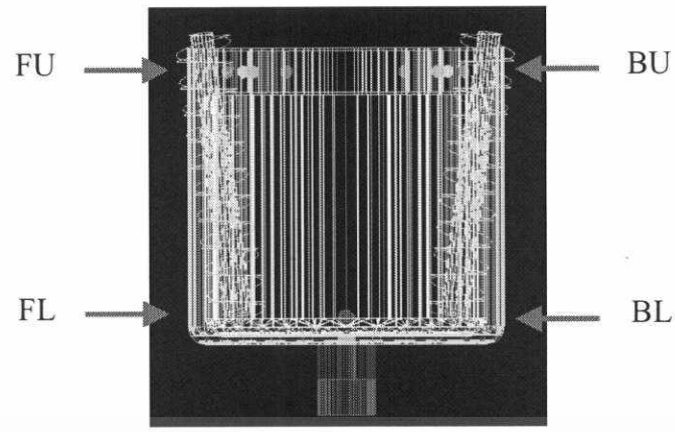
4.4.3 ตำแหน่งที่ทำการวัดการสั่นสะเทือนจากแบบจำลอง

การวัดสั่นสะเทือนของแบบจำลองของเครื่องซักผ้านั้นจะถูกวัดออกมาในรูปของค่าความเร่ง ซึ่งตำแหน่งที่ทำการวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าในแบบจำลองนั้นจะมีทั้งหมด 8 จุดดังรูปที่ 4.14 - 4.16

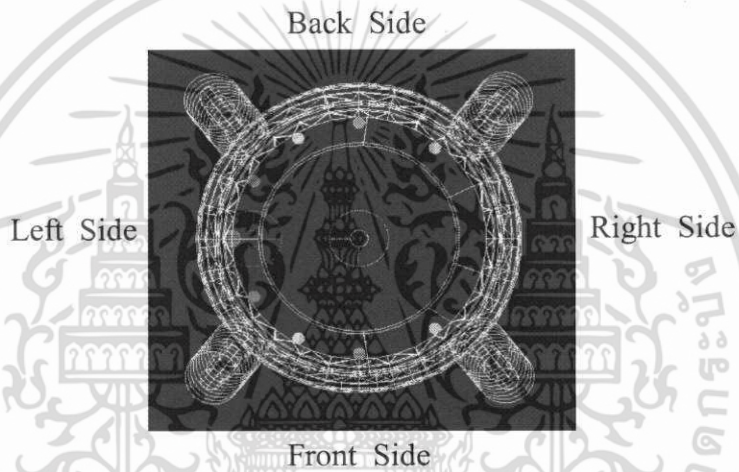


รูปที่ 4.14 ตำแหน่งที่ทำการวัดการสั่นสะเทือนจากแบบจำลอง จากภาพด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ตำแหน่งที่ทำการวัดการสั่นสะเทือนจากแบบจำลอง จากภาพด้านข้าง



รูปที่ 4.16 ตำแหน่งที่ทำการวัดการสั่นสะเทือนจากแบบจำลอง จากภาพด้านบน

จากรูปที่ 4.14 - 4.16 ในการบอกตำแหน่งนั้นจะบอกเป็นตัวอักษรภาษาอังกฤษสองตัวติดกัน โดยตัวอักษรตัวแรกแทนด้านต่างๆของเครื่องซักผ้า เช่น Rx อักษร R นั้นหมายถึงด้านขวาของเครื่องซักผ้า ซึ่งอักษร R นั้นย่อมาจากคำว่า Right ส่วนตัวอักษรตัวที่สองแทนตำแหน่งของการวัด เช่น xU อักษร U นั้นหมายถึงตำแหน่งด้านบนของเครื่องซักผ้า ซึ่งอักษร U นั้นย่อมาจากคำว่า Upper ดังนั้นการวัดการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่ง RU จึงหมายถึง การวัดการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งบนทางด้านขวาของเครื่องซักผ้า

4.5 การจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องซักผ้า

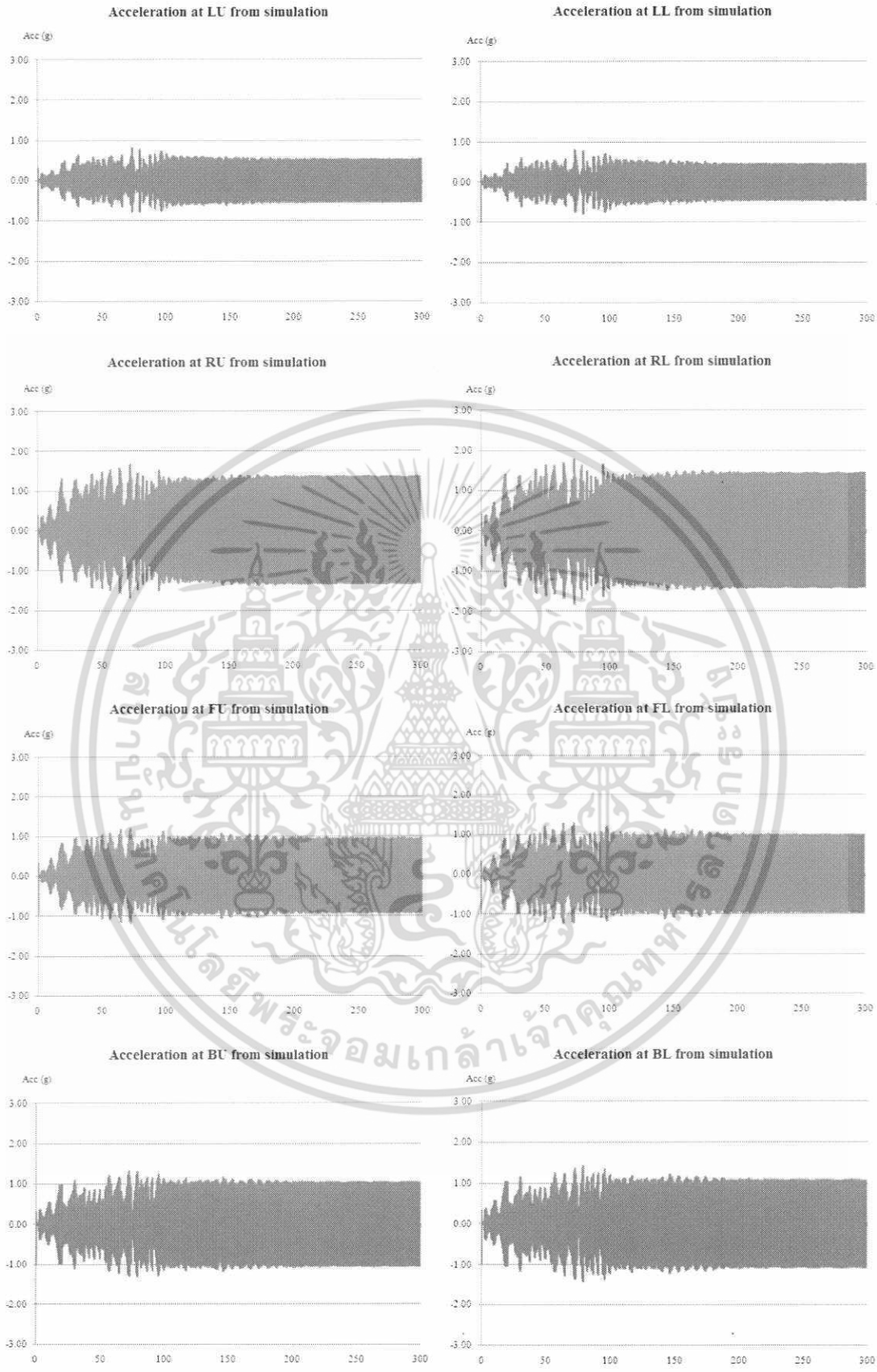
เมื่อทำการสร้างแบบจำลองและใส่ค่าเริ่มต้นของปัจจัยต่างๆให้แก่แบบจำลอง พร้อมทั้งใส่ค่ารูปแบบลักษณะการหมุนของเครื่องซักผ้าในสภาวะปั่นแห้ง หลังจากนั้นให้ทำการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่าอัตราเร่งในแกน X, Y และ Z ในทุกๆตำแหน่ง โดยรูปที่ 4.17 - 4.19 เป็นกราฟความเร่งทุกตำแหน่งที่ในแกน X, Y และ Z ตามลำดับจากแบบจำลองเชิงตัวเลข

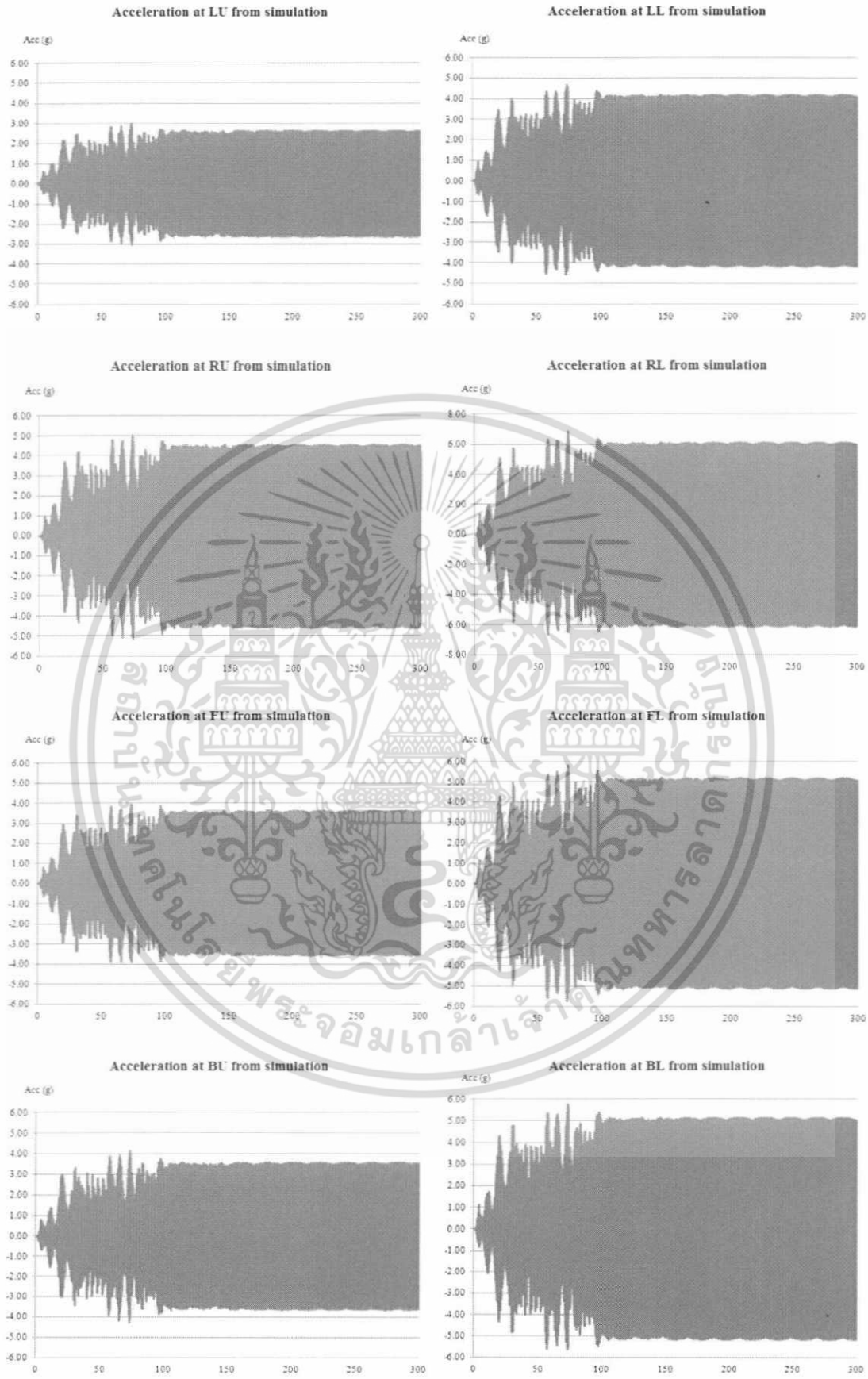
รูปที่ 4.17 กราฟความเร่งที่ทุกตำแหน่งในแกน X จากแบบจำลองเชิงตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 กราฟความเร่งที่ทุกตำแหน่งในแกน Y จากแบบจำลองเชิงตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กราฟความเร่งที่ทุกตำแหน่งในแกน Z จากแบบจำลองเชิงตัวเลข

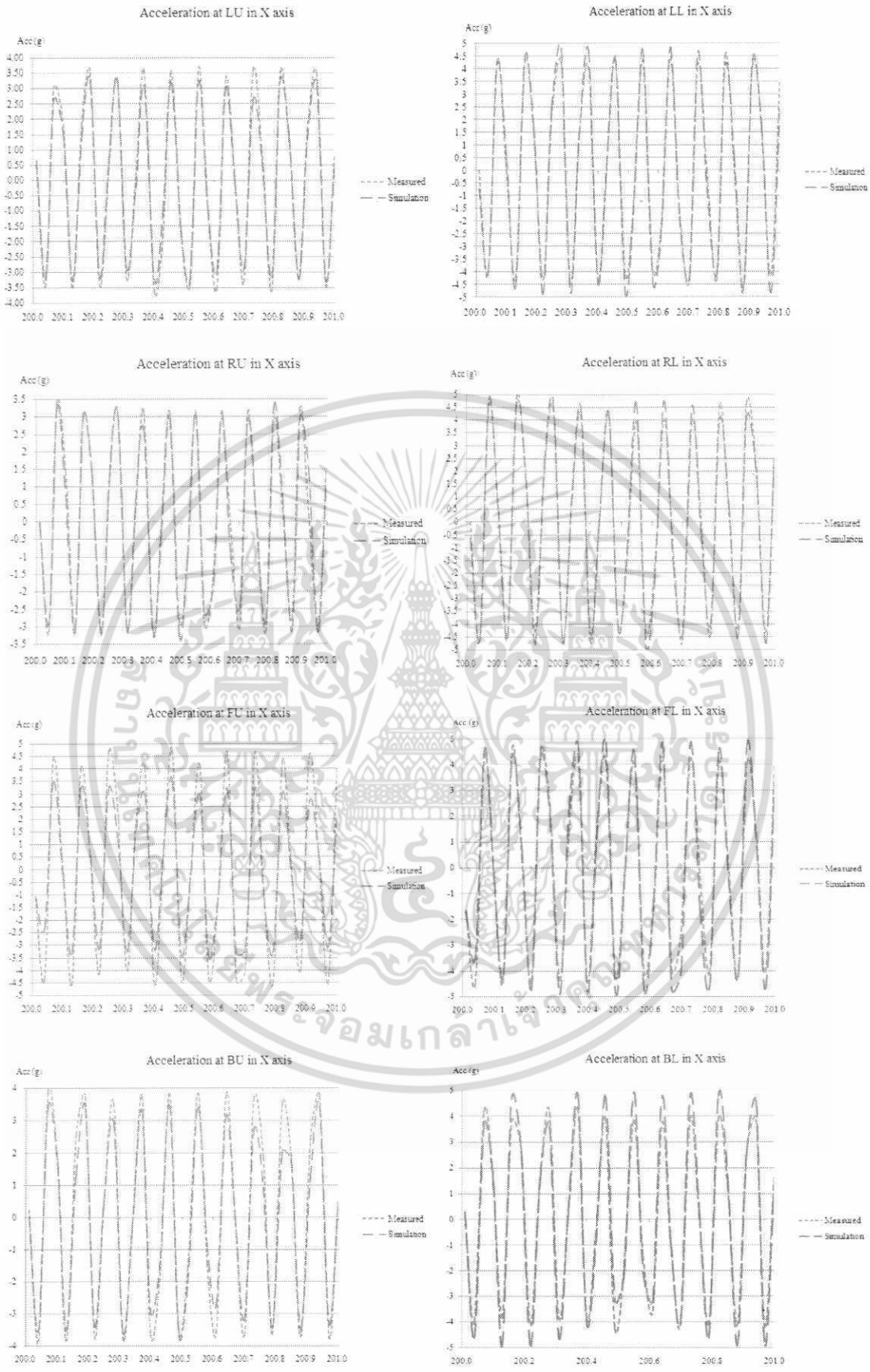
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.17 - 4.19 นั้นจะพบว่าผลการจำลองเชิงตัวเลข ความเร่งในช่วงความเร็วรอบไม่คงที่ นั้นจะมีค่าแปรผันอยู่ตลอดเวลาขึ้นอยู่กับการเพิ่มความเร็วรอบของรูปแบบการหมุนที่สภาวะการปั่นแห้งที่ถูกตั้งไว้ด้วยโปรแกรม และเมื่อพิจารณาความเร่งในช่วงความเร็วรอบคงที่นั้นจะมีความเร่งสูงมากกว่าความเร็วรอบไม่คงที่และมีค่าคงที่ นอกจากนั้นระยะเวลาของช่วงความเร็วคงที่นั้นมีค่ามากกว่าช่วงความเร็วรอบไม่คงที่มาก ทำให้ผู้ใช้งานสัมผัสได้ถึงการสั่นสะเทือนในช่วงความเร็วคงที่มากกว่าการสั่นสะเทือนในช่วงความเร็วรอบไม่คงที่ ดังนั้นค่าความเร่งในช่วงความเร็วรอบคงที่จึงถูกนำมาศึกษา

4.6 ผลการจำลองเชิงตัวเลขเปรียบเทียบกับการวัดค่าความเร่งในขณะหมุนที่ความเร็วรอบคงที่ทั้งสามแกน

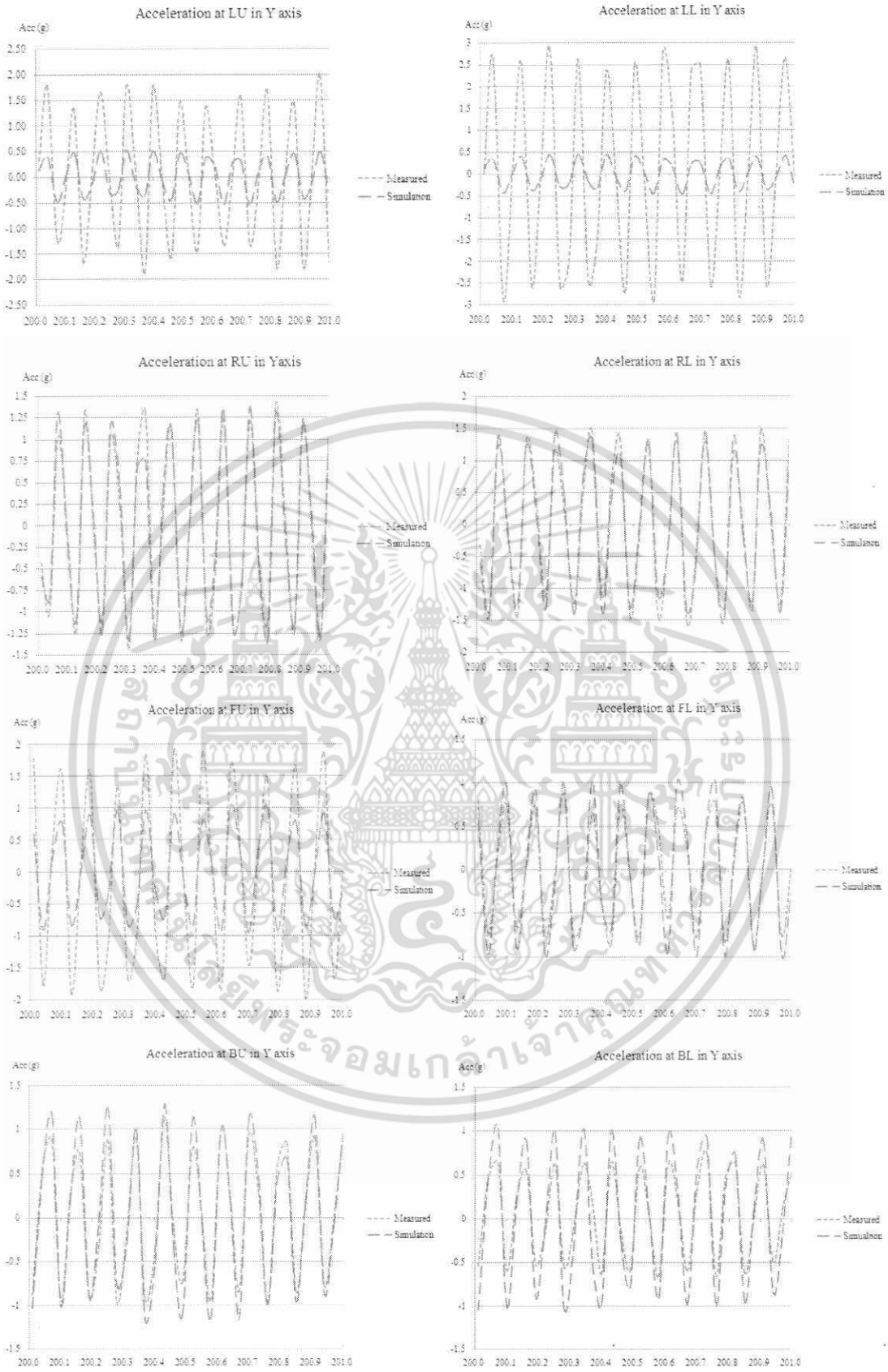
จากการวัดค่าความเร่งจากเครื่องซักผ้าที่สภาวะปั่นแห้งเปรียบเทียบกับการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อหาความเร่งของเครื่องซักผ้านั้น โดยนำความเร่งจากการวัดเปรียบเทียบกับความเร่งจากการจำลองในช่วงความเร็วรอบคงที่ภายในเวลา 1 วินาที ณ วินาทีที่ 200 - 201 ทั้งในแกน X, Y และ Z ตามลำดับ ซึ่งถูกแสดงดังรูปที่ 4.20 - 4.22 และรูปที่ 4.23 เป็นกราฟแสดงค่าความเร่งในช่วงความเร็วรอบไม่คงที่จนถึงช่วงความเร็วรอบคงที่จากการวัดและจากการจำลองเชิงตัวเลข โดยรูปที่ 4.24A นั้นเป็นค่าความเร่งจากการวัดจากเครื่องซักผ้าในสภาวะปั่นแห้งเครื่องซักผ้าจริง ส่วนรูปที่ 4.24B นั้นเป็นค่าความเร่งจากการจำลองเชิงตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบค่าความเร่งจากการวัดที่เครื่องซักผ้าขณะความเร็วรอบคงที่กับผล
การจำลองเชิงตัวขณะความเร็วรอบคงที่ที่ทุกตำแหน่งภาย ณ วินาทีที่ 200 - 201 ในแกน X

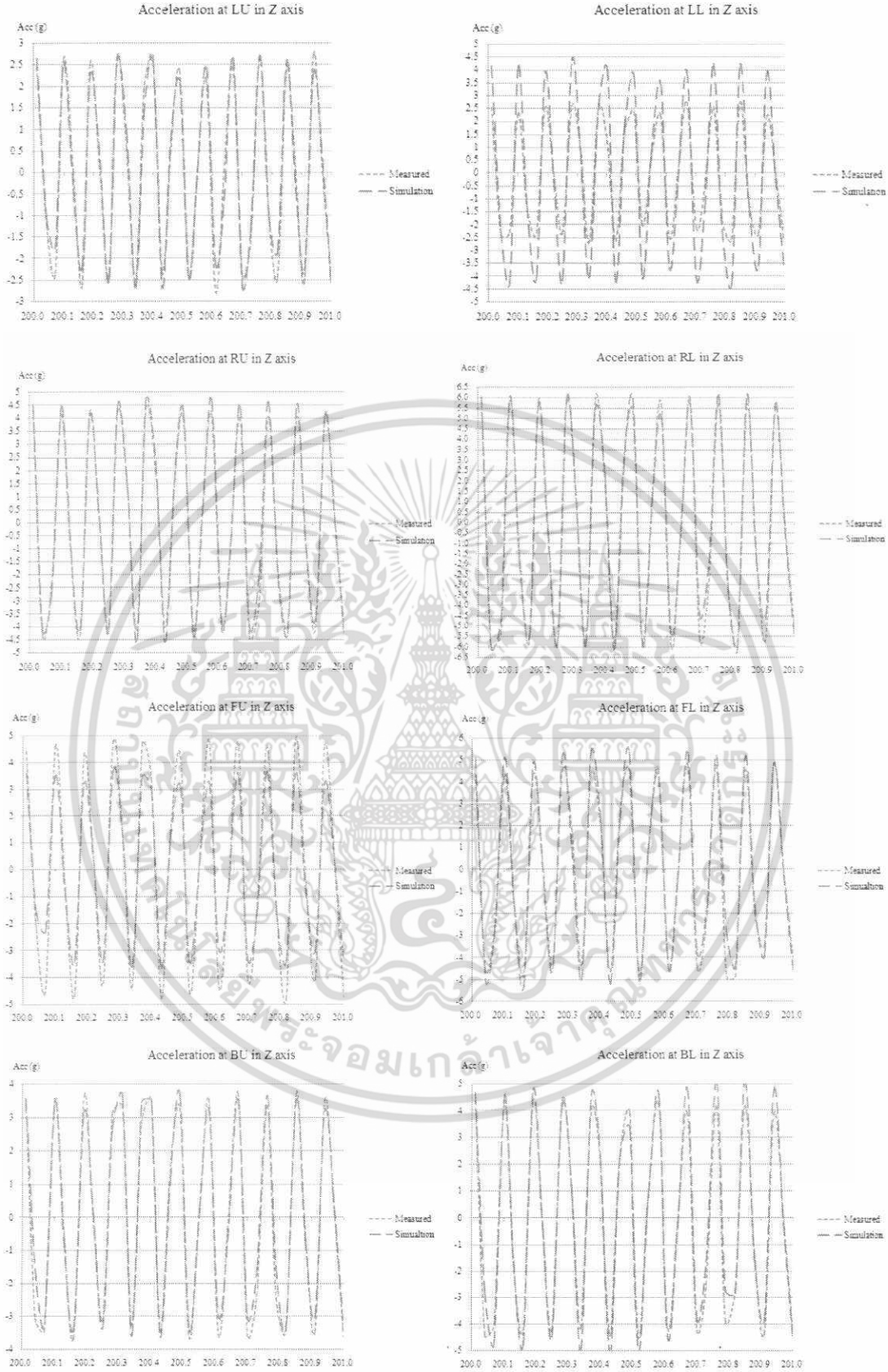
เอกสารนี้เป็นการเผยแพร่เพื่อให้ผู้ใช้งานได้ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบค่าความเร่งจากการวัดที่เครื่องซักผ้าขณะความเร็วรอบคงที่กับผล

การจำลองเชิงตัวขณะความเร็วรอบคงที่ที่ทุกตำแหน่งภาย ณ วินาทีที่ 200 - 201 ในแกน Y

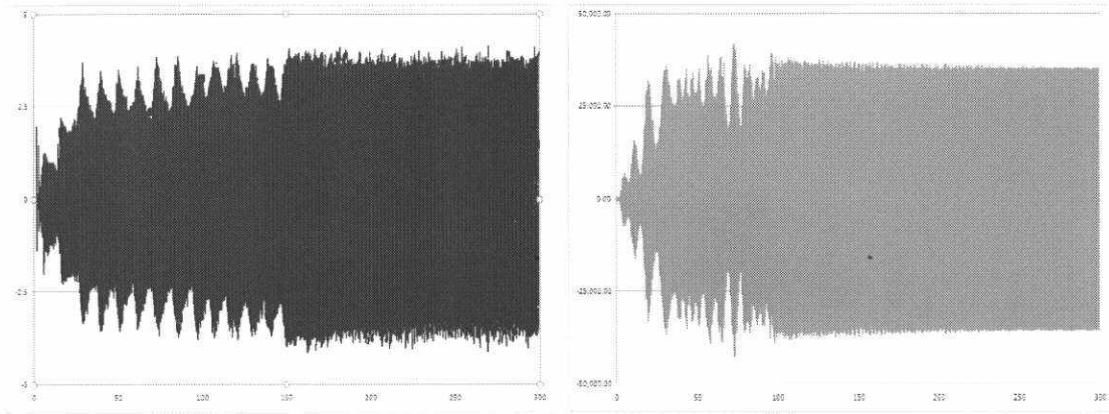
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบค่าความเร่งจากการวัดที่เครื่องซักผ้าขณะความเร็วรอบคงที่กับผล

การจำลองเชิงตัวขณะความเร็วรอบคงที่ที่ทุกตำแหน่งภาย ณ วินาทีที่ 200 - 201 ในแกน Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



A B

รูปที่ 4.23 ผลการวัดค่าความเร่งจริงของเครื่องซักผ้าที่สภาวะปั่นแห้ง (A) เปรียบเทียบกับค่าความเร่งที่หาจากการจำลองเชิงตัวเลข (B)

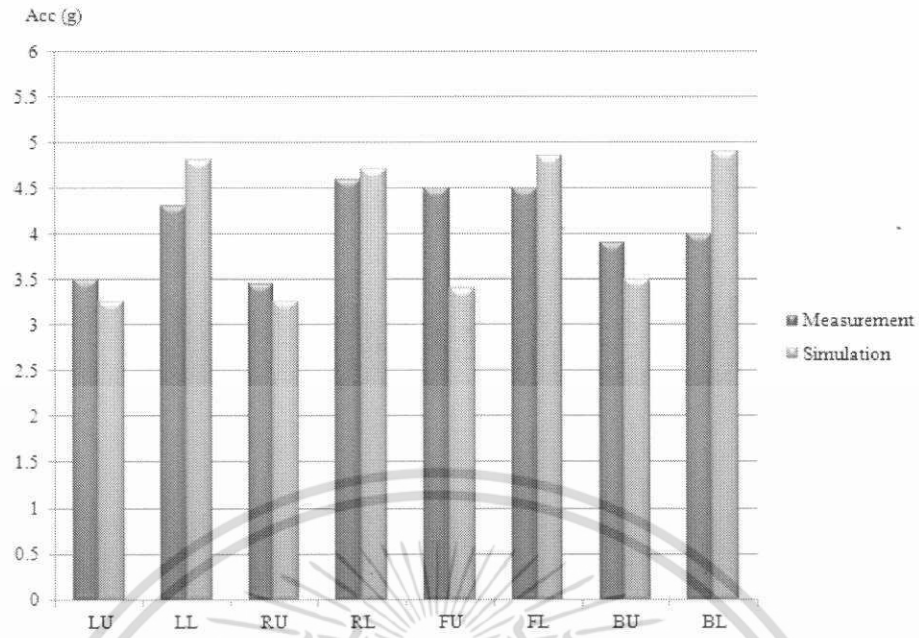
จากรูปที่ 4.20 - 4.22 เป็นการเปรียบเทียบค่าความเร่งจากการวัดที่เครื่องซักผ้าขณะความเร็วรอบคงที่กับผลการจำลองเชิงตัวขณะความเร็วรอบคงที่ที่ทุกตำแหน่งภายในเวลา 1 วินาที ณ วินาทีที่ 200 - 201 ในแกน X, Y และ Z ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าความเร่งจากการวัดและจากแบบจำลองนั้นมีจะมีค่าสูงในแกน X และ Z มากเมื่อเทียบกับแกน Y ดังนั้นการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในช่วงความเร็วรอบคงที่ของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดนั้นจะเกิดขึ้นสูงในระนาบ XZ

จากรูปที่ 4.23 จะพบว่าค่าความเร่งจากการวัดกับแบบจำลองนั้นความเร่งในช่วงความเร็วรอบไม่คงที่จะมีค่าไม่คงที่โดยขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของเครื่องซักผ้า และความเร่งในช่วงความเร็วรอบที่คมีค่าสูงและมีค่าคงที่ ซึ่งความเร่งจากแบบจำลองกับการวัดนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

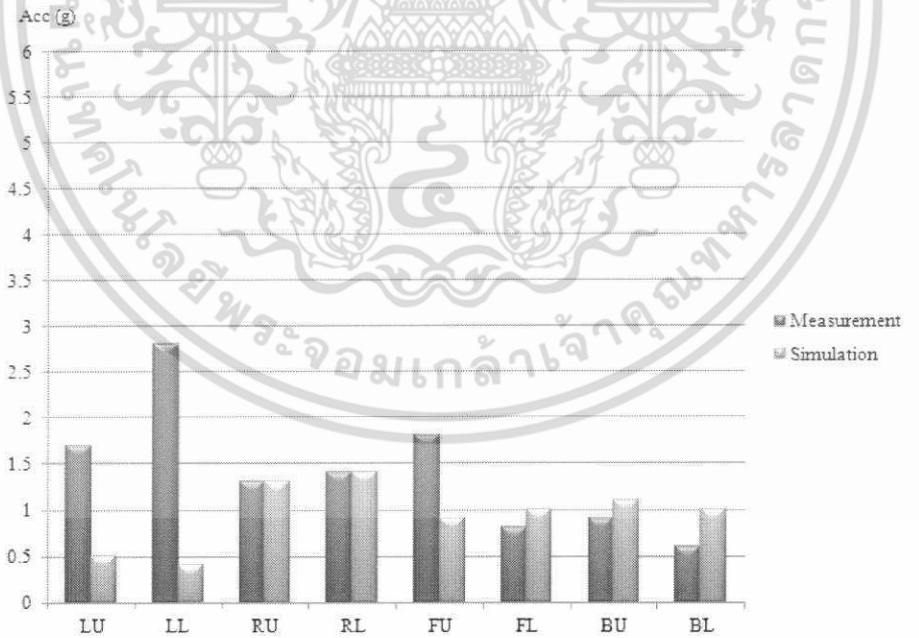
จากรูปที่ 4.24 - 4.26 เป็นกราฟแสดงค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ในช่วงความเร็วคงที่จากการวัดและการจำลองเชิงตัวเลข จะพบว่าแกน X และ Z มีการสั่นสะเทือนมากกว่าแกน Y หรืออีกความหมายหนึ่งนั้นคือ ระนาบที่เกิดการสั่นสะเทือนมากนั้นคือระนาบ XZ ที่เกิดการสั่นสะเทือนมากกว่าระนาบ XY และ YZ ดังนั้นในการศึกษาการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดจึงมุ่งศึกษาการสั่นสะเทือนในระนาบ XZ เป็นหลัก

จากผลการจำลองค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ในแกน Y จากการจำลองเชิงตัวเลขจะมีความแตกต่างกันมากเมื่อเทียบกับการวัด แต่การวิจัยนี้มุ่งเน้นในการศึกษาการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในระนาบ XZ เป็นหลัก โดยค่าความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ จากการจำลองเชิงตัวเลขและจากการวัดต้องมีความแตกต่างกันไม่เกิน 15 เปอร์เซนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

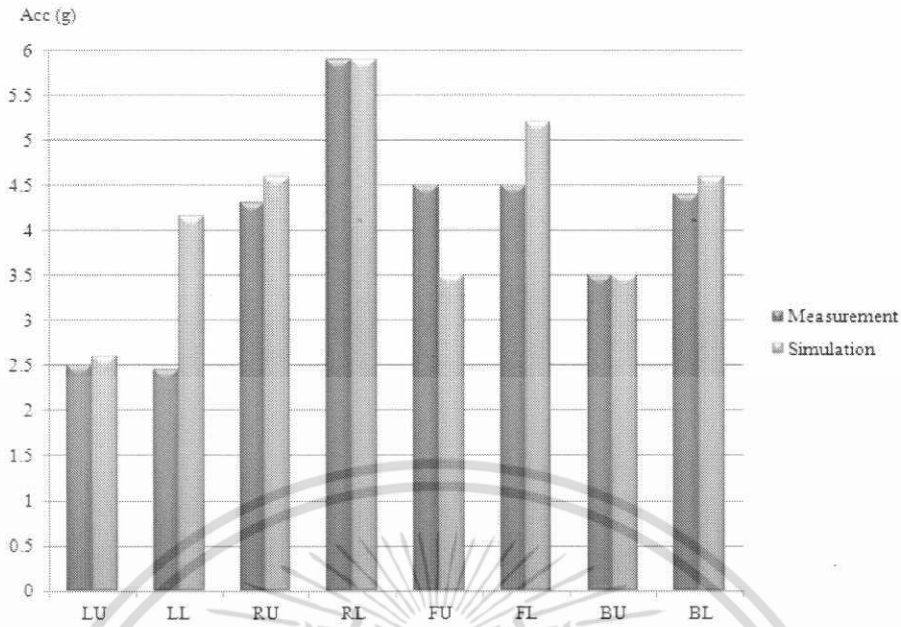


รูปที่ 4.24 ความเร่งเฉลี่ย RMS ในแนวแกน X ที่ตำแหน่งต่างๆที่สภาวะปั่นแห้งของเครื่องซักผ้าจากการวัดและจากการจำลอง



รูปที่ 4.25 ความเร่งเฉลี่ย RMS ในแนวแกน Y ที่ตำแหน่งต่างๆที่สภาวะปั่นแห้งของเครื่องซักผ้าจากการวัดและจากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 ความเร่งเฉลี่ย RMS ในแนวแกน Z ที่ตำแหน่งต่างๆที่สภาวะปั่นแห้งของเครื่องซักผ้าจากการวัดและจากการจำลอง

จากตารางที่ 4.2 เป็นตารางแสดงค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ในตำแหน่งต่างๆและค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกน X ซึ่งการคำนวณค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกน X นั้นจะถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ข. โดยจะพบว่าค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกน X จากการวัดและการจำลองเชิงตัวเลขจะมีค่าเท่ากับ 4.09375 g และ 4.081025 g ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ความเร่งเฉลี่ย RMS ในแกน X	
	การวัด	การจำลองเชิงตัวเลข
LU	3.5 g	3.25 g
LL	4.3 g	4.8 g
RU	3.45 g	3.25 g
RL	4.6 g	4.7 g
FU	4.5 g	3.4 g
FL	4.5 g	4.85 g
BU	3.9 g	3.5 g
BL	4 g	4.9 g
ค่าเฉลี่ย	4.09375 g	4.081025 g

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงความเร่งเฉลี่ย RMS ในตำแหน่งต่างๆและค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกน X

จากตารางที่ 4.3 เป็นตารางแสดงค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ในตำแหน่งต่างๆและค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกน Z ซึ่งการคำนวณค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกน Z นั้นจะถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ข. โดยจะพบว่าค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกน Z จากการวัดและการจำลองเชิงตัวเลขจะมีค่าเท่ากับ 4.00625 g และ 4.25625 g ตามลำดับ

	ความเร่งเฉลี่ย RMS ในแกน Z	
	การวัด	การจำลองเชิงตัวเลข
LU	2.5 g	2.6 g
LL	2.45 g	4.15 g
RU	4.3 g	4.6 g
RL	5.9 g	5.9 g
FU	4.5 g	3.5 g
FL	4.5 g	5.2 g
BU	3.5 g	3.5 g
BL	4.4 g	4.6 g
ค่าเฉลี่ย	4.00625 g	4.25625 g

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงความเร่งเฉลี่ย RMS ในตำแหน่งต่างๆและค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกน Y

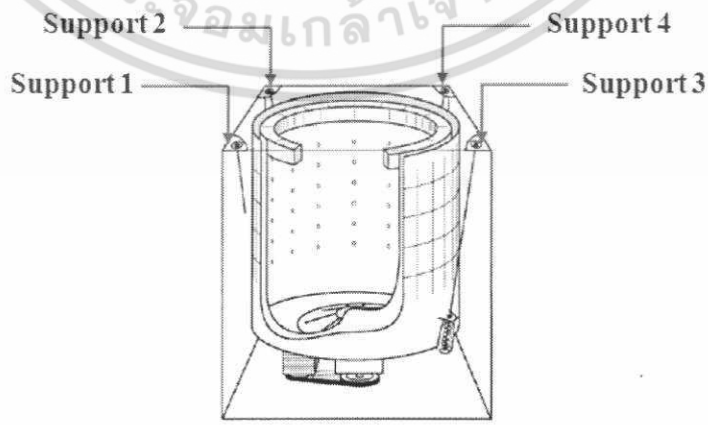
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบ XZ เป็นระนาบที่เกิดการสั่นสะเทือนในช่วงความเร็วรอบคงที่สูงมากกว่าระนาบอื่นทั้งจากการการวัดและจากการจำลองเชิงตัวเลข ดังนั้นการหาค่าความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ ของเครื่องซักผ้าจึงใช้หลักการรวมเวคเตอร์สองเวคเตอร์ในระนาบที่ตั้งฉากกันมาหาค่าความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ ของเครื่องซักผ้าซึ่งการคำนวณค่าความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ จะถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ข. โดยตารางที่ 4.4 แสดงค่าความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ ของเครื่องซักผ้าจากการวัดและการจำลองเชิงตัวเลขเท่ากับ 5.7279 g และ 5.8966 g ตามลำดับ ซึ่งค่าความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ ของเครื่องซักผ้าจากการวัดและการจำลองเชิงตัวเลขนั้นมีความแตกต่างกัน 2.94 เปอร์เซ็นต์

ความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ ของเครื่องซักผ้า	
จากการวัด	จากการจำลองเชิงตัวเลข
5.7279 g	5.8966 g

ตารางที่ 4.4 ความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ จากการวัดและจากการจำลองเชิงตัวเลข

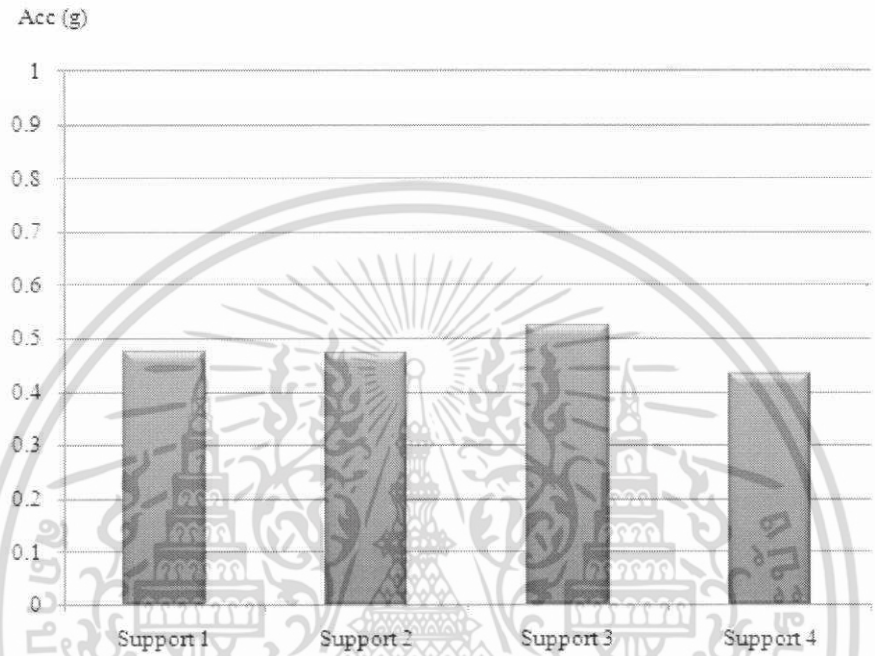
การสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าในช่วงสภาวะปั่นแห้งจะถูกส่งถ่ายไปยังชิ้นส่วนโครงสร้างซึ่งเป็นสิ่งที่ผู้ใช้งานสัมผัสได้ขณะใช้งานเครื่องซักผ้าจึงได้ทำการจำลองเชิงตัวเลขที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้าง ซึ่งรูปที่ 4.27 เป็นรูปที่แสดงตำแหน่งที่ทำการจำลองค่าความเร่งที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้าง และรูปที่ 4.28 - 4.30 เป็นค่าความเร่งที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้างในแนวแกน X, Y และ Z ตามลำดับ



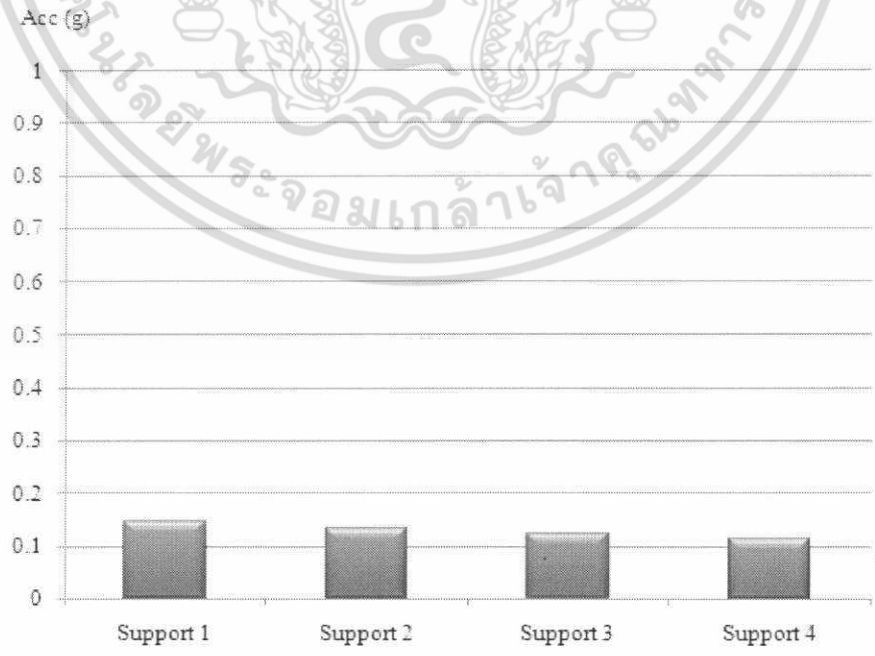
รูปที่ 4.27 ตำแหน่งที่ทำการจำลองค่าความเร่งที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.28 - 4.30 เป็นค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้างในช่วงความเร็วรอบคงที่ในแนวแกน X, Y และ Z ตามลำดับ จะพบว่าค่าความเร่งในแนวแกน Y มีค่าน้อยกว่าแกน X และ Z ซึ่งสอดคล้องกับการจำลองค่าความเร่งที่วัดจากถังจากแบบจำลองเชิงตัวเลข

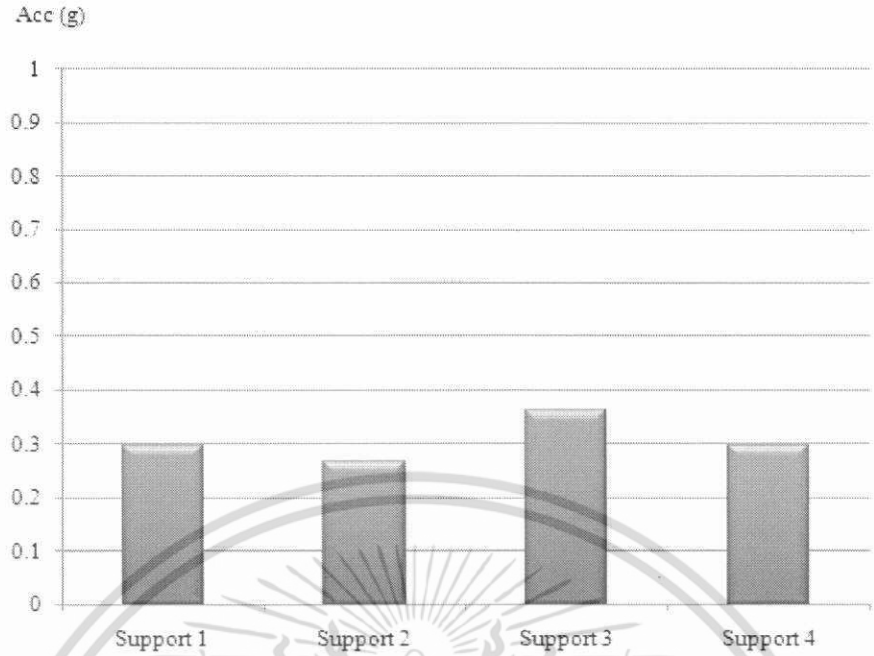


รูปที่ 4.28 ความเร่ง RMS ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้างในแนวแกน X



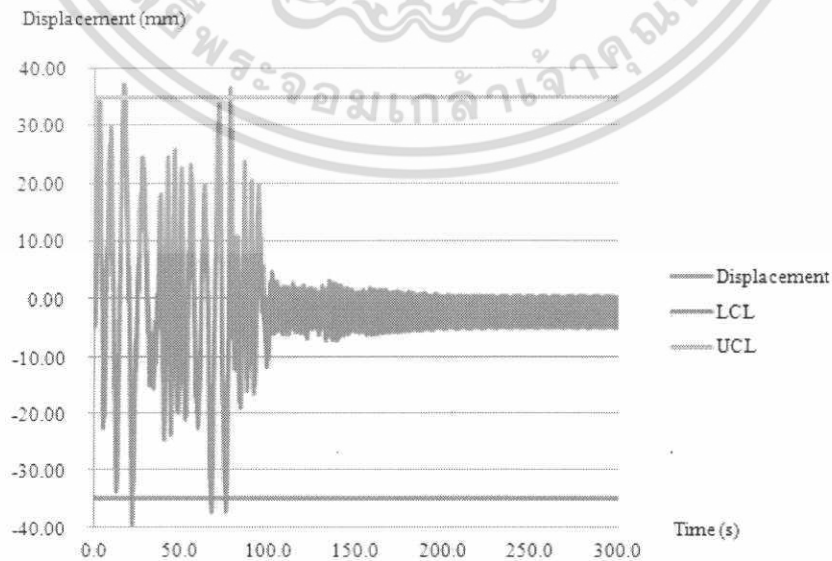
รูปที่ 4.29 ความเร่ง RMS ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้างในแนวแกน Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



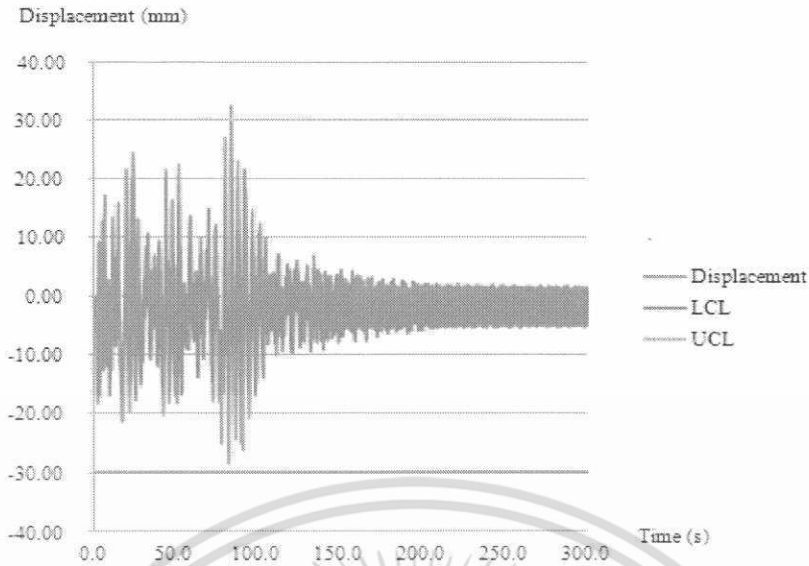
รูปที่ 4.30 ความเร่ง RMS ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้างในแนวแกน Z

จากรูปที่ 4.31 – 4.32 เป็นกราฟการจำลองการกระจัดของถังในแนวแกน X และ Z ตามลำดับ โดยวัดจากจุดศูนย์กลางของถัง ซึ่งระยะการกระจัดของถังในแนวแกน X และ Z ต้องไม่เกิน ± 35 มิลลิเมตร ถ้าระยะการกระจัดในแนวแกน X และ Z ถังมากกว่า ± 35 มิลลิเมตร ถังจะเกิดการกระแทกชิ้นส่วนโครงสร้างของถังทำให้เกิดเสียงดังขณะใช้งานเครื่องซักผ้าแบบใบพัดซึ่งจะทำให้ผู้ใช้งานสัมผัสได้และเกิดความไม่พึงพอใจ



รูปที่ 4.31 ระยะการกระจัดของถังในแนวแกน X จากการจำลองเชิงตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 ระยะการกระจัดของถังในแนวแกน Z จากการจำลองเชิงตัวเลข

จากผลการจำลองระยะการกระจัดในแนวแกน X และ Z นั้นจะมีระยะการกระจัดสูงในช่วงความเร็วรอบไม่คงที่และเกิน ± 35 มิลลิเมตร จึงทำให้ถังเกิดการกระแทกชิ้นส่วนโครงสร้างของเครื่องซักผ้าทั้งในแนวแกน X และ Z ตามลำดับ ส่งผลให้เกิดเสียงดังเนื่องจากการกระแทกขณะเข้าสู่สภาวะปั่นแห้ง ทำให้ผู้ใช้งานเกิดความไม่พึงพอใจขณะใช้งาน

เนื่องจากแบบจำลองนั้นมีความใกล้เคียงกับการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้า จึงได้นำแบบจำลองเชิงตัวเลขมาทำการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติในแกน X, Y และ Z ซึ่งถูกแสดงไว้ดังตารางที่ 4.5 โดยความเร็วรอบที่จะทำให้เกิดการสั่นพ้องในเครื่องซักผ้าแบบใบพัดในแกน X, Y และ Z เท่ากับ 94.4, 188.64 และ 95.58 รอบต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งในช่วงการทำงานที่สภาวะปั่นแห้งนั้นจะมีการเร่งความเร็วรอบผ่านค่าความถี่ธรรมชาตินี้อย่างรวดเร็วจึงไม่ทำให้เกิดการสั่นพ้องเกิดขึ้น

Axis	Natural Frequency (HZ)	Rotation Speed (RPM)
X	1.574 Hz	94.4 RPM
Y	3.144 Hz	188.64 RPM
Z	1.593 Hz	95.58 RPM

ตารางที่ 4.5 ความถี่ธรรมชาติของเครื่องซักผ้าจากแบบจำลองทั้งในแกน X, Y และ Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

อิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนและการออกแบบปัจจัยที่สามารถลดการสั่นสะเทือนให้แก่เครื่องซักผ้า

5.1 การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้า

ในเครื่องซักผ้านั้นประกอบไปด้วยชิ้นส่วนต่างๆมากมายที่ใช้ประกอบ อาทิ เช่น ตัวทำสมดุลชนิดของเหลว มอเตอร์ไฟฟ้า ท่อน้ำทิ้ง แผงวงจรไฟฟ้า เป็นต้น จึงจะทำให้เครื่องซักผ้านั้นทำงานได้อย่างราบรื่น ดังนั้นจึงมีปัจจัยมากมายที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าแต่ถ้าทำการทดลองโดยปรับเปลี่ยนโดยปรับเปลี่ยนวัสดุต่างๆให้แก่เครื่องซักผ้าก็จะทำให้ใช้เวลานานในการศึกษาและมีค่าใช้จ่ายสูงในการวิจัย จึงได้ทำการสร้างแบบจำลองที่ให้ความแม่นยำใกล้เคียงกับการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าจริงเพื่อประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการวิจัย โดยปัจจัยต่างๆที่สนใจศึกษาว่ามีอิทธิพลต่อการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าในสภาวะปั่นแห้งได้แก่ปัจจัยตามตารางที่ 5.1 ซึ่งปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าคือ ค่านิจของสปริง สัมประสิทธิ์ของตัวหน่วง มวลของตะกร้า มวลของตัวทำสมดุลชนิดของเหลว (ไม่รวมมวลของน้ำเกลือ) และมวลของถังส่วนในหลักของข้อมูลจากทางผู้ผลิตเป็นค่าปัจจัยที่ทางผู้ผลิตเครื่องซักผ้าใช้ในการผลิตเครื่องซักผ้าและในหลักของขอบเขตบนและขอบเขตล่างเป็นค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของแต่ละปัจจัย

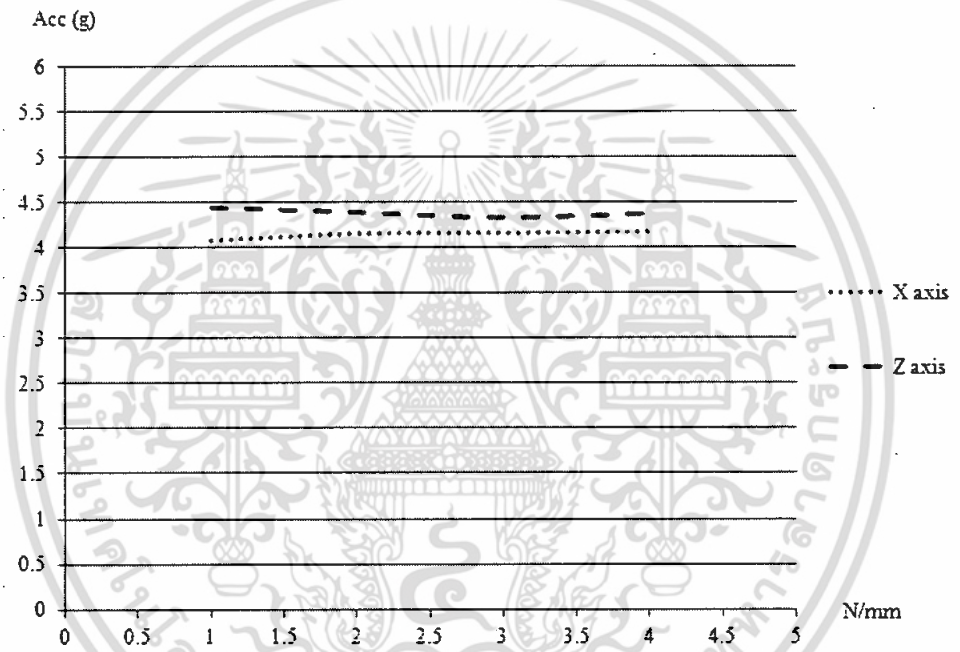
ตารางที่ 5.1 ปัจจัยต่างๆที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าเพื่อศึกษาผลการสั่นสะเทือน

ปัจจัย	หน่วย	ข้อมูลจากทางผู้ผลิต	ขอบเขตล่าง	ขอบเขตบน
ค่านิจของสปริง	N/mm	2.5	1	4
สัมประสิทธิ์ของตัวหน่วง	N-s/mm	0.1	10	10
มวลของตะกร้า	Kg	4	4	10
มวลของตัวทำสมดุลชนิดของเหลว (ไม่รวมมวลของน้ำเกลือ)	Kg	1.1	0.5	5
มวลของถัง	Kg	5	3	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

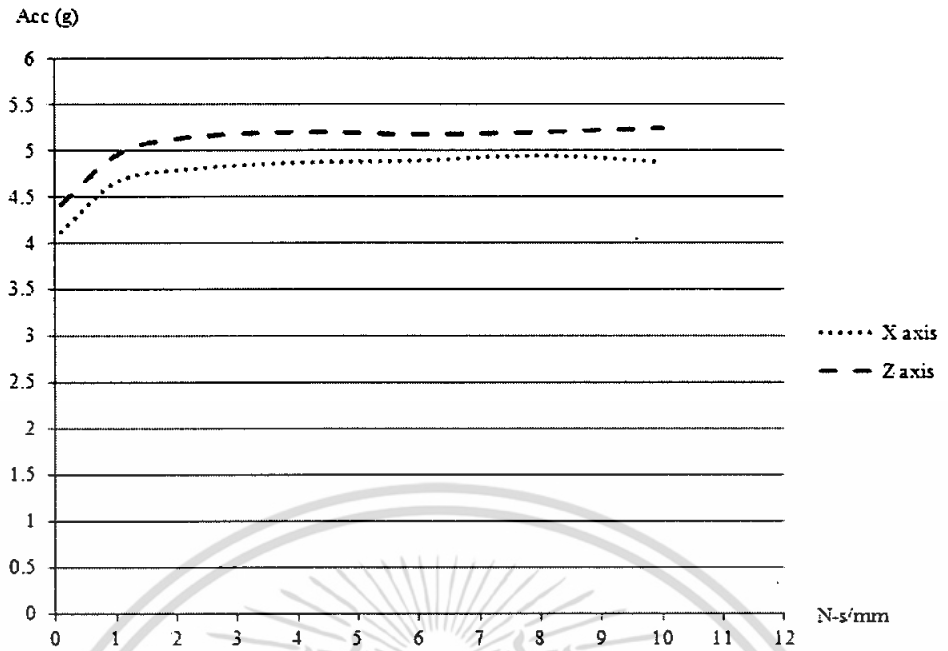
การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าที่สภาวะปั่นแห้ง จะทำการพิจารณาค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกน X และ Z เนื่องจากความเร่งในแกน X และ Z มีค่าสูงกว่าแกน Y มาก ดังนั้นระนาบที่เกิดการสั่นสะเทือนสูงจึงเป็นระนาบ XZ

รูปที่ 5.1 - 5.5 เป็นค่าความเร่งเฉลี่ยในแกน X และ Z จากแบบจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งการจำลองเชิงตัวเลขนี้จะทำการจะลองโดยปรับเปลี่ยนค่าปัจจัยทีละปัจจัยและปัจจัยอื่นๆจะมีค่าคงที่โดยเท่ากับข้อมูลจากทางผู้ผลิต เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าที่สภาวะปั่นแห้ง โดยการปรับเปลี่ยนค่าปัจจัยนั้นจะเป็นดังตารางที่ 5.1

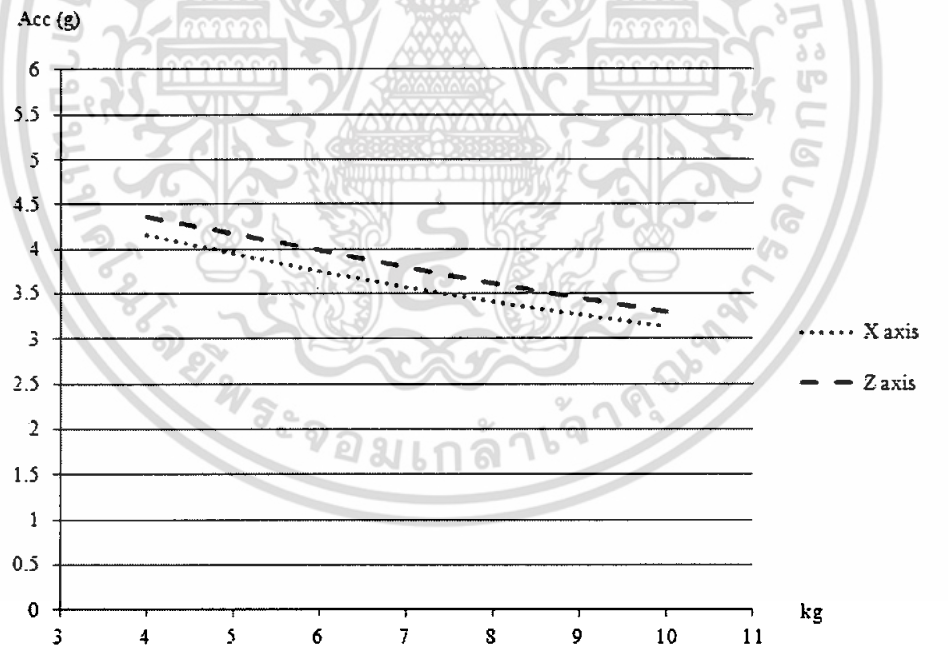


รูปที่ 5.1 ค่าความเร่งเฉลี่ยในแกน X และ Z เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่านิจของสปริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

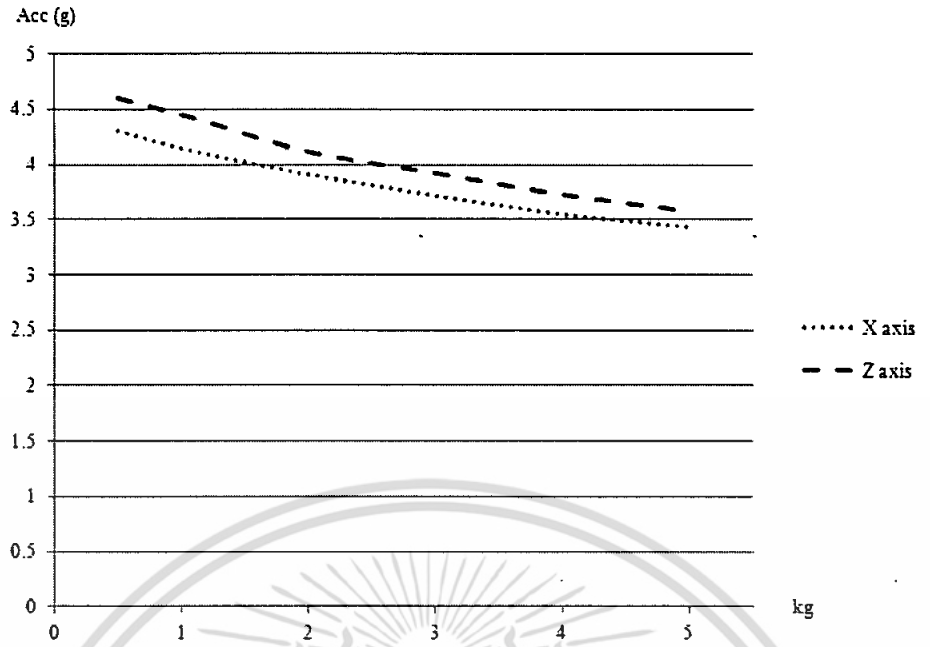


รูปที่ 5.2 ค่าความเร่งเฉลี่ยในแกน X และ Z เมื่อมีการปรับเปลี่ยนสัมประสิทธิ์ตัวหน่วง

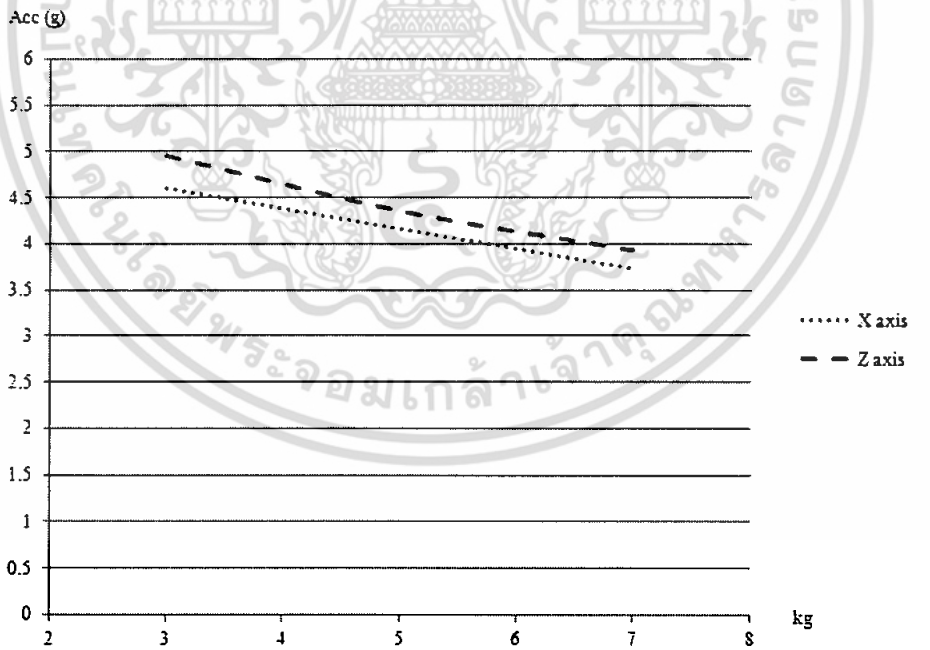


รูปที่ 5.3 ค่าความเร่งเฉลี่ยในแกน X และ Z เมื่อมีการปรับเปลี่ยนมวลของตะกร้าใส่ผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 ค่าความเร่งเฉลี่ยในแกน X และ Z เมื่อมีการปรับเปลี่ยนมวลของตัวทำสมดุลชนิดของเหลว (ไม่รวมมวลของน้ำเกลือที่บรรจุอยู่ภายใน)



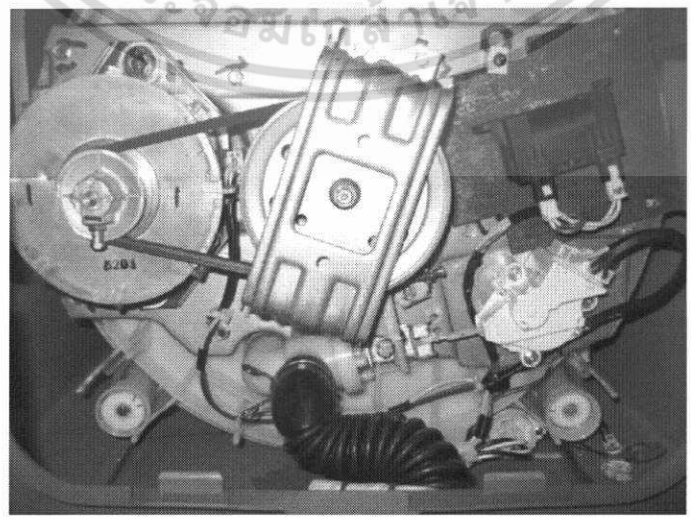
รูปที่ 5.5 ค่าความเร่งเฉลี่ยในแกน X และ Z ที่ตำแหน่ง LU เมื่อมีการปรับเปลี่ยนมวลของถัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.1 - 5.5 นั้นจะพบว่าในการปรับเปลี่ยนค่านิจของสปริงในช่วงที่กำหนดนั้นจะไม่มีอิทธิพลต่อความเร่งเฉลี่ยในแกน X และ Z แต่การปรับเปลี่ยนค่ามวลของตะกร้าใส่ผ้า มวลของตัวทำสมดุลชนิดของเหลว (ไม่รวมมวลของน้ำเกลือที่บรรจุอยู่ภายใน) และมวลของถังในช่วงที่กำหนด นั้นมีอิทธิพลต่อความเร่งเฉลี่ยในแกน X และ Z โดยถ้าเพิ่มมวลของตะกร้าใส่ผ้า มวลของตัวทำสมดุลชนิดของเหลว (ไม่รวมมวลของน้ำเกลือที่บรรจุอยู่ภายใน) และมวลของถัง จะทำให้ค่าความเร่งเฉลี่ยในแกน X และ Z นั้นลดลง ซึ่งค่าความไว (sensivity) ของตะกร้าใส่ผ้า ตัวทำสมดุลชนิดของเหลว และถังเท่ากับ 21.875%, 17.24% และ 23.529% ตามลำดับ ส่วนการปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงในช่วงที่กำหนดนั้นจะทำให้ความเร่งค่อยๆเพิ่มขึ้นและจะคงที่แม้จะเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ขึ้นอีกก็ตาม

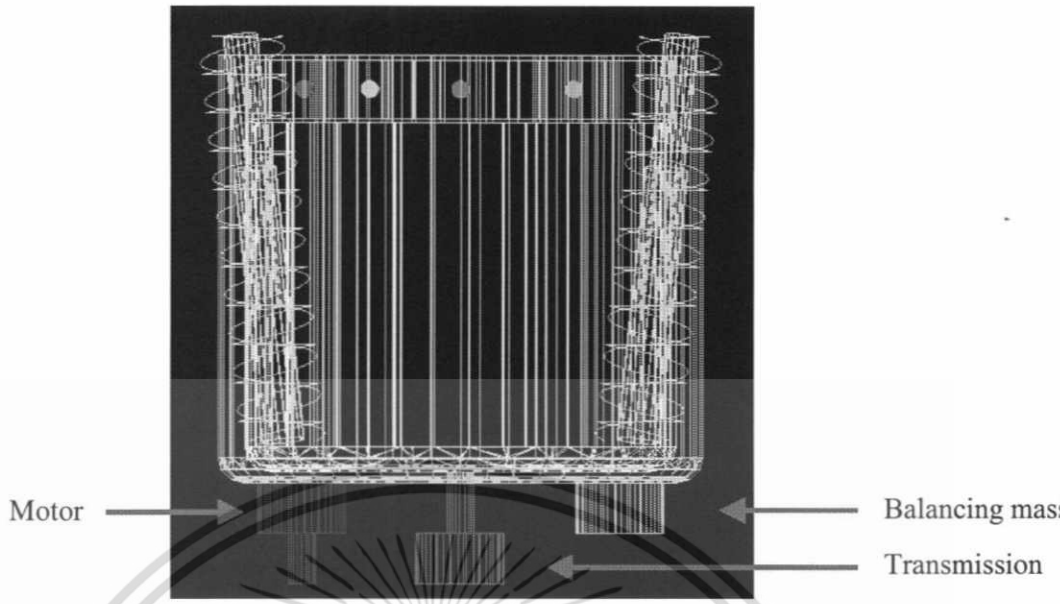
5.2 การศึกษาค่าความเร่งเมื่อติดตั้งมวลถ่วงที่ฐานของเครื่องซักผ้า

การเพิ่มค่ามวลของตะกร้าใส่ผ้า มวลของตัวทำสมดุลชนิดของเหลว (ไม่รวมมวลของน้ำเกลือที่บรรจุอยู่ภายใน) และมวลของถัง นั้นจะทำให้ค่าความสั่นสะเทือนนั้นลดลงได้ แต่นั้นหมายถึงต้องมีการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ในการผลิต ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนในการผลิตของผู้ผลิตอย่างมาก ดังนั้นจึงได้ทำการหาแนวทางใหม่เพื่อที่จะลดการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้า โดยแนวทางใหม่นี้ คือ การนำก้อนเหล็กไปยึดติดกับฐานของเครื่องซักผ้า ดังรูปที่ 5.6 ซึ่งจะเรียกก้อนเหล็กนี้ว่า มวลถ่วง (balancing mass) และเมื่อทำการขึ้นรูปให้กับมวลถ่วงเพื่อการติดตั้งที่เหมาะสมจะได้มวลถ่วงเท่ากับ 3 กิโลกรัม และรูปที่ 5.7 นั้นเป็นแบบจำลองที่มีมวลถ่วงติดอยู่ที่ด้านล่างของเครื่องซักผ้า



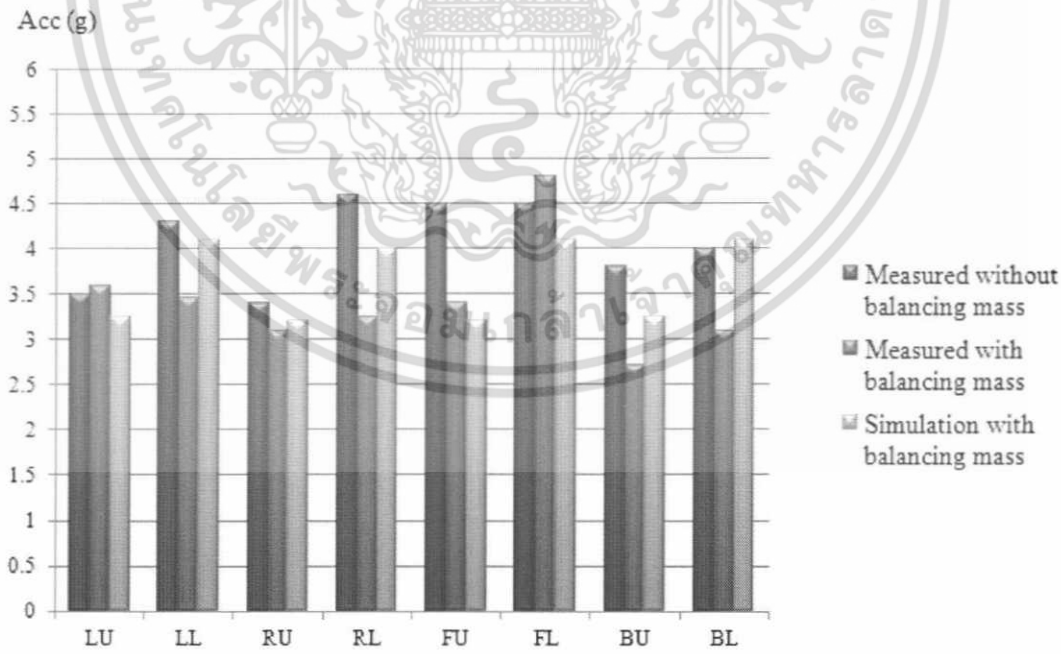
รูปที่ 5.6 ตำแหน่งในการติดตั้งของมวลถ่วงที่ฐานของเครื่องซักผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



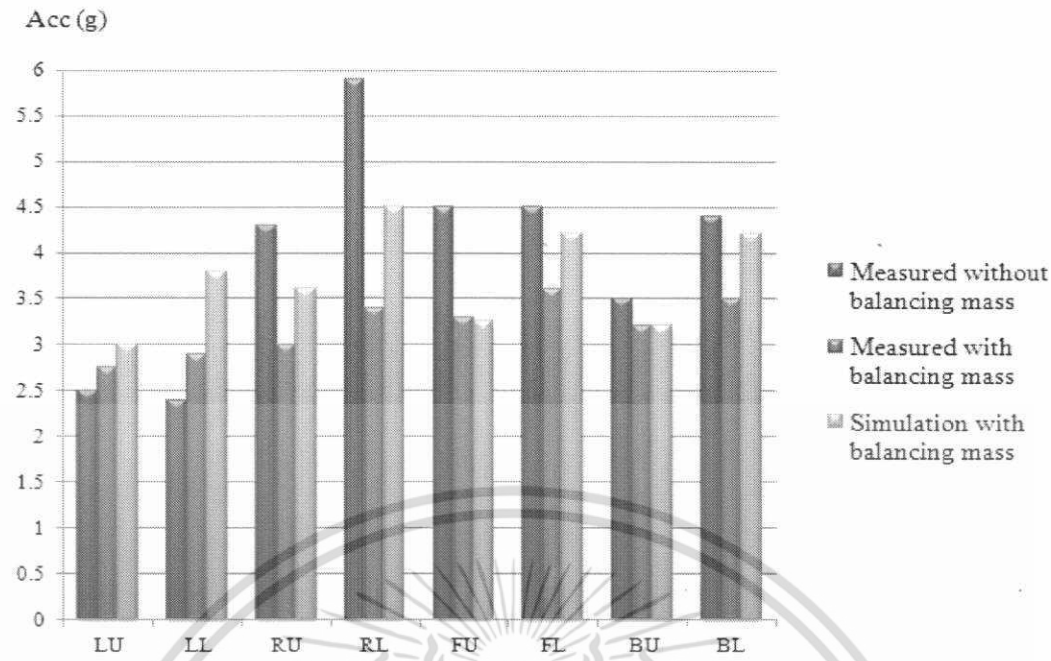
รูปที่ 5.7 ตำแหน่งในการติดตั้งของตัวมวลถ่วงที่ฐานของแบบจำลอง

จากการจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องซักผ้าแบบมีมวลถ่วงเปรียบเทียบกับจากการวัดค่าความเร่งของเครื่องซักผ้าที่สภาวะการปั่นแห้งทุกๆตำแหน่งในระนาบ XZ เพราะเป็นระนาบที่เกิดการสั่นสะเทือนมากที่สุด ซึ่งจะถูกแสดงในรูปที่ 5.8 - 5.9



รูปที่ 5.8 ความเร่งเฉลี่ย RMS ในแกน X จากผลการจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องซักผ้าแบบมีมวลถ่วงเปรียบเทียบกับการวัดความเร่งของเครื่องซักผ้าแบบก่อนและหลังติดมวลถ่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 ความเร่งเฉลี่ย RMS ในแกน Z จากผลการจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องซักผ้าแบบมีมวลถ่วงเปรียบเทียบกับการวัดความเร่งของเครื่องซักผ้าแบบก่อนและหลังติดมวลถ่วง

จากรูปที่ 5.8 - 5.9 จะเป็นความเร่งเฉลี่ย RMS ในแนวแกน X และ Z จากการวัดที่ก่อนและหลังการติดตั้งมวลถ่วงที่เครื่องซักผ้า และแบบจำลองเชิงตัวเลขที่มีการสร้างมวลถ่วงขนาด 3 กิโลกรัมที่แบบจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งพบว่าเมื่อมีการติดตั้งมวลถ่วงที่เครื่องซักผ้านั้นสามารถลดความเร่งกับเครื่องซักผ้าได้ โดยสามารถลดค่าความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ ก่อนการติดตั้งมวลถ่วงได้ถึง 8.086 เปอร์เซ็นต์ (การคำนวณความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ อ้างอิงมาจากภาคผนวก ข.) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองเชิงตัวเลขที่มีมวลถ่วง และค่าความเร่งเฉลี่ย RMS หลังการติดตั้งมวลถ่วงมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองเชิงตัวเลขที่มีการติดตั้งมวลถ่วงนั้นมีความแตกต่างกัน 11.1 เปอร์เซ็นต์

5.3 การออกแบบปัจจัยต่างๆที่สามารถลดการสั่นสะเทือนให้แก่เครื่องซักผ้าในสภาวะปั่นแห้ง

การออกแบบค่าปัจจัยที่เหมาะสมให้กับเครื่องซักผ้าแบบใบพัดที่สามารถลดการสั่นสะเทือนลงได้หลายๆปัจจัยที่มีความเกี่ยวข้องกันนั้นได้ใช้โปรแกรมทางสถิติศาสตร์มาช่วยในการออกแบบซึ่งจากผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 5.1 - 5.5 นั้นเป็นการวิเคราะห์เพียงทีละปัจจัยเพื่อหาเพื่อศึกษาผลกระทบ ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

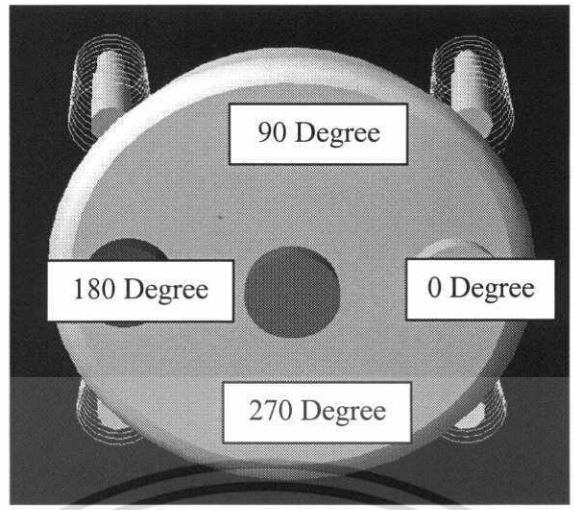
ในการหาผลกระทบแบบนี้ทางสถิติศาสตร์จะเรียกว่า "ผลกระทบหลัก"(Main Effect) ส่วนการวิเคราะห์ในการออกค่าปัจจัยที่สามารถลดการสั่นสะเทือนให้แก่เครื่องซักผ้าได้นั้นจะใช้วิธีการหาผลการตอบสนองทุกๆกรณีที่ปัจจัยต่างๆ โดยใช้หลักการ Exhaustive Search [11] มาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สามารถลดการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้า ซึ่งในการจำลองเชิงตัวเลขจากโปรแกรมวิเคราะห์การเคลื่อนที่ระบบเชิงกลนั้นไม่สามารถออกแบบค่าปัจจัยนี้ได้ แต่สามารถใช้แบบจำลองนี้ในการหาค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ในแต่ละตำแหน่งในแกน X และ Z และนำค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ทุกตำแหน่งในแกน X และ Z มาทำการหาค่าเฉลี่ยในแกน X และ Z ตามลำดับ ด้วยการเฉลี่ยทางเรขาคณิต หลังจากนั้นนำค่าความเร่งเฉลี่ยในแกน X และ Z มาหาค่าความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ ด้วยวิธีการรวมเวคเตอร์สองเวคเตอร์ที่ตั้งฉากกัน ซึ่งแกน X และ Z ได้ตั้งฉากซึ่งกันและกัน และนำค่าความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ มาวิเคราะห์โดยโปรแกรมทางสถิติศาสตร์เพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมที่สามารถลดการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าได้

ในการออกแบบค่าปัจจัยที่เหมาะสมให้กับเครื่องซักผ้าโดยโปรแกรมสถิติศาสตร์นั้นจะต้องมีการกำหนดปัจจัยที่ต้องการพิจารณาและระดับปัจจัยแต่ละปัจจัย โดยปัจจัยที่นำมาพิจารณาคือ ขนาดของมวลถ่วง ค่านิจของสปริง ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงและตำแหน่งองศาของมวลถ่วงที่ยึดติดกับฐานของถัง ซึ่งมีเป้าหมายในการหาความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ ในช่วงขอบเขตของปัจจัยต่างๆ ที่ได้ถูกกำหนด โดยขนาดของมวลถ่วง ค่านิจของสปริงและค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงได้ถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่สามค่า ส่วนตำแหน่งองศาของมวลถ่วงที่ยึดติดกับฐานของถังได้ถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่สี่ค่าดังตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.10 แสดงถึงตำแหน่งในการติดตั้งมวลถ่วงที่ตำแหน่งต่างๆ

ปัจจัย	ระดับปัจจัย	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3	ระดับที่ 4
มวลถ่วง (kg)	3	1 kg	3 kg	5 kg	-
ค่านิจของสปริง (N/mm)	3	1 N/mm	3 N/mm	5 N/mm	-
สัมประสิทธิ์ของตัวหน่วง (N-s/mm)	3	1 N-s/mm	3 N-s/mm	5 N-s/mm	-
ตำแหน่งในการติดตั้งมวลถ่วง (degree)	4	0 Degree	90 degree	180 degree	270 degree

ตารางที่ 5.2 ปัจจัยต่างๆและขนาดระดับที่จะใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 ตำแหน่งในการติดตั้งมวลถ่วงที่ตำแหน่งต่างๆที่ด้านล่างของถัง

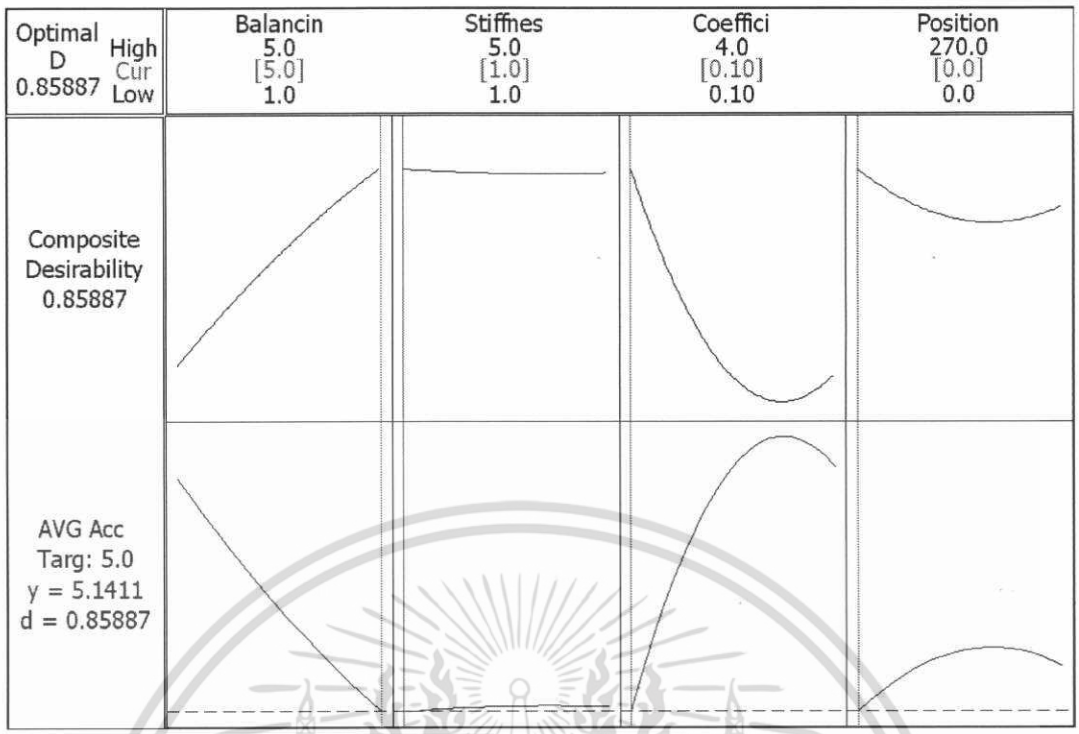
หลังจากการกำหนดปัจจัยที่สนใจและขนาดระดับจะได้จำนวนครั้งในการจำลองเชิงตัวเลขทั้งหมด 108 ครั้งตามหลักการความน่าจะเป็น และได้มีการกำหนดให้มีการทำซ้ำอีกหนึ่งครั้ง ดังนั้นจะต้องทำการจำลองเชิงตัวเลขทั้งหมด 216 ครั้ง ซึ่งได้ใช้โปรแกรมทางสถิติศาสตร์ช่วยในการออกแบบค่าตัวปัจจัยที่แปรที่เหมาะสมโดยใช้หลักการวิเคราะห์แบบ Exhaustive Search

จากการออกแบบปัจจัยที่เหมาะสมโดยใช้หลักการ Exhaustive search และนำความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ มาเขียนกราฟผลตอบสนองที่พื้นผิว (Response surface optimizer) ด้วยโปรแกรมทางสถิติศาสตร์จะได้ผลออกมาดังรูปที่ 5.11 ซึ่งปัจจัยต่างๆในรูปที่ 5.11 นั้นจะพบว่าขนาดของมวลถ่วงต้องมีขนาด 5.0 kg ค่านิจของสปริงทั้งสี่ตัวต้องเท่ากับ 1.00 N/mm ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงมีขนาด 0.1 N-s/mm และตำแหน่งที่ติดตั้งมวลถ่วงอยู่ที่ 0 องศา ที่จะทำให้ค่าความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ ที่มีค่าปัจจัยเริ่มต้นต่างๆที่ใช้ในการผลิตเครื่องซักผ้าโดยกำหนดมาจากผู้ผลิตเครื่องซักผ้านั้นลดลงจาก 5.8966 g ให้เหลือเพียง 5.1411 g หรือค่าความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ นั้นลดลงไปถึง 12.81 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 5.3

ความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ ของเครื่องซักผ้า	
ก่อนได้รับการออกแบบค่าปัจจัย	หลังได้รับการออกแบบค่าปัจจัย
5.8966 g	5.1411 g

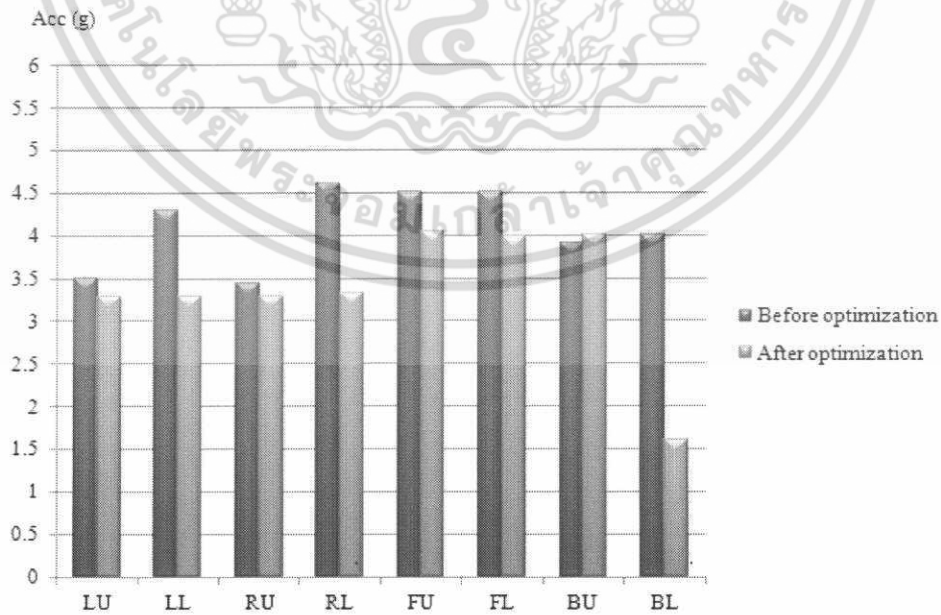
ตารางที่ 5.3 ความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ ของเครื่องซักผ้าก่อนและหลังการออกแบบค่าปัจจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



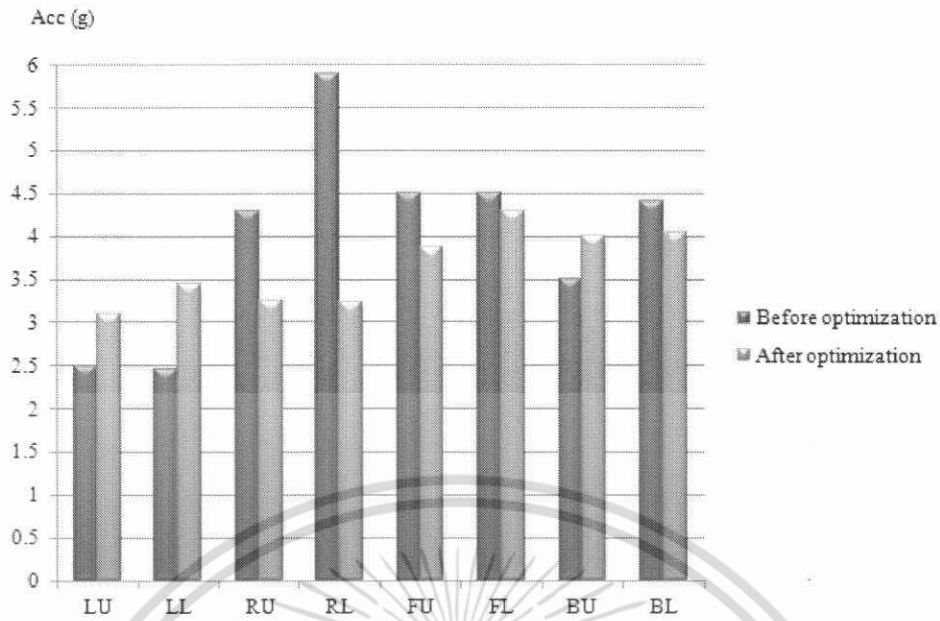
รูปที่ 5.11 ปัจจัยต่างๆที่ถูกออกแบบเพื่อลดความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ

รูปที่ 5.12 - 5.13 แสดงค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ที่ตำแหน่งต่างๆก่อนและหลังการออกแบบค่าปัจจัยต่างๆในแนวแกน X และ Z ตามลำดับโดยจะพบว่าค่าความเร่งเฉลี่ย RMS หลังการออกแบบค่าปัจจัยต่างๆนั้นมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ก่อนการออกแบบค่าปัจจัย



รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบความเร่งเฉลี่ย RMS ที่ทุกตำแหน่งในแกน X จากการวัดความเร่งก่อนและหลังการออกแบบค่าปัจจัยต่างๆ

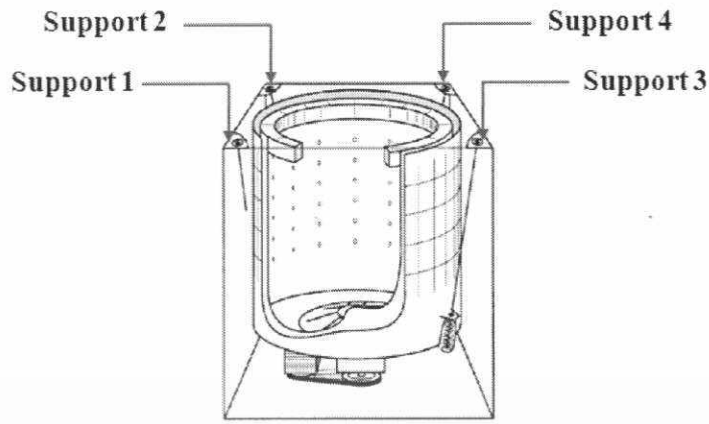
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 กราฟเปรียบเทียบความเร่งเฉลี่ย RMS ที่ทุกตำแหน่งในแกน Z จากการวัดความเร่งก่อนและหลังการออกแบบค่าปัจจัยต่างๆ

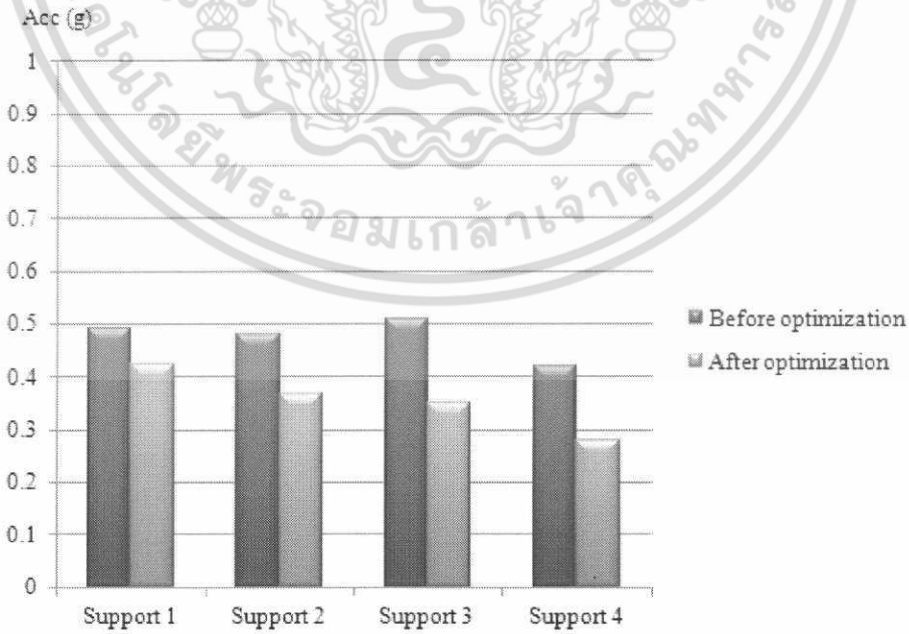
การสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าในช่วงสภาวะปั่นแห้งจะถูกส่งถ่ายไปยังชิ้นส่วนโครงสร้างซึ่งเป็นสิ่งที่ผู้ใช้งานสัมผัสได้ขณะใช้งานเครื่องซักผ้าจึงได้ทำการจำลองเชิงตัวเลขที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้างโดยมีการติดตั้งมวลถ่วง ซึ่งรูปที่ 5.14 เป็นรูปที่แสดงตำแหน่งที่ทำการจำลองค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้าง และรูปที่ 5.15 - 5.17 เป็นค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้างในแนวแกน X, Y และ Z ตามลำดับ จากแบบจำลองเครื่องซักผ้าก่อนและหลังการออกแบบค่าปัจจัยต่างๆให้แก่เครื่องซักผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



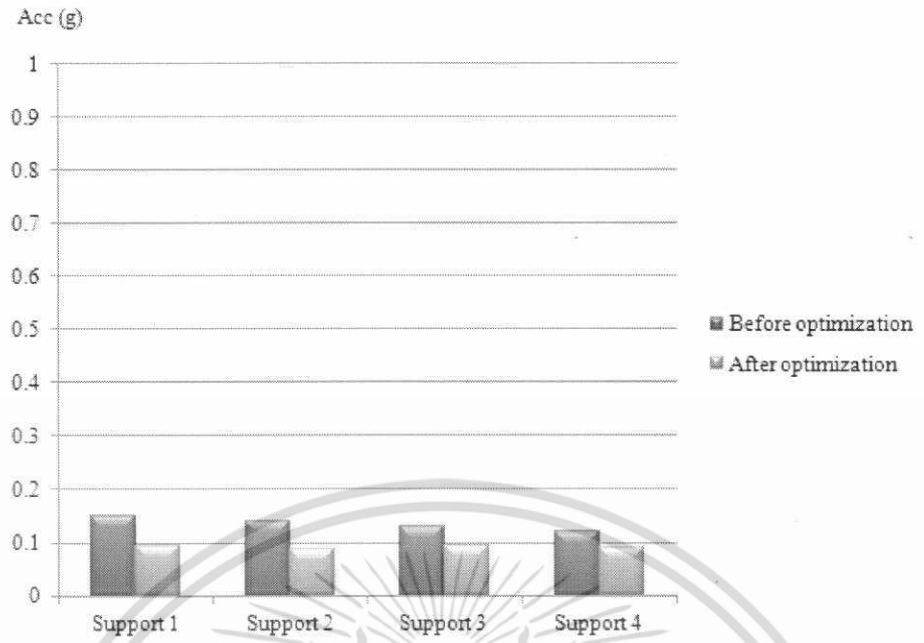
รูปที่ 5.14 ตำแหน่งที่ทำการจำลองค่าความค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้างจากแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ได้รับการออกแบบค่าปัจจัยต่างๆ

จากรูปที่ 5.15 - 5.17 เป็นค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้างในช่วงความเร็วรอบคงที่ในแนวแกน X, Y และ Z ตามลำดับ จากแบบจำลองเครื่องซักผ้าก่อนและหลังการออกแบบค่าปัจจัยต่างๆให้แก่เครื่องซักผ้า จะพบว่าค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ทั้งในแนวแกน X, Y และ Z ที่ได้ถูกออกแบบค่าปัจจัยต่างๆจะมีค่าน้อยกว่าค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ก่อนการออกแบบค่าปัจจัย

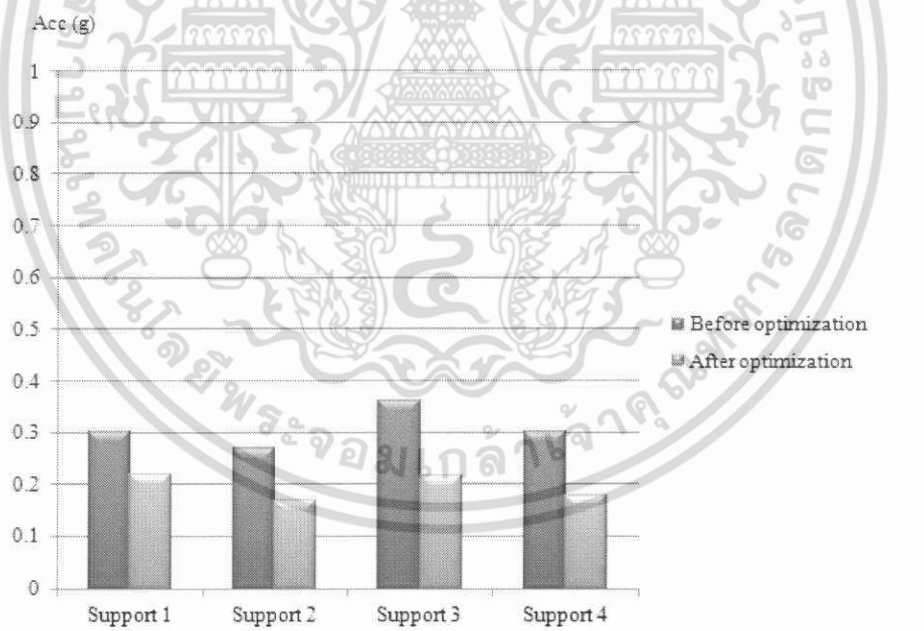


รูปที่ 5.15 ความเร่งเฉลี่ย RMS ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้างในแกน X ก่อนและหลังการออกแบบค่าปัจจัยต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



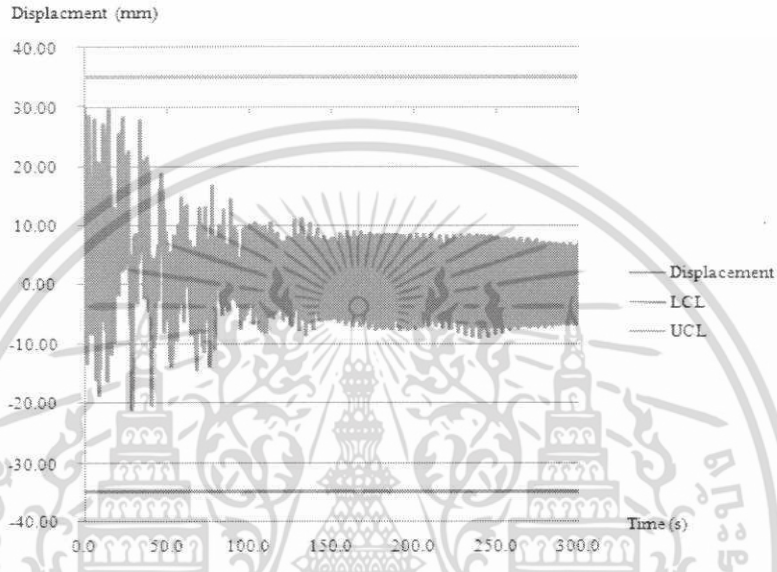
รูปที่ 5.16 ความเร่งเฉลี่ย RMS ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้างในแกน Y ก่อนและหลังการออกแบบค่าปัจจัยต่างๆ



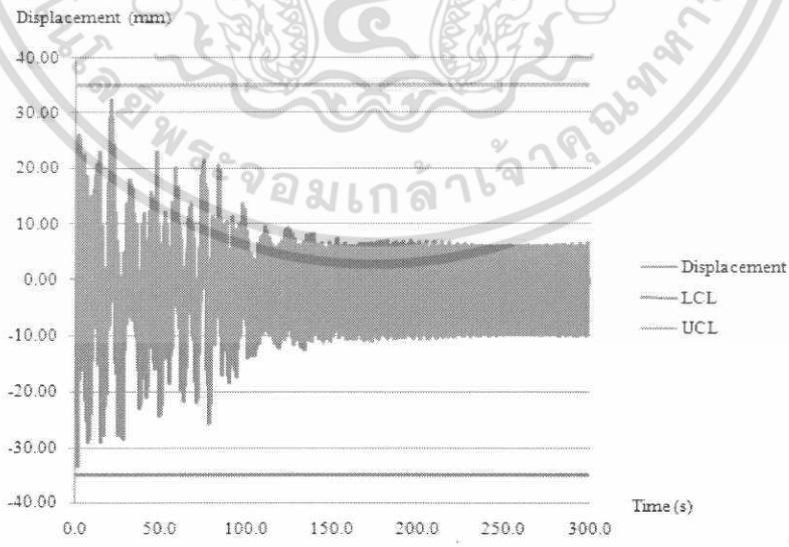
รูปที่ 5.17 ความเร่งเฉลี่ย RMS ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบรองรับกับชิ้นส่วนโครงสร้างในแกน Z ก่อนและหลังการออกแบบค่าปัจจัยต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.18 – 5.19 เป็นกราฟการจำลองการกระจัดของถังที่มีการติดตั้งมวลถ่วงในแนวแกน X และ Z ตามลำดับ โดยวัดจากจุดศูนย์กลางของถัง ซึ่งระยะการกระจัดของถังในแนวแกน X และ Z ต้องไม่เกิน ± 35 มิลลิเมตร ถ้าระยะการกระจัดในแนวแกน X และ Z ถังมากกว่า ± 35 มิลลิเมตรถังจะเกิดการกระแทกชิ้นส่วนโครงสร้างของถังทำให้เกิดเสียงดังขณะใช้งานเครื่องซักผ้าแบบใบพัดซึ่งจะทำให้ผู้ใช้งานสัมผัสได้และเกิดความไม่พึงพอใจ



รูปที่ 5.18 ระยะการกระจัดของถังในแนวแกน X จากการจำลองเชิงตัวเลขที่มีการติดตั้งมวลถ่วง



รูปที่ 5.19 ระยะการกระจัดของถังในแนวแกน Z จากการจำลองเชิงตัวเลขที่มีการติดตั้งมวลถ่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองระยะการกระจัดในแนวแกน X และ Z นั้นจะมีระยะการกระจัดสูงในช่วงความเร็วรอบไม่คงที่และการกระจัดนั้นจะเริ่มมีค่าคงที่ในช่วงความเร็วรอบคงที่ ซึ่งจากการจำลองระยะการกระจัด จะพบว่าระยะการกระจัดในช่วงความเร็วคงที่และความเร็วรอบไม่คงที่ที่มีการติดตั้งมวลถ่วงขนาด 5 กิโลกรัมและสปริงที่ระบบรองรับมีค่านิจเท่ากับ 1 นิวตันต่อมิลลิเมตร นั้นจะมีค่าไม่เกิน $\pm$ 35 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้ถังไม่กระแทกกับชิ้นส่วนโครงสร้างของเครื่องซักผ้า

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติของเครื่องซักผ้าภายหลังที่ได้ถูกดัดแปลง ให้ขนาดมวลถ่วงเท่ากับ 5 กิโลกรัม ค่านิจของสปริงเท่ากับ 1 นิวตันต่อมิลลิเมตร ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงเท่ากับ 0.1 นิวตัน-วินาทีต่อมิลลิเมตร และตำแหน่งในการติดตั้งมวลถ่วงอยู่ที่ 0 องศา จะพบว่าค่าความถี่ธรรมชาติในแกน X, Y และ Z เท่ากับ 0.9642, 1.7951 และ 0.974 Hz ตามลำดับ โดยการเพิ่มมวลให้แก่ระบบจะทำให้อัตราส่วนความถี่เพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้ขนาดของการสั่นลดลง ตามหลักการของความไม่สมดุลขณะทำการหมุน

Axis	Natural Frequency (HZ)	Rotation Speed (RPM)
X	0.9642 Hz	57.852 RPM
Y	1.7951 Hz	107.706 RPM
Z	0.974 Hz	58.44 RPM

ตารางที่ 5.4 ความถี่ธรรมชาติของเครื่องซักผ้าจากแบบจำลองทั้งในแกน X, Y และ Z หลังจากการออกแบบค่าปัจจัยต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดในสภาวะการปั่นแห้ง โดยใช้การจำลองเชิงตัวเลขเปรียบเทียบกับความเร่งที่วัดได้จากเครื่องซักผ้าแบบใบพัดขนาดความจุ 9.5 กิโลกรัม ซึ่งความเร่งเฉลี่ยจากการวัดและการจำลองเชิงตัวเลขในระนาบ XZ เป็นระนาบที่มีการสั่นสะเทือนมากที่สุดเมื่อเทียบกับระนาบ XY และ YZ ตามลำดับ ดังนั้นจึงมุ่งพิจารณาระนาบ XZ เป็นหลัก และได้นำค่าความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ จากแบบจำลองเชิงตัวเลขและจากการวัดมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งจะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนกันอยู่ที่ $\pm 2.94\%$ จึงได้นำแบบจำลองนี้มาศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าในสภาวะปั่นแห้ง เช่น ค่านิจของสปริง ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วง มวลของตัวทำสมดุลชนิดของเหลว เป็นต้น นอกจากนั้นยังได้ใช้แบบจำลองเป็นเครื่องมือช่วยการออกแบบค่าปัจจัยที่สามารถลดการสั่นสะเทือนหลายๆปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันอีกด้วย

จากการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีสามารถลดการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าทีละปัจจัย โดยปัจจัยอื่นๆจะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับข้อมูลจากทางผู้ผลิตเครื่องซักผ้า ซึ่งปัจจัยที่สามารถลดการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าได้แก่ มวลของถัง มวลของตัวทำสมดุลชนิดของเหลว (โดยไม่รวมมวลของน้ำเกลือ) และมวลของตะกร้าใส่ผ้า แต่การเพิ่มมวลของถัง มวลของตัวทำสมดุลชนิดของเหลว และมวลของตะกร้าใส่ผ้านั้นสามารถลดการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าได้ แต่ทางผู้ผลิตเครื่องซักผ้านั้นจะพบปัญหาในเรื่องต้นทุนที่เพิ่มขึ้นการผลิตจากการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ในการเพิ่มมวลของถัง มวลของตัวทำสมดุลชนิดของเหลวและมวลของตะกร้าใส่ผ้าและต้นทุนในการผลิตอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต อาทิ เช่น แม่พิมพ์ใหม่ที่ใช้ในการผลิตถัง ตะกร้าใส่ผ้าและตัวทำสมดุลชนิดของเหลว เป็นต้น ดังนั้นจึงได้ทำการคิดค้นวิธีในการเพิ่มมวลให้แก่เครื่องซักผ้า โดยการนำแท่งเหล็กไปยึดติดที่ฐานของเครื่องซักผ้า ซึ่งจะเรียกก้อนเหล็กนี้ว่า มวลถ่วง ซึ่งเมื่อทำการขึ้นรูปตัวมวลถ่วงให้มีรูปร่างและขนาดให้สามารถติดที่ฐานของเครื่องซักผ้าได้ โดยมวลถ่วงจะมีมวลเท่ากับ 3 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการติดตั้งมวลถ่วงขนาด 3 กิโลกรัมไว้ที่ฐานของเครื่องซักผ้านั้นทำให้ค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ในแกน X และ Z ซึ่งเป็นแกนที่มีค่าความเร่งสูงที่ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าในสภาวะปั่นแห้งลดลงได้ 8.086 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับแบบจำลองเชิงตัวเลข และจากแบบจำลองเชิงตัวเลขที่มีการติดตั้งมวลถ่วงที่ฐานของเครื่องซักผ้า พบว่าค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ในแกน X และ Z มีค่าลดลง ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับค่าความเร่งจากการวัดที่เครื่องซักผ้าที่มีการติดตั้งมวลถ่วง

จากการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยทีละปัจจัยตามที่ได้กล่าวมาในส่วนข้างต้น นั้นเป็นการหาอิทธิพลของปัจจัยหลักที่สามารถลดการสั่นสะเทือนลงได้แต่ไม่สามารถหาผลกระทบที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างของปัจจัยตั้งแต่สองปัจจัยขึ้นไปที่สามารถลดการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าที่สภาวะการปั่นแห้งได้ จึงได้ในการออกแบบทางสถิติศาสตร์มาเพื่อช่วยในการออกแบบค่าของปัจจัยที่สามารถลดการสั่นสะเทือนในการสภาวะการปั่นแห้งได้ โดยใช้แบบจำลองที่มีการติดตั้งมวลถ่วงที่ฐานของเครื่องซักผ้าช่วยในการวิเคราะห์ค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ที่ตำแหน่งต่างๆในแกน X และ Z ตามลำดับ ซึ่งปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ในการออกแบบได้แก่ ขนาดของมวลถ่วง ค่านิจของสปริง ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงและตำแหน่งในการติดตั้งมวลถ่วง หลังจากนั้นนำค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ที่ได้จากแบบจำลองมาทำการหาค่าเฉลี่ยในระนาบ XZ โดยใช้หลักการรวมเวคเตอร์สองเวคเตอร์ในแกนที่ตั้งฉากกันสองแกน และนำไปเข้าสู่กระบวนการทางสถิติศาสตร์เพื่อหาค่าของปัจจัยที่เหมาะสมที่สามารถลดการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าได้

จากการออกแบบค่าของปัจจัยที่สามารถลดการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าด้วยเครื่องซักผ้าด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติศาสตร์ ในได้ออกแบบให้ขนาดของมวลถ่วงเท่ากับ 5 กิโลกรัม ค่านิจของสปริงทั้งสี่นั้นเท่ากับ 1 นิวตันต่อมิลลิเมตร ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงเท่ากับ 0.1 นิวตัน-วินาทีต่อมิลลิเมตร และตำแหน่งองศาในการติดตั้งมวลถ่วงที่ตำแหน่ง 0 องศาซึ่งเป็นตำแหน่งที่ตรงข้ามกับมอเตอร์ไฟฟ้า โดยค่าปัจจัยต่างๆที่ถูกออกแบบนี้นั้นสามารถทำให้ค่าความเร่งเฉลี่ยในระนาบ XZ ของเครื่องซักผ้านั้นลดลงถึง 12.81 %

6.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางด้านพลศาสตร์ของวัตถุแข็งเกร็งจำลองการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดในสภาวะปั่นแห้งใช้เป็นเครื่องมือเพื่อการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าและศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความสั่นสะเทือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเครื่องซักผ้า เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นก่อนเข้าสู่กระบวนการพัฒนาประสิทธิภาพของเครื่องซักผ้าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เนื่องจากมีความสะดวกและมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าการสร้างชุดทดลองเพื่อใช้ในการศึกษาการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้า สำหรับผลจากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้แนวทางในการพัฒนาและออกแบบเครื่องซักผ้าแบบใบพัดให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

จากผลการจำลองเชิงตัวเลขนั้นพบว่าค่าความเร่งเฉลี่ยในบางตำแหน่งมีความแตกต่างกับการวัดค่าความเร่งเฉลี่ยจากการวัดจากเครื่องซักผ้า เนื่องจากในการจำลองเชิงตัวเลขนั้นได้จำลองให้เครื่องซักผ้านั้นเป็นวัตถุแข็งเกร็งจึงทำให้ผลที่ได้ออกมาคลาดเคลื่อนในบางตำแหน่ง ดังนั้นจึงควรใช้การจำลองทางไฟไนต์อิเลเมนต์มาช่วยวิเคราะห์ควบคู่กันไปด้วยเพื่อให้ผลการจำลองนั้นมีความแม่นยำยิ่งขึ้นทั้งในแนวแกน X, Y และ Z ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] สถาบันมาตราฐานอุตสาหกรรม.“ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเครื่องซักผ้า ด้านความปลอดภัย”. มอก.1463-2540.2540.หน้า 1-30

[2] Hai-Wei Chen , Qiu-Ju Zhang. “ Stability analyses of vertical axis automatic washing machine without balancer .” **Journal of Sound and Vibration** .Issue. 11 , 24 May 2010 .Page 2177 – 2192.

[3] S.Bae ,J.M. Lee,Y.J. Kang,J.S. Kang and J.R. Yun.“ DYNAMIC ANALYSIS OF AN AUTOMATIC WASHING MACHINE WITH A HYDRAULIC BALANCER.” **Journal of Sound and Vibration**.Vol. 257,No.1,2002.Page 3-18

[4] Conrad, D.C. and Soedel, W. “ On the Problem of Oscillatory Walk of Automatic Washing Machines.” **Journal of Sound and Vibration**.Vol.188,No.3,1995.page 301-314.

[5] SAMSUNG ELECTRONICS CO., LTD. “A Study on the Dynamic Behaviour of an Automatic Washing Machine.” **2001 Korea ADAMS User Conference**.11, 2001. Page.1-6

[6] F.F. Yap, N. Vahdati and H. Harmoko. “Design and analysis of vibration isolation systems for hard disk drives.” **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**.303.2006.Page. 52-56

[7] C. Cristalli, N. Paone and R.M. Rodriguez. “Mechanical fault detection of electric motors by laser vibrometer and accelerometer measurements.” **Mechanical Systems and Signal Processing**. 2006,20.2006.Page. 1350–1361

[8] Takayuki KOIZUMI, Nobutaka TSUJIUCHI and Yutaka NISHIMURA. “Modeling and Vibration Analysis of a Drum type Washing Machine.” Department of Engineering, Doshisha University.

[9] Chung-Hyo Jung , Chang-Sub Kim and Yun-Ho Choi. “A dynamic model and Numerical study on the liquid balancer used in an automatic washing machine.” **Journal of Mechanical Science and Technology.22.**2008.Page. 1843-1852

[10] O.S. Turkay , B.Kiray , A. K. Tugcu and I. T. Sumer. “FORMULATION AND IMPLEMENTATION OF PARAMETRIC OPTIMISATION OF A WASHING MACHINE SUSPENSION SYSTEM”. **Mechanical Systems and Signal Processing.9.**1995.Page 359-377

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] Jurg Nievergelt. "Exhaustive Search, Combinatorial Optimization : Exploring the Potential of Raw Computing Power". **Wiedermann Eds SOFSEM.2000**.Page 18-35

[12] Alok Sinha. 2012. **Vibration of mechanical systems.** New York : Cambridge University Press.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

การคำนวณหาค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกนต่างๆ

1. การคำนวณหาค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกนต่างๆจากการวัด

ค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ในแนวแกน X, Y และ Z ที่ตำแหน่งต่างๆในช่วงความเร็วรอบคงที่ที่สภาวะปั่นแห้งจากการวัดจะมีค่าดังตารางที่ ข.1

	ความเร่งเฉลี่ย RMS ในแนวแกน X	ความเร่งเฉลี่ย RMS ในแนวแกน Y	ความเร่งเฉลี่ย RMS ในแนวแกน Z
LU	3.5 g	1.7 g	2.5 g
LL	4.3 g	2.8 g	2.45 g
RU	3.45 g	1.3 g	4.3 g
RL	4.6 g	1.4 g	5.9 g
FU	4.5 g	1.8 g	4.5 g
FL	4.5 g	0.8 g	4.5 g
BU	3.9 g	0.9 g	3.5 g
BL	4 g	0.6 g	4.4 g

ตารางที่ ข.1 ความเร่งเฉลี่ย RMS ในแกน X, Y และ Z ที่ตำแหน่งต่างๆในช่วงความเร็วรอบคงที่ที่สภาวะปั่นแห้งจากการวัด

ค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกน X ($Acc_{\bar{x}}$) = $\frac{LU_x + LL_x + RU_x + RL_x + FU_x + FL_x + BU_x + BL_x}{8}$

$$= \frac{3.5 + 4.3 + 3.45 + 4.6 + 4.5 + 4.5 + 3.9 + 4}{8}$$

$$= 4.09375 \text{ g}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกน Y ($Acc_{\bar{y}}$) = $\frac{LU_y + LL_y + RU_y + RL_y + FU_y + FL_y + BU_y + BL_y}{8}$

= $\frac{1.7 + 2.8 + 1.3 + 1.4 + 1.8 + 0.8 + 0.9 + 0.6}{8}$

= 1.1875 g

ค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกน Z ($Acc_{\bar{z}}$) = $\frac{LU_z + LL_z + RU_z + RL_z + FU_z + FL_z + BU_z + BL_z}{8}$

= $\frac{2.5 + 2.45 + 4.3 + 5.9 + 4.5 + 4.5 + 3.5 + 4.4}{8}$

= 4.00625 g

เนื่องจากค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกน Y นั้นมีค่าน้อยกว่าค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกน X และ Z ค่อนข้างมาก ดังนั้นค่าความเร่งเฉลี่ยของเครื่องเครื่องซักผ้าจึงไม่นำค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกน Y มาพิจารณา ซึ่งค่าความเร่งเฉลี่ยของเครื่องเครื่องซักผ้าจะหาได้ดังสมการข้างล่าง

ค่าความเร่งเฉลี่ยของเครื่องซักผ้า = $\sqrt{(Acc_{\bar{x}})^2 + (Acc_{\bar{z}})^2}$

= $\sqrt{(4.09375)^2 + (4.00625)^2}$

= 5.7279 g

2. การคำนวณหาค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกนต่างๆจากผลการจำลองเชิงตัวเลข

ค่าความเร่งเฉลี่ย RMS ในแนวแกน X, Y และ Z ที่ตำแหน่งต่างๆในช่วงความเร็วรอบคงที่ที่สภาวะปั่นแห้งจากผลการจำลองเชิงตัวเลขจะมีค่าดังตารางที่ ข.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ความเร่งเฉลี่ย RMS ในแนวแกน X	ความเร่งเฉลี่ย RMS ในแนวแกน Y	ความเร่งเฉลี่ย RMS ในแนวแกน Z
LU	3.25 g	0.5 g	2.6 g
LL	4.8 g	0.4 g	4.15 g
RU	3.25 g	1.3 g	4.6 g
RL	4.7 g	1.4 g	5.9 g
FU	3.4 g	0.9 g	3.5 g
FL	4.85 g	1 g	5.2 g
BU	3.5 g	1.1 g	3.5 g
BL	4.9 g	1 g	4.6 g

ตารางที่ ข.2 ความเร่งเฉลี่ย RMS ในแนวแกน X, Y และ Z ที่ตำแหน่งต่างในช่วงความเร็วรอบคงที่ที่สภาวะปั่นแห้งจากผลการจำลองเชิงตัวเลข

ค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกน X ($Acc_{\overline{x}}$) = $\frac{LU_x + LL_x + RU_x + RL_x + FU_x + FL_x + BU_x + BL_x}{8}$

= $\frac{3.25 + 4.8 + 3.25 + 4.7 + 3.4 + 4.85 + 3.5 + 4.9}{8}$

= 4.081025 g

ค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกน Y ($Acc_{\overline{y}}$) = $\frac{LU_y + LL_y + RU_y + RL_y + FU_y + FL_y + BU_y + BL_y}{8}$

= $\frac{0.5 + 0.4 + 1.3 + 1.4 + 0.9 + 1 + 1.1 + 1}{8}$

= 0.95 g

ค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกน Z ($Acc_{\overline{z}}$) = $\frac{LU_z + LL_z + RU_z + RL_z + FU_z + FL_z + BU_z + BL_z}{8}$

= $\frac{2.6 + 4.15 + 4.6 + 5.9 + 3.5 + 5.2 + 3.5 + 4.6}{8}$

= 4.25625 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกน Y นั้นมีค่าน้อยกว่าค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกน X และ Z ค่อนข้างมาก ดังนั้นค่าความเร่งเฉลี่ยของเครื่องเครื่องซักผ้าจึงไม่นำค่าความเร่งเฉลี่ยในแนวแกน Y มาพิจารณา ซึ่งค่าความเร่งเฉลี่ยของเครื่องเครื่องซักผ้าจะหาได้ดังสมการข้างล่าง

ค่าความเร่งเฉลี่ยของเครื่องซักผ้า $= \sqrt{(Acc_{\bar{x}})^2 + (Acc_{\bar{z}})^2}$

$= \sqrt{(4.081025)^2 + (4.25625)^2}$

$= 5.8966$ g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.
สมการการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าแบบใบพัด [3]

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องซักผ้าแบบใบพัด [3]

โครงสร้างของเครื่องซักผ้าแบบใบพัด

โครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดดังรูปที่ ค.1 ซึ่งมีส่วนประกอบได้แก่ ตะกร้าใส่ผ้า ตัวกวนผ้า ถัง ก้านโลหะ (rod) มอเตอร์ไฟฟ้า ระบบรองรับการสั่นสะเทือน (suspension) ซึ่งจะประกอบไปด้วยสปริงและกระบอกลมและตัวทำสมดุลชนิดของเหลวซึ่งภายในจะมีน้ำเกลือบรรจุอยู่เพื่อช่วยลดการสั่นสะเทือน [3]

รูปที่ ค.1 โครงสร้างของเครื่องซักผ้าแบบใบพัด

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวทำสมดุลชนิดของเหลว (Liquid balancer) [3], [9]

ตัวทำสมดุลชนิดของเหลวซึ่งทำจากพลาสติกภายในบรรจุด้วยน้ำเกลือ ซึ่งในการปั่นแห้งน้ำเกลือจะทำหน้าที่สำคัญในการลดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากมวลไม่สมดุล โดยน้ำเกลือจะเคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามกับมวลไม่สมดุล เมื่อ R_o และ R_i คือ รัศมีภายนอกและภายในของตัวทำสมดุลชนิดของเหลว ตามลำดับ V คือ ปริมาตรของน้ำเกลือ ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำเกลือ ω คือ ความเร็วในการหมุน S คือ จุดศูนย์กลางของรูปทรง (geometry center) c คือระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของน้ำเกลือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียบกับตำแหน่ง S (centroid) O คือ จุดศูนย์กลางของการหมุน e คือ ระยะห่างการเยื้องศูนย์เมื่อเทียบกับตำแหน่ง S และ R_s คือ รัศมีภายในของผิวน้ำเกลือเมื่อ O เป็นจุดศูนย์กลาง โดยขนาดของแรงหนีศูนย์กลางสามารถหาได้จากสมการที่ (1)

$$F = \int dF \cos\theta = \rho\omega^2 e \int dV + \rho\omega^2 \int x dV \tag{1}$$

ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของน้ำเกลือเทียบกับตำแหน่ง S มีค่าเท่ากับ

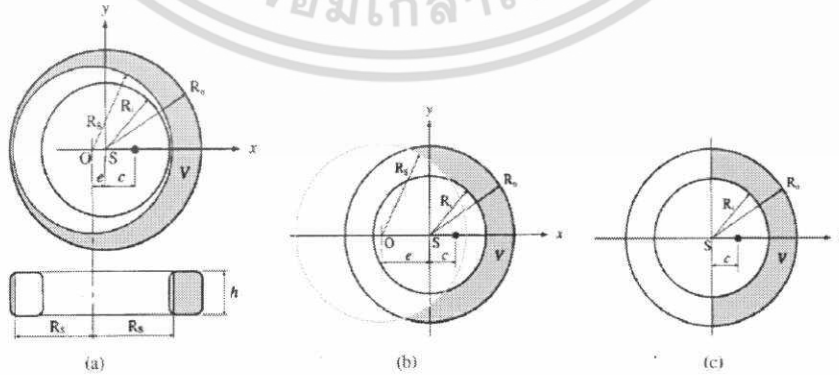
$$c = \int x dV / \int dV \tag{2}$$

และปริมาตรของน้ำเกลือหาได้จากสมการที่ (3)

$$V = q\pi\left(R_o^2 - R_i^2\right)h = \pi\left(R_o^2 - R_s^2\right)h \tag{3}$$

เมื่อ

$$R_s = \sqrt{(1-q)R_o^2 - qR_i^2} \tag{4}$$



รูปที่ ค.2 จุดศูนย์กลางของน้ำเกลือที่การหมุน ณ ตำแหน่งต่างๆ [3], [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการที่ (3) และ (4) ไปแทนค่าในสมการที่ (2) เพื่อจะหาค่า $\int x\mathrm{d}V$ ได้สมการใหม่ดังนี้

$$\int x\mathrm{d}V = \left(\int_{-R_O}^{R_O} x\sqrt{R_o^2 - x^2}\,dx - \int_{-R_s-e}^{R_s-e} x\sqrt{R_s^2 - (x+e)^2}\,dx \right)$$

$$= \pi R_s^2 eh \qquad (5)$$

จากสมการที่ (3) และ (5) จึงสามารถหาระยะคือระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของน้ำเกลือเทียบ\ กับตำแหน่ง S ได้ดังสมการที่ (94)

$$c = \frac{R_s^2 e}{R_O^2 - R_s^2} \equiv se \qquad (6)$$

เมื่อ

$$s \equiv \frac{R_s^2}{R_o^2 - R_s^2} \qquad (7)$$

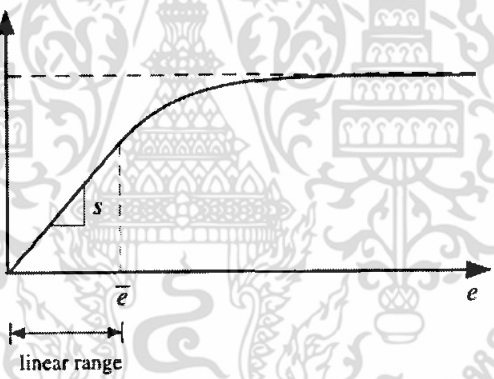
จากสมการที่ (6) จะพบว่าเป็นระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของน้ำเกลือเทียบกับตำแหน่ง S นั้นมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกัน เมื่อ $e \le \bar{e}$ โดยของเหลวภายในตัวทำสมดุลชนิดของเหลวจะมีลักษณะการเคลื่อนที่ดังรูปที่ ค.2(a) ในกรณีที่ค่า $e > \bar{e}$ และ $e >> \bar{e}$ ของเหลวภายในตัวทำสมดุลชนิดของเหลวจะมีลักษณะการเคลื่อนที่ดังรูปที่ ค.2(b) และ ค.2(c) ตามลำดับ และยังมีประพฤติตัวเหมือนวัตถุแข็งเกร็งอีกด้วย จึงทำให้ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของน้ำเกลือเทียบกับตำแหน่ง S นั้นมีค่าคงสูงสุดและยังมีค่าคงที่ด้วย ซึ่งระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของน้ำเกลือเทียบกับตำแหน่ง S สูงสุด (c^*) นั้นสามารถหาได้ดังสมการที่ (8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$c^* = \frac{2h\int_0^{qh}\int_{R_i}^{R_o} r^2\cos\theta \cdot dr \cdot d\theta}{2h\int_0^{qh}\int_{R_i}^{R_o} r dr \cdot d\theta}$$

$$= \frac{2\left(R_o^2 + R_o R_i + R_i^2\right)\left(\sin(q\pi)\right)}{3\left(R_o + R_i\right)(q\pi)} \qquad (8)$$

จากสมการที่ (6) และ (8) สามารถเขียนกราฟระหว่างระหว่างจุดศูนย์กลางของน้ำเกลือเทียบกับตำแหน่ง $S(c)$ กับระยะห่างการเยื้องศูนย์เมื่อเทียบกับตำแหน่ง $S(e)$ จะได้ผลดังรูปที่ ค.3 [3]



รูปที่ ค.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจุดศูนย์กลางของน้ำเกลือเทียบกับตำแหน่ง S กับระยะห่างการเยื้องศูนย์เมื่อเทียบกับตำแหน่ง S [3]

จากรูปที่ ค.3 ค่าความชันของกราฟจะพบว่ามีช่วงหนึ่งที่ค่า c และ e มีค่าแปรผันตรงกันซึ่งเรียกว่า ช่วงที่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (linear range) โดยค่า $\bar{e}$ เป็นค่าการเยื้องศูนย์สูงสุดที่ยังมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ส่วน c^* จะเป็นค่าระยะห่างมากที่สุดระหว่างจุดศูนย์กลางของน้ำเกลือเทียบกับตำแหน่ง S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากสมการที่ (6) และ (8) จะสามารถเขียนสมการที่บ่งบอกค่าระยะห่างจุดศูนย์กลางของน้ำเกลือเทียบกับตำแหน่ง $S(c)$ แบบมีเงื่อนไขได้ดังสมการที่ (9)

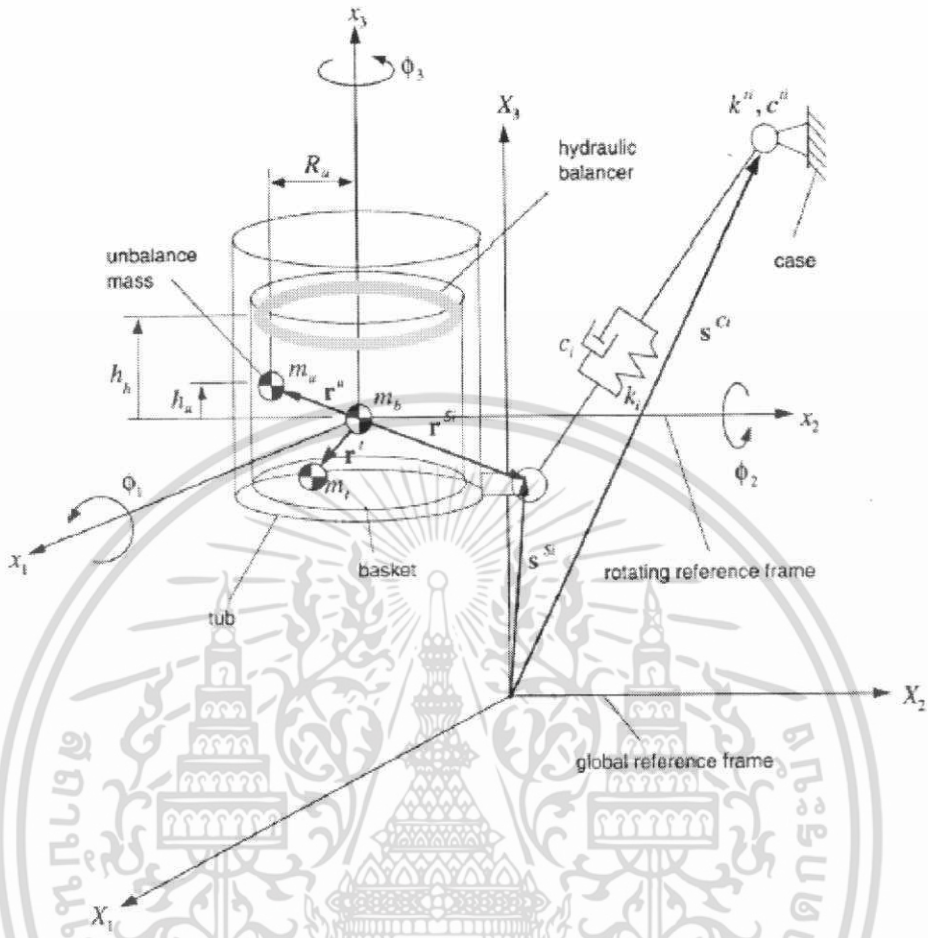
$$c = \begin{cases} se\ , & e < \bar{e} \\ c^*\ , & e \to \infty \end{cases} \tag{9}$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เครื่องซักผ้าแบบใบพัด

(Pulsator type washing machine mathematic model) [3]

แบบจำลองการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดจะถูกแสดงไว้ดังรูปที่ ค.4 โดย X_1, X_2 และ X_3 คือพิกัดอ้างอิงของโลก (global reference) x_1, x_2 และ x_3 คือ พิกัดอ้างอิงของการหมุน (rotating reference) โดยอยู่ที่จัดศูนย์กลางมวลของตะกร้าใส่ผ้า เวคเตอร์ **s** คือ เวคเตอร์ตำแหน่งที่อ้างอิงกับพิกัดอ้างอิงของโลก เวคเตอร์ **r** คือ เวคเตอร์ตำแหน่งที่อ้างอิงกับพิกัดอ้างอิงของการหมุน เวคเตอร์ **x** คือ เวคเตอร์ของการกระจัดในแนวแกนเทียบกับพิกัดอ้างอิงของโลก เวคเตอร์ ϕ คือ เวคเตอร์ของการกระจัดการหมุนเทียบกับพิกัดอ้างอิงของโลก และตัวอักษรยก $(\bullet)^b, (\bullet)^t, (\bullet)^u, (\bullet)^h$ หมายถึง ตะกร้าใส่ผ้า ถัง มวลที่ทำให้เกิดความไม่สมดุล ตัวทำสมดุลชนิดของเหลว ส่วน $(\bullet)^{Si}$ คือ ตำแหน่งของก้านโลหะ (rod) ที่ติดกับถัง และ $(\bullet)^{Ci}$ ตำแหน่งของก้านโลหะที่ติดกับโครงสร้าง (case) ส่วนตัวอักษรห้อย $(\bullet)_1, (\bullet)_2$ และ $(\bullet)_3$ หมายถึง ปัจจัยที่สนใจพิจารณาในแกน x_1 x_2 และ x_3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.4 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าแบบใบพัด [3]

เมื่อสมมติให้เครื่องซักผ้าเกิดการหมุนเพียงเล็กน้อย ค่าเวคเตอร์ของการกระจัดการเลื่อนตำแหน่งของถังและมวลไม่สมดุลจะสามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\mathbf{x}^{t} = \mathbf{x}^{b} + \mathbf{Q}\mathbf{r}^{t} \tag{10}$$

$$\mathbf{x}^{u} = \mathbf{x}^{b} + \mathbf{Q}\mathbf{r}^{u} \tag{11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & \phi_3 & -\phi_2 \\ -\phi_3 & 1 & \phi_1 \\ \phi_2 & -\phi_1 & 1 \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$\mathbf{r}^t = \begin{bmatrix} r_1^t & r_2^t & r_3^t \end{bmatrix}^T \tag{13}$$

และ

$$\mathbf{r}^u = \begin{bmatrix} R_u \cos\theta & R_u h_u \cos\theta \end{bmatrix}^T \tag{15}$$

โดยที่เวคเตอร์ $\mathbf{r}^t$, $\mathbf{r}^u$, R_u และ h_u คือเวคเตอร์ตำแหน่งของถัง มวลไม่สมดุล รัศมีในการหมุนของมวลไม่สมดุลและความสูงของมวลไม่สมดุล ตามลำดับ ซึ่งตัวแปรต่างๆจะถูกแสดงในรูปที่ ค.4 และเมทริกซ์ $\mathbf{Q}$ คือเมทริกซ์เปลี่ยนแปลงการหมุนจากแกนอ้างอิงหมุนไปสู่แกนอ้างอิงโลก นอกจากนั้นยังสามารถหาเวคเตอร์ความเร็วในการหมุนของตะกร้าใส่ผ้าและถังได้ดังสมการที่ (16) และ (17)

$$\dot{\psi}^b = \mathbf{Q}\dot{\phi} + \omega \tag{16}$$

$$\dot{\psi}^t = \mathbf{Q}\dot{\phi} \tag{17}$$

เมื่อ $\omega = [0,0,\dot{\theta}]^T$ คือ เวคเตอร์ในการหมุนเชิงมุมของตะกร้าใส่ผ้าเมื่อเทียบกับถัง $\dot{\phi}$ คือ เวคเตอร์การกระจัดเชิงมุมของแกนการหมุน และ θ คือ การกระจัดเชิงมุม

จากสมการที่ (10) - (17) จะสามารถหาพลังงานจลน์และพลังงานศักย์เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของระบบได้ดังนี้

$$T = \frac{1}{2}m_b\left\|\dot{x}^b\right\|^2 + \frac{1}{2}m_t\left\|\dot{x}^t\right\|^2 + \frac{1}{2}m_u\left\|\dot{x}^u\right\|^2 + \frac{1}{2}\left(\dot{\psi}^b\right)^T I_b\dot{\psi}^b + \frac{1}{2}\left(\dot{\psi}^t\right)^T I_t\dot{\psi}^t \tag{18}$$

$$V_g = \left(m_b x_3^b + m_t x_3^t + m_u x_3^u\right)g \tag{19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ m_b, m_t, m_u, I_b, I_t, $\dot{x}^b$, $\dot{x}^t$, $\dot{x}^u$, $\dot{\psi}^b$, $\dot{\psi}^t$, x_3^b, x_3^t และ x_3^u คือ มวลของตะกร้า มวลของถัง มวลที่ทำให้เกิดความไม่สมดุล โมเมนต์ความเฉื่อยของตะกร้า โมเมนต์ความเฉื่อยของถัง เวคเตอร์ความเร็วของตะกร้า เวคเตอร์ความเร็วของถัง เวคเตอร์ความเร็วเชิงมุมของตะกร้า เวคเตอร์ความเร็วของถัง การกระจัดในแนวแกนที่สามของถัง การกระจัดในแนวแกนที่สามของตะกร้า และการกระจัดในแนวแกนที่สามของมวลไม่สมดุล ตามลำดับ โดยพจน์ที่ 1 - 5 ของสมการที่ (18) คือ ค่าพลังงานจลน์จากการเลื่อนตำแหน่งของตะกร้า ถัง มวลไม่สมดุล และพลังงานจลน์จากการหมุนของตะกร้าและถังใส่ผ้า ตามลำดับ ส่วนสมการที่ (19) พจน์ที่ 1 - 3 คือค่าพลังงานศักย์จากแรงโน้มถ่วงของตะกร้า ถัง และมวลไม่สมดุล ตามลำดับ

แรงที่เกิดจากสปริงและตัวหน่วงในแนวแกนการเลื่อนตำแหน่งและแนวแกนการหมุนจากระบบรองรับการสั่นสะเทือนนั้นสามารถหาได้ดังสมการที่ (20) และ (21) ตามลำดับ

$$F_{SDx_j} = -\sum_{i=1}^{4}(k_i\delta_i + c_i v_i)\frac{\partial L_i}{\partial x_j^b} \tag{20}$$

$$F_{SD\phi_j} = -\sum_{i=1}^{4}(k_i\delta_i + c_i v_i)\frac{\partial L_i}{\partial \phi_j} \tag{21}$$

เมื่อ

$$L_i = \left\| x^{Si} - x^{Ci} \right\| \tag{22}$$

$$\delta_i = L_i - L_{oi} \tag{23}$$

$$v_i = x^{Si} \cdot e^i \tag{24}$$

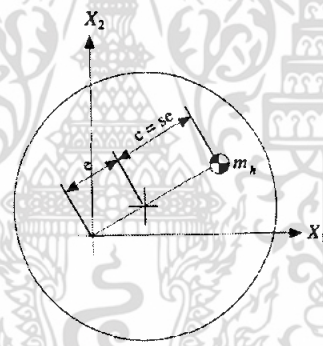
เมื่อ j คือแกนการหมุนที่ 1, 2 และ 3 โดยที่ k_i คือ ค่านิจของสปริง δ_i คือ ระยะหดตัวของสปริง c_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง v_i คือ ความเร็วที่เกิดขึ้นกับตัวหน่วง L_{oi} คือความยาวเริ่มต้นของสปริงของระบบรองรับการสั่นสะเทือน L_i คือความยาวสุดท้ายของสปริงของระบบรองรับกาสั่นสะเทือน และ e^i คือ เวคเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศของระบบรองรับการสั่นสะเทือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนั้นจะพบว่าตัวทำสมดุลชนิดของเหลวที่หมุนด้วยความเร็วรอบคงที่จะมีจุดศูนย์กลางมวลห่างจากพิกัดอ้างอิงโดยรวมในแกน X_3 เป็นระยะคงที่โดยมีค่าเท่ากับ $e+c$ ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งจากความสัมพันธ์ข้างต้นจะทำให้สามารถเขียนสมการของเวคเตอร์ s^h ซึ่งเป็นเวคเตอร์การกระจัดของจุดศูนย์กลางของตัวทำสมดุลชนิดของเหลวที่หมุนด้วยความเร็วคงที่ได้ดังสมการที่ (25)

$$s^h = \begin{Bmatrix} s_1^h \\ s_2^h \\ s_3^h \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (1+c/e)\left(s_{o1}^b + x_1^b + h_h\phi_2\right) \\ (1+c/e)\left(s_{o2}^b + x_2^b + h_h\phi_1\right) \\ \left(s_{o3}^b + x_3^b + h_h\right) \end{Bmatrix} \tag{25}$$

เมื่อ s_o^b คือ เวคเตอร์เริ่มต้นของตะกร้าใส่ผ้า



รูปที่ ค.5 ตำแหน่งพิกัดต่างๆที่ตัวทำสมดุลชนิดของเหลว [3]

จากสมการที่ (25) จึงทำให้หาค่าความเร่งของตัวทำสมดุลชนิดของเหลวได้ด้วยเช่นกัน

$$\ddot{x}^h = \frac{\partial^2}{\partial t^2} s^h = \begin{Bmatrix} (1+c/e)\left(\ddot{x}_1^b + h_h\ddot{\phi}_2\right) \\ (1+c/e)\left(\ddot{x}_2^b + h_h\ddot{\phi}_1\right) \\ \ddot{x}_3^b \end{Bmatrix} \tag{25}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (25) จะทำให้หาแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของตัวทำสมดุลชนิดของเหลวได้ดังสมการ

$$F_{HB} = m_h \begin{Bmatrix} -\ddot{x}_1^h \\ -\ddot{x}_2^h \\ -\ddot{x}_3^h + g \end{Bmatrix} \equiv \begin{Bmatrix} F_{HBx1} \\ F_{HBx2} \\ F_{HBx3} \end{Bmatrix} \tag{26}$$

จากสมการที่ (26) จะนำไปหาโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางมวลของตะกร้าใส่ผ้าได้ดังนี้

$$M_{HB} = \left(s^h - s_o^b - x^b\right) \times F_{HB} \equiv \begin{Bmatrix} F_{HB\phi 1} \\ F_{HB\phi 2} \\ F_{HB\phi 3} \end{Bmatrix} \tag{27}$$

จากสมการทั้งหมดที่กล่าวมานำมาเขียนเป็นสมการการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าแบบใบพัดได้โดยเขียนเป็นสมการลากรานจ์ได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_j^b}\right) - \frac{\partial T}{\partial x_j^b} + \frac{\partial V}{\partial x_j^b} = F_{SDx\,j} + F_{HBx\,j} \tag{28}$$

เมื่อ j คือ แกนการหมุนที่ 1, 2 และ 3

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \phi_j}\right) - \frac{\partial T}{\partial \phi_j} + \frac{\partial V}{\partial \phi_j} = F_{SD\phi\,j} + F_{HB\phi\,j} \tag{29}$$

เมื่อ j คือ แกนการหมุนที่ 1, 2 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายรัชพล รัศมีโรจน์
วัน เดือน ปีเกิด	6 มีนาคม 2526
สถานที่เกิด	จังหวัดฉะเชิงเทรา
ที่อยู่	77/112 หมู่ 2 หมู่บ้านพนมแลนด์แอนด์เฮาส์ ตำบล พนมสารคาม อำเภอ พนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา 24120
ประวัติการศึกษา	2548 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ.2548-2549	ทำงานที่บริษัท ชูโอไทย เคเบิ้ล จำกัด ในตำแหน่งวิศวกร แผนกวิศวกรรม รับผิดชอบในส่วนการออกแบบเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตสายเคเบิ้ลสำหรับคันส่งเกียร์ เคเบิ้ลสำหรับการควบคุมอุณหภูมิในห้องโดยสารรถยนต์และไฟเบอร์ในท่อไอเสียในรถยนต์
พ.ศ.2549-2550	ทำงานที่บริษัท บริดจสโตน เอ็นซีอาร์ จำกัด ในตำแหน่งวิศวกร แผนกซ่อมบำรุง รับผิดชอบในส่วนการดูแลบำรุงรักษาเครื่องจักรให้มีประสิทธิภาพและปรับปรุงเครื่องจักรให้มีความปลอดภัยในขณะทำงาน
พ.ศ.2550-2551	ทำงานที่บริษัท นิวแม็กซ์ จำกัด ในตำแหน่งวิศวกรขาย แผนกไฮดรอลิกส์ รับผิดชอบในส่วนการหาลูกค้าใหม่และประสานงาน ระหว่างลูกค้าและแผนกบริการ
พ.ศ.2554-ปัจจุบัน	ทำงานที่บริษัท เอ็นเอ็กซ์พี เซมิคอนดักเตอร์ (ประเทศไทย) จำกัด ในตำแหน่งวิศวกร รับผิดชอบในส่วนกระบวนการผลิตวงจรรวม ในกระบวนการ back grinding, die attaching, manual packing และ wafer back coating

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

พ.ศ.2553	รัชพล รัศมีโรจน์ , ณัฐวุฒิ เดไปวา และ อุนนัต พิณโสภณ. “การศึกษาและจำลองการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าชนิดฝาบนในสภาวะปั่นหมาด” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24, 20 ตุลาคม - 22 ตุลาคม 2553, จังหวัดอุบลราชธานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้