

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมอัตราการไหลของปั๊มหอยโข่งด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ FLOW RATE CONTROL OF CENTRIFUGAL PUMP BY ELECTRONICS SYSTEM



นาย อนุชา อนันตชัย
นาย อัครวิทย์ วงศ์วานกุล

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2542

เลขที่.....
เลขทะเบียน..... 36838
ออกเมื่อวันที่ 29 ต.ค. 2543
วัน, เดือน, ปี.....

รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**FLOW RATE CONTROL OF CENTRIFUGAL PUMP BY
ELECTRONICS SYSTEM**



**MR. ANUCHA ANANTACHAI
MR. AUKKARAWIT WONGWANAKUL**

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

1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2542

การควบคุมอัตราการไหลของป๊มหายใจด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์

โดย

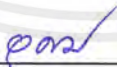
นาย อนุชา อนันตชัย

นาย อัครวิทย์ วงศ์วนากุล

อาจารย์ที่ปรึกษา



(ผศ. จำลอง ปราบแก้ว)



(อ. อุดม จันทรจรัสสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การควบคุมอัตราการไหลของปั๊มหอยโข่งด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์
นักศึกษา	นาย อนุชา อนันตชัย นาย อัครวิทย์ วงศ์วานากุล
อาจารย์ผู้ควบคุม	ผศ. จำลอง ปราบแก้ว
ปริญญานิพนธ์	อ. อุดม จันทร์จรัสสุข
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.	2542

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นการศึกษาถึงวิธีการควบคุมอัตราการไหลของปั๊มหอยโข่งให้
เป็นไปตามความต้องการใช้งาน โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากอุปกรณ์วัดการไหลระบบอิเล็กทรอนิกส์
มาควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ เพื่อให้ความเร็วรอบในการหมุนสัมพันธ์กับอัตราการ
ไหลที่ต้องการ แล้วศึกษาถึงการสูญเสียพลังงานและสมรรถนะของปั๊มที่เปลี่ยนไป โดยการสร้างชุด
ทดลองและทำการทดสอบปั๊มหาข้อมูลมาประกอบการศึกษา

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมอัตราการไหลของปั๊มไฮดรอลิกด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์
FLOW RATE CONTROL OF CENTRIFUGAL PUMP BY
ELECTRONICS SYSTEM



นาย อนุชา อนันตชัย
นาย อัครวิทย์ วงศ์วนากุล

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2542

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 36838
วัน, เดือน, ปี..... 29 ต.ค. 2543

บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**FLOW RATE CONTROL OF CENTRIFUGAL PUMP BY
ELECTRONICS SYSTEM**



**MR. ANUCHA ANANTACHAI
MR. AUKKARAWIT WONGWANAKUL**

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

1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2542

การควบคุมอัตราการใช้ของปัมฮอยโข่งด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์

โดย

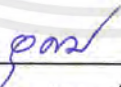
นาย อนุชา อนันตชัย

นาย อัครวิทย์ วงศ์วนากุล

อาจารย์ที่ปรึกษา



(ผศ. จำลอง ปราบแก้ว)



(อ. อุดม จันทรจรัสสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ การควบคุมอัตราการไหลของปั๊มหอยโข่งด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์
นักศึกษา นาย อนุชา อนันต์ชัย
นาย อัครวิทย์ วงศ์วนากุล
อาจารย์ผู้ควบคุม ผศ. จำลอง ปราบแก้ว
ปริญญานิพนธ์ อ. อุดม จันทร์จรัสสุข
ระดับการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2542

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นการศึกษาถึงวิธีการควบคุมอัตราการไหลของปั๊มหอยโข่งให้
เป็นไปตามความต้องการใช้งาน โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากอุปกรณ์วัดการไหลระบบอิเล็กทรอ
นิกส์มาควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ เพื่อให้ความเร็วรอบในการหมุนสัมพันธ์กับอัตราการ
ไหลที่ต้องการ แล้วศึกษาถึงการสูญเสียพลังงานและสมรรถนะของปั๊มที่เปลี่ยนไป โดยการสร้างชุด
ทดลองและทำการทดสอบปั๊มหาข้อมูลมาประกอบการศึกษา


Thesis Title FLOW RATE CONTROL OF CENTRIFUGAL PUMP BY
ELECTRONICS SYSTEM

Student Mr. Anucha Anantachai
Mr. Aukkarawit Wongwanakul

Thesis Advisor Ass.Prof. Chamlong Prabkeaw
Mr. Udom Chancharatsook

Level of study Bachelor of Engineering in Mechanical Engineering
King Mongkut 's Institute of Technology Ladkrabang

Year 1999



Abstract

This paper is a report which study about how to control flow rate of the centrifugal pump. Feedback control signal from electronic instrument was used for adjusting the motor speed which related to the pump flow rate. The energy loss and pump performance were included in this study. They can be investigated by centrifugal pump testing equipment.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ก็เพราะความช่วยเหลือ ให้ความสนับสนุน และให้กำลังใจ ตลอดจนแรงผลักดันจากบุคคลต่างๆมากมายหลายท่าน ดังรายนามต่อไปนี้

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์จำลอง ปราบแก้ว และ อาจารย์อุดม จันทร์รัฐสุข ซึ่งเป็น อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำ ทั้งทางภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ รวมไปถึงเงินสนับสนุนเพื่อจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คุณมณฑา เทียมเมือง ที่คอยช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์ และวิธีการ ตลอดจนการแก้ปัญหาในหลายๆจุด

ขอขอบคุณเพื่อนๆทั้งภาควิชาโทรคมนาคม และภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้ยืมอุปกรณ์ และกำลังใจเพื่อความสำเร็จ ตลอดจนผู้ที่อยู่เบื้องหลังแม่จะไม่ได้กล่าวไว้ในที่นี้ทุกคนครับ

ขอขอบคุณทีม LIVERPOOL ที่ช่วยทำให้คลายความเครียดในการทำ Project

สุดท้ายนี้หวังว่าปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางเบื้องต้นแก่ผู้สนใจ ศึกษาเกี่ยวกับป้อน้ำทุกคน

อนุชา อนันตชัย
อัศววิทย์ วงศ์วานกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่ออังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับปั๊ม.....	2
2.1 ชนิดของปั๊ม (Pump Classification).....	2
2.2 เฮดปั๊ม (Head Pump).....	3
2.3 สมการออยเลอร์ (Euler 's Equation).....	5
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเฮดกับอัตราการไหล.....	8
2.5 สมการของเบอร์นูลลี (Bernoulli 's Equation).....	8
2.6 ความเร็วจำเพาะ.....	9
2.7 Net Positive Suction Head (NPSH).....	10
2.8 คาวิตชัน (Cavitation).....	10
บทที่ 3 การทดสอบสมรรถนะของปั๊ม.....	12
3.1 กำลังงานที่มอเตอร์ให้แก่ปั๊มและที่ปั๊มให้แก่ น้ำ.....	12
3.2 การวัดค่าจากการทดสอบสมรรถนะของปั๊ม.....	13
3.3 การแปลงหน่วยจากเครื่องมือวัดความดัน.....	14
3.4 วิธีการทดลอง.....	15
3.5 ผลการทดลอง.....	16
บทที่ 4 ระบบควบคุมปั๊มหอยโข่งตามภาระการทำงาน.....	18
4.1 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	18
4.2 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	20
4.3 การทำงานของอินเวอร์เตอร์.....	21
4.4 วงจรการควบคุม.....	25
บทที่ 5 อุปกรณ์และผลการทดลองเมื่อใช้ระบบควบคุม.....	31
2.1 อุปกรณ์.....	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 วิธีการทดลอง.....	32
5.3 ผลการทดลอง.....	32
บทที่ 6 สรุปผลและวิจารณ์.....	48
6.1 สรุปผล.....	48
6.2 วิจารณ์การทดลอง.....	49
บรรณานุกรม.....	50
ภาคผนวก.....	51



สารบัญตาราง

หน้า

5.1 ข้อมูลจากการทดสอบปั๊มที่ความเร็วรอบ 2400 rpm.....	33
5.2 ข้อมูลจากการทดสอบปั๊มที่ความเร็วรอบ 2100 rpm.....	34
5.3 ข้อมูลจากการทดสอบปั๊มที่ความเร็วรอบ 1800 rpm.....	35
5.4 ข้อมูลจากการทดสอบปั๊มที่ความเร็วรอบ 1500 rpm.....	36
5.5 ข้อมูลจากการทดสอบปั๊มที่ความเร็วรอบ 1200 rpm.....	37
5.6 ข้อมูลจากการทดสอบปั๊มที่ความเร็วรอบ 900 rpm.....	38
5.7 ข้อมูลจากการทดสอบปั๊มที่ความเร็วรอบ 600 rpm.....	39
5.8 ข้อมูลจากการทดสอบปั๊ม โดยใช้ระบบควบคุมความเร็วรอบตามภาระอัตราการใช้.....	45
5.9 ข้อมูลเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของปั๊มระหว่างไม่ใช้วงจรควบคุมกับใช้วงจรควบคุมความเร็วรอบ.....	46



สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 Block Diagram การทำงาน โดยรวมของระบบ.....	1
2.1 การคำนวณเสถระหว่างจุดที่ทางเข้าและจุดที่ทางออก.....	5
2.2 ความเร็วของอนุภาคไหลเข้าและไหลออกจากใบพัด.....	6
2.3 สามเหลี่ยมความเร็วขณะอนุภาคของของเหลวไหลออกจากใบพัด.....	7
3.1 ระบบของชุดทดสอบสมรรถนะปั้ม.....	12
3.2 กราฟแสดงผลของการทดสอบสมรรถนะของปั้มหอยโข่ง.....	16
4.1 คุณลักษณะแรงบิด/กระแส-ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	18
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและไหลคของของไหล.....	19
4.3 จุดสมดุลของมอเตอร์ 3 เฟส.....	20
4.4 วงจร Rectifier ก่อนเข้า Inverter.....	22
4.5 วงจร Switching ใน Inverter.....	22
4.6 การทำงานของสวิตช์ที่เฟสต่างๆ.....	23
4.7 Sinusoidal Pulse Width Modulation.....	24
4.8 PWM ที่ความถี่ต่างๆ.....	24
4.9 Block Diagram การควบคุมความเร็วรอบตามอัตราการไหล.....	25
4.10 วงจรการควบคุมอัตราการไหล.....	25
4.11 โครงสร้างของ Paddle-Wheel Flow Sensor.....	26
4.12 K-Factor Curve.....	27
4.13 วงจรสัญญาณของ Flow Sensor แบบ Paddle-Wheel.....	27
4.14 Block Diagram.....	28
4.15 การปรับแต่ง F/V Converter.....	29
4.16 การปรับแต่งค่าใน Inverter.....	30
5.1 ระบบควบคุมความเร็วรอบของปั้มหอยโข่งที่ได้จัดทำ.....	31
5.2 H – Q Curve ของปั้มหอยโข่งที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	40
5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	41
5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับกำลังงานที่ปั้มผลิตขึ้น ได้ที่ความเร็วรอบ ต่างๆ.....	42
5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับประสิทธิภาพปั้มที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	43
5.6 กราฟแสดงสมรรถนะของปั้มที่ความเร็วรอบต่างกัน.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา VII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ระหว่างใช้ระบบควบคุมความเร็วรอบกับไม่ใช้ระบบควบคุมความเร็วรอบ.....	47
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเซตกับอัตราการไหลที่รอบการทำงานต่างๆ.....	48



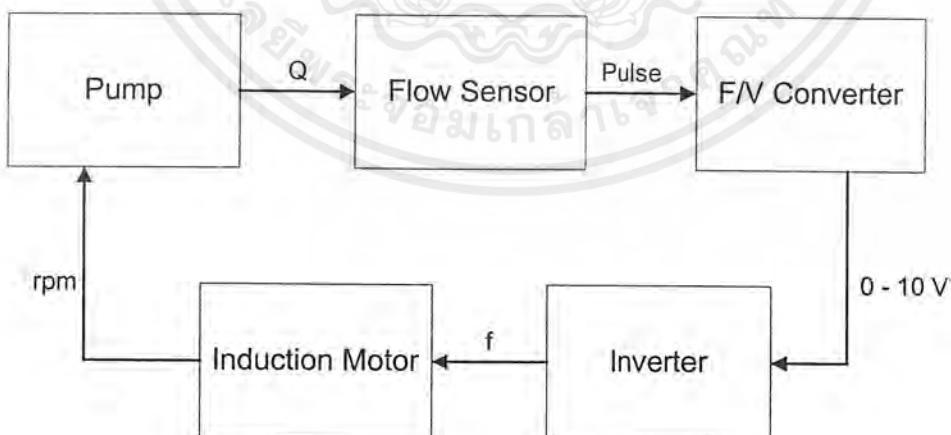
บทที่ 1

บทนำ

สิ่งที่จำเป็นสำหรับการใช้ปั๊มก็คือ การที่สามารถทำให้ปั๊มมีสมรรถนะหรือประสิทธิภาพสูง และเป็นที่ยืดหยุ่นได้ และใช้พลังงานในการขับปั๊มน้อยที่สุด การประหยัดพลังงานซึ่งสามารถทำได้ โดยออกแบบปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวปั๊มให้สูงขึ้น รวมถึงการปรับปรุงระบบที่เกี่ยวข้องกับปั๊มโดยรวม

ในงานบางประเภท มีการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของปั๊มอยู่ตลอดเวลา บางช่วงจะใช้น้ำมาก คือต้องการอัตราการไหลสูง และบางช่วงอาจจะใช้น้อย คือต้องการอัตราการไหลต่ำ โครงการนี้จะศึกษาวิธีควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ขับปั๊ม โดยการให้ความเร็วรอบสัมพันธ์กับอัตราการไหลที่ต้องการ ซึ่งจะใช้สัญญาณป้อนกลับจาก Flow Sensor มาผ่านชุดแปลงสัญญาณความถี่เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า VDC (Frequency to Voltage Converter) จากนั้นจึงใช้สัญญาณแรงดัน VDC ไปควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ซึ่งใช้ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่ไฟฟ้าใช้ขับปั๊ม ให้มอเตอร์ปรับเปลี่ยนความเร็วรอบได้ตามสัญญาณแรงดัน VDC ที่ส่งเข้าไปที่อินเวอร์เตอร์

ในสภาวะปกติที่ไม่มีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ มอเตอร์จะทำงานที่ความเร็วรอบค่อนข้างจะคงที่ ถ้าหากเราสามารถทำให้มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วรอบที่เหมาะสมกับอัตราการไหล โดยถ้ามีอัตราการไหลต่ำก็ให้มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วรอบต่ำกว่าตอนที่อัตราการไหลสูง ก็จะทำให้เป็นการประหยัดพลังงานที่ให้มอเตอร์



รูปที่ 1.1 Block Diagram การทำงานโดยรวมของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับปั๊ม

ปั๊มเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายเทของไหลผ่านทางเส้นท่อ มีปั๊มอยู่หลายชนิดซึ่งออกแบบมาใช้งานในรูปแบบที่แตกต่างกัน จะขอยกตัวอย่างประเภทของปั๊มที่มีใช้กันและจะแสดงให้เห็นแนวทางที่เป็นประโยชน์ในการเลือกประเภทของปั๊มสำหรับงานเฉพาะอย่าง และจะอธิบายไปถึงเรื่องวิธีการทดสอบปั๊ม การนำผลที่ได้มาใช้งานในการเลือกขนาดปั๊ม ซึ่งจะครอบคลุมถึงเรื่อง การเกิด Cavitation และการหลีกเลี่ยงปรากฏการณ์นี้ ด้วยการออกแบบปั๊มให้เหมาะสม ซึ่งจะครอบคลุมถึงการคำนวณ Net Positive Suction Head (NPSH)

2.1 ชนิดของปั๊ม (Pump Classification)

โดยทั่วไปปั๊มมีอยู่สองประเภทคือ

1. Non-Positive Displacement
2. Positive Displacement

Non-Positive Displacement มักจะใช้ในรูปของการหมุนเป็นการส่งถ่ายกำลังไปยังของไหลในรูปของความเร็ว และความดัน ส่วนปั๊มแบบ Positive Displacement มีการจำกัดปริมาณหรือการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของ Chamber ซึ่งรับและปล่อยของไหลจากปั๊ม

การจำแนกปั๊มแบบ Non-Positive Displacement มักจะอ้างอิงจากทิศทางการไหลของของไหลนั้นว่าจะเป็นลักษณะตามแนวแกนของการหมุน หรือขนานกับแกนหมุน (ของไหลผ่านเข้ามาในแนวรัศมีของปั๊มในทิศทางตั้งฉากกับแกนหมุนของปั๊ม) ในการหมุนแบบผสม ทิศทางการไหลของของไหล ไม่ได้ไหลแบบผ่านในแนวแกนหรือตั้งฉากกับแนวแกนอย่างสมบูรณ์แต่มีการผสมผสานในสองรูปแบบ จึงแบ่งประเภทของปั๊มตามทิศทางการไหลได้ 3 แบบ ได้แก่

1. ปั๊มแบบไหลตามแกน (Propeller Pump or Turbine Pump) ใช้ในการยกระดับของไหลที่ไม่สูงขึ้นไปมากนัก มอเตอร์หรือเครื่องยนต์สามารถนำมาใช้เป็นต้นกำลังให้แก่ปั๊ม โดยส่งถ่ายกำลังไปหมุนเพลลาของใบพัดซึ่งหมุนอยู่ในเรือนปั๊มและถูกจำกัดบังคับทิศทางการไหลอยู่ภายในนั้น
2. ปั๊มแบบการไหลผสม (Mixed Pump) เป็นหนึ่งในประเภทของการไหลที่ Impeller ไม่ได้มีการไหลตามแกนอย่างสมบูรณ์ หรือตามแนวรัศมีอย่างสมบูรณ์
3. ปั๊มแบบตามแนวรัศมี (Centrifugal Pump) ของไหลไหลผ่าน Casing เข้ามาและออกในทิศทางการไหลในแนวรัศมีของการหมุนของ Impeller

ในการออกแบบปั๊มบางอย่าง เราสามารถนำใบพัดมาต่อกัน เรียกว่า Multi-Stage Turbine Pump โดยนำไปใช้ในงานสูบน้ำที่อยู่ลึกมากๆ เมื่อใบพัดตัวแรกจับดันของเหลวขึ้นมาจะถูกส่งต่อไปยังใบพัดตัวที่ 2 และส่งต่อไปยังตัวถัดไปจนถึงตัวที่ 4 โดยเรื่อนใบพัดจะถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน จำนวนใบพัดที่จะกำหนดไปใช้ในการออกแบบปั๊มจะขึ้นกับความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน ซึ่งรู้จักกันในนาม Semi Open Impellers และ Enclose Impellers

สำหรับปั๊มแบบ Positive Displacement มีการออกแบบเพื่อการใช้งานในหลายๆแบบ เช่น Reciprocating Pump ใช้สำหรับสูบน้ำจากโคลนหรือซีเมนต์ โดยมีลูกสูบชักสูบของเหลวเข้ามาในจังหวะดูดและดันของเหลวออกในจังหวะคาย และมีลิ้นปิดเปิดแบบทางเดียวเพื่อควบคุมทิศทางการไหล

Rotary Gear Pump เป็นปั๊มแบบ positive displacement อีกประเภทหนึ่ง ประกอบด้วยเฟือง 2 ตัวซึ่งหมุนขบกันอยู่ภายในเรือนปั๊ม เมื่อเฟืองหมุนของเหลวจะถูกจับดันเข้าไปในช่องว่างระหว่างฟันเฟือง 2 ตัวและถูกส่งออกไปยังอีกด้านหนึ่ง

การเลือกใช้ปั๊มจะต้องพิจารณาตามที่คุณผลิตได้ออกแบบและทำการทดสอบกำหนดสมรรถนะของปั๊มไว้เพื่อนำไปใช้ในสภาพการทำงานที่เหมาะสม

2.2 เฮดปั๊ม (Head Pump)

ในการศึกษาเกี่ยวกับการทำงานของปั๊ม จำเป็นต้องทราบทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับเฮดของปั๊ม ซึ่งสามารถจำแนกได้หลายชนิด ดังนี้

2.2.1 เฮดความดัน (Pressure Head ; H_p) ค่าความดันนอกจากจะบอกเป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่ เช่น N/m^2 หรือ psi ถ้าเป็นความดันของของเหลวก็มักจะนิยมบอกเป็นแท่งความสูงของของเหลวที่จะก่อให้เกิดความดันที่กำหนดบนผิวหน้าซึ่งรองรับแท่งของเหลว นั้น ความดันซึ่งบอกเป็นแท่งความสูงของของเหลวนี้เรียกว่า เฮดความดัน (Pressure Head) โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (P) และเฮดความดัน (H_p) คือ

$$H_p = P / \gamma = P / \rho g \quad (2.1)$$

โดย γ = น้ำหนักจำเพาะของของเหลว

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

2.2.2 เฮดความเร็ว (Velocity Head ; H_v) ของเหลวที่ไหลในท่อหรือทางน้ำเปิดด้วยความเร็วใดๆนั้นมีพลังงานจลน์อยู่ พลังงานส่วนนี้เมื่อบอกในรูปของเฮดคือ

$$H_v = V^2 / 2g \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสถียรภาพอาจให้คำจำกัดความอีกอย่างหนึ่งว่า เป็นความสูงของของเหลวที่ตกลงมาด้วยแรงดึงดูดของโลกจนได้ความเร็วเท่ากับความเร็วในการไหลของของเหลวนั้น

2.2.3 **เสถียรภาพ (Static Head ; H_s)** ในการทำงานของปั๊มโดยทั่วไปของเหลวจะถูกเพิ่มพลังงานเพื่อให้มันไหลจากจุดๆหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งซึ่งอยู่สูงกว่า ความดัน (ซึ่งคิดเป็นแท่งความสูงของของเหลว) ที่กระทำต่อศูนย์กลางของปั๊มทั้งทางด้านดูดและด้านจ่ายในขณะที่ความเร็วของการไหลผ่านระบบเป็นศูนย์ เรียกว่า **เสถียรภาพ (Static Head)**

สำหรับเสถียรภาพรวม (Total Static Head) ก็คือผลต่างของเสถียรภาพด้านจ่ายกับเสถียรภาพด้านดูดค่าดังกล่าวนี้เป็นเสถียรภาพที่ปั๊มจะต้องเพิ่มให้แก่ของเหลวก่อนที่จะมีการไหลเกิดขึ้น

2.2.4 **เสถียรภาพเสียด (Friction Head ; H_f)** ในขณะที่ของเหลวไหลผ่านระบบทั้งทางด้านดูดและด้านจ่าย พลังงานหรือเสถียรภาพในการไหลส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปเนื่องจากความเสียดระหว่างของเหลวกับผนังท่อและส่วนประกอบต่างๆ ซึ่งรวมเรียกว่า **เสถียรภาพเสียด (Friction Head)**

ในระบบสูบน้ำทั่วไป การเสียดเนื่องจากความเสียดอาจเกิดขึ้นได้หลายจุด การเสียดเสถียรภาพทั้งหมดนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลผ่านระบบท่อ ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น

2.2.5 **เสถียรภาพรวม (Total Head ; H_T)** เสถียรภาพรวมของน้ำ ณ จุดหนึ่งจุดใด ก็คือพลังงานทั้งหมดของน้ำที่บอกในรูปเสถียรภาพของน้ำ ณ จุดนั้นๆ

$$\begin{aligned} \text{เสถียรภาพรวม} &= \text{เสถียรภาพความดัน} + \text{เสถียรภาพความเร็ว} + \text{เสถียรภาพเสียด} \\ H_T &= H_p + H_v + H_s = \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z \end{aligned} \quad (2.3)$$

ความแตกต่างระหว่างเสถียรภาพรวมของ 2 จุด ในกรณีที่ไม่มีพลังงานเพิ่มให้กับของเหลวก็คือเสถียรภาพเสียดระหว่าง 2 จุดนั้น

ดังนั้นจะได้ว่าเสถียรภาพเสียดระหว่างจุดที่ 1 และจุดที่ 2

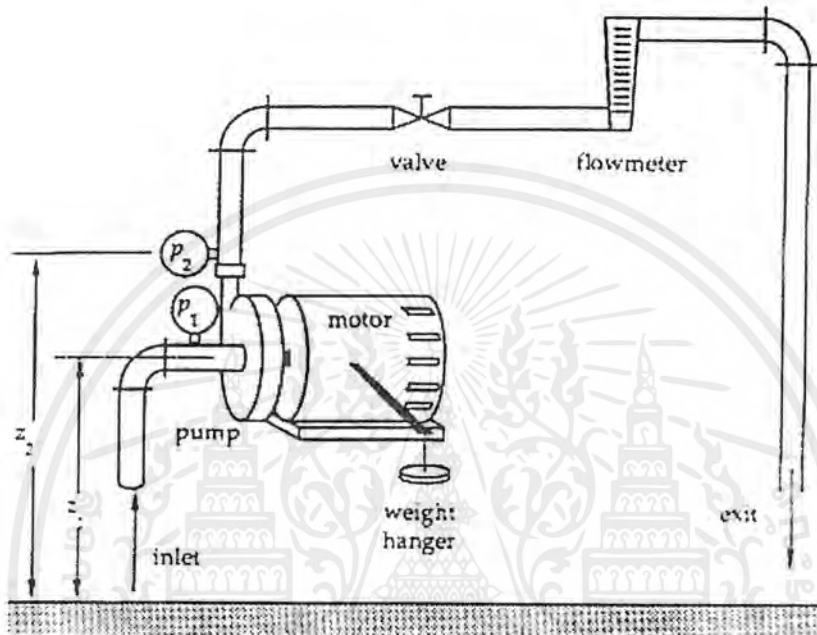
$$H_{f12} = \left(\frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma} \right) + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} \right) + (Z_1 - Z_2) \quad (2.4)$$

ในกรณีที่จุด 1 อยู่ที่ทางเข้าของปั๊ม และจุดที่ 2 อยู่ที่ทางออกของปั๊ม เสถียรภาพที่เพิ่มขึ้นก็คือเสถียรภาพที่ปั๊มให้แก่ น้ำ เรียกว่า **เสถียรภาพรวมของปั๊ม (Total Dynamic Head or Total Discharge Head ; H_{TDH})**

$$\begin{aligned} H_{TDH} &= H_{T2} - H_{T1} + H_f \\ H_{TDH} &= \left(\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \right) - \left(\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 \right) + H_f \end{aligned} \quad (2.5)$$

ในกรณีที่ H_f น้อยมากถือว่าเป็นศูนย์ และระดับทางเข้าออกของปั๊มอยู่ในระดับเดียวกัน ($Z_1 = Z_2$) สมการจะเป็น

$$H_{TDH} = \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma} \right) + \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} \right) \quad (2.6)$$

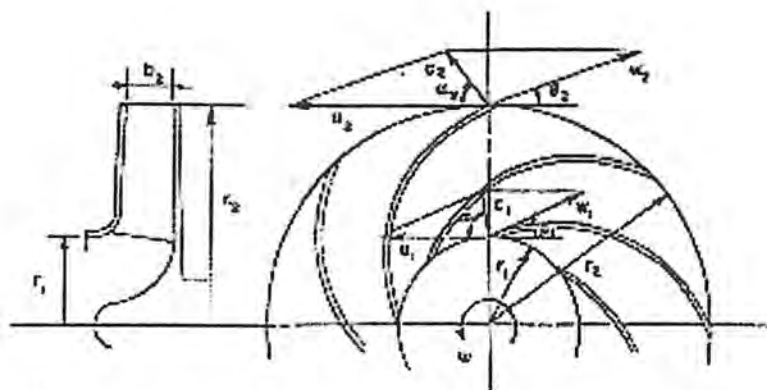


รูปที่ 2.1 การคำนวณเฮดระหว่างจุดที่ทางเข้าและจุดที่ทางออก

2.3 สมการออยเลอร์ (Euler's Equation)

ที่ใบพัดของปั๊มซึ่งทำงานโดยอาศัยแรงเหวี่ยงเพียงอย่างเดียว ของเหลว (ในที่นี้คือน้ำจืดที่อุณหภูมิห้อง) จะถูกเหวี่ยงโดยครีบบใบพัด (Vane) ให้ไหลออกจากศูนย์กลางผ่านช่องว่างระหว่างจานประกบ (Shroud) ในรูปที่ 2.2 ใบพัดหมุนด้วยความเร็วเท่ากับ ω ของเหลวไหลเข้ามาในใบพัดซึ่งมีช่องเปิดรัศมี r_1 ที่จุดนี้จะมีความเร็วตามเส้นรอบวงเท่ากับ $U_1 = r_1\omega$ และความเร็วสัมบูรณ์ (Absolute Velocity ; C_1) โดย C_1 เป็นความเร็วรวมของ U_1 และความเร็วสัมผัสของครีบบใบพัด W_1

ในทำนองเดียวกันที่ขอบนอกของใบพัด ของเหลวไหลออกจากใบพัดที่ความเร็วสัมบูรณ์ C_2 โดย C_2 เป็นความเร็วรวมของ $U_2 = r_2\omega$ และความเร็วที่ปลายครีบบใบพัด W_2



รูปที่ 2.2 ความเร็วของอนุภาคของเหลวไหลเข้าและไหลออกจากใบพัด

แรงที่กระทำต่ออนุภาคของเหลวโดยใบพัดทำให้เกิดโมเมนตัม ตามกฎของโมเมนตัม การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมในแนวเส้นรอบวงจะมีค่าเท่ากับแรงเหวี่ยง หรือ

$$T = \rho q (r_2 c_2 \cos \alpha_2 - r_1 c_1 \cos \alpha_1) \quad (2.7)$$

โดย $T =$ แรงเหวี่ยง (N-m)

$q =$ อัตราการไหล (m^3/s)

กำลังงานที่เกิดขึ้นจากแรงเหวี่ยง T สามารถหาได้จากผลคูณระหว่าง T และความเร็วรอบ ω หรือ

$$T\omega = \rho q (U_2 C_{U2} - U_1 C_{U1}) \quad (2.8)$$

โดย $\omega =$ ความเร็วรอบ (s^{-1})

$C_{U1} =$ ความเร็วสัมผัสในแนวเส้นรอบวงที่จุดซึ่งของเหลวไหลเข้า (m/s)

$C_{U2} =$ ความเร็วสัมผัสในแนวเส้นรอบวงที่จุดซึ่งของเหลวไหลออก (m/s)

กำลังงานจะต้องมีค่าเท่ากับเฮดที่ของเหลวได้รับจากใบพัดคูณกับน้ำหนักของของเหลวที่ไหลผ่านใบพัดต่อวินาที หรือ

$$\rho g q H_e = \rho q (U_2 C_{U2} - U_1 C_{U1}) \quad (2.9)$$

โดย $H_e =$ เฮดที่ของเหลวได้รับจากใบพัด (m)

จากสมการ (2.9) เฮดที่ของเหลวได้รับจากใบพัด (H_e) จะมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_e = \frac{1}{g}(U_2 C_{U2} - U_1 C_{U1}) \quad (2.10)$$

สมการที่ (2.10) ที่หาได้นี้เรียกว่า สมการของออยเลอร์ (Euler's Equation) ซึ่งสามารถใช้ได้กับ ปี่มเทอร์โบทุกชนิด แต่อย่างไรก็ตามในปี่มเทอร์โบทั่วไป ของเหลวที่ไหลเข้ามาสู่ใบพัดจะไม่มี ความเร็วตามแนวเส้นรอบวง ($C_{U1} = 0$) ดังนั้นจะได้ว่า

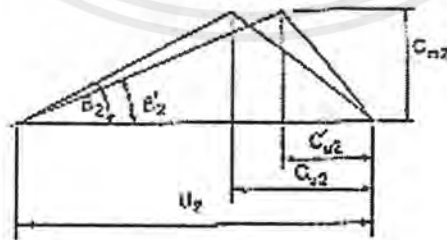
$$H_e = \frac{U_2 C_{U2}}{g} \quad (2.11)$$

ขอให้สังเกตว่าความเร็วสัมบูรณ์ และความเร็วสัมพัทธ์ที่นำมาคำนวณเสดที่ของเหลวจะได้รับ จากใบพัด H_e เป็นความเร็วที่แท้จริงของอนุภาคของของเหลวในใบพัดนั้น ที่ขอบนอกของใบพัด ความเร็วตามแนวเส้นรอบวงตามความเป็นจริงจะมีค่าน้อยกว่าที่แสดงไว้ในรูป ซึ่งคำนวณจากมุมที่ ปลายครีบบใบพัดเท่ากับ β_2 ทั้งนี้มีสาเหตุจากการลื่นไหลของอนุภาคของของเหลวที่ปลายครีบบใบพัด เสดที่แท้จริงซึ่งของเหลวได้รับจากใบพัด (H_u) จึงมีค่าน้อยกว่าทางทฤษฎีซึ่งคำนวณจากสมการออย ลเลอร์ (H_e)

ในรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงรูปสามเหลี่ยมความเร็วเมื่อมุมที่ปลายครีบบใบพัดเท่ากับ β_2 และเมื่อ ค่ามุมที่แท้จริงเท่ากับ β_2' ตามลำดับ ดังนั้นเสดที่ของเหลวได้รับจากใบพัดที่แท้จริงคือ

$$H_a = \frac{U_2 C'_{U2}}{g} \quad (2.12)$$

อัตราส่วนระหว่างเสดที่ที่ได้รับจริงกับค่าทางทฤษฎี H_u/H_e ประมาณ 0.6 - 0.8



รูปที่ 2.3 สามเหลี่ยมความเร็วขณะอนุภาคของของเหลวไหลออกจากใบพัด

2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเสดกับอัตราการไหล

จากสามเหลี่ยมความเร็วในรูปที่ 2.3 จะได้ว่า $C_{u2} = U_2 - C_{m2} / \tan \beta_2$ ดังนั้นจากสมการที่ 2.11 จะได้ว่า

$$H_e = \frac{U_2^2}{g} - \frac{U_2 C_{m2}}{g \tan \beta_2} \quad (2.13)$$

แต่เนื่องจาก C_{m2} เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการไหล Q และค่าของ β_2 มักจะถูกเลือกให้มีค่าน้อยกว่า 90° สมการ 2.13 แสดงให้เห็นว่าเสดจะลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเพิ่มอัตราการไหล Q

2.5 สมการของเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation)

จากสมการของเบอร์นูลลี คือ

$$\frac{p}{\rho} + gZ + \frac{v^2}{2} = \text{ค่าคงที่} \quad (2.14)$$

นำสมการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ที่ทางดูดและทางส่งของปั๊มจะได้ว่า

$$\text{พลังงานกลขาเข้า} = \frac{p_i}{\rho} + gZ_i + \frac{v_i^2}{2} \quad (2.15)$$

$$\text{พลังงานกลขาออก} = \frac{p_o}{\rho} + gZ_o + \frac{v_o^2}{2} + h_f \quad (2.16)$$

ดังนั้นจะได้ พลังงานกลสุทธิ(Head Pump ; H) คือ

$$H = \left(\frac{p_o - p_i}{\rho} \right) + g(Z_o - Z_i) + \left(\frac{v_o^2 - v_i^2}{2} \right) + h_f \quad (2.17)$$

เป็นพลังงานที่ปั๊มนำมาขับของเหลวให้เคลื่อนที่

เราสามารถพัฒนาสมการเบอร์นูลลี เพื่อใช้ในการคำนวณหา Head Pump ในการทดสอบได้

ดังนี้

$$H = H_d - H_s + Z_d + \Delta h_v \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย H_d คือ เฮดความดันทางออก

H_s คือ เฮดความดันทางดูด

Z_d คือ ความแตกต่างของความสูงระหว่างทางเข้าและทางออก

2.6 ความเร็วจำเพาะ

ในปั๊มแบบ Centrifugal ของเหลวที่ไหลเข้ามาสู่ศูนย์กลางของใบพัด จะถูกเพิ่มพลังงานโดยแรงกระทำของครีบบใบพัดและแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง อัตราการเพิ่มพลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของของเหลวจะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรงของใบพัดและอัตราการหมุน ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับรูปทรงของใบพัดที่ผู้ออกแบบกำหนดขึ้นเพื่อให้เหมาะสมกับการทำงานก็มี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนาของใบพัด ทิศทางการไหลออกจากใบพัด จำนวนและความโค้งของครีบบใบพัด เป็นต้น ใบพัดที่มีรัศมีโตและความหนาของใบพัดน้อย จะให้พลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของของเหลวมากกว่าใบพัดที่มีรัศมีเล็กและมีความหนามาก ดังนั้น จึงเหมาะกับงานที่ต้องการเฮดสูงแต่อัตราการสูบไม่มาก

การที่จะเลือกใช้ปั๊มที่มีใบพัดลักษณะไหนนั้น พิจารณาได้จากความเร็วจำเพาะ (Specific Speed) ซึ่งคำนวณโดย

$$N_s = \frac{rpm \sqrt{gpm}}{H^{0.75}} \quad (2.19)$$

โดย N_s = ความเร็วจำเพาะ (rpm)

rpm = ความเร็วรอบของใบพัด (rpm)

gpm = อัตราการไหล (gpm)

H = เฮดรวม หรือ Total Dynamic Head ; TDH (ft)

สำหรับการคำนวณในระบบ SI สมการสำหรับความเร็วจำเพาะ คือ

$$N_s = \frac{1.633rpm \sqrt{lps}}{H_m^{0.75}} \quad (2.20)$$

โดย lps = อัตราการไหล (litre/s)

H_m = TDH (m)

ในความเป็นจริงแล้วความเร็วจำเพาะไม่ได้เป็นความเร็วในความหมายที่ใช้กัน โดยทั่วไปแต่เป็นตัวเลขที่บ่งบอกลักษณะการออกแบบของใบพัดมากกว่า เช่น ปั๊มซึ่งมีความเร็วจำเพาะระหว่าง 500 – 3,000 จะมีทิศทางการไหลออกตั้งฉากกับเพลลา (Radial Flow) เป็นต้น ขณะที่ความเร็วจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นรัศมีของใบพัดจะเล็กลง และทิศทางการไหลออกจะเปลี่ยนจากในแนวตั้งฉากกับเพลลาเป็น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแนวนานกับเพลลา ใบพัด 2 ขนาดที่มีรูปร่างลักษณะเหมือนกัน แต่เพิ่มหรือลดขนาดในสัดส่วนเดียวกันทุกด้านจะมีความเร็วจำเพาะเท่ากัน

2.7 Net Positive Suction Head (NPSH)

เมื่อพิจารณาลักษณะทางเข้าของปั๊มหอยโข่งจะมี 2 แบบ คือ ระดับของเหลวต่ำกว่าใบพัดของปั๊ม และระดับของเหลวสูงกว่าใบพัดของปั๊ม เมื่อปั๊มทำงานแล้วถ้าความดันของเหลวก่อนเข้าปั๊มมีค่าน้อยกว่าความดันไอของของเหลวที่อุณหภูมิเดียวกัน ของเหลวจะเดือดที่บริเวณใบพัด ทำให้เกิดการควาวิเตชัน สำหรับระดับของเหลวที่ต่ำกว่าใบพัดของปั๊มจะมีโอกาสเกิดควาวิเตชันได้มากกว่า เราสามารถพัฒนาสมการเบอร์นูลลี เพื่อใช้ในการหาค่า Net Positive Suction Head Available (NPSH_a) ดังสมการต่อไปนี้

$$NPSH_a = h_p - h_z - h_f - h_{vp} \quad (2.21)$$

โดย NPSH_a คือ เสดทางเข้าของของเหลวสุทธิ
 h_p คือ เสดความดันของเหลวที่ทางเข้าปั๊ม
 h_z คือ เสดความสูงของปั๊มเทียบกับระดับของเหลว
 h_f คือ เสดความฝืดด้านทางเข้า
 h_{vp} คือ เสดความดันไอ

ปั๊มแต่ละแบบ ทางผู้ผลิตจะทำการทดสอบและกำหนดค่า Net Positive Suction Head Required (NPSH_r) ถ้า NPSH_a มากกว่า NPSH_r จะไม่ทำให้เกิดควาวิเตชัน และควรจะมีมากกว่ากัน 1 เมตร เป็นอย่างน้อยเพื่อความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน

2.8 ควาวิเตชัน (Cavitation)

เป็นที่ทราบกันดีว่าความดันด้านดูดของปั๊มหอยโข่งจะต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ถ้าหากว่า เสดความดันนี้มีค่าไม่เพียงพอ ของเหลวจะเริ่มต้มนเดือดที่อุณหภูมิห้อง ตัวอย่างเช่น น้ำเดือดที่ 33 °C (92 °F) ที่ความดัน 5.1 kPa (0.75 psia) การเดือดด้วยตัวมันเองมีความเกี่ยวพันในรูปของฟองอากาศความดันที่เกิดขึ้น และปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในปั๊มนี้เราจะเรียกว่า Cavitation

การเกิดควาวิเตชันในปั๊มหอยโข่ง ฟองเดือดจากความดันมักจะเกิดขึ้นที่ขอบของใบพัด และในขณะที่ของเหลวเคลื่อนที่ในแนวรัศมีผ่านใบพัด ฟองไอน้ำจะปะทะกับของเหลวย่านความดันสูง ทำให้เกิดการพังทลายและส่งผ่านคลื่นความดันออกไป คลื่นความดันจะกัดเซาะตัวใบพัดและเรือนปั๊มให้สึกกร่อน ที่รู้จักกันดีในนามของ Cavitation Erosion เมื่อเกิด Cavitation Erosion ขึ้น ตัวใบพัดจะไม่สามารถขับเคลื่อนของเหลวผ่านไปตามเรือนปั๊มได้ทั้งหมด จากผลเช่นนี้ประสิทธิภาพของปั๊ม

จะตกลงอย่างมาก หากสถานการณ์นี้ไม่ได้รับการแก้ไข ตัวปั๊มอาจจะเสียได้ อันเนื่องมาจากการกัดเซาะ โลหะ และการเกิดการล้าที่ตัวเพลลา แบริง และซีล

คาวีเตชันไม่ใช่ปัญหาที่ควรจะแก้ไขภายหลังจากติดตั้งระบบแต่ควรพิจารณาตั้งแต่ขั้นออกแบบ ในทางตรงข้ามการเกิดคาวีเตชันสามารถทำนายได้ และวิศวกรควรจะแน่ใจว่าเมื่อทำการออกแบบระบบ คาวีเตชันจะไม่เกิดขึ้น ผู้ผลิตปั๊มจะทำการทดสอบปั๊มและหาข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการทำนายการเกิดปรากฏการณ์ Cavitation

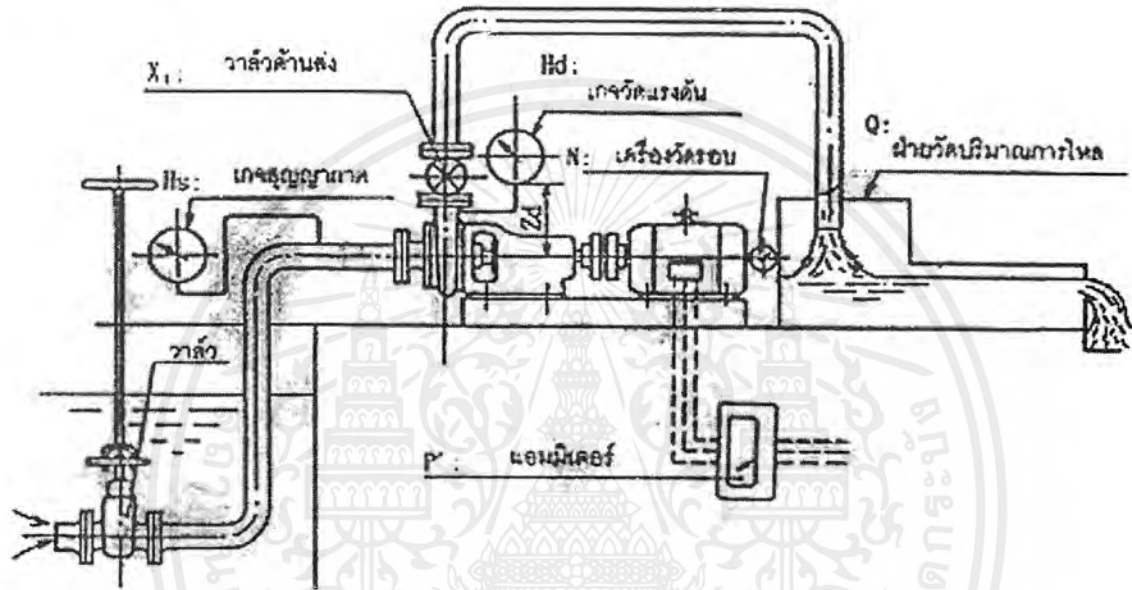


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดสอบสมรรถนะของปั๊ม

ในบทนี้จะเป็นการอธิบายวิธีการทดสอบสมรรถนะ รวมไปถึงหลักการที่ใช้คำนวณหาสมรรถนะของปั๊มไฮดรอลิกที่ใช้ในโครงการนี้ สำหรับการออกแบบระบบทดสอบปั๊มไฮดรอลิกจะใช้หลักการตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบของชุดทดสอบสมรรถนะปั๊ม

3.1 กำลังงานที่มอเตอร์ให้แก่ปั๊มและที่ปั๊มให้แก่ น้ำ

กำลังงาน หมายถึง อัตราการทำงานต่อหนึ่งหน่วยเวลา หน่วยของกำลังงานที่นิยมใช้ทั่วไป ได้แก่ แรงม้าและวัตต์ ซึ่ง 1 แรงม้า = 745.7 วัตต์ หรือนิวตันเมตรต่อวินาที หรือ 550 ฟุตปอนด์ต่อวินาที

ประสิทธิภาพของปั๊ม หมายถึง ร้อยละของกำลังงานที่ปั๊มผลิตได้ เมื่อเทียบกับกำลังงานที่จ่ายให้ของเหลวโดยผ่านเพลลาจากต้นกำลังและใบพัด ดังสมการ

$$\eta_p = W_o / W_i \quad (3.1)$$

กำลังงานที่ปั๊มผลิตได้สามารถคำนวณได้ตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_o = \rho g \left(\frac{Q}{60} \right) \left(\frac{H}{1000} \right) \quad (3.2)$$

โดย W_o = กำลังงานที่ได้จากปั๊ม (Pump Output ; kW)

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)

Q = อัตราการไหล (m^3/min)

H = เหนือรวมของปั๊ม (m)

สมการที่ 3.1 สามารถลดรูปให้เหลือได้โดย

$$W_o = 0.163 \gamma QH \quad (3.3)$$

โดย γ = น้ำหนักจำเพาะของของเหลว (ถ้าเป็นน้ำจะเท่ากับ 1)

ส่วน Input ให้กับปั๊มหรือ Output ของมอเตอร์นั้น คือ กำลังเพลาชักของมอเตอร์ หาได้โดยการวัดกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้แล้วคูณกับประสิทธิภาพของมอเตอร์ ดังสูตร

$$W_i = (P')(\eta_m) \quad (3.4)$$

โดย W_i = กำลังงานที่ได้จากมอเตอร์ (Pump Input ; kW)

P' = กำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากมอเตอร์ (kW)

η_m = ประสิทธิภาพมอเตอร์ (ในโครงการนี้กำหนดเป็น 80 %)

เมื่อแทนสมการที่ 3.3 และ 3.4 ลงในสมการที่ 3.1 จะได้ประสิทธิภาพปั๊ม คือ

$$\eta_p = \frac{0.163 \gamma QH}{(P')(\eta_m)} \quad (3.5)$$

3.2 การวัดค่าจากการทดสอบสมรรถนะของปั๊ม

ในการทดสอบสมรรถนะของปั๊มจำเป็นต้องวัดค่าต่างๆ เพื่อใช้ในการคำนวณและเขียนกราฟแสดงสมรรถนะ ค่าที่ทำการวัดมีดังนี้

3.2.1 อัตราการไหล (m^3/min)

ในการทดลองนี้จะใช้วิธีวัดอัตราการไหลโดยใช้ Flow meter ชนิด Paddle-Wheel โดยสัญญาณที่ได้ออกมาจาก Flow meter จะเป็นสัญญาณแบบ Pulse จากนั้นจะต้องใช้ Scope วัดสัญญาณ Pulse ที่ได้ นั้น โดยอ่านค่าความกว้างของคลื่นในหนึ่งคาบ จากนั้นจึงนำค่าที่อ่านได้ไปคูณ

กับสเกลของ Scope ค่าที่ได้หน่วยจะเป็น ms แล้วต้องแปลงให้เป็นหน่วย Hz จากนั้นจึงนำไปคำนวณโดยใช้สูตรตาม Spec. ของ Flow meter (ซึ่งจะแสดงในบทที่ 4) จึงจะได้ค่าอัตราการไหลออกมาในหน่วยลิตรต่อนาที

3.2.2 เฮดรวม (m)

เราสามารถคำนวณเฮดรวมได้จากสมการที่ 3.10 โดยที่

H_d เป็นเฮดความดันทางออกสามารถอ่านค่าได้จาก Pressure Gauge ซึ่งติดตั้งไว้ทางด้านจ่าย ได้โดยตรง มีหน่วยเป็น kg/cm^2

H_s เป็นเฮดความดันทางดูดสามารถอ่านค่าได้จาก Vacuum Gauge ซึ่งติดตั้งไว้ทางด้านดูด ได้โดยตรง มีหน่วยเป็น cm Hg

Z_d เป็นความแตกต่างระหว่างความสูงที่ติดตั้ง Gauge ทั้งสองด้าน ซึ่งในชุดทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 0.27 m.

ΔH_v เป็นความแตกต่างของเฮดความเร็ว สามารถหาค่าได้โดยการนำค่าอัตราการไหลที่วัดได้ มาหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของท่อทั้งทางเข้าและทางออก ก็จะได้ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านท่อทั้งทางเข้าและทางออก แล้วจึงใช้สมการที่ 2.5 หาค่า H_v ของแต่ละด้าน หลังจากนั้นจึงนำมาลบกัน โดยให้ $H_{v_{out}} - H_{v_{in}}$

สำหรับท่อทางเข้าใช้ขนาด 1 นิ้ว (เส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อเท่ากับ 0.025 m) และท่อทางออกใช้ขนาด 1/4 นิ้ว (เส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อเท่ากับ 0.0375 m)

3.2.3 กำลังงานที่ปั๊ม (kW)

สามารถอ่านค่าได้โดยตรงจาก Watt meter แต่ต้องนำค่าที่ได้ไปคูณกับประสิทธิภาพของมอเตอร์ด้วย เพื่อที่จะให้ได้ค่าที่เป็น Input จริงๆที่ให้แก่ปั๊ม

3.2.4 ความเร็วรอบ (rpm)

สามารถกำหนดได้จาก Inverter ที่ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่ใช้เป็นต้นกำลังให้กับปั๊ม

3.3 การแปลงหน่วยจากเครื่องมือวัดความดัน

เนื่องจากสเกลที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความดันไม่ได้อยู่ในรูปเฮด ดังนั้นค่าที่ได้จากการวัดจึงต้องทำการแปลงหน่วยซึ่งได้แก่ เฮดความดันทางเข้า เฮดความดันทางออก ซึ่งเราจะคำนวณได้ดังนี้

3.3.1 เฮดความดันทางเข้า (Suction pressure head)

เกจวัดที่ใช้วัดความดันทางเข้ามีสเกลอยู่ใน cmHg โดยสามารถแปลงให้อยู่ในรูปเฮดของน้ำ (m) ได้ดังนี้

เนื่องจากที่ความดัน 1 บรรยากาศ น้ำสามารถดันตัวขึ้นไปได้สูง 10.33 m. และปรอทสามารถดันตัวขึ้นไปได้สูง 76 cm. ดังนั้นจึงสามารถใช้วิธีการเทียบสัดส่วนกัน เพื่อหาความดันให้อยู่ในรูปเฮดน้ำ โดย

$$\frac{H_s}{10.33} = \frac{H_{cmHg}}{76}$$

$$H_s = 0.1359 H_{cmHg}$$

โดยปกติความดันทางเข้าจะต่ำกว่าความดันบรรยากาศ และความดันที่วัดได้อาจอยู่ในรูปความดันเกจ ดังนั้นค่าที่ได้จะติดลบ

3.3.2 เฮดความดันทางออก (Discharge pressure head)

เกจวัดที่ใช้วัดความดันทางออกมีสเกลอยู่ในรูปความดันคือ kg/cm^2 โดยสามารถแปลงให้อยู่ในหน่วยเฮดของน้ำ (m) ได้ดังนี้

$$\rho_{water} * H_d = P_{(kg/m^2)}$$

$$10^3 H_d = 10^4 P_{(kg/cm^2)}$$

$$H_d = 10 P_{(kg/cm^2)}$$

สำหรับความหนาแน่นของน้ำจะขึ้นกับอุณหภูมิ แต่ในการการคำนวณนี้เราประมาณให้ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ $1000 kg/m^3$ เพราะการแปรผันกันดังกล่าวมีค่าไม่มากนัก สามารถไม่นำมาคิดได้

3.4 วิธีการทดลอง

- 3.4.1 ทำการล่อน้ำที่ตัวปั๊มหอยโข่งให้เต็ม
- 3.4.2 ดันสวิทช์ Power ไปที่ "ON" ขณะนี้อินเวอร์เตอร์พร้อมจะทำงาน
- 3.4.3 เปิดประตูน้ำไปให้สุด
- 3.4.4 กดปุ่ม Run ที่ตัวอินเวอร์เตอร์จะทำให้ปั๊มทำงาน ปรับความเร็วรอบที่อินเวอร์เตอร์ไปที่ความเร็วรอบที่ต้องการ
- 3.4.5 บันทึกข้อมูลดังนี้
 - ความเร็วรอบ (rpm)
 - กำลังไฟฟ้าที่วัตต์มิเตอร์ (kW)
 - ความดันท่อดูด (cmHg)

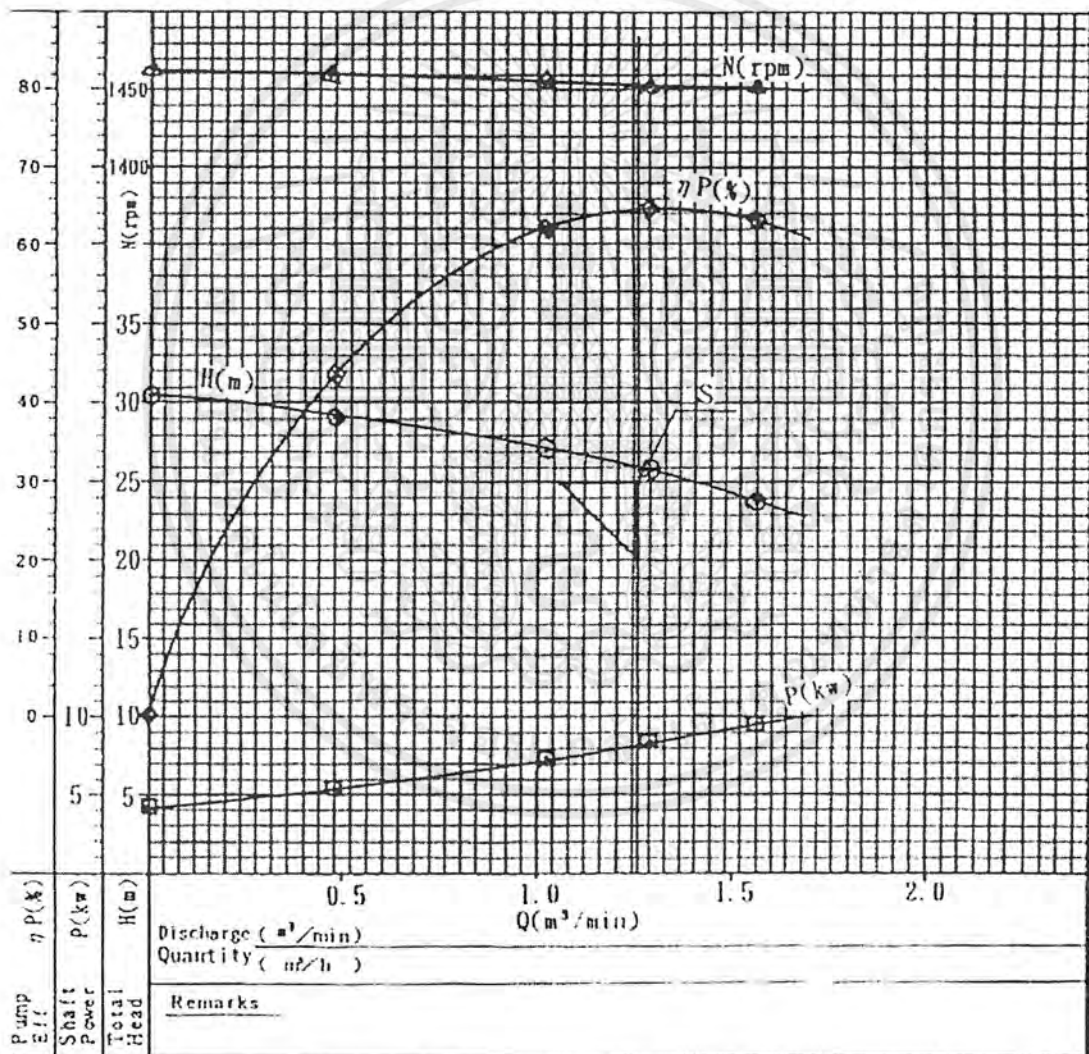
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความดันท่อส่ง (kg/cm^2)
- อัตราการไหล (l/min)

3.4.6 หรือว่าลั่วไป $4\frac{1}{2}$, 5 , $5\frac{1}{4}$, $5\frac{1}{2}$ รอบ และปิดสนิท ตามลำดับแล้วบันทึกข้อมูลตามข้อ 4.5 ต่อการหมุนวาลั่วแต่ละครั้ง

3.5 ผลการทดลอง

สำหรับผลการทดลองจะแสดงในรูปของกราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มหอยโข่งดังรูปที่ 3.2 ซึ่งจากกราฟจะพบว่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ขับปั๊มเมื่อไม่มีระบบควบคุม จะทำงานที่ความเร็วรอบค่อนข้างจะคงที่ (ตามที่ผู้ผลิตกำหนด)



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงผลการทดสอบสมรรถนะของปั๊มหอยโข่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ระบบควบคุมปั๊มหอยโข่งตามภาระการทำงาน

สืบเนื่องมาจากมาตรการในการประหยัดพลังงานตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น จึงต้องมีการปรับเปลี่ยนอัตราการจ่ายน้ำของปั๊มตามภาระการใช้น้ำที่ไม่คงที่ ซึ่งสามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด การปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของปั๊มเป็นวิธีการหนึ่งที่เหมาะสมและมีความเป็นไปได้เนื่องจากอัตราการไหลแปรผันตามความเร็วรอบและมีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้น

$$Q \propto N \tag{4.1}$$

ดังนั้นจึงสามารถออกแบบวงจรควบคุมได้โดยเทียบค่าแบบสัดส่วน การลดลงความเร็วรอบก็ทำให้ต้นกำลังใช้กำลังน้อยซึ่งจะตอบสนองมาตรการในการประหยัดพลังงานได้ และเพื่อการควบคุมให้เป็นไปอย่างอัตโนมัติและการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงภาระการใช้น้ำได้ดี จะใช้วิธีการป้อนกลับสัญญาณเพื่อนำไปแปลงค่าความเร็วรอบ สำหรับต้นกำลังที่ใช้ในการขับปั๊มจะใช้มอเตอร์ในการพิจารณาเพราะสามารถควบคุมได้ง่ายและเป็นที่ยอมรับใช้ในการต่อเข้ากับปั๊ม ดังนั้นในการควบคุมความเร็วรอบปั๊มก็คือการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์นั่นเอง

4.1 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) เป็นมอเตอร์ที่แพร่หลายและใช้งานกันมากที่สุด เพราะราคาของมอเตอร์ถูกและเรายังควบคุมได้ง่าย จึงได้ถูกนำมาใช้เป็นต้นกำลังให้กับปั๊มในโรงงานนี้ ในกรณีที่ต้องการปรับความเร็วของการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เราสามารถพิจารณาการทำงานของมอเตอร์ซึ่งมีการทำงานสัมพันธ์กับความเร็วยรอบ ตามทฤษฎีการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเบื้องต้นที่จะอธิบายต่อไปคือ

เมื่อพิจารณาที่ความเร็วรอบ ความเร็วเชิงโคจรจะขึ้นกับความถี่ของแรงดันที่ป้อนและจำนวนขั้วของสเตเตอร์ โดยได้ความสัมพันธ์

$$N_s = 120f / p \tag{4.2}$$

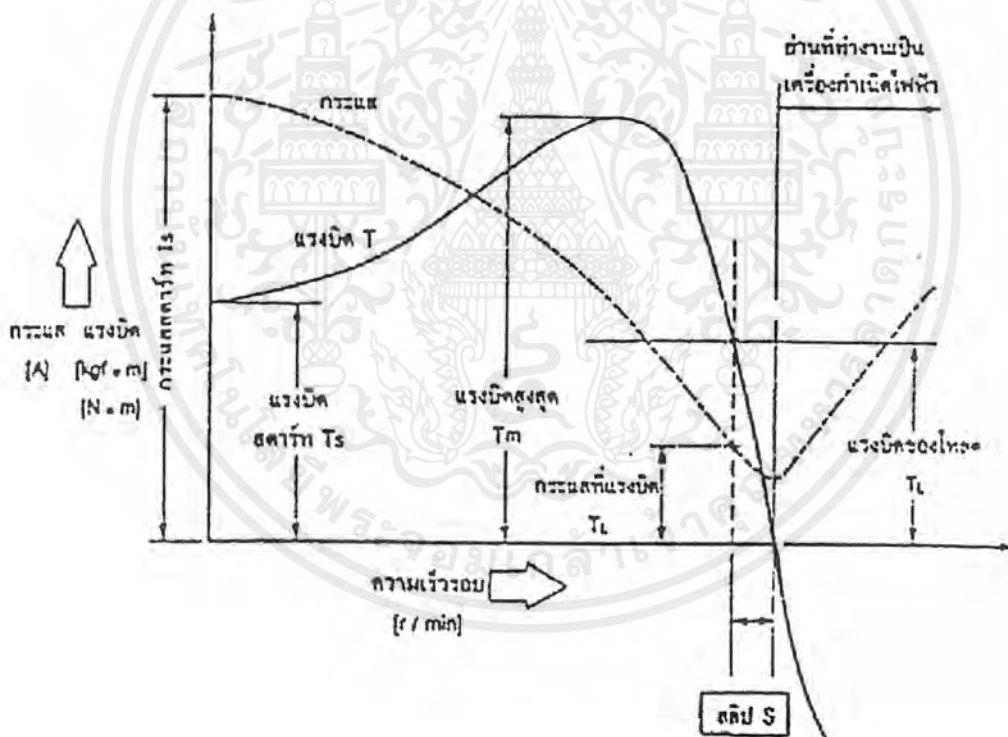
เมื่อเกิดการเหนี่ยวนำที่ Rotor ทำให้ Rotor หมุนด้วยความเร็วยรอบต่ำกว่าความเร็วเชิงโคจร จึงเกิดค่า Slip (S) ขึ้น โดยมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วยรอบ (N) โดยที่

$$N_s = 120 \frac{f}{p} (1 - s) \quad (4.3)$$

เมื่อมอเตอร์ขับโหลด ความเร็วรอบของมอเตอร์จะต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสซึ่งขึ้นกับปริมาณโหลด ขนาดความเร็วที่ลดลงต่อความเร็วซิงโครนัส เรียกว่า Slip (S) โดย

$$S = (N_s - N) / N_s \quad (4.4)$$

ขณะสตาร์ทมอเตอร์ มอเตอร์จะหยุดนิ่งสลลิปจะมีค่าเป็น 1 เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุน ความเร็วรอบจะเพิ่มขึ้น ค่าสลลิปจะลดลง และถ้าให้มอเตอร์ขับโหลดที่แรงบิดที่พิกัด ค่าสลลิปจะมีค่าระหว่าง 3-5% ถ้าโหลดเพิ่มมากขึ้น ค่าสลลิปจะมีค่ามากขึ้น และกระแสเข้ามอเตอร์ก็จะสูงด้วย สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอีกอย่างก็คือ แรงบิดเริ่มหมุน (Starting torque) ควรมากกว่าแรงบิดของโหลด มอเตอร์จึงสามารถต่อกับโหลดขณะเริ่มหมุน ได้ทันที ซึ่งพิจารณาได้ดังรูปที่ 4.1



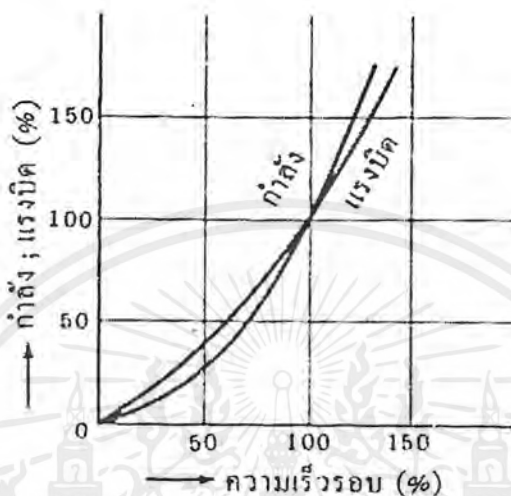
รูปที่ 4.1 แสดงคุณลักษณะแรงบิด/กระแส-ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

สำหรับโหลดที่ใช้กับมอเตอร์ในโรงงานนี้เป็นโหลดของไหล คือกำลังที่ใช้ในการผลักดันหรือเร่งของไหลให้เคลื่อนที่เพื่อให้เกิดการไหล จะต้องมีแรงที่จะมากระทำที่จุดเริ่มต้นของการไหลนั้นๆซึ่งได้จากใบพัด โดยส่วนหนึ่งของกำลังงานที่ใช้เหล่านี้เป็นส่วนที่ทำให้เกิดการสูญเสียจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความฝืดจากความหนืดของตัวของไหลเอง และความฝืดจะแปรตามกำลังสองของอัตราการไหลซึ่งแปรตามความเร็วรอบอีกที ดังนั้นจากเหตุผลดังกล่าวไหลของไหลจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างไหลของไหลกับความเร็วรอบจะเป็นดังนี้

$$\text{Power} : P \propto N^3 \quad \text{Torque} : T \propto N^2$$

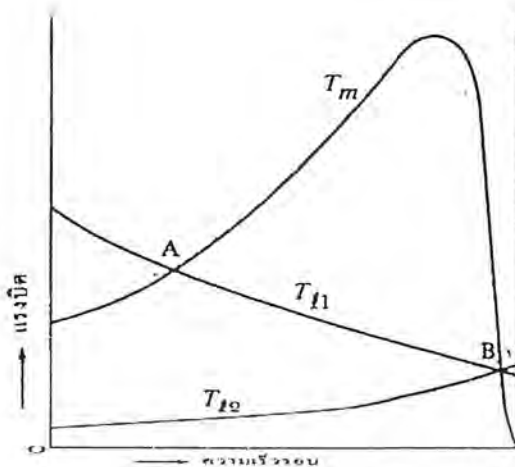


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและไหลของไหล

แต่ในความเป็นจริงจะมีแรงบิดของของไหลในการออกตัวตอนเริ่มต้นอยู่ด้วย เพื่อการเดินเครื่องอย่างมีเสถียรภาพ แรงบิดของมอเตอร์ต้องมีค่ามากพอในการจุดเพลิงให้หมุนเร็วขึ้นเพื่อเข้าสู่จุดเสถียรภาพและคงความเป็นเสถียรภาพไว้ที่จุดนั้นๆ โดยพิจารณาได้จากสมการการเคลื่อนที่เมื่อ โมเมนต์ความเฉื่อยรวมเท่ากับ J , ค่าแรงบิดมอเตอร์เท่ากับ T_m และค่าแรงบิดที่ต้องการของไหลเท่ากับ T_L ดังนั้น

$$J a_\theta = T_m - T_L \quad (4.5)$$

ก่อนถึงจุดสมดุลย์ T_m ต้องมากกว่า T_L และที่จุดสมดุลย์ $T_m = T_L$ อัตราเร่งเชิงมุมเป็น 0 ความเร็วรอบจะไม่เพิ่มมากกว่านี้ นั่นคือ $T_m < T_L$ เมื่อความเร็วรอบเลยจุดสมดุลย์



รูปที่ 4.3 จุดสมมูลย์ของมอเตอร์ 3 เฟส

จากรูปที่ 4.3 T_{L1} เป็น โหลดที่ไม่เสถียรภาพ และ T_{L2} เป็น โหลดที่มีเสถียรภาพในการเดินเครื่อง ดังนั้นจึงควรเลือกให้มอเตอร์มีการใช้งานเหมาะสมกับโหลด

4.2 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

สำหรับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ มีวิธีการควบคุมได้หลายแบบ เช่น

1. ปรับความถี่ของแรงดัน
2. เปลี่ยนขั้ว
3. ปรับค่าแรงดันที่ป้อนให้
4. ป้อนแรงดันในขดลวดโรเตอร์
5. ปรับค่าความต้านทานในขดโรเตอร์
6. การคาสเคด (Cascading)
7. คอมมิวเตเตอร์ มอเตอร์
8. ใช้ไทรสเตอร์ควบคุม

สำหรับในโครงการนี้จะสนใจเฉพาะการควบคุมความเร็วโดยการควบคุมความถี่ เนื่องจากสามารถควบคุมความเร็วได้อย่างต่อเนื่องทั้งในย่านความเร็วสูงกว่าและต่ำกว่าความเร็วที่กำหนด จากสมการที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าความเร็วเชิงโรตอร์ขึ้นกับความถี่ ดังนั้นถ้าเราออกแบบควบคุมมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายแรงที่ปรับความถี่ได้ ก็สามารถปรับความเร็วของมอเตอร์ได้ หรือถ้าเราปรับจำนวนขั้วของสเตเตอร์ได้เราก็จะได้ความเร็วค่าต่างๆได้ แต่เราจะมุ่งเน้นการปรับความถี่เพราะสามารถปรับได้อย่างต่อเนื่อง

ส่วนแรงบิด (Torque) จะแปรโดยตรงกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นมอเตอร์ที่มีแรงบิดสูงต้องให้จำนวนเส้นแรงได้มากโดยที่ยังไม่ถึงจุดอิ่มตัว แต่อย่างไรก็ตามจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กก็ขึ้นอยู่กับแรงดันและความถี่ตามความสัมพันธ์

$$V = k\phi f \quad (4.6)$$

เมื่อ V คือ แรงดันที่ป้อนเข้าที่ขั้วของมอเตอร์

k คือ คงที่ขึ้นอยู่กับรูปแบบการพันขดลวด

ϕ คือ เส้นแรงแม่เหล็ก

จากกรณีนี้จะเห็นว่า แรงบิดจะเป็นสัดส่วนในรูปของ V / kf สำหรับการควบคุมความถี่ของแรงดันจะมีการปรับแรงดันตามความถี่ด้วยคือเมื่อลดความถี่ของแรงดันสเตเตอร์ลง ก็ต้องลดแรงดันสเตเตอร์ตามไปด้วย เพื่อให้อัตราส่วน V / f คงที่ ซึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กของมอเตอร์ (Air Gap Flux) มีค่าคงที่ นั่นคือแรงบิดคงที่ แต่สำหรับช่วงความถี่เกินความถี่มูลฐานจะไม่ปรับแรงดันเกินแรงดันพิกัด ดังนั้นถ้าปรับความถี่เกินจากนี้ V / f จะลดลง แรงบิดก็ลดลง และช่วงความถี่ต่างๆ เนื่องจากที่ความถี่ต่ำๆ มีผลจากแรงดันตกคร่อม R และ L ที่ Stator ซึ่งจะทำให้ Output Torque ของมอเตอร์ลดลง และประสิทธิภาพของมอเตอร์จะลดลงด้วย ในทางปฏิบัติเราจึงพยายาม Boost ค่า V/f ขึ้นไป

4.3 การทำงานของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนความถี่ของแรงดันใช้งาน จึงสามารถนำไปควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ได้

โดยลักษณะทั่วไปของอินเวอร์เตอร์มีดังนี้

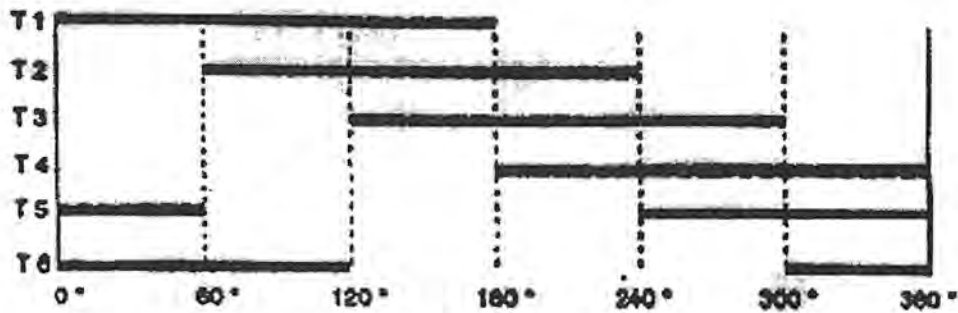
1) อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันกระแสตรง (DC Voltage) ทางด้านขาเข้า (Input) ไปเป็นแรงดันสมมาตรกระแสดับ (Symmetrical AC Voltage) ทางด้านขาออก (Output) โดยที่มีขนาดและความถี่ของแรงดันได้ตามต้องการ

2) อินเวอร์เตอร์ประกอบด้วยวงจรควบคุมการ Switching ซึ่งต้องใช้สัญญาณ Pulse ในการ On/Off อุปกรณ์ที่ใช้ในการ Switching

3) แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ ในทางอุดมคติแล้วจะเป็น Sinusoid แต่ในทางปฏิบัติแล้ว รูปคลื่นแรงดันขาออกมักจะไม่เป็น Sine Wave มักจะมีฮาร์มอนิกมาปนอยู่ด้วย ซึ่งแรงดันที่เป็น Sine Wave จะถูกใช้งานทางกำลังสูง

4) การใช้งานทางกำลังต่ำและกำลังปานกลาง มักจะใช้แรงดันที่มีรูปคลื่นเป็น Square Wave หรือ Quasi-Square Wave

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 การทำงานของสวิตช์ที่เฟสต่างๆ

4.3.4 วิธีสร้างไฟสลับจากไฟตรงและการปรับเปลี่ยนความถี่

พิจารณาตามรูปที่ 4.5 และ 4.6 ที่ 0 องศา สวิตช์ T1 จะปิดทำให้มีกระแสไฟไหลผ่านไปที่ขั้ว U และที่ 180 องศา สวิตช์ T1 จะเปิด และสวิตช์ T4 จะปิด จะมีกระแสวิ่งผ่านขั้ว U แต่จะกลับทิศทางเดิม ซึ่งเป็นลักษณะของไฟสลับวิ่งไปกลับครบ 1 รอบ สวิตช์ T1, T2, T3 จะทำงานต่างเฟสกันอยู่ 60 องศา ขั้ว U, V, W จึงสามารถรับไฟสลับ 3 เฟสตามที่ต้องการ และถ้าควบคุมเวลาที่เปิดปิดสวิตช์ได้ก็สามารถแปรความถี่ของไฟสลับได้

4.3.5 หลักการของ Pulse Width Modulation (PWM)

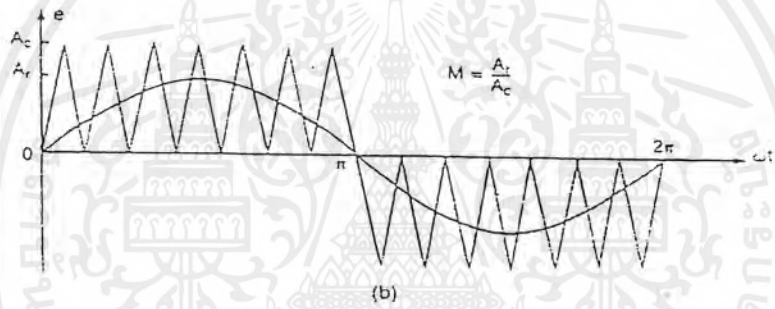
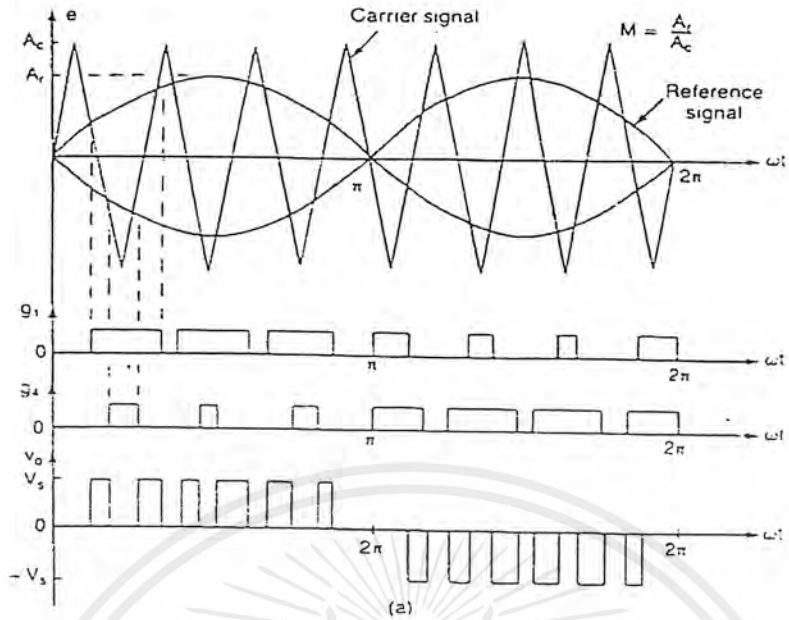
เนื่องจากแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์จะไม่เป็น Sine Wave ที่เดียว จะมีส่วนประกอบของฮาร์มอนิกอื่นปนอยู่ ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการลดทอนส่วนประกอบของฮาร์มอนิกลง

ความกว้างของแต่ละพัลส์เปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนต่อขนาดของรูปคลื่น Sine สัญญาณ ทริกที่เกท ซึ่งเกิดจากการเปรียบเทียบของสัญญาณอ้างอิงจะเป็นดังรูปที่ 4.7

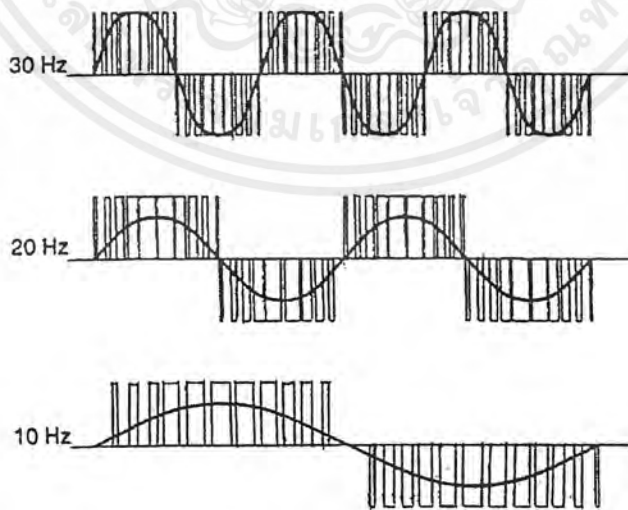
จากรูปที่ 4.7 (a) จะสังเกตได้ว่าสัญญาณอ้างอิงมี 2 สัญญาณ และมีมุมต่างเฟสกัน 180 องศา เป็นการยืนยันหลักการที่ว่า อุปกรณ์ Switching ที่อยู่ในสาขาเดียวกันนั้นไม่สามารถนำกระแสในเวลาเดียวกันได้ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าเกิดสัญญาณทริกที่ขาเกท และเกิดแรงดัน Output ได้อย่างไร

สำหรับรูปที่ 4.7 (b) แสดงให้เห็นสัญญาณทริกที่เกิดจากสัญญาณ Carrier ทิศทางเดียวซึ่งจะสร้างสัญญาณทริกที่เกทและแรงดัน Output

ในแต่ละครั้ง Cycle รูปคลื่น Pulse จะกว้างที่สุดบริเวณตรงกลางของครั้ง Cycle จากจุดกึ่งกลางความกว้างของพัลส์จะลดลงเป็นฟังก์ชันของ Cosine ถ้าพัลส์ที่ได้มีความสูงก็จะลดลงฮาร์มอนิกสลับได้มาก แต่จะทำให้ Switching Loss มีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.7 Sinusoidal Pulse Width Modulation



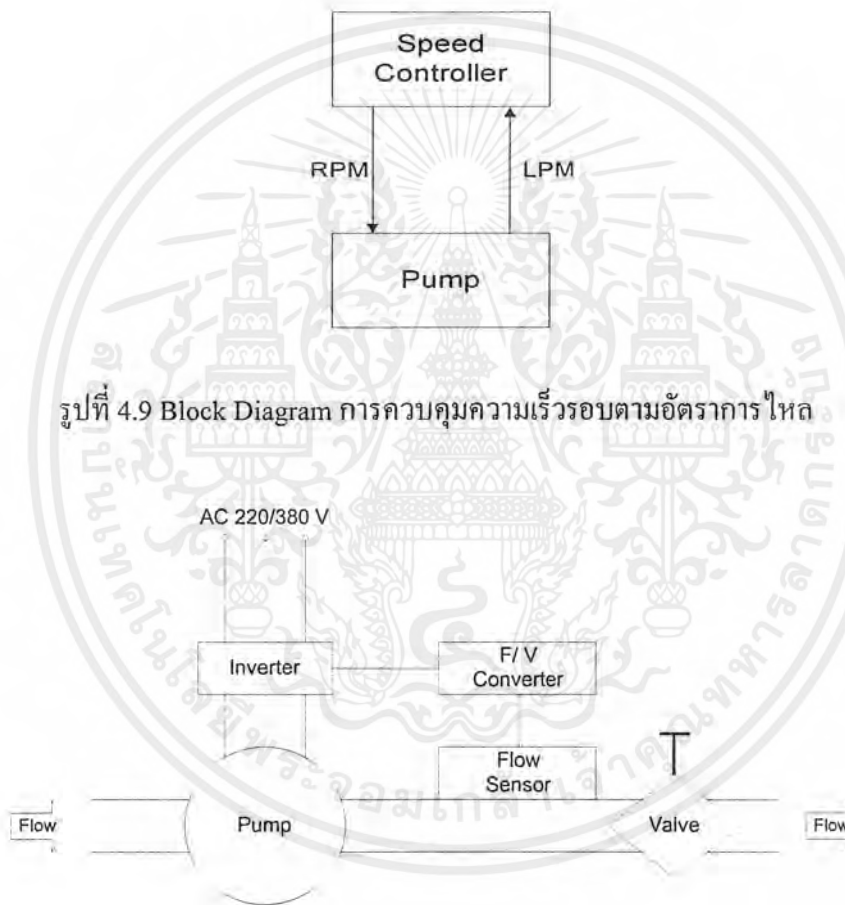
รูปที่ 4.8 PWM ที่ความถี่ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 วงจรการควบคุม

การควบคุมความเร็วรอบ จะต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและอัตราการไหล เพื่อหา Gain ที่เหมาะสมในการแปรค่าสัญญาณ ซึ่งขึ้นอยู่กับสมรรถนะของปั๊ม

ในรูปที่ 4.9 Speed Control ดังกล่าวจะใช้ Inverter เป็นตัวปรับความเร็วรอบ โดยรับสัญญาณอัตราการไหลจาก Flow Sensor สัญญาณอัตราการไหลที่ได้จะไปกำหนดให้ Inverter ทำงานที่ความเร็วที่เหมาะสมหรือทำงานที่รอบการทำงานที่เหมาะสม ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและอัตราการไหล ดังนั้นเราสามารถออกแบบวงจรการควบคุมได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 Block Diagram การควบคุมความเร็วรอบตามอัตราการไหล

รูปที่ 4.10 วงจรการควบคุมอัตราการไหล

4.4.1 หลักการควบคุมการทำงาน

ที่ภาระการใช้น้ำเต็มที่ (วาล์วเปิดสุด) ปั๊มจะทำงานที่ความเร็วรอบตามพิกัดที่กำหนดไว้ เมื่อภาระการใช้น้ำลดลง (หรือวาล์ว) นั่นคืออัตราการไหลลดน้อยลง Flow Sensor ก็จะส่งสัญญาณผ่านตัวแปลงสัญญาณเข้าอินเวอร์เตอร์ อินเวอร์เตอร์ก็จะปรับความถี่ของแรงดันไฟลดลงตาม Gain ที่ได้กำหนดไว้ เมื่อความถี่ลดลงความเร็วรอบก็จะลดลง นั่นหมายความว่า ปั๊มไปทำงานที่จุดทำงานที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสมกับภาระการใช้น้ำมากขึ้น ถ้าภาระการใช้น้ำเปลี่ยนแปลงไปอีก วงจรก็จะทำการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบตามอัตราการใช้น้ำอีก

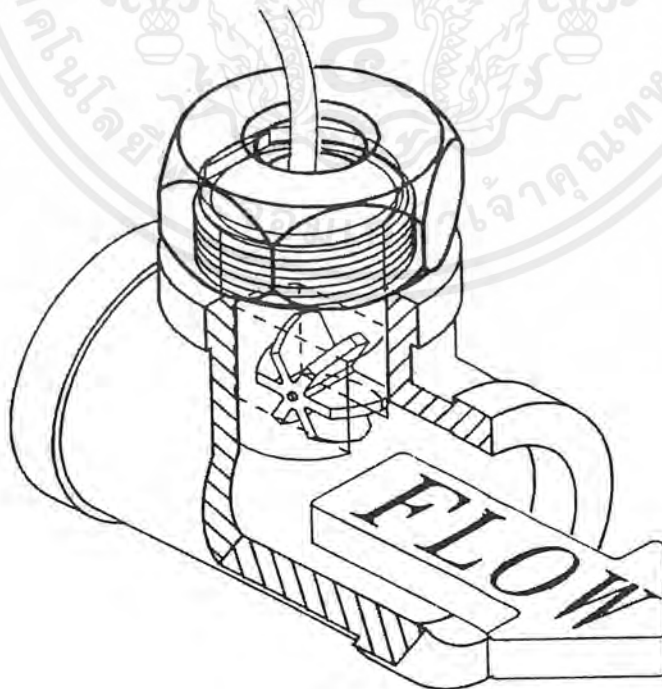
4.4.2 การวัดอัตราการไหล

การวัดอัตราการไหลจำเป็นต้องแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ในวงจรควบคุม สำหรับวิธีการวัดอัตราการไหลของน้ำก็มีหลากหลายวิธีการ และตัดแปลงเครื่องมือวัดได้หลายแบบ ดังเช่น

- Orifice plate
- Differential pressure transmitter
- Variable area flow meter
- Turbine, Vortex, Swirl flow meter
- Paddle-wheel flow meter
- Magnetic flow meter
- Etc.

สำหรับในโครงการนี้เราได้ใช้ Flow meter ชนิด Paddle-Wheel เพราะเป็น Flow meter แบบส่งสัญญาณได้ ซึ่งต้องใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับในการควบคุมความเร็วรอบปั๊ม และราคาถูกกว่าแบบอื่นที่ส่งสัญญาณได้เช่นกันซึ่งราคาสูงมาก

4.4.3 โครงสร้างและหลักการทำงานของ Flow Sensor ชนิด Paddle-Wheel



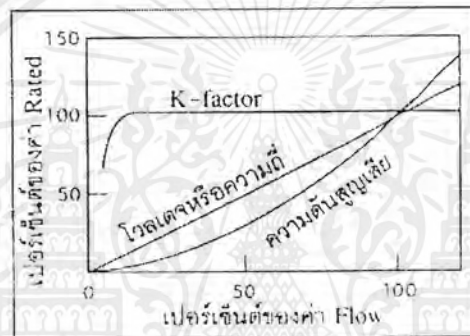
รูปที่ 4.11 โครงสร้างของ Paddle-Wheel Flow Sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 โครงสร้างของตัว Paddle-Wheels มีใบพัดตามแนวทิศทางการไหล ขณะที่ของไหลไหลผ่านจะทำให้ใบพัดหมุนไปตามอัตราการไหล ที่ตัว Housing มี Pick Off Coil เป็นตัวรับรู้ความเร็วรอบของใบพัด เมื่อใบพัดหมุนผ่าน Pick Off Coil ที่พันอยู่บนแท่งแม่เหล็กถาวร จะเกิดสัญญาณ Pulse ขึ้น โดยใช้สัญญาณช่วงบวก เป็นตัวกำหนดค่าความถี่ของ Pulse หรือบอกหน่วยเป็น Hz

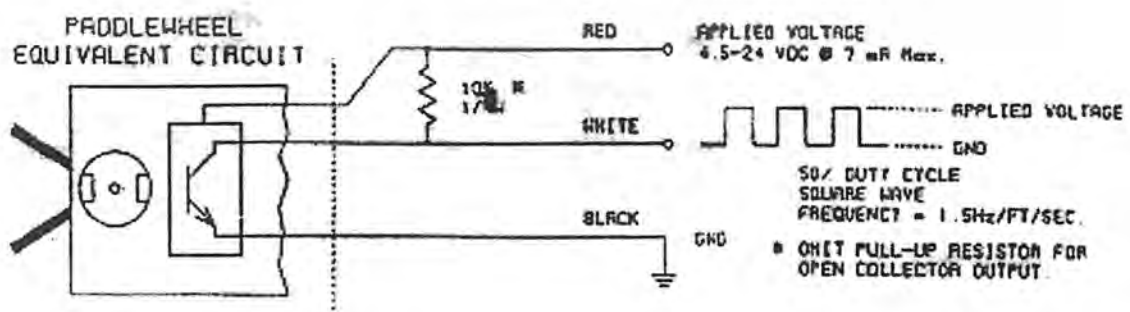
4.4.4 ค่า K-factor

K-factor เป็นค่าสัมประสิทธิ์ประจำของ Flow Sensor แบบใบพัด มีหน่วยเป็น Pulse/หน่วยปริมาตร โดยบริษัทผู้ผลิตจะกำหนดค่านี้มาด้วยทุกครั้ง โดยปกติ K-factor Curve เมื่อ Plot เทียบกับค่า Flow Rate จะเป็นดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 K-factor Curve

ในช่วง Flow Rate ต่ำๆ ค่า K-factor จะต่ำและสูงเมื่อสูงถึง Flow rate ค่าหนึ่ง ค่า K-Factor นี้จะมีมีค่าคงที่โดยปกติประมาณ 10% ขึ้นไป การใช้งานจะใช้งานในช่วงที่ค่า K-factor มีค่าคงที่หรืออยู่ในย่านที่มีค่าผิดพลาดอยู่ในพิสัย ค่า K-factor นี้เป็นค่าสำคัญ เพราะเมื่อมีค่าเปลี่ยนไปหมายถึงค่าที่วัดได้จะผิดไปด้วย



รูปที่ 4.13 วงจรสัญญาณของ Flow Sensor แบบ Paddle-Wheel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า Output Voltage และ Pressure Drop จะเพิ่มขึ้นเมื่อ Flow Sensor มีค่าความดันตกคร่อม เพิ่มขึ้นในภาวะที่ Flow Rate มีค่ามากขึ้น

สำหรับ Flow Sensor ที่ใช้ในโครงการนี้ มีค่า K-factor เท่ากับ 1.5 Hz/Ft/sec ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งแปลงเป็นหน่วย GPM ได้เมื่อทราบขนาดท่อ โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

$$GPM = FT / SEC * ID^2 * 2.45 \quad (4.7)$$

โดยที่ GPM = Gallons per minute

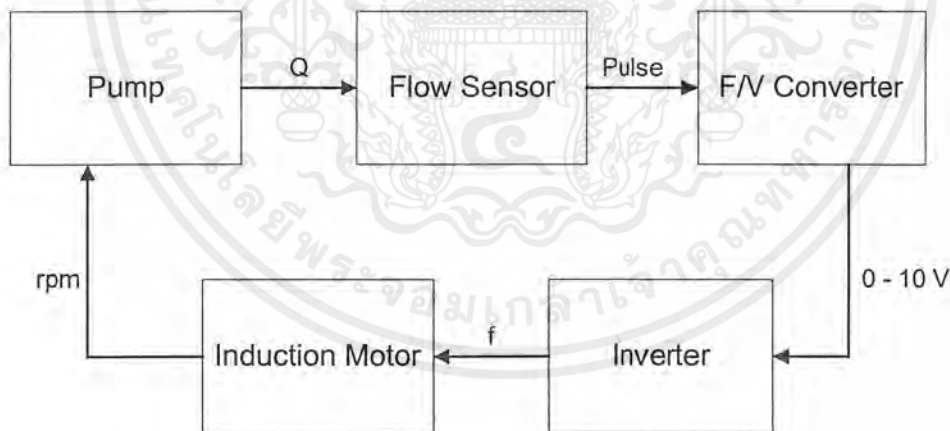
FT/SEC = ความเร็วของของไหล (Freq./1.5)

ID = Pipe inside diameter in inches

สำหรับการเลือกช่วงการวัดที่เหมาะสม ควรพิจารณา Specification ของ Flow Sensor ว่า กำหนดไว้เท่าไร และควรติดตั้ง Flow Sensor ให้ห่างจากวาล์ว ช้องอ ข้อลดหรือข้อเพิ่ม เป็นระยะไม่น้อยกว่า 10 เท่าของขนาดท่อ เพื่อให้ได้ค่าการวัดที่ถูกต้องมากที่สุด

4.4.5 การหาความสัมพันธ์ในวงจร

จากรูปที่ 4.10 เราจะพิจารณาการแปรค่าสัญญาณที่เกิดขึ้น ในวงจร ซึ่งมีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้นเท่านั้น โดยมีการปรับเปลี่ยนแบบ Proportional



รูปที่ 4.14 Block Diagram

จากรูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลตามความเร็วรอบที่เปลี่ยนไป เราสามารถหาได้โดยการทดสอบสมรรถนะของปั๊มที่ Flow Sensor จะมีค่า K-factor ซึ่งกำหนดจากบริษัทผู้ผลิตแล้ว สำหรับการแปลงสัญญาณเป็น Pulse ก็โดยตามที่กล่าวไว้ข้างต้น ส่วน Motor จะเปลี่ยนความเร็วรอบตามความถี่ของแรงดันที่เปลี่ยนไปตามสมการที่ 4.2 สำหรับ F/V Converter และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

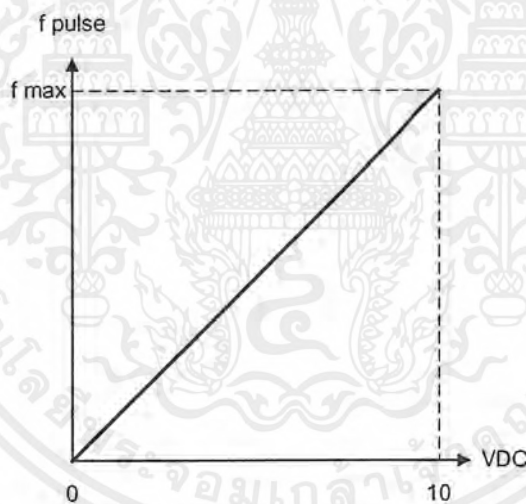
Inverter เราจะต้องมีการปรับแต่ง Gain ก่อนที่จะนำไปควบคุม โดยพิจารณาตามความเหมาะสมได้ดังนี้

1. การปรับแต่ง Gain ของ F/ V Converter

เนื่องจาก Flow Sensor ที่ใช้ส่งสัญญาณไม่รับกับสัญญาณ Input ของ Inverter สำหรับวงจรแปลงสัญญาณ F/V เราเลือกใช้ IC เบอร์ LM2907 ยี่ห้อ National ในการแปลงสัญญาณ ซึ่งเป็นวงจร Analog โดย Output ของ F/V Converter จะเลือกใช้ Range 0 - 10 VDC ตามการรับสัญญาณของ Inverter ในวงจรจะมีความสัมพันธ์ในการแปลงสัญญาณดังนี้

$$V_o = V_{cc} R_1 C_1 K f_{in} \quad (4.8)$$

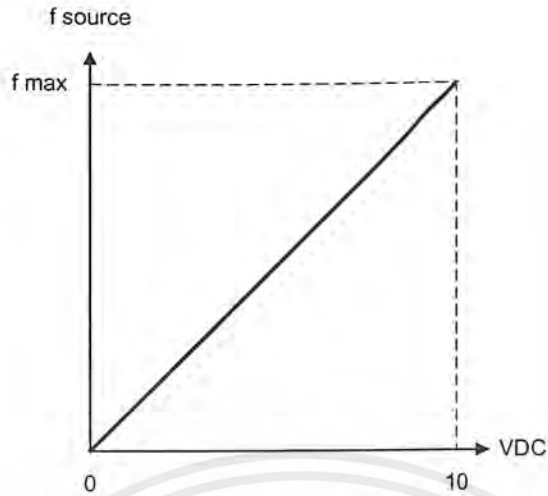
การกำหนดค่าความถี่ Pulse สูงสุด (F_{max}) ซึ่งเป็นสัญญาณจาก Flow Sensor เราจะเลือกที่พิกัดการทำงานสูงสุดซึ่ง Pump ส่งอัตราการไหลได้สูงสุด เมื่อกำหนดค่า F_{max} เราจะปรับค่า R_1 และ C_1 เพื่อให้ได้ V_{OUT} ที่ 10 VDC สำหรับความถี่ Pulse ต่ำสุด จะได้ V_{OUT} เป็น 0 ตามสมการที่ 4.8



รูปที่ 4.15 การปรับแต่ง F/V Converter

2. การปรับแต่ง Inverter

ในที่นี้ได้กำหนดค่าความถี่ใช้งานสูงสุด - ต่ำสุดตามสัญญาณ Input 0 - 10 VDC โดยสามารถเลือก Mode ปรับค่าความถี่สูงสุด - ต่ำสุด ที่ Inverter



รูปที่ 4.16 การปรับแต่งค่าใน Inverter

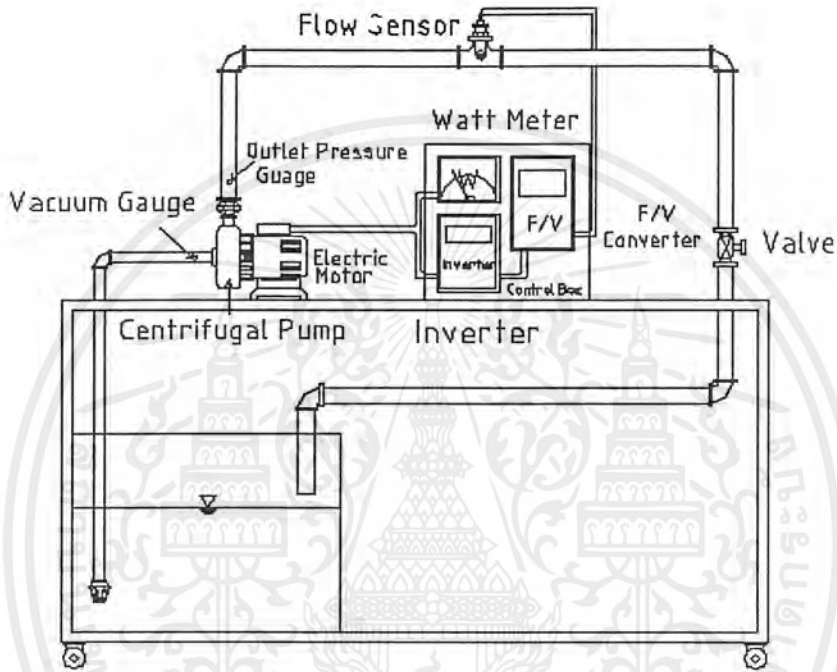
การกำหนดค่าความถี่สูงสุดจะเป็นความถี่ทำงานที่ปั๊มจะให้อัตราการไหลสูงสุด ส่วนความถี่ต่ำสุดก็จะเป็นความถี่ทำงานที่ปั๊มจะให้อัตราการไหลต่ำสุด ซึ่งต้องทดลองเดินเครื่องหาค่าดังกล่าว

เมื่อ Set การทำงานของวงจรเรียบหรือวงจรก็สามารถควบคุมการทำงานของปั๊มตามภาระอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงได้ตามต้องการ

บทที่ 5

อุปกรณ์และผลการทดลองเมื่อใช้ระบบควบคุม

ในโครงการนี้ได้จัดทำระบบควบคุมความเร็วรอบของปั๊มหอยโข่งและสามารถใช้ทดสอบสมรรถนะของปั๊มได้ ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ระบบควบคุมความเร็วรอบของปั๊มหอยโข่งที่ได้จัดทำ

5.1 อุปกรณ์

1. ปั๊มหอยโข่ง (Centrifugal Pump) Flow rate 10/105 LPM, Head 26.5/14 m, Duct size 1 inch
2. มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) ขนาด 0.8 Hp, 3 Phase 220/380 V, 50 Hz
3. เกจวัดความดัน (Pressure Gauge)
4. เกจสุญญากาศ (Vacuum Gauge)
5. อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ยี่ห้อ NOVEM ขนาด 1 kW, AC 3 Phase 380 V
6. เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter) ชนิด Paddle wheel, Flow range 1.5 to 70 f/s, Frequency range 2 to 105 Hz
7. วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน (Frequency to Voltage Converter)
8. เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (Watt meter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 ข้อมูลจากการทดสอบปั๊มที่ความเร็วรอบ 1500 rpm

Test No.	Flow rate		H_s (cmHg)	H_d (kg/cm ²)	$H_d - H_s$ (m)	Δh_v (m)	Z_d (m)	Total Head (m)	Input Power (kW)	Output Power (kW)	η_p (%)
	Hz	LPM									
1	10.64	102.77	64.0	0.0	8.70	0.50	0.27	8.47	1.00	0.14	28.38
2	10.42	100.63	62.0	0.7	15.43	0.48	0.27	15.22	1.00	0.25	49.92
3	8.33	80.50	40.0	1.5	20.44	0.31	0.27	20.40	0.97	0.27	55.19
4	4.55	43.91	15.0	2.2	24.04	0.09	0.27	24.22	0.86	0.17	40.31
5	1.14	10.98	2.4	2.6	25.83	0.01	0.27	26.09	0.72	0.05	12.97
6	0	0	0	2.7	27.00	0	0.27	27.27	0.68	0	0

หมายเหตุ Test No. 1 คือ เมื่อเปิดวาล์วเต็มที่

Test No. 2 – 5 คือ เมื่อหัววาล์วลงไปตามลำดับ จนปิดสนิทที่ Test No. 6

ตารางที่ 5.5 ข้อมูลจากการทดสอบปั๊มที่ความเร็วรอบ 1200 rpm

Test No.	Flow rate		H_s (cmHg)	H_d (kg/cm ²)	$H_d - H_s$ (m)	Δh_v (m)	Z_d (m)	Total Head (m)	Input Power (kW)	Output Power (kW)	η_p (%)
	Hz	LPM									
1	10.42	100.63	60.0	0.0	8.15	0.48	0.27	7.95	0.68	0.13	38.34
2	9.62	92.88	49.0	0.5	11.66	0.41	0.27	11.52	0.67	0.17	52.08
3	6.76	65.27	28.0	1.0	13.81	0.20	0.27	13.87	0.62	0.15	47.62
4	3.85	37.15	12.0	1.4	15.63	0.07	0.27	15.84	0.55	0.10	34.87
5	0.71	6.90	1.3	1.6	16.17	0.00	0.27	16.44	0.48	0.02	7.70
6	0	0	0	1.7	17.00	0	0.27	17.27	0.45	0	0

หมายเหตุ Test No. 1 คือ เมื่อเปิดวาล์วเต็มที่

Test No. 2 – 5 คือ เมื่อหรัวาล์วลงไปตามลำดับ จนปิดสนิทที่ Test No. 6

ตารางที่ 5.6 ข้อมูลจากการทดสอบปั๊มที่ความเร็วรอบ 900 rpm

Test No.	Flow rate		H_s (cmHg)	H_d (kg/cm ²)	$H_d - H_s$ (m)	Δh_v (m)	Z_d (m)	Total Head (m)	Input Power (kW)	Output Power (kW)	η_P (%)
	Hz	LPM									
1	8.06	77.90	39.0	0.0	5.30	0.29	0.27	5.28	0.40	0.07	33.55
2	7.14	69.00	30.0	0.3	6.58	0.22	0.27	6.62	0.40	0.07	37.24
3	5.26	50.84	18.0	0.6	8.45	0.12	0.27	8.59	0.38	0.07	37.49
4	2.63	25.42	6.3	0.8	8.85	0.03	0.27	9.09	0.35	0.04	21.52
5	0.42	4.03	1.0	0.9	9.14	0.00	0.27	9.41	0.32	0.01	3.86
6	0	0	0	1.0	9.50	0	0.27	9.77	0.30	0	0

หมายเหตุ Test No. 1 คือ เมื่อเปิดวาล์วเต็มที่

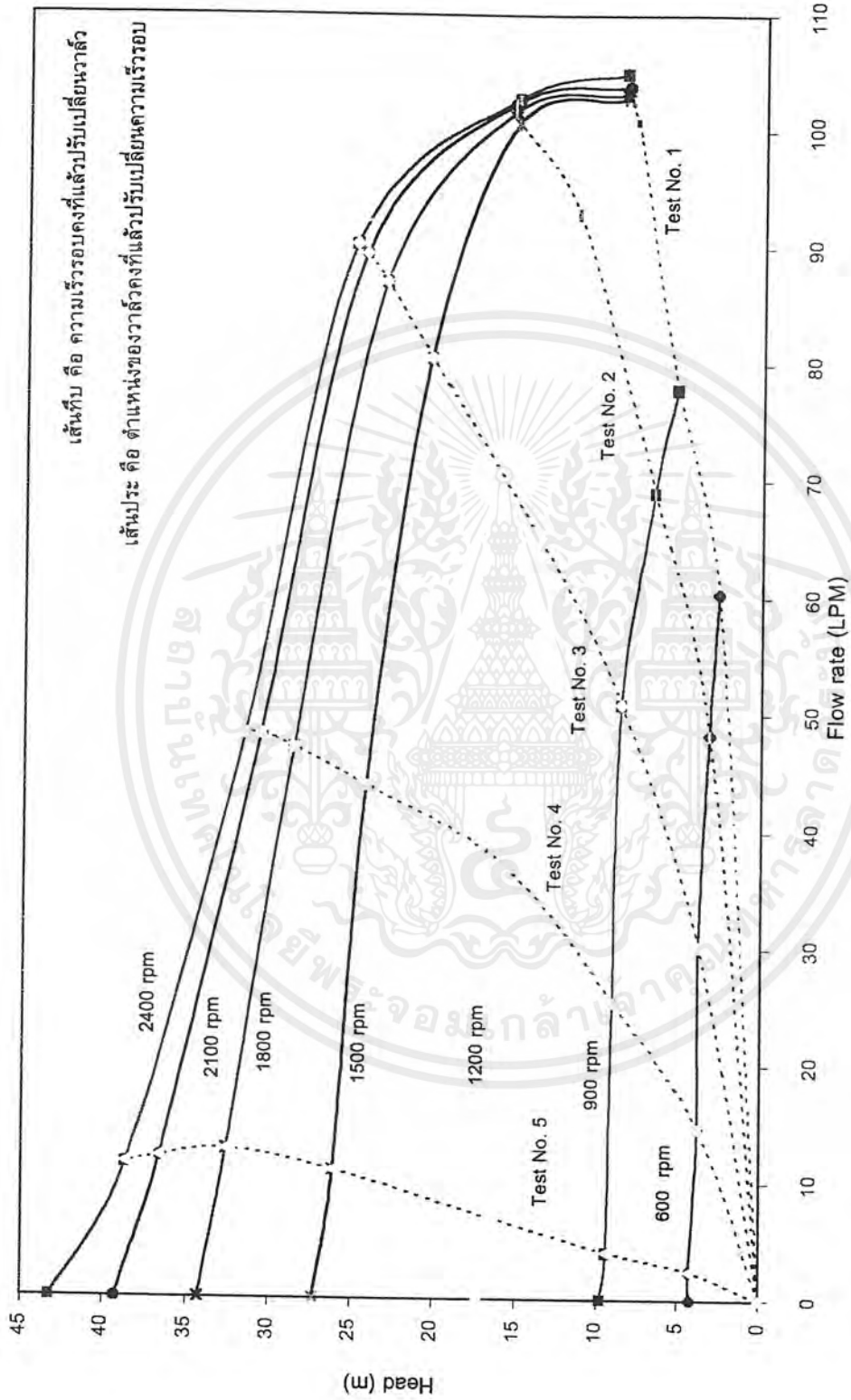
Test No. 2 - 5 คือ เมื่อหัววาล์วลงไปตามลำดับ จนปิดสนิทที่ Test No. 6

ตารางที่ 5.7 ข้อมูลจากการทดสอบปั๊มที่มีความเร็วรอบ 600 rpm

Test No.	Flow rate		H_s (cmHg)	H_d (kg/cm ²)	$H_d - H_s$ (m)	Δh_v (m)	Z_d (m)	Total Head (m)	Input Power (kW)	Output Power (kW)	η_P (%)
	Hz	LPM									
1	6.25	60.38	19.0	0.0	2.58	0.17	0.27	2.68	0.26	0.03	20.29
2	5.00	48.30	15.0	0.1	3.04	0.11	0.27	3.20	0.25	0.03	20.15
3	3.13	30.19	8.0	0.3	3.59	0.04	0.27	3.81	0.24	0.02	15.64
4	1.52	14.64	0.3	0.4	3.53	0.01	0.27	3.79	0.24	0.01	7.54
5	0.25	2.42	0.1	0.4	4.01	0.00	0.27	4.28	0.23	0.00	1.47
6	0	0	0	0.4	4.00	0	0.27	4.27	0.23	0	0

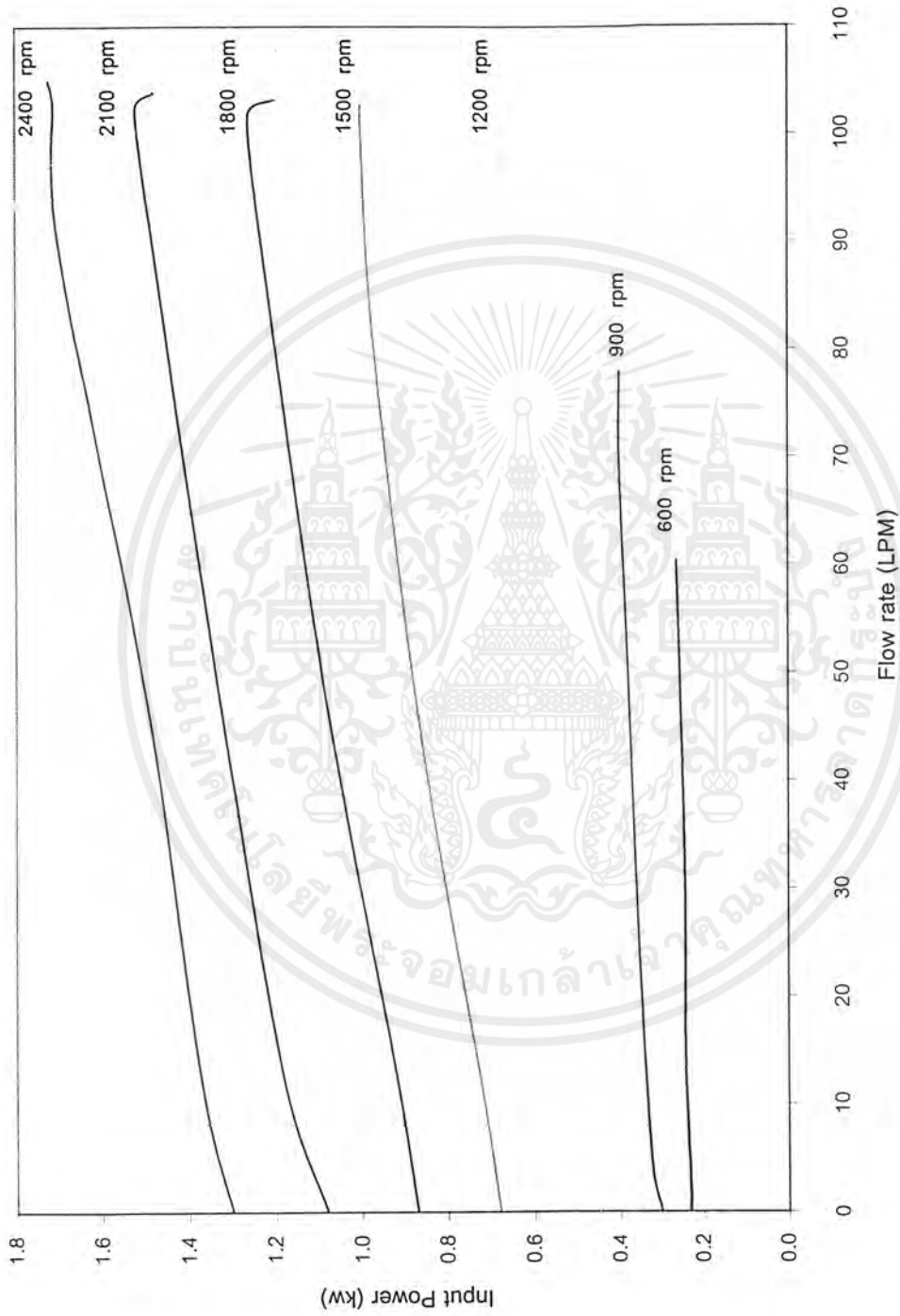
หมายเหตุ Test No. 1 คือ เมื่อเปิดวาล์วเต็มที่

Test No. 2 – 5 คือ เมื่อห้ร่วาล์วลงไปตามลำดับ จนปิดสนิทที่ Test No. 6



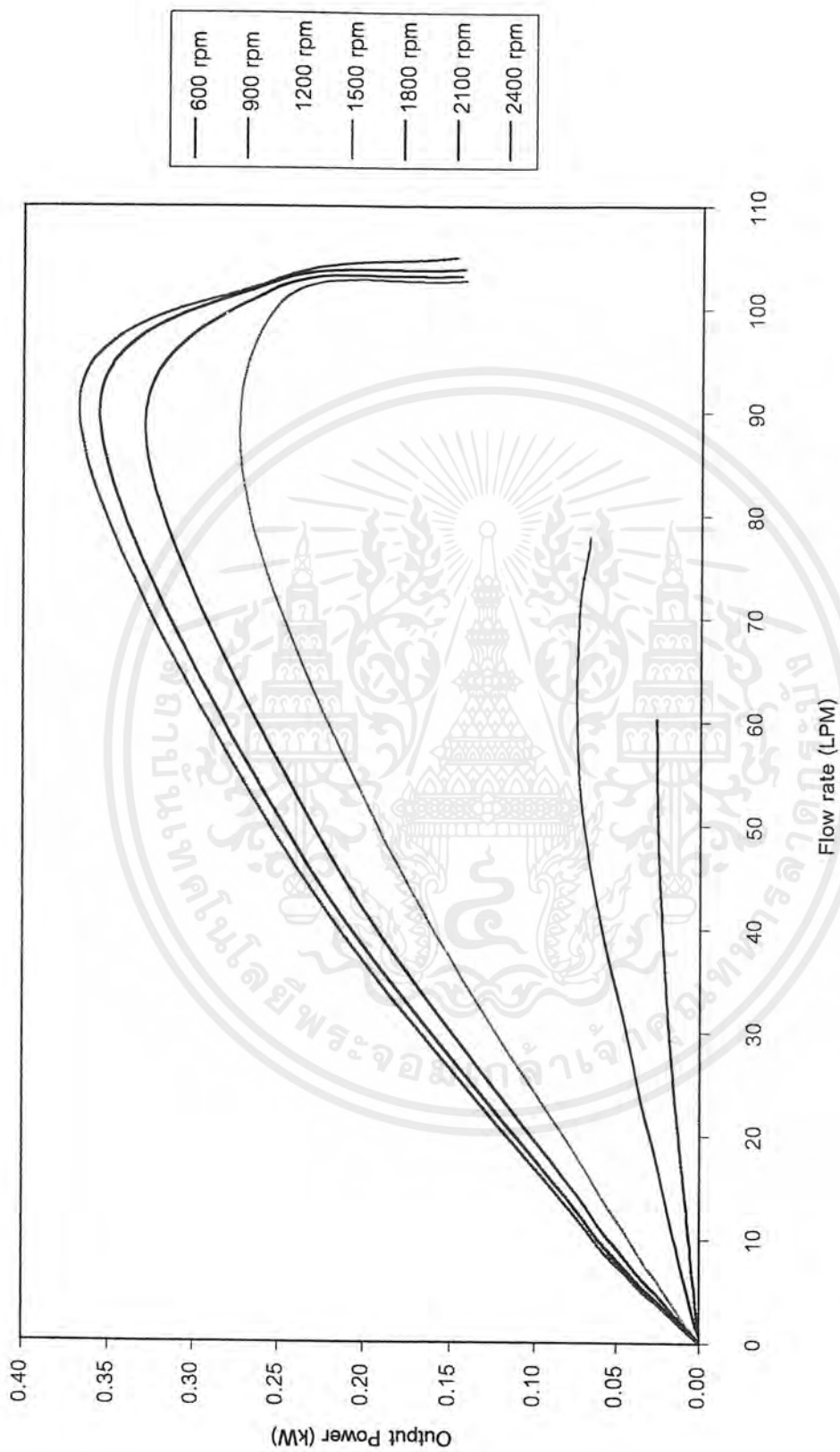
รูปที่ 5.2 H – Q Curve ของปั๊มหลายใบที่ความเร็วรอบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



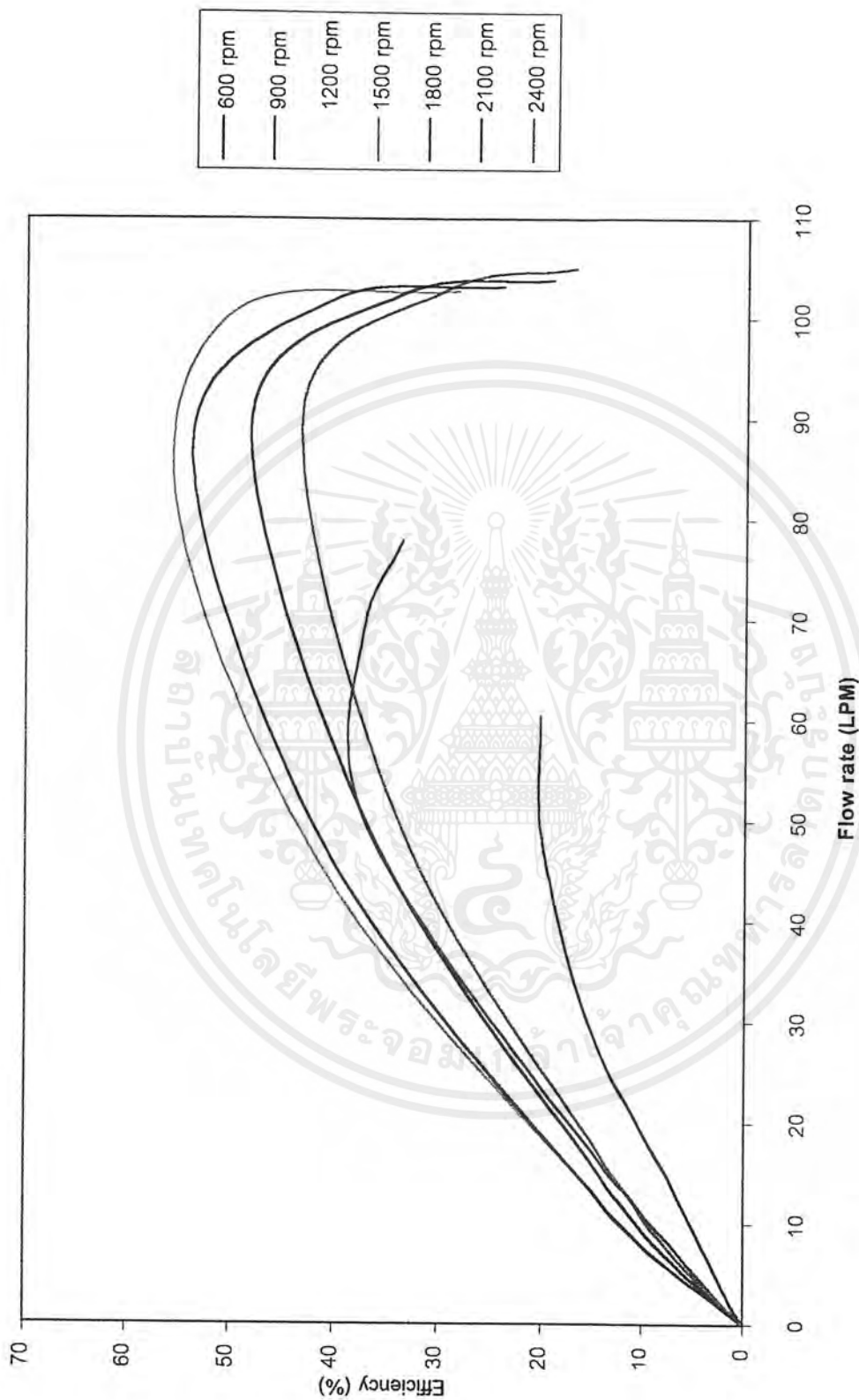
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ที่ความเร็วรอบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



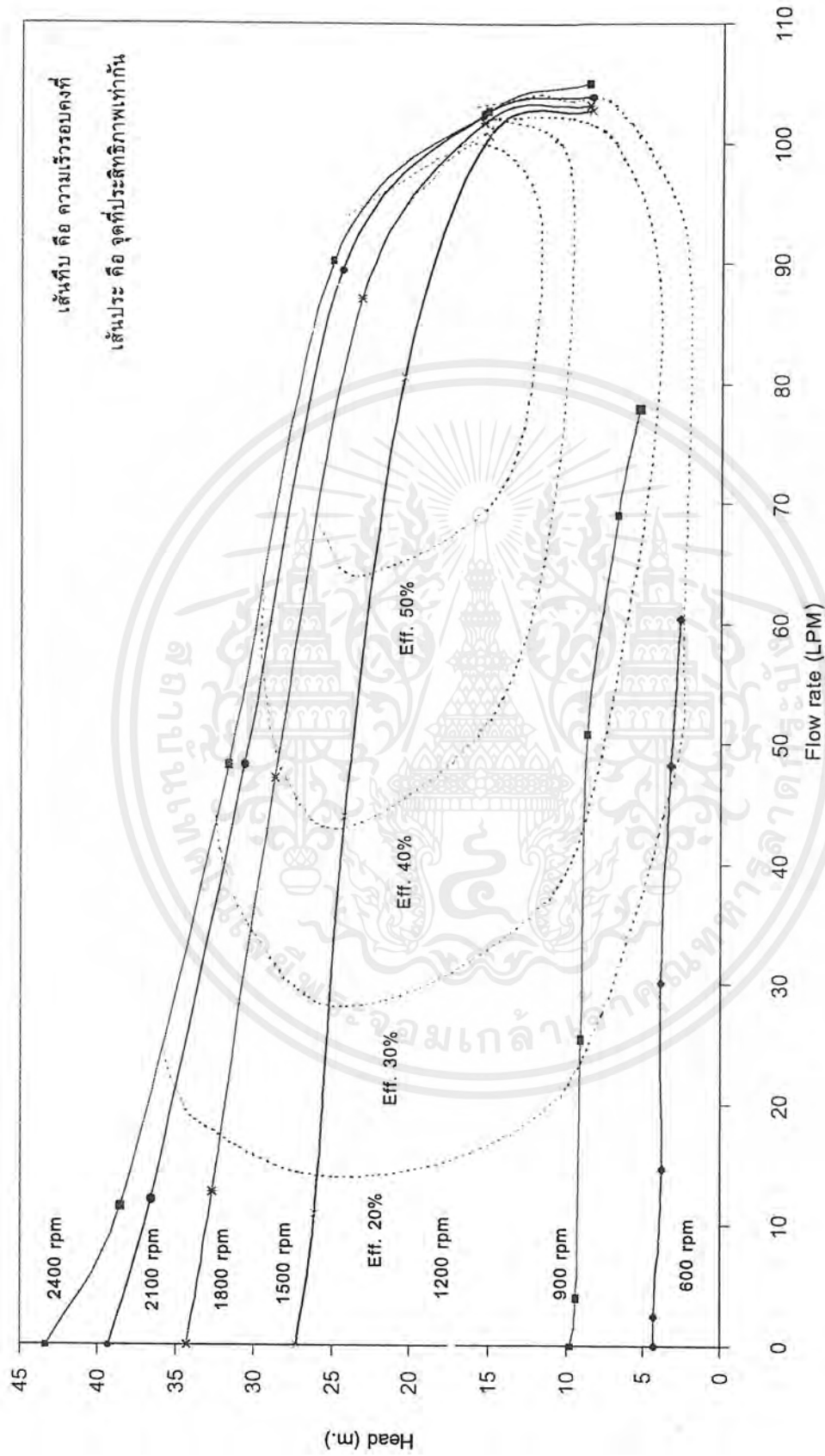
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับกำลังงานที่มีผลผลิตขึ้นได้ที่มีความเร็วรอบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับประสิทธิภาพปั๊มที่ความเร็วรอบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มที่ความเร็วรอบต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 ข้อมูลจากการทดสอบปั๊มโดยใช้ระบบควบคุมความเร็วรอบตามภาระอัตราการไหล

No.	Flow rate		N (rpm)	H _s (cmHg)	H _d (kg/cm ²)	H _d - H _s (m)	Δh _v (m)	Z _d (m)	Total Head (m)	Input Power (kW)	Output Power (kW)	η _p (%)
	Hz	LPM										
1	10.64	102.77	1500.0	64.0	0	8.70	0.50	0.27	8.47	1.00	0.14	28.38
2	10.42	100.63	1468.7	60.0	0.6	14.15	0.48	0.27	13.95	0.97	0.23	47.17
3	8.33	80.50	1175.0	40.0	0.5	10.44	0.31	0.27	10.40	0.68	0.14	40.14
4	4.55	43.91	640.9	15.0	0.3	5.04	0.09	0.27	5.22	0.26	0.04	28.73
5	1.14	10.98	160.2	2.4	0.2	2.33	0.01	0.27	2.59	0.10	0.005	9.27

หมายเหตุ No. 1 คือ เมื่อเปิดวาล์วเต็มที่

No. 2 - 5 คือ เมื่อห้ร่ววาล์วลงไปตามลำดับแต่จะไม่ทอดลงที่ปิดวาล์วสนิท

ตารางที่ 5.9 ข้อมูลเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของปั๊มระหว่างไม่ใช้วงจรถวลกับใช้วงจรถวลความเร็วรอบ

Flow rate (LPM)	ไม่ใช้วงจรถวลความเร็วรอบ					ใช้วงจรถวลความเร็วรอบ				
	Total Head (m)	Input Power (kW)	Output Power (kW)	η_p (%)	Control Speed (rpm)	Total Head (m)	Input Power (kW)	Output Power (kW)	η_p (%)	
102.77	8.47	1	0.14	28.38	1500.0	8.47	1	0.14	28.38	
100.63	15.22	1	0.25	49.92	1468.7	13.95	0.97	0.23	47.17	
80.50	20.40	0.97	0.27	55.19	1175.0	10.40	0.68	0.14	40.14	
43.91	24.22	0.86	0.17	40.31	640.9	5.22	0.26	0.04	28.73	
10.98	26.09	0.72	0.05	12.97	160.2	2.59	0.05	0.00	9.27	

หมายเหตุ ข้อมูลที่ไม่ใช้วงจรถวลความเร็วรอบนำมาจากผลการทดสอบสมรรถนะของปั๊มที่ 1500 rpm

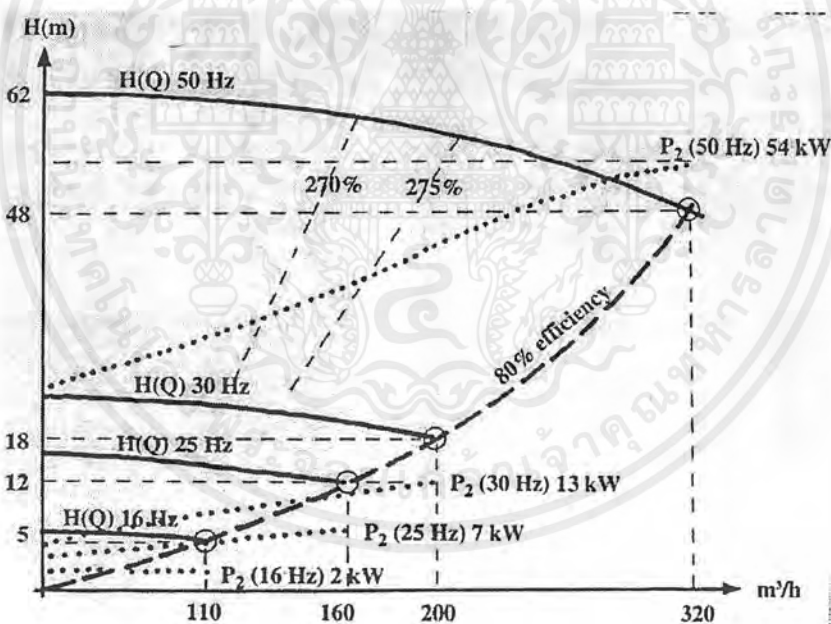
บทที่ 6

สรุปผลและวิจารณ์

6.1 สรุปผล

จากการศึกษาผลของการควบคุมความเร็วรอบของปั๊มตามภาระการทำงาน และการทดสอบสมรรถนะของปั๊มเราสามารถที่จะสรุปผลได้ดังนี้

- 1) โดยปกติถ้าไม่มีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ มอเตอร์จะทำงานที่รอบก่อนข้างคงที่ ดังนั้น ไม่ว่าจะม้อัดรายการไหลเท่าใดก็ตาม กำลังไฟฟ้าที่ให้กับมอเตอร์ก็จะไม่เปลี่ยนแปลง
- 2) จากผลการทดลองจะพบว่า เมื่อเราสามารถควบคุมความเร็วรอบตามภาระอัตรการไหล (Load) ที่เกิดขึ้น จะทำให้ปั๊มทำงานที่ความเร็วรอบค่าหนึ่งซึ่งเพียงพอที่จะรองรับค่าอัตรการไหลนั้น จะเป็นการประหยัดพลังงาน เพราะความเร็วรอบแปรผันตรงกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ถ้าสามารถลดความเร็วรอบลงได้ ก็จะทำให้ใช้กำลังไฟฟ้าในการเดินปั๊มลดลง



รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเฮดกับอัตรการไหลที่รอบการทำงานต่างๆ

- 3) เมื่อทำการทดสอบสมรรถนะของปั๊มที่รอบการทำงานต่างๆแล้วนำมาพล็อต H-Q Curve ผลที่ได้ก็เป็นไปตามความสัมพันธ์ระหว่างเฮดและอัตรการไหลซึ่งแปรผกผันกันตามทฤษฎี
- 4) เมื่อลดความเร็วรอบของมอเตอร์ลง เฮดที่ได้จะลดลงเมื่ออัตรการไหลเท่ากัน
- 5) เมื่อพิจารณาค่า อัตรการไหลที่ปั๊มทำได้จะถูกจำกัดไว้ไม่เกินกว่า 105 ลิตรต่ออนาที ถึงแม้จะเพิ่มความเร็วรอบให้สูงขึ้นมากเท่าใดก็ตาม เมื่อพิจารณาเฮดที่ปั๊มทำได้ ที่อัตรการไหลมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. ฉัตรชัย มานะดี, โคลิจิ โอนิชิ, “คู่มือการใช้งานปั๊มชนิดทันทันต่อการกัดกร่อน”, ปี พ.ศ.2542
2. วิบูลย์ บุญยช โรกุต, “ปั๊มและระบบสูบน้ำ”
3. สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย, “การวางแผนและออกแบบงานสูบน้ำ”
4. พีรศักดิ์ วรสุนท โรสธ, “เทคนิคการซ่อมแซมเลือกประเภทและติดตั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำ”
5. สมศักดิ์ กิรติวุฒิเศรษฐ์, “หลักการและการใช้เครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรม”
6. วีรเชษฐ์ ชันเงิน, “อินเวอร์เตอร์ชนิด PWM ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์”
7. EBARA Hatakeyama Memorial Fund, “Fundamentals of Pump Technology”, Doc.No.EHMF-7D230, 1997.
8. GRUNDFOS International Educational Centre, “Electronics made simple”, 1995.
9. Robert W. Fox, Alan T. McDonald, “Introduction to Fluid Mechanics”, 1994.
10. Kyoji Kawakuchi, “Variable Speed Full Power Control for Turbo Pump”, Section on Hydraulic Machinery and Cavitation, 1998.
11. William S. Janna, “Design of Fluid Thermal Systems”, 1993.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดข้อมูลทางเทคนิคของ Flow Sensor ชนิด Paddle-Wheel

the SPECIFICATIONS

PADDLEWHEELS

ELECTRICAL

FLOW RANGE	1.5 TO 70 fps
FREQUENCY RANGE	2 TO 105 Hz
OUTPUT SIGNAL	Open Collector Pulse
OUTPUT CURRENT	50 ma.
VOLTAGE REQUIREMENT	4.5 TO 24 VDC
LINEARITY	-/+0.5% Of Rate
REPEATABILITY	-/+0.5% Of Rate

PHYSICAL

STANDARD CABLE LENGTH	10 feet
PRESSURE SURGE	1000 PSI (see fittings)
PRESSURE MAX (sensor only)	600 PSI (see fittings)
TEMPERATURE MAX (sensor only)	250°F
SHOCKS MAX	10g
VISCOSITY MAX SSU	2000
CENTISTOKES	440

WETTED MATERIALS

BODY/PADDLE	Delrin or PVDF
AXEL	316 SST or Hastelloy C
O RING	Buna-N, Viton, EPDM

FLOW SENSOR แบบใบพัดนี้สามารถต่อโดยตรงเข้ากับ
COUNTER หรือ TACHOMETER ของ RED LION -
CONTROL และสามารถต่อโดยตรงเข้ากับ PLC

FLOW RANGE IN LPM per PIPE ID

Pipe Size (Inches)	1.5 FPM (Min Flow)	70 FPM (Max Flow)
Low Flow	2.27	102.19
3/4	7.83	363.36
1	13.89	647.23
1 1/4	21.72	1,014.38
1 1/2	31.26	1,461.01
2	55.63	2,596.51
2 1/2	86.90	4,053.73
3	125.16	5,840.25
4	222.55	10,386.04
6	500.75	23,368.59
8	890.23	41,510.09
10	1,390.98	64,912.75
14	2,726.33	127,228.99

ความต้านทานสารเคมี

DELRIN - ใช้ได้กับสารละลายอินทรีย์ เช่น ESTERS, ALCOHOLS, HYDROCARBONS, เคมีภัณฑ์เกษตร, กรดอ่อน, ด่างอ่อน ใช้ไม่ได้กับ กรดเข้มข้น, ด่างเข้มข้น, OXIDIZING AGENTS, ZINC CHLORIDE หรือ คลอไรด์

PVDF - ใช้ได้กับ กรดเข้มข้น, OXIDIZING AGENTS, คลอไรด์, HALOGENTS, สารละลายอะโรแมติก ALIPHATIC SOLVENT และเกลือ ใช้ไม่ได้กับ ด่างเข้มข้น, ESTERS หรือ KETONES

FITTINGS

	PI	PV	CPV	ST	ST	S	LE	LP	PVDF
TEMPERATURE MAX (F)	250	140	212	250	250	212	250	140	250
PSI MAX @ 100 F	125	200	200	125	125	300	125	100	200
PSI MAX @ 140 F	125	50	110	125	125	300	125	50	125
PSI MAX @ 210 F	125	-	-	125	125	300	125	-	-

High Pressure Tees in Division Shop. Stainless Steel and Brass are available for application up to 600 PSI. Consult Factory for Price and Availability.

INSTALLATION

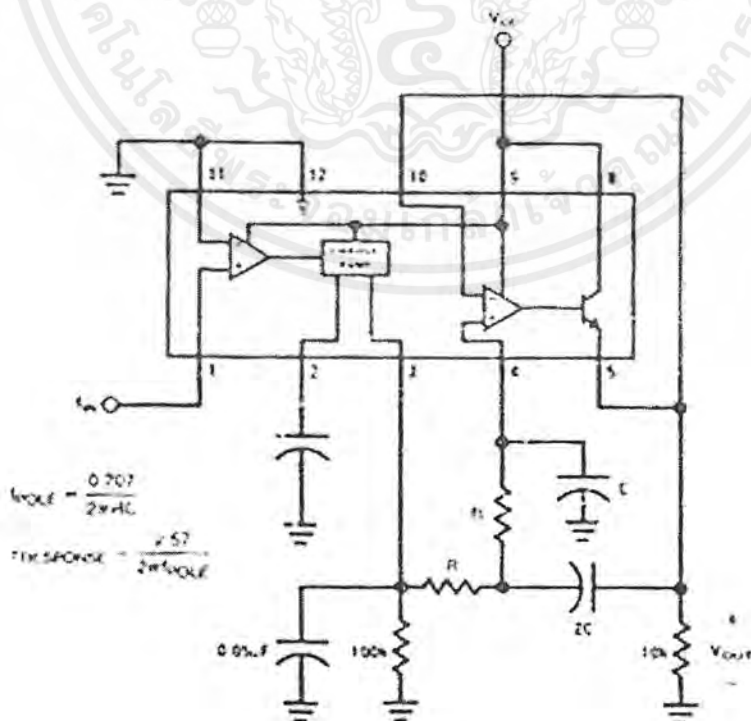
การติดตั้งที่ถูกต้องจะช่วยให้การอ่านค่าได้เที่ยงตรง การติดตั้ง FLOW SENSOR แบบใบพัดในท่อจะต้องห่างจาก วาล์ว, ข้อต่อ, ข้อลด หรือ ข้อเพิ่ม เป็นระยะไม่น้อยกว่า 10 เท่าของขนาดท่อ รายละเอียดเพิ่มเติมให้อ่านคู่มือการติดตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดข้อมูลทางเทคนิคของ Inverter

Input Power Supply	3ph or 1ph 200 to 230v $\pm 10\%$. 50Hz $\pm 5\%$	3ph 380v $\pm 10\%$. 50 Hz $\pm 5\%$
Enclosure	Totally Enclosed Non-Ventilated	Totally enclosed with fan ventilation over external cooling fins
Control System	Flux Linkage Pulse Width Modulation	
Frequency Accuracy	Digital Setting : $\pm 0.01\%$	Analog Setting : $\pm 0.5\%$
Frequency Range	0.1-128 Hz	
Voltage Boost	Manual boost 0.1 to 25% of rated voltage	
Acceleration or Deceleration Rate	0.05 sec to 3600 sec per 50 Hz change	
Programmable Features	DC Braking, start into coasting motor, minimum and maximum speed limits, preset jogging speed, frequency : Refer to the programming listing for a complete list.	
Motor Braking	DC Braking 0.05-30 seconds operating under DC Break frequency	
Signal For Setting Freq.	Digital setting by keypad or external analog signal 0-5V DC ,0-10VDC , or 4-20 mA DC.	
Protective Function	Instantaneous Electronic Trip for overcurrent, sustained overload, short circuit phase to phase, undervoltage and overheat. Current limit will reduce rate of acceleration or deceleration to avoid tripping.	
Operation Display	4- digit 7-segment LED displays operating frequency (Hz) or current (A), fault code, and programming information. LED indication of Hz, RPM, A., FAULT	
Overload Capacity	150% for 60 seconds	
Mounting Location	Indoor, Ambient temperature -10 to 40 C (50 C with the covers removed). Relative humidity less than 90%, non-condensing. Vibration less than 0.5G. Atmosphere not exposed to steam, electrically conductive dusts, or corrosive gases.	

วงจรของ Frequency to Voltage Converter



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้