การศึกษาแบบรูปสัญญาณการสั่นสะเทือนจากปรากฏการณ์คาวิเทชันในชุดทดลอง

นาย ประสม ดำรงพงษ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-334-689-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I19247667

A STUDY OF VIBRATION SIGNAL PATTERN FROM CAVITATION PHENOMENON IN AN EXPERIMENTAL APPARATUS

MR. PRASOM DAMRONGPONG

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-334-689-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาแบบรูปสัญญาณการสั่นสะเทือนจากปรากฏการณ์คาวิเทชันในชุดทดลอง
โดย	นาย ประสม ดำรงพงษ์
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุศล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล ปานงาม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุศล)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประสม ดำรงพงษ์ : การศึกษาแบบรูปสัญญาณการสั่นสะเทือนจากปรากฏการณ์คาวิเทชันในชุดทดลอง (A STUDY OF VIBRATION SIGNAL PATTREN FROM CAVITATION PHENOMENON IN AN EXPERIMENTAL APPARATUS) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุศล, 250 หน้า. ISBN 974-334-689-9

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษารูปแบบสัญญาณการสั่นสะเทือนจากปรากฏการณ์คาวิเทชันในชุดทดลองที่มีออริฟิสเป็นตัวทำให้เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ซึ่งสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ศึกษาจะเป็นสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่

ออริฟิสสำหรับใช้ในการทดลองที่มีขนาดรูต่างๆกัน 3 ขนาดพร้อมด้วยท่อใสที่ต่อจากออริฟิสเพื่อใช้สังเกตปรากฏการณ์คาวิเทชันด้วยสายตาจะถูกประกอบกับเครื่องที่ใช้สร้างปรากฏการณ์คาวิเทชันที่ระดับความรุนแรงต่างๆกัน จากการทดลองและทำการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนพบว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดทดลองขณะเกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันจะมีรูปแบบแตกต่างจากสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดทดลองเมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน กล่าวคือจะมีสัญญาณแถบกว้างลักษณะ Noise Floor ที่ความถี่สูงเกิดขึ้นและมีขนาดยอดสัญญาณการสั่นสะเทือนจากปรากฏการณ์คาวิเทชันสูงขึ้นซึ่งตรงกับความถี่ธรรมชาติของชุดทดลองคือที่ประมาณ 7250 CPM 8500 CPM 9900 CPM นอกจากนี้ขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบ Noise Floor ทุกๆความถี่จะเพิ่มขึ้นเมื่อปรากฏการณ์คาวิเทชันรุนแรงขึ้น โดยปรากฏการณ์คาวิเทชันจะรุนแรงขึ้นเมื่อ Cavitation Number น้อยลงส่งผลให้เกิดแรงกระทำกับระบบมากขึ้น และยังพบว่าปรากฏการณ์คาวิเทชันที่เกิดจากการไหลผ่านออริฟิสเริ่มเกิดให้เห็นได้ด้วยตาเมื่อ Cavitation Number มีค่าประมาณ 4.53 และขนาดรูของออริฟิสที่เปลี่ยนไปมีผลต่อ Cavitation Number ที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันน้อย

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต.....ประสม ดำรงพงษ์.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

4070331321 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

PRASOM DAMRONGPONG : A STUDY OF VIBRATION SIGNAL PATTERN FROM CAVITATION PHENOMENON IN AN EXPERIMENTAL APPARATUS. THESIS ADVISER : ASSIST.PROF.KAUKEART BOONCHUKOSOL, Dr.Ing. 250 pp. ISBN 974-334-689-9

This research is the study of the vibration signal pattern in frequency domain from cavitation phenomenon in experimental apparatus.

Orifices which used in this experiment have 3 sizes and observation device which linked from orifice is made from acrylic pipe. The result of this study shows that the vibration signals of the experimental apparatus which has cavitation phenomenon different from the one that does not have cavitation phenomenon. The vibration signals from cavitation phenomenon will have noise floor pattern at high frequency and will have the high peaks of the vibration amplitudes at the frequencies of 7250 CPM 8500 CPM and 9900 CPM which coincide with the natural frequencies of the experimental apparatus. The spectrum also shows an increasing of the vibration amplitude of noise floor at every frequency when cavitation number decreased. The cavitation phenomenon with lower cavitation number will have more effect to the system. The result of this study also shows that cavitation phenomenon from the orifice started to occur and to be seen when cavitation number is approximately 4.53 and the size of the orifice has little effect on cavitation number which cavitation phenomenon started to occur.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา 2542

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความช่วยเหลือของ ผศ.ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุศล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ ผศ.ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ รศ. ดร. อิทธิพล ปานงาม ซึ่งเป็นคณะกรรมการ โดยได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างทำการวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง และเนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับมาจากทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยมา ณ ที่นี้ด้วย

งานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บและวิเคราะห์ผลการทดลองที่หน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการบำรุงรักษาเครื่องจักรกล ภาควิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เอกสารทางวิชาการและอุปกรณ์การทดลองบางส่วนที่ใช้ในการวิจัยเป็นของหน่วยปฏิบัติการฯ จึงต้องขอขอบพระคุณหน่วยปฏิบัติการวิจัยอย่างยิ่ง

ระหว่างทำการสร้างอุปกรณ์การทดลองเพื่อทำการวิจัยได้รับความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ จึงขอขอบคุณช่างเทคนิคและนักการภารโรงของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่อำนวยความสะดวกอย่างดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ นิสิตปริญญาโทและปริญญาเอกทุกท่าน ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาฯ ที่คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ นอกจากนี้ขอขอบใจเพื่อนๆและน้องๆที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่ให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอ

ขอบคุณน้องสาวที่คอยให้กำลังใจ และช่วยเหลือตลอดมา ทำให้สามารถทำงานวิจัยได้อย่างเต็มที่

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา ที่สนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัย เข้าใจ เอาใจใส่และคอยให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมา

ประโยชน์อันใดจากงานวิจัยนี้ ขอมอบเป็นกตัญญูตาบูชาแด่บิดามารดา ครูอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่านเทอญ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ .....
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญภาพ ..... ค
คำอธิบายสัญลักษณ์ ..... ต

บทที่

1 บทนำ 1
1-1 ความสำคัญและที่มาของโครงร่างวิทยานิพนธ์ 1
1-2 วัตถุประสงค์ของโครงร่างวิทยานิพนธ์ 1
1-3 ขอบเขตของโครงร่างวิทยานิพนธ์ 1
1-4 การดำเนินการวิจัย 2
1-5 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์ 3
2 ทฤษฎีของการวิเคราะห์สัญญาณ 4
2-1 บทนำ 4
2-2 ประเภทของการสั่นสะเทือน 4
2-3 ชนิดของสัญญาณการสั่นสะเทือน (Type of Vibration Signal) 4
2-4 หน่วยวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน 5
2-5 โดเมนเวลาและโดเมนความถี่ 6
2-6 การแปลงแบบฟูริเยร์(Fourier Transform)..... 8
2-7 การวิเคราะห์แบบสเปกตรัม (Spectrum Analysis) 9
2-8 เรโซแนนซ์ (Resonance)..... 12
3 ปรากฏการณ์คาวิเทชัน(Cavitation)และการเฝ้าตรวจ 13
3-1 บทนำ 13
3-2 ประเภทของคาวิเทชัน(Type of Cavitation) 13

หน้า

3-3 ผลจากปรากฏการณ์คาวิเทชัน (Effect of Cavitation) 14

3-4 จุดกำเนิดของปรากฏการณ์คาวิเทชัน (Origin of Cavitation) 15

3-5 พารามิเตอร์ของคาวิเทชัน (Cavitation Parameters) 15

3-6 ระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิเทชัน..... 17

3-7 กลไกความเสียหาย (Damage Mechanism) 17

3-8 สมมุติฐานการเกิดคลื่นกระแทกความดันสูง 18

3-9 ความเสียหายเนื่องจาก microjet 19

3-10 การ rebounds ตัวของฟองไอ 20

3-11 ผลกระทบที่ส่งผลสำคัญต่อ jet impact damage 20

4 การออกแบบชุดทดลอง 24

4-1 บทนำ 24

4-2 เครื่องสร้างปรากฏการณ์คาวิเทชัน 24

4-3 การออกแบบชิ้นส่วนที่ใช้ในการสังเกตุปรากฏการณ์คาวิเทชัน(Observation Device) 25

4-4 การเลือกชนิดของ Observation Device 26

4-5 ข้อมูลจากการทดลองของ Fang, K.S., Kooslhof, Sweeney,C.E,Stripling,T.C 26

4-6 บริเวณที่เกิดความเสียหายเนื่องจากปรากฏการณ์คาวิเทชัน 29

4-7 มาตราส่วนขนาดและมาตราส่วนความดัน 31

4-8 การคำนวณเพื่อออกแบบชุดทดลองประกอบกับเครื่องสร้างปรากฏการณ์คาวิเทชัน 32

4-9 แบบชุดทดลองและออริฟิส 39

5 การทดลองวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของปรากฏการณ์คาวิเทชันในชุดทดลอง 41

5-1 บทนำ 41

5-2 อุปกรณ์การทดลอง 41

5-3 ข้อมูลในการคำนวณ 43

5-4 จุดที่ทำการติดตั้งหัวทรานส์ดิวเซอร์สำหรับวัดความเร่งแบบใช้แม่เหล็กในการติดตั้ง 44

5-5 วิธีการทดลอง 46

หน้า

5-6 ผลการทดลอง 47
5-7 อภิปรายผลการทดลอง 227
5-8 สรุปผลการทดลอง 233
6 สรุปผลการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับและข้อเสนอแนะ 234
รายการอ้างอิง 235
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก 238
ภาคผนวก ข 242
ภาคผนวก ค 246
ภาคผนวก ง 248
ภาคผนวก จ 249
ประวัติผู้วิจัย 250

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 4-1	ข้อจำกัดของปรากฏการณ์คาวิเทชันสำหรับออริฟิส	26
ตารางที่ 5-1	ผลการทดลองของออริฟิส B = 0.3 ของการทดลองแบบปรับวาล์ว ปรับอัตราการไหลคงที่เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน	47
ตารางที่ 5-2	ผลการทดลองของออริฟิส B = 0.4 ของการทดลองแบบปรับวาล์ว ปรับอัตราการไหลคงที่เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน	48
ตารางที่ 5-3	ผลการทดลองของออริฟิส B = 0.5 ของการทดลองแบบปรับวาล์ว ปรับอัตราการไหลคงที่เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน	49
ตารางที่ 5-4	ผลการทดลองของออริฟิส B = 0.3 ของการทดลองแบบปรับวาล์ว ปรับอัตราการไหลคงที่เมื่อเกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน	50
ตารางที่ 5-5	ผลการทดลองของออริฟิส B = 0.4 ของการทดลองแบบปรับวาล์ว ปรับอัตราการไหลคงที่เมื่อเกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน	51
ตารางที่ 5-6	ผลการทดลองของออริฟิส B = 0.5 ของการทดลองแบบปรับวาล์ว ปรับอัตราการไหลคงที่เมื่อเกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน	52
ตารางที่5-7	ผลการทดลองของออริฟิส B = 0.3 ของการทดลองแบบปรับเปลี่ยน วาล์วปรับอัตราการไหลเมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน	53
ตารางที่ 5-8	ผลการทดลองของออริฟิส B = 0.4 ของการทดลองแบบปรับเปลี่ยน วาล์วปรับอัตราการไหลเมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน	54
ตารางที่ 5-9	ผลการทดลองของออริฟิส B = 0.5 ของการทดลองแบบปรับเปลี่ยน วาล์วปรับอัตราการไหลเมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน	55
ตารางที่ 5-10	ผลการทดลองของออริฟิส B = 0.3 ของการทดลองแบบปรับเปลี่ยน วาล์วปรับอัตราการไหลเมื่อเกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน	56
ตารางที่ 5-11	ผลการทดลองของออริฟิส B = 0.4 ของการทดลองแบบปรับเปลี่ยน วาล์วปรับอัตราการไหลเมื่อเกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน	57
ตารางที่ 5-12	ผลการทดลองของออริฟิส B = 0.5 ของการทดลองแบบปรับเปลี่ยน วาล์วปรับอัตราการไหลเมื่อเกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน	58
ตารางที่ ค-1	Characteristic of water	246

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2-1	ความสัมพันธ์ในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่	7
รูปที่ 2-2	การเคลื่อนที่แบบลักษณะคาบ	8
รูปที่ 2-3	สัญญาณบนโดเมนเวลา	10
รูปที่ 2.4	สัญญาณบนโดเมนความถี่	11
รูปที่ 2-5	การเคลื่อนที่แบบเป็นคาบบนโดเมนเวลา	11
รูปที่ 2-6	การเคลื่อนที่แบบเป็นคาบบนโดเมนความถี่	12
รูปที่ 3-1	นิยามของความดันไอ	16
รูปที่ 3-2	การแตกตัวตามสมมุติฐานโดย Rayleigh	18
รูปที่ 3-3	รูปถ่ายลำน้ำขนาดเล็ก (Micro Jet)	19
รูปที่ 3-4	แบบจำลองการเกิดลำน้ำขนาดเล็ก (Micro Jet) ที่ศึกษาโดย Kling Timm and Hammitt	19
รูปที่ 3-5	แสดงการ rebounds ของฟองไอ	20
รูปที่ 3-6	ผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิต่ออัตราความเสียหายที่เกิดจากปรากฏการณ์คาวิเทชันของสแตนเลส 304	22
รูปที่ 4-1	เครื่องสร้างปรากฏการณ์คาวิเทชัน	25
รูปที่ 4-2	แสดงข้อมูลของปรากฏการณ์คาวิเทชันสำหรับออริฟิส	28
รูปที่ 4-3	แสดงสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยของออริฟิส	29
รูปที่ 4-4	เขตการเกิดหลุมด้านออกจากออริฟิส	30
รูปที่ 4-5	การกระจายของหลุมด้านออกรากออริฟิส	30
รูปที่ 4-6	แบบชุดทดลองแบบออริฟิส	40
รูปที่ 5-1	แสดงชุดทดลองแบบออริฟิส	41
รูปที่ 5-2	เครื่องสร้างปรากฏการณ์คาวิเทชัน	42
รูปที่ 5-3	Microlog Data Collector CMVA10	43
รูปที่ 5-4	แสดงจุดติดตั้งหัวทรานส์ดิวเซอร์สำหรับวัดความเร่งแบบใช้แม่เหล็กในการติดตั้งในแนว x	45
รูปที่ 5-5	แสดงจุดติดตั้งหัวทรานส์ดิวเซอร์สำหรับวัดความเร่งแบบใช้แม่เหล็กในการติดตั้งในแนว y	45

หน้า

รูปที่ 5-6 รูปถ่ายปรากฏการณ์คาวิเทชันที่ σ_2= 4.63 ของออริฟิส B=0.3 59

รูปที่ 5-7 รูปถ่ายปรากฏการณ์คาวิเทชันที่ σ_2= 4.3 ของออริฟิส B=0.3 59

รูปที่ 5-8 รูปถ่ายปรากฏการณ์คาวิเทชันที่ σ_2= 3.76 ของออริฟิส B=0.3 60

รูปที่ 5-9 รูปถ่ายปรากฏการณ์คาวิเทชันที่ σ_2= 2.25 ของออริฟิส B=0.3 60

รูปที่ 5-10 รูปถ่ายปรากฏการณ์คาวิเทชันที่ σ_2= 2.12 ของออริฟิส B=0.3 61

รูปที่ 5-11 รูปถ่ายปรากฏการณ์คาวิเทชันที่ σ_2= 3.061 ของออริฟิส B=0.4 62

รูปที่ 5-12 รูปถ่ายปรากฏการณ์คาวิเทชันที่ σ_2= 2.79 ของออริฟิส B=0.4 62

รูปที่ 5-13 รูปถ่ายปรากฏการณ์คาวิเทชันที่ σ_2= 2.773 ของออริฟิส B=0.4 63

รูปที่ 5-14 รูปถ่ายปรากฏการณ์คาวิเทชันที่ σ_2= 2.47 ของออริฟิส B=0.4 63

รูปที่ 5-15 รูปถ่ายปรากฏการณ์คาวิเทชันที่ σ_2= 2.263 ของออริฟิส B=0.4 64

รูปที่ 5-16 รูปถ่ายปรากฏการณ์คาวิเทชันที่ σ_2= 3.54 ของออริฟิส B=0.5 65

รูปที่ 5-17 รูปถ่ายปรากฏการณ์คาวิเทชันที่ σ_2= 3.43 ของออริฟิส B=0.5 65

รูปที่ 5-18 รูปถ่ายปรากฏการณ์คาวิเทชันที่ σ_2= 2.715 ของออริฟิส B=0.5 66

รูปที่ 5-19 รูปถ่ายปรากฏการณ์คาวิเทชันที่ σ_2= 2.636 ของออริฟิส B=0.5 66

รูปที่ 5-20 รูปถ่ายปรากฏการณ์คาวิเทชันที่ σ_2= 2.582 ของออริฟิส B=0.5 67

รูปที่ 5-21 ความถี่ธรรมชาติของชุดทดลองที่ใช้ออริฟิส B = 0.3 ในแนว x 68

รูปที่ 5-22 ความถี่ธรรมชาติของชุดทดลองที่ใช้ออริฟิส B = 0.4 ในแนว x 68

รูปที่ 5-23 ความถี่ธรรมชาติของชุดทดลองที่ใช้ออริฟิส B = 0.5 ในแนว x 69

รูปที่ 5-24 ความถี่ธรรมชาติของชุดทดลองที่ใช้ออริฟิส B = 0.3 ในแนว y 69

รูปที่ 5-25 ความถี่ธรรมชาติของชุดทดลองที่ใช้ออริฟิส B = 0.4 ในแนว y 70

รูปที่ 5-26 ความถี่ธรรมชาติของชุดทดลองที่ใช้ออริฟิส B = 0.5 ในแนว y 70

รูปที่ 5-27 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ของออริฟิส B=0.3 เมื่อยัง
ไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 700 rpm..... 71

รูปที่ 5-28 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ของออริฟิส B=0.3 เมื่อยัง
ไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 800 rpm 72

รูปที่ 5-29 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ของออริฟิส B=0.3 เมื่อยัง
ไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 900 rpm 72

รูปที่ 5-30 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ของออริฟิส B=0.3 เมื่อยัง
ไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 1000 rpm 73

หน้า

รูปที่ 5-31 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ของออริฟิส B=0.3 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 1100 rpm 74
รูปที่ 5-32 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ของออริฟิส B=0.3 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 700 rpm..... 75
รูปที่ 5-33 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ของออริฟิส B=0.3 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 800 rpm..... 76
รูปที่ 5-34 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ของออริฟิส B=0.4 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 900 rpm..... 76
รูปที่ 5-35 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ของออริฟิส B=0.4 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 1000 rpm..... 77
รูปที่ 5-36 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ของออริฟิส B=0.4 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 1100 rpm 78
รูปที่ 5-37 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ของออริฟิส B=0.4 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 700 rpm..... 79
รูปที่ 5-38 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ของออริฟิส์ B=0.4 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 800 rpm..... 80
รูปที่ 5-39 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ของออริฟิส B=0.4 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 900 rpm.....80
รูปที่ 5-40 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ของออริฟิส B=0.4 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 1000 rpm..... 81
รูปที่ 5-41 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ของออริฟิส B=0.4 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 1100 rpm..... 82
รูปที่ 5-42 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ของออริฟิส B=0.4 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 700 rpm 83
รูปที่ 5-43 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ของออริฟิส B=0.4 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 800 rpm..... 84
รูปที่ 5-44 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ของออริฟิส B=0.4 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 900 rpm..... 84
รูปที่ 5-45 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ของออริฟิส B=0.4 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 1000 rpm..... 85

หน้า

รูปที่ 5-46 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ของออริฟิส B=0.4 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 1100 rpm..... 86

รูปที่ 5-47 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ของออริฟิส B=0.5 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 700 rpm..... 87

รูปที่ 5-48 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ของออริฟิส B=0.5 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 800 rpm..... 88

รูปที่ 5-49 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ของออริฟิส B=0.5 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 900 rpm 88

รูปที่ 5-50 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ของออริฟิส B=0.5 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 1000 rpm..... 89

รูปที่ 5-51 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ของออริฟิส B=0.5 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 1100 rpm 90

รูปที่ 5-52 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ของออริฟิส B=0.5 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 700 rpm..... 91

รูปที่ 5-53 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ของออริฟิส B=0.5 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 800 rpm 92

รูปที่ 5-54 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ของออริฟิส B=0.5 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 900 rpm..... 92

รูปที่ 5-55 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ของออริฟิส B=0.5 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 1000 rpm..... 93

รูปที่ 5-56 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ของออริฟิส B=0.5 เมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ที่รอบการทำงานของปั๊ม 1100 rpm 94

รูปที่ 5-57 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ที่ σ_2= 4.63 ของออริฟิส B=0.3 ที่ 700 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน 97

รูปที่ 5-58 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ที่ σ_2= 4.3 ของออริฟิส B=0.3 ที่ 800 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน 99

รูปที่ 5-59 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ที่ σ_2= 3.76 ของออริฟิส B=0.3 ที่ 900 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน 101

หน้า

รูปที่ 5-60 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ที่ σ_2= 2.25 ของออริฟิส B=0.3 ที่ 700 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน 103

รูปที่ 5-61 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ที่ σ_2= 2.12 ของออริฟิส B=0.3 ที่ 700 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน 105

รูปที่ 5-62 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ที่ σ_2 ต่างๆ ของออริฟิส B =0.3 107

รูปที่ 5-63 แสดง Amplitude ในแนว x ที่ 7250 CPM ของออริฟิส B=0.3 ที่ระดับความรุนแรงต่างๆกัน 107

รูปที่ 5-64 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2= 4.63ของออริฟิส B=0.3 ที่ 700 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน 108

รูปที่ 5-65 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2= 4.3 ของออริฟิส B=0.3 ที่ 800 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน 110

รูปที่ 5-66 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2= 3.76 ของออริฟิส B=0.3 ที่ 900 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน 112

รูปที่ 5-67 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2= 2.25 ของออริฟิส B=0.3 ที่ 1000 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน 114

รูปที่ 5-68 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2= 2.12 ของออริฟิส B=0.3 ที่ 1100 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน 116

รูปที่ 5-69 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2 ต่างๆ ของออริฟิส B =0.3 118

รูปที่ 5-70 แสดง Amplitude ในแนว y ที่ 8500 CPM ของออริฟิส B=0.3 ที่ระดับความรุนแรงต่างๆกัน 118

รูปที่ 5-71 แสดง Amplitude ในแนว y ที่ 9500 CPM ของออริฟิส B=0.3 ที่ระดับความรุนแรงต่างๆกัน 118

หน้า

รูปที่ 5-60 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ที่ σ_2= 2.25 ของออริฟิส B=0.3 ที่ 700 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน 103

รูปที่ 5-61 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ที่ σ_2= 2.12 ของออริฟิส B=0.3 ที่ 700 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน 105

รูปที่ 5-62 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ที่ σ_2 ต่างๆ ของออริฟิส B =0.3 107

รูปที่ 5-63 แสดง Amplitude ในแนว x ที่ 7250 CPM ของออริฟิส B=0.3 ที่ระดับความรุนแรงต่างๆกัน 107

รูปที่ 5-64 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2= 4.63ของออริฟิส B=0.3 ที่ 700 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน 108

รูปที่ 5-65 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2= 4.3 ของออริฟิส B=0.3 ที่ 800 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน 110

รูปที่ 5-66 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2= 3.76 ของออริฟิส B=0.3 ที่ 900 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน 112

รูปที่ 5-67 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2= 2.25 ของออริฟิส B=0.3 ที่ 1000 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน 114

รูปที่ 5-68 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2= 2.12 ของออริฟิส B=0.3 ที่ 1100 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน 116

รูปที่ 5-69 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2 ต่างๆ ของออริฟิส B =0.3 118

รูปที่ 5-70 แสดง Amplitude ในแนว y ที่ 8500 CPM ของออริฟิส B=0.3 ที่ระดับความรุนแรงต่างๆกัน 118

รูปที่ 5-71 แสดง Amplitude ในแนว y ที่ 9500 CPM ของออริฟิส B=0.3 ที่ระดับความรุนแรงต่างๆกัน 118

หน้า

รูปที่ 5-72 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ที่ σ_2= 3.061 ของออริฟิส B =0.4 ที่ 700 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน..... 120

รูปที่ 5-73 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ที่ σ_2= 2.79 ของออริฟิส B =0.4 ที่ 800 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน..... 122

รูปที่ 5-74 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ที่ σ_2= 2.773 ของออริฟิส B =0.4 ที่ 900 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน..... 124

รูปที่ 5-75 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ที่ σ_2= 2.47 ของออริฟิส B =0.4 ที่ 1000 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน..... 126

รูปที่ 5-76 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ที่ σ_2= 2.263 ของออริฟิส B =0.4 ที่ 1100 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน..... 128

รูปที่ 5-77 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ที่ σ_2 ต่างๆ ของออริฟิส B =0.4 130

รูปที่ 5-78 แสดง Amplitude ในแนว x ที่ 7250 CPM ของออริฟิส B=0.4 ที่ระดับความรุนแรงต่างๆกัน 130

รูปที่ 5-79 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2= 3.061 ของออริฟิส B =0.4 ที่ 700 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน..... 131

รูปที่ 5-80 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2= 2.79 ของออริฟิส B =0.4 ที่ 800 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน..... 133

รูปที่ 5-81 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2= 2.773 ของออริฟิส B =0.4 ที่ 900 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน..... 135

รูปที่ 5-82 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2= 2.47 ของออริฟิส B =0.4 ที่ 1000 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน..... 137

หน้า

รูปที่ 5-83 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2= 2.263 ของออริฟิส B =0.4 ที่ 1100 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน..... 139

รูปที่ 5-84 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2 ต่างๆ ของออริฟิส B =0.4 141

รูปที่ 5-85 แสดง Amplitude ในแนว y ที่ 8500 CPM ของออริฟิส B=0.4 ที่ระดับความรุนแรงต่างๆกัน 141

รูปที่ 5-86 แสดง Amplitude ในแนว y ที่ 9500 CPM ของออริฟิส B=0.4 ที่ระดับความรุนแรงต่างๆกัน 141

รูปที่ 5-87 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ที่ σ_2= 3.54 ของออริฟิส B =0.5 ที่ 700 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน..... 143

รูปที่ 5-88 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ที่ σ_2= 3.43 ของออริฟิส B =0.5 ที่ 800 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน..... 145

รูปที่ 5-89 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ที่ σ_2= 2.715 ของออริฟิส B =0.5 ที่ 900 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน..... 147

รูปที่ 5-90 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ที่ σ_2= 2.636 ของออริฟิส B =0.5 ที่ 1000 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน..... 149

รูปที่ 5-91 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ที่ σ_2= 2.582 ของออริฟิส B =0.5 ที่ 700 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน..... 151

รูปที่ 5-92 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ที่ σ_2 ต่างๆ ของออริฟิส B =0.5 153

รูปที่ 5-93 แสดง Amplitude ในแนว x ที่ 7250 CPM ของออริฟิส B=0.5 ที่ระดับความรุนแรงต่างๆกัน 153

รูปที่ 5-94 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2= 3.54 ของออริฟิส B =0.5 ที่ 700 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน..... 154

หน้า

รูปที่ 5-95 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2= 2.43 ของออริฟิส B =0.5 ที่ 800 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน..... 156

รูปที่ 5-96 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2= 2.715 ของออริฟิส B =0.5 ที่ 900 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน..... 158

รูปที่ 5- 97 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2= 2.636 ของออริฟิส B =0.5 ที่ 1000 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน..... 160

รูปที่ 5-98 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2= 2.582 ของออริฟิส B =0.5 ที่ 1100 rpm เปรียบเทียบขณะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของรอบการทำงานของปั๊มเดียวกัน..... 162

รูปที่ 5-99 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว y ที่ σ_2 ต่างๆ ของออริฟิส B =0.5 164

รูปที่ 5-100 แสดง Amplitude ในแนว y ที่ 8500 CPM ของออริฟิส B=0.5 ที่ระดับความรุนแรงต่างๆกัน 164

รูปที่ 5-101 แสดง Amplitude ในแนว y ที่ 9900 CPM ของออริฟิส B=0.5 ที่ระดับความรุนแรงต่างๆกัน 165

รูปที่ 5-102 สัญญาณการสั่นสะเทือนของออริฟิสเมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของออริฟิส B=0.3 Δp=7.4 mmHg (σ_2=9.71) 167

รูปที่ 5-103 สัญญาณการสั่นสะเทือนของออริฟิสเมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของออริฟิส B=0.3 Δp=8 mmHg (σ_2=8.98) 168

รูปที่ 5-104 สัญญาณการสั่นสะเทือนของออริฟิสเมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของออริฟิส B=0.3 Δp=15 mmHg (σ_2=4.79) 168

รูปที่ 5-105 สัญญาณการสั่นสะเทือนเมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน Δp=7.4,8,15 mmHg ของออริฟิส B=0.3 168

รูปที่ 5-106 สัญญาณการสั่นสะเทือนของออริฟิสเมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของออริฟิส B=0.4 Δp=21.75 mmHg (σ_2=8.99) 169

รูปที่ 5-107 สัญญาณการสั่นสะเทือนของออริฟิสเมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของออริฟิส B=0.4 Δp=23.31 mmHg (σ_2=8.04) 170

หน้า

รูปที่ 5-108 สัญญาณการสั่นสะเทือนของออริฟิสเมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของออริฟิส B=0.4 Δp=41.5 mmHg (σ_2=4.55) 170

รูปที่ 5-109 สัญญาณการสั่นสะเทือนเมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันที่ Δp=21.75,23.31,43.709 mmHg ของออริฟิส B=0.4 170

รูปที่ 5-110 สัญญาณการสั่นสะเทือนของออริฟิสเมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของออริฟิส B=0.5 Δp=48.5 mmHg (σ_2=9.04) 171

รูปที่ 5-111 สัญญาณการสั่นสะเทือนของออริฟิสเมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของออริฟิส B=0.5 Δp=52.5 mmHg (σ_2=8.38) 172

รูปที่ 5-112 สัญญาณการสั่นสะเทือนของออริฟิสเมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันของออริฟิส B=0.5 Δp=98.21 mmHg (σ_2=4.55) 172

รูปที่ 5-113 สัญญาณการสั่นสะเทือนเมื่อยังไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันที่ Δp=48.87,52.46,98.21 mmHg ของออริฟิส B=0.5 172

รูปที่ 5-114 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 4.53 ของออริฟิส B=0.3 175

รูปที่ 5-115 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 4.5 ของออริฟิส B=0.3 177

รูปที่ 5-116 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 4.22 ของออริฟิส B=0.3 179

รูปที่ 5-117 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 3.757 ของออริฟิส B=0.3 181

รูปที่ 5-118 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 3.38 ของออริฟิส B=0.3 183

รูปที่ 5-119 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 2.82 ของออริฟิส B=0.3 185

รูปที่ 5-120 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 2.41 ของออริฟิส B=0.3 187

รูปที่ 5-121 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 4.53 ของออริฟิส B=0.3 189

รูปที่ 5-122 สัญญาณการสั่นสะเทือนของออริฟิส B=0.3 ที่ระดับความรุนแรงต่างๆกัน 191

รูปที่ 5-123 แสดง Amplitude ที่ 7250 CPM ของออริฟิส B=0.3 ที่ระดับความรุนแรงต่างๆกัน 191

รูปที่ 5-124 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 4.53 ของออริฟิส B=0.4 192

รูปที่ 5-125 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 4.5 ของออริฟิส B=0.4 194

รูปที่ 5-126 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 4.22 ของออริฟิส B=0.4 196

รูปที่ 5-127 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 3.757 ของออริฟิส B=0.4 198

รูปที่ 5-128 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 3.38 ของออริฟิส B=0.4 200

รูปที่ 5-129 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 2.82 ของออริฟิส B=0.4 202

หน้า

รูปที่ 5-130 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 2.41 ของออริฟิส B=0.4 204

รูปที่ 5-131 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 2.25 ของออริฟิส B=0.34..... 206

รูปที่ 5-132 สัญญาณการสั่นสะเทือนของออริฟิส B=0.4 ที่ระดับ
ความรุนแรงต่างๆกัน 208

รูปที่ 5-133 แสดง Amplitude ที่ 7250 CPM ของออริฟิส B=0.4 ที่
ระดับความรุนแรงต่างๆกัน 208

รูปที่ 5-134 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 4.53 ของออริฟิส B=0.5 209

รูปที่ 5-135 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 4.5 ของออริฟิส B=0.5 211

รูปที่ 5-136 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 4.22 ของออริฟิส B=0.5 213

รูปที่ 5-137 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 3.757 ของออริฟิส B=0.5 215

รูปที่ 5-138 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 3.38 ของออริฟิส B=0.5..... 217

รูปที่ 5-139 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 2.82 ของออริฟิส B=0.5 219

รูปที่ 5-140 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 2.41 ของออริฟิส B=0.5 221

รูปที่ 5-141 สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ σ_2 = 2.25 ของออริฟิส B=0.5..... 223

รูปที่ 5-142 สัญญาณการสั่นสะเทือนของออริฟิส B=0.5 ที่ระดับ
ความรุนแรงต่างๆกัน 225

รูปที่ 5-143 แสดง Amplitude ที่ 7250 CPM ของออริฟิส B=0.5 ที่
ระดับความรุนแรงต่างๆกัน 225

รูปที่ 5-144 เปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติของชุดทดลองแบบออริฟิส
กับสัญญาณการสั่นสะเทือนจากปรากฏการณ์ดาวิเทชัน
σ_2= 2.58 ที่ 1100 rpm ของออริฟิส B=0.5 ในแนว x..... 228

รูปที่ 5-145 เปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติของชุดทดลองแบบออริฟิส
กับสัญญาณการสั่นสะเทือนจากปรากฏการณ์ดาวิเทชัน
σ_2= 2.58 ที่ 1100 rpm ของออริฟิส B=0.5 ในแนว x..... 229

รูปที่ 5-146 เปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติของชุดทดลองแบบออริฟิส
กับสัญญาณการสั่นสะเทือนจากปรากฏการณ์ดาวิเทชัน
σ_2= 2.58 ที่ 1100 rpm ของออริฟิส B=0.5 ในแนว x..... 230

รูปที่ 5-147 สัญญาณการสั่นสะเทือนในแนว x ที่σ_2ต่างๆของออริฟิส B =0.3..... 231

รูปที่ 5-148 รูปถ่ายปรากฏการณ์ดาวิเทชันที่σ_2ต่างๆของออริฟิสB =0.3 232

รูปที่ ก-1 ระบบ Microlog/PRISM ของบริษัท SKF 238

หน้า

รูปที่ ก-2	Microlog Data Collector รุ่น CMVA1084	239
รูปที่ ก-3	Microlog Support module (CMVA6112)	240
รูปที่ ก-4	หัวทรานส์ดิวเซอร์สำหรับวัดความเร่งแบบใช้แม่เหล็ก	240
รูปที่ ก-5	StrobeLite รุ่น CMSS6165	241
รูปที่ ข-1	แบบเครื่องสร้างปรากฏการณ์คาวิเทชัน (Cavitation Phenomenon Experimental Apparatus)	244
รูปที่ ข-2	แบบเครื่องสร้างปรากฏการณ์คาวิเทชัน	245
รูปที่ ค-1	แสดงค่า K_t สำหรับ venturi ออริฟิส และ หัวฉีด	247

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์

d_o	คือ orifice diameter ของ orifice ที่ใช้สร้างคาวิเทชัน	(mm)
d_n	คือ orifice diameter ของ orifice ที่ใช้วัด flow rate	(mm)
α	คือ flow coefficient	
T	คือ operating temperature	$^{\circ}C$
Q	คือ flowrate	(m^3/s)
Δp	คือ measured differential pressure	(mmHg)
V	คือ water velocity ที่ orifice	(m/s)
Am	คือ พื้นที่ของช่อง orifice	(m^2)
ρ	คือ ความหนาแน่นของของเหลว	
K_l	คือ minor loss	
σ	คือ Cavitation number พื้นฐาน	
σ_2	คือ Cavitation number	
σ_i	คือ Cavitation number ที่ทำให้เกิดคาวิเทชันเริ่มก่อ (Incipient Cavitation)	
σ_c	คือ Cavitation number ที่ทำให้เกิดคาวิเทชันวิกฤต (Critical Cavitation)	
σ_{id}	คือ Cavitation number ที่ทำให้เกิดความเสียหายเริ่มก่อ (Incipient Damage)	
σ_{ch}	คือ Cavitation number ที่ทำให้เกิดโชกกิ้งคาวิเทชัน (Choking Cavitation)	
P_{vg}	คือ ความดันไอสมบูรณ์	
P_u	คือ ความดันก่อนเข้าอุปกรณ์	
P_b	คือ ความดันบรรยากาศ	
C_d	คือ Discharge coefficient	
B	คือ d_o/D	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย