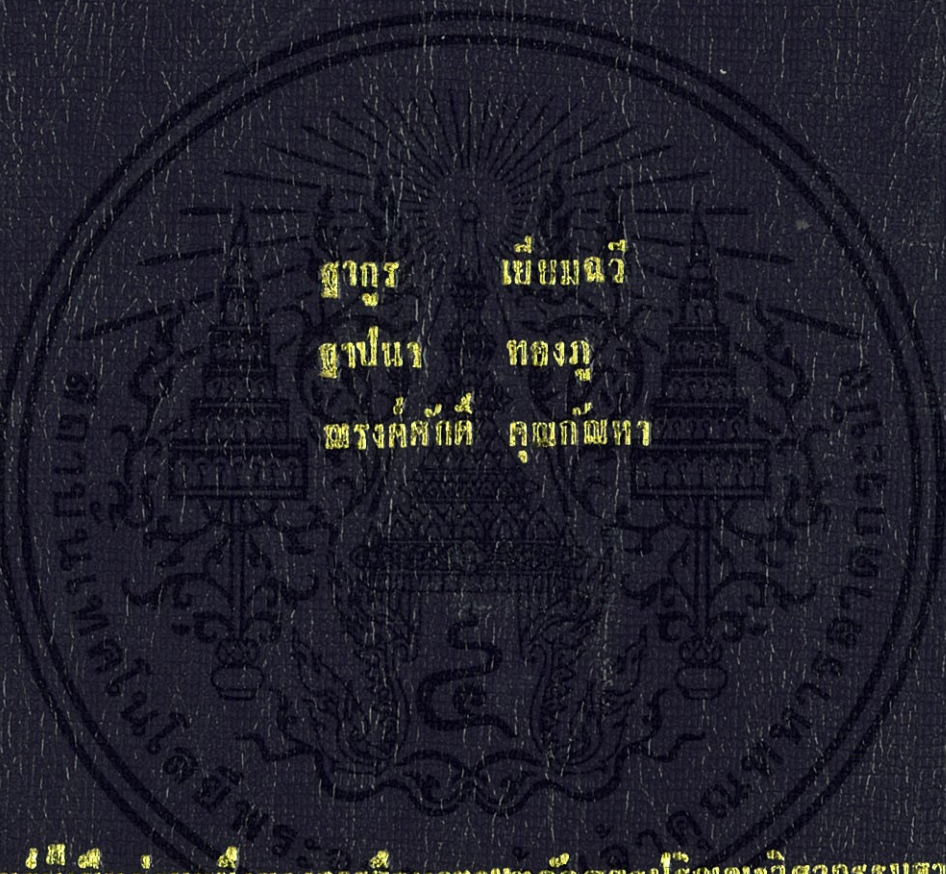


ชุดทดสอบการเกิดควาวิเคชั่นในปั้มน้ำ

EXPERIMENTAL TRAINING SET FOR STUDYING CAVITATION PHENOMENON
IN CENTRIFUGAL PUMP II



ปริญญาโทชั้นเป็นต้นหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

ชุดทดสอบการเกิดควิเทชั่นในปั้มน้ำ2

EXPERIMENTAL TRAINING SET FOR STUDYING CAVITATION PHENOMENON IN CENTRIFUGAL PUMP II



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ปีการศึกษา 2556 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EXPERIMENTAL TRAINING SET FOR STUDYING CAVITATION PHENOMENON
IN CENTRIFUGAL PUMP II



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

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 2013 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ชุดทดลองการเกิดควิเทชั่นในปั้มน้ำ2

EXPERIMENTAL TRAINING SET FOR STUDYING CAVITATION PHENOMENON

IN CENTRIFUGAL PUMP II

ผู้จัดทำ

1. นายฐากร เขี่ยมฉวี รหัสประจำตัว 53010398
2. นายฐาปนา ทองภู รหัสประจำตัว 53010403
3. นายณรงค์ศักดิ์ คุณกัณฑ์ รหัสประจำตัว 53010429



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. มณฑล ใจกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดทดลองการเกิดควิเตชันในปีน้ำ 2

นายฐากร เยี่ยมฉวี รหัส 53010398
 นายฐาปนา ทองภู รหัส 53010403
 นายณรงค์ศักดิ์ คุณกันหา รหัส 53010429
 ผศ.มณฑล ใจกุลศล อาจารย์ที่ปรึกษา
 ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

โครงการการออกแบบชุดสอบการเกิดควิเตชันในปีน้ำ 2 นี้มีจุดประสงค์จัดทำขึ้นเพื่อเป็นชุดทดสอบที่ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์การเกิดควิเตชันในปีน้ำแรงเหวี่ยง ซึ่งทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนอัตราการไหลด้วยวิธีการปรับค่าความเร็วรอบมอเตอร์ของปีมและปรับค่าเฮดสุทธิตามดูของระบบ(ปรับวาล์ว) ในการตรวจจับการเกิดควิเตชันจะใช้เครื่องมือวัดทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้หลักการหักเหของแสงโดยการวัดความขุ่นของน้ำที่เกิดจากควิเตชันในแต่ละค่าอัตราการไหล โดยเครื่องมือวัดจะแสดงผลกลับเป็นค่าอนาล็อก ซึ่งในการทดลองนี้มีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์ควิเตชันกับความเร็วรอบมอเตอร์ปีมที่ความเร็วรอบ 2700, 2500, 2300, และ 2100 RPM พบว่าเมื่อความเร็วรอบลดลงแนวโน้มของอัตราการไหลที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์ควิเตชันจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยทำการยืนยันค่าที่ได้ด้วยภาพถ่ายฟองอากาศที่ความเร็วรอบมอเตอร์ปีมนั้นๆ จากภาพถ่ายจะเห็นว่าที่ความเร็วรอบ 2700 , 2500 , และ 2300 RPM ปรากฏการณ์ควิเตชันจะเริ่มเกิดที่อัตราการไหลประมาณ 35 , 40 , และ 45 LPM ตามลำดับ ส่วนที่ความเร็วรอบ 2100 RPM เมื่อทำการปรับอัตราการไหลสูงสุดที่ 45 LPM จะพบว่ายังไม่มีการเกิดปรากฏการณ์ควิเตชันขึ้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความเร็วรอบ(RPM) แปรผกผันกับอัตราการไหลที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์ควิเตชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EXPERIMENTAL TRAINING SET FOR STUDYING CAVITATION PHENOMENON
IN CENTRIFUGAL PUMP II

THAKOON	YIEMCHAVEE	53010398
THAPANA	THONGPOO	53010403
NARONGSAK	KHUNKHUNHA	53010429
Assis.Prof Montol Jaikusol		Advisor
Year 2556		

Abstract

This project is design and building an experimental training set for studying cavitation phenomenon in centrifugal pump II. The purposes of this project were experimental to study the phenomenon of the cavitation in centrifugal pumps. The experiments were conducted by changing the rotational speed motor of pump and adjust net suction head of the system (adjust valve). The cavitation is detected by an electronic instrumentation which is based on fundamentals of light reflection. The measurement detects the turbidity of water. Then, it shows analog values. In this experiment, further study on the relationship between the flow rates started cavitation phenomenon and speed motor of pump at 2700, 2500, 2300 and 2100 RPM. Found that, when the speed decreasing trend of the flow rates started cavitation phenomenon were increased. Confirmed the values by obtained with photos bubbles. From photos at speed motor of pump are 2700, 2500, and 2300 RPM can be seen flow rates cavitation phenomenon began at a flow rate of approximately 35, 40, and 45 LPM. At speed motor of pump is 2100 RPM when the flow rate of up to maximum at 45 LPM to find that no cavitation phenomenon began, respectively, it was concluded that speed. (RPM) inversely proportional to the flow rate started cavitation phenomenon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในทุกๆด้านเสมอมาจากอาจารย์ที่ปรึกษา จึงขอขอบพระคุณ ผศ.มณฑล ใจกุลศล อาจารย์ที่ปรึกษา เป็นอย่างมาก และ ขอขอบคุณอาจารย์ภาควิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ช่วยอบรมสั่งสอนความรู้ ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการศึกษา

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่เอื้อเพื่อให้ยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้ และขอบคุณพี่กวีพจน์ วรรณตรสสุทธิกุล และ พี่ชุตินรงค์ รูปกลมที่ให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆ ทำให้การทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายธำกร เยี่ยมฉวี
นายฐาปนา ทองภู
นายณรงค์ศักดิ์ คุณกันหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
สารบัญกราฟ.....	X
รายการและสัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ปีมแรงเหวี่ยง.....	3
2.2 ส่วนประกอบที่สำคัญของปีมแรงเหวี่ยง.....	4
2.2.1 ใบพัด.....	4
2.2.2 เพลลา.....	5
2.2.3 เรือนปีม.....	5
2.3 หลักการทำงานเกี่ยวกับปีมแรงเหวี่ยง.....	6
2.3.1 ด้านจ่ายของปีม.....	6
2.3.2 ด้านดูดของปีม.....	7
2.4 ปรากฏการณ์ควิตซ์.....	7
2.5 เขตด้านดูดสุทธิ.....	8
2.5.1 เขตด้านดูดสุทธิที่ต้องการ (NPSHa).....	8
2.5.2 เขตด้านดูดสุทธิที่มีอยู่จริง (NPSHr).....	8
2.6 การไหลในท่อปิดและการสูญเสียเฮด.....	9
2.6.1 การจำแนกลักษณะการไหลภายในท่อ.....	9
2.6.1.1 การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow).....	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.6.1.2 การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow).....	9
2.6.2 การคำนวณเฮดการสูญเสียรวม.....	9
2.6.2.1 การสูญเสียเฮดหลัก.....	10
2.6.2.2 การสูญเสียเฮดรอง.....	11
2.7 อัตราการไหล ณ จุดทำงานของปั๊มและจุดเกิดคาวิตีชัน.....	12
2.7.1 Pump Curve.....	12
2.7.2 System Curve.....	12
2.8 กฎความคล้าย (Affinity Law).....	13
บทที่ 3 การออกแบบชุดทดลอง.....	15
3.1 ชุดทดลองการเกิดคาวิตีชันในปั๊ม.....	15
3.2 ส่วนประกอบชุดทดลองการเกิดคาวิตีชันในปั๊ม.....	17
3.2.1 อุปกรณ์.....	18
3.2.2 ก่ออิเล็กทรอนิกส์.....	19
3.2.3 ก่อปรับความเร็วรอบ.....	20
บทที่ 4 ขั้นตอนและผลการทดลอง.....	21
4.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	21
4.1.1 การล่อน้ำ.....	21
4.1.2 เตรียมการทดลอง.....	22
4.1.3 การทดลองเก็บข้อมูลนอก.....	22
4.2 ผลการทดลอง.....	23
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	27
5.1 ทฤษฎีในการวิเคราะห์การทดลอง.....	27
5.1.1 การคำนวณขนาดตัวอย่าง (Sample size).....	27
5.1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA).....	27
5.2 ผลการวิเคราะห์การทดลอง.....	28
5.2.1 ผลการคำนวณหาขนาดของตัวอย่าง.....	28
5.2.2 ผลการตรวจสอบสมมติฐานของข้อมูลโดยการพิจารณาสมการต้นแบบ.....	29
5.2.3 ผลการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธีของตุ๊กกี.....	32
5.3 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	34

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
5.3.1 สรุปผลการทดลอง.....	34
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	34
เอกสารอ้างอิง.....	36
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.	37
ภาคผนวก ข.	53
ภาคผนวก ค.	57
ภาคผนวก ง.	68
ภาคผนวก จ.	78



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 การกำหนดความยาวรวม และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อด้านดูด ด้านจ่าย.....	15
3.2 การกำหนดอุปกรณ์ในระบบท่อด้านดูด.....	16
3.3 การกำหนดอุปกรณ์ในระบบท่อด้านจ่าย.....	16
3.4 แสดงค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องที่สภาวะอุณหภูมิและความดันบรรยากาศใน การออกแบบ.....	16
3.5 แสดงผลการคำนวณเสถียรของระบบและค่า NPSH.....	17
4.1 แสดงตัวอย่างค่าอนุบาล็อกในแต่ละอัตราการไหลที่ความเร็วรอบมอเตอร์ปั๊ม 2700 รอบต่อนาที.....	23



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ป้อนแรงเหวี่ยงไหลตามแนวรัศมีแบบก้นหอย.....	3
2.2 ก.แสดงลักษณะใบพัดแบบเปิด ข.แสดงลักษณะใบพัดแบบกึ่งเปิด ค.แสดงลักษณะใบพัดแบบปิด.....	4
2.3 แสดงลักษณะของเพลลาของปั๊มแรงเหวี่ยง.....	5
2.4 แสดงลักษณะของเรือนปั๊ม.....	5
2.5 ส่วนประกอบของปั๊มแบบแรงเหวี่ยง (Centrifugal Pump).....	6
2.6 แรงดันทางคูดของปั๊ม.....	7
2.7 แรยงจากแรงดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเล.....	7
2.8 แสดงกระบวนการการเกิดคาวิตีชั่น.....	8
2.9 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหล (K) ของอุปกรณ์ต่างๆ.....	12
3.1 แสดงรูปจำลองสามมิติของชุดทดลองและอุปกรณ์ต่างๆของชุดทดลอง.....	18
3.2 แสดงรูปชุดทดลองจริงที่ได้รับการติดตั้งอุปกรณ์.....	19
3.3 แสดงรูปกล่องอิเล็กทรอนิกส์.....	19
3.4 แสดงกล่องปรับความเร็วรอบ.....	20
4.1 แสดงอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการล่อน้ำ.....	21
4.2 แสดงขั้นตอนการเตรียมการทดลอง.....	22
4.3 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 20 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที.....	24
4.4 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที.....	24
4.5 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 30 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที.....	25
4.6 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 35 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที.....	25
4.7 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 40 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที.....	26
4.8 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 45 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกริใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่ในเชิงพาณิชย์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1แสดงการใส่ค่าต่างๆในการหาค่าขนาดของตัวแปรโดยใช้โปรแกรม Minitab 16.....	29
5.2ผลจากการคำนวณขนาดของตัวแปรโดยใช้โปรแกรม Minitab 16 ผลที่ได้คือ ขนาดของตัวแปรเท่ากับ26.....	29
5.3แสดงกราฟ Normal plot of residuals ซึ่งจุดของเศษค้างต้องมีแนวโน้ม เรียงตัวกันเป็นเส้นตรง ดังนั้นเศษค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ.....	30
5.4แสดงกราฟ Histogram.....	30
5.5แสดงกราฟ Residualversusorder.....	31
5.6แสดงกราฟ Residual versus fitted value.....	31



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญกราฟ

กราฟที่	หน้า
2.1 แสดงแผนภาพมู้ดดี (Moody's diagram)	11
2.2 กราฟแสดงอัตราการไหลทำงานของปั๊มที่จุดตัดของ Pump curve และ System curve และ กราฟแสดงอัตราการไหลที่เริ่มเกิดคาวิตะชันที่จุดตัดของ NPSHa curve และ NPSHr curve	13
2.3 กราฟการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหล, เฮดสุทธิรวมของปั๊มและกำลังขับปั๊ม เมื่อความเร็วรอบมอเตอร์ของปั๊มเปลี่ยนไป	14
3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล กับ ค่าเฮด ของ NPSHr และ NPSHa	17
5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ และอัตราการไหลที่เริ่มเกิดคาวิตะชัน	35



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ชื่อ/ความหมาย
NPSHr	เฮดสุทธิด้านดูดที่ต้องการ
NPSHa	เฮดสุทธิด้านดูดที่มีอยู่จริง
P_{atm}	ความดันบรรยากาศสัมบูรณ์ มีหน่วยเป็น Pa
z_1	ระยะความสูงจากผิวน้ำถึงศูนย์กลางปั๊ม (Static suction lift) มีหน่วยเป็น m
P_v	ความดันไอของของเหลว (Vapor Pressure) ที่อุณหภูมิที่กำหนด มีหน่วยเป็น Pa
γ	น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight) มีหน่วยเป็น N/m^3
Σh_L	การสูญเสียเฮดรวมด้านดูด (Total Head Loss)
Re	ตัวเลขเรย์โนลด์
V	ความเร็วของการไหลในท่อ มีหน่วยเป็น m/s
D	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ มีหน่วยเป็น m
ν	Kinematic viscosity ของของเหลวมีหน่วยเป็น m^2/s
H_f	การสูญเสียเฮดหลัก
f	สัมประสิทธิ์ความฝืด ไม่มีหน่วย สามารถหาได้จาก Moody's Diagram
L	ความยาวของท่อ มีหน่วยเป็น m
D	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ มีหน่วยเป็น m
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีหน่วยเป็น m/s^2
V	ความเร็วของการไหลในท่อ มีหน่วยเป็น m/s
ϵ/D	ค่าความขรุขระสัมพัทธ์
H_{le}	การสูญเสียเฮดรอง
K	สัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหล
Q	อัตราการไหล m^3/s
N	ความเร็วรอบมอเตอร์ (rpm)
H	เฮดสุทธิรวมปั๊ม (m)
P	กำลังขับปั๊ม (W)
σ	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ของขนาดตัวอย่าง
n	ขนาดของตัวอย่างของแต่ละหน่วยทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์	ชื่อ/ความหมาย
τ_i	ผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละหน่วยทดลอง กับค่าเฉลี่ยรวม ($\mu_i - \bar{\mu}$)
a	จำนวนของหน่วยทดลอง
ϕ	ตัวแปรที่สามารถหาได้จาก Operating Characteristic Curves
a	จำนวนหน่วยทดลอง
$q_\alpha(a, f)$	หาได้จาก Studentized range statistic
f	ระดับความเป็นอิสระ (Degree of freedom) ของของความคลาดเคลื่อน (Error)
n	ขนาดของตัวอย่างในแต่ละหน่วยทดลอง Sample size



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เนื่องจากโรงงานอุตสาหกรรมจำนวนมากในปัจจุบันใช้ปั๊มแรงเหวี่ยงเป็นอุปกรณ์ในการขนส่งของเหลว ซึ่งอาจมีการเกิดปรากฏการณ์ควิเตชันภายในปั๊มแรงเหวี่ยง เป็นผลให้เกิดการกัดกร่อนของใบพัด การกัดกร่อนของเรือนปั๊มเกิดเสียงดัง เกิดการสั่นของปั๊ม และทำให้ประสิทธิภาพของปั๊มแรงเหวี่ยงลดลง ซึ่งปัญหาเหล่านี้เป็นปัญหาใหญ่ในการใช้ปั๊มแรงเหวี่ยง จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและทดลอง [1-2]

ควิเตชัน หรือปรากฏการณ์การเกิดโพรงไอน้ำ เป็นปรากฏการณ์ในการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากของเหลวเป็นไอขณะที่ของเหลวไหลเข้าสู่ปั๊ม ถ้าของเหลวมีความดันต่ำ และมีความดันของของเหลวเข้าใกล้ความดันไอ ณ อุณหภูมิของของเหลวในขณะนั้น ของเหลวบางส่วนจะเริ่มเดือดกลายเป็นไอ และก่อให้เกิดฟองอากาศร่วมกับของเหลวภายในปั๊ม เมื่อให้กำลังปั๊มมีค่าคงที่ และ ปรับอัตราการไหลจะพบว่าความดันของของเหลวที่เกิดขึ้นจะแปรผกผันกับอัตราการไหล ดังนั้นการปรับอัตราการไหลจึงส่งผลต่อการเกิดควิเตชัน [3-5,12]

การเกิดควิเตชันเป็นเนื้อหาที่นักศึกษาได้เรียนรู้ทางทฤษฎี และ การทดลองจากชุดทดลองการเกิดควิเตชันในปั๊มแรงเหวี่ยง โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล (ปรับวาล์วด้านจ่าย) และสังเกตการณ์เกิดควิเตชันโดยการตรวจจับความขุ่นของน้ำที่ไหลผ่านภายในท่อด้วยเครื่องมือวัดทางอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งใช้หลักการการหักเหของแสงที่อัตราการไหลต่างๆ เครื่องมือวัดจะแสดงผลออกมาเป็นค่าอนาล็อก ผลการทดลองของชุดทดลองการเกิดควิเตชันในปั๊มน้ำนี้เริ่มเกิดควิเตชันที่อัตราการไหล 80 ลิตรต่อนาที ซึ่งในชุดการทดลองดังกล่าวนี้สามารถวัดค่าอัตราการไหลสูงสุดได้ที่ 95 ลิตรต่อนาที [2]

จากชุดทดลองการเกิดควิเตชันในปั๊มแรงเหวี่ยงดังกล่าวข้างต้น จะพบว่าสามารถทดลองปรากฏการณ์ควิเตชันได้เพียงค่าเดียวเท่านั้น และ ผลต่างระหว่างอัตราการไหลที่เริ่มควิเตชันกับอัตราการไหลสูงสุดมีค่าแตกต่างกันไม่มาก จึงนำมาซึ่งการพัฒนาชุดทดสอบการเกิดควิเตชันในปั๊มน้ำ 2 โดยออกแบบชุดทดสอบให้เปลี่ยนอัตราการไหลด้วยวิธีการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ของปั๊ม และปรับค่าเสตสุทธิด้านดูดของระบบ (ปรับวาล์วด้านจ่าย) ทำให้ชุดทดสอบการเกิดควิเตชันในปั๊มน้ำ 2 นั้นมีความหลากหลายในการทดลองมากขึ้น ทำการกำหนดการออกแบบชุดทดสอบให้เริ่มเกิดควิเตชันในช่วงอัตราการไหลช่วง 30-50 ลิตรต่อนาทีเพื่อที่จะได้พบการเกิดควิเตชันที่เร็วขึ้นกว่าชุดทดลองแบบแรก และ ทำการถ่ายฟองควิเตชันจากกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงเพื่อนำไปทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าอนาล็อกที่วัดจากเครื่องมือวัดทางอิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้ยืนยันอัตราการไหลที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์ควิเตชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารตัวอย่างของเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำ ไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อเป็นชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ควิเตชันในปั๊มแรงเหวี่ยง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์ควิเตชันและความเร็วรอบมอเตอร์ปั๊ม

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 สามารถเข้าใจและมีความรู้ในการทำชุดทดลองเกิดควิเตชันในปั๊มน้ำ
- 1.3.2 ทราบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์ควิเตชันและความเร็วรอบมอเตอร์ปั๊ม

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.4.1 ศึกษาการเกิดควิเตชันภายในระบบปั๊มแรงเหวี่ยงโดยกำหนดให้อุณหภูมิของน้ำอยู่ที่อุณหภูมิห้องและที่ความบรรยากาศ
- 1.4.2 ตรวจสอบการเกิดควิเตชันด้วยการมองเห็นด้วยภาพถ่ายและสัญญาณจากเครื่องมือวัดด้วยแสงส่งเป็นสัญญาณอนาล็อก
- 1.4.3 ศึกษาการเกิดควิเตชันภายในระบบปั๊มแรงเหวี่ยงโดยการปรับค่าความเร็วของมอเตอร์ของปั๊มและเสตสุทธิด้านดูด (ปรับวาล์ว)
- 1.4.4 ศึกษาการเกิดควิเตชันในช่วงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น ซึ่งการเกิดควิเตชันไม่ได้เกี่ยวข้องกับปัจจัยของการสีกกร่อนของเรือนปั๊มและระบบท่อ

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.5.1 ศึกษาการเกิดควิเตชันจากชุดทดลองเดิม พร้อมทั้งวิเคราะห์ถึงจุดดีและจุดบกพร่องในชุดทดลองเดิม
- 1.5.2 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสิ่งที่สนใจจะปรับปรุงและเพิ่มเติมในชุดทดลองที่จะสร้างใหม่
- 1.5.3 เสนอข้อมูลต่ออาจารย์ที่ปรึกษา เพื่อหาแนวทางการดำเนินงาน
- 1.5.4 ประชุมเพื่อหาข้อสรุป
- 1.5.5 ออกแบบชุดทดลอง และ อุปกรณ์
- 1.5.6 สร้างชุดทดลอง และติดตั้งอุปกรณ์
- 1.5.7 ปรับปรุง และแก้ไขชุดทดลอง
- 1.5.8 เริ่มทดลองโดยการปรับอัตราการไหลของระบบโดยปรับการวาล์วและปรับความเร็วรอบมอเตอร์ปั๊ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อผู้จัดทำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

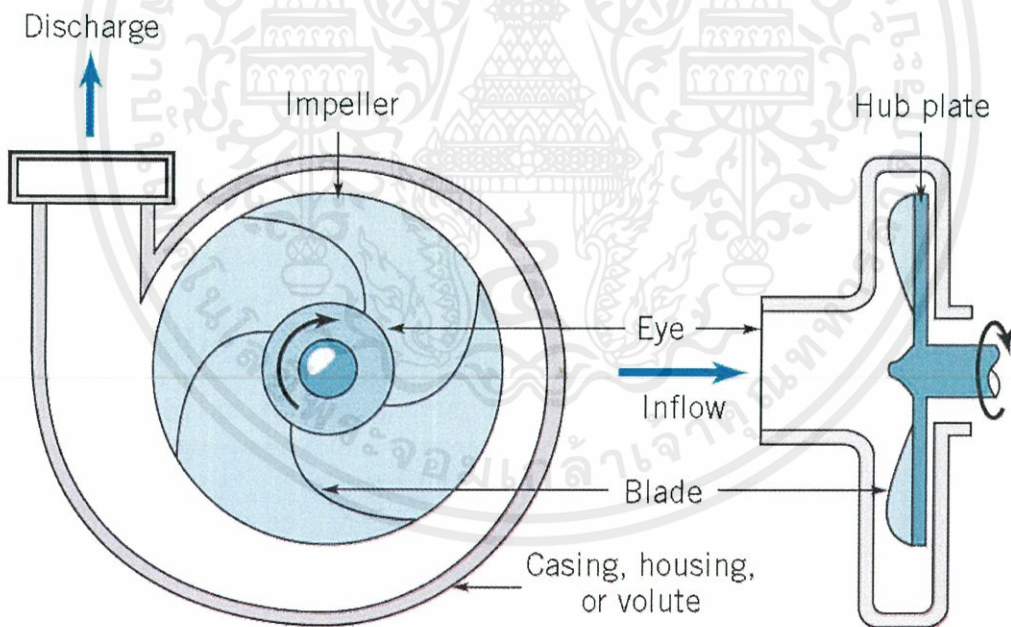
- 1.5.9 เก็บข้อมูลผลการทดลอง และ นำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ผล

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปั๊มแรงเหวี่ยง

โดยทั่วไปแล้วปั๊มแรงเหวี่ยง (Centrifugal pump) สามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท ตามลักษณะใบพัดได้แก่ ปั๊มแรงเหวี่ยงไหลตามแนวรัศมี (Radial flow pump) ปั๊มแรงเหวี่ยงไหลตามแนวแกน (Axial flow pump) และปั๊มแรงเหวี่ยงไหลแบบผสม (Mixed-flow pump) ซึ่งในชุดทดลองนี้ใช้ปั๊มแรงเหวี่ยงชนิดไหลตามแนวรัศมีแบบก้นหอย (Volute type)

ปั๊มแรงเหวี่ยงไหลตามแนวรัศมีแบบก้นหอย (Volute type) ใบพัดของปั๊มจะเหวี่ยงของไหลเข้าไปในเรือนปั๊ม (Casing) ที่มีลักษณะเป็นวงก้นหอย เส้นผ่านศูนย์กลางของก้นหอยนี้จะค่อยๆ ขยายจากปากทางเข้าสู่ใบพัดไปจนถึงปากทางออก ทำให้พลังงานที่ซึ่งอยู่ในรูปความเร็วของของไหล (Velocity Energy) ถูกเปลี่ยนให้เป็นแรงดันสถิต (Static pressure) ปั๊มในแบบนี้เป็นที่รู้จักกันในชื่อ ปั๊มหอยโข่ง



รูปที่ 2.1 ปั๊มแรงเหวี่ยงไหลตามแนวรัศมีแบบก้นหอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ส่วนประกอบที่สำคัญของปั๊มแรงเหวี่ยง

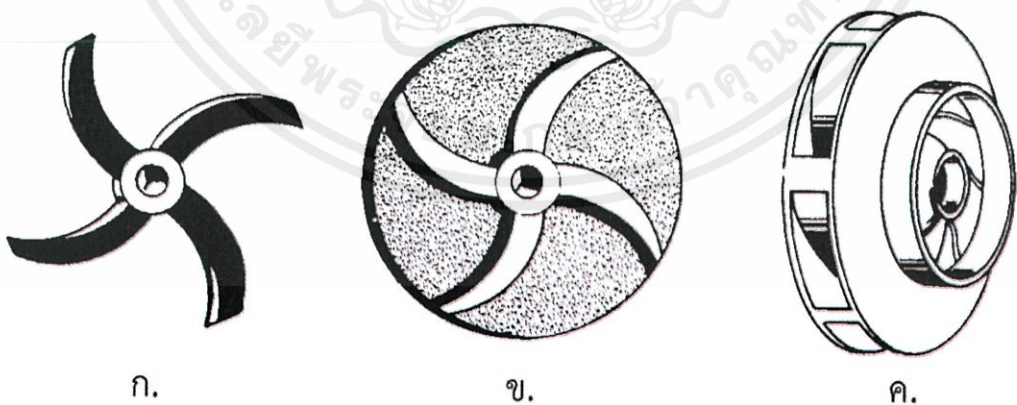
ส่วนประกอบที่สำคัญของปั๊มแรงเหวี่ยงประกอบด้วย ชิ้นส่วนที่หมุน (Rotor) ซึ่งได้แก่ใบพัด (Impeller) และเพลา (Shaft) กับชิ้นส่วนที่อยู่นิ่ง (Stator) ซึ่งได้แก่เรือนปั๊ม (Casing)

2.2.1 ใบพัดเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ใช้ในการถ่ายทอดพลังงานกลให้กับของไหล ประสิทธิภาพของปั๊มแรงเหวี่ยงขึ้นอยู่กับประเภทของใบพัด ครีบ (Blade) และรายละเอียดของใบพัดถูกออกแบบมาเพื่อให้เข้ากับเงื่อนไขของการทำงานของปั๊ม การแบ่งประเภทของใบพัดก็ขึ้นอยู่กับลักษณะการออกแบบ โดยปกติใบพัดถูกแบ่งออกเป็นสามประเภท

2.2.1.1 ใบพัดแบบเปิด (Open impeller) โดยทั่วไปแล้วครีบของใบพัดจะยึดติดอยู่กับจานประกบ (Shroud) สำหรับใบพัดที่จัดอยู่ในประเภทนี้จะมีแผ่นครีบบางส่วนยื่นออกมาจากจานประกบ คือ รัศมีของจานจะเล็กกว่ารัศมีของใบพัด

2.2.1.2 ใบพัดแบบกึ่งเปิด (Semi-open impeller) รัศมีของจานประกบเท่ากับรัศมีของใบพัด โดยใบพัดประเภทนี้มีจานประกบเพียงด้านเดียว อีกด้านหนึ่งของใบพัดจะไม่มีฝาปิด

2.2.1.3 ใบพัดแบบปิด (Enclosed impeller) ใบพัดถูกปิดด้วยจานประกบ 2 แผ่น ใบพัดแบบนี้มีทางให้ของไหลเข้าแบบดูดด้านเดียว (Single suction) หรือ ดูดสองด้าน (Double suction) ได้อีกด้วย ใบพัดแบบดูดด้านเดียว ของไหลจะไหลผ่านตาบีม (Eye) เพียงด้านเดียว ในขณะที่ใบพัดแบบดูดสองด้านของไหลจะไหลเข้าตาบีมทั้งสองด้าน (ในชุดทดลองนี้ใช้ใบพัดแบบปิด)



ก.

ข.

ค.

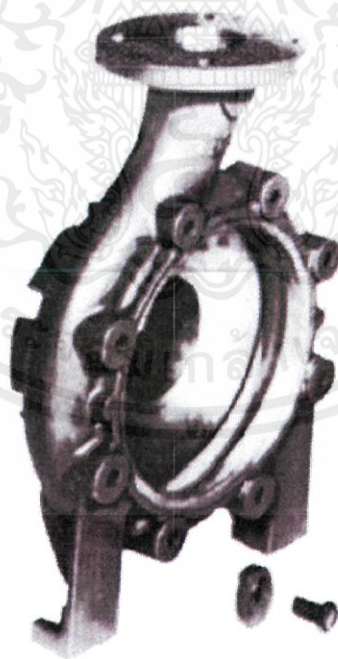
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.2 ก.แสดงลักษณะใบพัดแบบเปิด ข.แสดงลักษณะใบพัดแบบกึ่งเปิด ค.แสดงลักษณะใบพัดแบบปิด

2.2.2 เพลาเป็นชิ้นส่วนที่ติดอยู่กับใบพัด เป็นส่วนที่ถ่ายทอดกำลังขับเคลื่อนจากมอเตอร์ หรือ เครื่องยนต์สูใบพัด ทำให้สามารถสร้างอัตราการไหลแก่ของเหลวได้



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของเพลาของปั๊มแรงเหวี่ยง

2.2.3 เรือนปั๊ม (Casing) เป็นชิ้นส่วนที่ใช้ห่อหุ้มใบพัด และเป็นเสื้อของลูกปืนรองรับเพลา และปะเก็นอัด (Gasket) หรือซีล (Seal) โดยทั่วไปแล้วเรือนปั๊มมีรูปร่างเป็นหอยโข่ง (Volute) พื้นที่หน้าตัดจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามทิศทางการไหล การออกแบบเช่นนี้เพื่อที่จะลดความเร็วความเร็วของไหลที่ออกจากใบพัดทำให้พลังงานจลน์ลดตาม และพลังงานจลน์ที่ลดนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นความดันที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของเรือนปั๊ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเอาไว้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

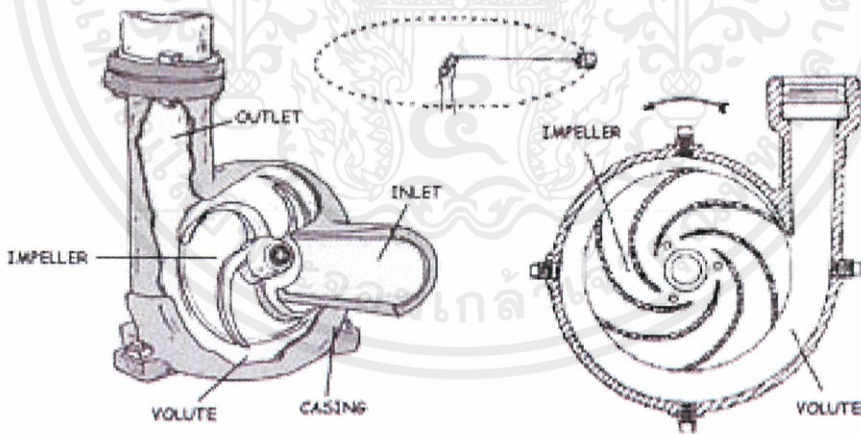
2.3 หลักการทำงานเกี่ยวกับปั๊มแรงเหวี่ยง

หลักการทำงานของปั๊มโดยทั่วไป คือ มีหน้าที่ในการเพิ่มพลังงาน (Energy) ให้กับน้ำหรือของเหลวเพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ไปได้

ปั๊มแบบแรงเหวี่ยง (Centrifugal Pump) ทำงานโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานจลน์ (พลังงานในรูปความเร็วในการเคลื่อนที่ของน้ำ) เป็นพลังงานศักย์ (พลังงานในรูปของแรงดัน) แบ่งปั๊มการทำงานออกเป็นสองส่วนคือ ด้านจ่ายของปั๊ม (Discharge Side) และ ด้านดูดของปั๊ม (Suction Side)

2.3.1 ด้านจ่ายของปั๊ม (Discharge Side)

โดยหลักการทำงานของปั๊มแรงเหวี่ยงตามรูปที่ 5 เริ่มต้นจากเมื่อน้ำไหลเข้าสู่ตัวปั๊มผ่านทางด้านดูด น้ำก็เคลื่อนที่เข้าไปยังใบพัด (Impeller) ที่กำลังหมุนอยู่และถูกเหวี่ยงออกสู่ด้านข้างด้วยความเร็วสูง เมื่อเคลื่อนที่ผ่านปลายใบพัดน้ำจะลดความเร็วลงและเคลื่อนที่เข้าสู่ช่องทางเดินน้ำหรือกันหอย (Volute) ตรงนี้เองที่พลังงานที่อยู่ในน้ำซึ่งเป็นพลังงานจลน์จากความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานศักย์ในรูปของแรงดัน และน้ำก็เคลื่อนที่ออกจากปั๊มด้วยแรงดันดังกล่าว ซึ่งแรงดันและอัตราการไหลจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับรายละเอียดและการออกแบบปั๊ม

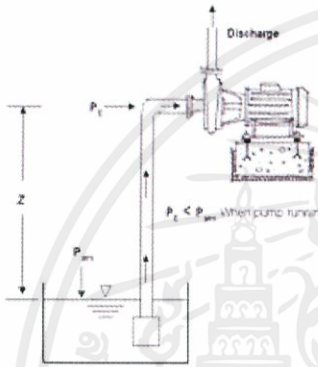


รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของปั๊มแบบแรงเหวี่ยง (Centrifugal Pump)

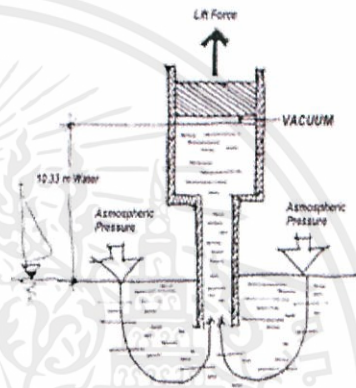
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ด้านดูดของปั๊ม (Suction Side)

การที่น้ำสามารถไหลผ่านท่อดูดเข้าสู่ตัวปั๊มได้นั้นเนื่องจากในขณะที่ปั๊มทำงาน ปั๊มจะสร้างแรงดันสุญญากาศหรือแรงดันที่ต่ำกว่าแรงดันบรรยากาศขึ้นที่ทางดูดของปั๊ม สำหรับปั๊มแรงเหวี่ยงนั้น สุญญากาศที่เกิดขึ้นตรงทางดูดจะน้อย จึงต้องล่อน้ำหรือเติมน้ำให้เต็มท่อทางดูดของปั๊มก่อนที่จะทำการเดินเครื่องปั๊มได้



รูปที่ 2.6 แรงดันทางดูดของปั๊ม



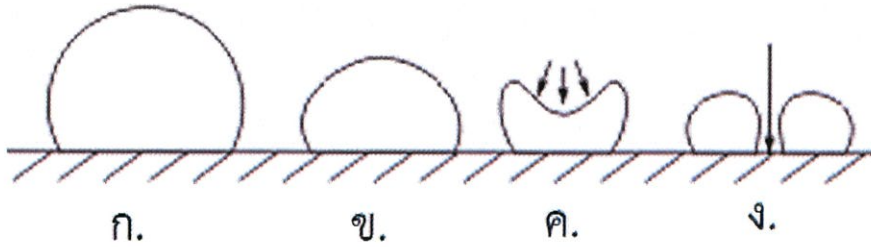
รูปที่ 2.7 แรงยกจากแรงดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเล

เมื่อตรงด้านดูด (Suction Eye) ถูกทำให้มีแรงดันต่ำกว่าแรงดันบรรยากาศ และขณะเดียวกัน ผิวหน้าถูกแรงดันบรรยากาศกดทับไว้ ดังนั้นเมื่อแรงดันที่ผิวหน้าซึ่งเท่ากับแรงดันบรรยากาศมากกว่าแรงดันสุญญากาศที่ด้านดูดปั๊ม ดังนั้นน้ำจะถูกดันให้ไหลผ่านท่อดูดเข้ามาด้วยแรงดันบรรยากาศ

2.4 ปรากฏการณ์คาวิตีชัน (Cavitation)

ปรากฏการณ์คาวิตีชัน หรือปรากฏการณ์การเกิดโพรงไอ เป็นปรากฏการณ์ในการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากของเหลวกลายเป็นไอขณะที่น้ำไหลเข้าสู่ปั๊ม ณ จุดทำงานจุดใดจุดหนึ่งของปั๊ม เมื่อความดันที่ทางเข้าของปั๊มลดลงต่ำกว่าความดันของไออิ่มตัวของน้ำที่อุณหภูมินั้นๆ น้ำจะกลายเป็นไอขึ้นมา ในลักษณะของการเกิดฟองอากาศขึ้นอย่างรวดเร็ว และฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะถูกบีบอัดให้เล็กลงและแตกก่อให้เกิดเสียงดัง และทำให้เกิดความเสียหายแก่ชิ้นส่วนภายในของเครื่องได้ ความดันที่เกิดขึ้นจากการบีบอัดฟองอากาศให้แตกอาจสูงกว่าค่าความดันบรรยากาศเป็นร้อยๆ เท่า สร้างความเสียหายให้แก่ชิ้นส่วนที่สัมผัสกับน้ำโดยตรงได้อย่างมาก [3-5, 12]

ไม่ว่ากรรม โศกทางสน อักทงห้ามม ให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงกระบวนการการเกิดคาวิตีเตชัน ก. แสดงการเกิดฟองอากาศเนื่องจากการกลายเป็นไอของน้ำขณะที่ยังไหลอยู่ ข. ขนาดของฟองอากาศเริ่มเล็กลงเมื่อฟองน้ำเคลื่อนที่ไปสู่ที่ที่มีความดันสูงขึ้น ค. ฟองน้ำเริ่มยุบตัว ง. ฟองน้ำแตกตัวโดยมีลักษณะเจ็ทน้ำขนาดเล็ก (Water Micro Jet) มีทิศทางสู่ผิวของอุปกรณ์

2.5 เฮดด้านดูดสุทธิ (Net Positive Suction Head: NPSH)

เฮดด้านดูดสุทธิ คือ ความดันสัมบูรณ์ (Absolute pressure) ทั้งหมดของด้านดูด หรือความดันที่สามารถส่งน้ำเข้าปั๊มได้หลังจากที่หักการสูญเสียอื่น ๆ ออกไป

ค่า NPSH มีอยู่ 2 ค่าคือ

2.5.1 เฮดสุทธิด้านดูดสุทธิที่ต้องการ (Net Positive Suction Head require: NPSHr) เป็นค่าเฮดสุทธิด้านดูดที่ขึ้นอยู่กับการออกแบบปั๊ม ค่าดังกล่าวนี้บริษัทผู้ผลิตจะกำหนดมาให้

2.5.2 เฮดสุทธิด้านดูดสุทธิที่มีอยู่จริง (Net Positive Suction Head Available: NPSHa) คือ เป็นค่าเฮดสุทธิด้านดูดที่มีอยู่จริง ขึ้นอยู่กับสภาพการทำงานของระบบซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$\text{NPSH}_a = \frac{P_{\text{atm}}}{\gamma} - z_1 - \sum h_L - \frac{P_v}{\gamma} \quad (2.1)$$

โดยที่

P_{atm} คือ ความดันบรรยากาศสัมบูรณ์ (Absolute Atmosphere pressure) มีหน่วยเป็น Pa

z_1 คือ ระยะความสูงจากผิวน้ำถึงศูนย์กลางปั๊ม (Static suction lift) มีหน่วยเป็น m

P_v คือ ความดันไอของของเหลว (Vapor Pressure) ที่อุณหภูมิที่กำหนด มีหน่วยเป็น Pa

γ คือน้ำหนักจำเพาะ (Specific weight) มีหน่วยเป็น N/m^3

$\sum h_L$ คือ การสูญเสียเฮดรวมด้านดูด (Total Head Loss) มีค่าเท่ากับผลรวมระหว่างการสูญเสียเฮดหลัก และการสูญเสียเฮดรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่เงื่อนไขการเกิดควิตซ์โดยทั่วไปแล้วแล้วเป็นไปตามสมการ

$$NPSH_u < NPSH_r \quad (2.2)$$

2.6 การไหลในท่อปิดและการสูญเสียเฮด

2.6.1 การจำแนกลักษณะการไหลในท่อ

ลักษณะการไหลในท่อแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

2.6.1.1 การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) หากแรงหนืดมีค่าสูงเมื่อเทียบกับแรงเฉื่อย การไหลของของเหลวก็จะมีลักษณะคล้ายเป็นแผ่นขนานกันไป

2.6.1.2 การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) โมเมนตัมของของเหลวเคลื่อนที่แบบไร้ระเบียบ การไหลก็จะปั่นป่วน

การที่จะบอกลักษณะการไหลว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบหรือปั่นป่วนนั้น ให้พิจารณาจาก เลขเรย์โนลด์ ซึ่ง

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (2.3)$$

โดยที่

V คือ ความเร็วของการไหลในท่อ มีหน่วยเป็น m/s

D คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ มีหน่วยเป็น m

ν คือ Kinematic viscosity ของของเหลวมีหน่วยเป็น m^2/s

ในทางปฏิบัติ ถือว่า ถ้า Re มีค่าน้อยกว่า 2000 เป็นการไหลแบบราบเรียบ ถ้ามากกว่า 3000 เป็นการไหลแบบปั่นป่วน

2.6.2 การคำนวณเฮดการสูญเสียรวม

การไหลในท่อทั่วไปมีความฝืดเกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับลักษณะผิวของท่อและข้อต่อ ซึ่งส่งผลให้เกิดการสูญเสียเฮด เรียกว่า การสูญเสียเฮด (Head loss) ซึ่งประกอบไปด้วยการสูญเสียหลัก (Major loss) ซึ่งเป็นการสูญเสียเฮดเนื่องจากความฝืด และการสูญเสียรอง (Minor loss) เป็นการสูญเสียเฮดตามอุปกรณ์และ ข้อต่อต่างๆ ทั้งนี้การสูญเสียเฮดรวมหาได้จากผลรวมระหว่างการสูญเสียเฮดความฝืด และการสูญเสียเฮดรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2.1 การสูญเสียเฮดหลัก

ในการคำนวณการสูญเสียเฮดหลักในเส้นท่อตรง ไม่ว่าจะการไหลนั้นจะเป็นแบบราบเรียบหรือปั่นป่วนนั้น สามารถคำนวณได้จากสมการของดาร์ซี-ไวส์แบช (Darcy-Weisbach) คือ

$$H_{L_f} = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (2.4)$$

โดยที่

f คือสัมประสิทธิ์ความฝืด ไม่มีหน่วย สามารถหาได้จาก Moody's Diagram หรือสมการของโคล์บรูค (Colebrook's Equation)

L คือความยาวของท่อ มีหน่วยเป็น m

D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ มีหน่วยเป็น m

g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีหน่วยเป็น m/s^2

V คือความเร็วของการไหลในท่อ มีหน่วยเป็น m/s

การหาค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืด เมื่อจำแนกทั้งคุณสมบัติของท่อและลักษณะของการไหลว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบหรือไหลแบบปั่นป่วน แล้วให้พิจารณากรณีต่อไปนี้
ในกรณีเป็นการไหลแบบราบเรียบสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ได้จากสมการ

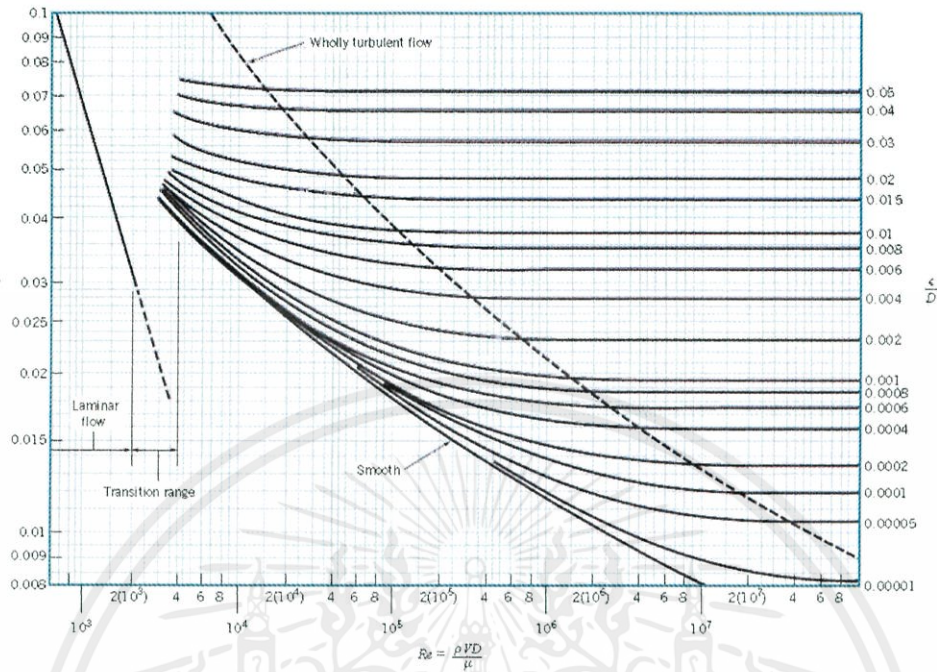
$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.5)$$

หรือจาก Moody's Diagram

ในกรณีการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อค่าเลขเรย์โนลด์ (Reynold number) มากกว่า 3000 จะเป็นการไหลแบบปั่นป่วนเสมอ ไม่ว่าจะท่อจะเรียบสม่ำเสมอเท่าไรก็ตาม ในกรณีการไหลแบบปั่นป่วนนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืดจะขึ้นอยู่กับทั้งค่าเลขเรย์โนลด์ และค่าความขรุขระสัมพัทธ์ (ϵ/D) ซึ่งหาได้จากตารางที่ xx ในกรณีนี้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความฝืดได้จากสมการของโคล์บรูค คือ

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log\left(\left(\frac{\epsilon}{3.7D}\right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re}\right) \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
หรือหากจาก Moody's Diagram



กราฟที่ 2.1 แสดงแผนภาพมูดี้ (Moody's diagram) ที่มา: Munson, Bruce R., Young, Donald F., Okiishi, Theodore H., Huebsch, Wade W. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. 6th edition. United States of America: John Wiley & Sons, Inc. (2009).

2.6.2.2 การสูญเสียเฮดรอง

การสูญเสียพลังงานเนื่องจากอุปกรณ์ในระบบท่อ เช่น ข้องอ (Elbow), ข้อต่อตรง (Socket), วาล์วประตูน้ำ (Gate valve) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

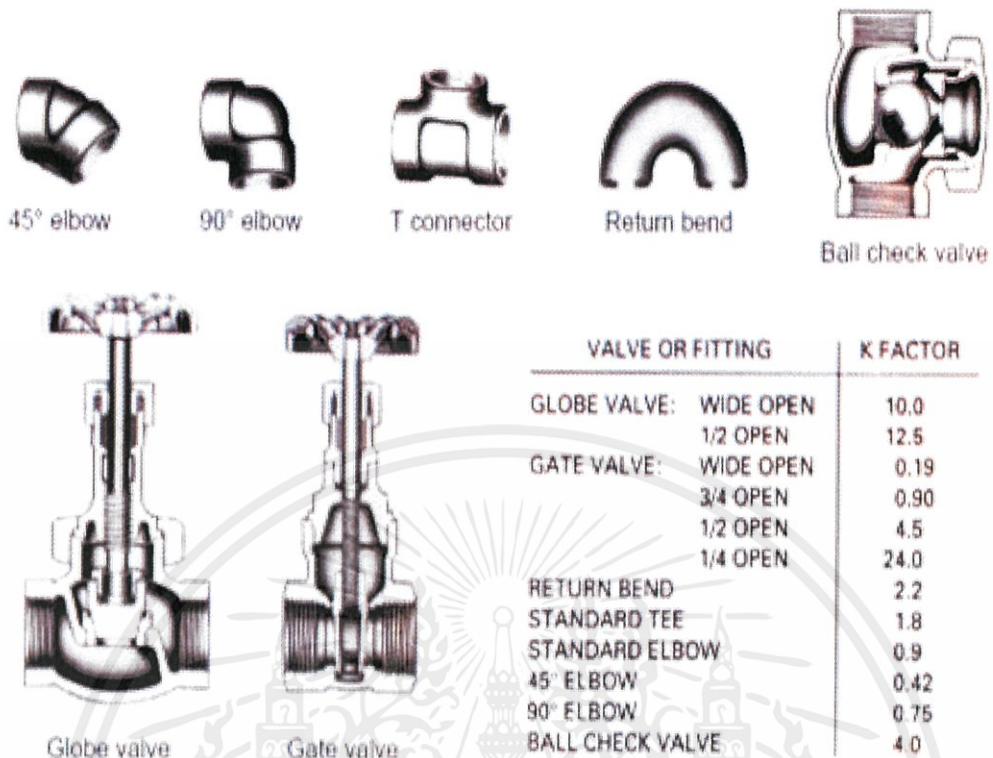
$$H_{Le} = K \frac{V^2}{2g} \quad (2.7)$$

โดยที่

K คือสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของอุปกรณ์ เป็นตัวแปรไม่มีหน่วย

ดังนั้น เฮดการสูญเสียรวม = การสูญเสียเฮดหลัก + การสูญเสียเฮดรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหล (K) ของอุปกรณ์ต่างๆ

2.7 อัตราการไหล ณ จุดทำงานของปั๊ม และ จุดเกิดควาวิเตชัน

จุดทำงานของปั๊มคือจุดตัดระหว่าง Pump curve และ System curve ซึ่งจะแสดงให้เห็นอัตราการไหลของน้ำที่ออกจากปั๊มในแต่ละระบบนั้นๆ

2.7.1 Pump curve

โดยปกติเมื่อทำการสั่งซื้อปั๊ม บริษัทผู้ผลิตจะมีข้อมูลสำหรับปั๊มแต่ละรุ่น เรียกว่า Pump characteristics curve หรือ Pump curve เป็นกราฟที่แสดง H-Q ของปั๊ม, กราฟ H-Q head capacity curve ของปั๊ม คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูบลบกับเฮดที่ปั๊มสามารถทำงานได้ ตั้งแต่อัตราการสูบลบเป็นศูนย์ จนถึงอัตราการสูบลบสูงสุดของปั๊มนั้น

2.7.2 System curve

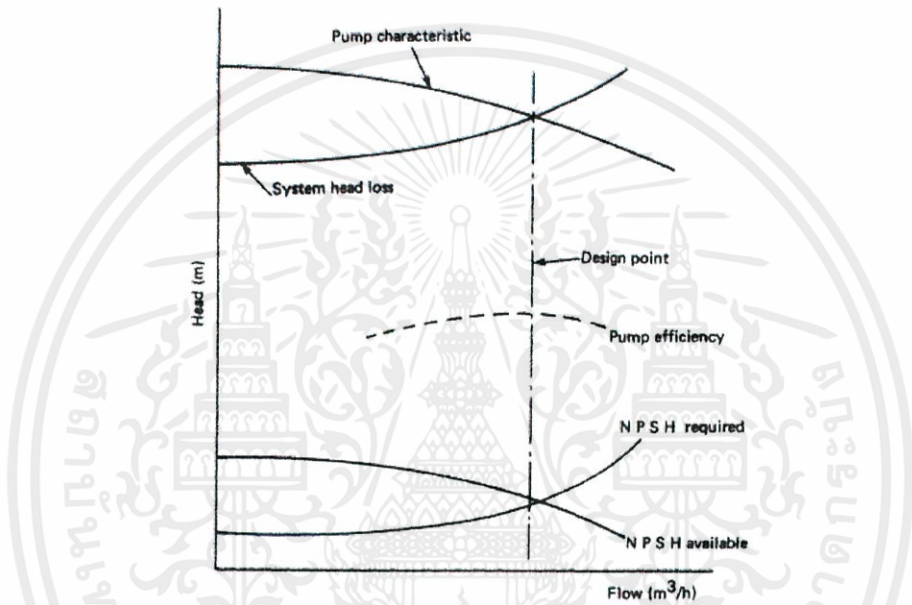
System curve คือกราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลผ่านระบบกับเฮดรวม (TDH) หรือ พลังงานที่ปั๊มจะต้องเพิ่มให้แก่ของเหลวเพื่อก่อให้เกิดการไหลนั้น พลังงานที่ปั๊มจะต้องให้ซึ่งบอกเป็นความสูงของแท่งของเหลว หรือเฮดมีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานสองอย่างด้วยกัน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกริใช้งานเพื่อการศึกษาดูแลเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2.1 ความต่างระดับของของเหลวที่ปลายของท่อดูดและท่อจ่าย หรือ
เฮดสถิต (Static Head)

2.7.2.2 พลังงานที่สูญเสียไปในการไหลผ่านระบบเนื่องมาจากความฝืดในเส้นท่อและ
การสูญเสียในอุปกรณ์ของระบบท่อ

จากสมการ (2.2) จะทราบได้ว่าจุดที่แสดงอัตราการไหลที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์ควิเตชัน คือ
จุดตัดระหว่าง NPSHa curve และ NPSHr curve



กราฟที่ 2.2 กราฟแสดงอัตราการไหลทำงานของปั๊มที่จุดตัดของ Pump curve และ System curve และ กราฟแสดงอัตราการไหลที่เริ่มเกิดควิเตชันที่จุดตัดของ NPSHa curve และ NPSHr curve

2.8 กฎความคล้าย (Affinity Law)

กฎความสัมพันธ์แสดงถึงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างอัตราการไหล (flow), ความเร็วของเครื่องสูบน้ำ (pump speed), แรงดัน (head), และพลังงานที่ใช้ (power consumption) สำหรับเครื่องสูบน้ำ หอยโข่ง (centrifugal pump) โดยกฎนี้แสดงให้เห็นว่าแม้แต่อัตราการไหลที่ลดลงเพียงเล็กน้อยจะช่วยลดกำลังที่ต้องการลงได้อย่างมาก นั่นหมายถึงพลังงานที่ต้องใช้ที่ลดลงด้วย กฎดังกล่าวเป็นพื้นฐานของการประหยัดพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารเมื่อตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเครื่องสูบน้ำ เปลี่ยนไป ตัวแปรอื่นๆ ด้านการคำนวณสามารถคำนวณได้ด้วยกฎความสัมพันธ์ (law of affinity) อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความเร็รรอบ

$$Q \propto N \quad (2.8)$$

Q = อัตราการไหล m^3/s

N = ความเร็รรอบมอเตอร์ (rpm)

2.8.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเฮดปั๊มกับความเร็รรอบ

$$H \propto N^2 \quad (2.9)$$

H = เฮดสุทธิรวมปั๊ม (m)

N = ความเร็รรอบมอเตอร์ (rpm)

2.8.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังปั๊มกับความเร็รรอบ

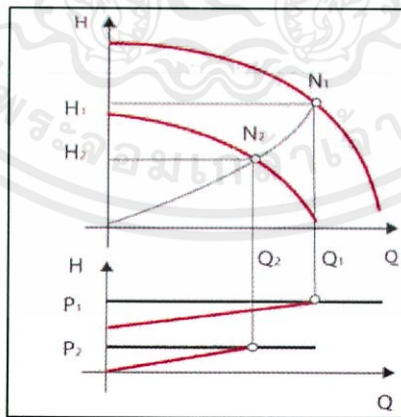
$$P \propto N^3 \quad (2.10)$$

P = กำลังขับปั๊ม (w)

N = ความเร็รรอบมอเตอร์ (rpm)

2.8.4 กฎความคล้าย (Affinity Law) เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางปั๊มคงที่ (Diameter constant)

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.11)$$



กราฟที่ 2.3 กราฟการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหล, เฮดสุทธิรวมของปั๊มและกำลังขับปั๊ม เมื่อความเร็รรอบมอเตอร์ของปั๊มเปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบชุดทดลอง

3.1 ชุดทดลองการเกิดควิเตชันในปี้ม

โครงการนี้ได้จัดทำชุดทดลองการเกิดควิเตชันในปี้ม โดยจะมีการสังเกตการณ์เกิดควิเตชันจากการปรับเปลี่ยนอัตราการไหล และการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบมอเตอร์ โดยอุปกรณ์หลักๆ ที่ใช้ในการสร้างชุดทดลองนั้นมีดังนี้ ปี้มแบบแรงเหวี่ยง, อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์, มาตรการวัดความดัน, ท่อ PVC, เหล็กใช้ทำโครงสร้าง, กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง, และอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของฟอง โดยใช้คลื่นอินฟราเรด ซึ่งค่าที่เครื่องมือวัดได้จะถูกส่งกลับมาประมวลผลด้วยวิธีทางสถิติที่ถูกต้อง

จากความเป็นมา และความสำคัญ จนถึงขอบเขตของการศึกษาจึงนำมาซึ่งการออกแบบชุดทดลองการเกิดควิเตชันในปี้ม กำหนดการออกแบบชุดทดสอบให้เริ่มเกิดควิเตชันในช่วงอัตราการไหล 30-50 ลิตรต่อนาที และโดยที่เงื่อนไขการเกิดควิเตชันโดยทั่วไปแล้วเป็นไปตามสมการที่ (2.2) จากสมการนี้ค่า NPSHr ได้มาจากผู้ผลิตปี้ม และค่า NPSHa หาได้จากสมการที่ (2.1) ซึ่งกำหนดให้ค่าตัวแปรต่างๆ ของสมการอยู่ที่สภาวะอุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 1 ซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 3.4 จากนั้นทำการเลือกขนาดท่อ สุ่มเปลี่ยนค่าความยาวของท่อทั้งหมด และเลือกข้อต่อ ข้องอในระบบท่อ โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ดังแสดงในตารางที่ 3.1, 3.2, 3.3

เมื่อเราได้สมการ และค่าตัวแปรที่เราต้องการแล้ว สุดท้ายจึงได้ผลการคำนวณออกมาดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.1 การกำหนดความยาวรวม และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อด้านดูด ด้านจ่าย

	ด้านดูด	ด้านจ่าย	หน่วย
ความยาวรวม	2.56E+00	1.69E+00	เมตร
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	2.50E-02	2.50E-02	เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 การกำหนดอุปกรณ์ในระบบท่อด้านดูด

ด้านดูด			
ชนิดอุปกรณ์	จำนวน	ค่า K	รวม
ข้องอ 90 องศา	2	0.75	1.5
foot valve	1	0.8	0.8
ข้อต่อสามทาง	1	0.06	0.06
ผลรวมค่า K			2.36

ตารางที่ 3.3 การกำหนดอุปกรณ์ในระบบท่อด้านจ่าย

ด้านจ่าย			
ชนิดอุปกรณ์	จำนวน	ค่า K	รวม
ข้องอ 90 องศา	2	0.75	1.5
Globe Valve	1	10	10
ข้อต่อสามทาง	1	0.06	0.06
ผลรวม K			11.56

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องที่สภาวะอุณหภูมิ และความดันบรรยากาศในการออกแบบ

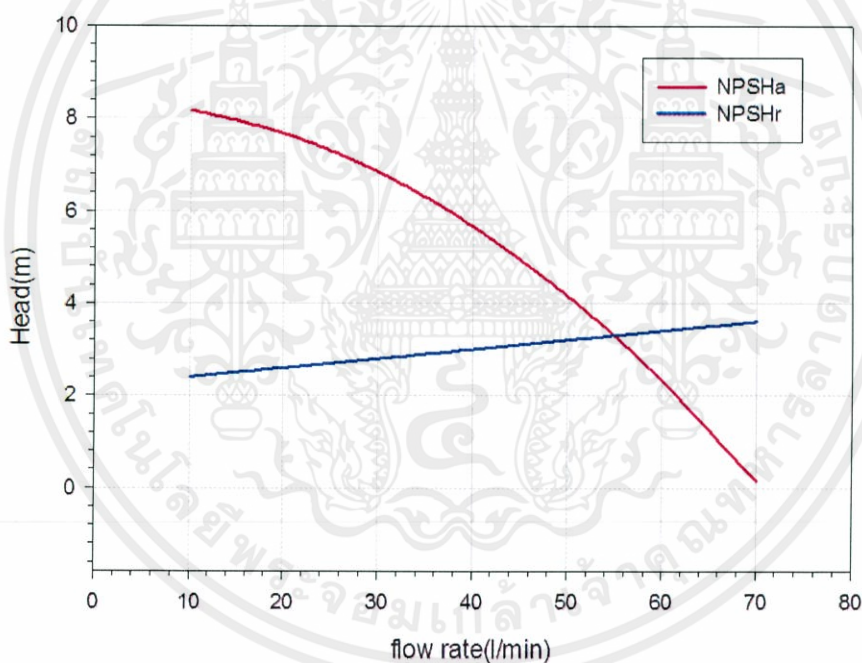
ตัวแปร	ค่า	หน่วย
H_{abs}	1.03E+01	m
H_s	7.00E-01	m
P_v	3.54E+03	Pa
γ	9.95E+02	kg/m ³
g	9.81E+00	m/s ²
Z_1	1.00E+00	m
v	8.619E-07	m ² /s
ϵ/D	0.0015	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 แสดงผลการคำนวณเฮดของระบบและค่า NPSH

Q (l/min)	Suction				Discharge				TDH (m)	NPSH _a (m)	NPSH _r (m)
	Re	f	H _{if} (m)	H _{ie} (m)	Re	f	H _{if} (m)	H _{ie} (m)			
10	1.92E+05	0.0228	0.0490	0.1200	1.54E+05	0.0230	0.0108	0.0768	0.26	8.19	2.40
20	3.84E+05	0.0223	0.1920	0.4802	3.07E+05	0.0224	0.0422	0.3073	1.02	7.69	2.60
30	5.76E+05	0.0221	0.4287	1.0804	4.61E+05	0.0222	0.0940	0.6913	2.29	6.85	2.80
40	7.68E+05	0.0220	0.7592	1.9207	6.14E+05	0.0221	0.1663	1.2290	4.08	5.68	3.00
50	9.60E+05	0.0220	1.1835	3.0011	7.68E+05	0.0220	0.2591	1.9204	6.36	4.18	3.20
60	1.15E+06	0.0219	1.7016	4.3216	9.21E+05	0.0220	0.3724	2.7653	9.16	2.34	3.40
70	1.34E+06	0.0219	2.3134	5.8822	1.08E+06	0.0220	0.5062	3.7639	12.47	0.16	3.60

นำข้อมูลจากตารางที่ 3.5 มาสร้างกราฟจะเห็นได้ว่าค่า NPSH_a จะมีค่าน้อยกว่า NPSH_r ที่อัตราการไหลประมาณ 55 ลิตรต่อนาที

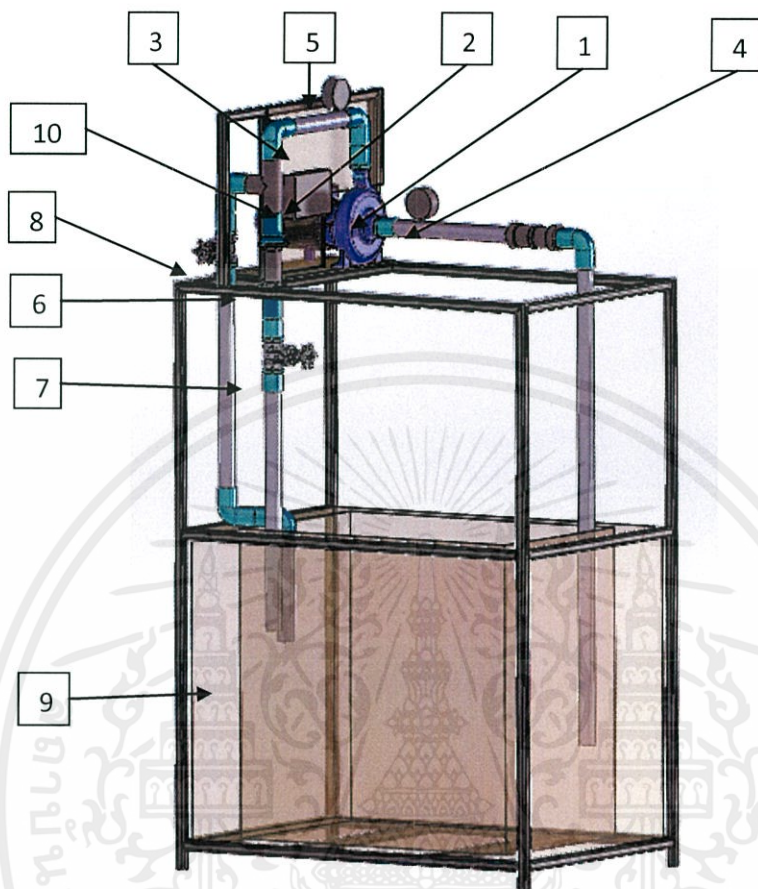


กราฟที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล กับ ค่าเฮด ของ NPSH_r และ NPSH_a

3.2 ส่วนประกอบชุดทดลองการเกิดควิเตชันในปั๊ม

หลังจากที่เราได้ทำการคำนวณการเกิดควิเตชันแล้ว เราจึงได้ข้อมูลความยาวของท่อ และข้อมูลของระบบท่อที่เราออกแบบ และนำข้อมูลที่ได้มาจำลองแบบสามมิติโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการช่วยออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงรูปจำลองสามมิติของชุดทดลองและอุปกรณ์ต่างๆของชุดทดลอง

3.2.1 อุปกรณ์

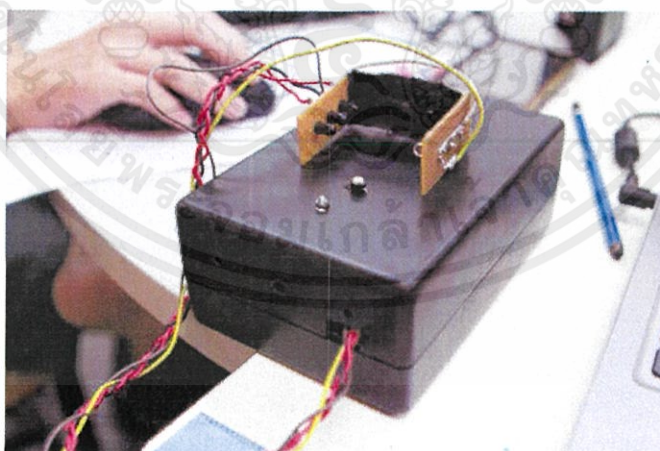
1. ปัมแบบแรงเหวี่ยง
2. ก่อ่งอิเล็กทรอนิกส์
3. ท่อใสขนาด 1" ใช้สังเกตควิตะชั้นจากปัม
4. มาตรวัดความดันด้านดูด
5. มาตรวัดความดันด้านจ่าย
6. เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow meter)
7. วาล์วปรับอัตราการไหล
8. วาล์วประตุน้ำ
9. ถังน้ำ
10. ก่อ่งปรับความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงรูปชุดทดลองจริงที่ได้รับการติดตั้งอุปกรณ์

3.2.2 กล้องอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 3.3 แสดงรูปกล่องอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ว่าห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
ไม่ว่าจะโดยทางใดก็ตาม การทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมายและจะถูกลงโทษตามกฎหมายต่อไป

กล้องอิเล็กทรอนิกส์เป็นกล่องที่ใช้วัดปริมาณฟองอากาศ โดยมีหลักการพื้นฐานของการหักเหของแสงกล่าวคือเมื่อฟองอากาศผ่านตัวตรวจจับที่ติดตั้งไว้บริเวณท่อใส่ฝิ่งจ่ายน้ำ จะทำให้แสงอินฟราเรดที่ส่งจากหลอดส่งนั้นเกิดการหักเหขึ้น ทำให้ตกกระทบที่หลอดรับน้อยลง จึงเป็นผลให้เกิด

การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่โหลดรับได้ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงจะถูกส่งเข้าสู่ชุดควบคุมและแปลงเป็นค่าอนาล็อกต่อไป

3.2.3 กล่องปรับความเร็วรอบ



รูปที่ 3.4 แสดงกล่องปรับความเร็วรอบ

กล่องปรับความเร็วรอบใช้สำหรับปรับความเร็วรอบของมอเตอร์บีบซึ่งใช้หลักการในการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าเพื่อทำให้ความเร็วรอบมอเตอร์บีบเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

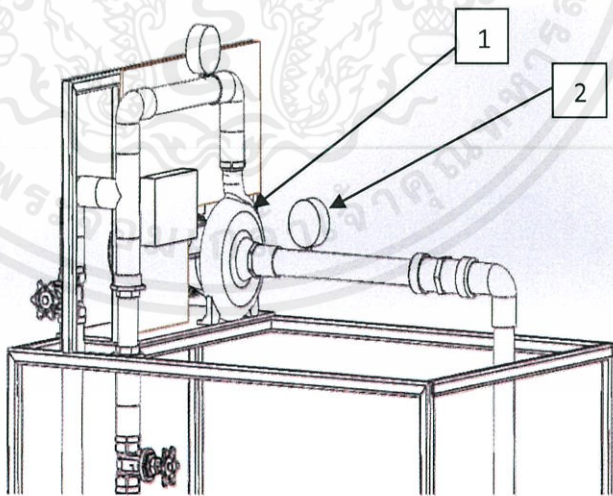
บทที่ 4

ขั้นตอนและผลการทดลอง

4.1 ขั้นตอนการทดลอง

4.1.1 การล่อน้ำ ก่อนทำการทดลองและตรวจพบว่าไม่มีน้ำอยู่ในระบบท่อ สำหรับปั๊มแรงเหวี่ยงนั้นสูญญากาศที่เกิดขึ้นตรงทางดูดจะน้อย จึงต้องล่อน้ำหรือเติมน้ำให้เต็มท่อทางดูดของปั๊มก่อนที่จะทำการเดินเครื่องปั๊มได้

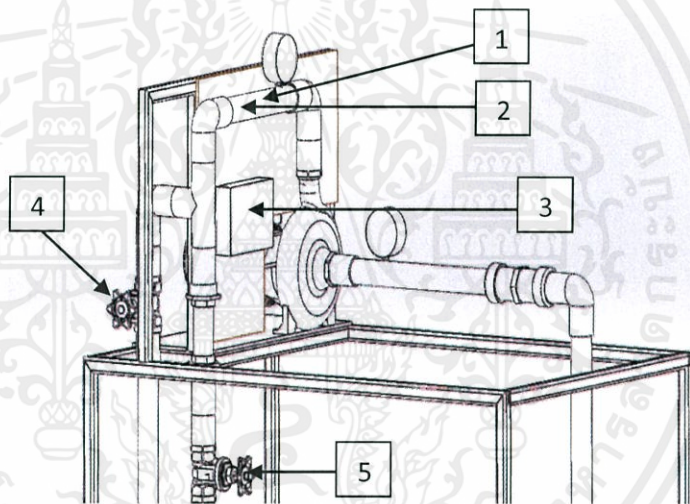
- 1) เปิดช่องไล่อากาศที่ด้านบนของตัวปั๊ม (จุดที่ 1)
- 2) ถอดเกจวัดความดันของท่อด้านดูดออก (จุดที่ 2)
- 3) ทำการกรอกน้ำเข้าไปในท่อที่ใช้ติดตั้งเกจวัดความดันของท่อด้านดูด อย่างช้าๆ จนมีน้ำล้นออกทางช่องไล่อากาศที่ด้านบนของตัวปั๊ม
- 4) ปิดช่องไล่อากาศที่ด้านบนของตัวปั๊มให้สนิท
- 5) กรอกน้ำเพิ่มในท่อที่ใช้ติดตั้งเกจวัดความดันของท่อด้านดูดจนน้ำระดับน้ำในรูกรอกน้ำขึ้นสูงเท่าระดับขอบท่อ
- 6) นำเกจวัดความดันของท่อด้านดูดมาติดตั้งอีกครั้ง
- 7) นำดินน้ำมันมาปิดบริเวณขอบท่อกับเกจวัดความดัน เพื่อป้องกันการรั่วไหล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.1 แสดงอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการล่อน้ำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประกอบในการเรียนการสอนเท่านั้น มิใช่เอกสารที่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 เตรียมการทดลอง

- 1) นำชุดไฟฉายมาติดตั้งที่ท่ออะคริลิกใสทางด้านจ่ายของปั๊ม (จุดที่ 1)
- 2) นำเครื่องตรวจจับการเกิดควาเวเทชั่นมาติดตั้งที่ท่ออะคริลิกใสทางด้านจ่ายของปั๊ม ต่อเครื่องตรวจจับการเกิดควาเวเทชั่นเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อทำการเก็บข้อมูล (จุดที่ 2)
- 3) นำเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์มาติดตั้งกับมอเตอร์ปั๊มโดยนำปลั๊กของปั๊มมาต่อเข้ากับเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์และนำปลั๊กของเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไปต่อเข้ากับปลั๊กแหล่งจ่ายไฟฟ้า (จุดที่ 3)
- 4) เช็ควาล์วประตูน้ำของท่อด้านจ่าย(by pass)อยู่ในตำแหน่งปิด (จุดที่ 4)
- 5) เช็ควาล์วปรับอัตราการไหลอยู่ในตำแหน่งเปิดเล็กน้อย (จุดที่ 5)



รูปที่ 4.2 แสดงขั้นตอนการเตรียมการทดลอง

4.2.3 การทดลองเก็บข้อมูลนาฬิกา

- 1) ทำการเปิดสวิทซ์ของปั๊มและเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์ที่ 2700 รอบต่อนาที
- 2) ปรับอัตราการไหลให้อยู่ที่ 20 ลิตรต่อนาที ทิ้งไว้ประมาณ 30 วินาที
- 3) ทำการเก็บข้อมูลนาฬิกา และทำถ่ายรูปฟองอากาศที่ท่ออะคริลิกใสทางด้านจ่าย
- 4) ปรับอัตราการไหลเพิ่มขึ้นครั้งละ 5 ลิตรต่อนาที และทำซ้ำตามข้อ 3 และข้อ 4

จนถึงค่าอัตราการไหลสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) ทำการเก็บค่าใหม่อีกครั้งตามข้อ 1-4 โดยปรับความเร็วรอบมอเตอร์บีบลดลงเป็น 2500 ,2300 และ 2100 รอบต่อนาที

4.2 ผลการทดลอง

จากการทดลอง ผลการทดลองที่เก็บค่าได้จะแบ่งเป็นสองอย่างด้วยกันคือ ค่าอนุลือกที่เก็บได้ในแต่ละอัตราการไหลและภาพถ่ายที่เก็บได้ในแต่ละอัตราการไหล

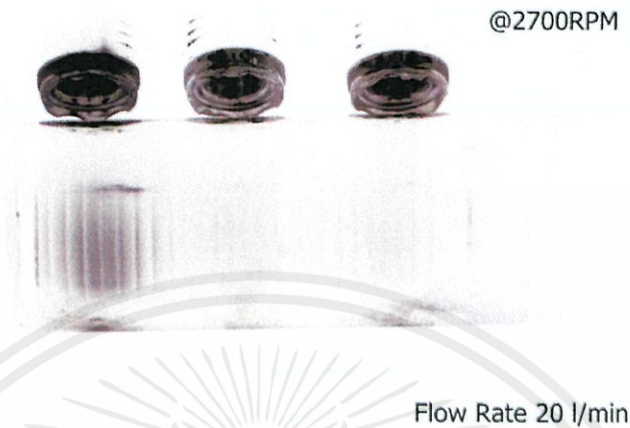
4.2.1 ค่าอนุลือกที่เก็บได้ในแต่ละอัตราการไหลที่ความเร็วรอบมอเตอร์บีบ 2700, 2500, 2300, และ 2100 รอบต่อนาที

ตารางที่ 4.1 แสดงตัวอย่างค่าอนุลือกในแต่ละอัตราการไหล ที่ความเร็วรอบมอเตอร์บีบ 2700 รอบต่อ นาที

Sample Size	Analog Value at 2700RPM								
	Flow Rate(γ /min)								
	20	25	30	35	40	45	50	55	60
1	971.15	971.05	971.32	971.58	972.27	972.41	973.23	974.26	975.72
2	971.26	971.11	971.42	971.53	972.17	972.41	973.39	974.68	975.88
3	971.36	971.05	971.74	971.21	972.01	972.36	973.34	974.16	976.09
4	971.26	971.21	971.53	971.42	971.9	972.46	973.28	974.26	975.56
5	971.52	970.89	971.26	971.47	971.74	972.15	973.27	974.16	975.98
6	971.21	970.95	971.21	971.16	971.8	972.31	973.38	974.37	975.98
7	971.42	971.21	971.47	971.32	971.38	972.36	973.12	974.63	975.67
8	971.26	971.53	971.63	971.37	972.06	972.52	972.96	974.42	976.14
9	971.21	971.16	971.47	971.47	971.74	972.41	972.69	974.74	975.62
10	971.42	971.26	971.42	971.59	971.8	972.41	973.06	974.26	975.3
11	971.42	971.05	971.26	971.32	971.56	972.52	972.96	973.74	975.56
12	971.26	971.26	971.11	971.26	971.46	972.2	972.91	974.05	975.67
13	971.42	971.21	971.68	971.47	971.6	972.09	972.64	974.21	975.35
14	971.42	971.05	971.63	971.59	971.55	972.52	972.64	974.21	975.98
15	971.47	971.16	971.32	971.42	971.39	972.41	972.96	974.05	975.72
16	971.05	971.42	971.11	971.53	971.55	972.46	972.8	974.58	975.56
17	971.42	971.37	971.53	971.43	971.6	972.41	972.64	974.47	975.77
18	971.31	971.16	971.53	971.54	971.44	972.25	972.64	973.84	975.72
19	971.52	970.89	971.11	971.49	971.65	972.25	972.69	974.63	975.83
20	971.31	971	971.47	971.43	971.39	972.52	972.64	974.37	975.77
21	971.52	971.26	971.53	971.49	971.55	972.52	972.54	974.42	975.72
22	971.52	971.11	971.37	971.44	971.5	972.04	972.91	974.58	975.77
23	971.05	971.05	971.26	971.44	971.6	972.46	972.48	974.21	975.77
24	971.1	971.21	971.37	971.71	971.5	972.46	972.48	973.84	975.77
25	971.26	971.16	971.58	971.6	971.55	972.25	973.01	974.05	976.09
26	971.42	971.21	971.26	971.71	971.65	972.25	972.96	973.74	975.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ภาพถ่ายที่เก็บได้ในแต่ละอัตราการไหล ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ปัม 2700, 2500, 2300, และ 2100 รอบต่อนาที

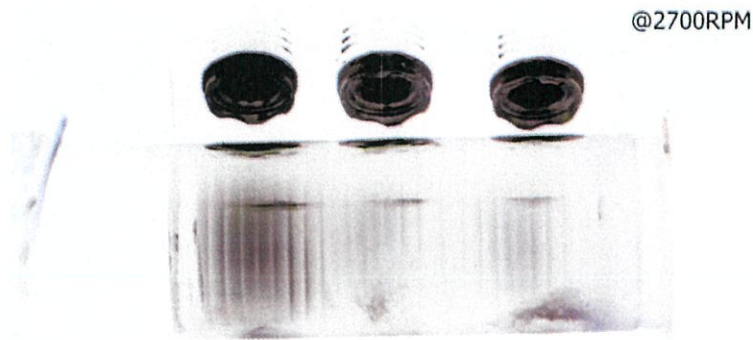


รูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 20 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที



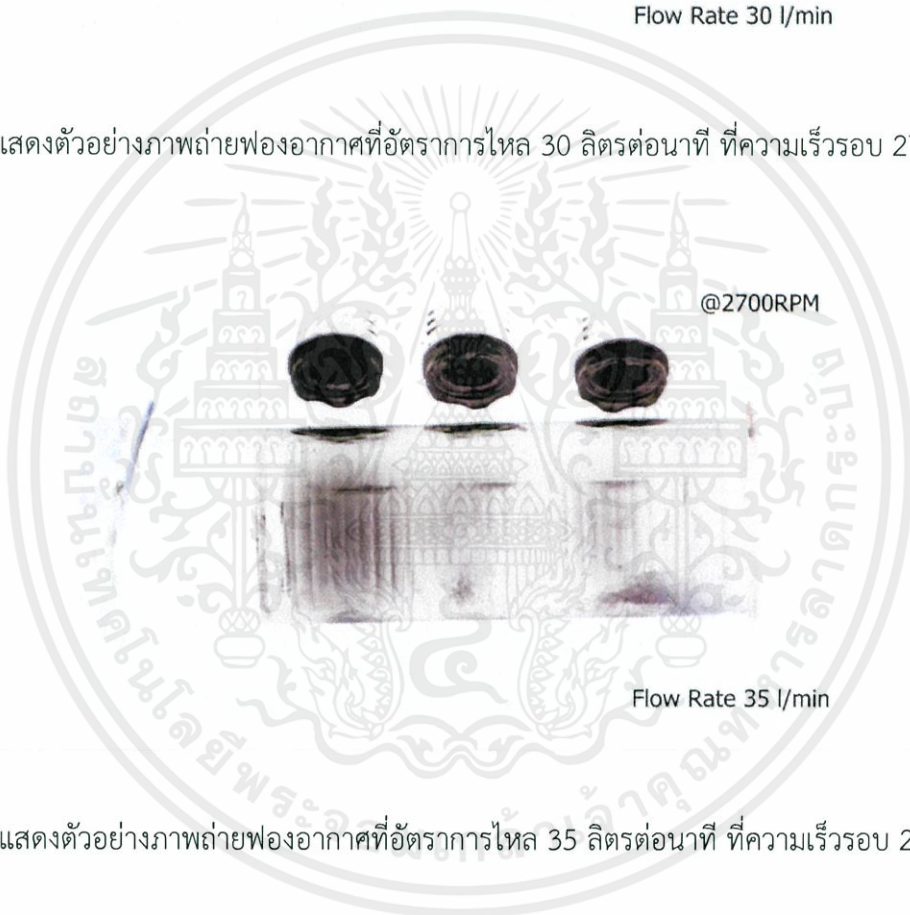
รูปที่ 4.4 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Flow Rate 30 l/min

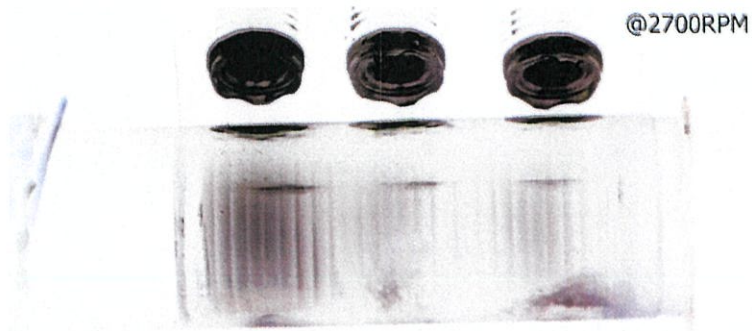
รูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 30 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที



Flow Rate 35 l/min

รูปที่ 4.6 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 35 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Flow Rate 40 l/min

รูปที่ 4.7 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 40 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที



Flow Rate 45 l/min

รูปที่ 4.8 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 45 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 ทฤษฎีในการวิเคราะห์การทดลอง

5.1.1 การคำนวณขนาดของตัวอย่าง (Sample size) ของแต่ละหน่วยทดลอง (Level of factors หรือ Treatments) เพื่อจะได้การวิเคราะห์ที่เหมาะสม จำนวนตัวอย่างที่ถูกสุ่มมาต้องมีการคำนวณอย่างเหมาะสมด้วยสมการ

$$\phi^2 = \frac{n \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a\sigma} \quad (5.1)$$

โดยที่ σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ของขนาดตัวอย่าง
 n คือ ขนาดของตัวอย่างของแต่ละหน่วยทดลอง
 τ_i คือ ผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละหน่วยทดลอง กับค่าเฉลี่ยรวม ($\mu_i - \bar{\mu}$)
 a คือ จำนวนของหน่วยทดลอง
 ϕ คือ ตัวแปรที่สามารถหาได้จาก Operating Characteristic Curves

โดยตัวแปรที่ต้องทราบค่าโดยการเดาหรือทำการทดลองนำร่อง (Pilot study) เพื่อหาค่า σ ในกรณีที่ยังไม่ได้ทำการทดลอง ในกรณีที่ได้ทำการทดลองแล้วให้ใช้ค่า Pooled standard deviation และต้องทราบขนาดของหน่วยทดลองและค่าความคลาดเคลื่อนประเภทที่ 2 (Type II error หรือ β error) คือความน่าจะเป็นที่ยอมรับสมมติฐานว่างเปล่าต่างๆที่ สมมติฐานว่างเปล่าผิด) เพื่อที่จะสามารถหาอำนาจการตรวจสอบ (Power of test) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1-\beta$ ได้

5.1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA)

เพื่อที่จะแสดงได้ว่ามีปัจจัยเกิดขึ้นเนื่องจากควิเตชั่นในปีนั้นจำเป็นต้องใช้วิธีทางสถิติแสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างความใสของน้ำที่อัตราการไหลต่างๆ กัน ต้องใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน หนึ่งในวิธีการทางสถิติที่นิยมใช้กันอย่างทั่วไปในการตัดสินใจทางสถิติคือการทดสอบสมมติฐาน (hypothesis testing) โดยทั่วไปการทดสอบสมมติฐานจะสันนิษฐานว่าสิ่งที่เราสนใจนั้นเป็นจริงก่อน แล้วจึงทำการพิสูจน์ด้วยข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง

การทดสอบสมมติฐานประกอบด้วย 2 ส่วนคือ สมมติฐานหลัก (เขียนแทนด้วย H_0) และสมมติฐานรอง (เขียนแทนด้วย H_1) สมมติฐานหลักเป็นข้อสันนิษฐานเบื้องต้น ซึ่งมักอ้างอิงจากผลการศึกษาวิจัยก่อนหน้านี้หรือความรู้โดยทั่วไป สมมติฐานรองคือสิ่งที่ต้องการพิสูจน์ว่าเป็นจริง โดยกำหนดสมมติฐาน ดังนี้

สมมติฐานว่างเปล่า (Null hypothesis) $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n$

สมมติฐานทางเลือก (Alternative hypothesis) $H_1: \mu_i \neq \mu_j$ อย่างน้อยหนึ่งคู่และ $i \neq j$

โดยมีระดับนัยสำคัญทั้งหมดเท่ากับ α ที่ซึ่งโดยปกติแล้วระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 สำหรับกรณีที่ขนาดของตัวอย่างเท่ากันแล้ว ถ้าค่าสัมบูรณ์ของความต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของข้อมูลในหน่วยทดลองสองหน่วยมากกว่า

$$T_\alpha = q_\alpha(a, f) \sqrt{\frac{MS_E}{n}} \quad (5.2)$$

โดยที่ a คือ จำนวนหน่วยทดลอง

$q_\alpha(a, f)$ หาได้จาก Studentized range statistic

f คือ ระดับความเป็นอิสระ (Degree of freedom) ของความคลาดเคลื่อน (Error) ภายในหน่วยทดลอง หาได้จากจำนวนการทดลอง (Runs) ลบด้วยจำนวนหน่วยทดลอง (a)

MS_E คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนสามารถหาได้จากสมการ $MS_E = \frac{SS_E}{\alpha-1}$ และ SS_E หาได้จาก $\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$ โดย y_{ij} คือ ค่าที่ได้จากการทดลองที่ ij และ

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^n y_{ij}}{n} \quad (5.3)$$

n คือ ขนาดของตัวอย่างในแต่ละหน่วยทดลอง Sample size
แล้วจะสรุปได้ว่าความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยทั้งสองค่าต่างกันอย่างน้อยที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

5.2 ผลการวิเคราะห์การทดลอง

5.2.1 ผลการคำนวณหาขนาดของตัวอย่าง (Sample size)

เพื่อจะได้การวิเคราะห์ที่เหมาะสม จำนวนตัวอย่าง (Sample size) ที่ถูกสุ่มมาต้องมีการคำนวณอย่างเหมาะสมด้วย การวิเคราะห์ Sample size จะทำในโปรแกรม Minitab 16 โดยค่า Power = 0.95, ค่าจำนวนหน่วยทดลองเท่ากับ 58, ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) เท่ากับ 0.52 ซึ่งได้จากการทำการทดลองนำร่อง และข้อมูลแตกต่างกันไม่มากนัก การกำหนดค่าความต่างที่มากที่สุดระหว่างค่าเฉลี่ย (Values of the maximum difference between means) จึงต้องมีค่าค่อนข้างน้อยที่ ซึ่งกำหนดไว้ที่ 1 เพื่อที่ว่าจะสามารถรู้ได้ว่า ถ้าค่าที่วัดได้อย่างน้อย 1 ต้องสามารถวัดได้ว่ามันต่างกันอย่างน้อยมีนัยสำคัญ จากรูปที่ 5.1 ได้ค่าขนาดของตัวแปรเท่ากับ 26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Power and Sample Size for One-Way ANOVA

Number of levels: 58

Specify values for any two of the following:

Sample sizes: _____

Values of the maximum difference between means: 1

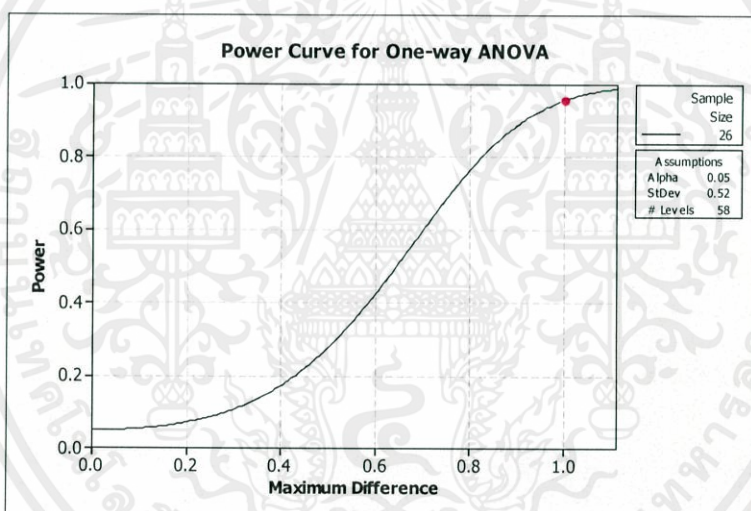
Power values: 0.95

Standard deviation: 0.52

Options... Graph...

Help OK Cancel

รูปที่ 5.1 แสดงการใส่ค่าต่างๆในหน้าต่างการหาค่าขนาดของตัวแปรโดยใช้โปรแกรม Minitab 16

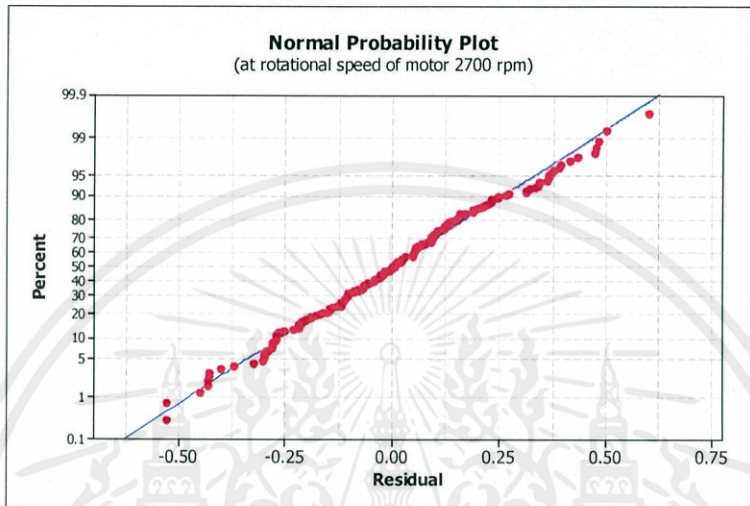


รูปที่ 5.2 ผลจากการคำนวณขนาดของตัวแปรโดยการใช้โปรแกรม Minitab 16 ผลที่ได้คือ ขนาดของตัวแปรเท่ากับ 26

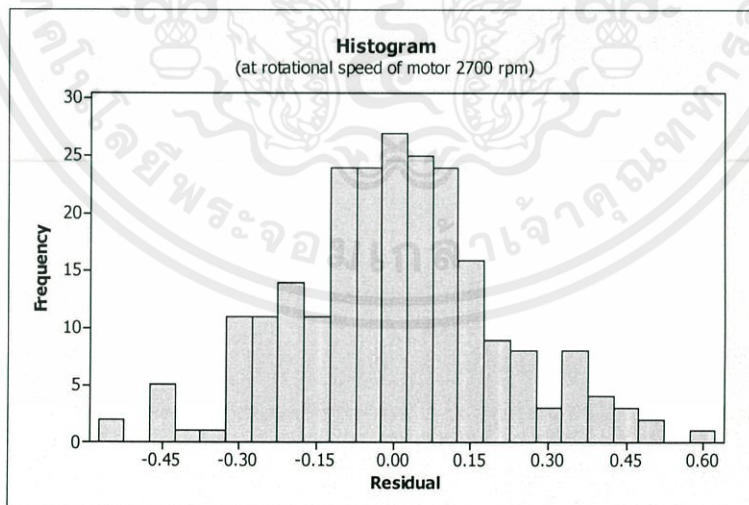
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 ผลการตรวจสอบสมมติฐานของข้อมูลโดยการพิจารณาสมการต้นแบบ (Model Adequacy Checking)

การทดสอบสมมติฐานของข้อมูลเป็นทดสอบสมมติฐานที่ว่าเศษค้ำง (Residual) ของข้อมูลต้องมี การกระจายตัวแบบปกติ, ค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์, ความเป็นอิสระต่อกัน และความแปรปรวนมีค่าคงที่ โดย

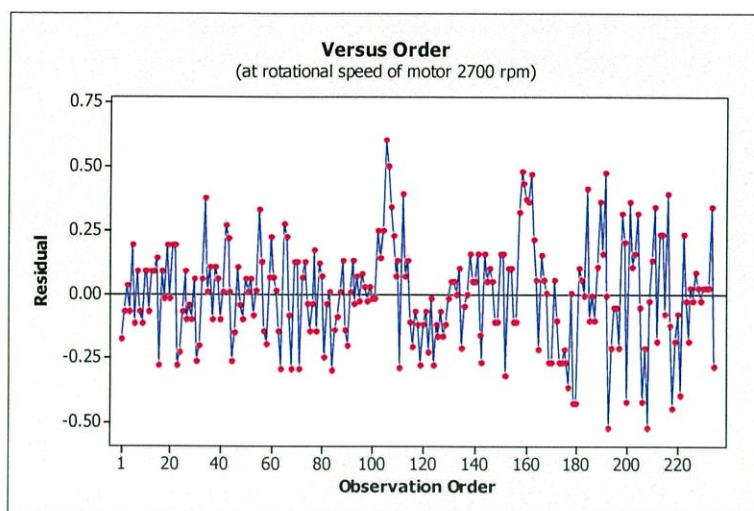


รูปที่ 5.3 แสดงกราฟ Normal plot of residuals ซึ่งจุดของเศษค้ำงต้องมีแนวโน้มเรียงตัวกันเป็นเส้นตรง ดังนั้นเศษค้ำงมีการกระจายตัวแบบปกติ

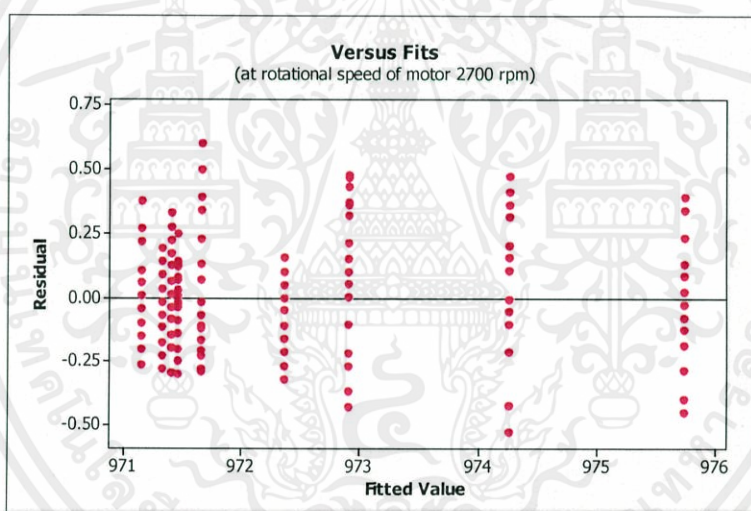


รูปที่ 5.4 แสดงกราฟ Histogram ซึ่งลักษณะของกราฟต้องมีลักษณะเป็นรูประฆังคว่ำ ดังนั้นเศษค้ำงมีการกระจายตัวแบบปกติ

ไม่ว่ากรณีใดๆ หงสน ออกทงหำมมำให้ค้ดเปลงเนื้อหำ และต้องอ้ำงอิงถึงเจ้ำของเอกศำรทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้



รูปที่ 5.5 แสดงกราฟ Residual versus order ลักษณะจุดเศษค้ำงไม่มีความสัมพันธ์ที่แน่นอนต่อกัน ดังนั้นค่าเศษค้ำงเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 5.6 แสดงกราฟ Residual versus fitted value

จากรูปที่ 5.6 กราฟมีแนวโน้มการกระจายตัวของเศษค้ำงเป็นไปอย่างไม่มีแบบแผน (ไม่ขยายกว้าง หรือ แคบลงในทางใดทางหนึ่ง) รอบเส้นเศษค้ำงเท่ากับศูนย์ ดังนั้นความแปรปรวนของเศษค้ำงมีค่าคงที่ และการกระจายตัวของเศษค้ำงมีลักษณะกระจายรอบค่าศูนย์ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของเศษค้ำงมีค่าโดยประมาณเท่ากับศูนย์

จากรูปที่ 5.6 กราฟมีแนวโน้มการกระจายตัวของเศษค้ำงเป็นไปอย่างไม่มีแบบแผน (ไม่ขยายกว้าง หรือ แคบลงในทางใดทางหนึ่ง) รอบเส้นเศษค้ำงเท่ากับศูนย์ ดังนั้นความแปรปรวนของเศษค้ำงมีค่าคงที่ และการกระจายตัวของเศษค้ำงมีลักษณะกระจายรอบค่าศูนย์ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของเศษค้ำงมีค่าโดยประมาณเท่ากับศูนย์

จากกราฟทั้งสองสรุปได้ว่า ข้อมูลตั้งอยู่บนสมมติฐานที่สามารถทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

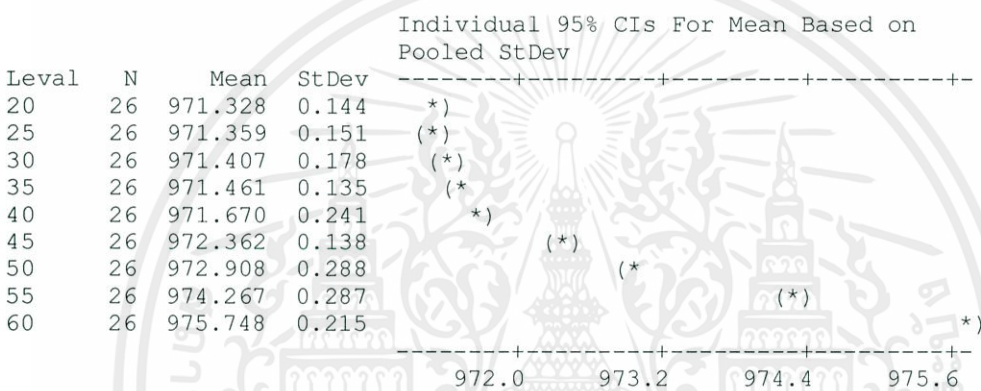
5.2.3 ผลการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธีของตุกี (Tukey's multiple comparison)

ในการทดสอบเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยอนุภาค (ตัวแปรตาม) ในแต่ละอัตราการไหล (ตัวแปรต้น) โดยใช้โปรแกรม Minitab 16 ได้ผลลัพธ์ดังนี้

One-way ANOVA: at rotational speed of motor 2700rpm

Source	DF	SS	MS	F	P
C1	8	520.0189	65.0024	1530.04	0.000
Error	225	9.5589	0.0425		
Total	233	529.5779			

S = 0.2061 R-Sq = 98.19% R-Sq(adj) = 98.13%



Grouping Information Using Tukey Method

C1	N	Mean	Grouping
60	26	975.7481	A
55	26	974.2665	B
50	26	972.9085	C
45	26	972.3619	D
40	26	971.6696	E
35	26	971.4612	F
30	26	971.4073	F
25	26	971.3592	F G
20	26	971.3285	G

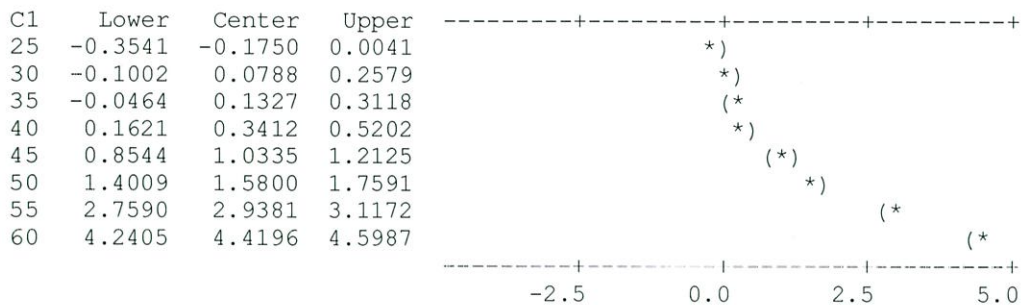
Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of C1

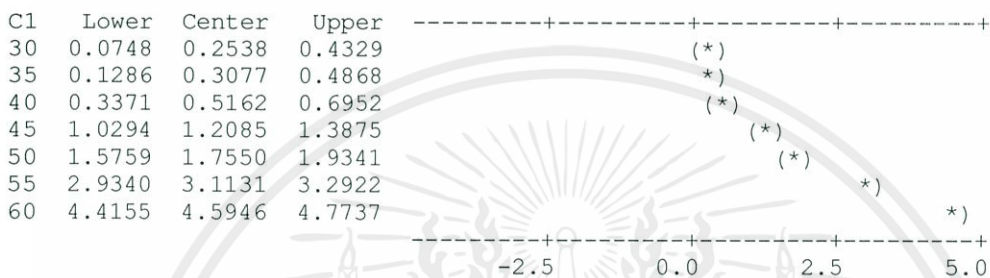
Individual confidence level = 99.80%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

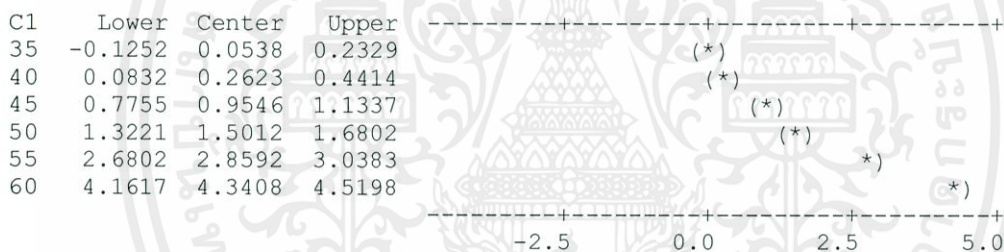
C1 = 20 subtracted from:



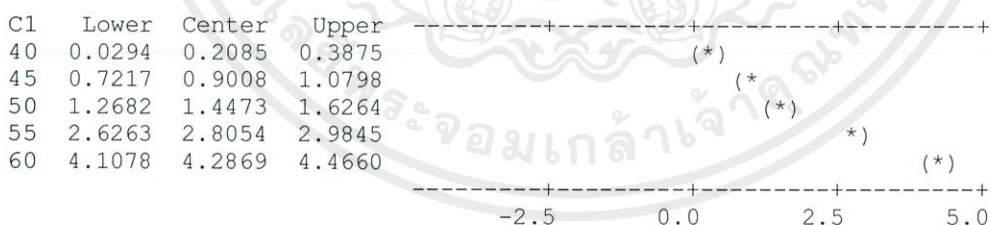
C1 = 25 subtracted from:



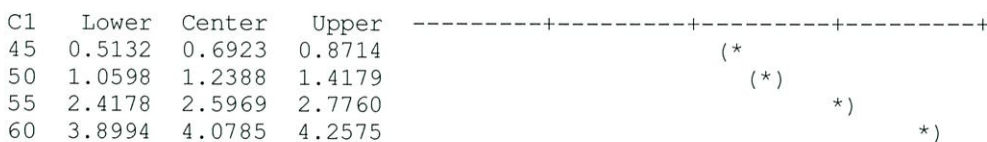
C1 = 30 subtracted from:



C1 = 35 subtracted from:

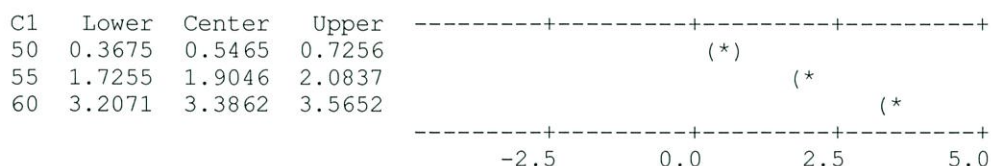


C1 = 40 subtracted from:



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเชิงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C1 = 45 subtracted from:



C1 = 50 subtracted from:



C1 = 55 subtracted from:



5.3 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.3.1 สรุปผลการทดลอง

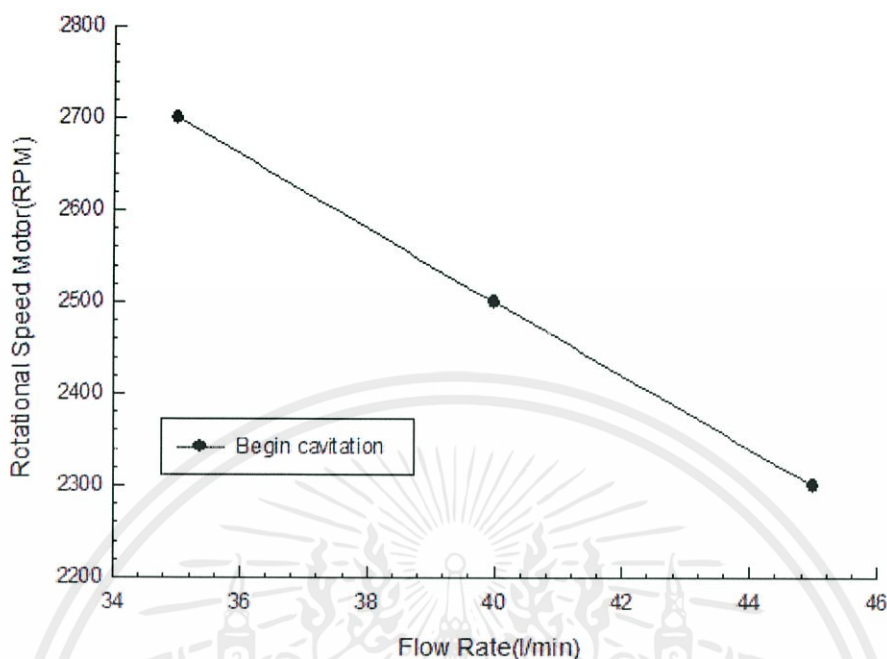
กระบวนการตัดสินใจสำหรับการทดสอบสมมติฐานนั้นอยู่บนพื้นฐานของความน่าจะเป็นทางสถิติหรือเรียกว่าค่า P-value ที่ได้จากการทดสอบ

- ถ้าค่า P-value มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับระดับนัยสำคัญที่ตั้งไว้ (α -Level) ให้ปฏิเสธสมมติฐานหลัก และยอมรับสมมติฐานรอง
- ถ้าค่า P-value มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ตั้งไว้ (α -Level) แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ จึงไม่สามารถยอมรับสมมติฐานรอง

จากผลการทดสอบในตาราง ANOVA ค่า P-value เท่ากับ 0.000 จึงสรุปได้ว่ามีอย่างน้อยหนึ่งอัตราการไหล ที่มีค่าเฉลี่ยนาฬิกาแตกต่างจากอัตราการไหลอื่นๆ เมื่อค่าระดับนัยสำคัญอยู่ที่ 0.05

เพื่อให้ทราบอย่างแน่ชัดว่าค่าเฉลี่ยนาฬิกาของอัตราการไหลใดบ้างที่แตกต่างกัน โดยดูผลลัพธ์จากการทดสอบแบบ Tukey จากตารางจะเห็นได้ว่าช่วงระหว่างอัตราการไหล 35 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหล 40 ลิตรต่อนาที มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากช่วงของแต่ละค่าไม่คาบเกี่ยวกันอยู่ ซึ่งแสดงว่าความขุ่นของน้ำมากขึ้นเนื่องจากฟองอากาศทำให้เซนเซอร์ตัวรับ (Receiver) รับแสงจากตัวส่ง (Emitter) ได้น้อยลง จึงสรุปได้ว่าค่าวิเตชันในระบบสูบน้ำนี้เริ่มเกิดขึ้นที่อัตราการไหล 35 ลิตรต่อนาที เมื่อความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าคงที่ ($N=2700$ รอบต่อนาที) และทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกันกับที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ 2500 และ 2300 รอบต่อนาที โดยอัตราการไหลที่เริ่มเกิดค่าวิเตชันคือ 40 และ 45 ลิตรต่อนาที ส่วนที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ 2100 รอบ

ต่อนาที มีช่วงของแต่ละค่าคาบเกี่ยวกันอยู่ จึงสรุปได้ว่ายังไม่มีเกิดการเกิดคาวิตेशन และเมื่อนำค่าอัตราการไหลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับรูปถ่ายพบว่ามีคุณสมบัติคล้ายกัน



กราฟที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ และอัตราการไหลที่เริ่มเกิดคาวิตेशन

เมื่อนำค่าอัตราการไหลที่เริ่มเกิดคาวิตेशनแต่ละความเร็วรอบของมอเตอร์มาเขียนกราฟ จะได้ดังกราฟที่ 5.1 และสรุปได้ว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลง อัตราการไหลที่เริ่มเกิดคาวิตेशनจะเพิ่มขึ้น

5.4 ข้อเสนอแนะ

เครื่องมือที่ใช้วัดอัตราการไหลควรจะมีค่าความละเอียดมากกว่านี้ เนื่องจากเครื่องวัดอัตราการไหลนั้นสามารถเริ่มวัดได้ที่ 20 ลิตรต่อนาที และปรับได้เพิ่มทีละ 5 ลิตรต่อนาที เช่นที่ความเร็วรอบ 2700 RPM ปรากฏการณ์คาวิตेशनจะเริ่มเกิดที่ช่วงอัตราการไหลประมาณ 30-35 ลิตรต่อนาที ที่เครื่องวัดอัตราการไหลวัดได้ แต่ถ้าเครื่องวัดอัตราการไหลมีความละเอียดมากกว่านี้ จะสามารถบ่งบอกถึงอัตราการไหลที่เริ่มเกิดคาวิตेशनได้แม่นยำกว่านี้

นอกจากนั้นแล้วควรทำการทดลองวัดหาค่าเลขคาวิตेशन เนื่องจากตัวเลขคาวิตेशनนี้จะเป็นตัวบ่งบอกว่าการเกิดคาวิตेशनนั้นเกิดขึ้นมากหรือน้อยเพียงใด ตัวเลขคาวิตेशनจะสามารถบ่งบอกได้แม่นยำกว่าการสังเกตจากท่อใสด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

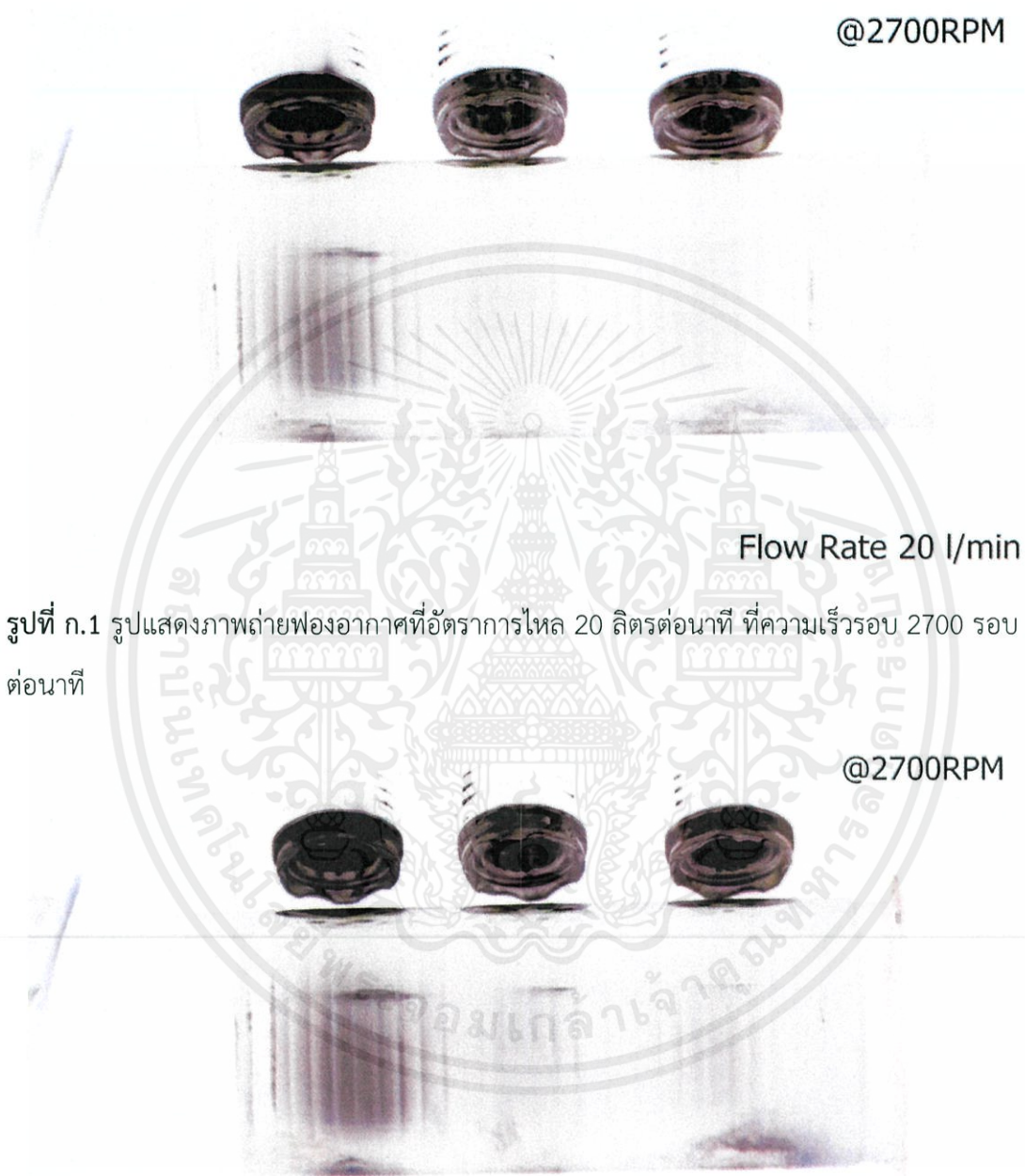
เอกสารอ้างอิง

- [1] เกรียงไกร มหาวັນ, การศึกษาผลกระทบจากการเกิดคavititeชั่น ต่อสมรรถนะของปั๊มหอยโข่ง โดยวิธีการทดลอง, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. 2549, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] ชวัลนัฐ ร้อนทาน, ชุตติพงษ์ รูปกลม และธีรภัทร รักประยูร, การออกแบบชุดทดลองการเกิดคavititeชั่นในปั๊มแรงเหวี่ยง, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. 2555, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] Munson, B.R., et al., Fundamental of Fluid mechanics. 6 ed. 2010: John Wiley & Son.
- [4] FRANC, J.-P. and J.-M. MICHEL, Fundamentals of Cavitation. 2005: Springer Science + Business Media Inc.
- [5] Esposito, A., Emeritus, and M. University, Fluid Power with Applications. 7 ed. 2009.
- [6] Dan R. Rankin, "What is NPSH?" . Peerless Pump Company, Indianapolis, Indiana, USA.
- [7] British Pump Manufacturers' Association.
- [8] ASHRAE , "Centrifugal Pumps" , 2000 HVAC System and Equipment ,2000
- [9] B.K. Bose., Modern Power Electronic and AC Drive, Prentice - Hall, 2002.
- [10] Michael Volk, P.E., "Pump Characteristics and Applications", Taylor & Francis Group, 2nd edition, New York, 2005.
- [11] [http:// www.chemguide.co.uk](http://www.chemguide.co.uk)
- [12] [http:// www.irrigationcraft.com](http://www.irrigationcraft.com)
- [13] <http://202.129.59.73/tn/JULY/Head%20Curve.htm>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

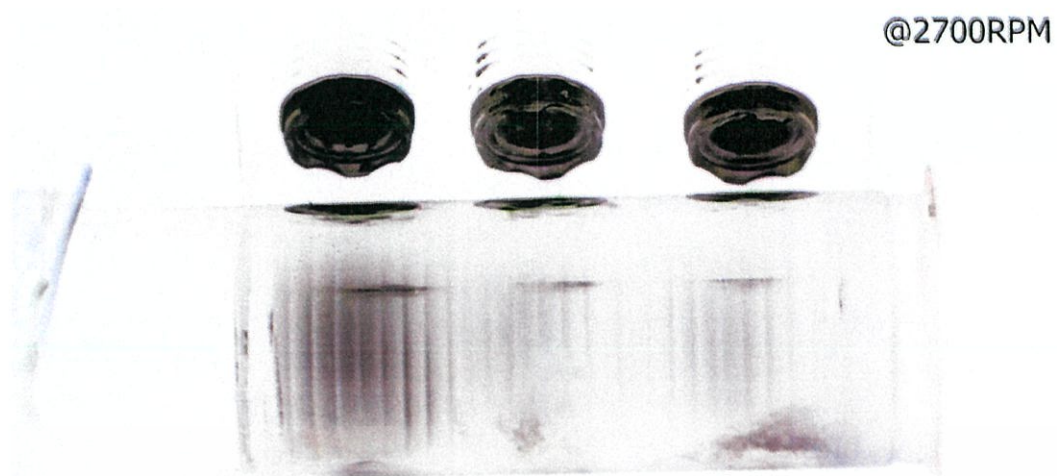
ภาคผนวก ก.

แสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหลต่างๆ ที่ความเร็วรอบ 2700, 2500, 2300 และ 2100 รอบต่อนาที



รูปที่ ก.1 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 20 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที

เอกสาร รูปที่ ก.2 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที
ไม่ว่ากต่อนาที ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Flow Rate 30 l/min

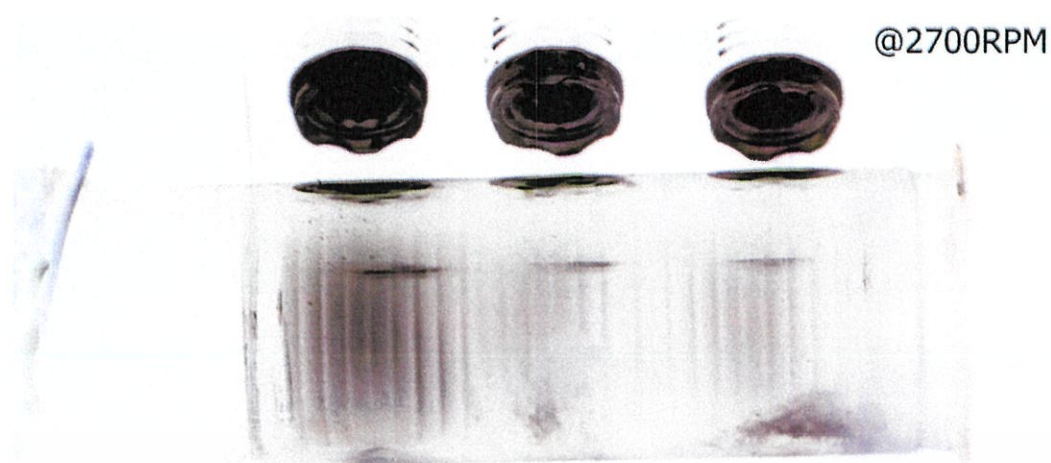
รูปที่ ก.3 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 30 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที



Flow Rate 35 l/min

รูปที่ ก.4 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 35 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Flow Rate 40 l/min

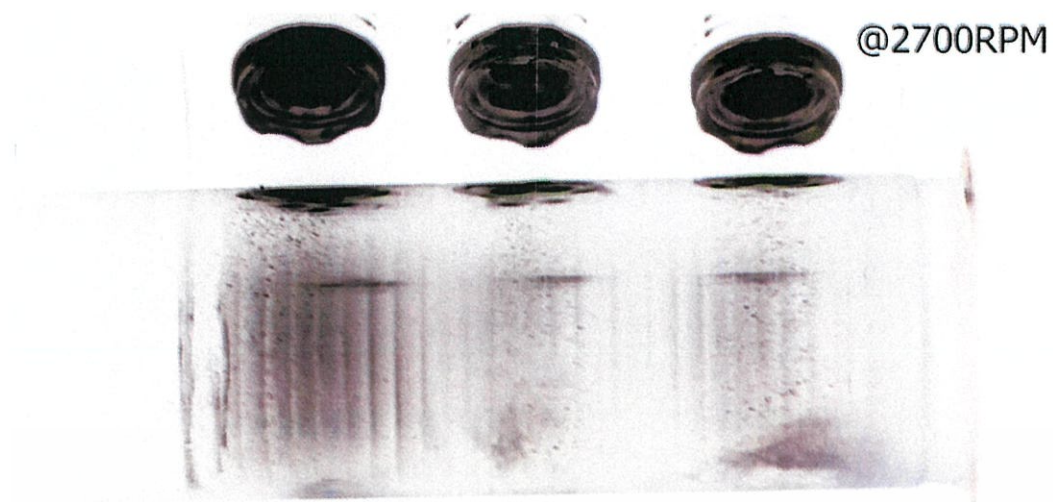
รูปที่ ก.5 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที



Flow Rate 45 l/min

รูปที่ ก.6 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 45 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Flow Rate 50 l/min

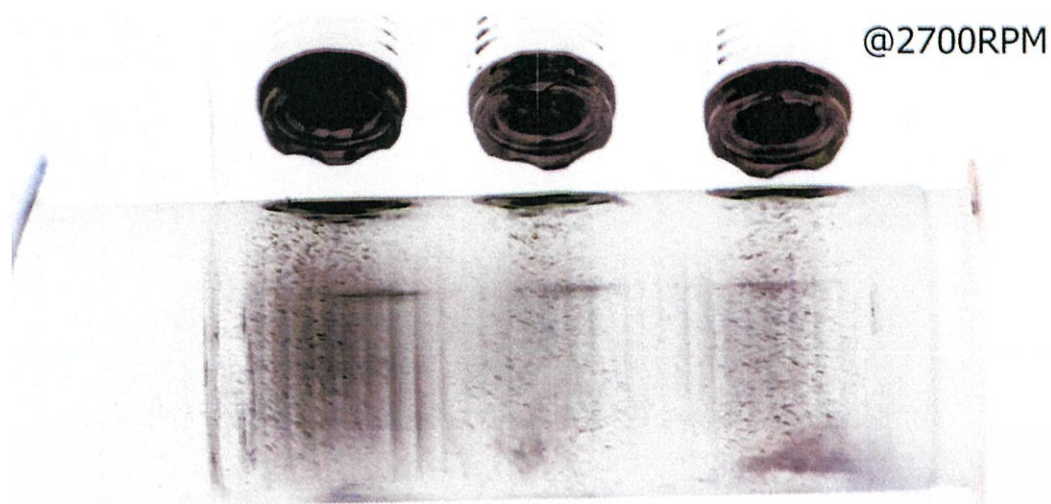
รูปที่ ก.7 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 50 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที



Flow Rate 55 l/min

รูปที่ ก.8 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 55 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Flow Rate 60 l/min

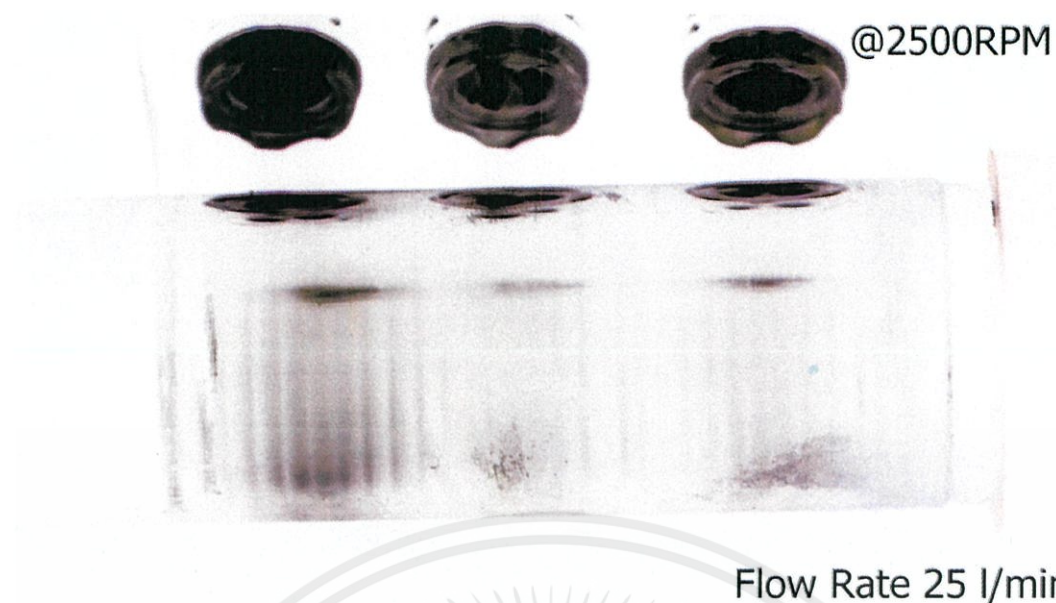
รูปที่ ก.9 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 60 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที



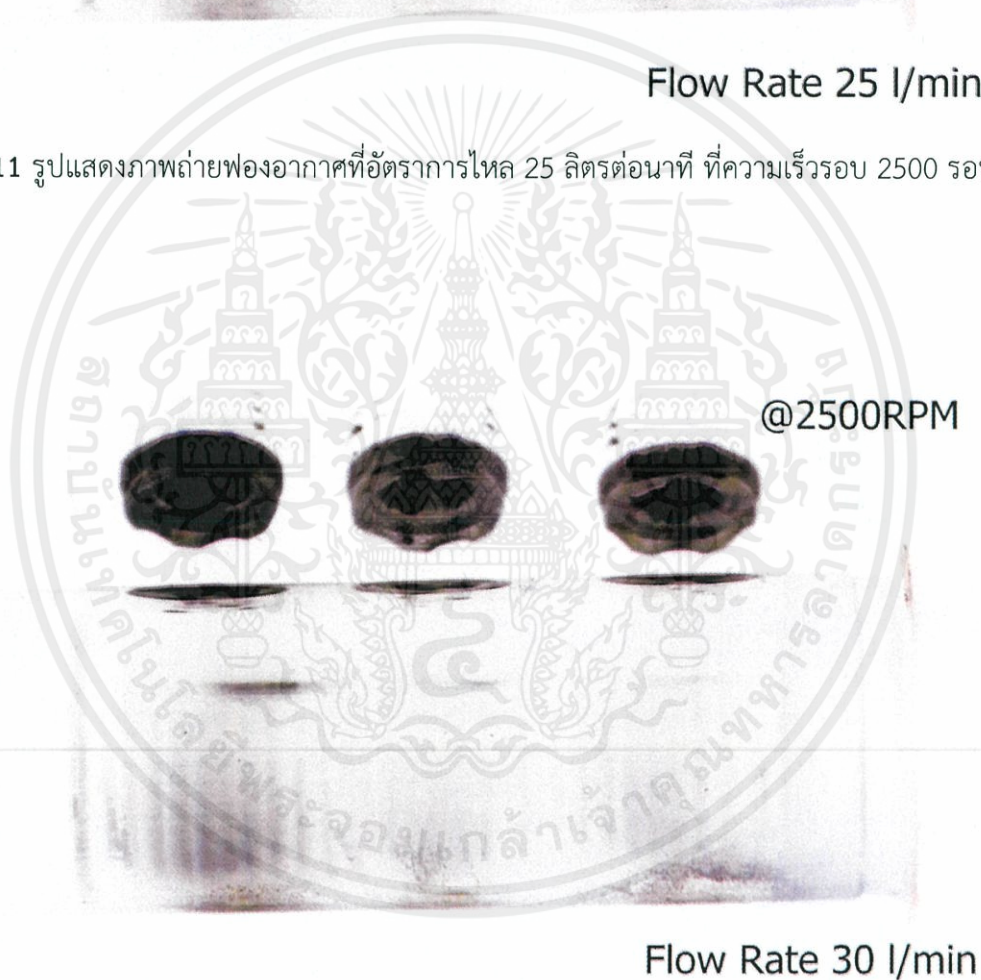
Flow Rate 20 l/min

รูปที่ ก.10 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 20 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

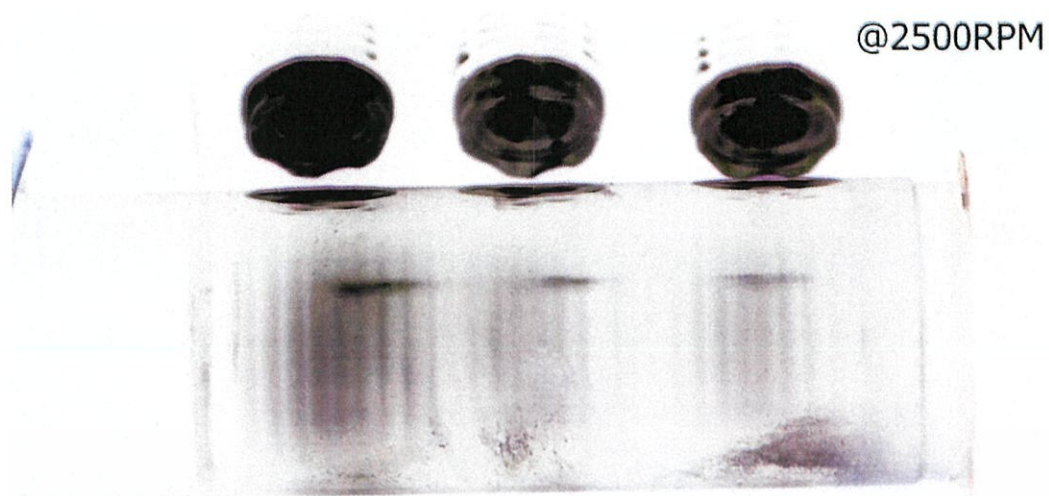


รูปที่ ก.11 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที



รูปที่ ก.12 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 30 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Flow Rate 35 l/min

รูปที่ ก.13 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 35 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

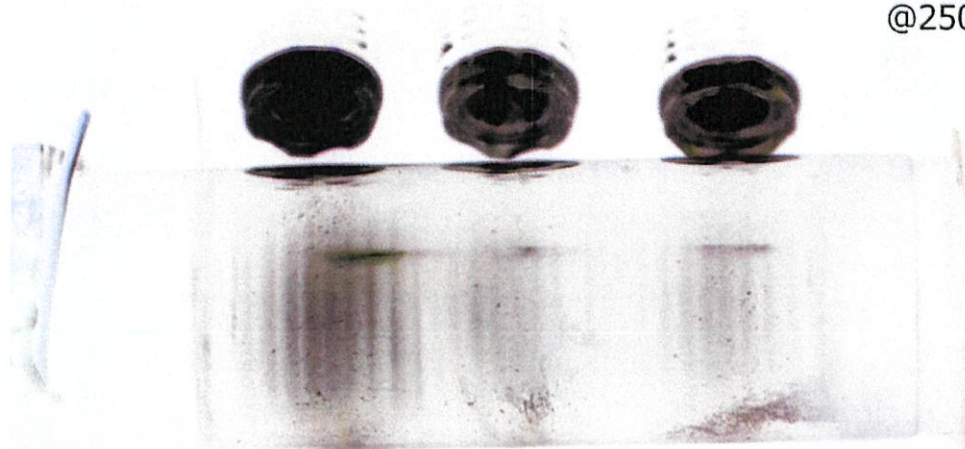


Flow Rate 40 l/min

รูปที่ ก.14 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 40 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

@2500RPM



Flow Rate 45 l/min

รูปที่ ก.15 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 45 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

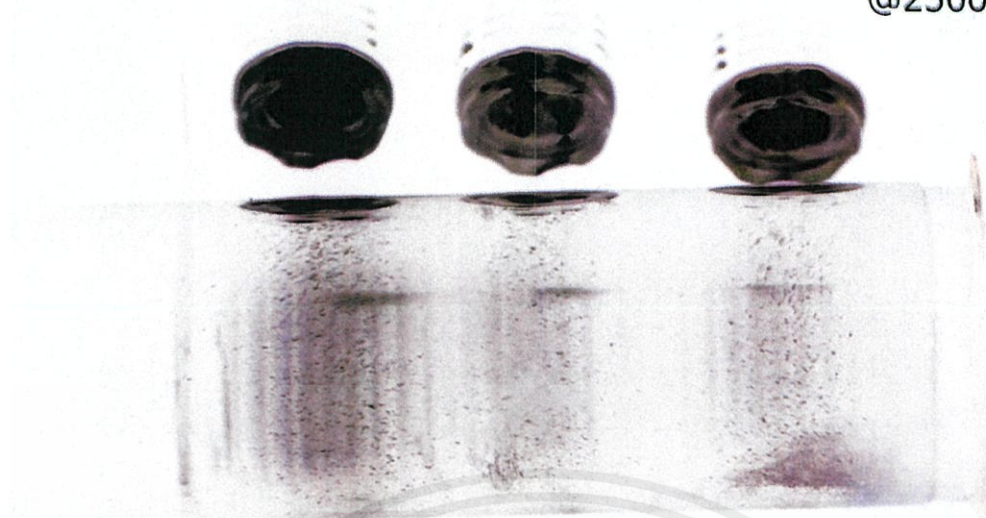
@2500RPM



Flow Rate 50 l/min

รูปที่ ก.16 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 50 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

@2500RPM



Flow Rate 55 l/min

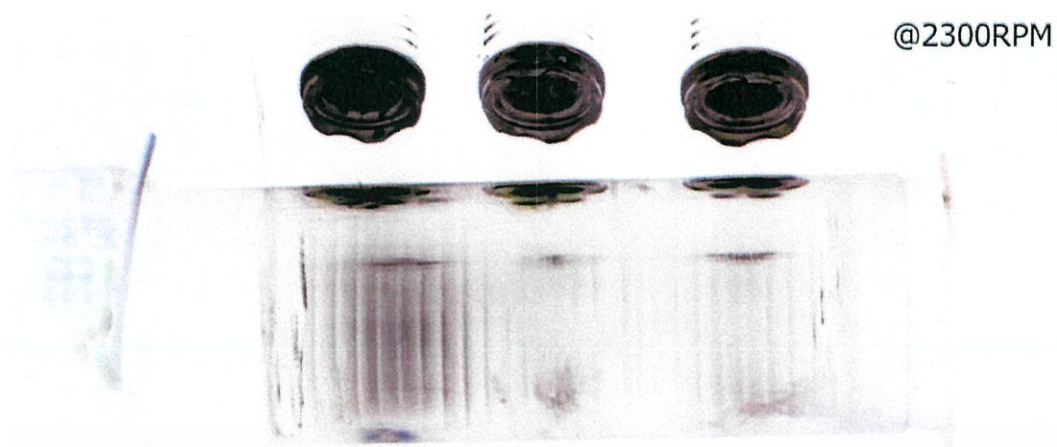
รูปที่ ก.17 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 55 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที

@2500RPM



Flow Rate 57 l/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ ก.18 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 57 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Flow Rate 20 l/min

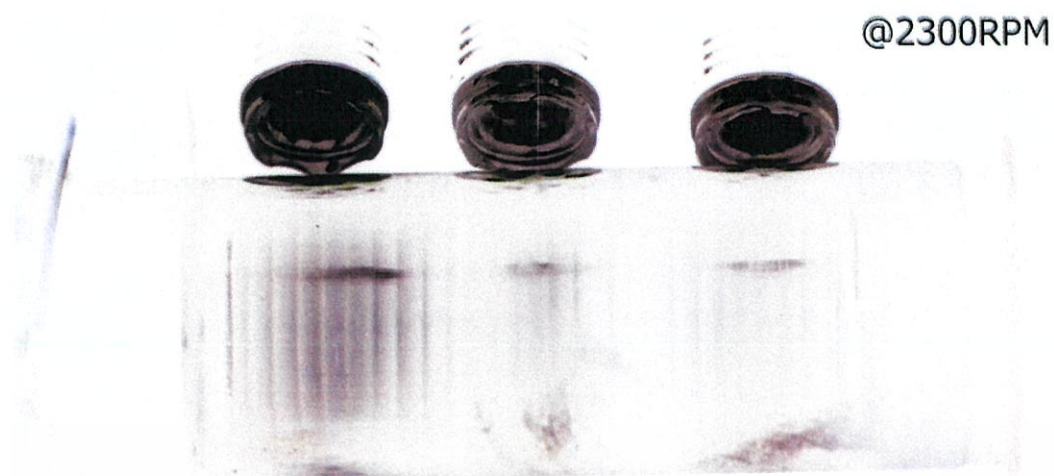
รูปที่ ก.19 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 20 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2300 รอบต่อนาที



Flow Rate 25 l/min

รูปที่ ก.20 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2300 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Flow Rate 30 l/min

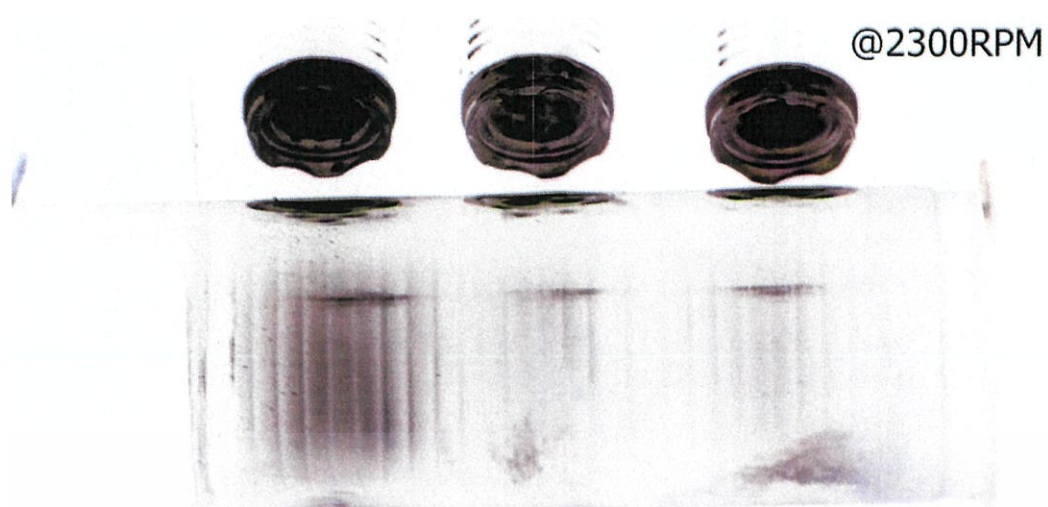
รูปที่ ก.21 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 30 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2300 รอบต่อนาที



Flow Rate 35 l/min

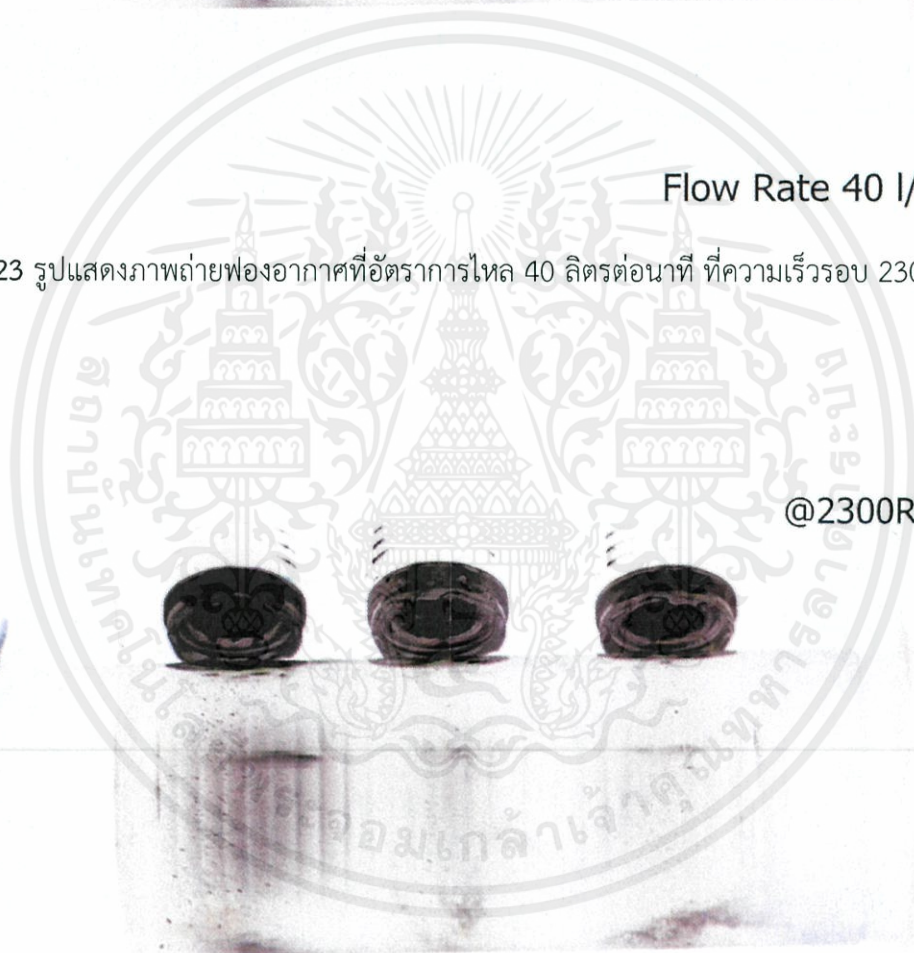
รูปที่ ก.22 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 35 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2300 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Flow Rate 40 l/min

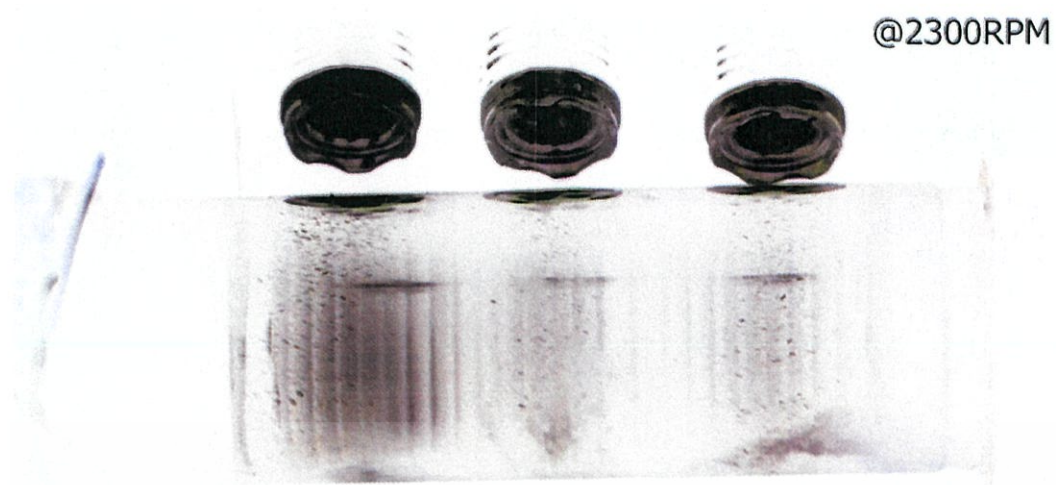
รูปที่ ก.23 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 40 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2300 รอบต่อนาที



@2300RPM

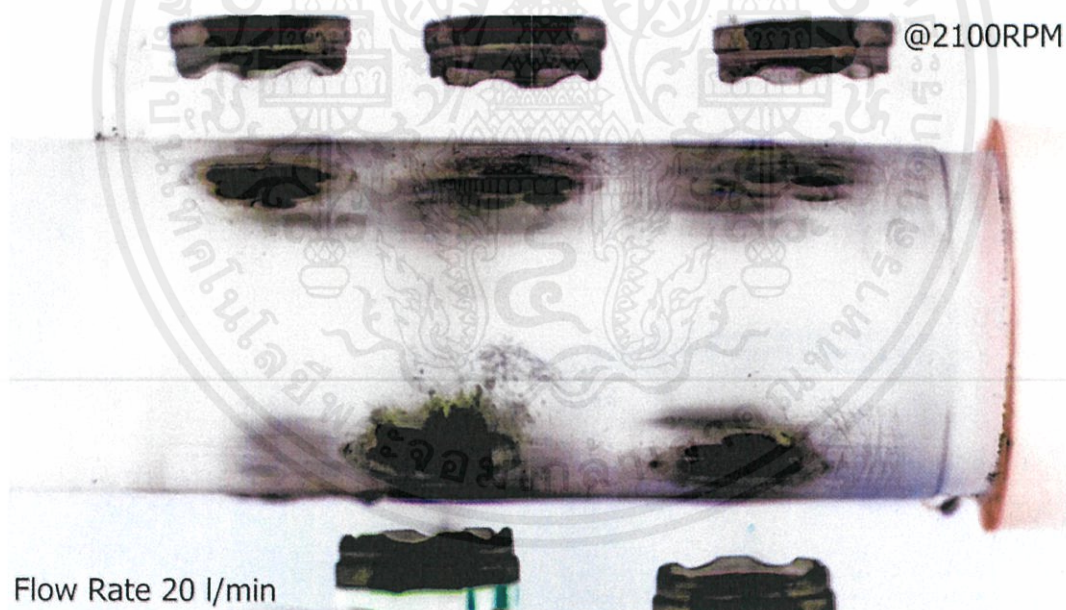
Flow Rate 45 l/min

รูปที่ ก.24 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 45 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2300 รอบต่อนาที เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



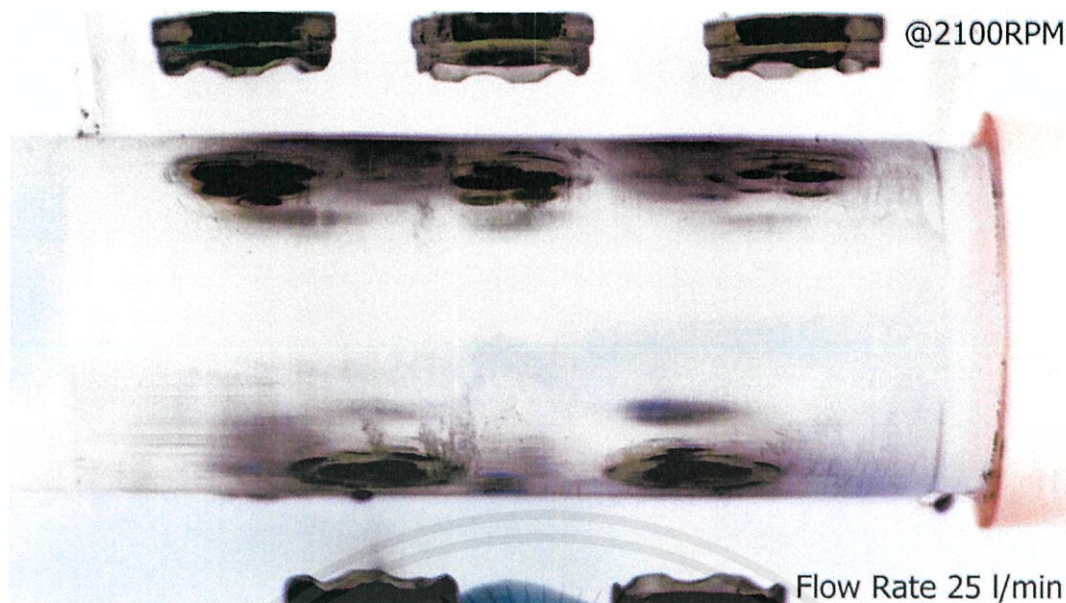
Flow Rate 50 l/min

รูปที่ ก.25 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 50 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2300 รอบต่อนาที



รูปที่ ก.26 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 20 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2100 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

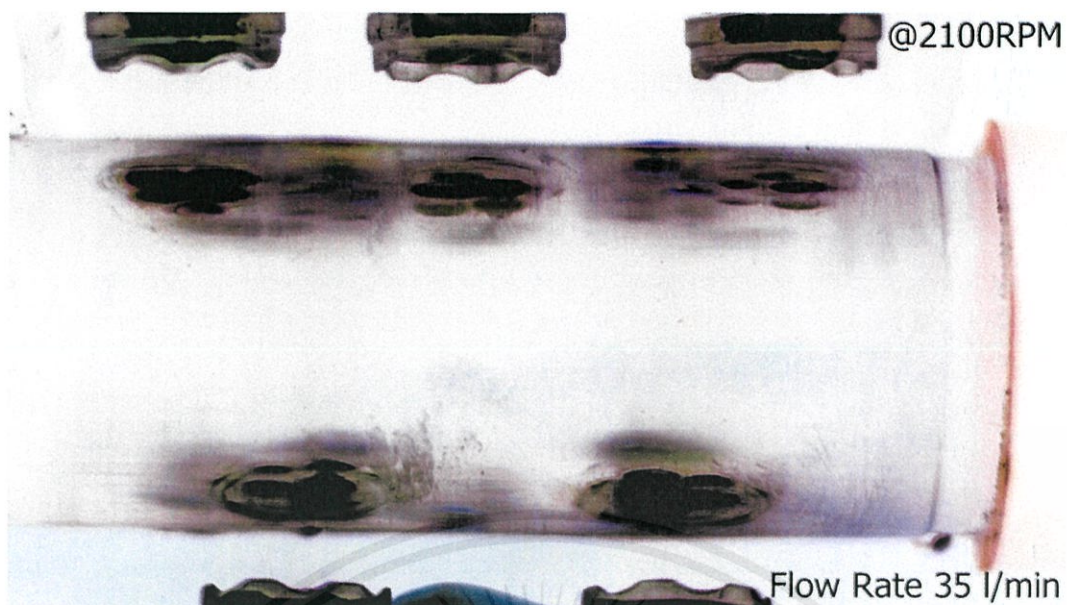


รูปที่ ก.27 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2100 รอบต่อนาที

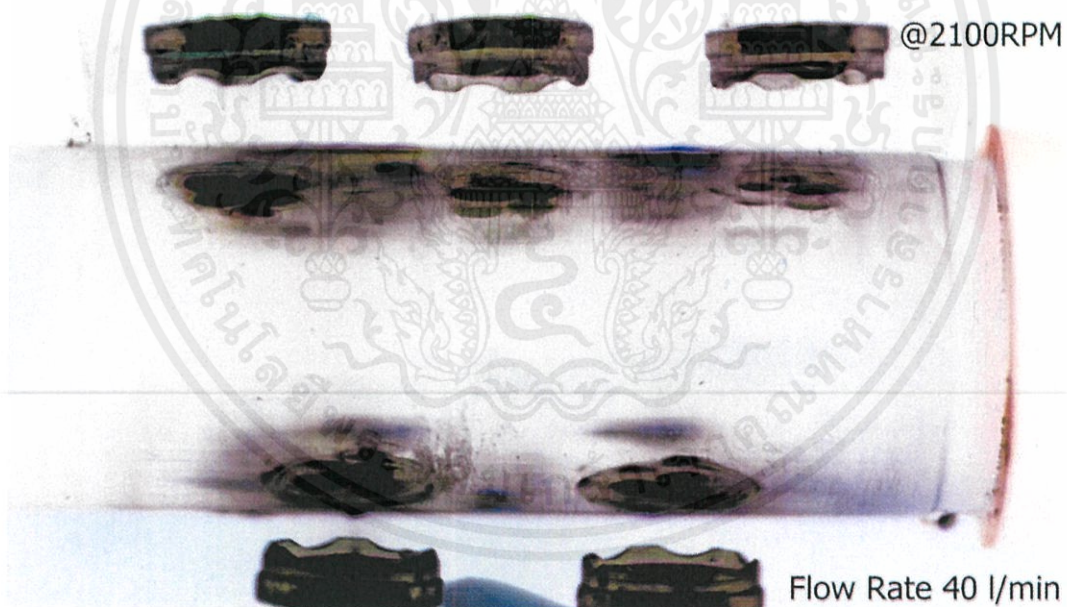


รูปที่ ก.28 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 30 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2100 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

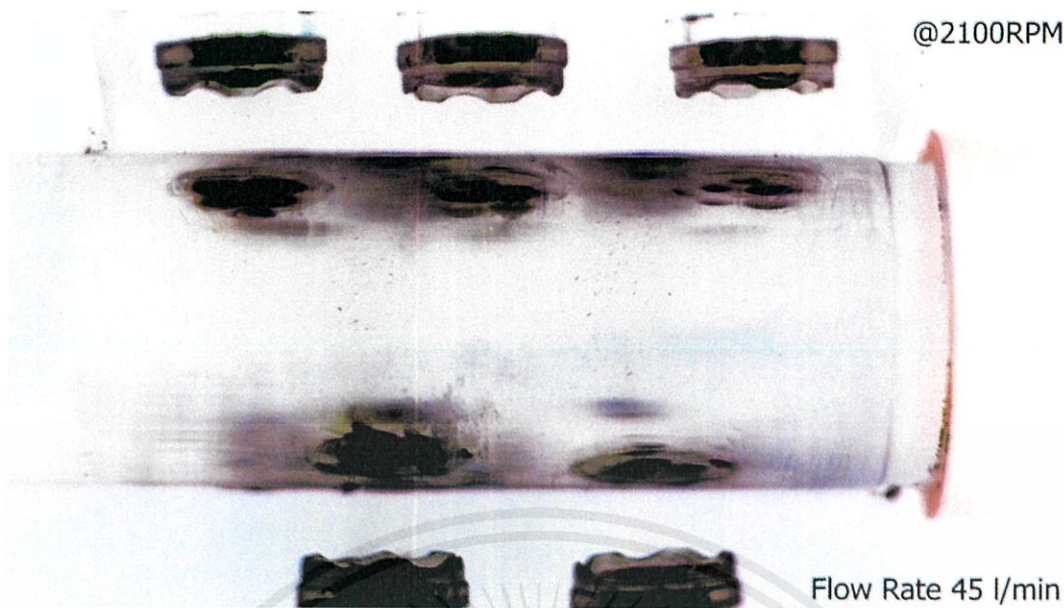


รูปที่ ก.29 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 35 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2100 รอบต่อนาที

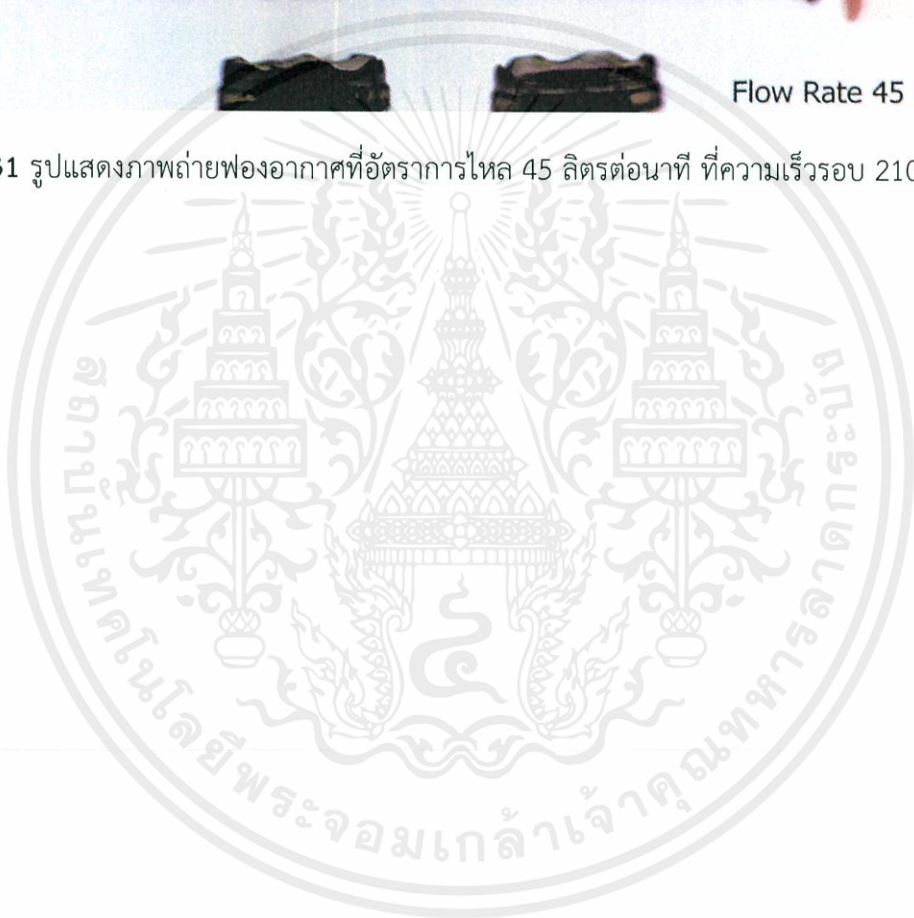


รูปที่ ก.30 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 40 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2100 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.31 รูปแสดงภาพถ่ายฟองอากาศที่อัตราการไหล 45 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2100 รอบต่อนาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

แสดงผลตารางค่าอนาล็อกในแต่ละอัตราการไหล ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 2700, 2500, 2300 และ 2100 รอบต่อนาที

Sample Size	Analog Value at 2700RPM								
	Flow Rate(l/min)								
	20	25	30	35	40	45	50	55	60
1	971.15	971.05	971.32	971.58	972.27	972.41	973.23	974.26	975.72
2	971.26	971.11	971.42	971.53	972.17	972.41	973.39	974.68	975.88
3	971.36	971.05	971.74	971.21	972.01	972.36	973.34	974.16	976.09
4	971.26	971.21	971.53	971.42	971.9	972.46	973.28	974.26	975.56
5	971.52	970.89	971.26	971.47	971.74	972.15	973.27	974.16	975.98
6	971.21	970.95	971.21	971.16	971.8	972.31	973.38	974.37	975.98
7	971.42	971.21	971.47	971.32	971.38	972.36	973.12	974.63	975.67
8	971.26	971.53	971.63	971.37	972.06	972.52	972.96	974.42	976.14
9	971.21	971.16	971.47	971.47	971.74	972.41	972.69	974.74	975.62
10	971.42	971.26	971.42	971.59	971.8	972.41	973.06	974.26	975.3
11	971.42	971.05	971.26	971.32	971.56	972.52	972.96	973.74	975.56
12	971.26	971.26	971.11	971.26	971.46	972.2	972.91	974.05	975.67
13	971.42	971.21	971.68	971.47	971.6	972.09	972.64	974.21	975.35
14	971.42	971.05	971.63	971.59	971.55	972.52	972.64	974.21	975.98
15	971.47	971.16	971.32	971.42	971.39	972.41	972.96	974.05	975.72
16	971.05	971.42	971.11	971.53	971.55	972.46	972.8	974.58	975.56
17	971.42	971.37	971.53	971.43	971.6	972.41	972.64	974.47	975.77
18	971.31	971.16	971.53	971.54	971.44	972.25	972.64	973.84	975.72
19	971.52	970.89	971.11	971.49	971.65	972.25	972.69	974.63	975.83
20	971.31	971	971.47	971.43	971.39	972.52	972.64	974.37	975.77
21	971.52	971.26	971.53	971.49	971.55	972.52	972.54	974.42	975.72
22	971.52	971.11	971.37	971.44	971.5	972.04	972.91	974.58	975.77
23	971.05	971.05	971.26	971.44	971.6	972.46	972.48	974.21	975.77
24	971.1	971.21	971.37	971.71	971.5	972.46	972.48	973.84	975.77
25	971.26	971.16	971.58	971.6	971.55	972.25	973.01	974.05	976.09
26	971.42	971.21	971.26	971.71	971.65	972.25	972.96	973.74	975.46

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าอนาล็อกในแต่ละอัตราการไหล ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 2700 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample Size	Analog Value at 2500RPM								
	Flow Rate(l/min)								
	20	25	30	35	40	45	50	55	57
1	971.22	971.45	971.66	971.32	971.57	972.35	973.23	974.01	975.34
2	971.27	971.55	971.6	971.79	971.36	972.35	973.39	973.7	974.81
3	971.01	971.29	971.55	971.37	971.67	972.35	973.34	973.7	975.24
4	970.85	970.87	971.76	971.37	971.73	972.09	973.28	974.12	975.08
5	970.95	971.29	971.45	971.58	971.62	971.93	973.27	973.7	975.03
6	970.95	971.08	971.55	971.42	971.67	971.88	973.38	974.01	975.29
7	971.22	971.4	971.55	971.74	971.46	971.88	973.12	974.12	975.45
8	971.64	970.97	971.76	971.63	971.83	971.77	972.96	974.01	974.71
9	971.53	971.45	971.39	971.63	971.57	971.62	972.69	974.01	974.87
10	971.32	971.29	971.39	971.42	971.78	971.88	973.06	974.17	974.66
11	971.53	971.29	971.03	971.42	971.62	971.67	972.96	973.86	974.71
12	971.37	971.34	971.66	971.58	971.62	971.98	972.91	973.86	974.66
13	971.11	971.34	971.08	971.47	971.46	972.25	972.64	974.07	974.97
14	971.53	970.97	971.5	971.21	971.52	971.98	972.64	973.7	975.13
15	971.48	971.19	971.45	971.53	971.36	972.09	972.96	973.65	974.76
16	971.11	971.03	971.34	971.58	971.52	972.51	972.8	973.75	974.97
17	971.69	971.08	971.08	971.21	971.78	972.35	972.64	973.54	975.03
18	971.53	971.4	971.18	971.47	971.62	972.41	972.64	973.86	974.92
19	971.11	970.97	971.76	971.11	971.55	972.09	972.69	973.91	974.81
20	971.58	971.24	971.39	971.63	971.46	972.09	972.64	973.75	974.76
21	971.37	971.24	971.29	971.68	971.44	972.19	972.54	973.38	974.66
22	971.69	971.29	971.29	971.63	971.55	972.04	972.91	973.8	974.6
23	971.43	971.34	971.55	971.47	971.6	972.35	972.48	973.49	974.55
24	971.64	971.55	971.39	971	971.71	972.19	972.48	973.86	974.87
25	971.48	971.29	971.03	971.21	971.6	972.3	973.01	973.38	974.87
26	971.43	971.34	971.13	971.58	971.71	972.14	972.96	973.7	974.55

ตารางที่ ข.2 แสดงค่าอนาล็อกในแต่ละอัตราการไหล ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 2500 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample Size	Analog Value at 2300RPM						
	Flow Rate(l/min)						
	20	25	30	35	40	45	50
1	971.35	971.35	971.39	971.45	971.39	971.54	972.71
2	971.4	971.4	971.18	971.5	971.18	971.76	972.61
3	971.4	971.4	971.45	971.5	971.49	971.76	972.4
4	971.14	971.14	971.5	971.24	971.55	971.49	972.29
5	971.29	971.29	971.39	971.39	971.44	971.76	972.08
6	971.19	971.19	971.34	971.29	971.49	971.49	972.71
7	971.4	971.4	971.39	971.5	971.28	971.39	972.45
8	971.14	971.14	971.18	971.24	971.65	971.39	972.29
9	971.29	971.29	971.29	971.39	971.39	971.49	972.45
10	971.08	971.08	971.29	971.18	971.6	971.49	972.29
11	971.35	971.35	971.34	971.45	971.44	971.7	972.08
12	971.4	971.4	971.24	971.5	971.44	971.76	972.5
13	971.29	971.29	971.18	971.39	971.28	971.76	972.71
14	971.24	971.24	971.39	971.34	971.34	971.49	972.61
15	971.29	971.29	971.18	971.39	971.18	971.91	972.5
16	971.08	971.08	971.45	971.18	971.34	971.49	972.4
17	971.29	971.29	971.45	971.29	971.6	971.76	972.4
18	971.19	971.19	971.18	971.29	971.44	971.81	972.45
19	971.29	971.45	971.4	971.34	971.37	971.6	972.45
20	971.14	971.5	971.14	971.24	971.28	971.54	972.45
21	971.08	971.5	971.29	971.18	971.26	971.39	972.71
22	971.29	971.24	971.08	971.39	971.37	971.6	972.29
23	971.08	971.39	971.35	971.18	971.42	971.6	972.29
24	971.35	971.29	971.4	971.45	971.53	971.65	972.14
25	971.29	971.5	971.29	971.45	971.42	971.81	971.98
26	971.08	971.24	971.24	971.18	971.53	971.76	972.19

ตารางที่ ข.3 แสดงค่าอนาล็อกในแต่ละอัตราการไหล ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 2300 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample Size	Analog Value at 2100RPM					
	Flow Rate(l/min)					
	20	25	30	35	40	45
1	971.23	971.33	971.39	971.39	971.62	971.48
2	971.18	971.27	971.44	971.44	971.46	971.69
3	971.23	971.27	971.33	971.33	971.51	971.8
4	971.02	971.33	971.28	971.28	971.19	971.69
5	971.23	971.32	971.33	971.33	971.57	971.8
6	971.13	971.01	971.12	971.12	971.62	971.48
7	971.23	971.33	971.23	971.23	971.62	971.59
8	971.08	971.01	971.23	971.23	971.56	971.9
9	971.02	971.12	971.28	971.28	971.51	971.48
10	971.23	971.33	971.18	971.18	971.51	971.69
11	971.02	971.01	971.12	971.12	971.41	971.74
12	971.29	971.12	971.33	971.33	971.46	971.74
13	971.23	971.43	971.12	971.12	971.3	971.67
14	971.02	971.17	971.39	971.39	971.3	971.48
15	971.31	971.33	971.39	971.39	971.62	971.74
16	971.41	971.24	971.12	971.12	971.25	971.59
17	971.15	971.29	971.47	971.47	971.35	971.59
18	971.15	971.35	971.41	971.41	971.62	971.69
19	971.15	971.24	971.41	971.41	971.51	971.74
20	971.31	971.35	971.47	971.47	971.3	971.58
21	971.26	971.33	970.99	970.99	971.3	971.48
22	971.05	971.29	971.05	971.05	971.3	971.64
23	971.31	971.29	971.47	971.47	971.35	971.74
24	971.15	971.29	971.15	971.15	971.46	971.59
25	971.15	971.29	971.26	971.26	971.51	971.59
26	971.2	971.19	971.47	971.47	971.19	971.74

ตารางที่ ข.4 แสดงค่าอนาล็อกในแต่ละอัตราการไหล ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 2100 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

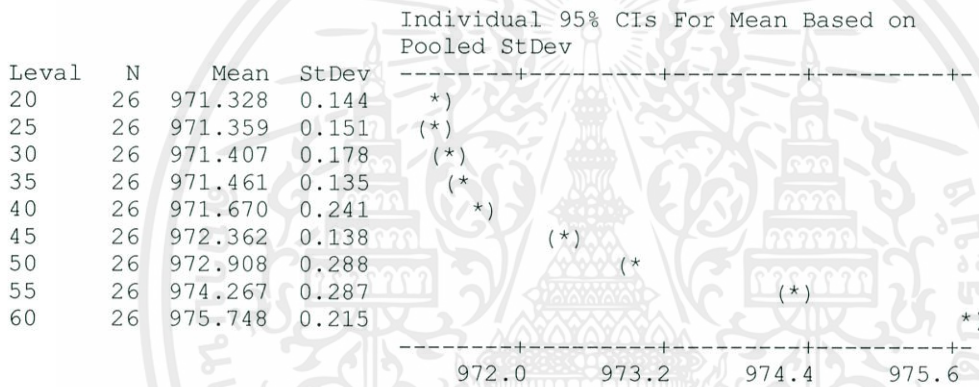
ภาคผนวก ค.

ผลการทดสอบเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยนาล็อก (ตัวแปรตาม) ในแต่ละอัตราการใช้ (ตัวแปรต้น) โดยใช้โปรแกรม Minitab 16 ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 2700, 2500, 2300 และ 2100 รอบต่อนาที

One-way ANOVA: at rotational speed of motor 2700rpm

Source	DF	SS	MS	F	P
C1	8	520.0189	65.0024	1530.04	0.000
Error	225	9.5589	0.0425		
Total	233	529.5779			

S = 0.2061 R-Sq = 98.19% R-Sq(adj) = 98.13%



Pooled StDev = 0.206

Grouping Information Using Tukey Method

C1	N	Mean	Grouping
60	26	975.7481	A
55	26	974.2665	B
50	26	972.9085	C
45	26	972.3619	D
40	26	971.6696	E
35	26	971.4612	F
30	26	971.4073	F
20	26	971.3285	F G
25	26	971.1535	G

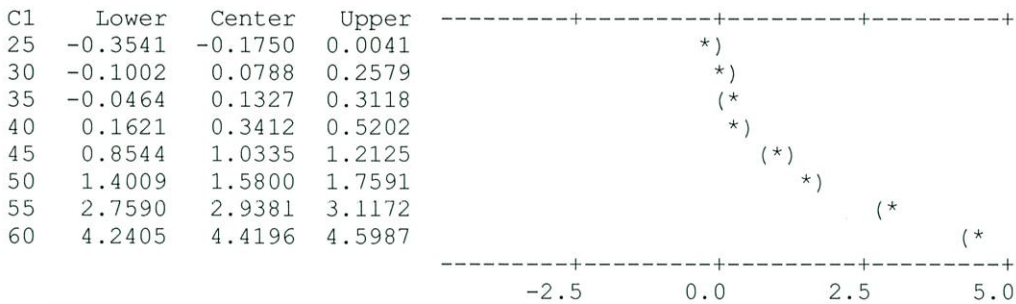
Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of C1

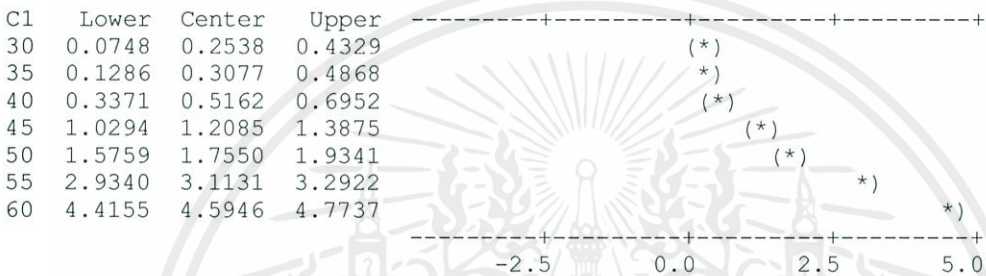
Individual confidence level = 99.80%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

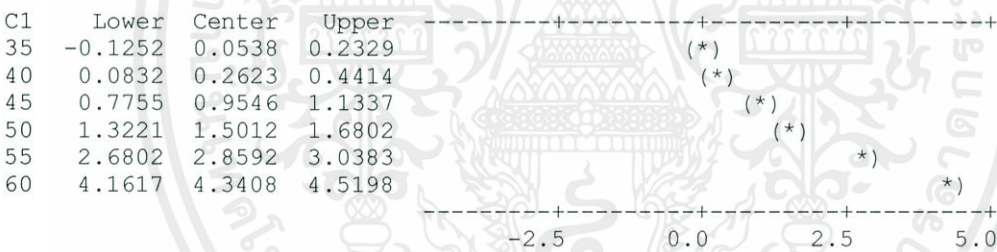
C1 = 20 subtracted from:



C1 = 25 subtracted from:



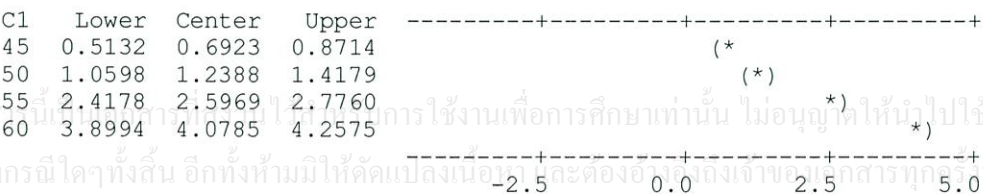
C1 = 30 subtracted from:



C1 = 35 subtracted from:



C1 = 40 subtracted from:



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C1 = 45 subtracted from:

C1	Lower	Center	Upper	
50	0.3675	0.5465	0.7256	(*)
55	1.7255	1.9046	2.0837	(*)
60	3.2071	3.3862	3.5652	(*)

C1 = 50 subtracted from:

C1	Lower	Center	Upper	
55	1.1790	1.3581	1.5372	*)
60	2.6605	2.8396	3.0187	*)

C1 = 55 subtracted from:

C1	Lower	Center	Upper	
60	1.3025	1.4815	1.6606	(*)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C3 = 25 subtracted from:

C3	Lower	Center	Upper	
30	-0.1098	0.0842	0.2782	(*)
35	-0.0621	0.1319	0.3259	(*)
40	0.0660	0.2600	0.4540	(*)
45	0.5795	0.7735	0.9674	(*)
50	1.3829	1.5769	1.7709	(*)
55	2.2864	2.4804	2.6744	(*)
57	3.3706	3.5646	3.7586	(*)

-2.0 0.0 2.0 4.0

C3 = 30 subtracted from:

C3	Lower	Center	Upper	
35	-0.1463	0.0477	0.2417	(*)
40	-0.0182	0.1758	0.3698	(*)
45	0.4952	0.6892	0.8832	(*)
50	1.2987	1.4927	1.6867	(*)
55	2.2022	2.3962	2.5901	(*)
57	3.2864	3.4804	3.6744	(*)

-2.0 0.0 2.0 4.0

C3 = 35 subtracted from:

C3	Lower	Center	Upper	
40	-0.0659	0.1281	0.3221	(*)
45	0.4476	0.6415	0.8355	(*)
50	1.2510	1.4450	1.6390	(*)
55	2.1545	2.3485	2.5424	(*)
57	3.2387	3.4327	3.6267	(*)

-2.0 0.0 2.0 4.0

C3 = 40 subtracted from:

C3	Lower	Center	Upper	
45	0.3195	0.5135	0.7074	(*)
50	1.1229	1.3169	1.5109	(*)
55	2.0264	2.2204	2.4144	(*)
57	3.1106	3.3046	3.4986	(*)

-2.0 0.0 2.0 4.0

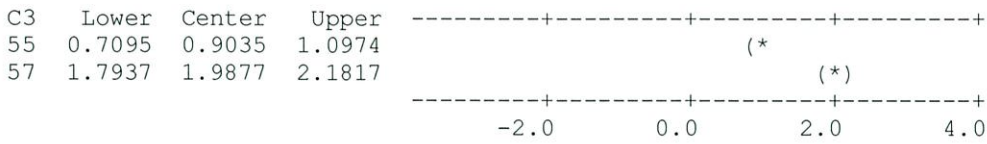
C3 = 45 subtracted from:

C3	Lower	Center	Upper	
50	0.6095	0.8035	0.9974	(*)
55	1.5129	1.7069	1.9009	(*)
57	2.5972	2.7912	2.9851	(*)

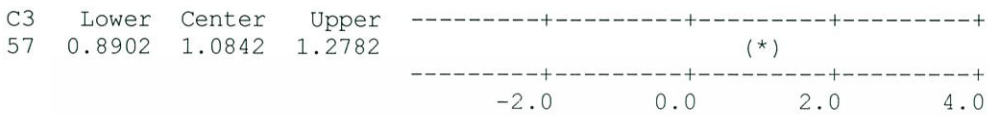
-2.0 0.0 2.0 4.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C3 = 50 subtracted from:



C3 = 55 subtracted from:



One-way ANOVA: at rotational speed of motor 2300rpm

Source	DF	SS	MS	F	P
C5	6	25.9035	4.3173	224.44	0.000
Error	175	3.3662	0.0192		
Total	181	29.2697			

S = 0.1387 R-Sq = 88.50% R-Sq(adj) = 88.11%

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev
20	26	971.247	0.113	(-*)
25	26	971.305	0.123	(-*)
30	26	971.308	0.113	(-*)
35	26	971.343	0.115	(-*)
40	26	971.412	0.125	(-*)
45	26	971.592	0.152	(-*)
50	26	972.401	0.206	(-*)

971.25 971.60 971.95 972.30

Pooled StDev = 0.139

Grouping Information Using Tukey Method

C5	N	Mean	Grouping
50	26	972.4012	A
45	26	971.6227	B
40	26	971.4115	C
35	26	971.3431	C D
30	26	971.3077	C D
25	26	971.3046	C D
20	26	971.2465	D

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of C5

Individual confidence level = 99.67%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C5 = 20 subtracted from:

C5	Lower	Center	Upper	
25	-0.0567	0.0581	0.1729	(-*)
30	-0.0536	0.0612	0.1759	(-* -)
35	-0.0182	0.0965	0.2113	(*-)
40	0.0502	0.1650	0.2798	(*-)
45	0.2614	0.3762	0.4909	(*-)
50	1.0398	1.1546	1.2694	(*-)

-0.70 0.00 0.70 1.40

C5 = 25 subtracted from:

C5	Lower	Center	Upper	
30	-0.1117	0.0031	0.1179	(-* -)
35	-0.0763	0.0385	0.1532	(*-)
40	-0.0079	0.1069	0.2217	(*-)
45	0.2033	0.3181	0.4329	(*-)
50	0.9818	1.0965	1.2113	(*-)

-0.70 0.00 0.70 1.40

C5 = 30 subtracted from:

C5	Lower	Center	Upper	
35	-0.0794	0.0354	0.1502	(*-)
40	-0.0109	0.1038	0.2186	(*-)
45	0.2002	0.3150	0.4298	(*-)
50	0.9787	1.0935	1.2082	(*-)

-0.70 0.00 0.70 1.40

C5 = 35 subtracted from:

C5	Lower	Center	Upper	
40	-0.0463	0.0685	0.1832	(-* -)
45	0.1648	0.2796	0.3944	(-* -)
50	0.9433	1.0581	1.1729	(-* -)

-0.70 0.00 0.70 1.40

C5 = 40 subtracted from:

C5	Lower	Center	Upper	
45	0.0964	0.2112	0.3259	(-* -)
50	0.8748	0.9896	1.1044	(-* -)

-0.70 0.00 0.70 1.40

C5 = 45 subtracted from:

C5	Lower	Center	Upper	
50	0.6637	0.7785	0.8932	(-* -)

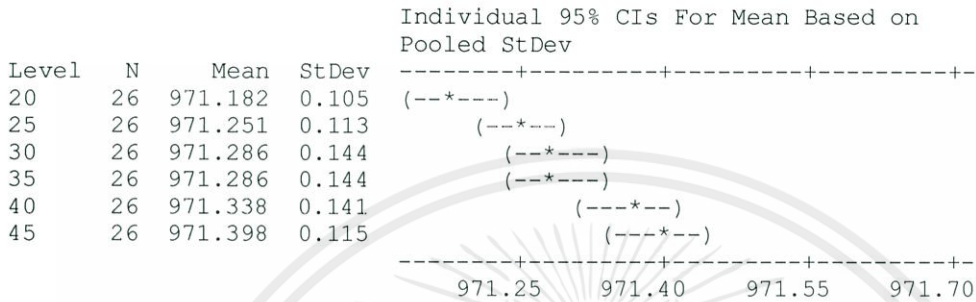
-0.70 0.00 0.70 1.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกร ใช้งานเพื่อการศึกษ ใ้เท่านั้น ไม่ใ้เผยแพร่ใ้บุคคลใ้ช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใ้ใดๆทั้งสั น อื่กทั้งห้ามมิใ้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใ้

One-way ANOVA: at rotational speed of motor 2100rpm

Source	DF	SS	MS	F	P
C7	5	3.7671	0.7534	45.99	0.000
Error	150	2.4573	0.0164		
Total	155	6.2244			

S = 0.1280 R-Sq = 60.52% R-Sq(adj) = 59.21%



Pooled StDev = 0.128

Grouping Information Using Tukey Method

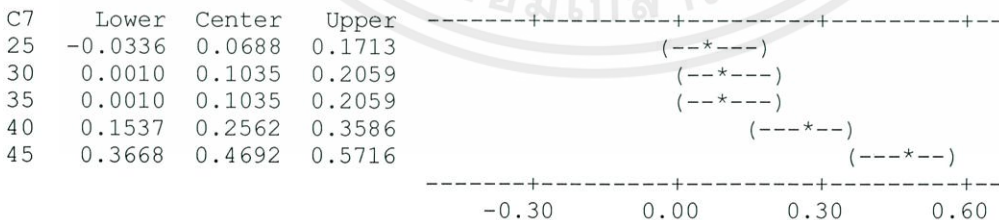
C7	N	Mean	Grouping
45	26	971.3982	A B
40	26	971.3384	B
35	26	971.2858	B C
30	26	971.2858	C
25	26	971.2512	C D
20	26	971.1823	D

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of C7

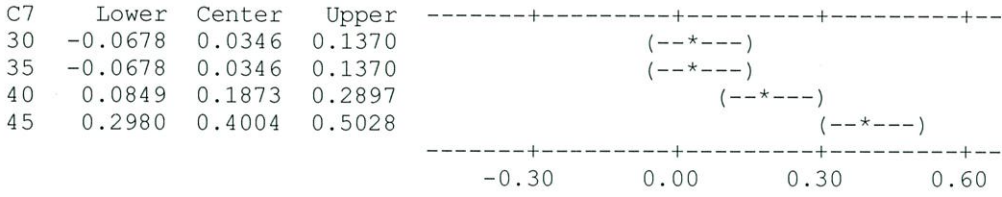
Individual confidence level = 99.55%

C7 = 20 subtracted from:



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

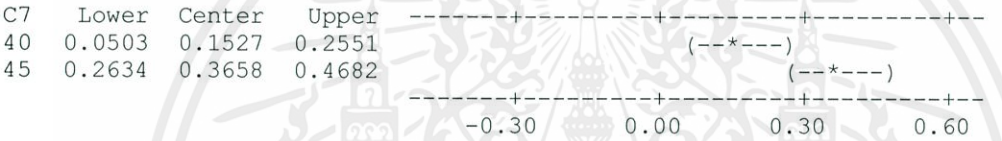
C7 = 25 subtracted from:



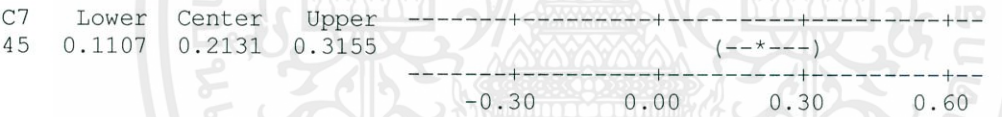
C7 = 30 subtracted from:



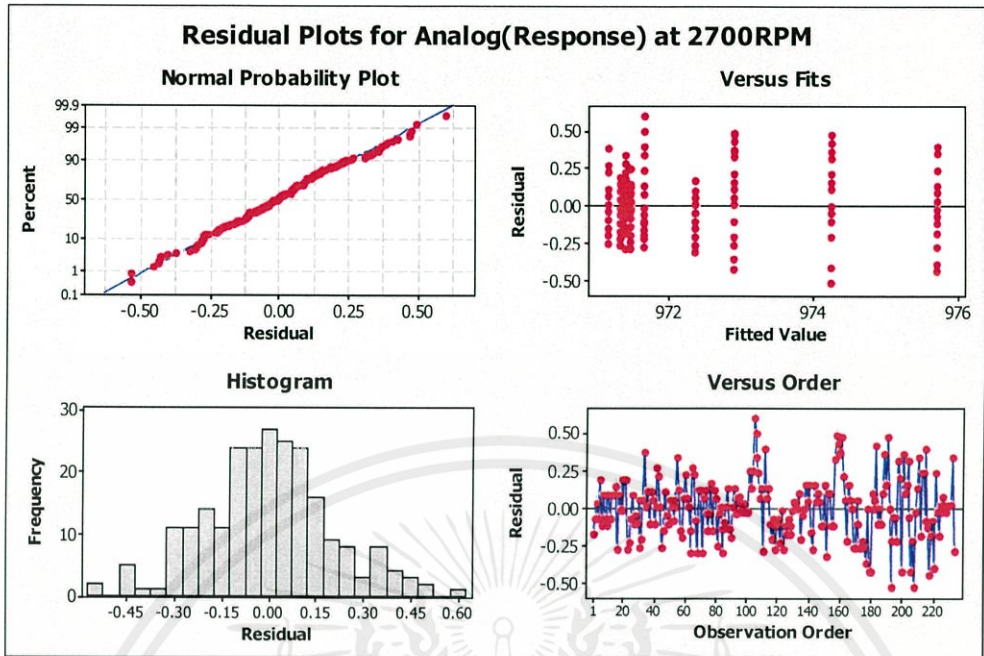
C7 = 35 subtracted from:



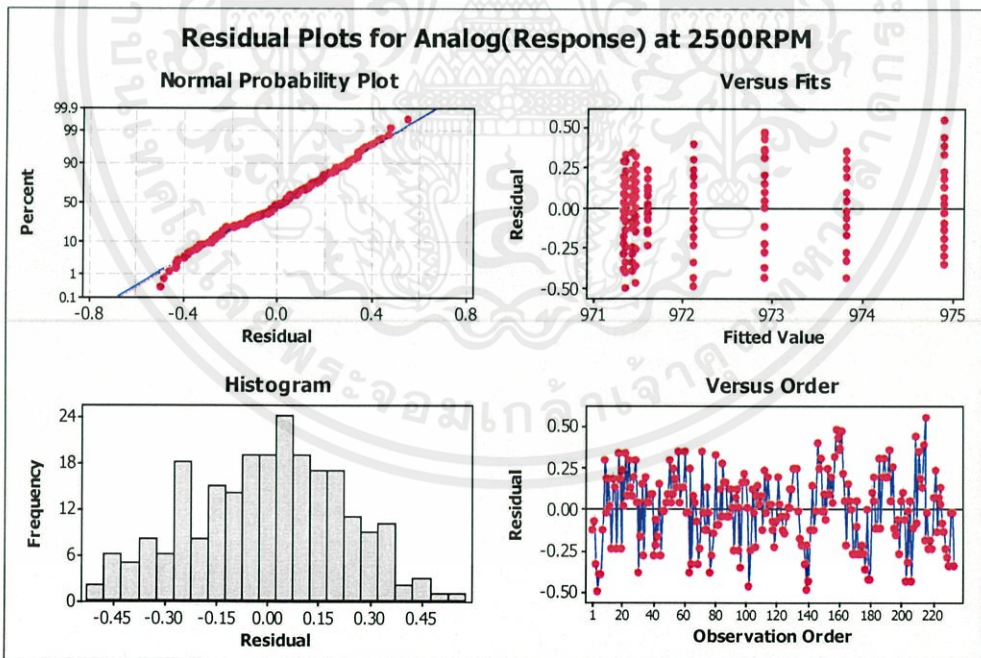
C7 = 40 subtracted from:



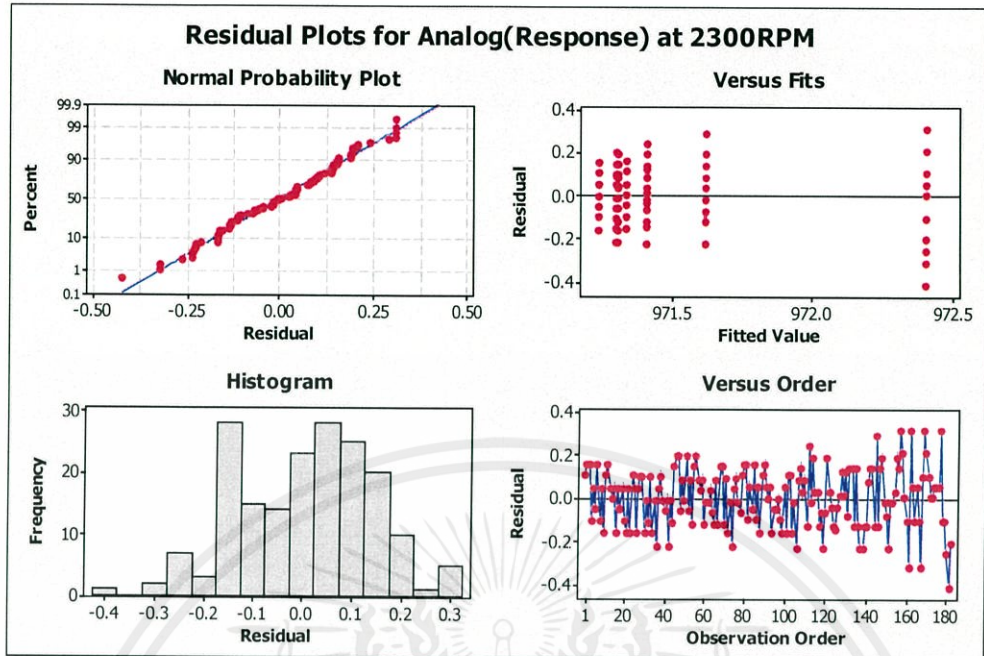
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



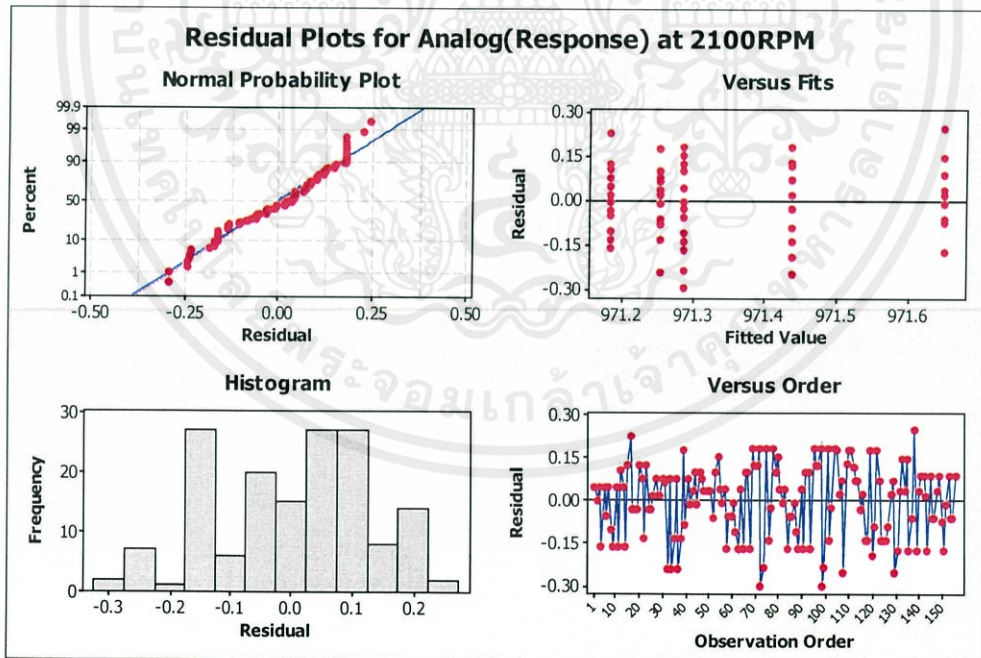
รูปที่ ค.1 แสดงกราฟ Normal plot of residuals, Histogram, Residual versus order และกราฟ Residual versus fitted value ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 2700 รอบต่อนาที



รูปที่ ค.2 แสดงกราฟ Normal plot of residuals, Histogram, Residual versus order และกราฟ Residual versus fitted value ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 2500 รอบต่อนาที เค้าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.3 แสดงกราฟ Normal plot of residuals, Histogram, Residual versus order และกราฟ Residual versus fitted value ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 2300 รอบต่อนาที



รูปที่ ค.4 แสดงกราฟ Normal plot of residuals, Histogram, Residual versus order และกราฟ Residual versus fitted value ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 2100 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ไว้บนเว็บไซต์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

1.) บทนำ

โครงการนี้เป็นโครงการที่ออกแบบและสร้างชุดทดลองการศึกษาปรากฏการณ์ควิตซ์ในปั๊ม หอยโข่ง ปรากฏการณ์ควิตซ์เป็นปรากฏการณ์อันไม่พึงประสงค์ เมื่อเกิดควิตซ์ขึ้นในปั๊มจะทำให้เกิดผลเสียอย่างมาก เช่น ก่อให้เกิดเสียงดัง, การสั่นสะเทือน และความเสียหายอย่างมากต่อใบพัดปั๊ม เพื่อหาแนวทางการแก้ปัญหาควิตซ์ในปั๊มจำเป็นต้องมีการทดลองเพื่อที่จะศึกษาปรากฏการณ์ [หมายเหตุ] คู่มือการใช้ชุดทดลองนี้ได้บรรจุข้อมูลที่จำเป็น เช่น ข้อมูลจำเพาะของปั๊ม ข้อมูลของระบบท่อ และ ข้อมูลการใช้งานชุดทดลอง กรุณาเก็บคู่มือการใช้ชุดทดลองนี้ไว้ในที่ที่เหมาะสม เพื่อใช้ประกอบในการใช้งานและการบำรุงรักษา

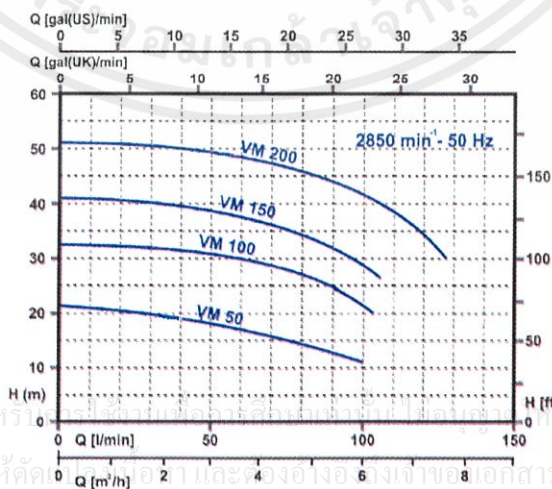
2.) รายละเอียดชุดทดลอง

ปั๊ม (pump)

ตารางที่ ง.1 แสดงรายชื่อข้อมูลของปั๊มน้ำ

Brand	Venz
Model	VM 50
Pump speed	2850 RPM
Ultimate pressure	3 bar
Connection	Inlet 1" outlet 1"
Motor	0.37 kW , 0.5 HP
NPSHr	3.5 m

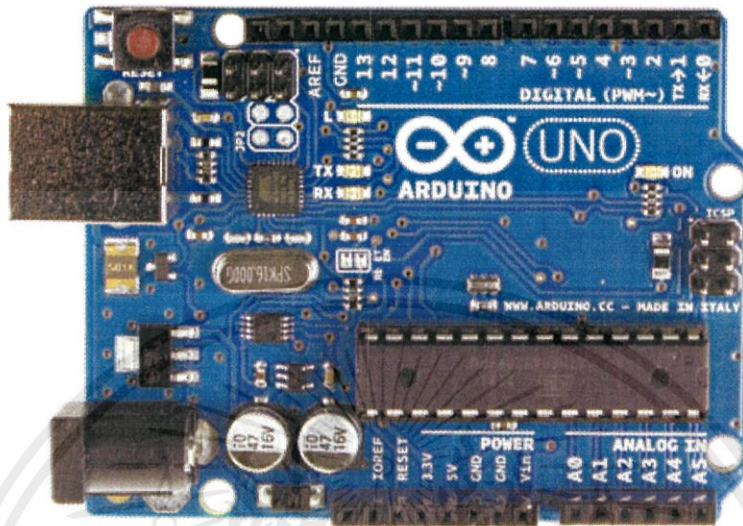
Pump performance curve



รูปที่ ง.1 แสดง Performance curve ของปั๊มยี่ห้อ Venz

2.1) เครื่องตรวจจับฟองอากาศ

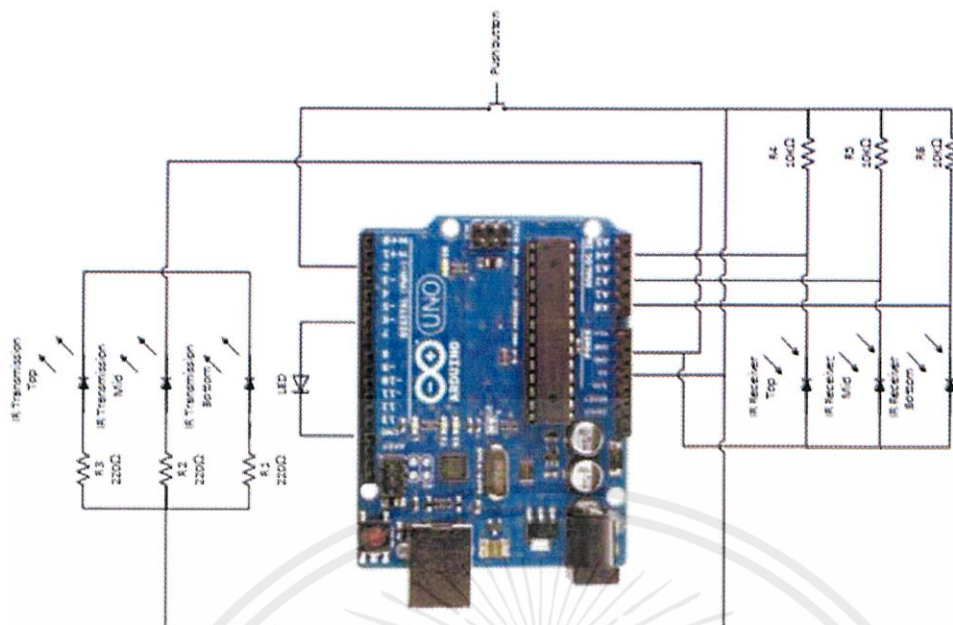
รายละเอียดชุดไมโครคอนโทรลเลอร์สำเร็จรูป Arduino UNO R3 วงจรการต่ออุปกรณ์ของเครื่องตรวจจับฟองอากาศ



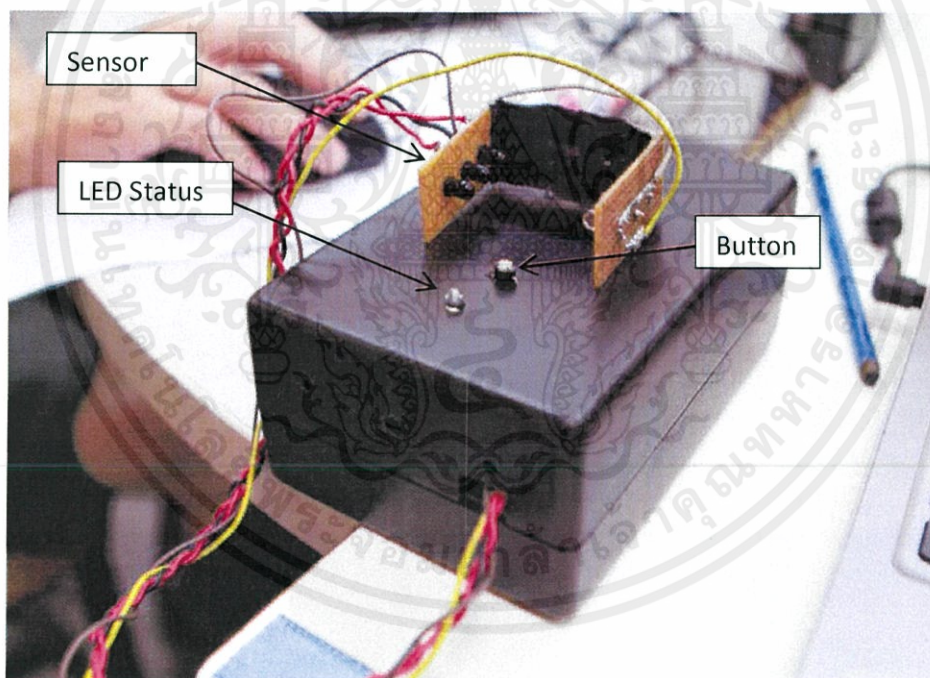
รูปที่ ง.2 แสดงชุดไมโครคอนโทรลเลอร์สำเร็จรูป Arduino UNO R3

Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 kB (ATmega328) of which 0.5 kB used by bootloader
SRAM	2 kB (ATmega328)
EEPROM	1 kB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.3 แสดงการต่ออุปกรณ์เครื่องตรวจจับฟองอากาศ



รูปที่ ง.4 แสดงการต่ออุปกรณ์เครื่องตรวจจับฟองอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดโปรแกรมที่เขียนในวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

```
//const int IRb=A5; //น้ำตาล
const int IRm=A3; //ดำ
//const int IRt=A0; //แดง
const int Led=12;
const int buttonpin=2;
int alarm_state=0;
int cal_state=9;
//float val_IRb=0;
float val_IRm=0;
//float val_IRt=0;
int buttonstate=LOW;
//float sum_IRb=0;
float sum_IRm=0;
//float sum_IRt=0;
//float mean_IRb=0.00;
float mean_IRm=0.00;
//float mean_IRt=0.00;
//float mean_sum=0.00;

void setup() {
  //pinMode(IRb,INPUT);
  pinMode(IRm,INPUT);
  //pinMode(IRt,INPUT);
  pinMode(Led,OUTPUT);
  pinMode(buttonpin,INPUT);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  เอกสาร buttonstate=digitalRead(buttonpin); เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
  ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม (if(buttonstate==HIGH) ให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
  {
```

```

cal_state=0;
}
if(alarm_state==1)
{
digitalWrite(Led,HIGH); //set LED on
cal_state=9; // stop calculate
buttonstate=LOW;
buttonstate = digitalRead(buttonpin); //state calculate
    if(buttonstate==HIGH)
    {
alarm_state=0;
digitalWrite(Led,LOW); //set LED off
cal_state=0;
    }
}
for(int i=1 ; i<=10 ; i++)
{
//val_IRb=analogRead(IRb);
val_IRm=analogRead(IRm);
// val_IRt=analogRead(IRt);
// Serial.println(val_IRb);
Serial.println(val_IRm);
//Serial.println(val_IRt);
//sum_IRb=sum_IRb+val_IRb;
sum_IRm=sum_IRm+val_IRm;
//sum_IRt=sum_IRt+val_IRt;
}
int i=10;
if(i==10)
{
//mean_IRb=sum_IRb/i;
mean_IRm=sum_IRm/i;
//mean_IRt=sum_IRt/i;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม กรุณาแจ้งผู้ถือลิขสิทธิ์เพื่อเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

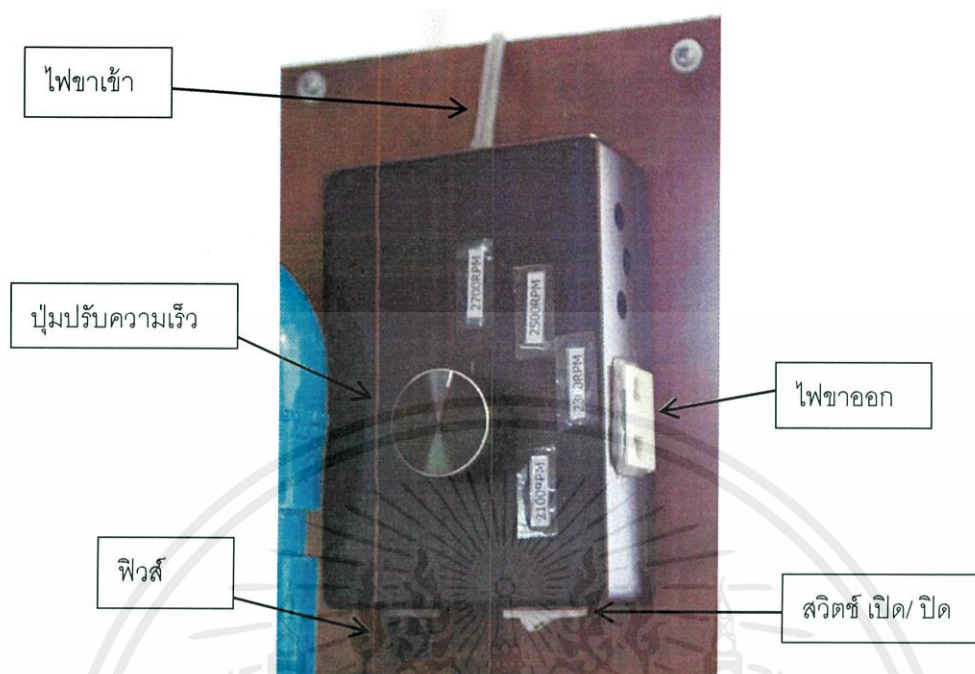
    //Serial.println(mean_IRb);
    Serial.println(mean_IRm);
  }
  //i=3;
  //mean_sum=(mean_IRb+mean_IRm+mean_IRt)/i;
  //Serial.print("mean_sum:");
  //Serial.println(mean_sum);
  if(mean_IRm >972) {
    alarm_state=1;
  }
  //sum_IRb=0;
  sum_IRm=0;
  //sum_IRt=0;
  //mean_IRb=0.00;
  mean_IRm=0.00;
  //mean_IRt=0.00;
  //mean_sum=0.00;
}

```

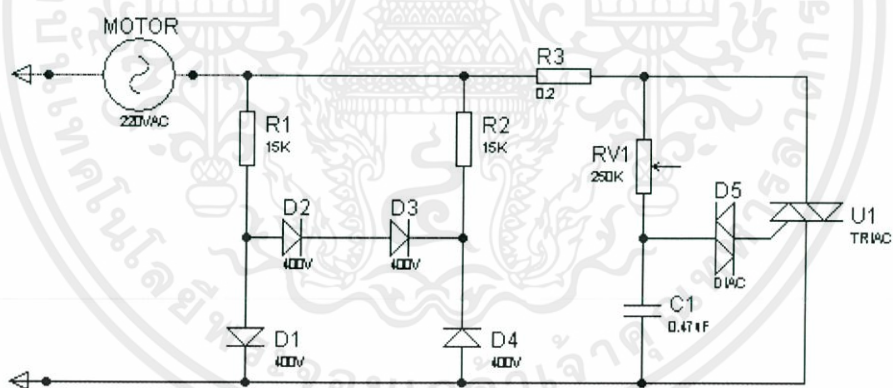


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2) อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์



รูปที่ ๓.5 แสดงอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์



รูปที่ ๓.6 วงจรไฟฟ้าอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์

ตัวต้านทาน $15K\Omega \pm 5\%$ 1/4W	2 ตัว
ตัวต้านทานเซรามิค 0.2Ω 4W	1 ตัว
ตัวต้านทานปรับค่าได้ 250 k Ω	1 ตัว
ไดโอด 400 V	4 ตัว
DIAC DB4	1 ตัว
TRIAC	1 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเอกสารนี้หา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.) ขั้นตอนการทดลอง

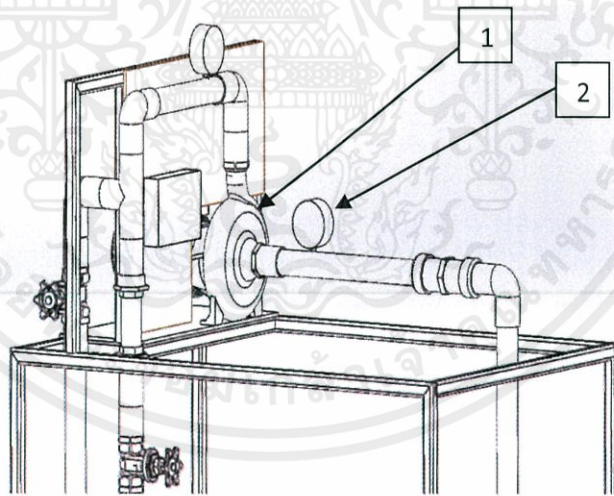


ระวัง ผู้ทดลองควรอ่านขั้นตอนในการทำการทดลองอย่างละเอียด และปฏิบัติตามอย่างเคร่งครัด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอุบัติเหตุ



ระวัง การล่อน้ำ ก่อนทำการทดลองหากไม่มีน้ำอยู่ในระบบท่อ ผู้ทำการทดลองต้องทำการล่อน้ำ หรือการใส่น้ำเข้าไปในระบบท่อเพื่อให้ปั๊มสามารถเดินเครื่องได้

- 1) เปิดช่องไล่อากาศที่ด้านบนของตัวปั๊ม (จุดที่ 1)
- 2) ถอดเกจวัดความดันของท่อด้านตุ่ดออก (จุดที่ 2)
- 3) ทำการกรอกน้ำเข้าไปในท่อที่ใช้ติดตั้งเกจวัดความดันของท่อด้านตุ่ด อย่างช้าๆ จนมีน้ำล้นออกทางช่องไล่อากาศที่ด้านบนของตัวปั๊ม
- 4) ปิดช่องไล่อากาศที่ด้านบนของตัวปั๊มให้สนิท
- 5) กรอกน้ำเพิ่มในท่อที่ใช้ติดตั้งเกจวัดความดันของท่อด้านตุ่ดจนน้ำระดับน้ำในรูกรอกน้ำขึ้นสูงเท่าระดับขอบท่อ
- 6) นำเกจวัดความดันของท่อด้านตุ่ดมาติดตั้งอีกครั้ง
- 7) นำดินน้ำมันมาปิดบริเวณขอบท่อกับเกจวัดความดัน เพื่อป้องกันการรั่วไหล

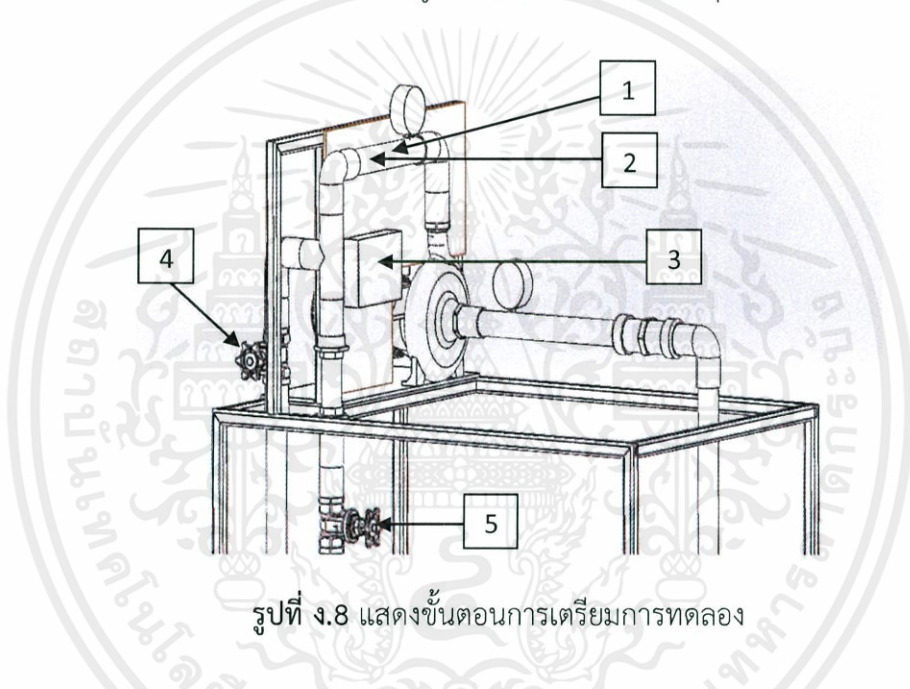


รูปที่ ง.7 แสดงอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องข้องในการล่อน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 เตรียมการทดลอง

- 1) นำชุดไฟฉายมาติดตั้งที่ท่ออะคริลิกใสทางด้านจ่ายของปั๊ม (จุดที่ 1)
- 2) นำเซนเซอร์ของเครื่องตรวจจับการเกิดควิเตชันมาติดตั้งที่ท่ออะคริลิกใสทางด้านจ่ายของปั๊มต่อเครื่องตรวจจับการเกิดควิเตชันเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อทำการเก็บข้อมูล (จุดที่ 2)
- 3) นำเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์มาติดตั้งกับมอเตอร์ปั๊มโดยนำปลั๊กของปั๊มมาต่อกับเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์และนำปลั๊กของเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไปต่อกับแหล่งพลังงาน (จุดที่ 3)
- 4) เช็คว่าวาล์วประตูน้ำของท่อด้านจ่าย(by pass)อยู่ในตำแหน่งปิด (จุดที่ 4)
- 5) เช็คว่าวาล์วปรับอัตราการไหลอยู่ในตำแหน่งเปิดเล็กน้อย (จุดที่ 5)



รูปที่ ง.8 แสดงขั้นตอนการเตรียมการทดลอง

3.3) การทดลองการเกิดควิเตชันในปั๊ม

- 1) ทำการเปิดสวิตซ์ของปั๊มและเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์ที่ 2700 รอบต่อนาที
- 2) ปรับอัตราการไหลวาล์ว 5 ให้อยู่ที่ 20 ลิตรต่อนาที ทิ้งไว้ประมาณ 30 วินาที
- 3) กดปุ่ม button ที่เครื่องตรวจจับฟองอากาศ 1 ครั้ง
- 4) สังเกตฟองอากาศที่ท่ออะคริลิกใสทางด้านจ่าย และสังเกตที่เครื่องตรวจจับฟองอากาศว่าไฟ LED Status ติดหรือยัง
- 5) ปรับอัตราการไหลเพิ่มขึ้นครั้งละ 5 ลิตรต่อนาที และทำซ้ำตามข้อ 3 และข้อ 4

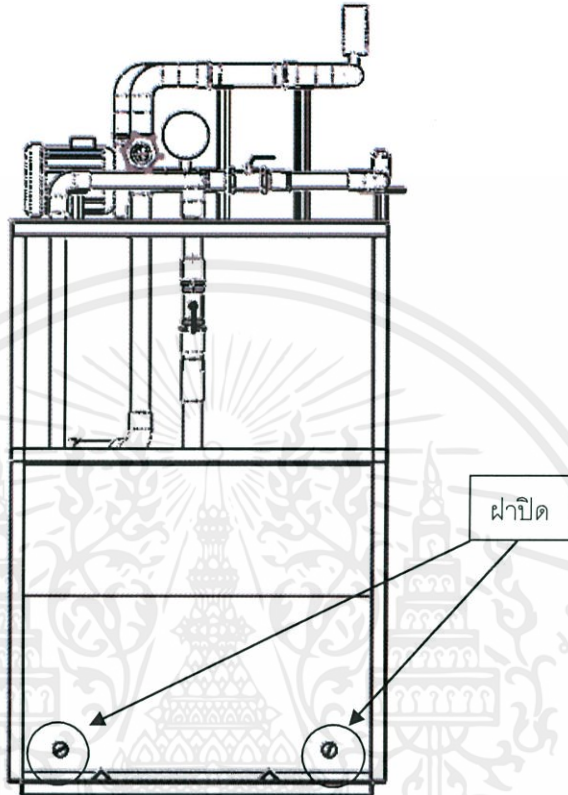
จนถึงค่าอัตราการไหลสูงสุด

- 6) ทำการสังเกตควิเตชันอีกครั้งตามข้อ 1-4 โดยปรับความเร็วรอบมอเตอร์ปั๊มลดลงเป็น 2500 ,2300 และ 2100 รอบต่อนาที

4.) การบำรุงรักษา

- การเปลี่ยนถ่ายน้ำ

- 1) เมื่อต้องการทำการเปลี่ยนน้ำของชุดทดลอง สามารถทำได้โดยการเปิดฝาปิด ของบ่อพักน้ำ ด้านล่างดังรูป



รูปที่ ง.9 แสดงตำแหน่งฝาปิดถังน้ำ

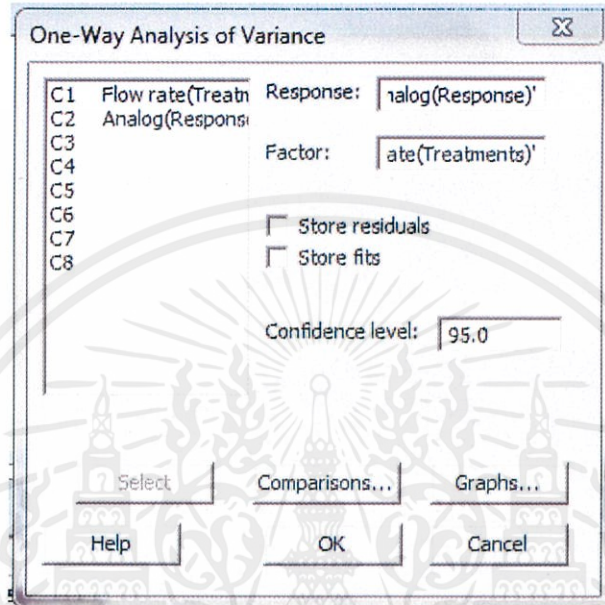
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

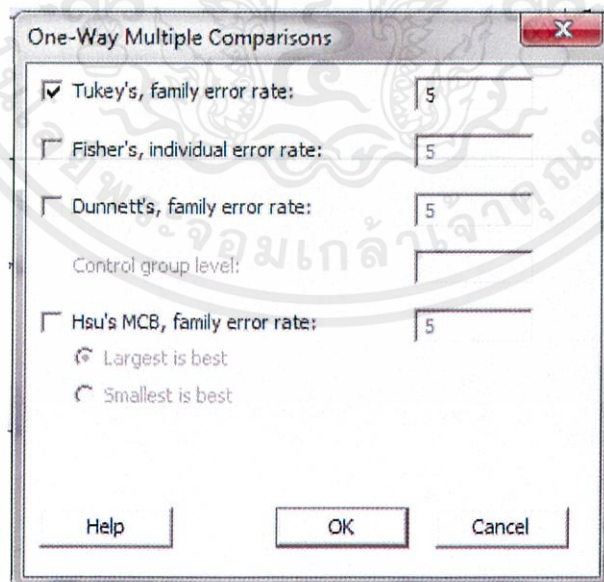
แสดงการใช้โปรแกรม Minitab 16 ในการคำนวณทางสถิติศาสตร์

1. เลือกเมนู Stat > ANOVA > One-Way
2. ในช่อง Response เลือกคอลัมน์ 'Analog' ในช่อง Factor เลือกคอลัมน์ 'Flow

rate'



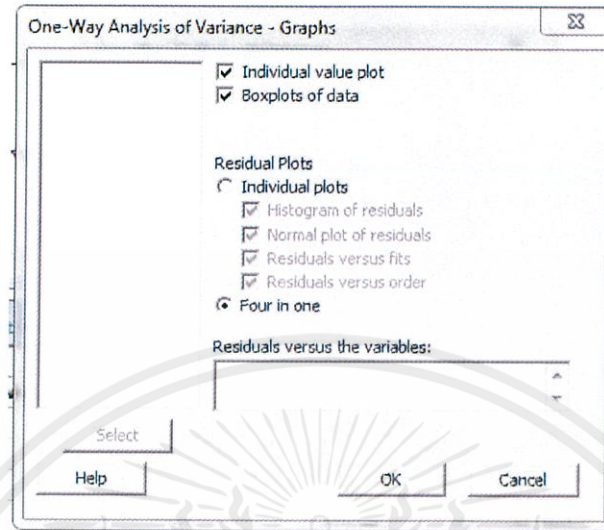
3. คลิกที่ปุ่ม Comparisons
4. เลือก Tukey's family error rate จากนั้นคลิก OK



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. คลิกปุ่ม Graphs

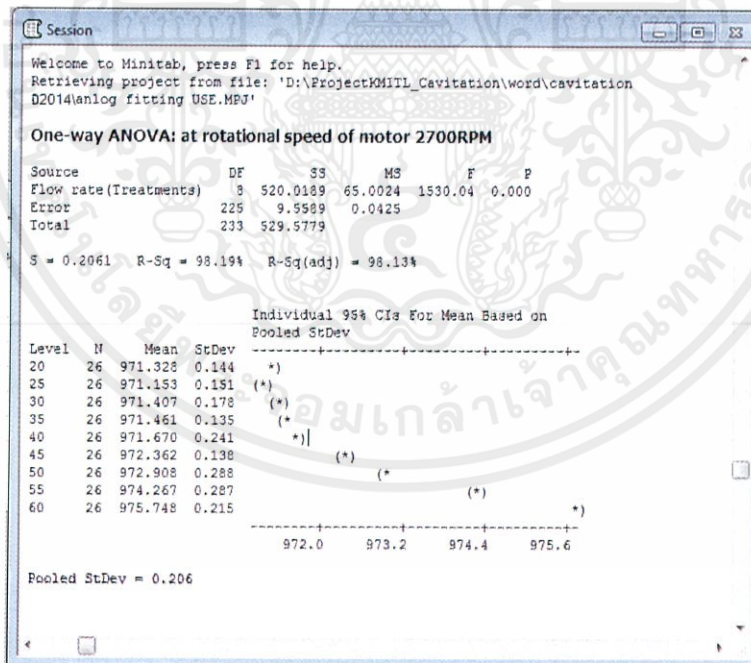
6. เลือก Individual value plot และ Boxplots of data



7. ภายใต้หัวข้อ Residual Plots เลือก Four in One

8. คลิก OK ในแต่ละไดอะล็อก บ็อกซ์

9. ผลลัพธ์จะแสดงบน Session Window



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้