

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งแบบปั๊มคู่

THE DESIGN AND DEVELOP OF THE TWO STAGE CENTRIFUGAL PUMP TEST SET



นายปฐมชัย สุวรรณปิณฑะ
นายพิรต์ จันทนเสถียร
นายชญญา ทิพย์วรรณ

รพ.
2/14/ก
2549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 72890
วัน,เดือน,ปี..... 25 ส.ย. 2550

b. 11274101
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอโย่งแบบปั๊มคู่

THE DESIGN AND DEVELOP OF THE TWO STAGE CENTRIFUGAL PUMP TEST SET

ผู้จัดทำ

1. นายปฐมชัย สุวรรณปิณฑะ รหัสประจำตัว 47015364
2. นายพิรล จันทนเสถียร รหัสประจำตัว 47015366
3. นายชญญา ทิพย์วรรณ รหัสประจำตัว 47015376



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. จ้างอง ปราบแก้ว)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผศ. มณฑล ใจกุลศล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งแบบปั๊มคู่

นายปฐมชัย สุวรรณปิณฑะ 47015364

นายพิรวัสส์ จันทนเสถียร 47015366

นายชญญา ทิพย์วรรณ 47015376

รศ.ดร. จำลอง ปราบแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.มณฑล ใจกุลศล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

ในการติดตั้งปั๊มเพื่อการใช้งานนั้นอาจติดตั้งเพียงตัวเดียว หรือต่อกันแบบขนาน หรือต่อกันแบบอนุกรม ซึ่งแตกต่างกันไปตามกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมต่างๆ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่นักศึกษาในระดับปริญญาตรี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่จะต้องมีความรู้ความเข้าใจเป็นอย่างดีถึงคุณลักษณะ และสมรรถนะของปั๊มในระบบดังกล่าว โครงการนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบและสร้างชุดทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งเมื่อต่อกันแบบขนาน หรืออนุกรม แล้วทำการทดสอบการใช้งาน เพื่อที่จะนำชุดทดสอบนี้ไปใช้เป็นการเรียนการสอนในห้องปฏิบัติการ โดยชุดทดสอบนี้ถูกสร้างขึ้นมาให้สามารถทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งได้ทั้งในระบบขนานและอนุกรม โดยอาศัยหลักของการเปิดและปิดของวาล์ว ชุดทดสอบที่ได้ ออกแบบและสร้างขึ้นมานี้สามารถใช้ทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสด, กำลังขับปั๊ม และค่าประสิทธิภาพเทียบกับอัตราการไหลของปั๊มตัวเดียว, ปั๊มระบบขนานและอนุกรมได้ จากชุดทดสอบจะวัดค่าความดันบริเวณทางด้านดูด โดยเกจสูญญากาศ และวัดความดันทางด้านจ่ายโดยเกจวัดความดัน อัตราการไหลจะวัดด้วยออร์ฟิซ ส่วนกำลังที่ใช้ขับปั๊มจะหาโดยการวัดกระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้าโดยใช้แอมป์มิเตอร์ และ โวลท์มิเตอร์ ตามลำดับ เมื่อต้องการทดสอบปั๊มในระบบต่างๆ ก็สามารถทำการทดสอบและบันทึกค่าต่างๆ ลงในตารางและนำข้อมูลมาคำนวณเพื่อเขียนกราฟแสดงคุณลักษณะรวมถึงประสิทธิภาพของปั๊มในระบบขนานหรืออนุกรมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE DESIGN AND DEVELOPMENT OF THE TWO STAGE CENTRIFUGAL PUMP TEST SET

Pathomchai Suwanpinta

Pirul Jantanastien

Chanya Thippawan

Assoc.Prof.Dr.Chamlong Prabkeo Advisor

Assis.Prof Montol Jaikusol Co.Advisor

ABSTRACT

Pumps assembled in parallel or in serial systems are of practical importance having many applications in several process plants. A good knowledge about such systems and their performance characteristics by the engineering undergraduate students is crucial. It is presented in this work the construction, test and use of an assembly for teaching the association in parallel or in series of centrifugal pumps. The assembly is constructed in a way that turning on some valves and turning off other ones the apparatus becomes a parallel pump system or a serial one. In order to get the performance characteristics of that pump systems is necessary to do experimental measurements of pressure at inlet and outlet of the pumps, the flow rate through the pump system, and the electric current and voltage of the electric motors driving the pumps. The pressures are measured using pressure gauges and the electric current and voltage by using ammeter and voltmeter connected to the electric motors. Flow rate measurement is done by using a calibrated orifice meter. After getting all this measurements it is obtained the pump system characteristic curves and the efficiency for operating in parallel or in series.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้คง ไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและร่วมมือจาก หลากๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ขอกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จ สิ้นลงได้ก็คือ รศ.ดร. จำลอง ปรามแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้โอกาส ตลอดจนคอยช่วยเหลือ แนะนำ เอาใจใส่เป็นอย่างดีเสมอมา อีกท่านหนึ่งคือ ผศ. มณฑล ใจกุลศล สำหรับความเป็น “ครู” ที่มี ให้แก่คณะผู้จัดทำตลอดมา

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่ เคารพรักขัง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้จัดทำเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้ กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุด ประมาณ นี้

สุดท้ายนี้ทางคณะผู้จัดทำขอขอบคุณ คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน รวมทั้งขอขอบคุณทุกคนในครอบครัวของคณะผู้จัดทำ เพื่อนๆ ชาววิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน และ ทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่มีส่วนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ทางคณะผู้จัดทำ ขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

นายปฐมชัย สุวรรณปิณฑะ
นายพิรล จันทนเสถียร
นาย ชาญญา ทิพย์วรรณ

สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 หลักการทำงานและคุณสมบัติของบีมหอยโข่ง	3
2.1 หลักการทำงานของบีมหอยโข่ง	3
2.2 ประเภทของบีมหอยโข่ง	4
2.2.1 แบบไหลตามแนวรัศมี	4
2.2.1.1 แบบก้นหอย	4
2.2.1.2 แบบกระจายของเหลว	5
2.2.2 แบบไหลตามแนวแกนเพลลา	5
2.2.3 แบบผสม	5
2.3 ส่วนประกอบที่สำคัญของบีมหอยโข่ง	6
2.3.1 ใบพัด	8
2.3.2 เรือนบีม	8
2.2.3 แหวนกันสีก	9
2.3.4 เพลลา	9
2.3.5 ลูกปืน	10
2.3.6 อุปกรณ์ซีลเพลลา	10
2.3.6.1 ปะเก็นอัด	10
2.3.6.2 ซีลทางกล	10

สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
2.4 เสดขของระบบ	11
2.4.1 เสดคความคั่น	11
2.4.2 เสดคความเร็ว	11
2.4.3 เสดคสถิต	11
2.4.4 เสดคสูญเสี่ยในระบบท่อ	12
2.4.4.1 การสูญเสี่ยหลัก	12
2.4.4.2 การสูญเสี่ยรอง	13
2.4.5 การคำนวณหาเสดขของปั้ม	14
2.5 ประสิทธิภาพของปั้มหอยโข่ง	15
2.5.1 ประสิทธิภาพของปั้ม	15
2.5.2 ประสิทธิภาพปั้มในระบบขนาน	15
2.5.3 ประสิทธิภาพของปั้มในระบบอนุกรม	15
2.5.4 กำล้งที่ป้อนให้แก่ปั้ม	16
2.5.5 กำล้งที่ได้ออกมาจากปั้ม	16
2.6 สมรรถนะของปั้มหอยโข่ง	17
2.6.1 สมรรถนะของปั้มหอยโข่งตัวเดียว	17
2.6.2 สมรรถนะของปั้มหอยโข่งในระบบขนาน	18
2.6.3 สมรรถนะของปั้มหอยโข่งในระบบอนุกรม	18
บทที่ 3 ชุดทดสอบสมรรถนะของปั้มหอยโข่งแบบปั้มคู่	19
3.1 ชุดทดสอบสมรรถนะของปั้มหอยโข่งและอุปกรณ์ประกอบชุดทดสอบ	19
3.1.1 ปั้มหอยโข่ง	20
3.1.2 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล	21
3.1.3 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบออร์ฟิช	23
3.1.4 อุปกรณ์วัดความคั่น	25
3.1.5 อุปกรณ์วัดกำล้งของมอเตอร์	25
3.2 วิธีการทดสอบสมรรถนะของปั้มหอยโข่ง	26
3.4.1 การทดสอบสมรรถนะของปั้มหอยโข่งตัวเดียว	26
3.4.2 การทดสอบสมรรถนะของปั้มหอยโข่งในระบบขนาน	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
3.4.3 การทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งในระบบอนุกรม	27
บทที่ 4 ผลการทดสอบ	29
4.1 ผลการทดสอบปั๊มตัวที่ 1	29
4.2 ผลการทดสอบปั๊มตัวที่ 2	31
4.3 ผลการทดสอบปั๊มในระบบอนุกรม	33
4.4 ผลการทดสอบปั๊มในระบบขนาน	35
บทที่ 5 สรุปผลและวิจารณ์การทดสอบ	37
5.1 สรุปผลจากการทดสอบ	37
5.2 วิจารณ์การทดสอบ	37
บรรณานุกรม	38
ภาคผนวก ก	39
ภาคผนวก ข	45
ภาคผนวก ค	50
ภาคผนวก ง	59



สารบัญรูป

รูปที่	หน้าที่
2.1	3
2.2	4
2.3	5
2.4	6
2.5	6
2.6	7
2.7	7
2.8	8
2.9	12
2.10	14
2.11	17
2.12	18
2.13	18
3.1	19
3.2	20
3.3	20
3.4	22
3.5	23
3.6	23
3.7	24
3.8	25
3.9	25
3.10	26
3.11	27
3.12	27
4.1	29
4.2	30
4.3	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขของปั๊ม (h_p) กับอัตราการไหล(Q)ของปั๊มตัวที่ 2	31
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ (η) กับ อัตราการไหล (Q) ของปั๊มตัวที่ 2	32
4.6 กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มตัวที่ 2	32
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ (η) กับ อัตราการไหล (Q) ของปั๊มในระบบขนาน	33
4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างการต่อปั๊มแบบอนุกรมกับการใช้ปั๊มตัวเดียว	34
4.8 กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มในระบบขนาน	34
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ (η) กับ อัตราการไหล (Q) ของปั๊มในระบบอนุกรม	35
4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างการต่อปั๊มแบบขนานกับการใช้ปั๊มตัวเดียว	36
4.11 กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มในระบบอนุกรม	36
5ข. สัมประสิทธิ์การไหล K และ Re_p/K กับ Re_p สำหรับมาตรอัตราการไหลแบบเวนจูรี มาตรอัตราการไหลแบบหัวฉีด และมาตรอัตราการไหลแบบออริฟิซ	48
6ข. Moody diagram	49

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
1ก. แสดงข้อมูลจากการทดสอบและการคำนวณผลจากการทดสอบปี่มตัวที่ 1	39
2ก. แสดงข้อมูลจากการทดสอบและการคำนวณผลจากการทดสอบปี่มตัวที่ 2	40
3ก. แสดงข้อมูลจากการทดสอบปี่มในระบบอนุกรม	41
4ก. แสดงผลที่ได้จากการคำนวณข้อมูลจากการทดสอบปี่มในระบบอนุกรม	42
5ก. แสดงข้อมูลจากการทดสอบปี่มในระบบขนาน	43
6ก. แสดงผลที่ได้จากการคำนวณข้อมูลจากการทดสอบปี่มในระบบขนาน	44
1 ข. แสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ (หน่วยเอสไอ)	45
2 ข. แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย (K) สำหรับการไหลผ่านช่องอ ข้อต่อและวาล์ว	46
3 ข. แสดงค่าความขรุขระสัมบูรณ์ ϵ สำหรับท่อชนิดต่าง ๆ	46
4 ข. แสดงความหนาของออริฟิซ	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ปั๊มหอยโข่ง หรือปั๊มแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Pump) เป็นปั๊มสูบน้ำที่ได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นการนำไปใช้ในระบบชลประทาน, การเกษตร, โรงงานอุตสาหกรรม, อุตสาหกรรมเคมี และ อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น

ในโรงอุตสาหกรรมบางประเภทที่มีความจำเป็นจะต้องใช้ปั๊มหอยโข่งในระบบหรือกระบวนการต่าง ๆ ความดันเสดหรืออัตราการไหลที่ได้มาจากปั๊มตัวเดียวอาจไม่เพียงพอต่อความต้องการในการปฏิบัติงานในระบบหรือกระบวนการนั้น ๆ เช่น ในกระบวนการหนึ่งต้องการสูบน้ำขึ้นไปในระดับที่สูงมาก จนทำให้ปั๊มตัวเดียวไม่สามารถสูบน้ำขึ้นไปในระดับนั้นได้ กล่าวคือค่าความดันเสดจากปั๊มที่ใช้อยู่ไม่เพียงพอต่อการใช้งานในกระบวนการนั้น วิธีแก้ไขก็คือเปลี่ยนไปใช้ปั๊มที่มีความดันเสดมากขึ้น หรือหากปั๊มเพียงตัวเดียวไม่สามารถให้ความดันเสดในระดับที่เราต้องการใช้งานได้เลย เราก็จำเป็นต้องนำปั๊ม 2 ตัว หรือมากกว่านั้นมาต่อกันแบบอนุกรม ซึ่งจะส่งผลให้ความดันเสดมากยิ่งขึ้นจนสามารถสูบน้ำขึ้นไปในระดับที่ต้องการได้ ในขณะที่เดียวกันหากในกระบวนการหนึ่งต้องการส่งน้ำจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งซึ่งต้องการอัตราการไหลมากๆ กล่าวคืออัตราการไหลที่ได้จากปั๊มตัวเดียวไม่เพียงพอต่อกระบวนการนั้น วิธีแก้ไขก็คือเปลี่ยนไปใช้ปั๊มที่มีอัตราการไหลมากขึ้น หรือหากปั๊มเพียงตัวเดียวไม่สามารถให้อัตราการไหลในระดับที่เราต้องการใช้งานได้เลย เราก็จำเป็นต้องนำปั๊ม 2 ตัวหรือมากกว่านั้นมาต่อกันแบบขนาน ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการไหลมากยิ่งขึ้นจนสามารถส่งน้ำไปในระยะที่ต้องการได้

จากที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นจะเห็นได้ว่าปั๊มหอยโข่งนั้นเมื่อนำมาต่อกันแบบขนานหรือแบบอนุกรมแล้วนั้นจะให้ผลลัพธ์แตกต่างกันออกไป ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายประเภทซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่ออุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่ต้องการการสูบ หรือส่งผ่านของไหลเข้ามาเกี่ยวข้อง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.1.1 ออกแบบและจัดสร้างจุดทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งแบบปั๊มคู่เพื่อใช้ในห้องปฏิบัติการ

1.1.2 ทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งแบบตัวเดียว ต่อกันแบบขนาน และต่อกันแบบอนุกรม

1.1.3 จัดทำเอกสารประกอบการเรียนการสอนเพื่อใช้ห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของโครงการ

โครงการนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาถึงสมรรถนะของปั๊มหอยโข่ง 2 ตัวในแบบขนาน และแบบอนุกรมโดยการออกแบบและสร้างชุดทดสอบขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งในระบบดังกล่าว แล้วนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาทำการเขียนกราฟแสดงประสิทธิภาพ (Performance curve) และชุดทดสอบที่สร้างไว้นี้จะนำไปใช้เป็นอุปกรณ์การสอนในห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลต่อไป

1.4 วิธีการดำเนินงาน

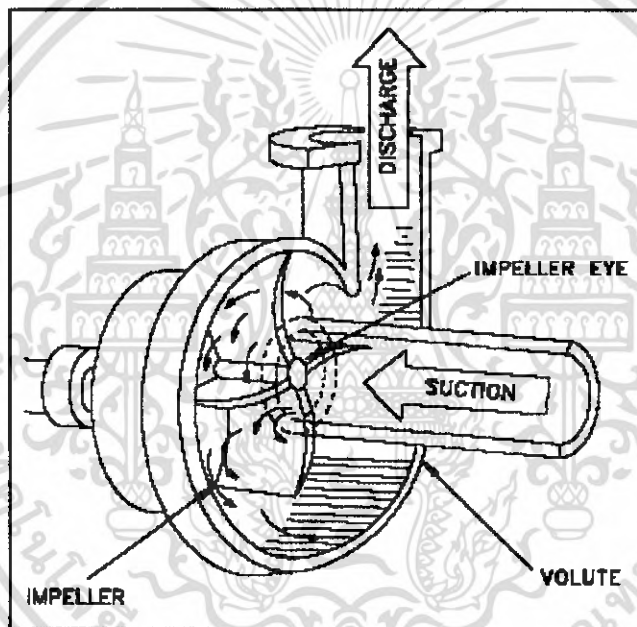
โครงการนี้เริ่มต้นขึ้น โดยการศึกษาทฤษฎีการทำงานของปั๊มหอยโข่งทั้งแบบตัวเดียว แบบขนาน และแบบอนุกรม รวมถึงชุดทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งที่มีอยู่ในท้องตลาด แล้วรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ มาใช้ในการออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งแบบปั๊มคู่ขึ้นมา ซึ่งสามารถทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งได้ทั้งแบบตัวเดียว แบบขนาน และแบบอนุกรม หลังจากนั้นจึงได้เริ่มทำการทดสอบเพื่อหาสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งในระบบต่าง ๆ ตามข้างต้น ซึ่งรายละเอียดของผลการทดสอบ ได้แสดงไว้ตอนท้ายของปฏิญญานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

บทที่ 2

หลักการทำงานและคุณสมบัติของปั๊มหอยโข่ง

2.1 หลักการทำงานของปั๊มหอยโข่ง

ในปั๊มหอยโข่ง พลังงานเชิงกลจากเพลลาของปั๊มที่ถูกต่อเข้ากับเครื่องต้นกำลังซึ่งอาจเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าหรือเครื่องยนต์ จะถูกถ่ายทอดไปสู่ของเหลวที่ถูกทำให้ไหลโดยใบพัดหรือใบเครื่องจักร (Impeller) ที่ติดอยู่กับเพลลา ซึ่งอยู่ภายในเรือนปั๊ม (Casing) ที่มีช่องทางดูด (Suction) และช่องทางส่ง (Discharge) ตามที่แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การทำงานของปั๊มหอยโข่ง

ปั๊มจะทำงานถ้าเพลลาของปั๊มถูกขับให้หมุน ซึ่งใบพัดที่ติดกับเพลลา ก็จะหมุนไปด้วย การหมุนของใบพัดนี้จะทำให้อนุภาคของของเหลวที่อยู่ภายในช่องว่างระหว่างครีป (Vane) ของใบพัดหมุนไปกับใบพัด และไหลจากด้านทางดูดไปสู่ด้านทางส่ง ทำให้ความดันด้านทางดูดลดลง เป็นผลทำให้ของเหลวในท่อดูดไหลเข้าทางด้านทางดูดของปั๊ม และเข้าสู่ปากทางเข้าของใบพัด อนุภาคของของเหลวที่ถูกพาให้หมุนไปกับใบพัดก็จะได้รับการถ่ายทอดพลังงานจากใบพัด โดยเปลี่ยนจากพลังงานกลไปเป็นพลังงานจลน์ที่เพิ่มขึ้น (ความเร็วของของเหลวที่เพิ่มขึ้น) พลังงานจลน์บางส่วนก็จะถูกเปลี่ยนไปเป็นความดัน โดยการทำให้ช่องทางการไหลมีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อลดความเร็วของของเหลวลง ซึ่งก็จะทำให้ของเหลวสามารถไหลตามระบบการสูบไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้

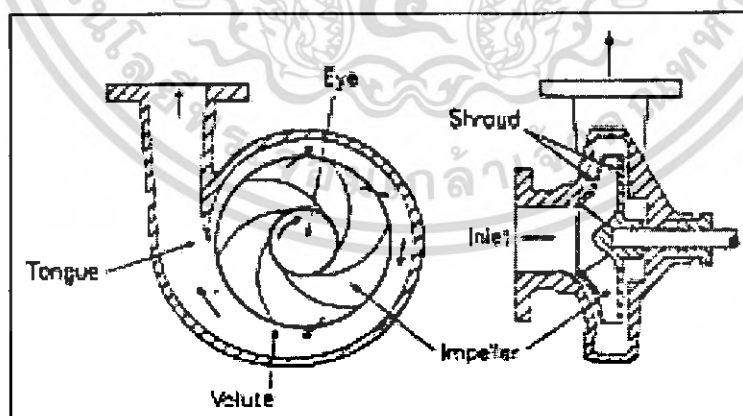
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ประเภทของปั๊มหอยโข่ง

โดยทั่วไป ปั๊มหอยโข่ง แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ตามลักษณะการออกแบบชนิดใบพัด (Impeller) ได้แก่ ใบพัดแบบไหลตามแนวรัศมี (Radial flow) แบบไหลตามแนวแกน (Axial flow) และแบบผสม (Mixed flow) โดยอาศัยทิศทางการไหลเข้าและออกของของเหลวจากใบพัดเป็นหลัก ปกติทิศทางการไหลเข้าของของเหลวจากปลายท่อดูดเข้าสู่ปากทางเข้าชุดใบพัดจะขนานกับแนวแกนเพลารับกำลัง ซึ่งมักจะเป็นแนวเดียวกันกับแนวศูนย์กลางของชุดใบพัด ส่วนทิศทางการไหลออกจะขึ้นกับลักษณะของใบพัดที่ได้รับการออกแบบมา

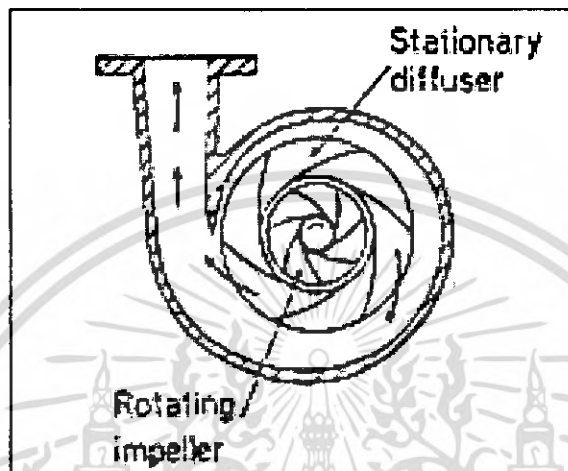
2.2.1 แบบไหลตามแนวรัศมี (Radial flow type) ในปั๊มประเภทนี้ การไหลของของเหลวเข้าสู่ใบพัดจะขนานกับแนวแกนเพลา แต่ทิศทางการไหลออกจากใบพัดจะตั้งฉากกับแนวแกนเพลา เมื่อมองจากทางด้านข้างของตัวเรือนปั๊ม (ตามแนวยาวของเพลา) ทั้งนี้เพราะใบพัดได้รับการออกแบบมาให้ใช้แต่แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพียงอย่างเดียวในการเพิ่มพลังงานให้กับของเหลว ใบพัดแบบนี้เรียกว่า Radial flow impeller หรือเรียกสั้นๆ ว่า Impeller ปั๊มประเภทนี้ยังแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.2.1.1 แบบก้นหอย (Volute type) ใบพัดจะเหวี่ยงของเหลวผ่านเข้าไปในเรือนปั๊มที่มีลักษณะเป็นวงโค้งเหมือนก้นหอย เส้นผ่านศูนย์กลางของก้นหอยนี้จะค่อยๆ ขยายจากปากทางเข้าสู่ใบพัดไปจนถึงปากทางออก ทำให้พลังงานซึ่งอยู่ในรูปความเร็วของของเหลว (Velocity Energy) ถูกเปลี่ยนให้เป็นแรงดันสถิต (Static pressure) ปั๊มแบบนี้คือ ปั๊มซึ่งรู้จักกันในนามของปั๊มหอยโข่ง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ปั๊มหอยโข่งแบบก้นหอย (Volute type)

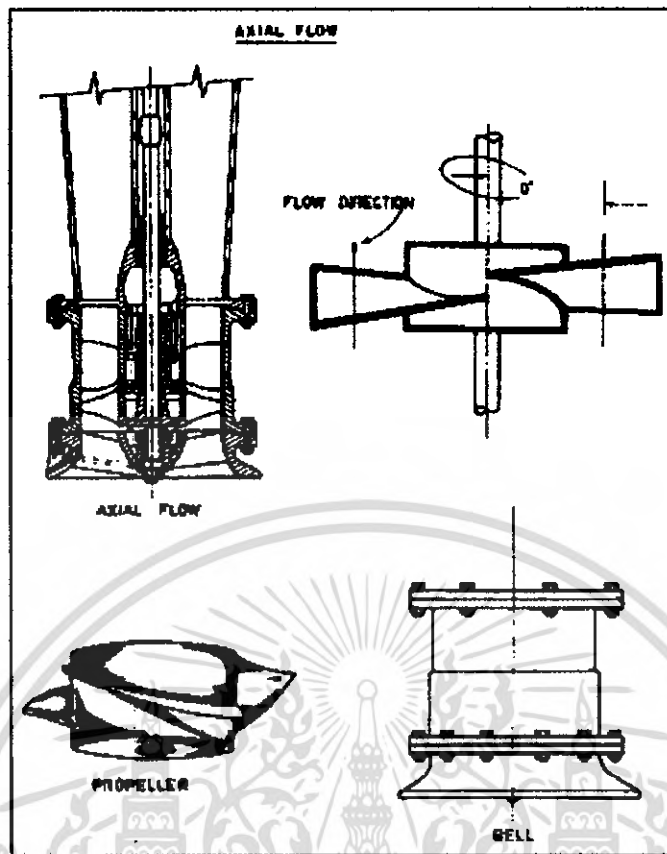
2.2.1.2 แบบกระจายของเหลว (Diffuser type) ปัมป์แบบนี้จะมีแผ่นกระจายของเหลว (Stationary guide vane) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นแผ่นโค้งคล้ายใบพัด แต่ติดตั้งตายตัวอยู่บนผนังของเรือนปั๊ม และมีทิศทางความโค้งสวนกับแนวโค้งของใบพัด ของเหลวที่ผ่านสู่ใบพัดจะถูกเบนให้เปลี่ยนทิศทางและลดความเร็วลง ทำให้พลังงานถูกเปลี่ยนจากรูปของความเร็วมายังเป็นแรงดันในรูปของเสด ดังรูปที่ 2.3



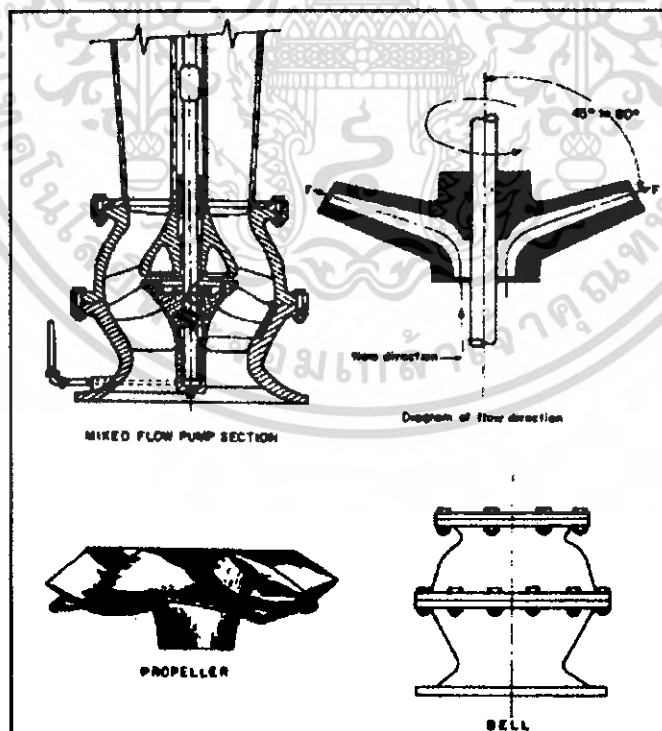
รูปที่ 2.3 ปัมป์ทอยโง้งแบบกระจายของเหลว (Diffuser type)

2.2.2 แบบไหลตามแนวแกนเพลา (Axial flow type) มีทิศทางการไหลของของเหลวเข้าสู่ใบพัดจะไหลออกจากใบพัดขนานกับแนวแกนเพลาโดยตลอด ทั้งนี้เพราะพลังงานที่ของเหลวได้รับเกิดจากแรงยกของครีบบใบพัด (Lifting force) เพียงอย่างเดียว ไม่มีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเข้ามาเกี่ยวข้อง ใบพัดประเภทนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Propeller ดังรูปที่ 2.4

2.2.3 แบบผสม (Mixed flow type) เป็นปั๊มที่มีทิศทางการไหลของของเหลวเข้าสู่ใบพัดขนานกับแนวเพลาเช่นเดียวกับแบบอื่น แต่ทิศทางการไหลออกจากใบพัดจะทำมุมป้านระหว่างแนวแกนเพลา กับเส้นตั้งฉากกับแนวแกนเพลา คืออยู่ระหว่างสองแบบแรก ทั้งนี้เพราะพลังงานที่ของเหลวได้รับ เป็นพลังงานที่ได้จากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและแรงยกของกليبใบพัดผสมกัน ใบพัดประเภทนี้เรียกว่า Mixed flow impeller ดังรูปที่ 2.5



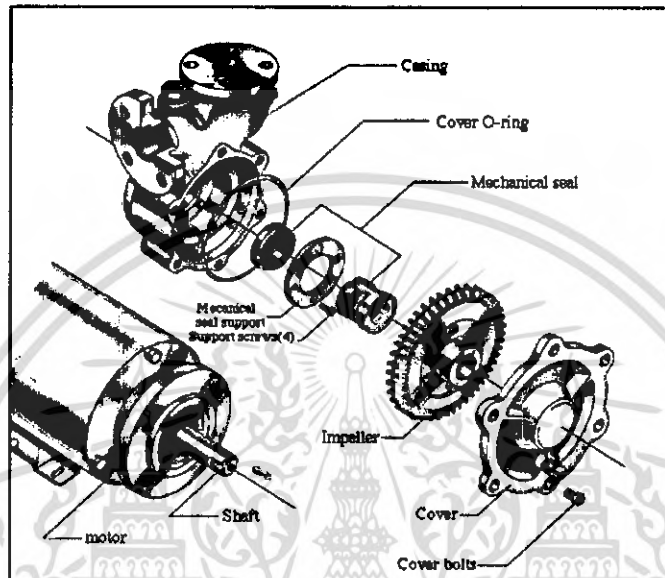
รูปที่ 2.4 ปัมพ์หอยโข่งแบบไหลตามแนวแกนเฟลา (Axial type)



รูปที่ 2.5 ปัมพ์หอยโข่งแบบผสม (Mixed flow type)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

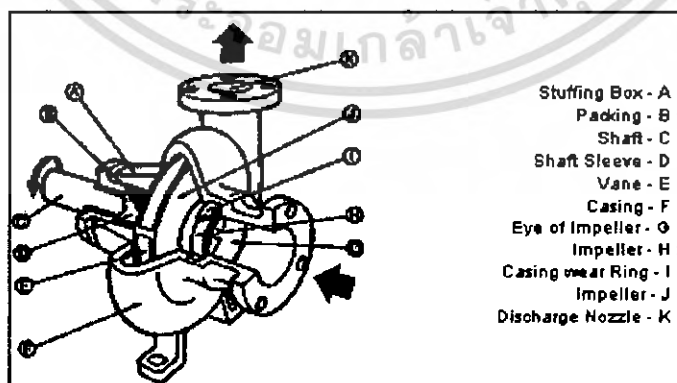
นอกจากที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีปั๊มอีกประเภทหนึ่งซึ่งถูกจัดไว้ในประเภทของปั๊มหอยโข่ง คือ ปั๊มแบบเทอร์ไบน์ (Turbine type pump) ดังรูปที่ 2.6 ปั๊มประเภทนี้ ประกอบด้วยเรือนปั๊มที่มีลักษณะช่องว่างภายในลักษณะคล้ายวงแหวน (Annular channel หรือ Ring-like channel) ใบพัดเป็นแบบแผ่นตรงเหมือนใบพัดเทอร์ไบน์ และมีจำนวนใบมากกว่าใบพัดในปั๊ม 3 ประเภทที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 2.6 ปั๊มหอยโข่งชนิดเทอร์ไบน์ (Turbine type)

2.3 ส่วนประกอบที่สำคัญของปั๊มหอยโข่ง

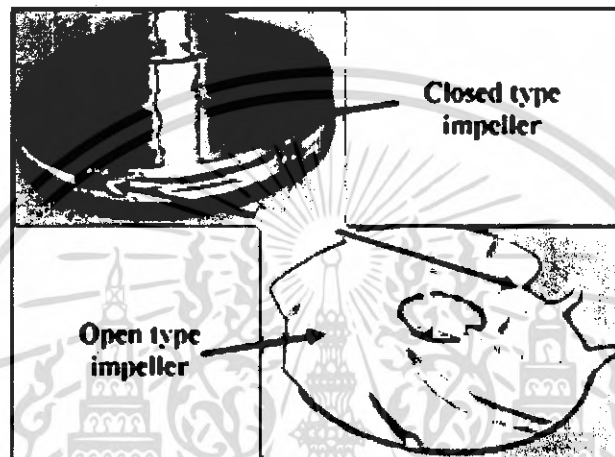
ส่วนประกอบที่สำคัญของปั๊มหอยโข่งมีอยู่สองกลุ่ม คือ ชิ้นส่วนที่หมุนได้ ได้แก่ ใบพัดและเพลา และชิ้นส่วนที่อยู่กับที่ ได้แก่ เรือนปั๊ม กดองปะเก็นอัดหรือซีล และลูกปืน ซึ่งมีรายละเอียดของส่วนประกอบแต่ละส่วนคือ



รูปที่ 2.7 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของปั๊มหอยโข่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 ใบพัด (Impeller) เป็นชิ้นส่วนที่ใช้ในการถ่ายทอดพลังงานกลของการหมุนใบพัดไปยังของเหลวที่อยู่ในใบพัดในรูปของพลังงานจลน์ของของเหลวที่เพิ่มขึ้น รูปร่างของใบพัดก็จะขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของของเหลวที่ออกจากใบพัดเมื่อเทียบกับแกนหมุนหรือเป็นไปตามตัวเลขระบุชนิด ซึ่งก็จะเรียกชื่อใบพัดนั้นๆ ตามทิศทางการไหลด้วย คือใบพัดชนิดไหลในแนวรัศมี (Radial flow impeller) ใบพัดชนิดไหลในแนวผสม (Mixed flow impeller) และชนิดไหลในแนวแกน (Axial flow impeller)



รูปที่ 2.8 ใบพัดของปั๊มหอยโข่งแบบเปิด (Open type) และแบบปิด (Close type)

ใบพัดโดยทั่วไปจะประกอบด้วยคิริบ (Vane) จำนวนหลายคิริบแผ่นกั้นหน้าและหลัง และรูสำหรับใส่เข้ากับเพลา ในกรณีของเครื่องสูบน้ำที่ใช้กับของเหลวที่มีอนุภาคของแข็งปนอยู่ด้วย เช่น น้ำที่มีดินหรือทรายหรือเชื้อต่างๆ ใบพัดที่ใช้อาจไม่มีแผ่นกั้นหน้า หรือไม่มีทั้งแผ่นกั้นหน้าและหลัง ซึ่งใบพัดที่มีแผ่นกั้นหน้าและหลังจะถูกเรียกว่าใบพัดแบบปิด (Closed impeller) ใบพัดที่ไม่มีแผ่นกั้นหน้าและหลัง จะถูกเรียกว่าใบพัดเปิด (Open impeller) ส่วนใบพัดที่ใช้กับเครื่องสูบน้ำชนิดสูบด้านเดียวก็จะถูกเรียกว่า ใบพัดแบบทางดูดด้านเดียว (Single suction impeller) และใบพัดที่ใช้กับเครื่องสูบน้ำชนิดทางดูดสองด้านก็จะถูกเรียกว่า ใบพัดแบบทางดูดสองด้าน (Double suction impeller) นอกจากนี้ยังมีใบพัดแบบพิเศษที่ถูกออกแบบมาสำหรับงานลักษณะหนึ่งๆ โดยเฉพาะอีก เช่น ใบพัดที่ไม่อุดตัน (Non logging impeller) และใบพัดสำหรับเยื่อกระดาษ (Paper club impeller) เป็นต้น รูปที่ 2.8 แสดงใบพัดของปั๊มหอยโข่งแบบเปิดและแบบปิด

2.3.2 เรือนปั๊ม (Casing) เป็นชิ้นส่วนที่ใช้ห่อหุ้มใบพัด และเป็นเส้นของลูกปืนที่รองรับเพลา และปะเก็นอัดหรือซีล นอกจากนี้เรือนปั๊มยังทำให้เกิดช่องทางการไหลของของเหลวที่เข้า

และออกจากใบพัด สำหรับช่องทางการไหลของของเหลวจะรวบรวมของเหลวที่ออกจากใบพัด และเปลี่ยนพลังงานงานความเร็วให้เป็นพลังงานความดัน ซึ่งทำได้สองลักษณะคือ ลักษณะแรกทำให้เรอีนปั้มเป็นรูปก้นหอย โดยพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงทางส่งที่เรียกว่าเรอีนปั้มแบบโวลูต หรือแบบหอยโข่ง (Volute pump) ซึ่งมักจะเป็นปั้มชนิดไหลในแนวรัศมี ลักษณะที่สอง ทำให้เรอีนสูบมีหน้าตัดกลม และมีจุดศูนย์กลางเดียวกับใบพัด (พื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลออกคงที่) แล้วใช้ตัวกระจาย (Diffuser) ที่ทำเป็นช่องซึ่งแบ่งด้วยคريبที่มีพื้นที่หน้าตัดค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากทางเข้าถึงทางออก ปั้มที่มีเรอีนสูบประเภทนี้จะถูกเรียกว่า ปั้มชนิดตัวกระจาย (Diffuser pump) เช่นกัน เรอีนปั้มแบบมีตัวกระจายนิยมใช้กับปั้มเทอร์โบไนซ์ชนิดเพลาดัง (Vertical turbine pump) ที่ใช้กับบ่อบาดาลหรือบ่อสูบ และปั้มชนิดไหลตามแนวแกน

นอกจากนี้เรอีนปั้มของปั้มชนิดไหลในแนวรัศมี ยังแบ่งตามจำนวนชั้น เป็นแบบชั้นเดียว หรือแยกในแนวรัศมี (Solid casing or radially split casing) ได้แก่ เรอีนปั้มที่มีช่องทางการไหลออกไปจนถึงทางส่งเป็นชั้นเดียว แต่ด้านหนึ่งจะต้องเปิดออกเพื่อใส่ใบพัด ดังนั้นจึงไม่ใช่เป็นแบบชั้นเดียวจริงๆ แต่เป็นแบบแยกในแนวรัศมีเมื่อเทียบกับแกนของการหมุน (ในระนาบที่ตั้งฉากกับแกนหมุน) และเรอีนปั้มเป็นแบบสองชั้นส่วนหรือมากกว่า ยึดติดกันด้วยสลักเกลียวและแป้นเกลียว ซึ่งแยกกัน ในระนาบที่ขนานกับแกนหมุน (Split casing or axially split casing) เรอีนปั้มแบบแยกในแนวรัศมีนิยมใช้กับปั้มแบบดูดทางเดียว ส่วนเรอีนปั้มแบบแยกในแนวแกนนิยมใช้กับปั้มแบบทางดูดสองทาง

รูปร่างของเรอีนปั้มยังแตกต่างกันออกไปตามตำแหน่งของทางดูด ได้แก่ ทางดูดด้านปลาย (End suction) ทางดูดด้านล่าง (Bottom suction) ทางดูดด้านข้าง (Side suction) และทางดูดด้านบน (Top suction) อีกด้วย

2.3.3 แหวนกันลึก (Sealing ring) เป็นชิ้นส่วนที่ใส่ไว้เพื่อป้องกันการลึกหรือของเรอีนปั้มเพียงอย่างเดียว หรือการลึกหรือของทั้งเรอีนปั้มและใบพัดที่บริเวณที่จะมีการรั่วของของเหลวภายในเรอีนปั้มกลับไปช่องทางดูด แหวนกันลึกจึงเป็นชิ้นส่วนที่มีรูปร่างเป็นวงแหวนใส่เข้ากับเรอีนปั้มอันเดียว (Single casing ring) หรือเป็นวงแหวนสองอัน อันหนึ่งใส่เข้ากับเรอีนปั้ม และอีกอันใส่เข้ากับใบพัด (Double rings) ในบริเวณที่จะเกิดการรั่วดังกล่าวทำให้การลึกหรือที่จะเกิดขึ้นในบริเวณนี้ของเรอีนปั้มหรือของทั้งเรอีนปั้มและใบพัด เป็นการลึกหรือของแหวนกันลึกแทน ซึ่งเป็นผลให้ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงของปั้มลดลง

2.3.4 เพลา (Shaft) เป็นชิ้นส่วนที่ให้ใบพัดติดเข้าไปในตำแหน่งที่กำหนด เพลาจะทำหน้าที่ในการถ่ายทอดกำลังจากตัวขับ ไปสู่ใบพัด โดยผ่านทางข้อต่อ มู่เกิ้ล และเฟือง เป็นต้น เพลาของปั้มมักมี

การป้องกันจากการกัดเซาะ การกัดคร่อน และการสึกหรอที่กล่องปะเก็นอัด ที่บริเวณการรั่ว และในทางที่ของเหลวผ่านโดยการใส่ปลอกเพลลา (Shaft sleeves) ที่ถอดเปลี่ยนได้เข้าไป

2.3.5 ลูกปืน (Bearing) เป็นชิ้นส่วนที่ใช้ในการรองรับเพลลาของปั๊ม ชนิดของลูกปืนที่ใช้กับปั๊มจะมีทั้งเพลนเบริง (Plain bearing) หรือลูกปืนชนิดเป็นปลอก และลูกปืนด้านความเสียดทาน (Antifriction bearing) ซึ่งจะมีหลายแบบ คือ ด้ล้บลูกปืนเม็ดกลม (Ball bearing), ด้ล้บลูกปืนเม็ดทรงกระบอก (Cylindrical roller bearing), ด้ล้บลูกปืนเม็ดโค้ง (Spherical roller bearing) และด้ล้บลูกปืนเม็ดเรียว (Taper roller bearing) สำหรับการหล่อลื่นลูกปืนเหล่านี้ ถ้าเป็นเพลนเบริงก็มักจะใช้น้ำมัน แต่ถ้าเป็นด้ล้บลูกปืน หรือลูกปืนด้านความเสียดทาน ก็จะมีทั้งแบบหล่อลื่นด้วยน้ำมันและจาระบี นอกจากนี้ยังมีลูกปืนแบบอื่นๆ อีกเช่น ลูกปืนทำด้วยยางที่หล่อลื่นด้วยน้ำสำหรับปั๊มสูบลูเทอร์ไบน์ที่ใช้กับบ่อบาลอีกด้วย

2.3.6 อุปกรณ์ซีลเพลลา (Shaft sealing) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการป้องกันการรั่วของของเหลวออกสู่ด้านนอก หรือป้องกันการรั่วของอากาศเข้าสู่ด้านในของเรือนปั๊ม ในบริเวณที่เพลลาผ่านเข้าไปในเรือนปั๊ม อุปกรณ์ซีลเพลลาที่นิยมใช้กันมีอยู่สองแบบคือ

2.3.6.1 ปะเก็นอัด (Gland packing) เป็นแบบที่ใช้ปะเก็น (Packing) ใส่เข้าไปในกล่องปะเก็นอัด (Stuffing box) แล้วอัดด้วยตัวอัด สำหรับเครื่องสูบน้ำโดยทั่วไปในกล่องปะเก็นอัดจะมีแหวนตัวกลาง (Lantern ring) ที่รับน้ำสะอาดภายใต้ความดันมาจากภายนอก เพื่อมาทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อากาศจากภายนอกเข้ามาในกรณีที่มีความดันในเรือนปั๊มต่ำกว่าความดันบรรยากาศ หรือทำหน้าที่ป้องกันการสึกหรอของปะเก็นและเพลลา (หรือปลอกเพลลา) เมื่อมีอนุภาคของแข็งปนอยู่ในน้ำที่สูบส่ง ปะเก็นอัดที่ใช้มักจะทำด้วยฝ้ายอัดชุบด้วยน้ำมัน จาระบี หรือ แกรไฟต์

2.3.6.2 ซีลทางกล (Mechanical seal) แบบที่ใช้กันทั่วไปจะประกอบด้วยชิ้นส่วนคือตัวจับสปริง, สปริง, แหวนหมุน, และแหวนอยู่กับที่ ซึ่งติดเข้ากับเรือนปั๊ม เมื่อเครื่องสูบน้ำทำงาน แหวนหมุน จะหมุนไปกับเพลลา และถูกกดเข้ากับแหวนอยู่กับที่ โดยสปริงทำให้เกิดการซีลของเพลลาที่เรือนปั๊ม

นอกจากส่วนประกอบที่สำคัญต่างๆข้างต้นแล้ว ปั๊มหลายโง่งยังมีอุปกรณ์อื่นอีก เช่น อุปกรณ์สมดุลแรงในแนวแกน (Axial thrust balancing device) เป็นต้น

2.4 เสดของระบบ

ในการศึกษาการทำงานของปั๊มจำเป็นต้องทราบทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับเสดซึ่งสามารถจำแนกได้หลายชนิด ดังนี้

2.4.1 เสดความดัน (Pressure Head; H_p)

ค่าความดันนอกจากจะบอกเป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่ เช่น N/m^2 หรือ psi ถ้าเป็นความดันของเหลวก็มักจะนิยมบอกเป็นแท่งความสูงของของเหลวที่จะก่อให้เกิดความดันที่กำหนดบนผิวน้ำซึ่งรองรับแท่งของเหลวนั้น ความดันซึ่งบอกเป็นแท่งความสูงของของเหลวนี้เรียกว่าเสดความดัน (Pressure Head) โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเสดความดัน คือ

$$H_p = \frac{P}{\gamma} = \frac{P}{\rho g} \quad (2.1)$$

โดย γ = น้ำหนักจำเพาะของของเหลว

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

2.4.2 เสดความเร็ว (Velocity Head; H_v)

ของเหลวที่ไหลในท่อหรือทางน้ำเปิดด้วยความเร็วใด ๆ นั้นมีพลังงานจลน์อยู่พลังงานส่วนนี้เมื่อบอกในรูปของเสด คือ

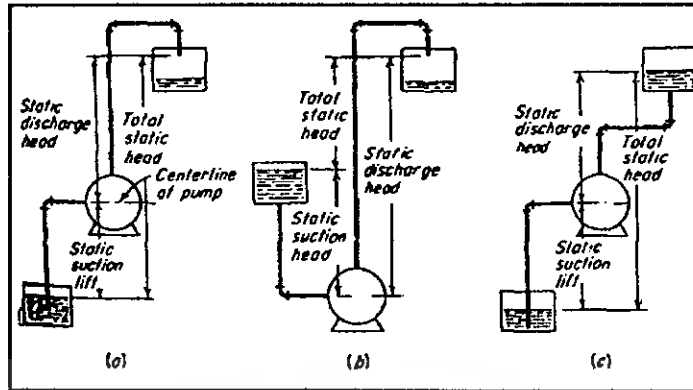
$$H_v = \frac{V^2}{2g} \quad (2.2)$$

เสดความเร็วอาจใช้จำกัดความอีกอย่างหนึ่งว่า เป็นความสูงของของเหลวที่ตกลงมาด้วยแรงดึงดูดของโลกจนได้ความเร็วเท่ากับความเร็วในการไหลของของเหลวนั้น

2.4.3 เสดสถิตย (Static Head; H_s)

ในการทำงานของปั๊มโดยทั่ว ๆ ไปของเหลวจะถูกเพิ่มพลังงานเพื่อให้มันไหลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งซึ่งอยู่สูงกว่า ดังรูปที่ 2.9 ความดันซึ่งคิดเป็นแท่งความสูงของของเหลวที่กระทำต่อศูนย์กลางของปั๊ม ทั้งทางด้านดูดและด้านจ่าย ในขณะที่ความเร็วของการไหลผ่านระบบเป็นศูนย์เรียกว่า เสดสถิต (Static Head)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 คำจำกัดความของเฮดสถิต (Static Head)

สำหรับเฮดสถิตรวม (Total Static Head) ก็คือผลต่างของเฮดสถิตด้านจ่ายกับเฮดสถิตด้านดูด ค่าดังกล่าวนี้เป็นเฮดต่ำสุดที่ปั๊มจะต้องเพิ่มให้แก่ของเหลวก่อนที่จะมีการไหลเกิดขึ้น

2.4.4 เฮดสูญเสียในระบบท่อ (Total Head Loss; $H_{loss,T}$)

ในขณะที่ของเหลวไหลผ่านระบบทั้งทางด้านดูดและทางด้านจ่ายพลังงานหรือเฮดในการไหลส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปเนื่องจากความฝืดระหว่างของเหลวกับผนังท่อและส่วนประกอบต่าง ๆ ซึ่งรวมเรียกว่า เฮดความฝืด (Friction Head)

ในระบบสูบน้ำทั่วไปการเสียดเนื่องจากความฝืดอาจเกิดขึ้นได้หลายจุด การเสียดทั้งหมดนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลผ่านระบบท่อ ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น

ซึ่ง เฮดสูญเสียในระบบท่อมืออยู่ 2 แบบ คือ การสูญเสียหลัก (Major loss, $H_{loss,p}$) และการสูญเสียรอง (minor loss, $H_{loss,m}$) โดยการสูญเสียรวม (Total Head Loss; $H_{loss,T}$) ก็คือการสูญเสียหลักรวมกับการสูญเสียรอง

$$H_{loss,T} = H_{loss,p} + H_{loss,m} \quad (2.3)$$

2.4.4.1 การสูญเสียหลัก (Major loss, $H_{loss,p}$) เป็นพลังงานที่สูญเสียไปกับความเสียดทานภายในท่อ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.4)

$$H_{loss,p} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $H_{loss,f}$ = การสูญเสียเนื่องจากความฝืด (m)

f = สัมประสิทธิ์ของความฝืด (ดูได้จากรูปที่ 6 ข. Moody Diagram)

L = ความยาวของท่อ (m)

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ (m)

V = ความเร็วของการไหลในท่อ (m/s)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m^2/s)

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความฝืด f จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วน $\frac{E}{D}$ และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re)

โดยที่ E = ความขรุขระสัมบูรณ์ (ดูได้จาก ตารางที่ 3 ข.)

ส่วนค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re) หาได้จากสมการที่ (2.5)

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.5)$$

โดยที่ Re = ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว (ดูได้จาก ตารางที่ 1 ข.)

μ = ค่าความหนืดสัมบูรณ์ (ดูได้จากตารางที่ 1 ข.)

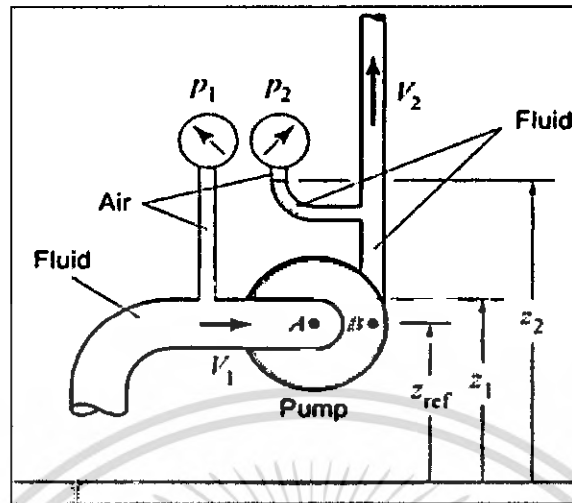
2.4.4.2 การสูญเสียรอง (minor loss, $H_{loss,m}$) เป็นการสูญเสียพลังงานเนื่องจากอุปกรณ์ในระบบท่อ เช่น ข้องอ ประตูน้ำ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.6)

$$H_{Loss,m} = K \frac{V^2}{2g} \quad (2.6)$$

โดยที่ $H_{loss,m}$ = การสูญเสียเนื่องจากอุปกรณ์ในระบบท่อ

K = สัมประสิทธิ์ของความต้านการไหล (ดูได้จาก ตารางที่ 2 ข.)

2.4.5 การคำนวณหาเสดของปั๊ม



รูปที่ 2.10 เสดของปั๊ม

จากรูปเป็นสมการพลังงานระหว่างจุด A และ B ได้

$$\left(\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z \right)_A + h_p = \left(\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z \right)_B \quad (2.7)$$

จากสมการที่ 2.8 เราไม่พิจารณาการสูญเสีย (Loss) ที่เกิดขึ้น ($V_A = V_B$) และ ($Z_A \approx Z_B$)

จะได้

$$h_p = \frac{(P_A - P_B)}{\gamma} \times 10^5 \quad (2.9)$$

โดยที่ P_A = ความดันที่อ่านจากเกจสุญญากาศ (Vacuum gauge, bar)

P_B = ความดันที่อ่านจากเกจวัดความดัน (Pressure gauge, bar)

γ = น้ำหนักจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิ 25 °C เท่ากับ 9779 (N/m³)

2.5 ประสิทธิภาพของปั๊มหอยโข่ง

2.5.1 ประสิทธิภาพของปั๊ม

ประสิทธิภาพของปั๊มเพียงตัวใดตัวหนึ่งในโครงการนี้สามารถหาได้จากสมการที่ 2.10

$$\eta = \frac{\text{Power Output}}{\text{Power Input}} \quad (2.10)$$

โดยที่ P_{input} = กำลังที่ต้องป้อนให้กับปั๊ม

P_{output} = กำลังที่ได้ออกมาจากปั๊ม

2.5.2 ประสิทธิภาพของปั๊มในระบบขนาน

ประสิทธิภาพของปั๊มในระบบขนานสามารถหาได้จากสมการที่ 2.11

$$\eta = \frac{\gamma Q h_{p(average)}}{P_{input 1} + P_{input 2}} \quad (2.11)$$

โดยที่ $h_{p(average)} = \frac{h_{p(pump1)} + h_{p(pump2)}}{2}$

$P_{input 1}$ = กำลังที่ป้อนให้กับปั๊มตัวที่ 1

$P_{input 2}$ = กำลังที่ป้อนให้กับปั๊มตัวที่ 2

2.5.3 ประสิทธิภาพของปั๊มในระบบอนุกรม

ประสิทธิภาพของปั๊มในระบบอนุกรมสามารถหาได้จากสมการที่ 2.12

$$\eta = \frac{\gamma Q h_{p2}}{P_{input 1} + P_{input 2}} \quad (2.12)$$

2.5.4 กำลังที่ป้อนให้แก่มอเตอร์

กำลังงาน หมายถึง อัตราการทำงานต่อหน่วยเวลา หน่วยของกำลังงานที่นิยมใช้ทั่วไป ได้แก่ แรงม้าและวัตต์ ซึ่ง 1 แรงม้า เท่ากับ 746 วัตต์

ซึ่ง P_{in} ที่ให้กับปั๊มหรือ P_{out} ของมอเตอร์นั้น คือกำลังเพลลาของมอเตอร์หาได้โดยการวัดค่าความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ แล้วคูณกับค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ (η_m) และค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ ($\cos \theta$) ดังสมการที่ 2.13

$$P_{in} = EI\eta_m \cos \theta \quad (2.13)$$

โดยที่ E = แรงดันไฟฟ้าที่อ่านจากโวลต์มิเตอร์

I = กระแสไฟฟ้าที่อ่านจากแอมป์มิเตอร์

ซึ่งเพาเวอร์แฟกเตอร์ ($\cos \theta$) ของมอเตอร์ไฟฟ้าเฟสเดียวสามารถหาได้จากสมการที่ 2.14

$$\eta \cos \theta \Big|_{\text{motor}} = \frac{P'}{EI'} \quad (2.14)$$

โดยที่ P' = กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ 1.5 แรงม้า ซึ่งเท่ากับ 1118.55 Watt

E' และ I' = แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าซึ่งอ่านได้จาก Name Plate ของปั๊ม

ซึ่งในโครงการนี้จะเท่ากับ 220 V และ 8 A ตามลำดับ ดังนั้น

$$\eta \cos \theta = \frac{1118.5}{1760} = 0.63553 \quad (2.15)$$

ซึ่งเป็นเพาเวอร์แฟกเตอร์ของปั๊มในโครงการนี้ ดังนั้น จากสมการที่ 2.13 จะได้

$$P_{in} = 0.63553EI \quad (2.16)$$

2.5.5 กำลังที่ได้ออกมาจากปั๊ม

$$P_{out} = \gamma Q h_p \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ Q = อัตราการไหล (m^3/s) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.18

h_p = เหน้ของปั้ม (m)

เมื่อ

$$Q = 2A_0 K \sqrt{2g \left(\frac{\rho_{Hg}}{\rho_{H2O}} - 1 \right) \frac{\Delta h (cm-Hg)}{100}} \quad (2.18)$$

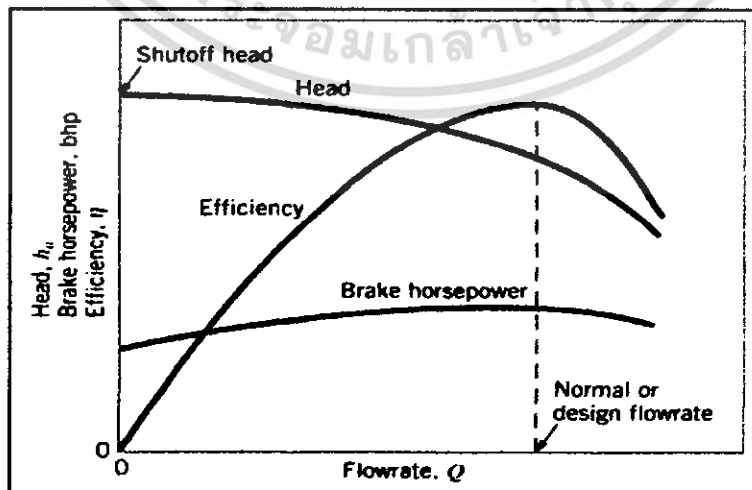
โดยที่ K = ค่าสัมประสิทธิ์การไหล (Flow coefficient) ของมาตรวัดอัตราการไหลแบบออร์ฟิซ เราเลือกใช้ค่า $K = 0.725$

$$A_0 = \text{พื้นที่ภายในของท่อ} = 0.001134 \text{ m}^2$$

2.6 สมรรถนะของปั้มหอยโข่ง

2.6.1 สมรรถนะของปั้มหอยโข่งตัวเดียว

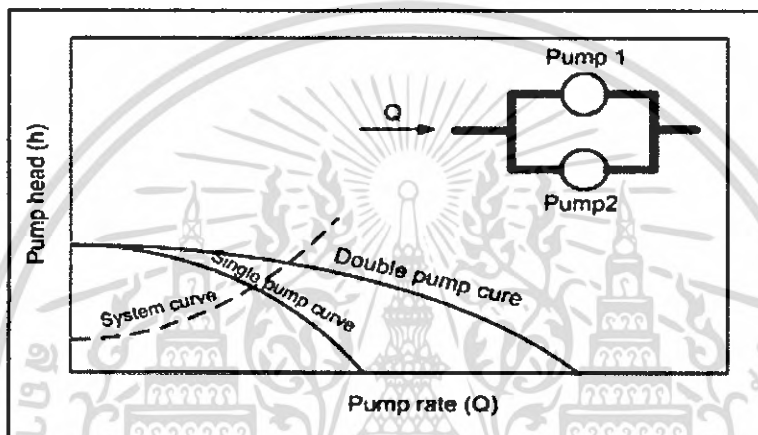
บริษัทผู้ผลิตปั้มจะทำการทดสอบสมรรถนะของปั้มที่ผลิตขึ้นแล้วเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเหน้เทียบกับอัตราการไหล, ประสิทธิภาพเทียบกับอัตราการไหล และกำลังที่ต้องใช้ขับปั้มเทียบกับอัตราการไหล จากรูปจะสังเกตเห็นว่าเมื่ออัตราการไหลเริ่มจากศูนย์ ประสิทธิภาพก็จะเริ่มจากศูนย์จนกระทั่งถึงค่าสูงสุดแล้วจะลดลง จุดให้ประสิทธิภาพสูงสุดเรียกว่า Best efficiency Point (BEP) อัตราการไหล ณ จุดนี้เรียกว่า Design flow rate ในการเลือกปั้มมาใช้ งานจะต้องเลือกที่อัตราการไหลและประสิทธิภาพสูงสุดหรือใกล้เคียง รูปที่ 2.11 กราฟแสดงสมรรถนะของปั้ม (Performance curve หรือ Characteristics curve)



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงสมรรถนะของปั้มหอยโข่ง

2.6.2 สมรรถนะของปั๊มหลายใบในระบบขนาน

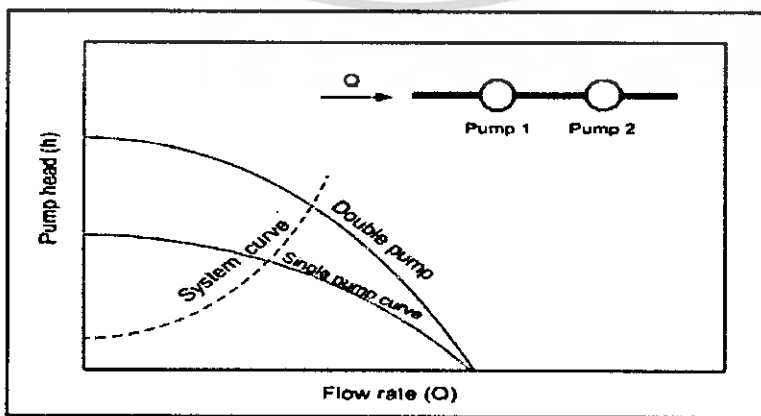
เมื่อปั๊ม 2 ตัวทำงานร่วมกันในระบบขนาน อัตราการสูบของระบบจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า ในกรณีที่เฮดเท่าเดิม แต่ความเป็นจริงแล้วอัตราการสูบจะไม่เป็นสองเท่า ทั้งนี้เพราะว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นการสูญเสียพลังงานในระบบท่อ ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยจนกระทั่งเฮดสูงกว่าเมื่อปั๊มทำงานเพียงตัวเดียว อัตราการสูบก็จะลดลงกว่าสองเท่าและอาจหาได้จากจุดตัดของกราฟแสดงสมรรถนะใหม่ของระบบผสมกับกราฟเฮดของระบบ (System Head Curve) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มหลายใบในระบบขนานในทางทฤษฎี

2.6.3 สมรรถนะของปั๊มหลายใบในระบบอนุกรม

เมื่อปั๊ม 2 ตัวทำงานร่วมกันในระบบอนุกรม เฮดของระบบจะเพิ่มขึ้นแต่จะไม่เท่ากับเฮดของปั๊มสองตัวมารวมกัน ในขณะที่อัตราการสูบจะเพิ่มขึ้นน้อยมาก ปั๊มในระบบอนุกรมนี้เหมาะกับการงานในลักษณะที่ต้องการความดันสูง เช่นในงานที่ต้องขนส่งน้ำไปยังที่สูง ซึ่งกราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มหลายใบในระบบอนุกรมในทางทฤษฎีนั้นได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มหลายใบในระบบอนุกรมในทางทฤษฎี

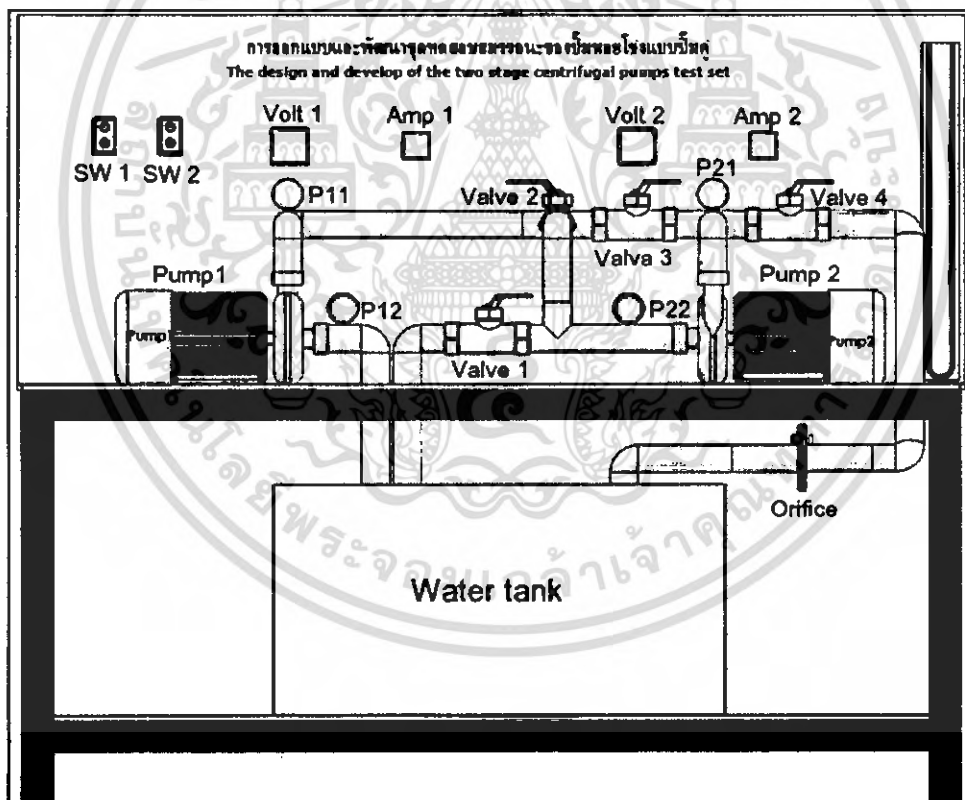
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ชุดทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งแบบปั๊มคู่

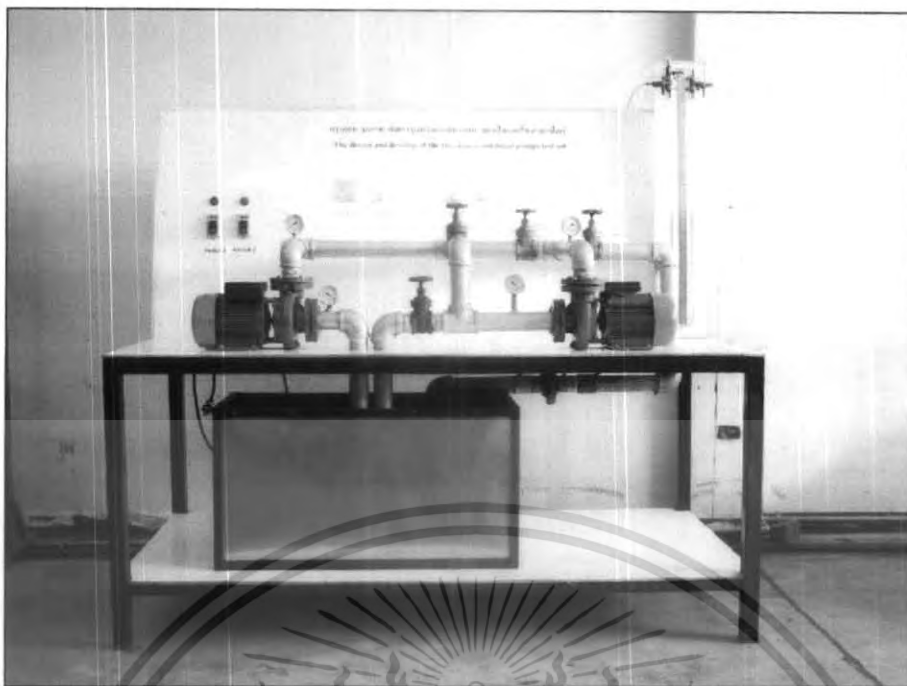
3.1 ชุดทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งและอุปกรณ์ประกอบชุดทดสอบ

ชุดทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งแบบปั๊มคู่ที่ได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้นมานี้สามารถทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งได้ทั้งในกรณีทดสอบปั๊มตัวเดียว, สองตัวต่อกันแบบขนาน หรืออนุกรม ซึ่งส่วนประกอบที่สำคัญประกอบด้วยปั๊มหอยโข่งขนาด 1.5 HP จำนวน 2 ตัว โดยติดตั้งเกทวาล์วจำนวน 4 ตัวเพื่อเป็นตัวปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลของของไหลให้เป็นระบบขนานหรืออนุกรม เกจสูญญากาศและเกจวัดความดันเพื่อวัดแรงดันทางด้านดูดและด้านจ่าย ตามลำดับ กำลังที่ใช้ขับเคลื่อนจะวัดโดยการใช้อะมิเตอร์และโวลต์มิเตอร์ แล้วคำนวณหาค่ากำลังขับเคลื่อนตามลำดับ การวัดอัตราการไหลจะใช้ออริฟิซ ส่วนประกอบที่สำคัญจะแสดงไว้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบและอุปกรณ์ต่างๆ ในชุดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายชุดทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งที่ได้จัดสร้างขึ้นมา

3.1.1 ปั๊มหอยโข่ง

ในโครงการนี้เลือกใช้ปั๊มหอยโข่ง ARENO™ ขนาด 1.5 แรงม้า, เส้นเท่ากับ 17 เมตร และ อัตราการไหล 365 ลิตรต่อนาที โดยใช้กระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้าขนาด 8 แอมป์ และ 220 โวลต์ ตามลำดับ จำนวน 2 ตัว ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ปั๊มหอยโข่งที่ใช้ในชุดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 อุปกรณ์ในการวัดอัตราการไหล

ในโครงการนี้เลือกติดตั้งแผ่นออริฟิซลงในชุดทดสอบเพื่อใช้ในการวัดอัตราการไหล โดยจะอ่านค่าผ่านทางระดับความแตกต่างของของเหลวภายในมานอมิเตอร์ ซึ่งแผ่นออริฟิซที่ใช้ในชุดทดสอบเป็นแบบที่มีรูจุดศูนย์กลางร่วม (Concentric) รูปแบบที่มีศูนย์กลางร่วมถือเป็นรูปแบบที่นิยมใช้ที่สุดมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ขอบคม (Sharp edged) โดยรูออริฟิซทางด้านที่ของไหลไหลเข้าจะเรียบเสมอกันแต่ทางด้านออกจะผายออกประมาณ 45 องศา เพื่อลดความเสียดทานอันจะทำให้สูญเสียความดันลดลงให้เหลือเท่าที่จำเป็นสำหรับการวัด

อย่างไรก็ตาม ขนาดของออริฟิซ จะบอกเป็นอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูออริฟิซกับเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อจึงเรียกว่า อัตราส่วนเบต้า (β ratio) ค่าของเบต่านี้จะมีขีดจำกัด เพื่อให้การวัดที่มีความเที่ยงตรง พบว่า มีค่าอยู่ระหว่าง 0.15 ถึง 0.75 สำหรับของเหลว

การออกแบบแผ่นออริฟิซ

แผ่นออริฟิซที่ใช้ทำจาก Stainless steel โดยใช้ลักษณะพื้นฐานของออริฟิซตามมาตรฐาน ISO 5167 โดยการออกแบบขนาดของออริฟิซจะบอกเป็นค่าของ β ในกรณีวัดของเหลวค่า β จะอยู่ระหว่าง 0.2-0.75 ในการสร้างชุดทดสอบนี้ได้เลือกใช้ออริฟิซที่มีค่า $\beta = 0.75$

โดยท่อที่ใช้ในชุดทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 นิ้ว (50.8 มม.) หาขนาดของช่องออริฟิซได้จากสมการ

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (3.1)$$

$$d = \beta \times D \quad (3.2)$$

โดยที่ β = อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรูออริฟิซกับเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูแผ่นออริฟิซ

ความหนาของแผ่นออริฟิซ (E)

จากตารางที่ 4ข. ค่าความหนาของออริฟิซ ขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อที่ใช้ในชุดทดสอบ ซึ่งท่อขนาด 2 นิ้ว สามารถเลือกได้ระหว่าง (0.115 นิ้ว-0.130 นิ้ว) หรือ (2.921 มม. - 3.302 มม.) เลือกค่าที่เหมาะสม คือ 0.125 นิ้ว (3.175 มม.)

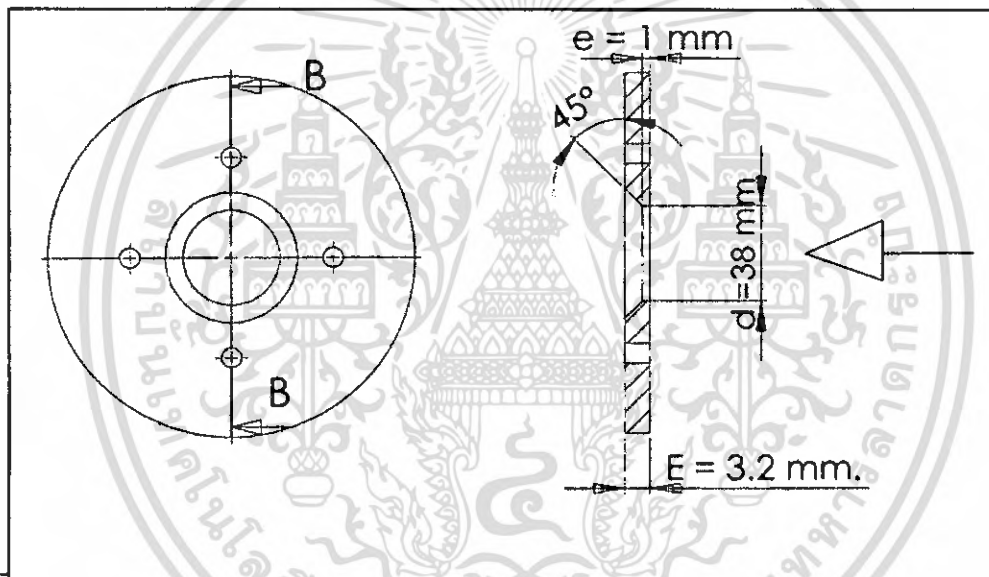
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาของขอบในออร์ฟิซ (e)

ความหนาของขอบในของแผ่นออร์ฟิซ (e) จะต้องมีค่าไม่เกิน $0.02D$ หรือ $d/8$ แล้วแต่ค่าไหนจะน้อยกว่า จึงเลือกค่านั้นเป็นค่าสูงสุดของความหนาขอบในของออร์ฟิซ ซึ่งคำนวณจะได้ค่า e คือ

$$\begin{aligned} e &\leq 0.02D \\ e &\leq 0.02 \times 50.4 \\ e &\leq 1.008 \end{aligned}$$

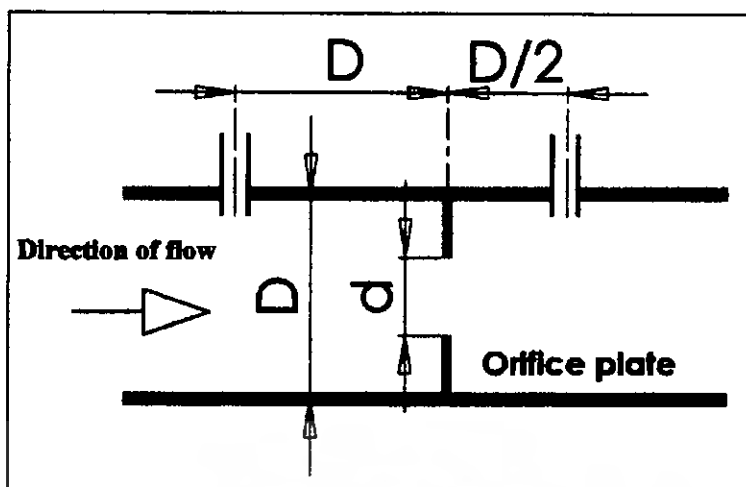
ดังนั้น ความหนาของขอบในออร์ฟิซ จึงใช้ 1 มม. ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงขนาดความหนาของแผ่นออร์ฟิซในโครงการนี้

จุดสำหรับวัดความดันแตกต่างกัน

ในการใช้งานแผ่นออร์ฟิซสำหรับวัดอัตราการไหลจะต้องมีจุดต่อสำหรับวัดความดันที่แตกต่างกันระหว่างทางท่อด้านหน้า (Upstream) และด้านหลัง (Downstream) อย่างน้อยด้านละหนึ่งจุด เพื่อใช้สำหรับต่อไปยังอุปกรณ์วัดความดันต่างๆ ที่ใช้วัดความดันแตกต่างกันที่เกิดจากแผ่นออร์ฟิซ (ในชุดทดสอบนี้เลือกใช้ทฤษฎี Vena contracta Taps) จุดที่ต่อในลักษณะนี้จะอยู่ที่ท่อซึ่งวัดจากด้านหน้าของแผ่นออร์ฟิซออกไปที่ระยะ D และด้านหลังของแผ่นออร์ฟิซออกไปที่ ระยะ $0.5D$ ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงตำแหน่งวัดค่าความดันตกต่าง

3.1.3 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดอัตราการไหล

การสอบเทียบออริฟิซในโรงงานนี้ใช้วิธีการชั่งน้ำหนัก (Weighing method) ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน Japanese Industrial Standard (J.I.S.) โดยแผ่นออริฟิซในโรงงานนี้ใช้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะเท่ากับ 38 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.6 แสดงชุดออริฟิซหลังจากการติดตั้งลงในชุดทดสอบเรียบร้อยแล้ว

อุปกรณ์ในการสอบเทียบออริฟิซ

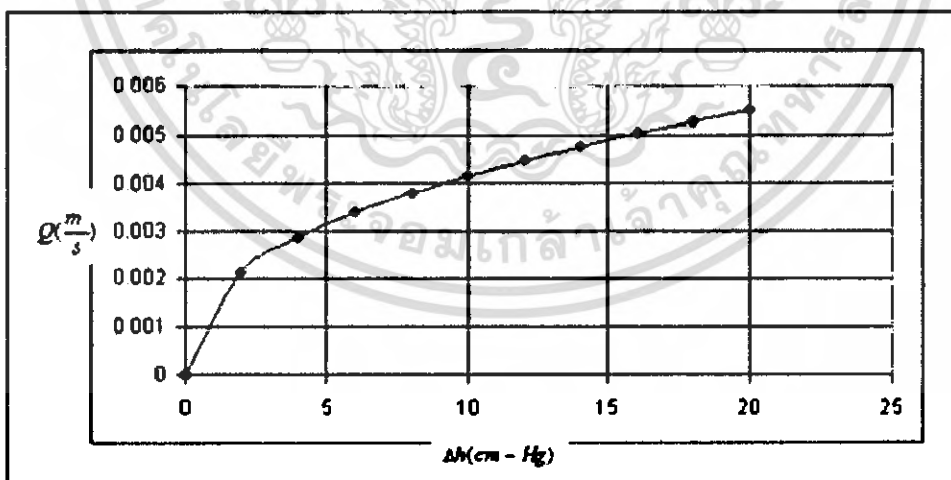
1. เครื่องชั่งน้ำหนัก
2. ถังรองน้ำ
3. นาฬิกาจับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนในการสอบเทียบออริฟิซ

1. จัดเตรียมอุปกรณ์ในการสอบเทียบ ซึ่งประกอบไปด้วย เครื่องชั่งน้ำหนัก ถังรองน้ำ และ นาฬิกาจับเวลา
2. เปิดสวิตช์ชุดทดสอบให้ปัมเริ่มทำงานเพียง 1 ตัว
3. ปรับความดันตกคร่อมระหว่างแผ่นออริฟิซ ซึ่งทำได้โดยการควบคุมอัตราการไหลผ่านทางเกวาล์วตัวที่ 4 แล้วอ่านค่าความดันผ่านทางมานอมิเตอร์
4. ในการทดลองครั้งแรกได้เลือกควบคุมให้ค่าความดันมีค่าเท่ากับ 2 cm-Hg แล้วทำการรองน้ำที่ผ่านออกมาจากแผ่นออริฟิซ โดยใช้การจับเวลาครั้งละ 10 วินาที
5. นำน้ำที่ได้จากขั้นตอนที่ 4 ไปชั่งน้ำหนัก แล้วจดบันทึกค่าที่ได้เอาไว้ โดยทำเช่นนี้ 5 ครั้ง แล้วนำผลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยออกมา
6. ทำการปรับวาล์วเพื่อเพิ่มความดันตกคร่อมระหว่างแผ่นออริฟิซ ให้เป็น 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 และ 20 cm-Hg ตามลำดับ แล้วย้อนกลับไปทำตามขั้นตอนที่ 4 อีกครั้ง โดยทำงานกว่าจะได้ค่าตามที่ต้องการครบทุกค่า

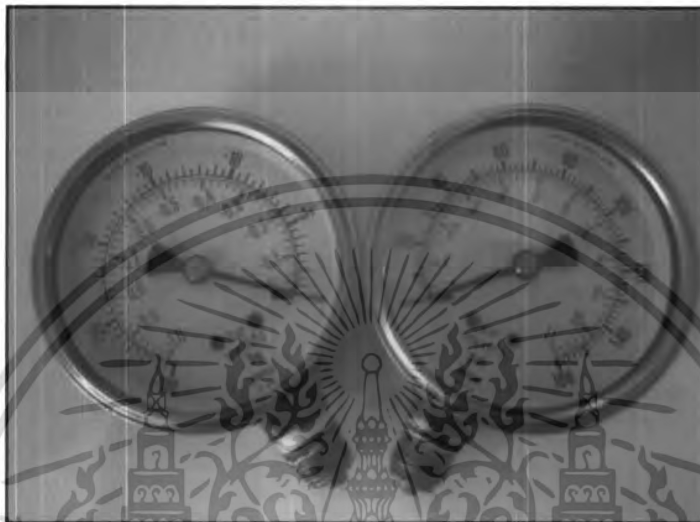
เมื่อทำการทดลองจนครบทุกค่าความดันตามที่ต้องการแล้ว นำผลที่ได้จากการทดลองมาหาความสัมพันธ์ระหว่าง Δh ที่มานอมิเตอร์ กับ Q โดยใช้ระเบียบวิธี Least - Squares Regression แบบ Linearization of Nonlinear Relationships จากวิชา Engineering Computation ได้สมการความสัมพันธ์เป็นสมการกำลังสอง $\bar{y} = 0.001640\bar{x}^{(0.40353)}$ จากนั้นนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์โดยให้ Δh เป็นแกน x และ Q เป็นแกน y ได้ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งเมื่อทราบ Δh ที่มานอมิเตอร์ ก็จะทราบค่าอัตราการไหลของน้ำจากตารางหรือจากกราฟของการสอบเทียบออริฟิซ



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงผลที่ได้จากการสอบเทียบออริฟิซ

3.1.4 อุปกรณ์วัดความดัน

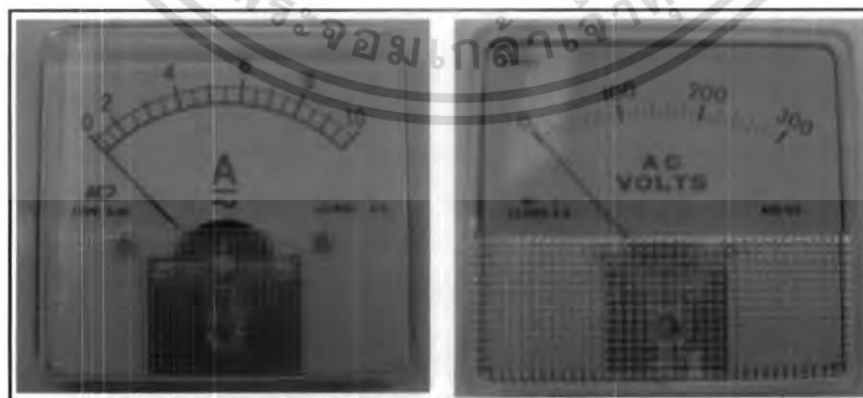
ในการที่จะคำนวณเพื่อที่จะหาประสิทธิภาพของปั๊มหอยโข่งจากสมการในบทที่ผ่านมานั้น จำเป็นที่จะต้องทราบค่าแรงดันทั้งทางด้านดูดและจ่ายของปั๊มทั้งสองตัว ในโครงการนี้เลือกที่จะใช้ เกจสูญญากาศ (Vacuum gauge) และเกจวัดความดัน (Pressure gauge) ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งจะถูกติดตั้งไว้ที่ทางด้านดูด และทางด้านจ่ายของปั๊มทั้งสองตัว ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 เกจสูญญากาศและเกจวัดความดันที่ถูกติดตั้งลงในชุดทดสอบ

3.1.5 อุปกรณ์วัดกำลังของมอเตอร์

ในการวัดกำลังที่มอเตอร์ส่งให้แก่ปั๊ม เพื่อที่จะนำมาคำนวณหากำลังที่ต้องป้อนให้กับปั๊มจากสมการในบทที่ผ่านมานั้นทำได้โดยการอ่านค่ากระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้าผ่านทางแอมป์มิเตอร์และโวลท์มิเตอร์ ตามลำดับ ซึ่งได้ติดตั้งไว้ในชุดทดสอบ โดยถูกต่อเข้ากับมอเตอร์ของปั๊มทั้ง 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.9

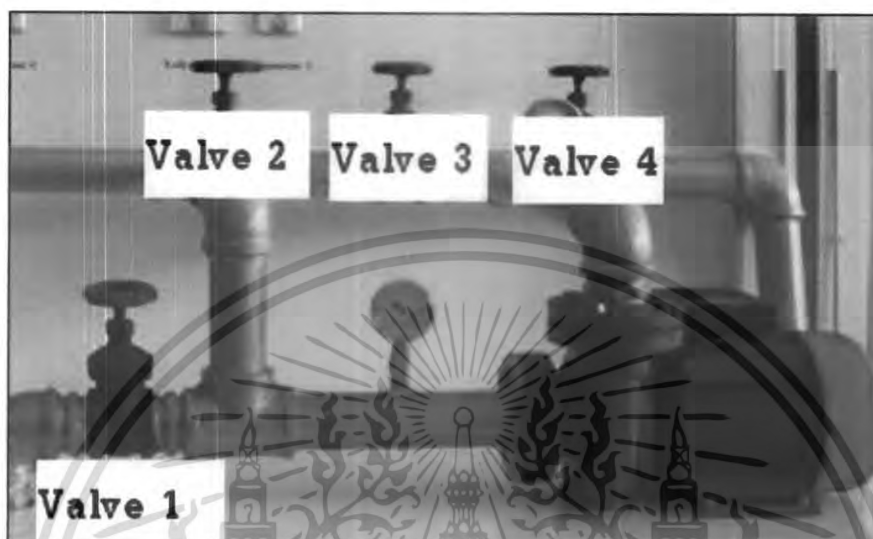


รูปที่ 3.10 แอมป์มิเตอร์และ โวลท์มิเตอร์ที่ถูกติดตั้งลงบนชุดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีการทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่ง

การทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งด้วยชุดทดสอบที่ได้ออกแบบจัดทำขึ้นมา สามารถใช้ทดสอบปั๊มได้ทั้งในกรณีทดสอบสมรรถนะของปั๊มตัวเดียว, ปั๊มในระบบขนาน และปั๊มในระบบอนุกรม โดยมีวิธีการทดสอบในแต่ละระบบดังนี้

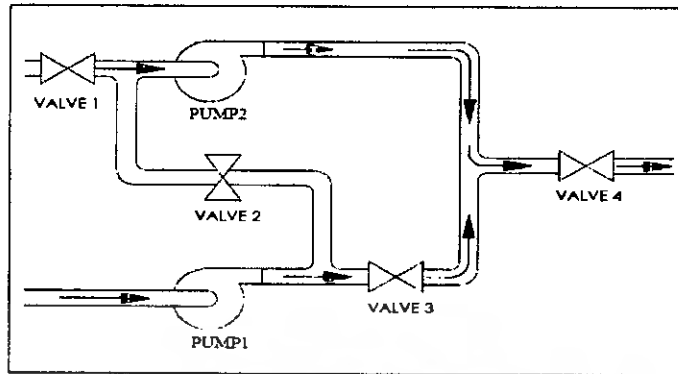


รูปที่ 3.7 แสดงตำแหน่งของเกทวาล์ว

3.2.1 การทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งตัวเดียว (ปั๊มตัวที่ 1)

1. จากรูปที่ 3.7 เปิดเกทวาล์วตัวที่ 1 และ 2 ปิดเกทวาล์วตัวที่ 3 และ 4 จนสุด
2. เปิดสวิตซ์ให้ปั๊มตัวที่ 1 เริ่มทำงาน
3. บันทึกค่าความดันด้านดูด, ด้านจ่าย, อัตราการไหล, กระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้า
4. เมื่อบันทึกค่าต่างๆ จนครบแล้วให้ค่อยๆ เปิดเกทวาล์วตัวที่ 4 เพิ่มขึ้นครึ่งละครึ่งรอบ แล้วกลับไปบันทึกเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 3 ทำเช่นนี้จนกระทั่งเกทวาล์วตัวที่ 4 ถูกเปิดจนสุด
5. เมื่อได้ค่าต่างๆ ที่ต้องการจนครบแล้วให้ปิดเกทวาล์วทั้ง 4 ตัวลงให้สนิท แล้วปิดสวิตซ์เพื่อหยุดการทำงานของปั๊มหอยโข่ง
6. นำค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบ ไปคำนวณหาประสิทธิภาพของปั๊ม และเขียนกราฟแสดงคุณลักษณะของปั๊มหอยโข่งต่อไป

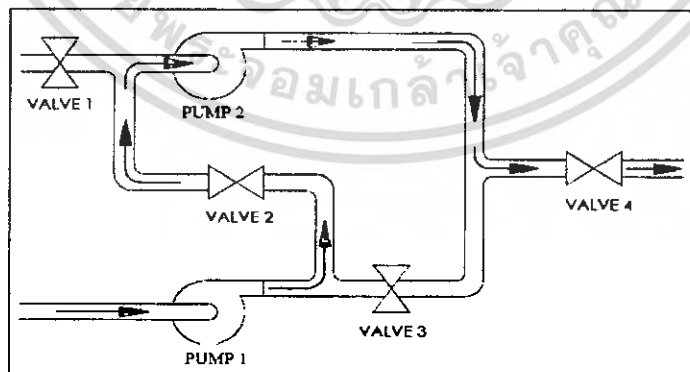
3.2.2 การทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งในระบบขนาน



รูปที่ 3.8 แสดงการต่อปั๊มแบบขนาน

1. จากรูปที่ 3.8 ปิดเกตวาล์วตัวที่ 1 และ 3 ปิดเกตวาล์วตัวที่ 2 และ 4 จนสุด
2. เปิดสวิตช์ให้ปั๊มตัวที่ 1 และ 2 เริ่มทำงาน
3. บันทึกค่าความดันด้านดูด, ด้านจ่าย, อัตราการไหล, กระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้า
4. เมื่อบันทึกค่าต่างๆ จนครบแล้วให้ค่อยๆ เปิดเกตวาล์วตัวที่ 4 เพิ่มขึ้นครั้งละครึ่งรอบ แล้วกลับไปบันทึกเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 3 ทำเช่นนี้จนกระทั่งเกตวาล์วตัวที่ 4 ถูกเปิดจนสุด
5. เมื่อได้ค่าต่างๆ ที่ต้องการจนครบแล้วให้ปิดเกตวาล์วทั้ง 4 ตัวลงให้สนิท แล้วปิดสวิตช์เพื่อหยุดการทำงานของปั๊มหอยโข่ง
6. นำค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบไปคำนวณหาประสิทธิภาพของปั๊ม และเขียนกราฟแสดงคุณลักษณะของปั๊มหอยโข่งต่อไป

3.2.3 การทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งในระบบอนุกรม



รูปที่ 3.10 แสดงการต่อปั๊มแบบอนุกรม

3.2.3 การทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งในระบบอนุกรม

1. จากรูปที่ 3.10 ปิดเกทวาล์วตัวที่ 1,3 และ 4 เปิดเกทวาล์วตัวที่ 2 โดยเปิดจนสุด
2. เปิดสวิตซ์ให้ปั๊มตัวที่ 1 และ 2 เริ่มทำงาน
3. บันทึกค่าความดันด้านดูด, ด้านจ่าย, อัตราการไหล, กระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้า
4. เมื่อบันทึกค่าต่างๆ จนครบแล้วให้ค่อยๆ เปิดเกทวาล์วตัวที่ 4 เพิ่มขึ้นครึ่งละครึ่งรอบ แล้วกลับไปบันทึกเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 3 ทำเช่นนี้จนกระทั่งเกทวาล์วตัวที่ 4 ถูกเปิดจนสุด
5. เมื่อได้ค่าต่างๆ ที่ต้องการจนครบแล้วให้ปิดเกทวาล์วทั้ง 4 ค้างไว้ 5 นาที แล้วปิดสวิตซ์ เพื่อหยุดการทำงานของปั๊มหอยโข่ง
6. นำค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบไปคำนวณหาประสิทธิภาพของปั๊ม และเขียนกราฟ แสดงคุณลักษณะของปั๊มหอยโข่งต่อไป



บทที่ 4

ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบจะนำเสนอในรูปแบบของตารางซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ก. จากนั้นจะได้นำข้อมูลจากตารางมาแสดงในรูปของกราฟต่างๆ ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดสอบปั๊มตัวที่ 1

จากการทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งโดยอ้างอิงจากปั๊มตัวที่ 1 ผลที่ได้คือ

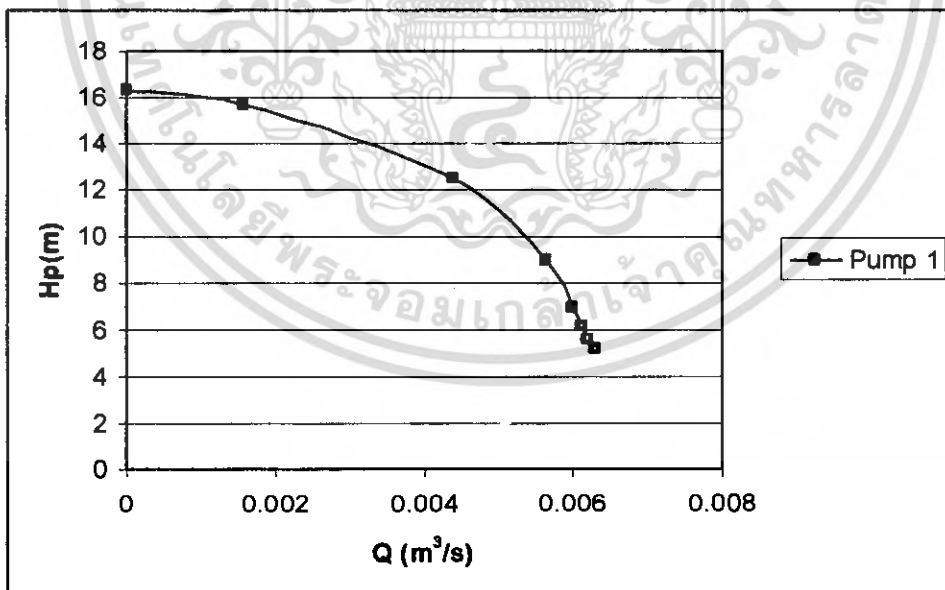
อัตราการไหลสูงสุดมีค่าเท่ากับ 363.018 L/min

เฮดปั๊มสูงสุด เท่ากับ 16.36 m

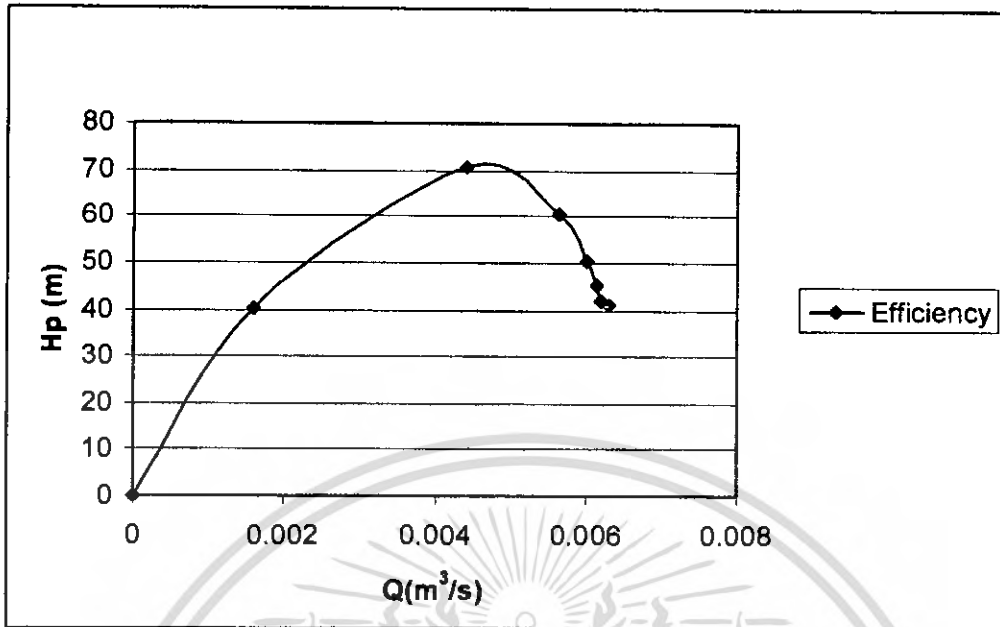
ประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุดของปั๊มมีค่าเท่ากับ 79.64 %

กำลังที่ป้อนแก่ปั๊มมีค่าเท่ากับ 0.764 kW

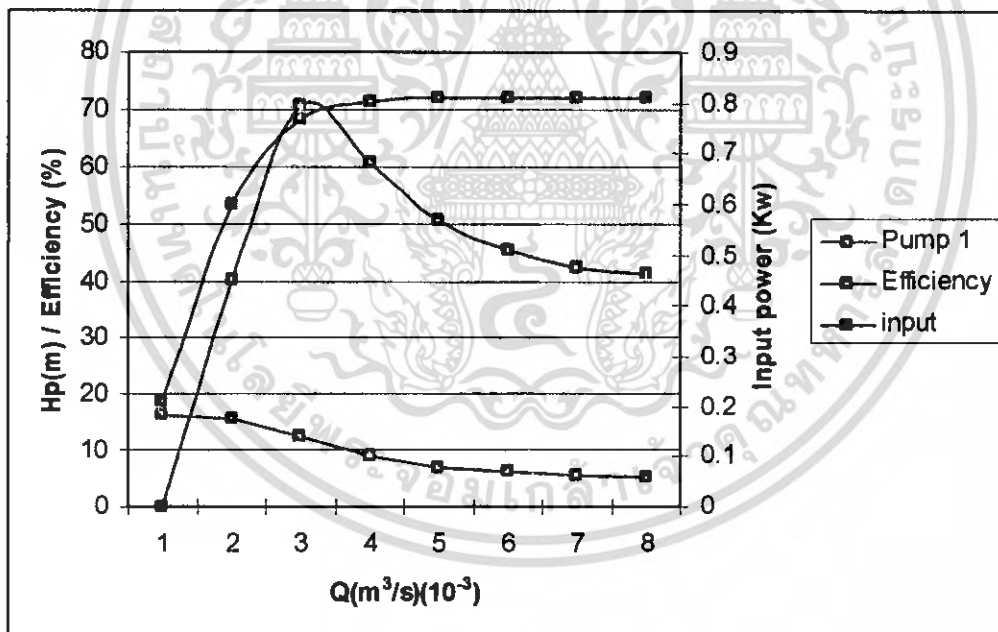
ในรูปที่ 4.1 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฮดของปั๊ม (h_p) กับอัตราการไหล (Q) ของปั๊มตัวที่ 1 รูปที่ 4.2 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ (η) กับอัตราการไหล (Q) ของปั๊มตัวที่ 1 และในรูปที่ 4.3 เป็นกราฟแสดงสมรรถนะ (Performance curve) ของปั๊มตัวที่ 1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฮดของปั๊ม (h_p) กับอัตราการไหล (Q) ของปั๊มตัวที่ 1



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ (η) และ อัตราการไหล (Q) ของปั๊มตัวที่ 1



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มตัวที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดสอบปั๊มตัวที่ 2

จากการทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งโดยอ้างอิงจากปั๊มตัวที่ 2 ผลที่ได้ คือ

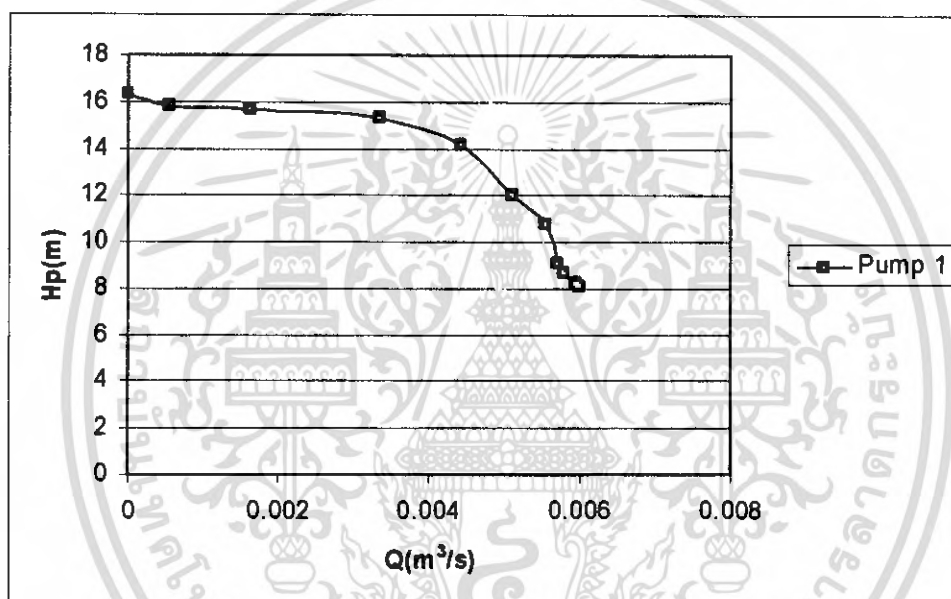
อัตราการไหลสูงสุดมีค่าเท่ากับ 362 L/min

เสดปั๊มสูงสุด เท่ากับ 16.23 m

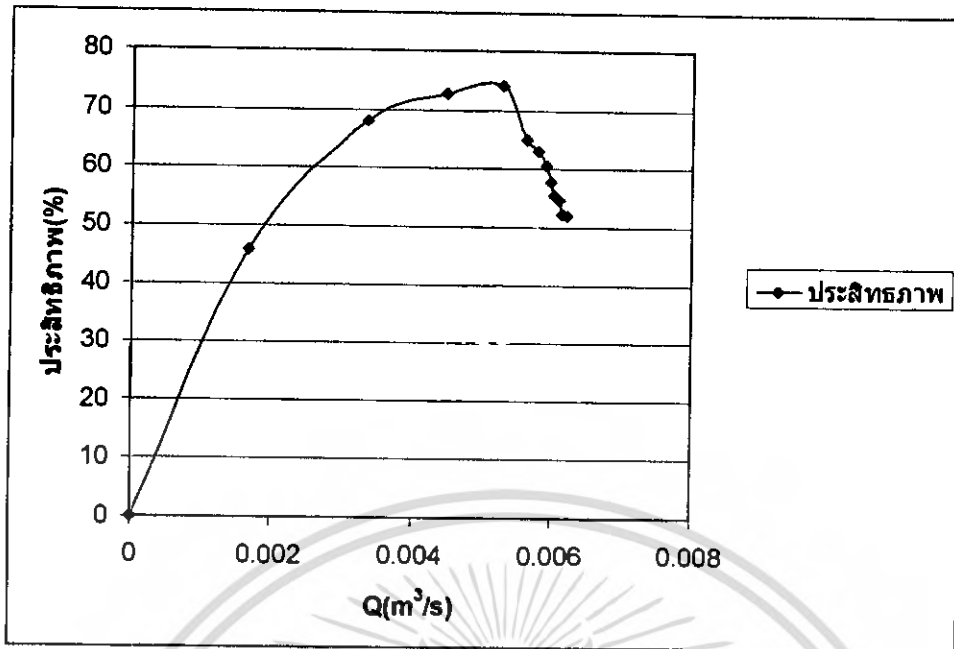
ประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุดของปั๊มมีค่าเท่ากับ 79 %

กำลังที่ป้อนแก่ปั๊มมีค่าเท่ากับ 0.760 kW

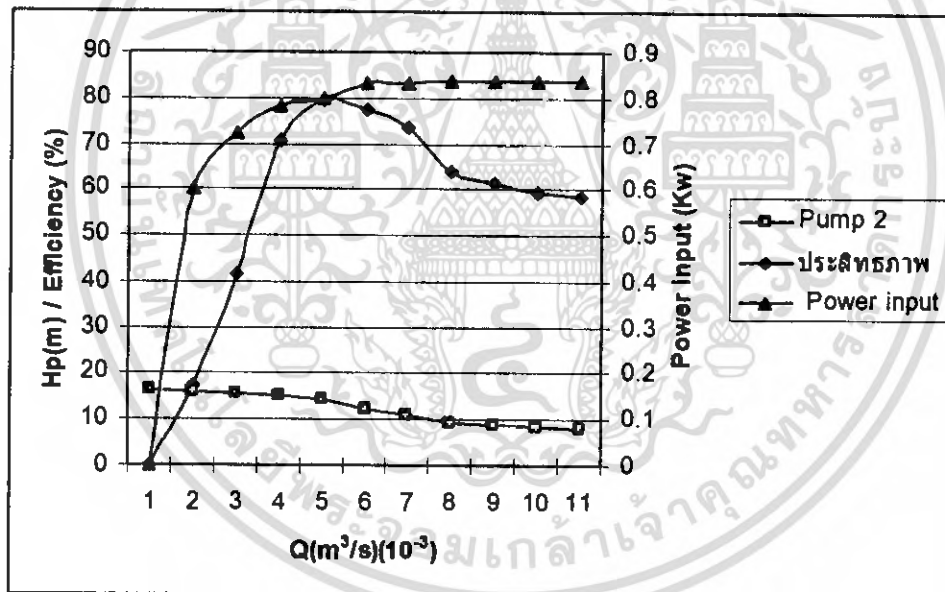
ในรูปที่ 4.4 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเสดของปั๊ม (h_p) กับอัตราการไหล (Q) ของปั๊มตัวที่ 2 รูปที่ 4.5 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ (η) กับอัตราการไหล (Q) ของปั๊มตัวที่ 2 และรูปที่ 4.6 เป็นกราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มตัวที่ 2



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเสดของปั๊ม (h_p) กับ อัตราการไหล (Q) ของปั๊มตัวที่ 2



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ (η) กับ อัตราการไหล (Q) ของปั๊มตัวที่ 2



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดสอบปั๊มในระบบขนาน

จากการทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งในระบบขนาน ผลที่ได้ คือ

อัตราการไหลสูงสุดมีค่าเท่ากับ 593.44 L/min

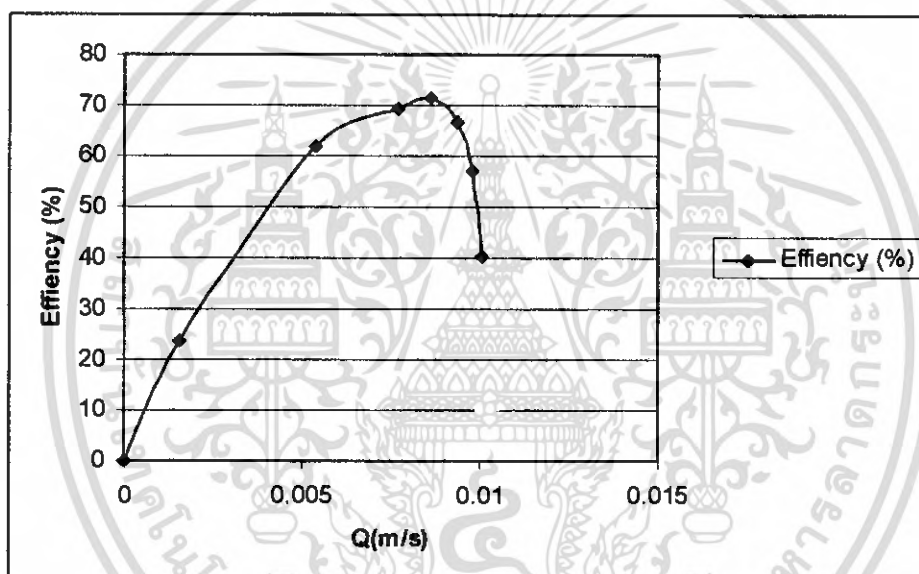
เสดปั๊มสูงสุด เท่ากับ 16.5 m

ประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุดของปั๊มมีค่าเท่ากับ 70.2 %

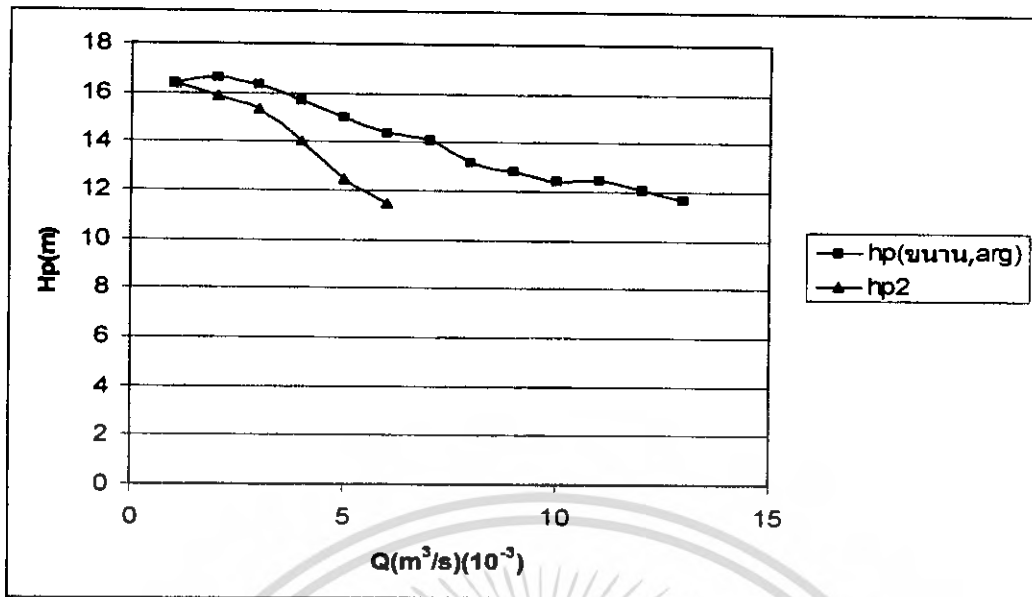
กำลังที่ป้อนแก่ปั๊มตัวที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.750 kW

กำลังที่ป้อนแก่ปั๊มตัวที่ 2 มีค่าเท่ากับ 0.824 kW

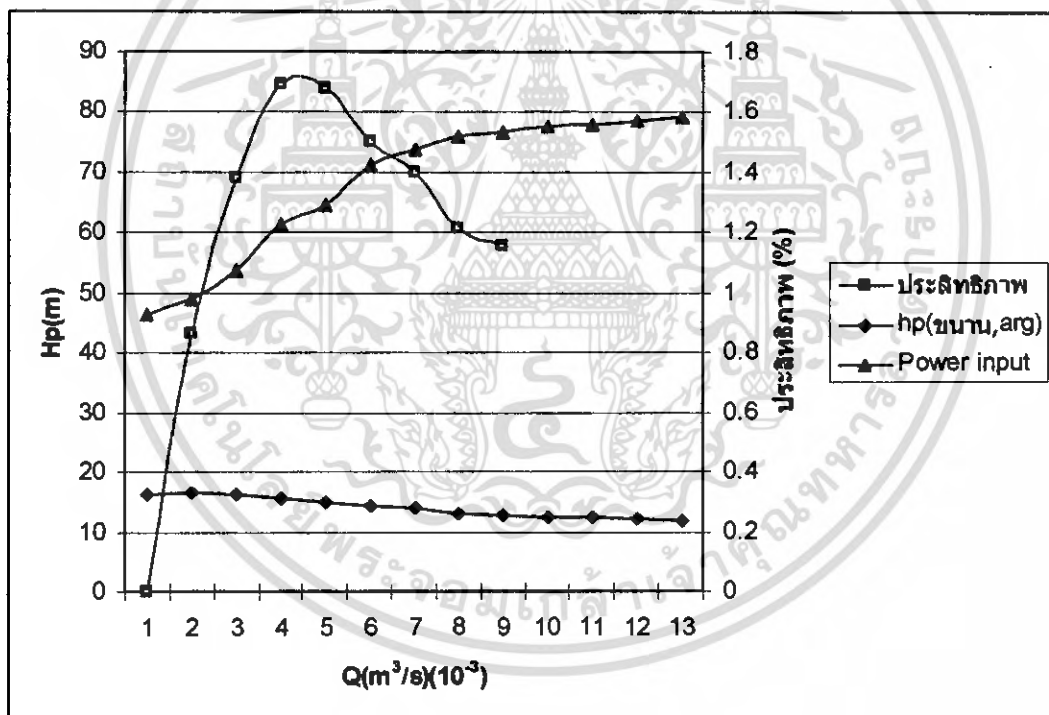
รูปที่ 4.7 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ (η) กับอัตราการไหล (Q) ของปั๊มในระบบขนาน รูปที่ 4.8 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างการต่อปั๊มแบบขนานกับปั๊มตัวเดียวและรูปที่ 4.9 เป็นกราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มในระบบขนาน



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ (η) กับ อัตราการไหล (Q) ของปั๊มในระบบขนาน



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างการต่อปั๊มแบบขนานกับการใช้ปั๊มตัวเดียว



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มในระบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการทดสอบปั๊มในระบบอนุกรม

จากการทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งในระบบอนุกรม ผลที่ได้ คือ

อัตราการไหลสูงสุดมีค่าเท่ากับ 375.92 L/min

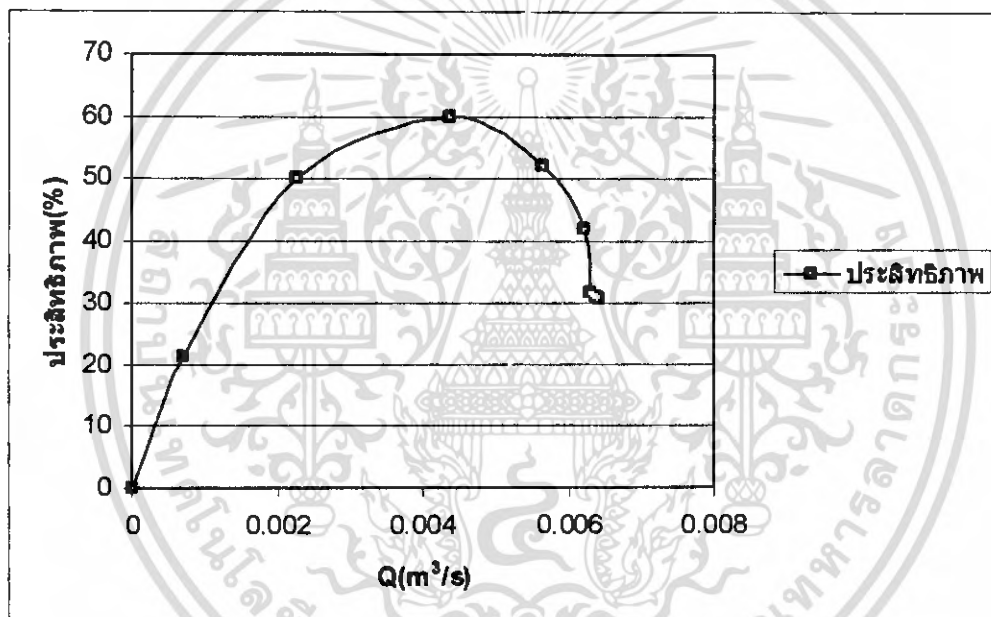
เฮดปั๊มสูงสุด เท่ากับ 30.067 m

ประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุดของปั๊มมีค่าเท่ากับ 70.2 %

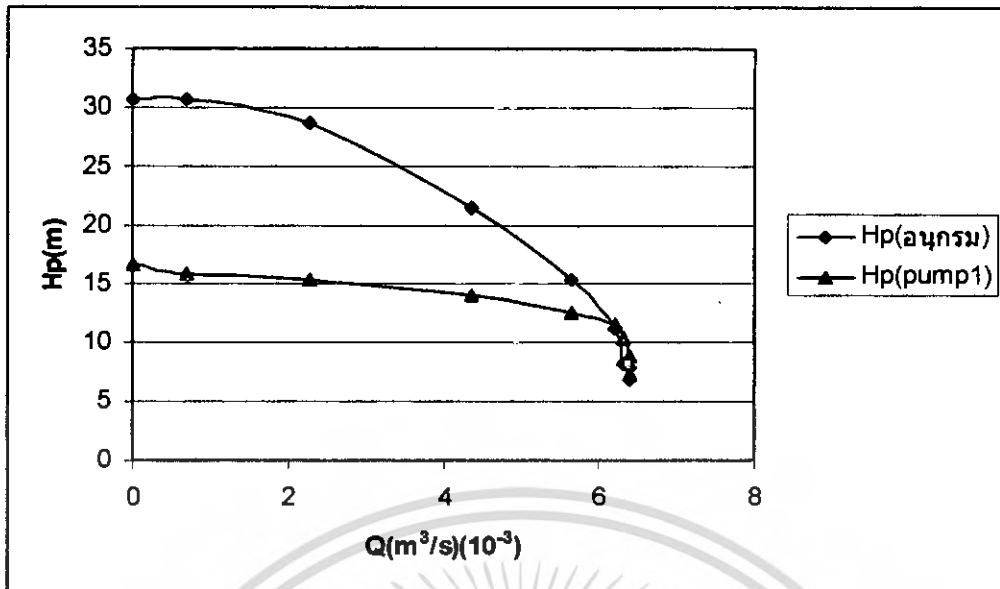
กำลังที่ป้อนแก่ปั๊มตัวที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.768 kW

กำลังที่ป้อนแก่ปั๊มตัวที่ 2 มีค่าเท่ากับ 0.782 kW

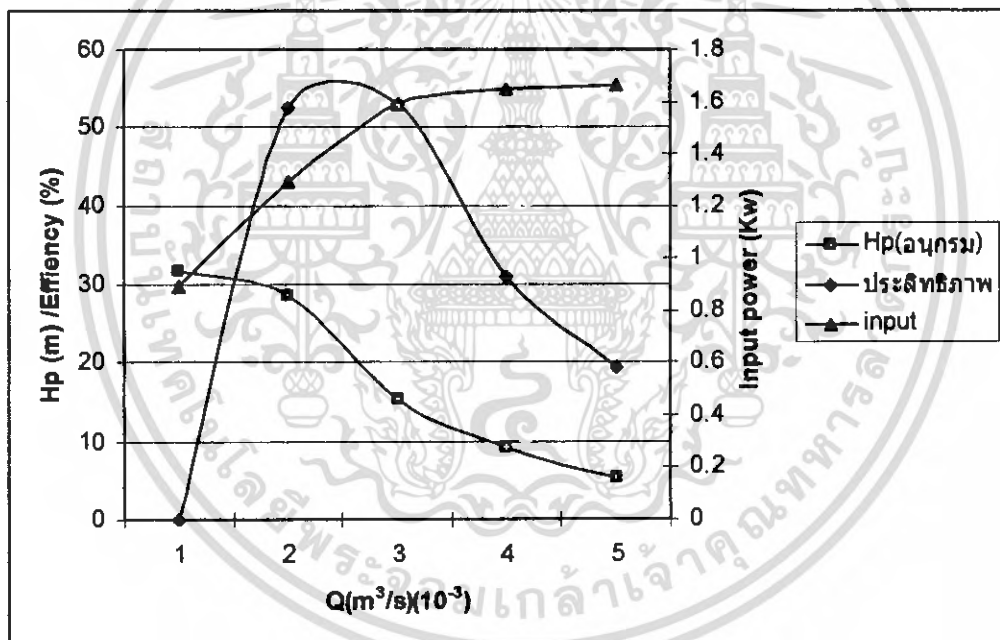
รูปที่ 4.10 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ (η) กับอัตราการไหล (Q) ของปั๊มในระบบอนุกรม รูปที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างการต่อปั๊มแบบอนุกรมกับปั๊มตัวเดียว และรูปที่ 4.8 เป็นกราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มในระบบอนุกรม



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ (η) กับ อัตราการไหล (Q) ของปั๊มในระบบอนุกรม



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างการต่อปั๊มแบบอนุกรมกับการใช้ปั๊มตัวเดียว



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มในระบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและวิจารณ์การทดสอบ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

1. เมื่อปั๊มสองตัวทำงานร่วมกันแบบขนานจะให้อัตราการไหลมากกว่าปั๊มตัวเดียว ในขณะที่แรงดันเสดจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับปั๊มตัวเดียว ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการทดสอบนั้นสอดคล้องกับผลทางทฤษฎี โดยผลจากการทดสอบปั๊มระบบขนานในโครงการนี้พบว่าอัตราการไหลจะมากกว่าปั๊มตัวเดียวอยู่ประมาณ 39% ดังนั้น จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าปั๊มในระบบขนานจะเหมาะสมกับงานที่ต้องการอัตราการไหลมากๆ เช่น งานขนส่งของเหลวในระยะทางไกลๆ เป็นต้น

2. เมื่อปั๊มสองตัวทำงานร่วมกันแบบอนุกรมจะให้แรงดันเสดมากกว่าปั๊มตัวเดียว ในขณะที่อัตราการไหลจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับปั๊มตัวเดียว ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการทดสอบนั้นสอดคล้องกับผลทางทฤษฎี โดยผลจากการทดสอบปั๊มระบบอนุกรมในโครงการนี้พบว่าแรงดันเสดจะมากกว่าปั๊มตัวเดียวประมาณ 47% ดังนั้น จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าปั๊มในระบบอนุกรมจะเหมาะสมกับงานที่ต้องการแรงดันเสดมากๆ เช่น งานขนส่งของเหลวไปยังที่สูง เป็นต้น

5.2 วิจารณ์ผลการทดสอบ

1. ในการหา Power input ของปั๊มเราไม่สามารถใช้สมการ $P = T\omega$ เนื่องจาก โครงสร้างของปั๊มกับมอเตอร์จะรวมอยู่ในชุดเดียวกัน ซึ่งไม่สามารถออกมาวัดหาทอร์กได้ ทำให้ต้องหา Power input ของปั๊ม โดยการหา Power input ของมอเตอร์แล้วนำไปคูณกับค่าประสิทธิภาพและค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ ($\cos\theta$) ของมอเตอร์ เพื่อให้เป็นค่า Power input ของปั๊มซึ่งค่าจะคลาดเคลื่อนไป

2. ในการอ่านค่าความดันโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ด้านดูดเข็มของเกจสุญญากาศ (Vacuum gauge) จะสั้นจึงทำให้ค่าที่อ่านได้นั้นคลาดเคลื่อนไปบ้างถึงแม้จะทำการทดสอบหลายครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยก็ตาม

3. เนื่องจาก โวลท์มิเตอร์ และแอมป์มิเตอร์ ที่ใช้ในโครงการนี้เป็นแบบ Analog ดังนั้นค่าที่อ่านได้อาจไม่ค้อยเที่ยงตรง

บรรณานุกรม

- (1) วีรศักดิ์ ทรัพย์วิเชียร, “เครื่องสูบลมและระบบสูบลม 3” , เอ็มแอนคี่อี, 2546
- (2) วีรศักดิ์ ทรัพย์วิเชียร, “เครื่องสูบลมและระบบสูบลม 4 ” , เอ็มแอนคี่อี, ปี 2546
- (3) วิบูลย์ บุญขจรโรกุล, “ปั๊มและระบบสูบน้ำ”มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2529
- (4) Anthony Esposito, “Fluid Power with Application”, 2nd Prentice Hall,
- (5) Bruce R. Munson, Donald F. Young and Theodore H. Okiishi, “Fundamentals of Fluid Mechanics”, 2nd Edition, John Wiley & Sons.
- (6) Sam Yeddiah, “Centrifugal pump user’s guide book”, Chapman & Hall, 1996
- (7) Japanese Standards Association “Measurement of Fluid Flow by Means of Orifice Plates”,
Nozzles and Venturi Tubes



1



ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะของวาล์ว (จำนวนรอบ)	Δh (cm-Hg)	I (Amp)	Volt (V)	Pressure (Bar)	Vacuum (Bar)	Q (10 ³) (m ³ /s)	H _{p2} (m)	Power input (Watt)	Power output (Watt)	η (%)
ปิด	0	3.5	215	1.60	0	0	16.361	0	0	0
1/2	0.2	3.7	215	1.50	0.05	0.5582	15.850	505.142	86.513	17.162
1	1.7	4.4	215	1.40	0.13	1.6273	15.645	600.71	248.96	41.440
1 _{1/2}	7.2	5.2	215	1.30	0.20	3.3490	15.336	709.93	502.25	70.740
2	12.5	5.6	215	1.10	0.28	4.4127	14.111	764.54	608.941	79.644
2 _{1/2}	16.8	5.7	215	0.85	0.33	5.1156	12.066	778.192	603.602	77.560
3	19.8	5.8	215	0.69	0.36	5.5536	10.737	791.845	583.049	73.631
3 _{1/2}	20.9	5.8	215	0.51	0.38	5.7058	9.1011	791.845	507.814	64.130
4	21.6	5.9	215	0.46	0.39	5.8006	8.692	805.497	493.04	61.209
4 _{1/2}	22.2	5.9	215	0.41	0.40	5.8806	8.2830	805.497	476.325	59.134
5	22.8	5.9	215	0.38	0.41	5.09595	8.0785	805.497	470.759	58.440
5 _{1/2}	23.1	5.9	215	0.35	0.41	5.09986	7.7717	805.497	455.890	56.597
6	23.4	5.9	215	0.33	0.41	6.0375	7.5672	805.497	446.772	55.465
6 _{1/2}	23.5	5.9	215	0.30	0.41	6.0503	7.2604	805.497	429.567	53.329
7	23.5	5.9	215	0.29	0.41	6.0503	7.1589	805.497	423.562	52.584
7 _{1/2}	23.5	5.9	215	0.29	0.41	6.0503	7.1589	805.497	423.562	52.584
8	23.5	5.9	215	0.28	0.41	6.0503	7.0559	805.497	417.654	51.850
8 _{1/2}	23.5	5.9	215	0.28	0.41	6.0503	7.0559	805.497	417.654	51.850
9	23.5	5.9	215	0.27	0.41	6.0503	6.9536	805.497	417.654	51.070
เปิดสุด	23.5	5.9	215	0.27	0.41	6.0503	6.9536	805.497	417.654	51.070

ตารางที่ 1ก. แสดงข้อมูลจากการทดสอบและการคำนวณผลจากการทดสอบปั๊มตัวที่ 1

สถานะของวาล์ว (ใช้จำนวนรอบ)	Δh (cm-Hg)	I (Amp)	Volt (V)	Pressure (Bar)	Vaccum (Bar)	Q (10^{-3}) (m^3/s)	HP ₂ (m)	Power input (Watt)	Power output (Watt)	η (%)
ปิด	0	3.5	215	1.60	0	0	16.361	0	0	0
1/2	0.2	3.7	215	1.50	0.05	0.5582	15.850	505.142	86.513	17.162
1	1.7	4.4	215	1.40	0.13	1.6273	15.645	600.71	248.96	41.440
1 _{1/2}	7.2	5.2	215	1.30	0.20	3.3490	15.336	709.93	502.25	70.740
2	12.5	5.6	215	1.10	0.28	4.4127	14.111	764.54	608.941	79.644
2 _{1/2}	16.8	5.7	215	0.85	0.33	5.1156	12.066	778.192	603.602	77.560
3	19.8	5.8	215	0.69	0.36	5.5536	10.737	791.845	583.049	73.631
3 _{1/2}	20.9	5.8	215	0.51	0.38	5.7058	9.1011	791.845	507.814	64.130
4	21.6	5.9	215	0.46	0.39	5.8006	8.692	805.497	493.04	61.209
4 _{1/2}	22.2	5.9	215	0.41	0.40	5.8806	8.2830	805.497	476.325	59.134
5	22.8	5.9	215	0.38	0.41	5.09595	8.0785	805.497	470.759	58.440
5 _{1/2}	23.1	5.9	215	0.35	0.41	5.09986	7.7717	805.497	455.890	56.597
6	23.4	5.9	215	0.33	0.41	6.0375	7.5672	805.497	446.772	55.465
6 _{1/2}	23.5	5.9	215	0.30	0.41	6.0503	7.2604	805.497	429.567	53.329
7	23.5	5.9	215	0.29	0.41	6.0503	7.1589	805.497	423.562	52.584
7 _{1/2}	23.5	5.9	215	0.29	0.41	6.0503	7.1589	805.497	423.562	52.584
8	23.5	5.9	215	0.28	0.41	6.0503	7.0559	805.497	417.654	51.850
8 _{1/2}	23.5	5.9	215	0.28	0.41	6.0503	7.0559	805.497	417.654	51.850
9	23.5	5.9	215	0.27	0.41	6.0503	6.9536	805.497	417.654	51.070
เปิดสุด	23.5	5.9	215	0.27	0.41	6.0503	6.9536	805.497	417.654	51.070

ตารางที่ 2ก. แสดงข้อมูลจากการทดสอบและการคำนวณผลจากการทดสอบปั๊มตัวที่ 2

สถานะของวาล์ว (จำนวนรอบ)	Δh (cm-Hg)	Pump 1		Pump 2		P ₁ (Bar)	P ₂ (Bar)	Vacuum1 (Bar)	Vacuum2 (Bar)
		Amp ₁	Volt ₁	Amp ₂	Volt ₂				
ปิด	0	3.5	215	3.5	220	1.6	1.6	-	-
1/2	0.2	3.5	215	3.6	22	1.55	1.55	-0.025	-0.075
1	1.7	3.8	215	4.0	220	1.5	1.5	-0.075	-0.12
1 _{1/2}	8.9	4.4	215	4.5	220	1.4	1.4	-0.13	-0.14
2	17.4	4.7	215	4.9	220	1.3	1.3	-0.16	-0.17
2 _{1/2}	28.2	5.0	215	5.3	220	1.2	1.2	-0.20	-0.21
3	34.8	5.2	215	5.5	220	1.1	1.1	-0.22	-0.23
3 _{1/2}	40.2	5.4	215	5.6	220	1.0	1.0	-0.23	-0.24
4	43.3	5.4	215	5.7	220	1.0	1.0	-0.25	-0.26
4 _{1/2}	49.2	5.5	215	5.75	220	1.1	0.9	-0.26	-0.27
5	51.9	5.5	215	5.8	220	0.94	0.9	-0.27	-0.27
5 _{1/2}	55.2	5.6	215	5.8	220	0.90	0.86	-0.28	-0.28
6	58	5.6	215	5.8	220	0.88	0.82	-0.29	-0.28
6 _{1/2}	59.1	5.6	215	5.85	220	0.86	0.81	-0.29	-0.29
7	60.5	5.6	215	5.85	220	0.85	0.78	-0.29	-0.29
7 _{1/2}	61.7	5.6	215	5.9	220	0.84	0.77	-0.29	-0.29
8	62.1	5.6	215	5.9	220	0.84	0.75	-0.30	-0.30
8 _{1/2}	62.5	5.6	215	5.9	220	0.83	0.75	-0.30	-0.30
9	62.8	5.6	215	5.9	220	0.83	0.75	-0.30	-0.30
เปิดสุด	6.3	5.6	215	5.9	220	0.83	0.75	-0.30	-0.30

ตารางที่ 3ก. แสดงข้อมูลผลจากการทำการทดสอบปั๊มในระบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะวาล์ว (จำนวนรอบ)	Q (10 ³) (m ³ /s)	Hp ₁ (m)	Hp ₂ (m)	Power Input (watt)		Power Output (watt)	ประสิทธิภาพ (%) η
				Pump1	Pump2		
ปิด	0	15.339	30.678	448.95	507.492	0	0
1/2	0.70802	15.850	30.678	530.86	549.783	212.406	21.276
1	2.27597	15.850	28.633	628.65	648.462	637.276	49.9
1 _{1/2}	4.3645	12.987	21.475	754.38	775.335	916.571	59.918
2	5.6345	8.7944	15.339	796.29	831.723	845.189	51.915
2 _{1/2}	6.2128	5.1130	11.249	803.275	831.723	683.439	41.801
3	6.3063	5.3175	8.1808	796.29	845.820	504.504	30.723
3 _{1/2}	6.3852	5.420	8.1808	768.35	845.820	510.823	31.646
4	6.3983	5.420	7.9763	754.38	845.820	499.074	31.188
4 _{1/2}	6.4114	5.522	7.874	754.38	845.820	493.678	30.851
5	6.4114	5.522	7.7718	740.41	845.820	487.270	29.909
5 _{1/2}	6.4114	5.522	7.5670	740.41	845.820	474.430	29.506
6	6.4114	5.522	7.4650	740.41	845.820	468.034	29.102
6 _{1/2}	6.4114	5.522	7.3627	740.41	838.772	461.621	29.419
7	6.4114	5.522	7.1582	733.425	838.772	448.799	28.419
7 _{1/2}	6.4114	5.522	6.9537	733.425	831.723	435.977	27.730
8	6.4114	5.522	6.8514	726.44	831.723	429.563	27.444
8 _{1/2}	6.4114	5.522	6.8514	726.44	831.723	429.563	27.56
9	6.4114	5.522	6.8514	726.44	831.723	429.563	27.569
เปิดสุด	6.2654	4.397	7.055	768.350	831.215	432.250	27.569

ตารางที่ 4ก. แสดงข้อมูลของค่าความผลจากการทดสอบปั๊มในระบบอนุกรม

สถานะของวาล์ว (จำนวนรอบ)	Δh (cm-Hg)	Pump 1		Pump 2		P ₁ (Bar)	P ₂ (Bar)	Vacuum1 (Bar)	Vacuum2 (Bar)
		Amp ₁	Volt ₁	Amp ₂	Volt ₂				
ปิด	0	3.5	215	3.5	220	1.6	1.6	-	-
1/2	0.2	3.5	215	3.6	22	1.55	1.55	-0.025	-0.075
1	1.7	3.8	215	4.0	220	1.5	1.5	-0.075	-0.12
1 _{1/2}	8.9	4.4	215	4.5	220	1.4	1.4	-0.13	-0.14
2	17.4	4.7	215	4.9	220	1.3	1.3	-0.16	-0.17
2 _{1/2}	28.2	5.0	215	5.3	220	1.2	1.2	-0.20	-0.21
3	34.8	5.2	215	5.5	220	1.1	1.1	-0.22	-0.23
3 _{1/2}	40.2	5.4	215	5.6	220	1.0	1.0	-0.23	-0.24
4	43.3	5.4	215	5.7	220	1.0	1.0	-0.25	-0.26
4 _{1/2}	49.2	5.5	215	5.75	220	1.1	0.9	-0.26	-0.27
5	51.9	5.5	215	5.8	220	0.94	0.9	-0.27	-0.27
5 _{1/2}	55.2	5.6	215	5.8	220	0.90	0.86	-0.28	-0.28
6	58	5.6	215	5.8	220	0.88	0.82	-0.29	-0.28
6 _{1/2}	59.1	5.6	215	5.85	220	0.86	0.81	-0.29	-0.29
7	60.5	5.6	215	5.85	220	0.85	0.78	-0.29	-0.29
7 _{1/2}	61.7	5.6	215	5.9	220	0.84	0.77	-0.29	-0.29
8	62.1	5.6	215	5.9	220	0.84	0.75	-0.30	-0.30
8 _{1/2}	62.5	5.6	215	5.9	220	0.83	0.75	-0.30	-0.30
9	62.8	5.6	215	5.9	220	0.83	0.75	-0.30	-0.30
เปิดสุด	6.3	5.6	215	5.9	220	0.83	0.75	-0.30	-0.30

ตารางที่ 5ก. แสดงข้อมูลผลการทำการทดสอบปั๊มในระบบขนาน

สถานะวาล์ว (จำนวนรอบ)	Q(10 ⁻³) (m ³ /s)	Hp ₁ (m)	Hp ₂ (m)	Hp _(averag) (m)	Power Input (watt)		Power Output (watt)	ประสิทธิภาพ (%) (η)
					Pump1	Pump2		
ปิด	0	16.361	16.361	16.361	478.021	448.95	0	0
1/2	0.5982	16.105	16.617	16.361	477.836	502.920	89.302	9.390
1	1.6273	16.105	16.566	16.331	518.795	558.800	259.873	24.116
1 _{1/2}	3.7234	15.645	15.748	15.696	600.710	628.650	571.490	46.486
2	5.2062	14.930	11.032	14.981	641.667	648.330	762.699	57.510
2 _{1/2}	6.6278	14.316	14.418	14.367	682.625	740.410	931.172	65.435
3	7.3627	14.520	130600	14.060	709.970	768.350	1012.317	68.477
3 _{1/2}	7.9133	13.600	12.680	13.140	737.235	782.320	1016.780	66.304
4	8.2128	12.782	12.884	12.833	737.235	796.290	1030.656	66.315
4 _{1/2}	8.7544	12.884	11.964	12.424	750.887	803.275	1063.609	68.130
5	8.9914	12.978	11.964	12.476	750.887	810.260	1096.930	70.264
5 _{1/2}	9.2729	12.475	11.657	12.066	764.540	810.260	1094.141	69.478
6	9.5052	12.066	11.248	11.657	764.540	817.245	1083.533	68.800
6 _{1/2}	9.5949	11.964	11.248	11.606	764.540	817.245	1088.990	68.840
7	9.7079	11.759	10.941	11.350	764.540	824.230	1077.495	67.819
7 _{1/2}	9.8037	11.657	10.839	11.248	764.540	824.230	1078.350	67.870
8	9.8354	11.555	10.737	11.146	764.540	824.230	1072.026	67.470
8 _{1/2}	9.8670	11.657	10.737	11.197	764.540	824.230	1080.390	68.000
9	9.8907	11.555	10.737	11.146	764.540	824.230	1078.050	67.856
เปิดสุด	9.9064	11.555	10.737	11.146	764.540	824.230	1079.760	67.962

ตารางที่ 6ก. แสดงข้อมูลของการคำนวณผลจากการทดสอบปั๊มในระบบขนาน

ตารางที่ 1 ข. แสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ (หน่วยเอสไอ)

อุณหภูมิ °C	ความหนาแน่น $\rho, \text{kg} / \text{m}^3$	ความหนืด $\mu, \text{Pa} \cdot \text{s}$	ความดันไอ P_v, kPa
0	999.9	1.792×10^{-3}	0.6
5	1000.0	1.519	0.9
10	999.7	1.308	1.2
15	999.1	1.140	1.7
20	998.2	1.005	2.5
25	997.1	0.894	3.2
30	995.7	0.801	4.3
35	994.1	0.723	5.7
40	992.2	0.656	7.5
45	990.2	0.599	9.6
50	988.1	0.549	12.4
55	985.7	0.509	15.8
60	983.2	0.469	19.9
65	980.6	0.436	25.1
70	977.8	0.406	31.4
75	974.9	0.380	38.8
80	971.8	0.357	47.7
85	968.6	0.336	58.1
90	965.3	0.317	70.4
95	961.9	0.299	84.5
100	958.4	0.284	101.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 ข. แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย (K) สำหรับการไหลผ่านข้องอ ข้อต่อและวาล์ว

อุปกรณ์ในระบบท่อ	K
ข้องอ 90° ,แบบเกลียว	1.50
ข้อต่อยูเนียน(Union) ,แบบเกลียว (theaded)	0.08
เกวาล์ว (gage valve) , เปิดเต็มที่	0.15
เกวาล์วปิด 1/6	0.26
เกวาล์วปิด 1/3	0.81
เกวาล์วปิด 1/2	2.06
เกวาล์วปิด 2/3	5.52
เกวาล์วปิด 5/6	97.80
Foot valve	10.00

ตารางที่ 3 ข. แสดงค่าความขรุขระสัมบูรณ์ ϵ สำหรับท่อชนิดต่างๆ

ท่อประเภทต่างๆ	ϵ มิลลิเมตร
ท่อที่ได้จากการรีดขึ้นรูป ท่อทองเหลือง ท่อดีบุก ท่อซีเมนต์ที่หล่อโดยการเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ท่อที่เคลือบด้วยบิโทมินัส	0.0015
ท่อเหล็กเหนียวที่ผลิตขายในอุตสาหกรรมหรือท่อเหล็กที่ขึ้นรูปโดยการเชื่อม	0.046
ท่อเหล็กหล่อเคลือบขางมะตอย	0.12
ท่อชุบสังกะสี	0.15
ท่อเหล็กหล่อทั่ว ๆ ไป	0.25
ท่อไม้	0.18 ถึง 0.9
ท่อคอนกรีต	0.3 ถึง 3
ท่อเหล็กที่ย้ำด้วยหมุดย้ำ	0.9 ถึง 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 ข. ตารางความหนาของออริฟิซ (E)

Orifice I.D.	2"	3"	4"	6"	8"	10"	12"	16"	20"	24"	30"								
0.02 D	1/32	1/32	3/64	1/64	5/54	3/32	7/64	9/64	5/32	3/16	7/32	15/6	9/32	19/6	3/8	7/16	29/6	9/16	37/6
mm. D	1.68	....	2.62	3.15	....	....	....	....	....	9.56	....	....	....	....	18.8	....	....	....	....
mm. D	1.93	....	2.90	3.45	....	4.89	5.76	....	7.98	10.0	....	....	....	....	19.0	....	23.0	....	29.0
mm. D	2.06	2.30	3.06	3.82	4.02	5.18	6.06	7.62	8.07	10.1	11.3	12.9	14.6	15.2	19.2	22.6	23.2	28.6	29.2

Orifice Plate Thickness "E"

ค่าสุด	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.17	0.17	0.17	0.17	0.24	0.24	0.24	0.37	0.37
สูงสุด	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.16	0.19	0.25	0.26	0.31	0.37	0.39	0.49	0.50	0.50	0.50	0.50	0.54	0.57
แนะนำ	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.25	0.25	0.25	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.50	0.50

ความหนาแผ่นสูงสุดของออริฟิซ

Orifice diam. inches	Es.d/8																		
150	1/32	§1/3	§1/3	§1/3	1/32	1/32	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
175	3/64	.....	.....	§3/6	3/64§1	3/64	.....1	.....1	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
200	1/16	.....	.....	.....	/1	1/16	/16	/16	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
225	5/64	.....	.....	.....	.....	§5/6	5/64	5/64	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
250	3/32	.....	.....	.....	.....	.....	§3/3	3/32	.....7	.....7	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
275	7/64	.....	.....	.....	.....	.....	.....	§7/6	/64	/64	.....1	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
300	1/8	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	1/8	1/8	/8	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
325	9/64	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	§9/6	9/64	9/64	.....5	.....5	.....	.....	.....	.....	.....	.....
350	5/32	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	§5/3	5/32	/32	/32	.....	.....	.....	.....	.....	.....
375	11/64	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	11/6	11/6	11/6	.....	.....	.....	.....	.....	.....
400	3/16	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	§3/1	3/16	3/16	3/16	3/16	.....	.....	.....	.....
425	13/64	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	13/6	13/6	13/6	13/6	.....	.....	.....	.....
450	7/32	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	§7/3	7/32	7/32	7/32	7/32	.....	.....	.....
475	15/64	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	§15	15/6	15/6	.....	.....	.....	.....
500	1/4	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	1/4	1/4	.....	.....	.....	.....
525	9/32	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	§19	19/6	19/6	19/6	.....
550	16/64	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	5/16	5/16	5/16	.....
575	5/16	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	11/3	11/3	11/3
600	12/3	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	§3/8	23/6	23/6
625	23/64	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	3/8	3/8
650	3/8	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	13/3	13/3
675	13/3	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	13/3
700	7/6	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	§7/1
725	29/64	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	7/16
750	15/3	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	§29/
775	1/2	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	29/6
800	17/3	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	29/6
825	9/16	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	15/3
850	37/64	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	15/3
875	19/3	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	1/2
900	5/8	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	1/2

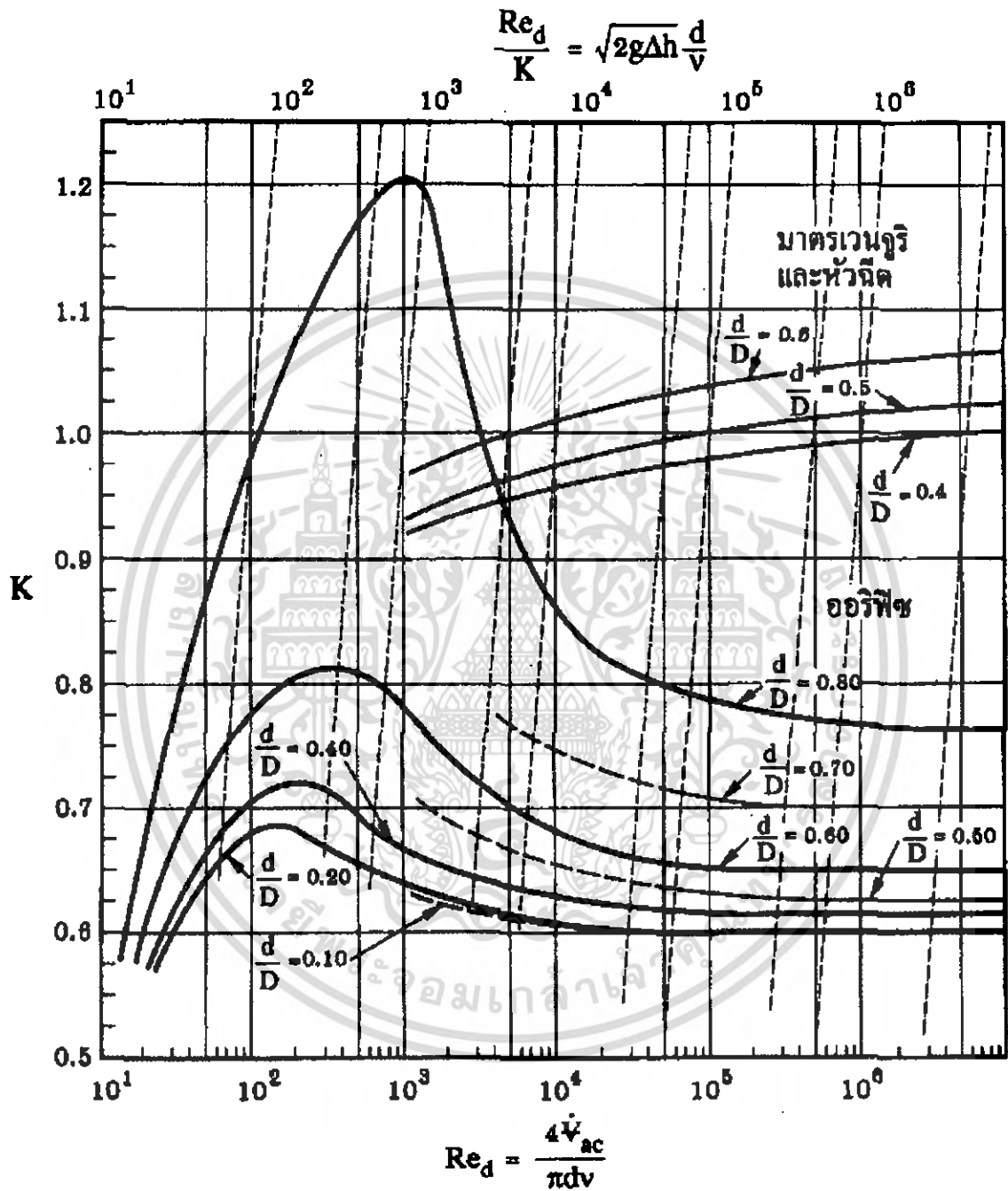
บันทึก - ความหนาของขอบในออริฟิซไม่เกิน $e \leq 0.02D$ หรือ $d/8$ แต่ค่าไหนจะน้อยกว่ากำหนดค่าสูงสุดด้วยตัวนั้น เครื่องหมาย ϕ

เป็นค่าสูงสุดของออริฟิซขนาดนั้น แต่ในขนาดที่ใหญ่กว่ากำหนดค่าสูงสุด $e = 0.02D$

- ค่าของ e กำหนดให้มีค่าน้อยกว่า $d/8$
- แผ่นออริฟิซที่มีค่าความหนาของขอบ $e \leq \frac{i}{30D}$ ไม่จำเป็นต้องสาปทางช่องทางด้านนอก ยกเว้นด้วยเหตุผลอย่างอื่น

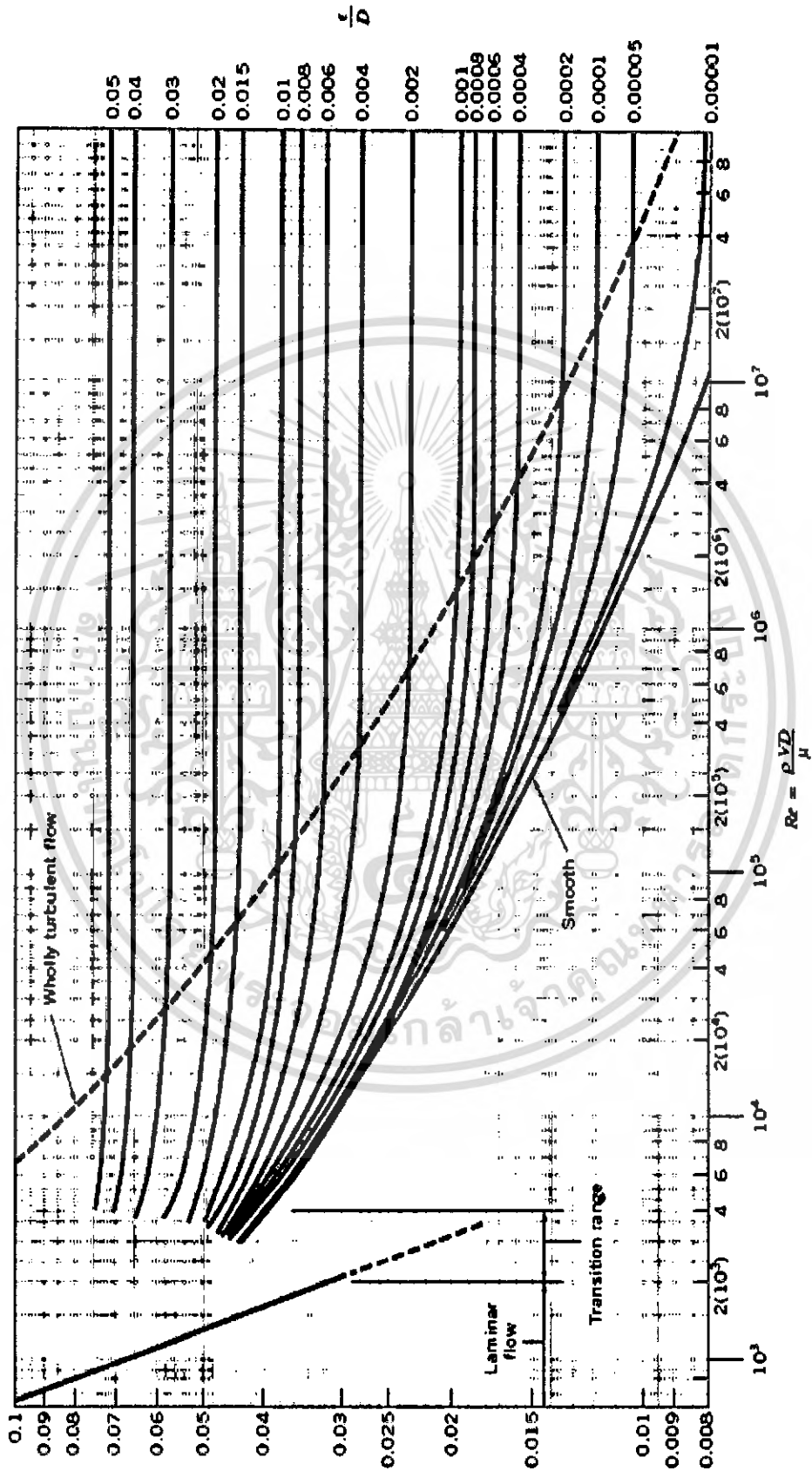
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5 ข. สัมประสิทธิ์การไหล K และ Re_d/K กับ Re_d สำหรับมาตรอัตราการไหลแบบเวนจูรี มาตรอัตราการไหลแบบหัวฉีด และมาตรอัตราการไหลแบบออร์ฟิซ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6 ข Moody diagram



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่ง

(Characteristics of the two stage centrifugal pump testing)

1. วัตถุประสงค์

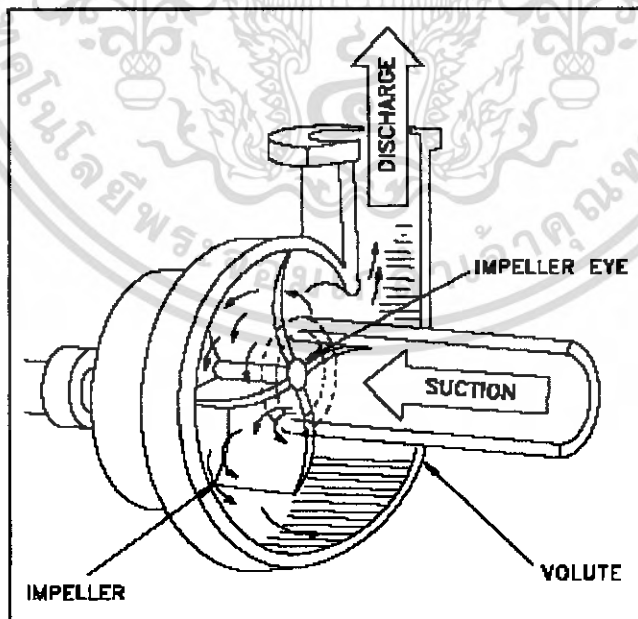
เพื่อทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งเมื่อปั๊มทำงานเพียงตัวเดียว, เมื่อปั๊มสองตัวทำงานร่วมกันในระบบขนาน และเมื่อปั๊มสองตัวทำงานร่วมกันในระบบอนุกรมโดยการหาค่าเสด, กำล้ง, อัตราการไหล และประสิทธิภาพของปั๊มหอยโข่งเพื่อเปรียบเทียบระหว่างปั๊มตัวเดียว (Single pump) กับ ปั๊มในระบบอนุกรม (Serial pump), ปั๊มตัวเดียวกับปั๊มในระบบขนาน (Parallel pump) และปั๊มในระบบอนุกรมกับปั๊มในระบบขนาน

2. ทฤษฎี

ปั๊ม เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานของของไหล พลังงานที่ใช้ขับปั๊มอาจจะได้มาจากเครื่องยนต์ หรือมอเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้น

2.1 หลักการทำงานของปั๊มหอยโข่ง

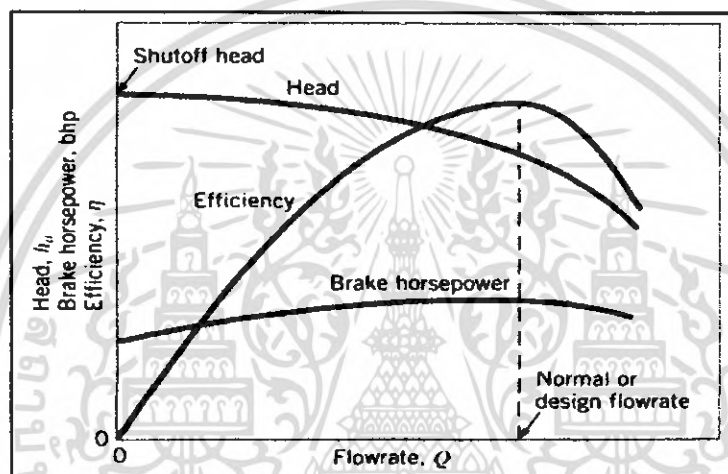
สำหรับปั๊มหอยโข่งของไหลจะเข้าสู่ตัวเรือนปั๊มทางช่องทางดูด (Suction) เนื่องจากพลังงานกลจากเพลาลูกส่งมาจากคัมกัล้งซึ่งอาจเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าหรือเครื่องยนต์ ของเพลาลูกจะถูกเหวี่ยงโดยใบพัด (Impeller) ทำให้ความดันที่ช่องทางดูดลดลง ของเหลวก็จะถูกผลักรันออกทางช่องทางส่ง (Discharge) ต่อไป ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของปั๊มหอยโข่ง

2.2 สมรรถนะของปั๊มหอยโข่ง

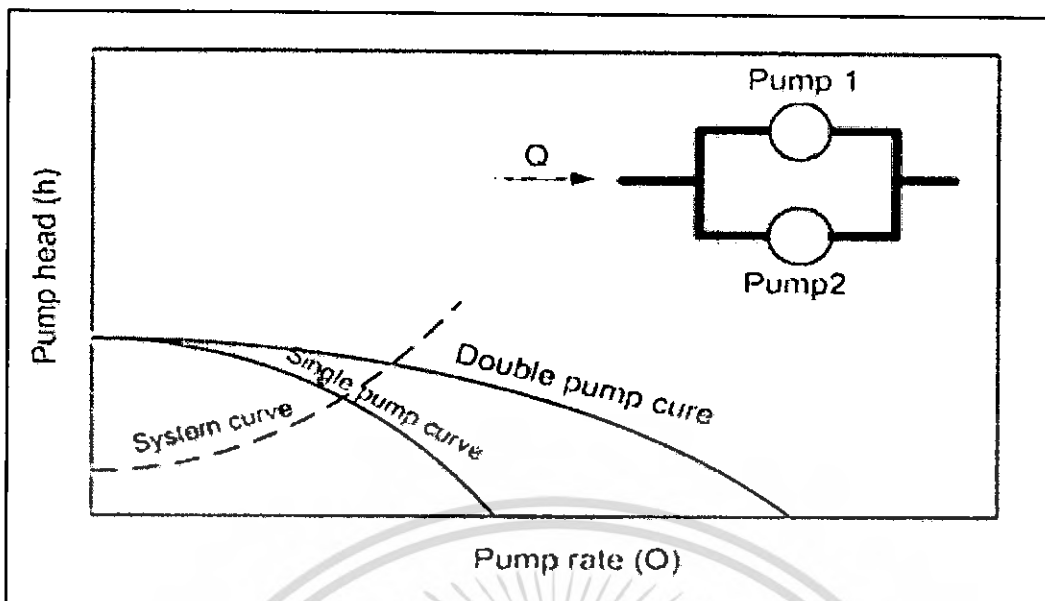
บริษัทผู้ผลิตปั๊มจะทำการทดสอบสมรรถนะของปั๊มที่ผลิตขึ้นแล้วเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสดเทียบกับอัตราการไหล, ประสิทธิภาพเทียบกับอัตราการไหล และกำลังที่ต้องใช้ขับปั๊มเทียบกับอัตราการไหล จากรูปจะสังเกตเห็นว่าเมื่ออัตราการไหลเริ่มจากศูนย์ ประสิทธิภาพก็จะเริ่มจากศูนย์จนกระทั่งถึงค่าสูงสุดแล้วจะลดลง จุดให้ประสิทธิภาพสูงสุดเรียกว่า Best efficiency Point (BEP) อัตราการไหล ณ จุดนี้เรียกว่า Design flow rate ในการเลือกปั๊มมาใช้งานจะต้องเลือกที่อัตราการไหลและประสิทธิภาพสูงสุดหรือใกล้เคียง รูปที่ 2 กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มหอยโข่ง (Performance curve หรือ Characteristics curve)



รูปที่ 2 กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มหอยโข่ง

2.3 สมรรถนะของปั๊มหอยโข่งในระบบขนาน

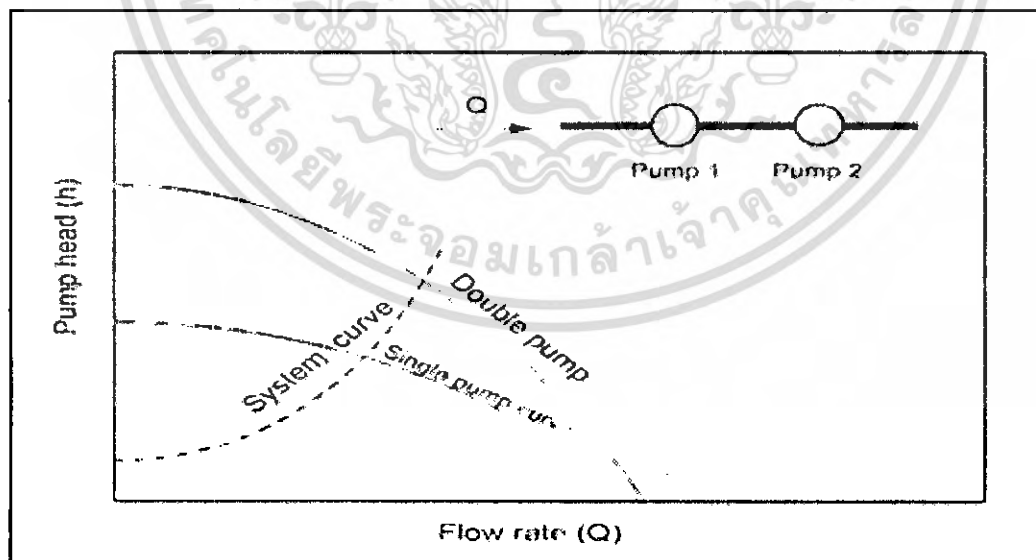
เมื่อปั๊ม 2 ตัวทำงานร่วมกันในระบบขนาน อัตราการสูบของระบบจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า ในกรณีที่เสดเท่าเดิม แต่ความเป็นจริงแล้วอัตราการสูบจะ ไม่เป็นสองเท่า ทั้งนี้เพราะว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นการสูญเสียพลังงานในระบบท่อ ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยจนกระทั่งเสดสูงกว่าเมื่อปั๊มทำงานเพียงตัวเดียว อัตราการสูบก็จะลดลงกว่าสองเท่าและอาจหาได้จากจุดตัดของกราฟแสดงสมรรถนะใหม่ของระบบผสมกับกราฟเสดของระบบ (System Head Curve) ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งระบบขนานในทางทฤษฎี

2.4 สมรรถนะของปั๊มหอยโข่งในระบบอนุกรม

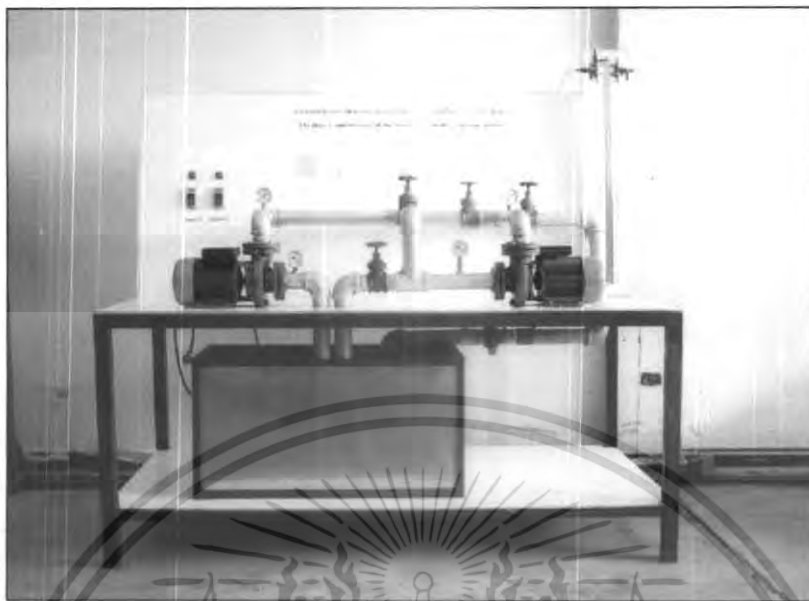
เมื่อปั๊ม 2 ตัวทำงานร่วมกันในระบบอนุกรม เหนือของระบบจะเพิ่มขึ้นแต่จะไม่เท่ากับผลของปั๊มสองตัวมารวมกัน ในขณะที่อัตราการสูบจะเพิ่มขึ้นน้อยมาก ปั๊มในระบบอนุกรมนี้เหมาะกับการใช้งานในลักษณะที่ต้องการความดันสูงมาก เช่น ในงานที่ต้องขนส่งน้ำไปยังที่สูง ซึ่งกราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งระบบอนุกรมในทางทฤษฎีนั้นได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งระบบอนุกรมในทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

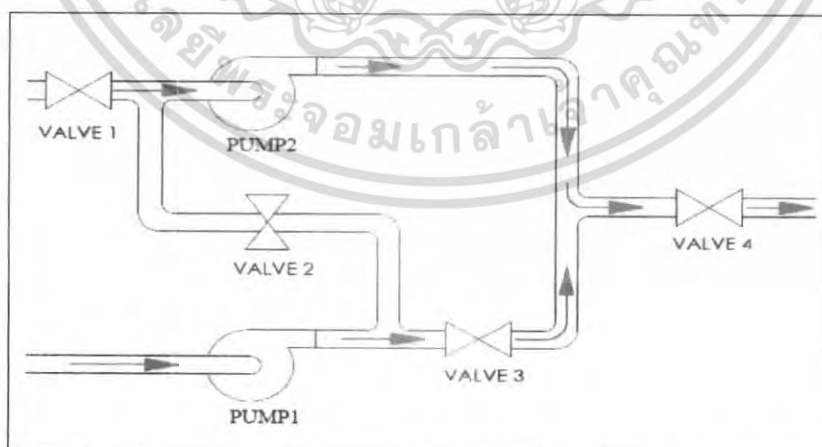
3. การทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่ง



รูปที่ 5 ชุดทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่ง

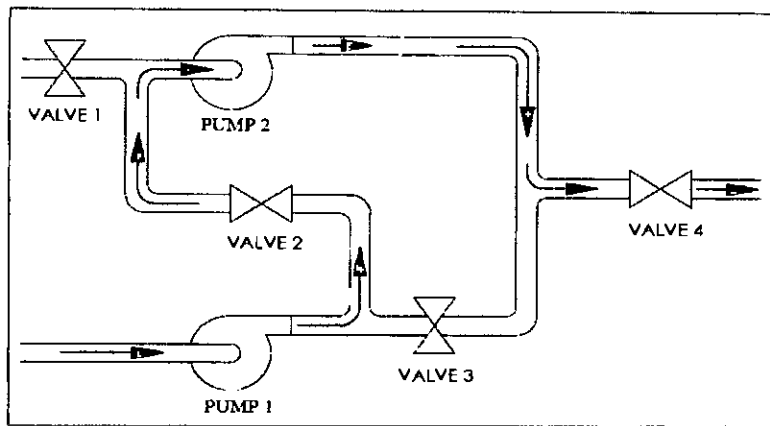
3.1 ชุดทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่ง

การทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งในกรณีต่างๆ ตามข้างต้นนั้น สามารถทำได้โดยชุดทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งแบบปั๊มคู่ ซึ่งสามารถใช้ทดสอบเพื่อหาสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งได้ทั้งกรณีปั๊มตัวเดียว, ปั๊มสองตัวต่อกันอย่างขนาน และปั๊มสองตัวต่อกันอย่างอนุกรม โดยอาศัยหลักการเปิดปิดของ Gate valve รูปที่ 5 แสดงชุดทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งแบบปั๊มคู่ที่ใช้ในการทำการทดลอง



รูปที่ 6 แสดงการเปิดปิดของวาล์วให้ปั๊มทำงานในระบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 แสดงการเปิดปิดของวาล์วให้ปั๊มทำงานในระบบอนุกรม

3.2 การทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งตัวเดียว (Single pump)

1. จากรูปที่ 6 หรือ 7 เปิดเกทวาล์วตัวที่ 1 และ 2 ปิดเกทวาล์วตัวที่ 3 และ 4 จนสุด
2. เปิดสวิตซ์ให้ปั๊มตัวที่ 1 เริ่มทำงาน
3. บันทึกค่าความดันด้านดูด, ด้านจ่าย, อัตราการไหล, กระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้า
4. เมื่อบันทึกค่าต่างๆ จนครบแล้วให้ค่อยๆ เปิดเกทวาล์วตัวที่ 4 เพิ่มขึ้นครึ่งละครึ่งรอบ แล้วกลับไปบันทึกเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 3 ทำเช่นนี้จนกระทั่งเกทวาล์วตัวที่ 4 ถูกเปิดจนสุด
5. เมื่อได้ค่าต่างๆ ที่ต้องการจนครบแล้วให้ปิดเกทวาล์วทั้ง 4 ตัวลงให้สนิท แล้วปิดสวิตซ์เพื่อหยุดการทำงานของปั๊มหอยโข่ง
6. นำค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบไปคำนวณหาประสิทธิภาพของปั๊ม และเขียนกราฟแสดงคุณลักษณะของปั๊มหอยโข่งต่อไป

3.3 การทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งในระบบขนาน

1. จากรูปที่ 6 ปิดเกทวาล์วตัวที่ 1 และ 3 ปิดเกทวาล์วตัวที่ 2 และ 4 จนสุด
2. เปิดสวิตซ์ให้ปั๊มตัวที่ 1 และ 2 เริ่มทำงาน
3. บันทึกค่าความดันด้านดูด, ด้านจ่าย, อัตราการไหล, กระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้า
4. เมื่อบันทึกค่าต่างๆ จนครบแล้วให้ค่อยๆ เปิดเกทวาล์วตัวที่ 4 เพิ่มขึ้นครึ่งละครึ่งรอบ แล้วกลับไปบันทึกเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 3 ทำเช่นนี้จนกระทั่งเกทวาล์วตัวที่ 4 ถูกเปิดจนสุด
5. เมื่อได้ค่าต่างๆ ที่ต้องการจนครบแล้วให้ปิดเกทวาล์วทั้ง 4 ตัวลงให้สนิท และปิดสวิตซ์เพื่อหยุดการทำงานของปั๊มหอยโข่ง

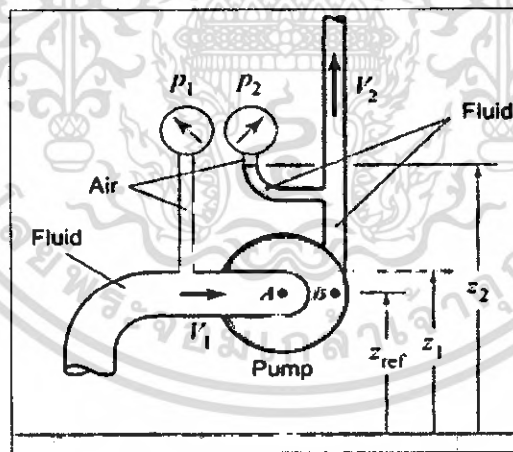
6. นำค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบ ไปคำนวณหาประสิทธิภาพของปั๊ม และเขียนกราฟ แสดงคุณลักษณะของปั๊ม หอยโข่งต่อไป

3.4 การทดสอบสมรรถนะของปั๊ม หอยโข่งในระบบอนุกรม

1. จากรูปที่ 3.10 ปิดเกตวาล์วตัวที่ 1,3 และ 4 เปิดเกตวาล์วตัวที่ 2 โดยเปิดจนสุด
2. เปิดสวิตซ์ให้ปั๊มตัวที่ 1 และ 2 เริ่มทำงาน
3. บันทึกค่าความดันด้านดูด, ด้านจ่าย, อัตราการไหล, กระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้า
4. เมื่อบันทึกค่าต่างๆ จนครบแล้วให้ค่อยๆ เปิดเกตวาล์วตัวที่ 4 เพิ่มขึ้นครั้งละครึ่งรอบ แล้วกลับไปบันทึกเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 3 ทำเช่นนี้จนกระทั่งเกตวาล์วตัวที่ 4 ถูกเปิดจนสุด
5. เมื่อได้ค่าต่างๆ ที่ต้องการจนครบแล้วให้ปิดเกตวาล์วทั้ง 4 ตัวลงให้สนิท แล้วปิดสวิตซ์เพื่อหยุดการทำงานของปั๊ม หอยโข่ง
6. นำค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบ ไปคำนวณหาประสิทธิภาพของปั๊ม และเขียนกราฟ แสดงคุณลักษณะของปั๊ม หอยโข่งต่อไป

4. การคำนวณหาประสิทธิภาพของปั๊ม หอยโข่ง

4.1 การคำนวณหาเสดของปั๊ม



รูปที่ 8 เสดของปั๊ม

จากรูปเป็นสมการพลังงานระหว่างจุด A และ B ได้

$$\left(\frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + Z \right)_A + h_p = \left(\frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + Z \right)_B \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 1 เราไม่พิจารณาการสูญเสีย (Loss) ที่เกิดขึ้น ($V_A = V_B$) และ ($Z_A \approx Z_B$) จะได้

$$h_p = \frac{(P_A - P_B)}{\gamma} \times 10^5 \quad (2)$$

โดยที่ P_A = ความดันที่อ่านจากเกจสุญญากาศ (Vacuum gauge, bar)

P_B = ความดันที่อ่านจากเกจวัดความดัน (Pressure gauge, bar)

γ = น้ำหนักจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิ 25 °C เท่ากับ 9779 (N/m^3)

4.2 กำลังที่มอเตอร์ให้แก่ปั๊ม (Power input)

กำลังงาน หมายถึง อัตราการทำงานต่อหน่วยเวลา หน่วยของกำลังงานที่นิยมใช้ทั่วไป ได้แก่ แรงม้าและวัตต์ ซึ่ง 1 แรงม้า เท่ากับ 746 วัตต์

ซึ่ง P_m ที่ให้กับปั๊มหรือ P_{out} ของมอเตอร์นั้น คือกำลังเพลลาของมอเตอร์หาได้โดยการวัดค่าความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ แล้วคูณกับค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ (η_m) และค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ ($\cos \theta$) ดังสมการที่ 3

$$P_m = EI\eta_m \cos \theta \quad (3)$$

โดยที่ E = แรงดันไฟฟ้าที่อ่านจาก โวลท์มิเตอร์

I = กระแสไฟฟ้าที่อ่านจากแอมป์มิเตอร์

ซึ่งเพาเวอร์แฟกเตอร์ ($\cos \theta$) ของมอเตอร์ไฟฟ้าเฟสเดียวสามารถหาได้จากสมการที่ 4

$$\eta \cos \theta \Big|_{motor} = \frac{P'}{EI'} \quad (4)$$

โดยที่ P' = กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ 1.5 แรงม้า ซึ่งเท่ากับ 1118.55 Watt

E' และ I' = แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าซึ่งอ่านได้จาก Name Plate ของปั๊มซึ่งในโครงการนี้จะเท่ากับ 220 V และ 8 A ตามลำดับ ดังนั้น

$$\eta \cos \theta = \frac{1118.5}{1760} = 0.63553$$

ซึ่งเป็นเพาเวอร์แฟกเตอร์ของปั๊มในโครงการนี้ ดังนั้น จากสมการที่ 3 จะได้

$$P_m = 0.63553EI \quad (5)$$

4.3 กำลังที่ได้จากปั๊ม (Power Output)

กำลังงานที่ได้จากปั๊มสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6

$$P_{out} = \gamma Q h_p \quad (6)$$

โดยที่ Q = อัตราการไหล (m^3/s) ซึ่งหาค่าจากสมการที่ 7
 h_p = เหนดของปั๊ม (m)

$$Q = 2A_0K \sqrt{2g \left(\frac{\rho Hg}{\rho H_2O} - 1 \right) \frac{\Delta h (cm-Hg)}{100}} \quad (7)$$

โดยที่ K = ค่าสัมประสิทธิ์การไหล (Flow coefficient) ของมาตรวัดอัตราการไหลแบบออริฟิซ
 เราเลือกใช้ค่า $K = 0.725$

4.4 ประสิทธิภาพของปั๊มตัวเดียว

ประสิทธิภาพของปั๊มเพียงตัวใดตัวหนึ่งในโครงการนี้สามารถหาได้จากสมการที่ 8

$$\eta = \frac{\text{Power Output}}{\text{Power Input}} \quad (8)$$

4.5 ประสิทธิภาพของปั๊มในระบบขนาน

ประสิทธิภาพของปั๊มในระบบขนานสามารถหาได้จากสมการที่ 9

$$\eta = \frac{\gamma Q h_{p(\text{average})}}{P_{\text{input}1} + P_{\text{input}2}} \quad (9)$$

โดยที่ $h_{p(\text{average})} = \frac{h_{p(\text{pump}1)} + h_{p(\text{pump}2)}}{2}$

$P_{\text{input}1}$ = กำลังที่มอเตอร์ให้แก่ปั๊มตัวที่ 1

$P_{\text{input}2}$ = กำลังที่มอเตอร์ให้แก่ปั๊มตัวที่ 2

4.6 ประสิทธิภาพของปั๊มในระบบอนุกรม

ประสิทธิภาพของปั๊มในระบบอนุกรมสามารถหาได้จากสมการที่ 10

$$\eta = \frac{\gamma Q h_{p(\text{average})}}{P_{\text{input1}} + P_{\text{input2}}} \quad (10)$$

5. สรุปผลการทดลอง

คำนวณค่าลงในตารางบันทึกผลการทดลองในหน้าถัดไปแล้วนำค่าไปแสดงผลการทดสอบในรูปของกราฟแสดงคุณลักษณะ (Characteristics curve หรือ Performance curve) โดยให้แกนราบเป็นแกนแสดงค่าอัตราการไหล (Q) ส่วนแกนตั้งเป็นแกนแสดงค่าเฮด (H) กำลังงานที่ต้องการและประสิทธิภาพของปั๊ม

6. เอกสารอ้างอิง

- (1) วีรศักดิ์ ทรัพย์วิเชียร, “เครื่องสูบลมและระบบสูบลม 3”, เอ็มแอนด์อี, 2546
- (2) วีรศักดิ์ ทรัพย์วิเชียร, “เครื่องสูบลมและระบบสูบลม 4”, เอ็มแอนด์อี, ปี 2546
- (3) วิบูลย์ บุญชูโรกุล, “ปั๊มและระบบสูบน้ำ”มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2529
- (4) Anthony Esposito, “Fluid Power with Application”, 2nd Prentice Hall,
- (5) Bruce R. Munson, Donald F. Young and Theodore H. Okiishi, “Fundamentals of Fluid Mechanics”, 2nd Edition, John Wiley & Sons.
- (6) Sam Yeddidiyah, “Centrifugal pump user’s guide book”, Chapman & Hall, 1996

สถานะของวาล์ว (จำนวนรอบ)	Δh (cm-Hg)	I (Amp)	Volt (V)	Pressure (Bar)	Vaccum (Bar)	Q (10^3) (m^3/s)	Hp ₂ (m)	Power input (Watt)	Power output (Watt)	ประสิทธิภาพ η (%)
1/2										
1										
1 _{1/2}										
2										
2 _{1/2}										
3										
3 _{1/2}										
4										
4 _{1/2}										
5										
5 _{1/2}										
6										
6 _{1/2}										
7										
7 _{1/2}										
8										
8 _{1/2}										
9										
เบ็ดเสร็จ										

ตารางแสดงข้อมูลผลการทดสอบและผลการทำงานผลจากการทดสอบปั๊มตัวที่ 1

สถานะของวาล์ว (จำนวนรอบ)	Δh (cm-Hg)	I (Amp)	Volt (V)	Pressure (Bar)	Vaccum (Bar)	Q (10^{-3}) (m^3/s)	Hp ₂ (m)	Power input (Watt)	Power output (Watt)	ประสิทธิภาพ η (%)
1/2										
1										
1 1/2										
2										
2 1/2										
3										
3 1/2										
4										
4 1/2										
5										
5 1/2										
6										
6 1/2										
7										
7 1/2										
8										
8 1/2										
9										
เบ็ดเสร็จ										

ตารางแสดงข้อมูลผลจากการทดสอบและการคำนวณผลจากการทดสอบปั๊มตัวที่ 2

สถานะของวาล์ว (จำนวนรอบ)	Δh (cm-Hg)	Δh (m-H ₂ O)	Pump 1		Pump 2		P ₁ (Bar)	P ₂ (Bar)	Vacuum1 (Bar)	Vacuum2 (Bar)
			Amp ₁	Volt ₁	Amp ₂	Volt ₂				
ปิด										
1/2										
1										
1 1/2										
2										
2 1/2										
3										
3 1/2										
4										
4 1/2										
5										
5 1/2										
6										
6 1/2										
7										
7 1/2										
8										
8 1/2										
9										
เปิดสุด										

ตารางแสดงผลการทดสอบปั๊มในระบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่วนวิศวกรรมเครื่องกลใช้สำหรับการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปโปรโมตหรือเผยแพร่
 ใ้ผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางวิศวกรรมเครื่องกล และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะวาล์ว (จำนวนรอบ)	Q (10 ⁻³) (m ³ /s)	Hp ₁ (m)	Hp ₂ (m)	Hp _(average) (m)	Power Input (watt)		Power Output	ประสิทธิภาพ (%)
					Pump1	Pump2		
ปิด								
1/2								
1								
1 1/2								
2								
2 1/2								
3								
3 1/2								
4								
4 1/2								
5								
5 1/2								
6								
6 1/2								
7								
7 1/2								
7 1/2								
8								
8 1/2								
9								
เปิดสุด								

ตารางแสดงผลการคำนวณผลจากการทดสอบปั๊มในระบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่สามารถใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะของวาล์ว (จำนวนรอบ)	Δh (cm-Hg)	Δh (m-H ₂ O)	Pump 1		Pump 2		P ₁ (Bar)	P ₂ (Bar)	Vacuum1 (Bar)	Vacuum2 (Bar)
			Amp ₁	Volt ₁	Amp ₂	Volt ₂				
ปิด										
1/2										
1										
1 _{1/2}										
2										
2 _{1/2}										
3										
3 _{1/2}										
4										
4 _{1/2}										
5										
5 _{1/2}										
6										
6 _{1/2}										
7										
7 _{1/2}										
8										
8 _{1/2}										
9										
เปิดสุด										

ตารางแสดงผลการทดสอบปั๊มในระบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่วารสิทธิ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะวาล์ว (จำนวนรอบ)	Q (10 ³) (m ³ /s)	Hp ₁ (m)	Hp ₂ (m)	Power Input (watt)		Power Output	ประสิทธิภาพ η (%)
				Pump1	Pump2		
ปิด							
1/2							
1							
1.5							
2							
2.5							
3							
3.5							
4							
4.5							
5							
5.5							
6							
6.5							
7							
7.5							
8							
8.5							
9							
เปิดสุด							

ตารางแสดงผลการคำนวณผลจากการทดสอบปั๊มในระบบอนุกรม



ภาคผนวก ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งแบบปั๊มคู่ (The design and develop of the two stage centrifugal pump test set)

ปฐมชัย สุวรรณเปินทะ¹, พิรล จันทนเสถียร¹, ชัญญา ทิพย์วรรณ¹

จำลอง ปราบแก้ว², มณฑล ใจกุลศล³

บทคัดย่อ

ในการติดตั้งปั๊มเพื่อการใช้งานนั้นอาจติดตั้งเพียงตัวเดียว หรือต่อกันแบบขนาน หรือต่อกันแบบอนุกรม ซึ่งแตกต่างกันไปตามกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมต่างๆ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่นักศึกษาในระดับปริญญาตรี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสาขาวิศวกรรมเครื่องกลที่จะต้องมีความรู้ความเข้าใจเป็นอย่างดีถึงคุณลักษณะ และสมรรถนะของปั๊มในระบบดังกล่าว โครงการนี้เป็นกรานำเสนอการออกแบบและสร้างชุดทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งเมื่อต่อกันแบบขนานหรืออนุกรม แล้วทำการทดสอบการใช้งาน เพื่อที่จะนำชุดทดสอบนี้ไปใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนในห้องปฏิบัติการ โดยชุดทดสอบนี้ถูกสร้างขึ้นมาให้สามารถทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งได้ทั้งในระบบขนานและอนุกรมโดยอาศัยหลักของการเปิดและปิดของวาล์ว ชุดทดสอบที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นมานี้สามารถใช้ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสด, กำลังขับปั๊ม และค่าประสิทธิภาพเทียบกับอัตราการไหลของปั๊มตัวเดียว, ปั๊มระบบขนานและอนุกรมได้ จากชุดทดสอบจะวัดค่าความดันบริเวณทางด้านดูดโดยเกจสูญญากาศ และวัดความดันทางด้านจ่ายโดยเกจวัดความดัน อัตราการไหลจะวัดด้วยออร์ฟิซ ส่วนกำลังที่ใช้ขับปั๊มจะหาโดยการวัดกระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้าโดยใช้แอมป์มิเตอร์และโวลท์มิเตอร์ ตามลำดับ เมื่อต้องการทดสอบปั๊มในระบบต่างๆ ก็สามารถทำการทดสอบและบันทึกค่าต่างๆ ลงในตารางและนำข้อมูลมาคำนวณเพื่อเขียนกราฟแสดงคุณลักษณะรวมถึงประสิทธิภาพของปั๊มในระบบขนานหรืออนุกรมได้

Abstract

Pumps assembled in parallel or in serial systems are of practical importance having many applications in several process plants. A good knowledge about such systems and their performance characteristics by the engineering undergraduate students is crucial. It is presented in this work the construction, test and use of an assembly for teaching the association in parallel or in series of centrifugal pumps. The assembly is constructed in a way that turning on some valves and turning off other ones the apparatus becomes a parallel pump system or a serial one. In order to get the performance characteristics of that pump systems is necessary to do experimental measurements of pressure at inlet and outlet of the pumps, the flow rate through the pump system, and the electric current and voltage of the electric motors driving the pumps. The pressures are measured using pressure gauges and the electric current and voltage by using ammeter and voltmeter connected to the electric motors. Flow rate measurement is done by using a calibrated orifice meter. After getting all this measurements it is obtained the pump system characteristic curves and the efficiency for operating in parallel or in series.

Keywords: Centrifugal Pumps: Parallel pumps: Serial pumps: Apparatus: Pressure Gauge: Voltmeter: Ammeter: Orifice

1. บทนำ

โครงการนี้มีจุดประสงค์เพื่อที่จะสร้างอุปกรณ์ในการทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งในระบบขนานหรืออนุกรม ซึ่งจำเป็นที่จะต้องทราบค่าอัตราการไหลรวม และค่าเสดรวม ระบบปั๊มแบบอนุกรมนั้นจะถูกใช้ในงานที่ต้องการความดันเสดที่มากกว่าความดันเสดจากปั๊มเพียงตัวเดียว ในทางตรงกันข้ามปั๊มในระบบขนานจะถูกใช้ในงานที่ต้องการอัตราการสูบน้ำที่มากกว่าอัตราการสูบน้ำจากปั๊มเพียงตัวเดียว ปั๊มในระบบอนุกรมลักษณะของการไหลจะผ่านสู้นปั๊มทุกตัวในระบบไปตามลำดับ ความดันเสดรวมของปั๊มในระบบอนุกรมนั้น จะมีค่าน้อยกว่าค่าเสดของปั๊มในระบบอนุกรมแต่ละตัวรวมกัน

¹ นักศึกษาคณะวิศวกรรมเครื่องกล สจล., ห้อง 3Q/1 รหัส 47015364, 47015366 และ 47015376 ตามลำดับ

² รองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล., โทร. 0 2326 4197, อีเมล kpchamlo@kmitl.ac.th

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล., โทร. 0 2326 4197

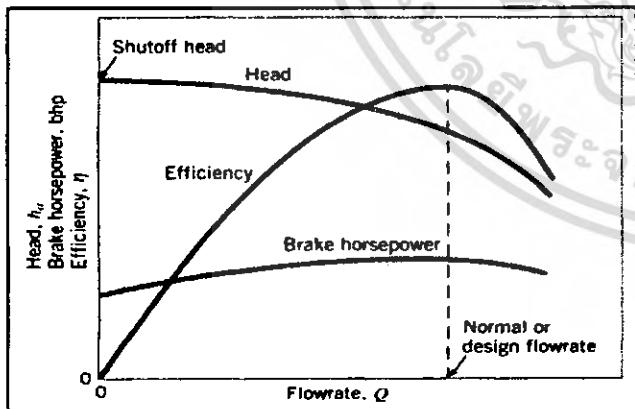
สัญลักษณ์			
H_p	เฮดของระบบ	P_n	กำลังที่ปั๊มได้รับจากมอเตอร์
P_{out}	กำลังที่ปั๊มให้ออกมาสู่ระบบ	Q	อัตราการสูบของปั๊ม

ในขณะที่อัตราการไหลจะเพิ่มขึ้นแต่จะไม่เท่ากับอัตราการไหลของปั๊มในระบบอนุกรมแต่ละตัวมารวมกัน สำหรับปั๊มในระบบขนานนั้น ลักษณะการไหลจะผ่านสู่อุปกรณ์ทุกตัวในระบบไปพร้อมกัน ความดันเสดรวมที่ได้จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่จะมีค่าน้อยกว่าค่าเฮดของปั๊มแต่ละตัวรวมกัน ส่วนอัตราการไหลก็จะเพิ่มขึ้นแต่จะมีค่าน้อยกว่าอัตราการไหลของปั๊มแต่ละตัวรวมกัน

2 ทฤษฎี

2.1 สมรรถนะของปั๊มหอยโข่ง

บริษัทผู้ผลิตปั๊มจะทำการทดสอบสมรรถนะของปั๊มที่ผลิตขึ้นแล้วเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฮดเทียบกับอัตราการไหล, ประสิทธิภาพเทียบกับอัตราการไหล และกำลังที่ต้องใช้ขับปั๊มเทียบกับอัตราการไหล จากรูปจะสังเกตเห็นว่าเมื่ออัตราการไหลเริ่มจากศูนย์ ประสิทธิภาพก็จะเริ่มจากศูนย์จนกระทั่งถึงค่าสูงสุดแล้วจะลดลง จุดที่ประสิทธิภาพสูงสุดเรียกว่า Best efficiency Point (BEP) อัตราการไหล ณ จุดนี้เรียกว่า Design flow rate ในการเลือกปั๊มมาใช้งานจะต้องเลือกที่อัตราการไหลและประสิทธิภาพสูงสุดหรือใกล้เคียง รูปที่ 1 กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊ม (Performance curve หรือ Characteristics curve)

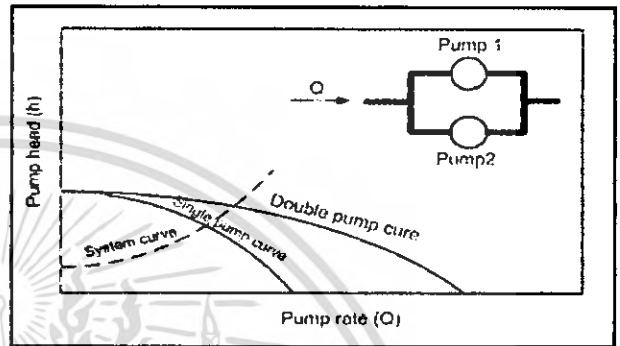


รูปที่ 1 กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งทางทฤษฎี

2.2 สมรรถนะของปั๊มในระบบขนาน

เมื่อปั๊ม 2 ตัวทำงานร่วมกันในระบบขนาน อัตราการสูบของระบบจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าในกรณีนี้ที่เฮดเท่าเดิม แต่ความเป็นจริงแล้วอัตราการสูบจะไม่เป็นสองเท่า ทั้งนี้เพราะว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นการสูญเสียพลังงานในระบบท่อ ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยจนกระทั่งเฮดสูงกว่าเมื่อปั๊มทำงานเพียงตัวเดียว อัตราการสูบก็จะลดลงกว่าสองเท่าและอาจ

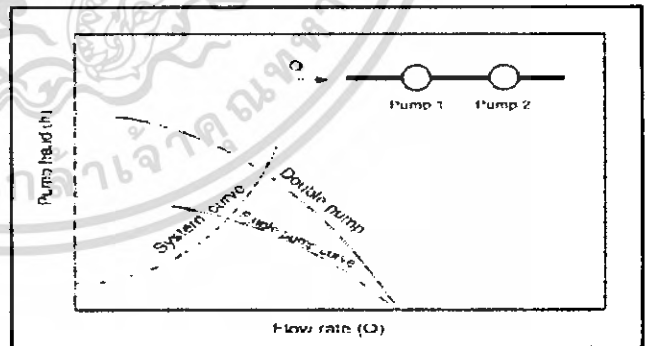
หาได้จากจุดตัดของกราฟแสดงสมรรถนะใหม่ของระบบผสมกับกราฟเฮดของระบบ (System Head Curve) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งระบบขนาน

2.3 สมรรถนะของปั๊มในระบบอนุกรม

เมื่อปั๊ม 2 ตัวทำงานร่วมกันในระบบอนุกรม เฮดของระบบจะเพิ่มขึ้นแต่จะไม่เท่ากับเฮดของปั๊มสองตัวมารวมกัน ในขณะที่อัตราการสูบจะเพิ่มขึ้นน้อยมาก ปั๊มในระบบอนุกรมนี้เหมาะกับงานในลักษณะที่ต้องการความดันเสดมาก เช่นในงานที่ต้องขนส่งน้ำไปยังที่สูง ซึ่งกราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งระบบอนุกรมในทางทฤษฎีนั้นได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3

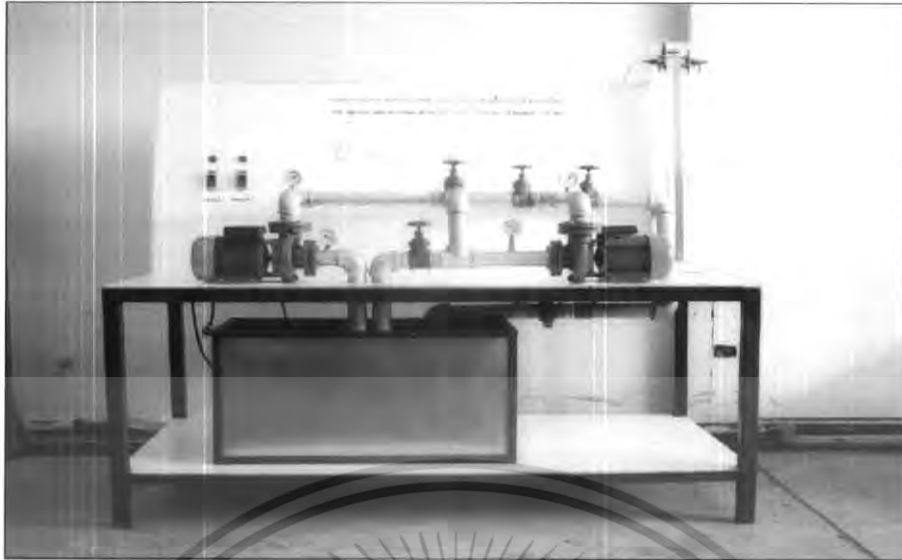


รูปที่ 3 กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งระบบขนาน

3. การทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งด้วยชุดทดสอบแบบปั๊มคู่

3.1 ชุดทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งและอุปกรณ์ประกอบชุดทดสอบ

ชุดทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งแบบปั๊มคู่ที่ได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้นนี้สามารถทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งได้ทั้งในกรณีทดสอบปั๊มตัวเดียว, สองตัวต่อกันแบบขนาน หรืออนุกรม ซึ่งส่วนประกอบที่สำคัญประกอบด้วยปั๊มหอยโข่งขนาด 1.8 HP จำนวน 2



รูปที่ 4 ชุดทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่ง

ตัว โดยติดตั้งเกทวาล์วจำนวน 4 ตัวเพื่อเป็นตัวปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลของของไหลให้เป็นระบบขนานหรืออนุกรม เกจสูญญากาศและเกจวัดความดันเพื่อวัดแรงดันทางด้านดูดและด้านจ่าย ตามลำดับ กำลังที่ใช้ขับปั๊มจะวัดโดยการใช้แอมมิเตอร์และโวลท์มิเตอร์ แล้วคำนวณหา กำลังขับปั๊ม ตามลำดับ การวัดอัตราการไหลจะใช้วิธีพิซ รูปที่ 4 แสดงชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้น

4. ผลการทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่ง

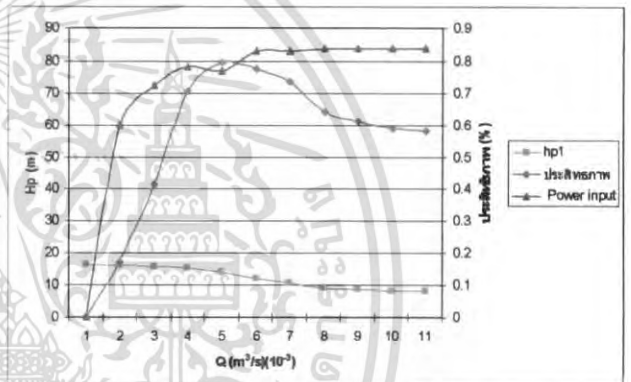
ผลของการทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งในโรงงานนี้จะแสดงออกมาในรูปของกราฟแสดงสมรรถนะหรือกราฟแสดงคุณลักษณะของปั๊ม (Performance curve หรือ Characteristics curve) โดยให้แกนราบ (แกน x) เป็นแกนแสดงอัตราการไหล ส่วนแกนตั้ง (แกน y) เป็นแกนแสดงค่าเฮดของปั๊ม (H_p) กำลังงานที่ต้องการ และประสิทธิภาพของปั๊ม

4.1 ผลการทดสอบสมรรถนะของปั๊มตัวเดียว

จากการทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งโดยอ้างอิงจากปั๊มตัวที่ 1 ผลที่ได้ คือ

- อัตราการไหลสูงสุดมีค่าเท่ากับ 363.018 L/min
- เฮดปั๊มสูงสุด เท่ากับ 16.28 m
- ประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุดของปั๊มมีค่าเท่ากับ 79.64 %
- กำลังที่ป้อนแก่ปั๊มมีค่าเท่ากับ 0.784 kW

ในรูปที่ 5 เป็นกราฟแสดงสมรรถนะ (Performance curve) ของปั๊มตัวที่ 1



รูปที่ 5 กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มตัวที่ 1

4.2 ผลการทดสอบสมรรถนะของปั๊ม 2 ตัวเมื่อต่อกันแบบขนาน

จากการทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งในระบบขนาน ผลที่ได้

คือ

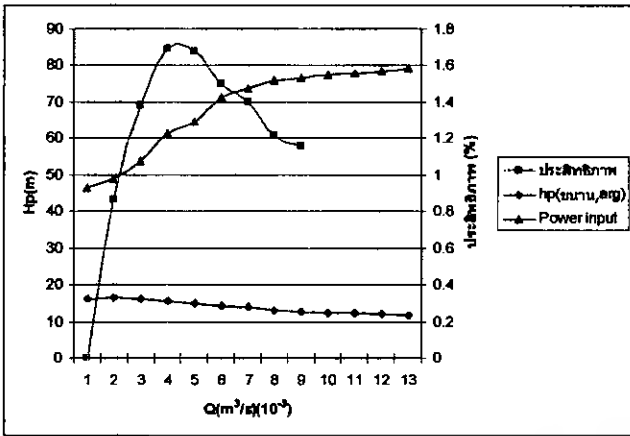
- อัตราการไหลสูงสุดมีค่าเท่ากับ 593.44 L/min
- เฮดปั๊มสูงสุด เท่ากับ 16.5 m
- ประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุดของปั๊มมีค่าเท่ากับ 70.2 %
- กำลังที่ป้อนแก่ปั๊มตัวที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.750 kW
- กำลังที่ป้อนแก่ปั๊มตัวที่ 2 มีค่าเท่ากับ 0.824 kW

รูปที่ 6 เป็นกราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มในระบบขนาน และรูปที่ 7 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างการต่อบั๊มแบบขนานกับปั๊มตัวเดียว

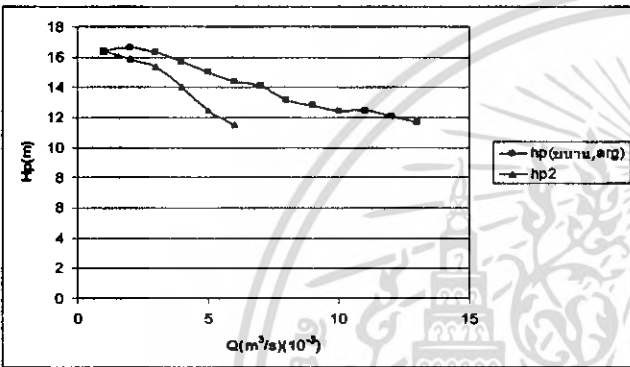
4.3 ผลการทดสอบสมรรถนะของปั๊ม 2 ตัว เมื่อต่อกันแบบอนุกรม

จากการทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งในระบบอนุกรม ผลที่ได้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



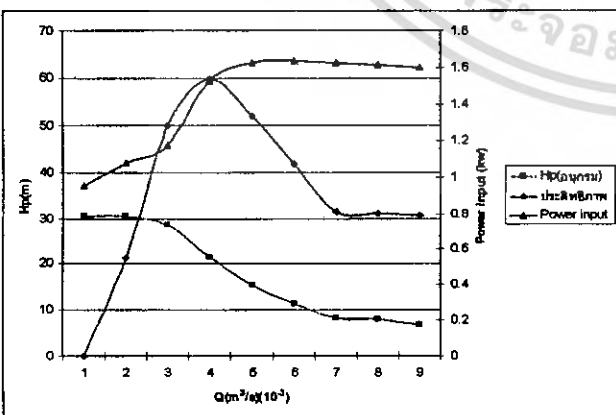
รูปที่ 6 กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มในระบบขนาน



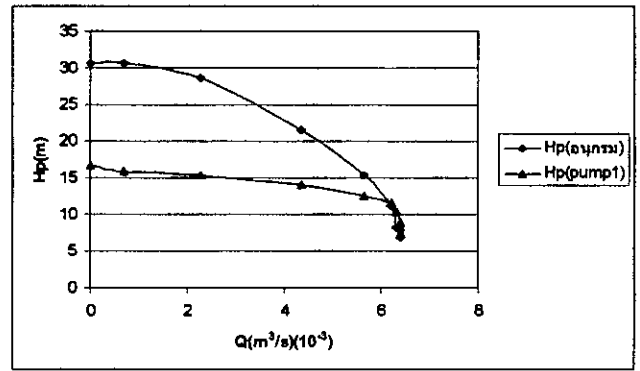
รูปที่ 7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของปั๊มในระบบขนานกับปั๊มตัวเดียว

อัตราการไหลสูงสุดมีค่าเท่ากับ 375.92 L/min
 เซดปั๊มสูงสุด เท่ากับ 30.067 m
 ประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุดของปั๊มมีค่าเท่ากับ 70.2 %
 กำลังที่ป้อนแก่ปั๊มตัวที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.768 kW
 กำลังที่ป้อนแก่ปั๊มตัวที่ 2 มีค่าเท่ากับ 0.782 kW

รูปที่ 8 เป็นกราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มในระบบอนุกรมรูปที่ 9 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างการต่อปั๊มแบบอนุกรมกับปั๊มตัวเดียว



รูปที่ 8 กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มในระบบอนุกรม



รูปที่ 9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของปั๊มในระบบอนุกรมกับปั๊มตัวเดียว

5. สรุปผลการทดลอง

1. เมื่อปั๊มสองตัวทำงานร่วมกันแบบขนานจะให้อัตราการไหลมากกว่าปั๊มตัวเดียว ในขณะที่แรงดันเฮดจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับปั๊มตัวเดียว ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการทดสอบนั้นสอดคล้องกับผลทางทฤษฎี โดยผลจากการทดสอบปั๊มระบบขนานในโครงการนี้พบว่าอัตราการไหลจะมากกว่าปั๊มตัวเดียวอยู่ประมาณ 39% ดังนั้น จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าปั๊มในระบบขนานจะเหมาะสมกับงานที่ต้องการอัตราการไหลมากๆ เช่น งานขนส่งของเหลวในระยะทางไกลๆ เป็นต้น

2. เมื่อปั๊มสองตัวทำงานร่วมกับแบบอนุกรมจะให้แรงดันเฮดมากกว่าปั๊มตัวเดียว ในขณะที่อัตราการไหลจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับปั๊มตัวเดียว ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการทดสอบนั้นสอดคล้องกับผลทางทฤษฎี โดยผลจากการทดสอบปั๊มระบบอนุกรมในโครงการนี้พบว่าแรงดันเฮดจะมากกว่าปั๊มตัวเดียวประมาณ 47% ดังนั้น จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าปั๊มในระบบอนุกรมจะเหมาะสมกับงานที่ต้องการแรงดันเฮดมากๆ เช่น งานขนส่งของเหลวไปยังที่สูง เป็นต้น

6. วิจารณ์ผลการทดลอง

1. ในการหา Power input ของปั๊มเราไม่สามารถใช้สมการ $P = T\omega$ เนื่องจากโครงสร้างของปั๊มกับมอเตอร์จะรวมอยู่ในชุดเดียวกัน ซึ่งไม่สามารถถอดออกมาวัดทอร์กได้ ทำให้ต้องหา Power input ของปั๊ม โดยการหา Power input ของมอเตอร์แล้วนำไปคูณกับค่าประสิทธิภาพและค่าเฟาเวอร์แฟกเตอร์ ($\cos \theta$) ของมอเตอร์ เพื่อให้เป็นค่า Power input ของปั๊มซึ่งค่าจะคลาดเคลื่อนไป

2. ในการอ่านค่าความดันโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ด้านดูดเข็มของ Vacuum gauge จะสังเกตเห็นว่าค่าที่อ่านได้นั้นคลาดเคลื่อนไปบ้างถึงแม้จะทำการทดสอบหลายครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยก็ตาม

3. เนื่องจาก Voltmeter และ Ampmeter ที่ใช้ในโครงการนี้เป็นแบบ Analog ดังนั้นค่าที่อ่านได้อาจไม่ค่อยเที่ยงตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. สรุปผลการดำเนินงาน

ตลอดช่วงระยะเวลาในการดำเนินโครงการที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน โครงการนี้ได้บรรลุจุดประสงค์ที่วางเอาไว้ ซึ่งประกอบด้วย

1. จัดสร้างชุดทดสอบสมรรถนะของปั๊มทอยโข่งแบบปั๊มคู่ ซึ่งสามารถทดสอบสมรรถนะของปั๊มทอยโข่งได้ทั้งในระบบขนานและอนุกรม เพื่อใช้ในห้องปฏิบัติการของภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
2. จัดทำเอกสารประกอบการเรียนการสอน เพื่อใช้ควบคู่กับชุดทดสอบที่ได้จัดสร้างขึ้น
3. ทำการทดสอบสมรรถนะของปั๊มทอยโข่ง เมื่อปั๊มทำงานตัวเดียว
4. ทำการทดสอบสมรรถนะของปั๊มทอยโข่ง เมื่อปั๊มทำงานพร้อมกัน 2 ตัว ในระบบขนาน
5. ทำการทดสอบสมรรถนะของปั๊มทอยโข่ง เมื่อปั๊มทำงานพร้อมกัน 2 ตัว ในระบบอนุกรม
6. สรุปผลการทดสอบ

9. กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้จัดทำขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัวของคณะผู้จัดทำที่ทำให้พวกเราทุกคนมีวันนี้ขึ้นมาได้ และบุคคลที่สำคัญยิ่งที่ทางคณะผู้จัดทำไม่อาจลืมได้ คือ รศ.ดร. จำลองปราบแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยให้คำปรึกษา ชี้แนะ และให้ความเอาใจใส่แก่พวกผมเป็นอย่างดีมาโดยตลอด อีกท่านหนึ่งคือ ผศ.มณฑล ใจกุศล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม สำหรับความเป็น “ครู” ที่มีให้แก่ทางคณะผู้จัดทำเสมอมา ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่เคยได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้กับคณะผู้จัดทำ ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ชาววิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ขอขอบคุณ อ้อ ออม และท่านอื่นๆที่คอยให้คำปรึกษาและให้กำลังใจในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

10. บรรณานุกรม

- (1) วีรศักดิ์ รัยวิเชียร, “เครื่องสูบลมและระบบสูบลม 3” , เอ็มแอนด็อบี, 2546
- (2) วีรศักดิ์ รัยวิเชียร, “เครื่องสูบลมและระบบสูบลม 4” , เอ็มแอนด็อบี, ปี 2546
- (3) วิบูลย์ บุญยธโรกุล, “ปั๊มและระบบสูบน้ำ” มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2529
- (4) Anthony Esposito, “Fluid Power with Application”, 2nd Prentice Hall,
- (5) Bruce R. Munson, Donald F. Young and Theodore H. Okiishi, “Fundamentals of Fluid Mechanics”, 2nd Edition, John Wiley & Sons.
- (6) Sam Yeddidiyah, “Centrifugal pump user’s guide book”, Chapman & Hall, 1996

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่วารกรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้