

การศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อกังหันเทอร์ไบน์ประเภทอิมพัลส์

THE EXPERIMENT WITH EFFECT OF VARIABLE TO IMPULSE TURBINE

ณัฐวุฒิ

ลำไย

ภาสกร

ถาวรกุล

สิทธิชัย

อาคมเวช

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

THE EXPERIMENT WITH EFFECT OF VARIABLE TO IMPULSE TURBINE

NATTAWUT	LAMYAI
PASSAKORN	THAVORAKUL
SITTICHAJ	ARCOMVAT

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
2012

ปริญญาโทปีการศึกษา 2557

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อกังหันเทอร์ไบน์ประเภทอิมพัลส์

THE EXPERIMENT WITH THE EFFECT OF VARIABLE TO IMPULSE TURBINE

ผู้จัดทำ

- | | | |
|----------------|---------|-----------------------|
| 1. นายณัฐวุฒิ | ลำไย | รหัสประจำตัว 54010455 |
| 2. นายภาสกร | ถาวรกุล | รหัสประจำตัว 54010997 |
| 3. นายสิทธิชัย | อาคมเวช | รหัสประจำตัว 54011360 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.มณฑล ใจกุล)

การศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อกังหันเทอร์โบประเภทอิมพัลส์

นาย ธีรัฐภูมิ	ลำไย	54010455
นาย ภาสกร	ถาวรกุล	54010997
นาย สิทธิชัย	อาคมเวช	54011360
ผศ. มณฑล	ใจกุล	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา	2557	

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้เสนอการทำงานและศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อกังหันน้ำเทอโบประเภทอิมพัลส์ โดยใช้หัวฉีด 1 หัว เส้นผ่านศูนย์กลางของรูหัวฉีดมีขนาด 8 มิลลิเมตร และเครื่องสูบน้ำที่มีขนาด 0.5 แรงม้า มีอัตราการไหลของน้ำสูงสุดที่ 35 ลิตรต่อนาที และน้ำที่ไหลออกจากหัวฉีด โดยจะทำการทดลองฉีดน้ำไปกระทบกับใบพัดของกังหันจำนวน 2 รูปแบบ จำนวน 24 กับ 12 ใบ และปรับมุมองศาการยิง และจากผลการทดลองพบว่า ใบพัดรูปแบบที่ 2 จำนวน 12 ใบ ยิงที่ 5 องศา ที่อัตราการไหลและความเร็วรอบเท่ากับ 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และ 120 รอบต่อนาที ตามลำดับ มีประสิทธิภาพดีที่สูดเท่ากับ 27.1 %

THE EXPERIMENT WITH THE EFFECT OF VARIABLE TO IMPULSE TURBINE

Nattawut	Lamyai	54010455
Passakorn	Thavorakul	54010997
Sittichai	Arcomvat	54011360
Assis.Prof Montol	Jaikusol	Advisor
Year 2014		

Abstract

This project prouds to present another operation and experiment with efficiency of Impulse turbine by one nozzle which has 0.5 horsepower's pump. Power of this maximum flow into 35 liters per minute,1 inch of diameter for long tube (10 mm. for hole) .This splashes to the blades of the turbine nozzle shapes in which each of blades shapes and style are different. Moreover we also adjust the nozzle to the impeller in order to find the degree that makes the most effectively. The result show 12 piece of the original design impulse turbine at 5 degree $1.4 \text{ m}^3/\text{h}$ of flow rate and angular velocity 120 rpm make the most efficiency (27.1%)

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำเพื่อประกอบการเรียนวิชา Project ซึ่งทำให้นักศึกษาได้นำความรู้ในภาคทฤษฎีมาปฏิบัติงาน เป็นการเพิ่มประสบการณ์การทำงาน และเพิ่มความรู้ความเข้าใจแก่นักศึกษามากขึ้น ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ผศ. มลทล ใจกุลศล อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ให้เกี่ยวกับคำแนะนำ และคำปรึกษาเกี่ยวกับโครงงานนี้ ขอขอบพระคุณ ดร. เอกพจน์ ตันตราภิวัดน์ ที่ได้ช่วยให้คำแนะนำ และตรวจสอบความถูกต้องของปริญญาานิพนธ์นี้ ขอขอบพระคุณ ดร. วิฑาดา เจษฎา รัตน์ชัย ที่ช่วยให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับปัญหาที่พบ ขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดคือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักรยิ่ง ที่เป็นกำลังใจและให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่

ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งพระคุณทุกๆท่านและกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

นายณัฐวุฒิ	ลำไย
นายภาสกร	ถาวรกุล
นายสิทธิชัย	อาคมเวช

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
สารบัญกราฟ.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 คำจำกัดความ.....	1
1.4 ขอบเขตการทดลอง.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1.1 ของไหล (Fluid).....	3
2.1.2 ความหนาแน่นเฉลี่ย (Mean density, ρ).....	3
2.1.3 ความหนาแน่นเฉพาะจุด (Density at a point)	3
2.1.4 น้ำหนักจำเพาะ (Specific Weight, γ)	3
2.1.5 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, s).....	4
2.2 คิเนมาติกส์ของการไหล.....	5
2.2.1 การไหลแบบลามินาร์และแบบเทอร์บิวเลนต์.....	5
2.2.2 การไหลแบบ Steady flow และการไหลแบบ Uniform flow	6
2.2.3 อัตราการไหลและความเร็วเฉลี่ย	7
2.3 การไหลของของไหลในท่อ.....	9
2.3.1 การสูญเสียกำลังงานในท่อ	9
2.3.2 Reynolds Number (N_R หรือ Re).....	9
2.3.3 แฟคเตอร์ความเสียดทาน (f)	10
2.3.4 การหาค่าการสูญเสียหลักในท่อกลม.....	10
2.3.5 การสูญเสียรอง.....	10

เรื่อง	หน้า
2.4 กังหันน้ำ (hydraulic turbine)	11
2.5 เครื่องกังหันน้ำ	12
2.5.1 เครื่องจักรกลที่คล้ายคลึงกัน	12
2.5.2 ความเร็วจำเพาะ (Specific speed)	13
2.5.3 ทฤษฎีใบจักรต่อเนื่อง	13
2.5.4 ทฤษฎีเครื่องจักรกลของไหล	15
2.5.5 กังหันแบบแรงกระทบ (Impulse Turbine).....	16
2.6 การวัดแรงม้าเบรก (Brake Horsepower).....	22
2.6.1 โพรนีเบรก (Prony brake)	22
บทที่ 3 การออกแบบ คำนวณ และวิธีการทดลอง	24
3.1 การออกแบบการจัดวางแนวแกนของล้อกังหัน	24
3.2 การออกแบบโครงเครื่อง	24
3.3 การออกแบบใบพัดกังหัน	24
3.4 การออกแบบล้อกังหัน	26
3.5 ขนาดและชนิดของท่อ	27
3.6 การเลือกใช้วาล์ว	27
3.7 การออกแบบปั๊ม	28
3.8 ถังบรรจุน้ำ	30
3.9 อุปกรณ์ในชุดวัดทอร์คอย่างง่าย	31
3.10 การออกแบบชุดฝาครอบ	32
3.11 การออกแบบฐานปรับมุมการฉีดยุติ	32
3.12 ระบบท่อและหัวฉีด	32
3.13 ชุดวัดความเร็วรอบ	33
3.14 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล	34
3.15 ส่วนประกอบชุดทดลอง	34
บทที่ 4 ขั้นตอนและผลการทดลอง	25
4.1 หลักการและเหตุผลในการทดลอง.....	25
4.1.1 จำนวนใบพัดของกังหัน	25

เรื่อง	หน้า
4.1.2 มุมองศาการยิงของหัวฉีด	25
4.1.3 รูปแบบของใบพัด.....	25
4.2 การอ่านอัตราการไหลของน้ำ	25
4.3 การอ่านค่าความเร็วรอบ	25
4.4 วิธีการในการวัดทอร์ค	25
4.5 วิธีการทดลอง.....	25
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	37
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	37
5.1.1 ที่อัตราการไหล 1.4 m ³ /h.....	37
5.1.2 ที่อัตราการไหล 1.5 m ³ /h.....	37
5.1.3 ที่อัตราการไหล 1.6 m ³ /h.....	37
5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	42
5.3 ข้อเสนอแนะ	42
บรรณานุกรม.....	43
ภาคผนวก ก.....	44
ภาคผนวก ข.....	80
ภาคผนวก ค.....	86
ภาคผนวก ง.....	89

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.2 ช่วงการทำงานของกังหันน้ำชนิดต่างๆ.....	11
ตารางที่ 1 ตัวอย่างตารางการบันทึกค่าที่ทดลอง.....	38

สารบัญรูปรูปภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 น้ำหนักจำเพาะของน้ำบริสุทธิ์ที่ $g=9.81$	4
รูปที่ 2.2 การไหลแบบลามินาร์.....	5
รูปที่ 2.3 การไหลแบบเทอร์บิวเลนซ์.....	6
รูปที่ 2.4 Velocity profile ของของไหลจริงภายในท่อ.....	6
รูปที่ 2.5 แสดงการไหลแบบ Unsteady flow ที่เกิดขึ้นในลำคลอง.....	7
รูปที่ 2.6 การไหลของของไหลในจินตนาการ.....	7
รูปที่ 2.7 Fluctuating Velocity ของจุดจุดหนึ่ง.....	8
รูปที่ 2.8 แผนภาพเวกเตอร์ความเร็วตรงจุดที่ออกของใบพัด.....	12
รูปที่ 2.9 ระบบใบจักรต่อเนื่องอย่างง่าย.....	13
รูปที่ 2.10 ใบจักรต่อเนื่องรอบวงกลม (ก)กงจักรติดกับที่ (ข)กงจักรภายในหมุน.....	14
รูปที่ 2.11 การไหลเข้าสู่ใบจักร (ก)ในแนวสัมผัสใบจักร (ข)ไม่สัมผัสใบจักร.....	15
รูปที่ 2.12 การไหลต่อผ่านปริมาตรควบคุมที่สมมาตรรอบวงกลม.....	16
รูปที่ 2.14 ตัวล้อของกังหัน.....	16
รูปที่ 2.13 ลักษณะของใบพัดรูปถ้วย.....	17
รูปที่ 2.15 ระบบการทำงานของกังหันแบบแรงกระทบ.....	18
รูปที่ 2.16 แสดงทิศทางการน้ำกระทบกับใบพัด.....	18
รูปที่ 2.17 การวางใบกังหันของล้อกังหันแบบเพลตัน.....	19
รูปที่ 2.18 ลักษณะการทำงานของ Nozzle และวงล้อกังหัน.....	20
รูปที่ 2.19 ล้อกังหันเพลตันชนิดมีหัวฉีดเดี่ยว.....	21
รูปที่ 2.20 ระบบล้อกังหันเพลตันชนิด 4 หัวฉีด ใช้กับเพลที่ตั้ง.....	21
รูปที่ 2.21 อุปกรณ์วัดทอร์ค (Prony brake)	22
รูปที่ 2.22 อุปกรณ์วัดทอร์ค (Prony brake)	22
รูปที่ 2.23 อุปกรณ์วัดทอร์ค (Prony brake)	23
รูปที่ 3.1 ใบพัดของกังหัน.....	26
รูปที่ 3.2 ล้อกังหัน.....	27
รูปที่ 3.3 โกลบวาล์ว.....	28
รูปที่ 3.4 ป้อนน้ำรุ่น Model PS-130 Auto.....	30
รูปที่ 3.5 ถังบรรจุน้ำ.....	31
รูปที่ 3.6 เครื่องมือวัดทอร์ค.....	31

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.7 ฐานปรับมุมการฉีดยุติ.....	32
รูปที่ 3.8 ท่อและหัวฉีดยุติ.....	33
รูปที่ 3.9 หัวฉีดยุติ.....	33
รูปที่ 3.10 มิเตอร์วัดรอบ Photo Tachometer MDT-2244B.....	33
รูปที่ 3.11 โรตاميเตอร์.....	34
รูปที่ 3.12 รูปแบบชุดทดลอง.....	34
รูปที่ 3.13 ชุดทดลองจริง.....	35

สารบัญกราฟ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเร็วรอบของใบพัดรูปแบบใหม่ ที่มีมุมยี่ง 0 องศาของ 12 และ 24 ใบ.....	41
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเร็วรอบของใบพัดรูปแบบใหม่ ที่มีจำนวนใบพัด 24 ใบ ขององศาการยี่ง 0, 5 และ -5 องศา.....	41
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเร็วรอบของใบพัดรูปแบบใหม่ และรูปแบบเดิมจำนวนใบพัด 24 ใบ ที่มีมุมยี่ง 0 องศา.....	42

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในการดำเนินชีวิตล้วนแต่ต้องพึ่งพาพลังงานทั้งสิ้น แหล่งกำเนิดพลังงานที่สำคัญที่สุดแก่โลกของเราคือดวงอาทิตย์ จนถึงปัจจุบันเราได้รู้จักพลังงานมากมาย อาทิเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานไฟฟ้า พลังงานน้ำ เป็นต้น ซึ่งในส่วนของพลังงานน้ำนั้น ได้มีการนำมาใช้กันอย่างกว้างขวาง สังเกตได้จากปริมาณเขื่อนในปัจจุบันที่มีมากมายนับไม่ถ้วน โดยเราจะนำพลังงานน้ำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า แทนที่ใช้พลังงานจากเชื้อเพลิง ซึ่งมีผลกระทบต่อมลพิษโดยตรง การนำพลังงานน้ำมาใช้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่แปลงพลังงานศักย์และพลังงานจลน์มาใช้งาน นั่นก็คือ “กังหันน้ำ” กังหันน้ำมีมากมายซึ่งล้วนแต่สร้างเพื่อให้เหมาะกับงานนั้นๆ ในที่นี้เราจะศึกษาการทำงานของกังหันน้ำแบบแรงผลัก (Impulse) โดยอุปสรรคที่สำคัญในการศึกษาก็คือ นักศึกษาไม่สามารถเห็นการทำงานของกังหันน้ำและส่วนประกอบได้ ชุดสาธิตกังหันน้ำแบบเพลตันสามารถช่วยให้นักศึกษาเห็นรูปร่างที่จำลองจากของจริงรวมทั้งสามารถทำการทดลองจากชุดสาธิตนี้ได้อย่างง่าย โดยเราทำการออกแบบกังหันให้มีรูปแบบต่างๆ ในทางทฤษฎีนั้นเราต้องการให้ลำน้ำที่ฉีดไปกระทบใบกังหันแล้วกลับในทิศสวนทางกับกระแสที่ฉีดออกมาให้มากที่สุดโดยประมาณ 180° วิธีนี้ทำให้ได้พลังงานจลน์จากลำน้ำส่งให้กังหันจนหมดสิ้น แต่ในการปฏิบัติจริงเราจะไม่สามารถสวนทางเดินน้ำบนล้อกังหันให้กลับเป็น 180° ได้เลยโดยจะทำได้ประมาณ 170° เพราะลำน้ำจะไปกระทบกับกังหันตัวถัดไป เป็นการต้านการหมุนของล้อกังหันซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพลดลง

จากข้อมูลที่ได้ทำการศึกษา จึงได้วางเป้าหมายเพื่อที่จะออกแบบชุดล้อกังหันน้ำแบบเพลตันเป็น 2 รูปแบบและมีจำนวนใบพัดที่ไม่เท่ากัน และอีกตัวแปรหนึ่งคือมุมในการยิงน้ำที่องศาต่างๆ โดยโครงงานนี้จะใช้ล้อกังหันเพลตันเป็นตัวขับเคลื่อนและใช้ชุดวัดการะเบรคเป็นตัวหาประสิทธิภาพ จากนั้นจึงนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. ออกแบบใบพัดและทำการปรับปรุงให้หัวฉีดสามารถปรับมุมการยิงได้
2. ทำการติดตั้ง Flow meter เครื่องวัดการะเบรค และปรับปรุงการทำงานของชุดสาธิต
3. หาประสิทธิภาพที่เปลี่ยนไปของกังหันน้ำ

1.3 คำจำกัดความ

ปั๊ม หมายถึง เครื่องมือทางกล ที่ทำหน้าที่สร้างอัตราการไหลให้แก่ของไหล

เฮด หมายถึง ความสูงระหว่างผิวหน้าของของไหล จนถึงจุดที่ของไหลไหลออก

กังหันพลังของไหล หมายถึง เครื่องมือที่เปลี่ยนพลังงานของของไหลไปเป็นพลังงานในรูปของกำลังงานเพลลาเพื่อนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า

ความดันสมบูรณ์ หมายถึง ความดันที่วัดเทียบกับความดันที่สูญญากาศหรือความดันศูนย์สัมบูรณ์

ความดันมาตร หมายถึง ความดันที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดความดัน โดยเปรียบเทียบกับความดันบรรยากาศเฉพาะที่

ทอร์ค หมายถึง แรงบิด ที่วัดได้จากเพลลาของกังหัน

พลังงานจลน์ หมายถึง พลังงานที่มีอยู่ในวัตถุ โดยที่วัตถุนั้นมีการเคลื่อนที่

พลังงานศักย์ หมายถึง พลังงานที่มีอยู่ในวัตถุ เนื่องจากวัตถุมีความสูงหรือพลังงานที่มีอยู่ในวัตถุ เนื่องจากวัตถุมีคุณสมบัติยืดหยุ่น

1.4 ขอบเขตการทดลอง

- 1.จำนวนใบพัด 24 กับ 12 ใบ
- 2.มุมมองศาทียิ่ง 0,5,-5
- 3.รูปแบบใบพัด 2 รูปแบบ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สำหรับทฤษฎีที่นำมาใช้ในการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อเทอร์โบประเภทอิมพัลส์นั้น เกี่ยวข้องกับทฤษฎีต่างๆเช่น ของไหล บีบ กังหันน้ำ และอื่นๆ ซึ่งจำเป็นต้องทำการศึกษาถึงหลักการทางานเพื่อสร้างแบบจำลองการทำงานของกังหันน้ำ ได้อย่างถูกต้อง

2.1 คุณสมบัติของของไหล

2.1.1 ของไหล (Fluid)

ของไหล หมายถึง สสารที่สามารถไหลได้ โดยมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปตามภาชนะที่บรรจุ เมื่ออยู่ในสภาพสมดุลของไหลจะไม่สามารถรับแรงเฉือนได้ของไหลทุกชนิดจะยุบตัวตามความดันได้เล็กน้อย

2.1.2 ความหนาแน่นเฉลี่ย (Mean density, ρ)

ความหนาแน่นเฉลี่ย เป็นอัตราส่วนระหว่างมวล กับปริมาตรของสารนั้น ถ้าความหนาแน่นเฉลี่ยทุกๆ ส่วนของสารนั้นเท่ากันหมดแสดงว่าสารนั้น มีความหนาแน่นสม่ำเสมอความหนาแน่น มวล และปริมาตรมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$(\rho = m/V)$$

เมื่อ m = มวล หน่วย kg

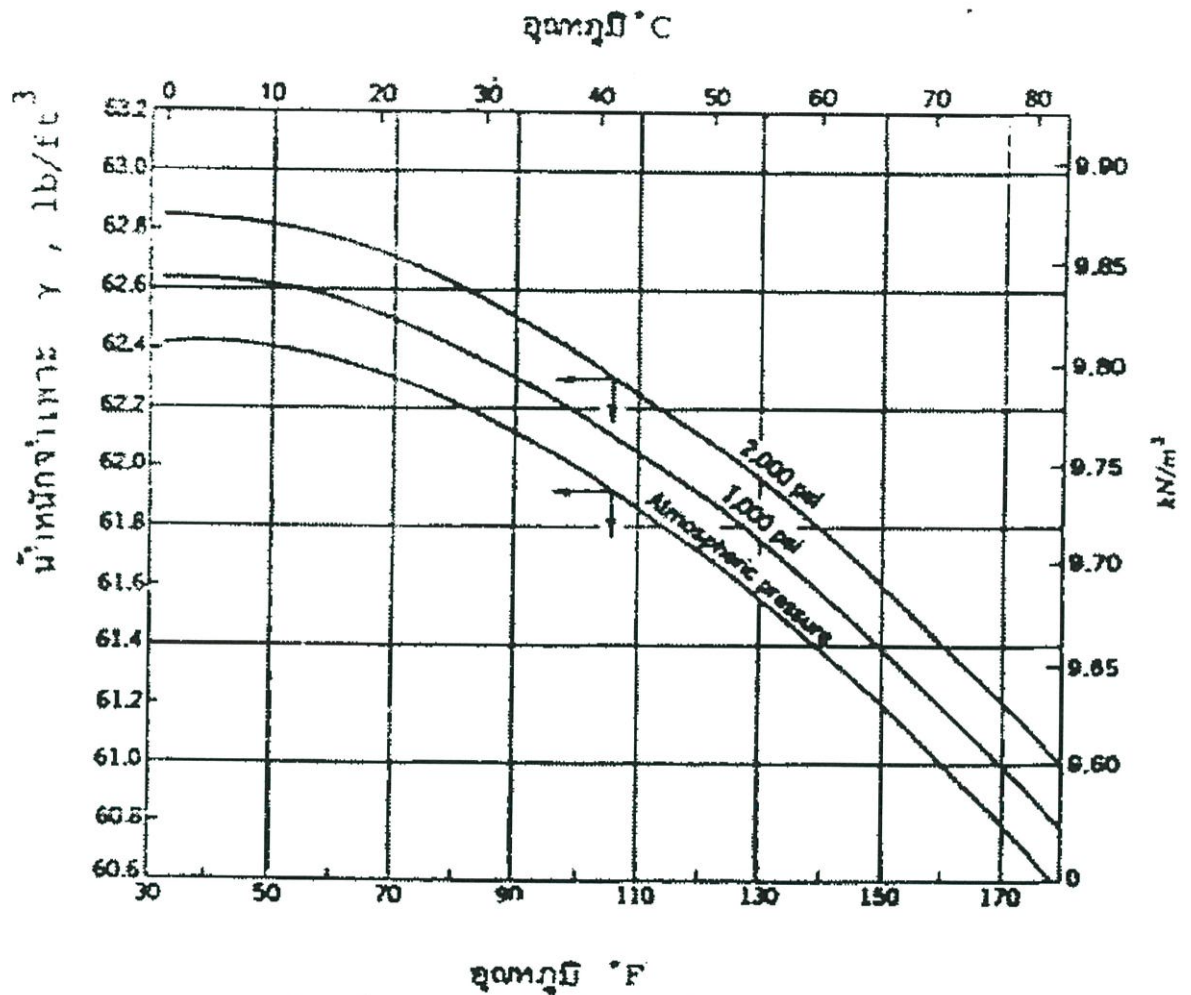
V = ปริมาตร หน่วย m^3

2.1.3 ความหนาแน่นเฉพาะจุด (Density at a point)

ความหนาแน่นเฉพาะจุด คือ ความหนาแน่นเฉลี่ยเมื่อปริมาตรของสารนั้นเข้าใกล้ศูนย์ โดยทั่วไปสสารมักประกอบด้วยโมเลกุลอยู่แยกจากกันดังนั้นปริมาตรของสสารจะลดลงเป็นศูนย์ไม่ได้ สามารถลดได้จำนวนหนึ่งเท่านั้น

2.1.4 น้ำหนักจำเพาะ (Specific Weight, γ)

น้ำหนักจำเพาะ เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักหรือแรงดึงดูดของโลกกับปริมาณสารนั้น ดังนั้นหน่วยของน้ำหนักจำเพาะจึงเป็นหน่วยของแรงต่อหน่วยปริมาตรน้ำหนักจำเพาะ และความหนาแน่น เขียนเป็นสมการดังนี้($\rho = \gamma/g$) หรือ ($\gamma = \rho g$) มีหน่วยเป็น kg/m^3 น้ำหนักจำเพาะของของเหลวจะเปลี่ยนแปลงตามความดันได้เล็กน้อย ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นอยู่กับ Bulk modulus ของของเหลวและขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของของเหลว และค่า g ด้วย น้ำหนักจำเพาะที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่อยู่ภายใต้ค่า $g=9.81$ สามารถหาได้จากรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 น้ำหนักจำเพาะของน้ำบริสุทธิ์ที่ $g=9.81$

2.15 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, s)

ความถ่วงจำเพาะ คืออัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของสารกับความหนาแน่นมาตรฐาน ซึ่งความหนาแน่นมาตรฐานที่ใช้เปรียบเทียบกับความหนาแน่นของของแข็งและของเหลวคือ ความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ 4°C ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1000 kg/m^3 ส่วนความหนาแน่นมาตรฐานที่ใช้เปรียบเทียบกับความหนาแน่นของแก๊สก็คือ ความหนาแน่นของอากาศหรือไนโตรเจน

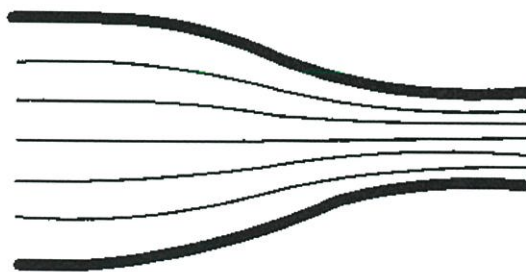
ความถ่วงจำเพาะ เป็นตัวแปรที่ไม่มีหน่วยเนื่องจากเป็นอัตราส่วนของค่า 2 ค่าที่มีหน่วยเหมือนกัน และ เนื่องจากความหนาแน่นของของไหลนั้นเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ดังนั้น จึงต้องกำหนดให้ชัดเจนว่าเป็นความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิใด

2.2 คิเนมาติกส์ของการไหล

ของไหลในจินตนาการถือว่าเป็นของไหลที่ไม่มีความหนืด ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะไม่มีในของไหลจริง ตามหลักวิศวกรรมบางอันถือว่าข้อสมมติของคุณสมบัตินี้มีประโยชน์ แต่ถ้าเป็นการไหลของของไหลจริงก็จะมีผลของความหนืดเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งความหนืดนี้จะทำให้เกิดความเค้นเฉือนขึ้นในอนุภาคของของไหล เมื่ออนุภาคนั้นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ต่างกัน

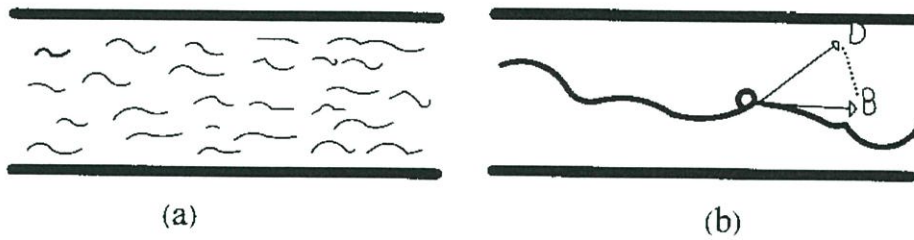
2.2.1 การไหลแบบลามินาร์และแบบเทอร์บิวเลนซ์

หัวข้อนี้ จะบรรยายเฉพาะความเร็ว ความเร่ง และการเคลื่อนที่ของของไหลในที่ว่าง โดยไม่พูดถึงเรื่องแรง ซึ่งลักษณะที่จะบรรยายในที่นี้คือ การไหลแบบลามินาร์และการไหลแบบเทอร์บิวเลนซ์ ในปี 1883 Osborne Reynolds ได้แสดงให้เห็นถึงลักษณะการไหลของของไหลทั้งสองแบบ โดยการฉีดสีเข้าไปที่ปากของหลอดแก้วที่ต่อจากถังน้ำ ที่จุดปลายของหลอดแก้วจะมีวาล์วปรับความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านหลอดแก้ว จากการสาธิต ปรากฏว่าเมื่อน้ำที่ไหลผ่านหลอดแก้วมีความเร็วต่ำๆ จะสังเกตเห็นสีที่ฉีดเข้าไปไหลเป็นเส้นตรงตลอดความยาวท่อ การไหลดังกล่าวแสดงว่าอนุภาคของน้ำนั้นเคลื่อนที่ขนานกันเป็นเส้นตรง แต่เมื่อก่อยๆเพิ่มความเร็วโดยการเปิดวาล์วให้กว้างขึ้น ปรากฏว่าลักษณะการเคลื่อนที่ของสีนั้นเปลี่ยนไป ในตอนแรกขนาดของเส้นสีที่อยู่ในหลอดแก้วจะหนาขึ้นจากนั้นสีที่อยู่บริเวณปากทางเข้าของหลอดแก้วจะแตกตัวเข้าไปรวมกับน้ำวนที่เกิดขึ้น ส่วนเส้นสีที่อยู่ถัดไปได้น้ำก็จะกระจายตัวออกอย่างสม่ำเสมอ จนกระทั่งไม่เห็นสีดังกล่าวเลย แสดงว่าการไหลแบบหลังนี้ ความเร็วของอนุภาคต่างๆของของไหลเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและทิศทางอยู่ตลอดเวลา ลักษณะการไหลที่เกิดจากการสาธิตแบบแรกนั้นมีชื่อเรียกว่า การไหลแบบลามินาร์(Laminar flow), การไหลแบบ Streamline หรือการไหลแบบ Viscous flow ลักษณะสำคัญของการไหลแบบนี้คือ ของไหลจะเคลื่อนที่โดยการเลื่อนตัวไปบนชั้นถัดไป และอนุภาคของของไหลในแต่ละชั้นจะเคลื่อนที่ไปในเส้นทางที่แน่นอนและสามารถสังเกตเห็นได้เป็น Streamline ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การไหลแบบลามินาร์

ลักษณะการไหลแบบที่สองมีชื่อเรียกว่าการไหลแบบเทอร์บิวเลนซ์ ดังรูปที่ 2.3 รูป (a) เป็นการเคลื่อนที่ที่ไม่เป็นระเบียบของอนุภาคจำนวนมากในช่วงสั้นๆ ส่วนรูป (b) แสดงให้เห็นเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ไม่เป็นระเบียบและไม่แน่นอนของอนุภาคเพียงอนุภาคเดียวในช่วงเวลาที่นานขึ้น ลักษณะเด่นของการไหลชนิดนี้คือ ความไม่เป็นระเบียบที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคต่างๆนั่นเอง



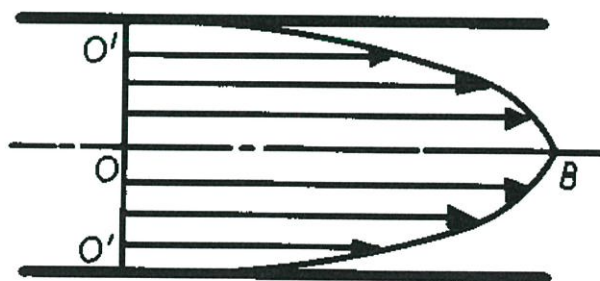
รูปที่ 2.3 การไหลแบบเทอร์บิวเลนต์

2.2.2 การไหลแบบ Steady flow และการไหลแบบ Uniform flow

- Steady flow เป็นลักษณะการไหลที่ทุกๆสถานะของจุดใดๆในลำของไหลมีค่าคงที่เมื่อเทียบกับเวลาหรือไม่แปรตามกาลเวลานั่นเอง

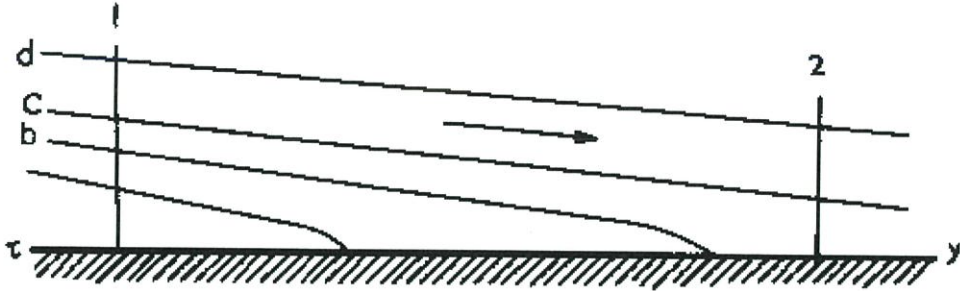
- Uniform flow ที่แท้จริงนั้นเป็นลักษณะการไหลที่ทุกๆจุดในที่ว่างของขณะใดขณะหนึ่งนั้นมีความเร็วเท่ากันทั้งขนาดและทิศทาง

การไหลแบบ Steady flow (หรือ unsteady flow) และ Uniform flow (หรือ nonuniform flow) อาจเกิดขึ้นกับของไหลใดๆ โดยไม่จำเป็นต้องมีความสัมพันธ์กัน ดังนั้น ของไหลใดๆ จึงอาจมีลักษณะการไหลแบบใดแบบหนึ่งในการไหลรวมซึ่งมีได้ 4 แบบ คือ ของไหลที่มีการไหลผ่านท่อที่มีขนาดสม่ำเสมอ ในอัตราการไหลที่คงที่ ก็จะเรียกว่าการไหลแบบ steady uniform flow ของไหลที่ไหลผ่านท่อเร็วด้วยอัตราการไหลคงที่ก็จะเป็นการไหลแบบ steady nonuniform flow แต่ถ้าของไหล ไหลผ่านท่อตรงที่มีขนาดสม่ำเสมอแต่อัตราการไหลไม่คงที่ จะเรียกการไหลแบบ unsteady uniform flow ส่วนของไหลที่ไหลผ่านท่อเร็วด้วยอัตราการไหลที่ไม่คงที่ จะเรียกว่า การไหลแบบ unsteady nonuniform flow



รูปที่ 2.4 Velocity profile ของของไหลจริงภายในท่อ

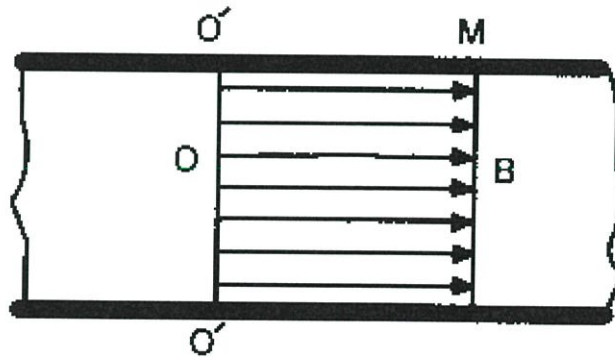
การไหลแบบ Unsteady flow นี้ อาจจะเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเพียงชั่วคราว หลังจากนั้นอาจจะ เป็นไปได้ทั้ง steady flow หรือไม่มีการไหลเลยก็ได้ตัวอย่างการไหลแบบ Unsteady flow แสดงในรูป 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการไหลแบบ Unsteady flow ที่เกิดขึ้นในลำคลอง

2.2.3 อัตราการไหลและความเร็วเฉลี่ย

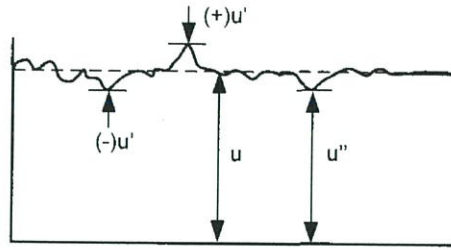
อัตราการไหล คือปริมาณของไหลที่ไหลผ่านหน้าตัดใดๆในหนึ่งหน่วยเวลา นิยมเรียกสั้นๆว่า Flow หรือ Discharge มีหน่วยต่างๆเช่น m^3/s , N/s, ลิตร/นาที หรือหน่วยอื่นๆตามลักษณะการใช้งานเฉพาะ อย่าง ในระบบเอสไอ นั้น อัตราการไหลจะมีหน่วยเป็น m^3/s ในกรณีที่เป็นการไหลในจินตนาการ การไหล ในช่องทาง ทุกๆอนุภาคของของไหลก็จะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงที่ขนานกัน ด้วยความเร็วที่เท่ากัน ดังรูป 2.6



รูปที่ 2.6 การไหลของของไหลในจินตนาการ

สำหรับการไหลของของไหลจริงนั้น ของไหลชั้นที่ติดอยู่กับผนังจะมีความเร็วเป็นศูนย์ และจะ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออยู่ห่างจากผนังออกไป และจะมี Velocity profile ดังเช่นในรูปที่ 2.4

ให้ความเร็วย่อยขณะใดขณะหนึ่งในแนวขนานกับช่องการไหลของจุดกำหนดให้เป็น u' ดังรูปที่ 2.7 แกนเฉลี่ยตลอดทั้งช่วงเวลาของ u' คือค่าความเร็วเฉลี่ยชั่วคราว u ของจุดนั้น ดังรูปที่ 2.7 นั้นเอง



รูปที่ 2.7 Fluctuating Velocity ของจุดจุดหนึ่ง

ความแตกต่างระหว่าง u'' และ u' นี้ เรียกว่า Turbulent fluctuation ของความเร็วย่อยนั้น ค่าเฉลี่ยชั่วคราวของ u' จะต้องมีค่าเป็นศูนย์เช่นเดียวกับค่าเฉลี่ยของความเร็วย่อยตลอดหน้าตัดของช่องทางการไหล เช่น BD ในรูปที่ 2.3 ดังนั้น ความเร็วที่ขณะใดขณะหนึ่ง จะแสดงในสมการที่ 2.1

$$u'' = u + u' \quad (2.1)$$

ค่า u ของช่วงเวลา t ที่แน่นอนหาได้จาก

$$\frac{u}{t} = \frac{1}{t} \int_0^t u'' \cdot dt \quad (2.2)$$

ความเร็ว u นี้ จะแปรผันตลอดพื้นที่หน้าตัด ในลักษณะใดลักษณะหนึ่ง เช่นในรูปที่ 2.3 ลักษณะดังกล่าว จะมีอัตราการไหลเป็น

$$Q = \int_A u \cdot dA = AV \quad (2.3)$$

เมื่อ u = ความเร็วเฉลี่ยของจุดที่ผ่านพื้นที่เล็กๆ dA

V = ความเร็วเฉลี่ยทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัด A

ถ้ารู้ว่า u เป็นฟังก์ชันของ A ก็สามารถ Integrate หาค่า Q ได้ แต่ถ้ารู้เพียงความเร็วเฉลี่ย V ของพื้นที่ที่แบ่งออกมาจากพื้นที่รวมแล้ว สามารถหาอัตราการไหลโดย

$$Q = A_a \cdot V_a + A_b \cdot V_b + \dots + A_n \cdot V_n = A \cdot V \quad (2.4)$$

ในทางกลับกัน ถ้ารู้อัตราการไหลซึ่งหาได้โดยวิธีใดวิธีหนึ่ง ก็สามารถหาความเร็วเฉลี่ยได้จาก

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{G}{\gamma \cdot A} \quad (2.5)$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลโดยปริมาตร
 G = อัตราการไหลโดยน้ำหนัก

2.3 การไหลของของไหลในท่อ

หัวข้อนี้ ได้แสดงถึงการไหลของของไหลในท่อ โดยประยุกต์ทฤษฎีการไหล สมการการไหลอย่างสม่ำเสมอ และทฤษฎีความต้านทานการไหลเข้าด้วยกัน

2.3.1 การสูญเสียกำลังงานในท่อ

การสูญเสียกำลังงานในท่อเป็นการสูญเสียเนื่องมาจากความต้านทาน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

- การสูญเสียหลัก (Major loss)

การสูญเสียหลักนี้ เกิดขึ้นจากความเสียดทานของผิวท่อ ขนาด ความยาว และความเร็วในการไหลในผิวท่อที่ขรุขระ ยิ่งความยาวของท่อมาก และมีความเร็วในการไหลสูง การสูญเสียกำลังงานก็จะสูงตามไปด้วย แต่การสูญเสียนี้อาจลดลง เมื่อท่อมีขนาดใหญ่ขึ้น

- การสูญเสียรอง (Minor loss)

การสูญเสียรองเกิดขึ้นเมื่อของไหลที่ไหลในท่อ ไหลผ่านข้อต่อ ข้องอ ลิ้น ฯลฯ ปกติถ้าท่อมีความยาวมาก ค่าการสูญเสียรองนี้จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าการสูญเสียหลัก แต่ถ้าท่อมีความยาวน้อย และมีการหักงอหรือมีการลดขนาดลงหลายแห่ง ค่าการสูญเสียรองจะมีค่าสูง เมื่อเทียบกับการสูญเสียหลัก

2.3.2 Reynolds Number (N_R หรือ R_e)

สามารถหาได้จากอัตราส่วนของแรงเนื่องจากความเฉื่อย และแรงเนื่องจากความหนืดของของไหล ซึ่งเป็นตัวเลขที่ไม่มีหน่วย ตัวเลขนี้เป็นตัวสำคัญที่จะบอกถึงลักษณะการไหลของของไหล ว่าเป็นการไหลแบบลามินาร์หรือการไหลแบบเทอร์บิวเลนต์ (ถ้า $N_R < 2000$ จะเป็นการไหลแบบลามินาร์ ถ้า $N_R > 2000$ มากๆ จะเป็นแบบเทอร์บิวเลนต์) และเป็นตัวสำคัญในการหาแฟคเตอร์ของความเสียดทาน สมการการหาค่า Reynolds Number คือ

- สำหรับท่อกลม

$$N_R = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (2.6)$$

เมื่อ R = Reynolds Number

D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

V = ความเร็วในการไหลของของไหล

ρ = ความหนาแน่นของของไหล

μ = ความหนืดสมบูรณ์ของของไหล

ν = ความหนืดจลน์ของของไหล

- สำหรับท่อไม่กลม

$$N = \frac{(4R)V\rho}{\mu} \quad \text{หรือ} \quad \frac{4RV}{\nu} \quad (2.7)$$

เมื่อ R = Hydraulic radius = A/P

A = พื้นที่หน้าตัดของของไหล

P = เส้นรอบรูปพื้นที่หน้าตัด

2.3.3 แฟคเตอร์ความเสียดทาน (f)

เป็นค่าที่แปรผกผันกับ Reynolds Number ค่าที่จะไม่มีหน่วย ใช้สำหรับหาการสูญเสีย

- แฟคเตอร์ความเสียดทานของการไหลแบบราบเรียบ ($NR < 2,000$)

$$f = \frac{64}{NR} \quad (2.8)$$

- แฟคเตอร์ความเสียดทานของการไหลแบบปั่นป่วน

การไหลแบบปั่นป่วนจะไม่มีสูตรการหาค่า f ที่แน่นอน เหมือนการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งทราบเพียงว่า f เป็นฟังก์ชันของ N_R และค่าความขรุขระของท่อ (e) (ตารางที่ก.3) เท่านั้น ดังนั้น ค่า f จึงต้องหาจากกราฟที่ได้จากการทดลองซึ่งจะต้องทราบค่า Reynolds Number และค่าอัตราส่วนความขรุขระต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (e/D) เสียก่อน

2.3.4 การหาค่าการสูญเสียหลักในท่อกลม

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.9)$$

เมื่อ h_L = การสูญเสียหลัก

f = แฟคเตอร์ความเสียดทาน

L = ความยาวท่อ

R = Hydraulic radius = A/P

V = ความเร็วในการไหลของของไหล

g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

2.3.5 การสูญเสียรอง

สำหรับการสูญเสียที่เกิดจากการที่มีสิ่งมาบกวนการไหลในที่เฉพาะแห่งเช่น การโค้งงอ การเพิ่มหรือลดขนาดของท่อ การไหลผ่านวาล์ว เป็นต้น เรียกว่า การสูญเสียรอง

ในกรณีที่ท่อมีขนาดยาวมาก การสูญเสียรองจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับการสูญเสียหลักที่เกิดจากความเสียดทาน แต่ถ้าท่อมีขนาดสั้น การสูญเสียรองก็อาจมีค่ามากกว่าการสูญเสียหลัก สมการการหาค่าการสูญเสียรองคือ

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g} \tag{2.10}$$

- เมื่อ h_L = การสูญเสียรอง
- K_L = สัมประสิทธิ์ของการสูญเสีย
- V = ความเร็วในการไหลของของไหล
- g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

2.4 กังหันน้ำ (hydraulic turbine)

ใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลงพลังงานในตัวของน้ำที่มีอยู่ในรูปของพลังงานศักย์ให้เป็นพลังงานกล และนำพลังงานที่ได้รับการเปลี่ยนแปลงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าในที่สุด ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการติดตั้งโรงไฟฟ้ากังหันน้ำ ได้แก่ อ่างเก็บน้ำ ท่อสำหรับส่งน้ำ ตัวกังหัน อาจสูงกว่าโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน แต่อาจจะมีข้อได้เปรียบมากกว่า ซึ่งก็คือ

1. ประสิทธิภาพการทำงานสูง
2. ความยืดหยุ่นในการเดินเครื่อง
3. การซ่อมแซมและการบำรุงทำได้ง่าย
4. การสึกหรอต่ำ
5. ไม่เกิดก๊าซไอเสีย ไม่ทำให้เกิดมลภาวะแก่บรรยากาศ

กังหันน้ำจะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1) กังหันน้ำแรงดล (Impulse turbine) คือกังหันที่ไม่ลดความดันของน้ำในขณะที่น้ำไหลผ่านกังหัน กังหันแรงดลที่ใช้กันทั่วไปคือ กังหันเพลตัน ซึ่งเหมาะสำหรับน้ำที่สูงๆ ประมาณ 150-2000 เมตร

2) กังหันน้ำแรงปฏิกิริยา (Reaction turbine) คือกังหันลดความดันของน้ำ ในขณะที่น้ำไหลผ่าน กังหันแบ่งเป็น 2 ชนิดตามลักษณะการไหลของน้ำ

1. กังหันแบบไหลตามรัศมีหรือแบบใบพัดผสม
2. กังหันน้ำแบบไหลตามแนวรัศมี

ตารางที่ 2.1 แสดงถึงค่าหัวพลังงาน (head) ค่ากำลังงาน และค่าประสิทธิภาพโดยทั่วไปของกังหันแต่ละชนิด

	กังหันล้อเพลตัน	กังหันฟรานซิส	กังหันคัปแลน
ความเร็วรอบ(rad)	0.05-0.4	0.4-2.2	1.8-4.6
หัวพลังงาน(m)	100-1700	80-500	ไม่เกิน400
กำลังผลิตสูงสุด(kw)	55	40	30
ประสิทธิภาพสูงสุด(%)	93	94	94
กลไกการปรับภาระ	วาล์วเข็มและครีบน้ำ	ใบครีบน้ำ	ใบครีบน้ำ

ตารางที่ 2.2 ช่วงการทำงานของกังหันน้ำชนิดต่างๆ

กังหันน้ำแบบสูบกลับ (Pump turbine) สามารถทำงานเป็นได้ทั้งเครื่องสูบน้ำและกังหันน้ำโดยในช่วงระยะเวลาที่ต้องการพลังงานไฟฟ้าต่ำ เช่นในเวลากลางคืน จะถูกใช้เป็นปั๊มในการสูบน้ำขึ้นไปเก็บในอ่างเก็บน้ำระดับสูงซึ่งน้ำที่สูบขึ้นมาเก็บนี้อาจจะถูกนำมาใช้สำหรับผลิตกำลังงานในเวลากลางวัน ซึ่งมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูง

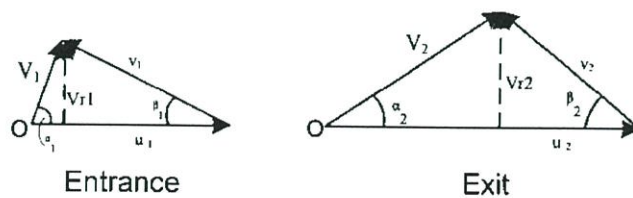
2.5 เครื่องกังหันน้ำ

เป็นเครื่องจักรกลของไหล (Turbo machinery) ชนิดหนึ่ง ทำวานโดยการถ่ายโอนพลังงานระหว่างเครื่องจักรกลกับของไหล ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ เครื่องสูบน้ำ (Pump) และเทอร์โบหรือกังหัน (Turbine) โดยที่เครื่องสูบน้ำนั้น เป็นตัวให้พลังงานกับของไหลโดยเปลี่ยนจากพลังงานเชิงกล เป็นพลังงานเชิงกลศาสตร์ ส่วนกังหัน เป็นตัวรับพลังงานเชิงกลศาสตร์มาจากของไหลแล้วแปลงมาเป็นพลังงานเชิงกลเพื่อไปหมุนเพลาลูกเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Electric generator)ต่อไป ทั้งนี้เครื่องจักรกลของไหล จะมีแรงกระทำระหว่างใบจักรกับของไหล ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างใบจักรกับของไหล ในที่นี้จะกล่าวถึงเนื้อหาเบื้องต้น ซึ่งประกอบด้วยประเภทของเครื่องจักรกลของไหล(เครื่องกังหันน้ำ) ได้แก่ กังหันปฏิกิริยา(Reaction turbine) และกังหันน้ำแบบแรงกระทบ(Impulse Turbine)รวมทั้งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเร็วจำเพาะของกังหันแบบแรงกระทบ

2.5.1 เครื่องจักรกลที่คล้ายคลึงกัน

ในการสร้างแบบจำลองเพื่อออกแบบ และทดสอบเครื่องจักรกลของไหลนั้น แบบจำลองต้องมีสภาพเหมือนเชิงเรขาคณิตกับต้นแบบ และจะต้องมีแผนภาพของเวกเตอร์ความเร็วตรงทางเข้าและทางออกจากใบพัดเหมือนกันด้วย จึงถือว่าแบบจำลองกับต้นแบบมีความคล้ายคลึงกัน

เมื่อพิจารณาแผนภาพเวกเตอร์ความเร็วตรงจุดที่ออกของใบพัดดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดย β คือมุมของใบจักร u คือความเร็วของใบจักรตรงปลายใบจักร v เป็นความเร็วสัมผัสของของไหลกับใบจักร V เป็นความเร็วจริงที่ของไหล ไหลออกจากใบจักร ซึ่งเป็นผลรวมของเวกเตอร์ของ u และ v ส่วน V_R เป็นความเร็วประกอบแนวรัศมีของ V ซึ่งเป็นอัตราส่วนกับอัตราการไหล และ α คือมุมระหว่างความเร็วจริง V กับ u ซึ่งอยู่ในแนวสัมผัสกับวงล้อใบพัด ถ้าหากแบบจำลองมีความคล้ายคลึงเชิงเรขาคณิตกับต้นแบบ แสดงว่ามุม α ต้องเท่ากันทั้งแบบจำลองกับต้นแบบ



รูปที่ 2.8 แผนภาพเวกเตอร์ความเร็วตรงจุดที่ออกของใบพัด

2.5.2 ความเร็วจำเพาะ (Specific speed)

ในการออกแบบขั้นต้นและการเลือกใช้เครื่องจักรกลของไหล ได้ยึดหลักการของเครื่องจักรที่มีความคล้ายคลึงกันจะต้องมีความเร็วจำเพาะเท่ากัน ความเร็วจำเพาะ (N_s) ของกังหันที่มีความคล้ายคลึงกันคือ ความเร็วรอบที่สามารถทำให้กำลังงาน 1 หน่วย ที่เฮด 1 หน่วย และเนื่องจากกำลังงาน P เป็นสัดส่วนกับ $Q.H$ ดังนั้น

$$\frac{P}{Q.H} = \text{ค่าคงที่} \quad (2.11)$$

เมื่อแทนค่า P และ Q จะได้

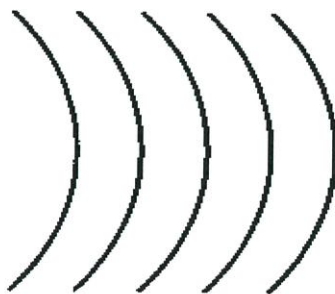
$$\frac{N.P^{\frac{1}{5}}}{H^4} = \text{ค่าคงที่} \quad (2.12)$$

สำหรับกำลังงาน 1 หน่วยที่เฮด 1 หน่วย จะได้ความเร็วจำเพาะของกังหัน

$$N = \frac{N.P^{\frac{1}{5}}}{H^4} \quad (2.13)$$

2.5.3 ทฤษฎีใบจักรต่อเนื่อง

เครื่องจักรของไหลทำงานได้โดยการรับพลังงานมาจากของไหล หรือใส่พลังงานให้กับของไหลในลักษณะการไหลที่ต่อเนื่อง กับผ่านชุดใบจักรที่เคลื่อนที่ ชุดใบจักรเหล่านี้เรียกว่า ใบจักรต่อเนื่อง (Cascade) และเมื่อพิจารณาการไหลผ่านใบจักรต่อเนื่องก็สามารถหาประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของเครื่องจักรกลได้ ระบบใบจักรต่อเนื่องอย่างง่าย แสดงในรูป 2.9 เวกเตอร์ความเร็วจะถูกบ่งชี้เบนไปตามมุมใบจักร จะเกิดแรงกระทำต่อของไหล แต่จะไม่มีการเกิดชั้นกับของไหล เพราะงานจะเกิดขึ้นเมื่อใบจักรหมุน



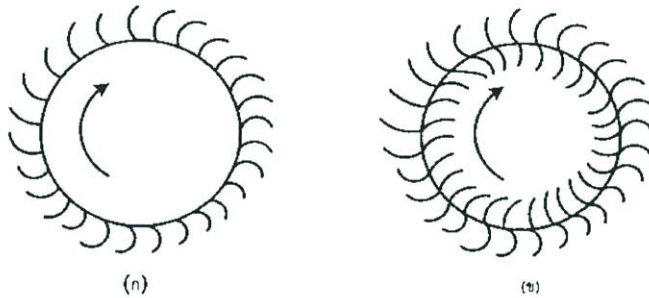
รูปที่ 2.9 ระบบใบจักรต่อเนื่องอย่างง่าย

เนื่องจากเครื่องจักรกลของไหลทำงานโดยการหมุน ดังนั้นระบบใบจักรต่อเนื่องจึงมักจัดวางให้สมมาตรรอบของวงกลม ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ก) ถ้าหากของไหล ไหลเข้าสู่ใบจักรต่อเนื่องที่อยู่กับที่ ใน

ทิศทางรัศมี โมเมนต์จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์ ซึ่งโมเมนต์จะเพิ่มขึ้นมากกว่าหรือเพิ่มขึ้นน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับปริมาตรมวลสารต่อหน่วยเวลา ของการไหลและเกิดความเร็วประกอบในแนวสัมผัส V_1 จึงสามารถเขียนแรงบิดที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

$$T = \rho Q \cdot r \cdot V_t \quad (2.14)$$

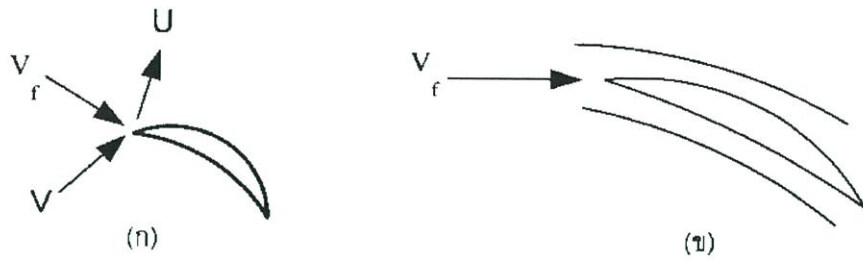
เมื่อพิจารณาชุดใบจักรในรูปที่ 2.10 (ข) เมื่อกังจักรในหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω อยู่ภายในกังจักรตัวนอกซึ่งอยู่กับที่ ระบบดังกล่าวจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องให้การไหลเข้าสู่ใบจักร เกิดความปั่นป่วนน้อยที่สุด นั่นคือของไหลเข้าสู่ใบจักรในทิศทางสัมผัสกับตัวใบจักร ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ก) แต่ถ้าหากความเร็วสัมผัสไม่อยู่ในแนวสัมผัสกับใบจักรแล้ว จะเกิดความแยกตัว (Separation) ดังแสดงในรูป 2.11 (ข)



รูปที่ 2.10 ใบจักรต่อเนื่องรอบวงกลม (ก)กังจักรติดกับที่ (ข)กังจักรภายในหมุน

การแยกตัวในรูปที่ 2.11 (ข) จะก่อให้เกิดความสูญเสียมากขึ้นอย่างรวดเร็ว(ประมาณเป็นค่ายกกำลังสอง) ตามมุมที่เบี่ยงเบนไปจากแนวสัมผัสก็อาจเกิดการแยกตัวขึ้นได้ ทั้งนี้เนื่องจากความโค้งของใบจักรหรือการขยายตัวของท่อของไหล ซึ่งจะทำให้ชั้นขอบเขต (Boundary layer) หนาขึ้น จนกระทั่งหยุดนิ่งในที่สุด การสูญเสียเหล่านี้เรียกว่า การสูญเสียเนื่องจากการกระตุกหรือความปั่นป่วน (Shock or Turbulence losses) เมื่อของไหลออกจากชุดใบจักรต่อเนื่อง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วทั้งขนาดและทิศทาง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์และเกิดงานกระทำต่อใบจักรต่อเนื่อง(กรณีของกังหัน)โดยหลักการกังหันนั้นต้องการให้ของไหลไม่มีโมเมนต์เหลืออยู่เลยหลังจากการกระทบใบจักรแล้ว หรืออีกนัยหนึ่งคือ ต้องการให้ของไหลถ่ายโอนพลังงานทั้งหมดให้กับใบจักร เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

การออกแบบเครื่องจักรของไหล จำเป็นต้องมีการจัดวางใบพัดและเส้นทางน้ำที่เข้ากระทบกับใบจักรให้เหมาะสม จึงได้ประสิทธิภาพสูงสุด สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการออกแบบ ในขณะที่เดียวกัน การออกแบบจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของเครื่องจักรกล ปริมาณต่อหน่วยมวลสารที่ต้องการ ตลอดจนความหนาแน่นของของไหล



รูปที่ 2.11 การไหลเข้าสู่ใบจักร (ก)ในแนวสัมผัสใบจักร (ข)ไม่สัมผัสใบจักร

2.5.4 ทฤษฎีเครื่องจักรกลของไหล

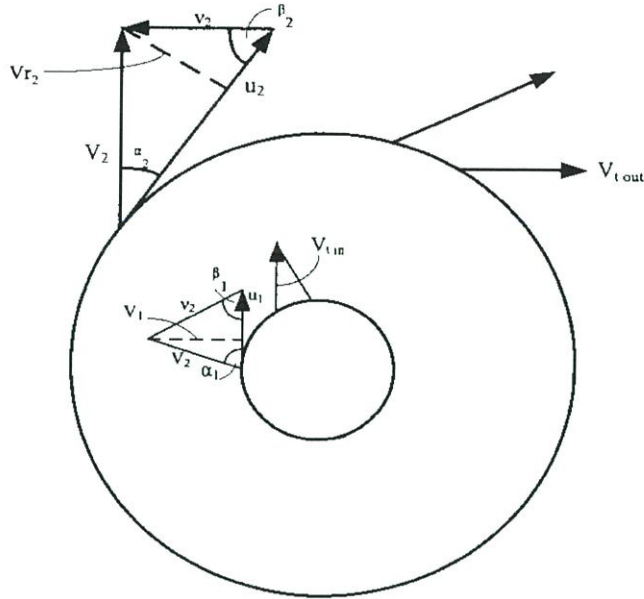
จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า กังหันรับพลังงานมาจากของไหล ส่วนเครื่องสูบน้ำ เครื่องเป่าลม และเครื่องคอมเพรสเซอร์ เป็นตัวเพิ่มพลังงานให้กับของไหลโดยผ่านกังจักร (Runner) ซึ่งมีใบพัดติดอยู่โดยรอบ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของใบจักรอยู่ที่ทิศทางสัมผัส ดังนั้นงานที่ได้จึงเกิดจากแรงประกอบในทิศทางสัมผัส และในระยะทิศทางเดียวกัน ส่วนแรงประกอบในทิศทางรัศมีจะไม่ทำให้เกิดงานขึ้น เพราะไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวรัศมี ในทฤษฎีเครื่องจักรกลของไหล จะถือว่าไม่มีความเสียดทานและทำให้ของไหลไหลผ่านเครื่องจักรอย่างราบรื่น ก็คือสมมติว่ามีใบจักรจำนวนไม่จำกัดที่ทำให้ความเร็วสัมผัสของของไหลในทิศทางสัมผัสใบจักรเสมอ และสามารถใช้สมการโมเมนต์ของโมเมนตัมในการคำนวณได้ นั่นคือ สำหรับการไหลคงตัวภายในปริมาตรควบคุมดังแสดงในรูปที่ 2.12 จะได้

$$T = \rho Q [(r \cdot V_t)_{out} - (r \cdot V_t)_{in}] \quad (2.15)$$

โดยที่ T คือแรงบิด (Torque) ที่กระทำต่อของไหลในปริมาตรควบคุม

$\rho Q (r \cdot V_t)_{out}$ คือโมเมนต์ของโมเมนตัมที่ออกจากปริมาตรควบคุม

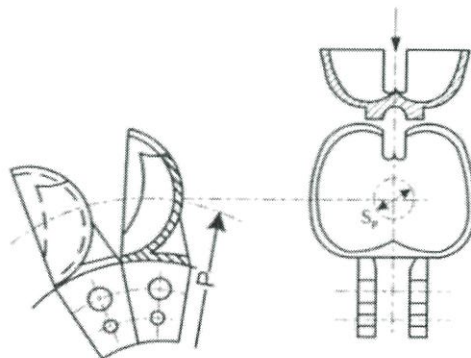
$\rho Q (r \cdot V_t)_{in}$ คือโมเมนต์ของโมเมนตัมที่เข้ามาสู่ปริมาตรควบคุม



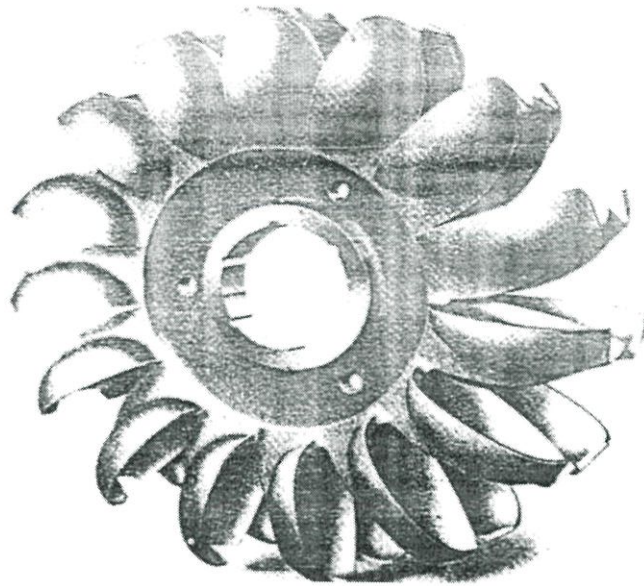
รูปที่ 2.12 การไหลต่อผ่านปริมาตรควบคุมที่สมมาตรรอบวงกลม

2.5.5 กังหันแบบแรงกระทบ (Impulse Turbine)

เป็นเครื่องกังหันน้ำที่มีลักษณะเป็นวงล้อขนาดใหญ่มีใบพัดเป็นรูปถ้วย (Bucket) ติดอยู่ที่ขอบนอกของวงล้อดังแสดงในรูปที่ 2.14 ใบพัดรูปถ้วยเหล่านี้ อาจจะมีผลผลิตโดยการห่อสำเร็จแล้วมาขันน็อตติดกับวงล้อภายหลังหรืออาจจะหล่อเป็นชิ้นเดียวกันกับวงล้อเลยก็ได้ เมื่อมีลำของน้ำ (Jet) พ่นมาจากหัวฉีด (Nozzle) กระแทกใบพัดรูปถ้วยตรงกลาง ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งมีสันแบ่งลำน้ำออกเป็น 2 ส่วน ไปทางด้านซ้ายและขวาของใบพัด พลังงานศักย์ของน้ำจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานจลน์ และจากพลังงานจลน์ของน้ำจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานเชิงกล ทำให้ใบพัดเคลื่อนที่และหมุนวงเพลาลงล้อต่อไป กังหันแบบนี้เหมาะที่จะใช้กันปัจจุบันคือ แบบวงล้อเพลตัน (Pelton wheel) กังหันชนิดนี้เหมาะสำหรับที่มีเฮดสูงๆ



รูปที่ 2.13 ลักษณะของใบพัดรูปถ้วย



รูปที่ 2.14 ตัวล้อของกังหัน

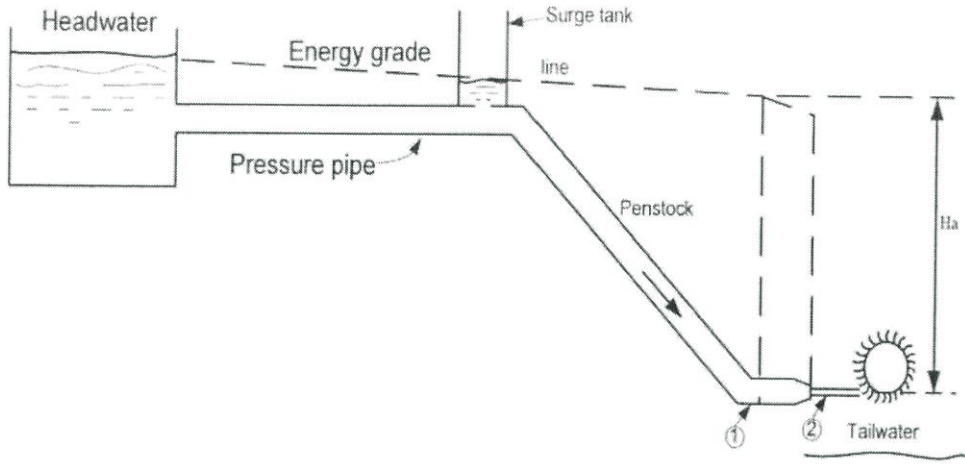
กังหันแบบแรงกระทบเป็นเครื่องจักรกลที่ได้รับพลังงานมาจาก ของไหลที่พุ่งออกจากหัวฉีดภายใต้ความดันบรรยากาศ ลำของไหลซึ่งมีความเร็วสูงพุ่งเข้ากระทบบใบจักรทำให้ใบจักรหมุน น้ำที่กักไว้จะถูกส่งมาตามท่อตามกระบวนการดังรูปที่ 2.15 การสูญเสียเฮดระหว่างถังเก็บน้ำถึงหัวฉีด สามารถคำนวณได้จากข้อมูลความเสียดทานของท่อและสมการการคำนวณหาการสูญเสียเฮดการไหลในท่อโดยใช้สมการของเบอร์นูลีจะพบว่าเฮดรวมที่หัวฉีดคือ

$$H = \frac{p_1}{\gamma} - \frac{v_1^2}{2g} \quad (2.16)$$

$$V_2 = C_v \cdot 2gH_a = C_v \quad (2.17)$$

การสูญเสียเฮดที่หัวฉีดคือ

$$\begin{aligned} H_a - \frac{V_2^2}{2g} &= H_a - C_v^2 \cdot H_a \\ &= H_a(1 - C_v^2) \end{aligned} \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.15 ระบบการทำงานของกังหันแบบแรงกระทบ

ประสิทธิภาพหัวฉีดคือ

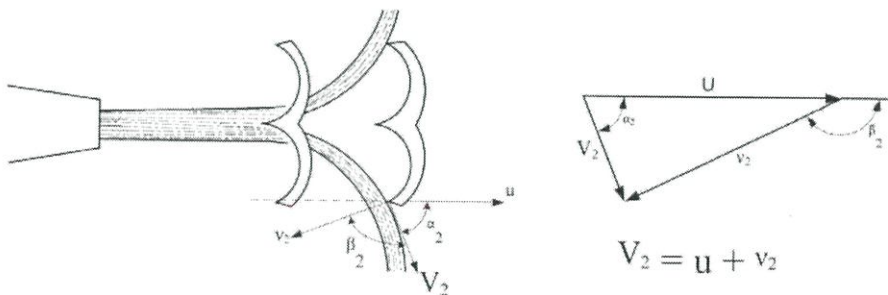
$$\frac{V_1^2/2g}{H_a} = C_v^2 \cdot \frac{H_a}{H_a} = C_v^2 \tag{2.19}$$

ลำน้ำซึ่งมีความเร็ว v พุ่งกระทบใบจักรซึ่งเป็นรูปถ้วยซึ่งมีสันตรงกลาง (Double-cupped buckets) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ทำให้การไหลแยกเป็น 2 ส่วนเท่าๆกัน และความเร็วสัมผัสปลายเบนออกไปเป็นมุม β ดังแสดงในรูป 2.16 เมื่อพิจารณารูปที่ 2.16 ตรงแนวแกน x ที่กระทำต่อใบพัดคือ

$$F = \rho Q \cdot (V_r - V_r \cos\beta_2) \tag{2.20}$$

จะได้กำลังงานที่กระทำต่อใบพัดเท่ากับ

$$P = F \cdot u = \rho Q \cdot u V_r (1 - \cos\beta_2) \tag{2.21}$$



รูปที่ 2.16 แสดงทิศทางการไหลของน้ำกระทบกับใบพัด

การที่ต้องการกำลังสูงสุดตามทฤษฎีนั้น จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไข 2 ประการคือ มุม $\beta = 180^\circ$ และ uV_r มีค่าสูงสุด กล่าวคือ ค่าของ $u(V_2 - u)$ จะต้องมามีค่าสูงสุด ซึ่งสามารถหาค่าได้โดยการหาอนุพันธ์ เทียบกับ u แล้วให้หาค่า = 0 จะได้

$$(V_2 - u) + u(-1) = 0$$

นั่นคือ

$$u = V_2/2$$

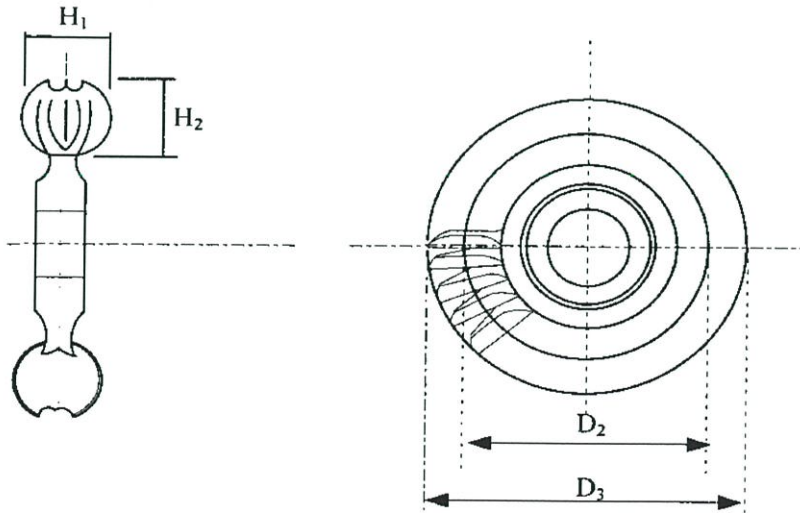
แทนค่า u ลงในสมการที่โมเมนตัม จะได้

$$F \cdot u = \gamma \cdot Q \cdot \frac{V_2^2}{2g} \quad (2.22)$$

เมื่อ

$$F = 2M_s(V - U) \quad (2.23)$$

ซึ่งพลังงานทั้งหมดของลำน้ำในทางทฤษฎีเมื่อจัดวางใบพัดวงล้อดังรูปที่ 2.17 และเมื่อพิจารณาแผนภาพของความเร็วแล้ว จะพบว่าความเร็วจริงของน้ำที่ออกจากใบพัดจะต้องมีค่าเป็น 0 จึงทำให้ได้กำลังงานสูงสุด



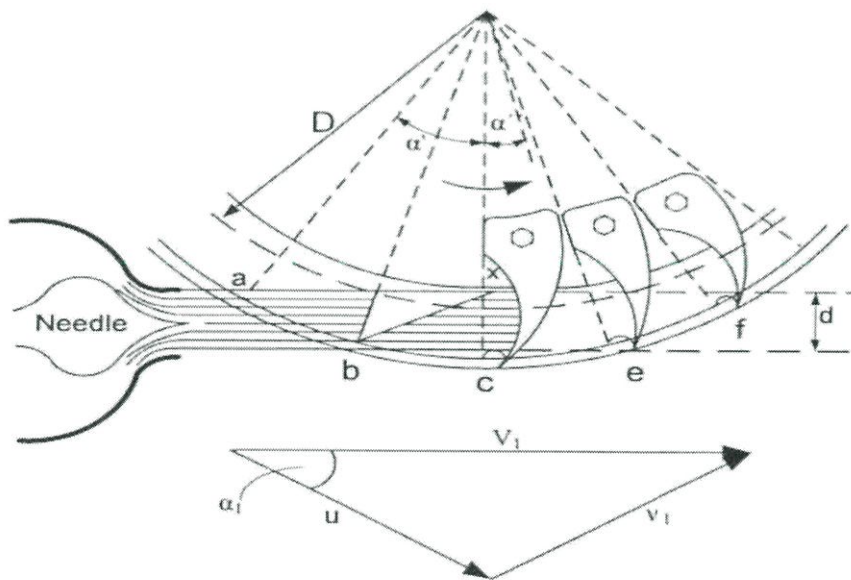
รูปที่ 2.17 การวางใบกังหันของล้อกังหันแบบเพลตัน

ในทางปฏิบัติ เมื่อจัดวางใบรอบวงล้อ และเมื่อน้ำพุ่งเข้ากระทบใบจักรแล้วมีความเร็วเหลืออยู่เพื่อที่จะไหลออกได้โดยไม่ปะทะกับใบจักรอีกใบหนึ่งที่ตามมา ตัวอย่างที่ดีของกังหันชนิดนี้คือ แบบวงล้อเพลตัน โดยลำน้ำจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆกันหลังจากกระทบใบจักรแล้ว จะไหลออกไปทางด้านข้างในแนวระดับทั้งด้านซ้ายและด้านขวา ทั้งนี้เพื่อป้องกันแรงเนื่องจากการไม่สมดุลกระทำต่อเพลลา ในขั้นตอนนี้จะมีการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้น เนื่องจากการแยกส่วนลำของน้ำ และเนื่องจากความเสียดทานของลำน้ำกับผิวของใบจักร ซึ่งทำให้ความเร็ว u น้อยกว่า $V_2/2$ และส่วนมากจะใช้อัตราส่วนความเร็วของลำน้ำกับความเร็วใบกังหันหรือเรียกว่า ดัชนีความเร็ว (Speed factor ; ϕ) ในการหาค่าความเร็วที่เหมาะสม โดยที่

$$\phi = \frac{u}{\sqrt{2gH_a}} \tag{2.24}$$

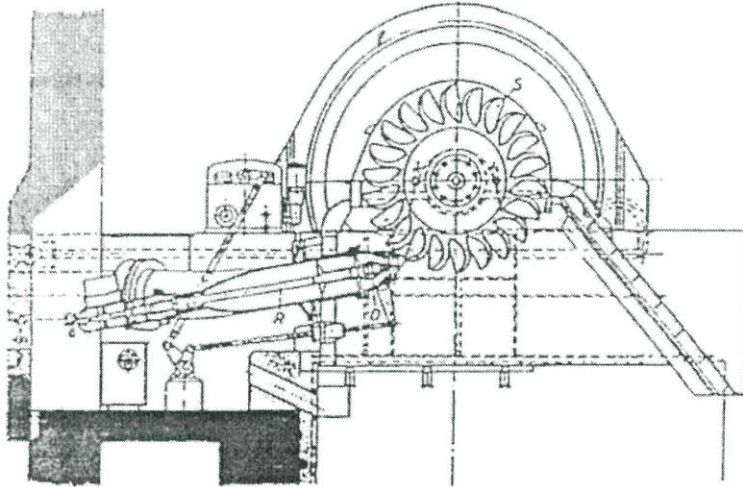
สำหรับกังหันที่ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ค่าดัชนีความเร็วจะขึ้นอยู่กับ ความเร็วจำเพาะ โดยมีมุมใบจักรรูปถ้วยประมาณ $173^\circ - 176^\circ$ ถ้าให้ d เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด และ D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของวงล้อถึงจุดกึ่งกลางของใบพัดดังแสดงในรูปที่ 2.18 ในทางปฏิบัติพบว่า เพื่อให้จะให้กังหันมีประสิทธิภาพสูงสุด อัตราส่วนของ D/d จะต้องมีค่าประมาณดังนี้

$$\frac{D}{d} = \frac{2Z}{\pi} \quad ; (m, kW, rpm) \tag{2.25}$$

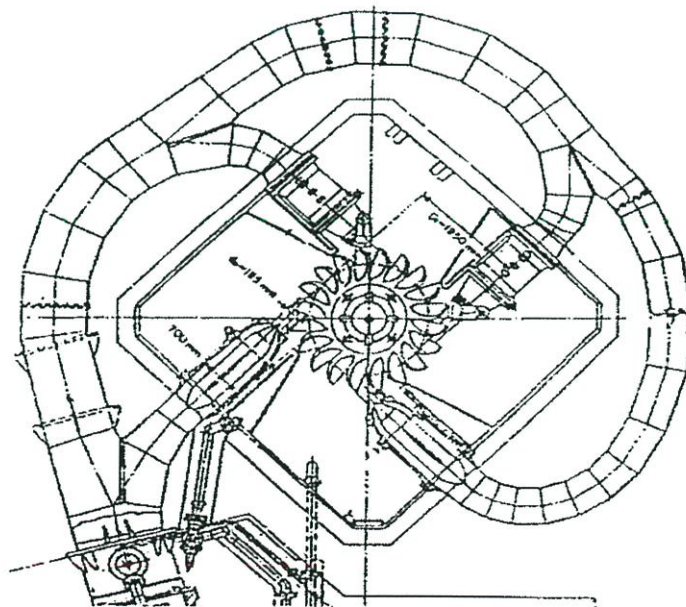


รูปที่ 2.18 ลักษณะการทำงานของ Nozzle และวงล้อกังหัน

โดยทั่วไป กังหันแบบแรงกระทบส่วนมาก จะใช้หัวฉีดเดี่ยวพ่นน้ำออกมาในแนวระดับ เข้าไปกระทบใบจักรที่อยู่ด้านล่างของวงล้อ ดังรูปที่ 2.18 และ 2.19 ความเร็วของวงล้อจะถูกควบคุมให้มีความสม่ำเสมอเพื่อใช้ในการปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การควบคุมความเร็วดังกล่าว ทำได้โดยการควบคุมอัตราการไหลผ่านหัวฉีดเป็นตัวควบคุมการปรับพื้นที่หน้าตัดของหัวฉีด ดังนั้นความเร็ว V_2 จะมีค่าเกือบคงที่



รูปที่ 2.19 ล้อกังหันเพลตันชนิดมีหัวฉีดเดี่ยว



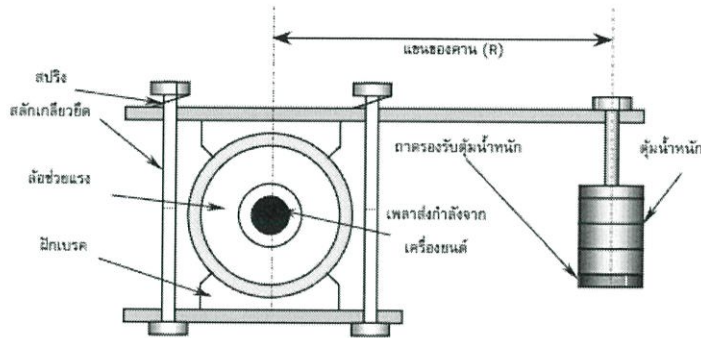
รูปที่ 2.20 ระบบล้อกังหันเพลตันชนิด 4 หัวฉีด ใช้กับเพลลาตั้ง

2.6 การวัดแรงม้าเบรค (Brake Horsepower)

การวัดแรงม้าเบรคมีความสำคัญและเป็นการวัดที่ไม่ยุ่งยาก การวัดส่วนใหญ่จะกระทำในห้องปฏิบัติการ และการวัดแรงม้าเบรคสามารถกระทำได้หลายวิธีเช่น โดยใช้ โพรนิเบรคหรือใช้สายพานหรือเชือก ไฮดรอลิกไดนาโมมิเตอร์ และไดนาโมมิเตอร์แบบไฟฟ้า เป็นต้น

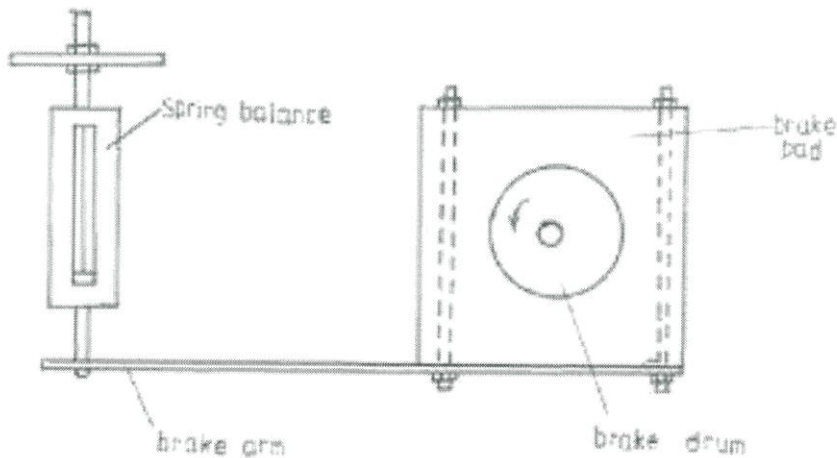
2.6.1 โพรนิเบรค (Prony brake)

โพรนิเบรคเป็นเครื่องมือวัดแรงม้าอย่างง่าย ที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งเป็นเครื่องมืออันแรกที่ถูกค้นพบ

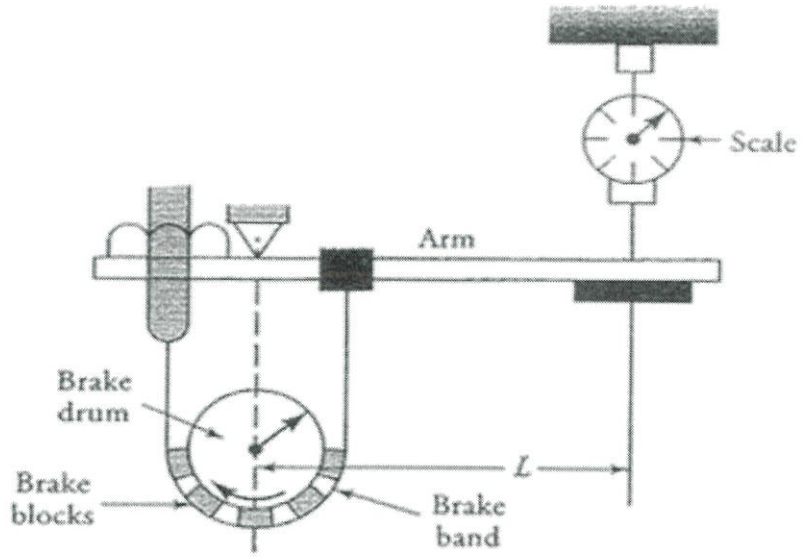


รูปที่ 2.21 อุปกรณ์วัดทอร์ก (Prony brake)

โพรนิเบรคเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ถูกคิดค้นในปี ค.ศ. 1821 โดย Gaspard de Prony วิศวกรชาวฝรั่งเศส เพื่อมาคำนวณหา ทอร์กที่เกิดจากเครื่องยนต์ ลักษณะของโพรนิเบรคจะประกอบด้วยก้ามปูซึ่งมีผ้าเบรคติดตั้งอยู่ ปกติก้ามปูจะติดตั้งประกบกับเพลาส่งกำลังจากเครื่องยนตซึ่งสามารถปรับระยะให้ห่างหรือชิดตามความต้องการได้จากก้ามปูจะมีแขนหรือคานต่อออกไป และที่ปลายคานจะสปริงรองรับน้ำหนัก ปริมาณน้ำหนักที่เพิ่มได้สูงสุดจะนำมาใช้การคำนวณเพื่อหาทอร์ก จากสูตร $T=FR$



รูปที่ 2.22 อุปกรณ์วัดทอร์ก (Prony brake)



รูปที่ 2.23 อุปกรณ์วัดทอร์ก (Prony brake)

จากสมการทอร์ก

$$T = F \cdot R \quad (2.26)$$

โดย T = แรงบิด (กิโลกรัม-เมตร)

F = น้ำหนักที่วัดได้จากสปริง (กิโลกรัม)

R = แขนของแรงหรือความยาวคาน (เมตร)

บทที่ 3

การออกแบบ คำนวณ และอุปกรณ์

การออกแบบและการคำนวณ

3.1 การออกแบบการจัดวางแนวแกนของล้อกังหัน

- การจัดวางแนวแกนแบบแกนนอน ล้อกังหันเดี่ยว 1 ชุด

3.2 การออกแบบโครงสร้าง

- หลักการออกแบบ

1. ทำงานสะดวก
2. แข็งแรงมั่นคง
3. แยกส่วนนำมาปรับแก้ไขได้ง่าย
4. เคลื่อนย้ายได้

- วัสดุที่ใช้

1. แผ่นฐานบน ทำจากไม้อัด ขนาด 800x800x5 mm.
2. ฐานเครื่อง วัสดุทำจากเหล็กฉากและเหล็กแป๊บขนาด 800x800x800 mm.

3.3 การออกแบบใบพัดกังหัน

- หลักการและเหตุผลในการออกแบบ

ใบกังหันน้ำเพลตันนี้มีลักษณะเป็นรูปถ้วย ซึ่งมีสันตรงกลางไว้แบ่งใบกังหันออกเป็น 2 ห้อง ซึ่งจะทำให้พื้นที่แบ่งลำน้ำออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆกัน ส่งผลให้เกิดแรงดันและทิศทางการน้ำออกได้ดีไม่มีวกกลับมาหาใบกังหันใบถัดไปซึ่งมีเหตุผลในการออกแบบดังนี้

1. น้ำหนัก
2. ทนทาน
3. ปรับแต่งได้
4. แข็งแรง

ตารางวิธีการเลือกขนาดของใบพัด

Jet diameter (d)	Bucket width (b)
3 to 6 mm.	19 mm.
6 to 10 mm.	30 mm.
10 to 15 mm.	45 mm.
15 to 20 mm.	60 mm.
20 to 25 mm.	75 mm.
25 to 30 mm.	90 mm.

การเลือกจำนวน ใบพัดก็ใบถึงเหมาะสมกับขนาด Nozzle และขนาดวงล้อ สามารถหาได้จาก สมการที่ (2.24)

$$z = D\pi/2d$$

โดยที่ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางวงล้อ
d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางลำน้ำ

Dimension

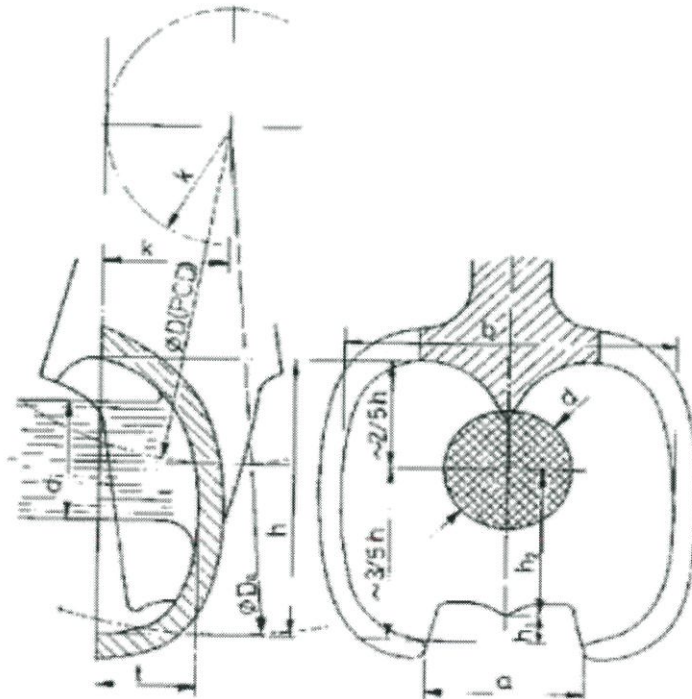


Illustration 14: Cross sections of Pelton buckets

$b = (2.5-3.2)d$	$b =$ ความกว้างใบพัด
$h = (2.1-2.7)d$	$h =$ ความสูงใบพัด
$a = 1.2d$	$a =$ ความกว้างช่อง
$t = 0.9d$	$t =$ ความลึก
$D_a = D+1.2h$	$D_a =$ เส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก
$k = (0.1-0.17)D$	$k =$ ระยะเลื่อน



รูปที่ 3.1 ใบพัดของกังหัน

3.4 การออกแบบล้อกังหัน

ตัวล้อของกังหันน้ำจะมีรูที่ใช้สำหรับใส่น็อตเพื่อทำการล็อคตัวล้อของกังหันน้ำกับใบพัดโดยจะมีเหตุผลการออกแบบดังนี้

- หลักการออกแบบ

 1. ทนทานต่อการสึกกร่อน
 2. มีความแข็งแรง
 3. น้ำหนักพอที่จะถ่วงล้อ
 4. ขึ้นรูปง่าย

หลักการเลือกใช้วัสดุ คือ ทำการชุบโครเมียมเพื่อกันสนิม



รูปที่ 3.2 ล้อกังหัน

3.5 ขนาดและชนิดของท่อ

ข้อมูลการตัดสินใจ

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว
- ทนแรงดันได้
- ทนต่อความร้อน
- ไม่ขึ้นสนิม
- ราคาถูก

จากข้อมูล ทำการเลือกใช้ท่อ พี.วี.ซี มีคุณสมบัติดังนี้

- ความหนาแน่น 1.38 kg/cm^2
- ทนแรงดันได้ไม่เกิน 3 km/cm^2
- อุณหภูมิไม่เกิน 70 c°

3.6 การเลือกใช้วาล์ว

ข้อมูลการตัดสินใจ

- ปรับอัตราการไหลได้

- ความเสียหายไม่สูง
- ไม่เป็นสนิม



รูปที่ 3.3 โกลบวาล์ว

3.7 การออกแบบปั๊ม

ข้อมูลการตัดสินใจ

- เหมาะสมกับงาน
- ราคาไม่แพง
- หาซื้อได้ง่าย

การคำนวณหาขนาดปั๊ม

ระบบใช้ท่อ พี.วี.ซี 13.5 ขนาด 1 นิ้ว $D = 36 \pm 0.15$ mm. หนา 3.0 ± 0.15 mm.

: เส้นผ่านศูนย์กลางภายในคือ 30 mm.

$$A = \pi r^2 = \pi \times \frac{0.03^2}{4} = 0.000707 m^2$$

$$Q = 35 \frac{L}{min} = \frac{35 \times 10^{-3}}{60} = 0.000583 \frac{m^3}{s}$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.000583}{0.000707} = 0.8251$$

ข้อมูลค่า K สำหรับการไหลผ่านท่อต่างๆ

ข้องอ 90° ; $K = 1.5$

โกลบวาล์ว; $K = 10$

ความยาวของท่อตรงทั้งหมด = 0.6 m.

จากข้อมูล

น้ำที่อุณหภูมิ 27 °C

$$\rho = 996.6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\mu = 5.906 \times 10^{-3}$$

$$N_R = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{996.6 \times 0.5941 \times 0.03}{5.906 \times 10^{-3}} = 3007.52 \quad (\text{turbulent})$$

ค่า ϵ ของท่อ พี.วี.ซี. = 0.0015 mm.

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0.0015}{30} = 0.0005$$

ค่า f จากกราฟแฟคเตอร์ความเสียดทาน = 0.042

เฮดเนื่องจากความฝืดในท่อ พี.วี.ซี.

$$h = 0.042 \times \frac{0.6}{0.03} \times \frac{0.8521^2}{2 \times 9.81} = 0.02915$$

เฮดเนื่องจาก ข้องอ และวาล์ว

$$h = K \frac{V^2}{2g}$$

ข้องอขนาด 90° 2 ตัว

$$h = 2 \times 1.5 \times \frac{0.8251^2}{2 \times 9.81} = 0.104 \text{ m.}$$

โกลบวาล์ว 1 ตัว

$$h = 10 \times \frac{0.8251^2}{2 \times 9.81} = 0.347 \text{ m.}$$

เฮดรวมทั้งระบบ

$$h_T = 0.02915 + 0.104 + 0.347 = 0.48 \text{ m.}$$

Pump มีประสิทธิภาพ 70%

$$P_w = \frac{Q\rho gh_T}{\eta} = \frac{0.000583 \times 0.9966 \times 10^{-3} \times 9.81 \times 0.48}{0.7} = 3.9 \text{ W}$$

เลือกปั๊มขนาด 0.5 แรงม้า ขนาดท่อดูดและส่ง 1 นิ้ว อัตราการไหล 35 L/min สูบได้สูงสุด 9 เมตร



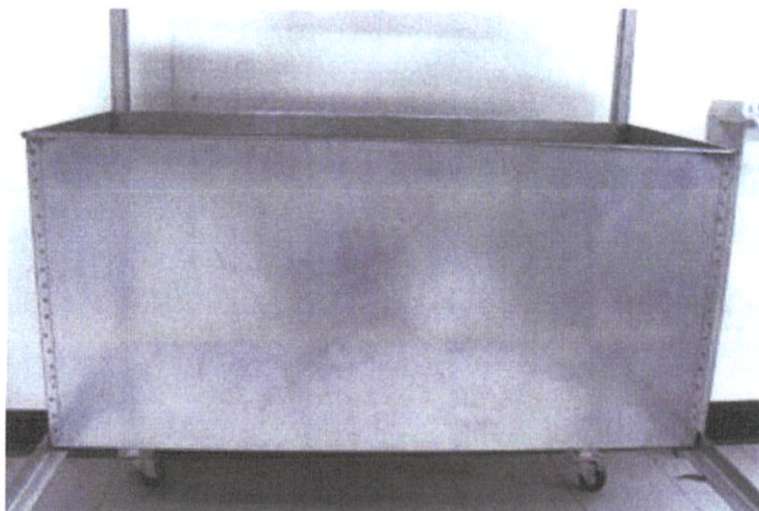
รูปที่ 3.4 ปั๊มน้ำรุ่น Model PS-130 Auto

3.8 ถึงบรรจุน้ำ

หลักการเลือก

- มีความทนทาน
- ไม่รั่วซึม
- ไม่เกิดสนิม

ซึ่งจากข้อมูลข้างต้นจะใช้ถังที่ทำจากสังกะสีที่มีความหนา 3 mm. เพื่อความแข็งแรง



รูปที่ 3.5 ถังบรรจุน้ำ

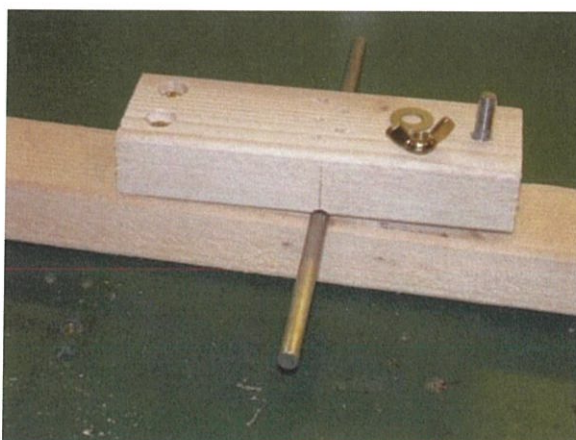
3.9 อุปกรณ์ในชุดวัดทอร์คอย่างง่าย

ข้อมูลในการตัดสินใจ

- แข็งแรงทนทาน
- สะดวกต่อการวัดค่า
- ง่ายต่อการเคลื่อนย้าย

อุปกรณ์ในการจัดทำ

1. ก้ามปูทำจากไม้
2. น็อตยึดก้ามปู
3. สปริงวัดน้ำหนัก
4. ตะขอยึด



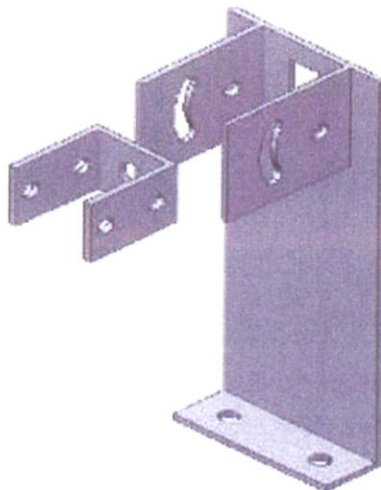
รูปที่ 3.6 เครื่องมือวัดทอร์ค

3.10 การออกแบบชุดฝาครอบ

- ป้องกันน้ำกระเด็นออกจากเครื่องทดสอบ
- ทำจากพลาสติกใส หนา 2 mm.
- น้ำหนักเบา และแข็งแรงทนทาน

3.11 การออกแบบฐานปรับมุมการฉีด

- ใช้สำหรับปรับมุมของการฉีดน้ำ
- หลักการและเหตุผลในการออกแบบ
- แข็งแรงทนทาน
 - สะดวกในการปรับระยะการฉีด



รูปที่ 3.7 ฐานปรับมุมการฉีด

3.12 ระบบท่อและหัวฉีด

หลักการและเหตุผลในการออกแบบ

1. หลีกเลี่ยงการลดขนาดท่อโดยทันที และลดจำนวนข้อต่อ หรือวาล์วที่ไม่จำเป็น
2. ส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างท่อส่งน้ำหลักกับท่อหัวฉีดต้องสามารถเคลื่อนย้ายปรับศูนย์ของหัวฉีดได้
3. หัวฉีดและท่อฉีดสามารถป้องกันการเกิดสนิมได้ ซึ่งเป็นส่วนที่สัมผัสน้ำมากที่สุด



ที่ 3.8 ท่อและหัวฉีด



รูปที่ 3.9 หัวฉีด

3.13 ชุดวัดความเร็วรอบ

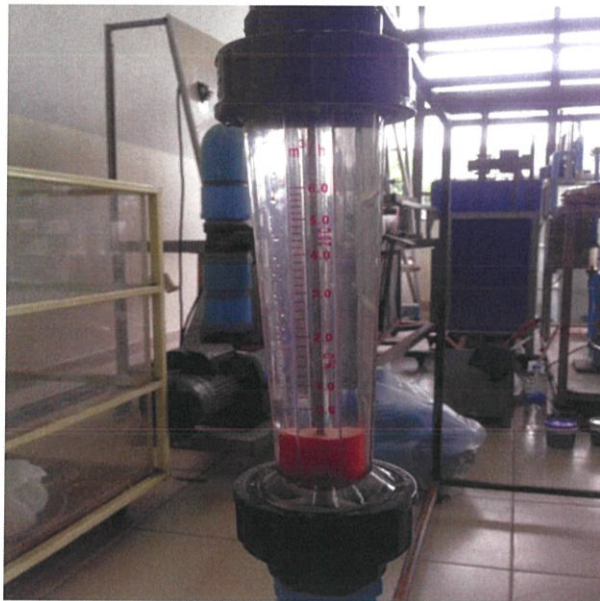
วัดรอบโดยใช้มิเตอร์วัดรอบหรือ Photo Tachometer MDT-2244B



รูปที่ 3.10 มิเตอร์วัดรอบ Photo Tachometer MDT-2244B

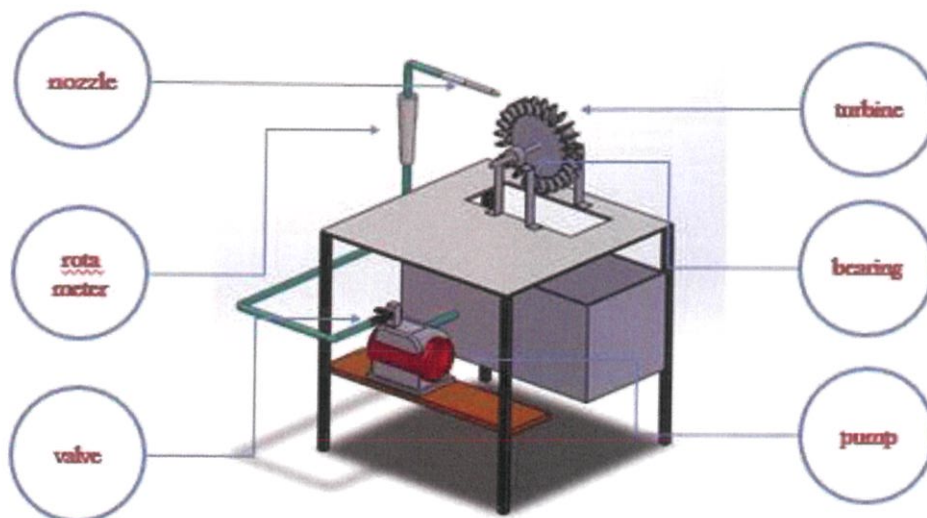
3.14 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล

ทำการวัดอัตราการไหลของน้ำที่ไหลออกจากปั๊มโดยใช้โรตاميเตอร์ (Rotameter)

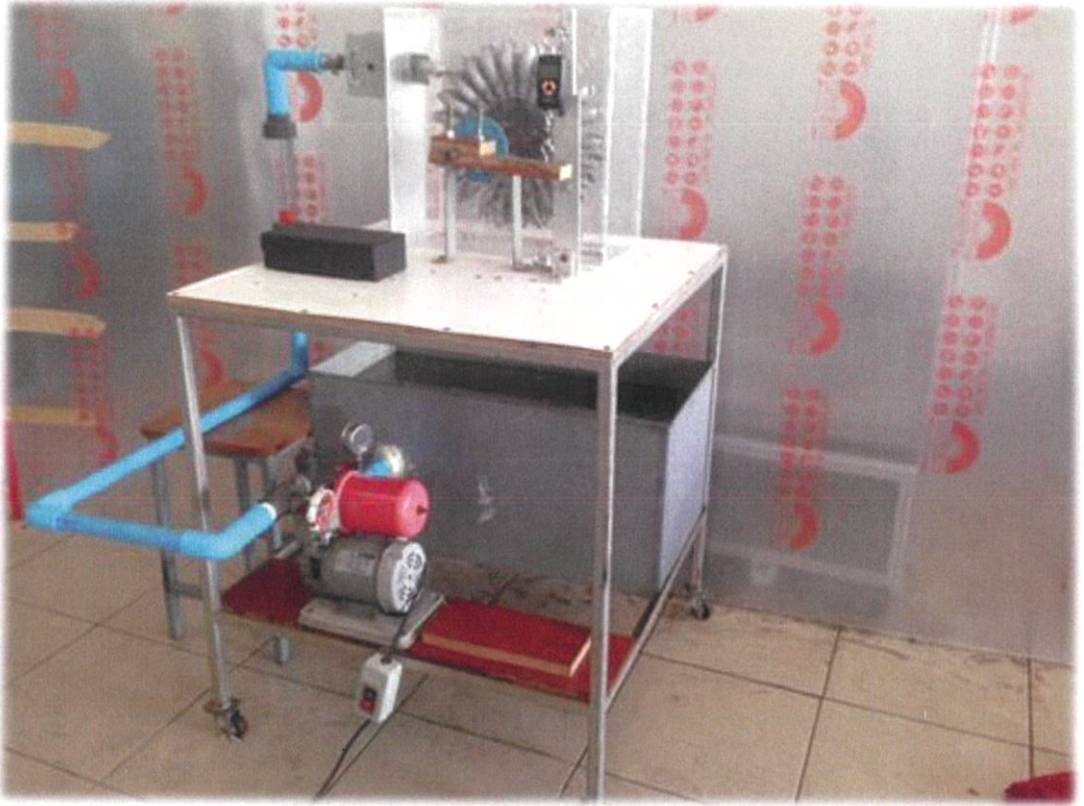


รูปที่ 3.11 โรตاميเตอร์

3.15 ส่วนประกอบชุดทดลอง



รูปที่ 3.12 รูปแบบชุดทดลอง



รูปที่ 3.13 ชุดทดลองจริง

บทที่ 4

ขั้นตอนและผลการทดลอง

4.1 หลักการและเหตุผลในการทดลอง

เนื่องจากการออกแบบและการสร้างแบบจำลองการทำงานของกังหันน้ำแบบล้อกังหันเพลตัน จำเป็นที่จะต้องมีการทดลอง ผลการทำงานของเครื่องเพื่อทดสอบประสิทธิภาพและสรุปผลต่างๆที่เกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงกำหนดตัวแปรที่จะศึกษาออกเป็น 3 ตัวแปร

4.1.1 จำนวนใบพัดของกังหัน

4.1.2 มุมองศาการยิงของหัวฉีด

4.1.3 รูปแบบของใบพัด

4.2 การอ่านอัตราการไหลของน้ำ

การหาอัตราการไหลของน้ำ จะมีอุปกรณ์ในการอ่านค่าหรือโรตاميเตอร์ (Rotameter) เพื่อสะดวกในการอ่านค่าและคำนวณ

4.3 การอ่านค่าความเร็วรอบ

ใช้อุปกรณ์ วัดค่าความเร็วรอบ Tachometer ในการวัดความเร็วรอบแต่ละค่าความเร็วโดยทำการบันทึกค่า 3 ค่า และหาค่าเฉลี่ย

4.4 วิธีการในการวัดทอร์ค

ใช้หลักการ Prony break โดยทำการล๊อคเพลลาเข้ากับที่วัดแรงบิด จากนั้นอ่านค่าน้ำหนักที่ได้จากเครื่องชั่ง โดยทำการบันทึกค่า 3 ค่า และหาค่าเฉลี่ย

4.5 วิธีการทดลอง

การทดลองโครงการนี้จะเน้นถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในแต่ละกรณี ซึ่งในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้จะยึดการเปลี่ยนค่าของ

1) ความเร็วรอบ (RPM)

2) จำนวนใบพัด

3) รูปแบบใบพัด

4) มุมของการยิง

การหาประสิทธิภาพคำนวณได้จาก

$$\eta_p = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}} \times 100 \quad (4.1)$$

$$P_{\text{input}} = \frac{1}{2} \rho Q v_j^2 \quad (4.2)$$

$$P_{\text{output}} = T \cdot \omega \quad (4.3)$$

จากสมการที่ (2.26)

$$T = F \cdot r = mg \times 0.165$$

และ

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (4.4)$$

สำหรับวิธีการทดลองมีดังนี้

4.5.1 ใช้ปั๊มขนาด 0.5 แรงม้า และมีจำนวนใบพัดของกังหันจำนวน 24 ใบ ฉีดน้ำผ่านหัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร โดยกำหนดอัตราการไหลที่เปิดวาล์วสุด

4.5.2 ตั้งองศาของหัวฉีดไว้ที่มุม 0 องศา จากนั้น รอให้ใบพัดหมุนด้วยความเร็วคงที่และทำการวัดทอร์ค โดย ล็อกเครื่องมือกับเพลลาขณะที่เพลลาหมุนคงที่ จากนั้นค่อยๆ บิดน็อตเพื่อให้เครื่องมือเริ่มลื้อคเพลลา และอ่านค่าน้ำหนักจากเครื่องชั่งพร้อมทั้งวัดความเร็วรอบที่ขณะนั้นโดยทำการวัด 3 ครั้งและหาค่าเฉลี่ย

4.5.3 ทำการทดลองเหมือนกับข้อ 4.4.1-4.4.2 แต่ทำการลดอัตราการไหลลง โดยการหรีวาล์ว เก็บค่าการทดลอง และบันทึกผล

4.5.4 ทำการเปลี่ยนมุมมององศาในการยิงของหัวฉีดทีละค่า โดยเปลี่ยนจาก 0 องศา เป็น -5 และ 5 องศา จากนั้นทำการทดลองเหมือนกับข้อ 4.4.1-4.4.3

4.5.5 ลดจำนวนใบพัดลง จาก 24 ใบ เป็น 12 ใบ และทำการทดลองเหมือนกับข้อ 4.4.1-4.4.4

4.5.6 เปลี่ยนรูปแบบของใบพัดอีกรูปแบบหนึ่งและทำการทดลองเหมือนกับข้อ 4.4.1-4.4.5 โดยทำทุกกรณี บันทึกผลการทดลอง

4.5.7 นำค่าที่ได้จากการทดลองมาบันทึกลงในตารางที่ 1 และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับความเร็วรอบ

ตารางที่ 1 ตัวอย่างตารางการบันทึกค่าที่ทดลอง

ที่อัตราการไหล $1.6 \text{ m}^3/\text{h}$ ชนิดใบพัดรูปแบบใหม่ จำนวนใบพัด 24 ใบยิงที่มุม 0 องศา

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.055	0.083545	1.7504667	17.3	10.11830443
190	19.90476	0.06	0.09114	1.81412	17.3	10.48624277
180	18.85714	0.065	0.098735	1.86186	17.3	10.76219653
170	17.80952	0.075	0.113925	2.02895	17.3	11.72803468
160	16.7619	0.085	0.129115	2.1642133	17.3	12.50990366
150	15.71429	0.1	0.1519	2.387	17.3	13.79768786
140	14.66667	0.115	0.174685	2.5620467	17.3	14.8095183
130	13.61905	0.125	0.189875	2.5859167	17.3	14.94749518
120	12.57143	0.14	0.21266	2.67344	17.3	15.4534104
110	11.52381	0.15	0.22785	2.6257	17.3	15.17745665
100	10.47619	0.165	0.250635	2.6257	17.3	15.17745665
90	9.428571	0.17	0.25823	2.43474	17.3	14.07364162
80	8.380952	0.175	0.265825	2.2278667	17.3	12.877842
70	7.333333	0.18	0.27342	2.00508	17.3	11.5900578
60	6.285714	0.19	0.28861	1.81412	17.3	10.48624277

ตัวอย่างการคำนวณเพื่อหาประสิทธิภาพกังหัน

กรณีปรับอัตราการไหลไปที่ 0.9 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง หรือเท่ากับ 0.00025 ลูกบาศก์เมตร/วินาที จากการทดลองพบว่าได้ความเร็วรอบ 3 ค่า นำมาหาค่าเฉลี่ยจะได้เท่ากับ 171.17 รอบ/นาที และอ่านค่าน้ำหนักที่ได้จากเครื่องชั่ง จากนั้นเราจะได้ค่า P_{output}

จะได้

$$\omega = \frac{2\pi N(200)}{60} = 20.952 \text{ รอบ/วินาที}$$

และ

$$\begin{aligned} T &= F \cdot r = (0.055)(9.81)0.155 \\ &= 0.0836 \text{ N.m} \end{aligned}$$

$$P_{\text{output}} = T \cdot \omega = 0.0836(20.952) = 1.750 \text{ W}$$

$$P_{\text{input}} = \frac{1}{2} \rho Q v_j^2$$

$$= \frac{1}{2} (996.95) \left(\frac{0.000444^3}{(\pi(0.004)^2)^2} \right) = 17.3 \text{ W}$$

จาก

$$\eta_p = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}} \times 100$$

$$\eta_p = \frac{1.750}{17.3} \times 100 = 10.11 \% ***$$

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองการหาประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์ ที่อัตราการไหลต่างๆโดยเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างตัวแปรต่างๆคือ จำนวนใบพัด องศาการยิง และรูปแบบของใบพัดได้ข้อสรุปดังนี้

5.1.1 ที่อัตราการไหล $1.4 \text{ m}^3/\text{h}$

จำนวนใบพัด

จำนวนใบพัด 12 ใบ มีประสิทธิภาพสูงกว่า 24 ใบ ที่มุมองศาการยิงเดียวกัน

องศาการยิง

องศาการยิงที่ 5 องศา มีประสิทธิภาพสูงกว่าทุกมุมการยิง

รูปแบบ

ใบพัดรูปแบบเก่า มีประสิทธิภาพสูงกว่าที่มุมองศาการยิงเดียวกัน

5.1.2 ที่อัตราการไหล $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$

จำนวนใบพัด

จำนวนใบพัด 12 ใบ มีแนวโน้มประสิทธิภาพสูงกว่า 24 ใบ ที่มุมองศาการยิงเดียวกัน

องศาการยิง

องศาการยิงที่ 5 องศา มีประสิทธิภาพสูงกว่าทุกมุมการยิง

รูปแบบ

ใบพัดรูปแบบเก่า มีประสิทธิภาพสูงกว่าที่มุมองศาการยิงเดียวกัน

5.1.3 ที่อัตราการไหล $1.6 \text{ m}^3/\text{h}$

จำนวนใบพัด

จำนวนใบพัด 12 ใบ มีแนวโน้มประสิทธิภาพสูงกว่า 24 ใบ ที่มุมองศาการยิงเดียวกัน

องศาการยิง

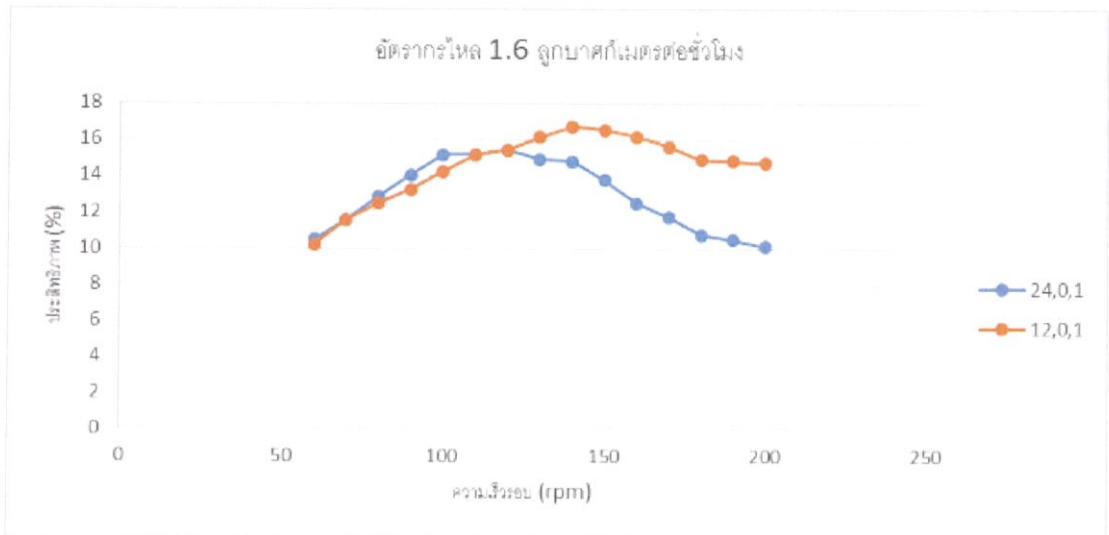
องศาการยิงที่ 5 องศา มีประสิทธิภาพสูงกว่าทุกมุมการยิง

รูปแบบ

ใบพัดรูปแบบเก่า มีประสิทธิภาพสูงกว่าที่มุมองศาการยิงเดียวกัน

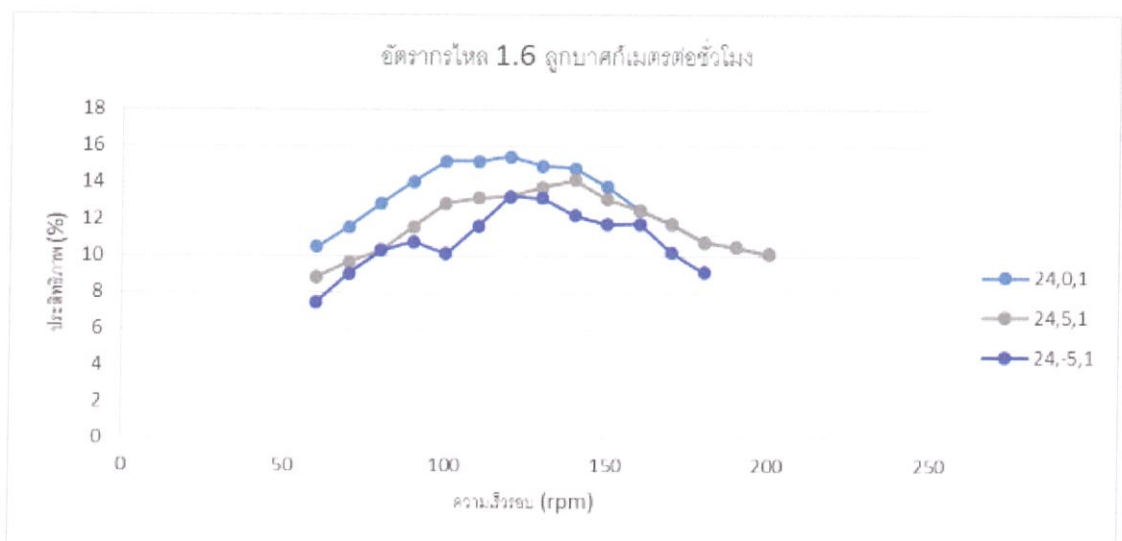
ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเร็วรอบ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่เงื่อนไขต่างๆ

ตัวแปร : จำนวนใบพัด (อัตราการไหล 1.6 m³/h.)



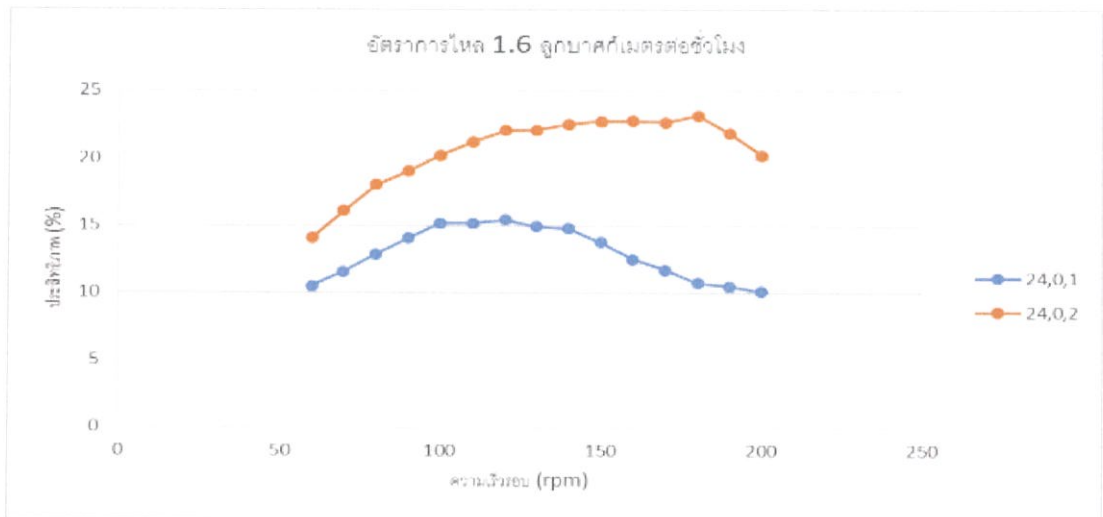
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเร็วรอบของใบพัดรูปแบบใหม่ที่มีมุมยั้ง 0 องศาของ 12 และ 24 ใบ

ตัวแปร : องศาการยั้ง



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเร็วรอบของใบพัดรูปแบบใหม่ที่มีจำนวนใบพัด 24 ใบ ขององศาการยั้ง 0, 5 และ -5 องศา

ตัวแปร : รูปแบบใบพัด



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเร็วรอบของใบพัดรูปแบบใหม่และรูปแบบเดิมจำนวนใบพัด 24 ใบ ที่มีมุมยี่ง 0 องศา

5.2 วิจัยณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าต่างๆเช่น ค่าน้ำหนักจากอุปกรณ์วัด และค่าความเร็วรอบ โดยค่าที่วัดจะต้องนำมาหาค่าเฉลี่ย และเมื่อนำมาคำนวณ ค่าจะเกิดการคลาดเคลื่อน ไม่คงที่ จึงได้ค่าที่ไม่แม่นยำมากพอ จึงควรหาอุปกรณ์ในการวัดทอร์คที่ได้ค่าแม่นยำมากกว่านี้ ถึงจะมีความถูกต้องมากขึ้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ในการติดตั้งโรตารีมอเตอร์ควรจะมีคความยาวของท่ออย่างน้อย 1 เมตร ทั้งขาเข้าและขาออก จากโรตารีมอเตอร์จะทำให้การอ่านค่าได้แม่นยำขึ้น
2. การวัดทอร์ค เกิดความคลาดเคลื่อน เนื่องจาก ลำน้ำสงแรงให้ใบพัดไม่คงที่ จึงต้องวัดค่าและเฉลี่ยน้ำหนักหลายๆครั้ง
3. ชุดทดลองนี้ เมื่อวัดในอัตราการใช้สูง เครื่องเกิดการสั่น ทำให้วัดค่าได้คลาดเคลื่อน จึงควรติดตั้งชุดทดลองให้มั่นคงแข็งแรงที่สุด

บรรณานุกรม

รายงาน

ชาญชัย จำรูญถาวร, ชาตรี เวียงพลระออม, อรรถกร จิ่งสงวนสิทธิ์ (2550), การทดลองหาประสิทธิภาพการทำงานของอิมพัลส์เทอร์ไบน์

หนังสือ

Fluid Mechanics with Engineering Application, Robert L.Daugherty, Joseph B.Franzini, E.john

Engineering Fluid Mechanics, Clayton T.Crown, Donald F.Elger, John A.Roberson.

เว็บไซต์

The Humanity Development Library 2.0แหล่งที่มา <http://www.nzdl.org/> ไปที่ Humanity Development ค้นหา คีย์เวิร์ด Micro Pelton Turbine วันที่เข้าดู 15/10/57

ภาคผนวก ก.

ภาคผนวก ก1 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 24 ใบ มุม 0 องศา รูปแบบที่ 1

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.04	0.06076	1.273067	11.6	10.9747126
190	19.90476	0.05	0.07595	1.511767	11.6	13.0324713
180	18.85714	0.055	0.083545	1.57542	11.6	13.5812069
170	17.80952	0.06	0.09114	1.62316	11.6	13.9927586
160	16.7619	0.07	0.10633	1.782293	11.6	15.3645977
150	15.71429	0.08	0.12152	1.9096	11.6	16.462069
140	14.66667	0.09	0.13671	2.00508	11.6	17.2851724
130	13.61905	0.1	0.1519	2.068733	11.6	17.833908
120	12.57143	0.11	0.16709	2.10056	11.6	18.1082759
110	11.52381	0.115	0.174685	2.013037	11.6	17.3537644
100	10.47619	0.12	0.18228	1.9096	11.6	16.462069
90	9.428571	0.135	0.205065	1.93347	11.6	16.6678448
80	8.380952	0.15	0.22785	1.9096	11.6	16.462069
70	7.333333	0.15	0.22785	1.6709	11.6	14.4043103
60	6.285714	0.15	0.22785	1.4322	11.6	12.3465517

ภาคผนวก ก2 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 24 ใบ มุม 0 องศา รูปแบบที่ 1

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.045	0.068355	1.4322	14.26	10.0434783
190	19.90476	0.05	0.07595	1.511767	14.26	10.6014493
180	18.85714	0.055	0.083545	1.57542	14.26	11.0478261
170	17.80952	0.06	0.09114	1.62316	14.26	11.3826087
160	16.7619	0.07	0.10633	1.782293	14.26	12.4985507
150	15.71429	0.08	0.12152	1.9096	14.26	13.3913043
140	14.66667	0.09	0.13671	2.00508	14.26	14.0608696
130	13.61905	0.1	0.1519	2.068733	14.26	14.5072464
120	12.57143	0.105	0.159495	2.00508	14.26	14.0608696
110	11.52381	0.11	0.16709	1.925513	14.26	13.5028986
100	10.47619	0.12	0.18228	1.9096	14.26	13.3913043
90	9.428571	0.13	0.19747	1.86186	14.26	13.0565217
80	8.380952	0.135	0.205065	1.71864	14.26	12.0521739
70	7.333333	0.15	0.22785	1.6709	14.26	11.7173913
60	6.285714	0.16	0.24304	1.52768	14.26	10.7130435

ภาคผนวก ก3 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 24 ใบ มุม 0 องศา รูปแบบที่ 1

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.055	0.083545	1.7504667	17.3	10.11830443
190	19.90476	0.06	0.09114	1.81412	17.3	10.48624277
180	18.85714	0.065	0.098735	1.86186	17.3	10.76219653
170	17.80952	0.075	0.113925	2.02895	17.3	11.72803468
160	16.7619	0.085	0.129115	2.1642133	17.3	12.50990366
150	15.71429	0.1	0.1519	2.387	17.3	13.79768786
140	14.66667	0.115	0.174685	2.5620467	17.3	14.8095183
130	13.61905	0.125	0.189875	2.5859167	17.3	14.94749518
120	12.57143	0.14	0.21266	2.67344	17.3	15.4534104
110	11.52381	0.15	0.22785	2.6257	17.3	15.17745665
100	10.47619	0.165	0.250635	2.6257	17.3	15.17745665
90	9.428571	0.17	0.25823	2.43474	17.3	14.07364162
80	8.380952	0.175	0.265825	2.2278667	17.3	12.877842
70	7.333333	0.18	0.27342	2.00508	17.3	11.5900578
60	6.285714	0.19	0.28861	1.81412	17.3	10.48624277

ภาคผนวก ก4 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 24 ใบ มุม 5 องศา รูปแบบที่ 1

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.04	0.06076	1.273067	11.6	10.9747126
190	19.90476	0.05	0.07595	1.511767	11.6	13.0324713
180	18.85714	0.07	0.10633	2.00508	11.6	17.2851724
170	17.80952	0.075	0.113925	2.02895	11.6	17.4909483
160	16.7619	0.08	0.12152	2.036907	11.6	17.5595402
150	15.71429	0.09	0.13671	2.1483	11.6	18.5198276
140	14.66667	0.1	0.1519	2.227867	11.6	19.2057471
130	13.61905	0.11	0.16709	2.275607	11.6	19.6172989
120	12.57143	0.12	0.18228	2.29152	11.6	19.7544828
110	11.52381	0.13	0.19747	2.275607	11.6	19.6172989
100	10.47619	0.135	0.205065	2.1483	11.6	18.5198276
90	9.428571	0.14	0.21266	2.00508	11.6	17.2851724
80	8.380952	0.145	0.220255	1.845947	11.6	15.9133333
70	7.333333	0.15	0.22785	1.6709	11.6	14.4043103
60	6.285714	0.16	0.24304	1.52768	11.6	13.1696552

ภาคผนวก ก5 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการไหล 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 24 ใบ มุม 5 องศา รูปแบบที่ 1

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.055	0.083545	1.750467	14.26	12.2753623
190	19.90476	0.06	0.09114	1.81412	14.26	12.7217391
180	18.85714	0.07	0.10633	2.00508	14.26	14.0608696
170	17.80952	0.08	0.12152	2.164213	14.26	15.1768116
160	16.7619	0.09	0.13671	2.29152	14.26	16.0695652
150	15.71429	0.1	0.1519	2.387	14.26	16.7391304
140	14.66667	0.11	0.16709	2.450653	14.26	17.1855072
130	13.61905	0.12	0.18228	2.48248	14.26	17.4086957
120	12.57143	0.125	0.189875	2.387	14.26	16.7391304
110	11.52381	0.13	0.19747	2.275607	14.26	15.957971
100	10.47619	0.135	0.205065	2.1483	14.26	15.0652174
90	9.428571	0.145	0.220255	2.07669	14.26	14.5630435
80	8.380952	0.155	0.235445	1.973253	14.26	13.8376812
70	7.333333	0.16	0.24304	1.782293	14.26	12.4985507
60	6.285714	0.165	0.250635	1.57542	14.26	11.0478261

ภาคผนวก ก6 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 24 ใบ มุม 5 องศา รูปแบบที่ 1

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.055	0.083545	1.7504667	17.3	10.11830443
190	19.90476	0.06	0.09114	1.81412	17.3	10.48624277
180	18.85714	0.065	0.098735	1.86186	17.3	10.76219653
170	17.80952	0.075	0.113925	2.02895	17.3	11.72803468
160	16.7619	0.085	0.129115	2.1642133	17.3	12.50990366
150	15.71429	0.095	0.144305	2.26765	17.3	13.10780347
140	14.66667	0.11	0.16709	2.4506533	17.3	14.1656262
130	13.61905	0.115	0.174685	2.3790433	17.3	13.75169557
120	12.57143	0.12	0.18228	2.29152	17.3	13.24578035
110	11.52381	0.13	0.19747	2.2756067	17.3	13.15379576
100	10.47619	0.14	0.21266	2.2278667	17.3	12.877842
90	9.428571	0.14	0.21266	2.00508	17.3	11.5900578
80	8.380952	0.14	0.21266	1.7822933	17.3	10.3022736
70	7.333333	0.15	0.22785	1.6709	17.3	9.658381503
60	6.285714	0.16	0.24304	1.52768	17.3	8.830520231

ภาคผนวก ก7 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 24 ใบ มุม -5 องศา รูปแบบที่ 1

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
180	18.85714	0.03	0.04557	0.85932	11.6	7.40793103
170	17.80952	0.05	0.07595	1.352633	11.6	11.6606322
160	16.7619	0.065	0.098735	1.654987	11.6	14.2671264
150	15.71429	0.075	0.113925	1.79025	11.6	15.4331897
140	14.66667	0.09	0.13671	2.00508	11.6	17.2851724
130	13.61905	0.1	0.1519	2.068733	11.6	17.833908
120	12.57143	0.105	0.159495	2.00508	11.6	17.2851724
110	11.52381	0.11	0.16709	1.925513	11.6	16.5992529
100	10.47619	0.115	0.174685	1.830033	11.6	15.7761494
90	9.428571	0.12	0.18228	1.71864	11.6	14.8158621
80	8.380952	0.125	0.189875	1.591333	11.6	13.7183908
70	7.333333	0.125	0.189875	1.392417	11.6	12.003592
60	6.285714	0.125	0.189875	1.1935	11.6	10.2887931

ภาคผนวก ก8 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราไหล 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 24 ใบ มุม -5 องศา รูปแบบที่ 1

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
180	18.85714	0.05	0.07595	1.4322	14.26	10.0434783
170	17.80952	0.055	0.083545	1.487897	14.26	10.434058
160	16.7619	0.065	0.098735	1.654987	14.26	11.6057971
150	15.71429	0.075	0.113925	1.79025	14.26	12.5543478
140	14.66667	0.085	0.129115	1.893687	14.26	13.2797101
130	13.61905	0.095	0.144305	1.965297	14.26	13.7818841
120	12.57143	0.105	0.159495	2.00508	14.26	14.0608696
110	11.52381	0.11	0.16709	1.925513	14.26	13.5028986
100	10.47619	0.095	0.144305	1.511767	14.26	10.6014493
90	9.428571	0.105	0.159495	1.50381	14.26	10.5456522
80	8.380952	0.115	0.174685	1.464027	14.26	10.2666667
70	7.333333	0.12	0.18228	1.33672	14.26	9.37391304
60	6.285714	0.125	0.189875	1.1935	14.26	8.36956522

ภาคผนวก ก9 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการไหล 1.6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 24 ใบ มุม -5 องศา รูปแบบที่ 1

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
180	18.85714	0.055	0.083545	1.57542	17.3	9.106473988
170	17.80952	0.065	0.098735	1.7584233	17.3	10.16429672
160	16.7619	0.08	0.12152	2.0369067	17.3	11.77402697
150	15.71429	0.085	0.129115	2.02895	17.3	11.72803468
140	14.66667	0.095	0.144305	2.1164733	17.3	12.2339499
130	13.61905	0.11	0.16709	2.2756067	17.3	13.15379576
120	12.57143	0.12	0.18228	2.29152	17.3	13.24578035
110	11.52381	0.115	0.174685	2.0130367	17.3	11.6360501
100	10.47619	0.11	0.16709	1.7504667	17.3	10.11830443
90	9.428571	0.13	0.19747	1.86186	17.3	10.76219653
80	8.380952	0.14	0.21266	1.7822933	17.3	10.3022736
70	7.333333	0.14	0.21266	1.5595067	17.3	9.014489403
60	6.285714	0.135	0.205065	1.28898	17.3	7.450751445

ภาคผนวก ก10 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการไหล 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 12 ใบ มุม 0 องศา รูปแบบที่ 1

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.025	0.037975	0.795667	11.6	6.8591954
190	19.90476	0.05	0.07595	1.511767	11.6	13.0324713
180	18.85714	0.07	0.10633	2.00508	11.6	17.2851724
170	17.80952	0.075	0.113925	2.02895	11.6	17.4909483
160	16.7619	0.08	0.12152	2.036907	11.6	17.5595402
150	15.71429	0.085	0.129115	2.02895	11.6	17.4909483
140	14.66667	0.095	0.144305	2.116473	11.6	18.2454598
130	13.61905	0.105	0.159495	2.17217	11.6	18.7256034
120	12.57143	0.11	0.16709	2.10056	11.6	18.1082759
110	11.52381	0.12	0.18228	2.10056	11.6	18.1082759
100	10.47619	0.13	0.19747	2.068733	11.6	17.833908
90	9.428571	0.13	0.19747	1.86186	11.6	16.0505172
80	8.380952	0.13	0.19747	1.654987	11.6	14.2671264
70	7.333333	0.135	0.205065	1.50381	11.6	12.9638793
60	6.285714	0.14	0.21266	1.33672	11.6	11.5234483

ภาคผนวก ก11 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการไหล 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 12 ใบ มุม 0 องศา รูปแบบที่ 1

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.06	0.09114	1.9096	14.26	13.3913043
190	19.90476	0.07	0.10633	2.116473	14.26	14.842029
180	18.85714	0.08	0.12152	2.29152	14.26	16.0695652
170	17.80952	0.09	0.13671	2.43474	14.26	17.073913
160	16.7619	0.1	0.1519	2.546133	14.26	17.8550725
150	15.71429	0.11	0.16709	2.6257	14.26	18.4130435
140	14.66667	0.115	0.174685	2.562047	14.26	17.9666667
130	13.61905	0.115	0.174685	2.379043	14.26	16.6833333
120	12.57143	0.12	0.18228	2.29152	14.26	16.0695652
110	11.52381	0.125	0.189875	2.188083	14.26	15.3442029
100	10.47619	0.13	0.19747	2.068733	14.26	14.5072464
90	9.428571	0.14	0.21266	2.00508	14.26	14.0608696
80	8.380952	0.15	0.22785	1.9096	14.26	13.3913043
70	7.333333	0.16	0.24304	1.782293	14.26	12.4985507
60	6.285714	0.175	0.265825	1.6709	14.26	11.7173913

ภาคผนวก ก12 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 12 ใบ มุม 0 องศา รูปแบบที่ 1

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.08	0.12152	2.5461333	17.3	14.71753372
190	19.90476	0.085	0.129115	2.5700033	17.3	14.8555106
180	18.85714	0.09	0.13671	2.57796	17.3	14.90150289
170	17.80952	0.1	0.1519	2.7052667	17.3	15.63737958
160	16.7619	0.11	0.16709	2.8007467	17.3	16.18928709
150	15.71429	0.12	0.18228	2.8644	17.3	16.55722543
140	14.66667	0.13	0.19747	2.8962267	17.3	16.74119461
130	13.61905	0.135	0.205065	2.79279	17.3	16.1432948
120	12.57143	0.14	0.21266	2.67344	17.3	15.4534104
110	11.52381	0.15	0.22785	2.6257	17.3	15.17745665
100	10.47619	0.155	0.235445	2.4665667	17.3	14.25761079
90	9.428571	0.16	0.24304	2.29152	17.3	13.24578035
80	8.380952	0.17	0.25823	2.1642133	17.3	12.50990366
70	7.333333	0.18	0.27342	2.00508	17.3	11.5900578
60	6.285714	0.185	0.281015	1.76638	17.3	10.21028902

ภาคผนวก ก13 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 12 ใบ มุม 5 องศา รูปแบบที่ 1

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.07	0.10633	2.227867	11.6	19.2057471
190	19.90476	0.08	0.12152	2.418827	11.6	20.851954
180	18.85714	0.09	0.13671	2.57796	11.6	22.2237931
170	17.80952	0.1	0.1519	2.705267	11.6	23.3212644
160	16.7619	0.11	0.16709	2.800747	11.6	24.1443678
150	15.71429	0.12	0.18228	2.8644	11.6	24.6931034
140	14.66667	0.135	0.205065	3.00762	11.6	25.9277586
130	13.61905	0.14	0.21266	2.896227	11.6	24.9674713
120	12.57143	0.15	0.22785	2.8644	11.6	24.6931034
110	11.52381	0.16	0.24304	2.800747	11.6	24.1443678
100	10.47619	0.17	0.25823	2.705267	11.6	23.3212644
90	9.428571	0.18	0.27342	2.57796	11.6	22.2237931
80	8.380952	0.185	0.281015	2.355173	11.6	20.3032184
70	7.333333	0.185	0.281015	2.060777	11.6	17.7653161
60	6.285714	0.19	0.28861	1.81412	11.6	15.6389655

ภาคผนวก ก14 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการไหล 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 12 ใบ มุม 5 องศา รูปแบบที่ 1

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.07	0.10633	2.227867	14.26	15.6231884
190	19.90476	0.085	0.129115	2.570003	14.26	18.0224638
180	18.85714	0.1	0.1519	2.8644	14.26	20.0869565
170	17.80952	0.11	0.16709	2.975793	14.26	20.8681159
160	16.7619	0.115	0.174685	2.928053	14.26	20.5333333
150	15.71429	0.12	0.18228	2.8644	14.26	20.0869565
140	14.66667	0.13	0.19747	2.896227	14.26	20.3101449
130	13.61905	0.145	0.220255	2.999663	14.26	21.0355072
120	12.57143	0.165	0.250635	3.15084	14.26	22.0956522
110	11.52381	0.17	0.25823	2.975793	14.26	20.8681159
100	10.47619	0.18	0.27342	2.8644	14.26	20.0869565
90	9.428571	0.18	0.27342	2.57796	14.26	18.0782609
80	8.380952	0.185	0.281015	2.355173	14.26	16.515942
70	7.333333	0.19	0.28861	2.116473	14.26	14.842029
60	6.285714	0.2	0.3038	1.9096	14.26	13.3913043

ภาคผนวก ก15 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 12 ใบ มุม 5 องศา รูปแบบที่ 1

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.08	0.12152	2.546133	17.3	14.71753
190	19.90476	0.1	0.1519	3.023533	17.3	17.47707
180	18.85714	0.125	0.189875	3.5805	17.3	20.69653
170	17.80952	0.135	0.205065	3.65211	17.3	21.11046
160	16.7619	0.15	0.22785	3.8192	17.3	22.0763
150	15.71429	0.16	0.24304	3.8192	17.3	22.0763
140	14.66667	0.175	0.265825	3.898767	17.3	22.53622
130	13.61905	0.19	0.28861	3.930593	17.3	22.72019
120	12.57143	0.21	0.31899	4.01016	17.3	23.18012
110	11.52381	0.22	0.33418	3.851027	17.3	22.26027
100	10.47619	0.24	0.36456	3.8192	17.3	22.0763
90	9.428571	0.25	0.37975	3.5805	17.3	20.69653
80	8.380952	0.255	0.387345	3.24632	17.3	18.76486
70	7.333333	0.27	0.41013	3.00762	17.3	17.38509
60	6.285714	0.28	0.42532	2.67344	17.3	15.45341

ภาคผนวก ก16 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 12 ใบ มุม -5 องศา รูปแบบที่ 1

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
180	18.85714	0.045	0.068355	1.28898	11.6	11.1118966
170	17.80952	0.055	0.083545	1.487897	11.6	12.8266954
160	16.7619	0.065	0.098735	1.654987	11.6	14.2671264
150	15.71429	0.075	0.113925	1.79025	11.6	15.4331897
140	14.66667	0.09	0.13671	2.00508	11.6	17.2851724
130	13.61905	0.1	0.1519	2.068733	11.6	17.833908
120	12.57143	0.115	0.174685	2.19604	11.6	18.9313793
110	11.52381	0.12	0.18228	2.10056	11.6	18.1082759
100	10.47619	0.13	0.19747	2.068733	11.6	17.833908
90	9.428571	0.14	0.21266	2.00508	11.6	17.2851724
80	8.380952	0.155	0.235445	1.973253	11.6	17.0108046
70	7.333333	0.155	0.235445	1.726597	11.6	14.884454
60	6.285714	0.155	0.235445	1.47994	11.6	12.7581034

ภาคผนวก ก17 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 12 ใบ มุม -5 องศา รูปแบบที่ 1

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
180	18.85714	0.06	0.09114	1.71864	14.26	12.0521739
170	17.80952	0.065	0.098735	1.758423	14.26	12.3311594
160	16.7619	0.07	0.10633	1.782293	14.26	12.4985507
150	15.71429	0.075	0.113925	1.79025	14.26	12.5543478
140	14.66667	0.08	0.12152	1.782293	14.26	12.4985507
130	13.61905	0.09	0.13671	1.86186	14.26	13.0565217
120	12.57143	0.1	0.1519	1.9096	14.26	13.3913043
110	11.52381	0.105	0.159495	1.83799	14.26	12.8891304
100	10.47619	0.115	0.174685	1.830033	14.26	12.8333333
90	9.428571	0.115	0.174685	1.64703	14.26	11.55
80	8.380952	0.12	0.18228	1.52768	14.26	10.7130435
70	7.333333	0.135	0.205065	1.50381	14.26	10.5456522
60	6.285714	0.145	0.220255	1.38446	14.26	9.70869565

ภาคผนวก ก18 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการไหล 1.6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 12 ใบ มุม -5 องศา รูปแบบที่ 1

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
180	18.85714	0.06	0.09114	1.71864	17.3	9.93433526
170	17.80952	0.07	0.10633	1.8936867	17.3	10.9461657
160	16.7619	0.08	0.12152	2.0369067	17.3	11.77402697
150	15.71429	0.09	0.13671	2.1483	17.3	12.41791908
140	14.66667	0.1	0.1519	2.2278667	17.3	12.877842
130	13.61905	0.11	0.16709	2.2756067	17.3	13.15379576
120	12.57143	0.115	0.174685	2.19604	17.3	12.69387283
110	11.52381	0.12	0.18228	2.10056	17.3	12.14196532
100	10.47619	0.13	0.19747	2.0687333	17.3	11.95799615
90	9.428571	0.13	0.19747	1.86186	17.3	10.76219653
80	8.380952	0.135	0.205065	1.71864	17.3	9.93433526
70	7.333333	0.145	0.220255	1.6152033	17.3	9.336435453
60	6.285714	0.155	0.235445	1.47994	17.3	8.554566474

ภาคผนวก ก19 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 24 ใบ มุม 0 องศา รูปแบบที่ 2

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.075	0.113925	2.387	11.6	20.57759
190	19.90476	0.08	0.12152	2.418827	11.6	20.85195
180	18.85714	0.085	0.129115	2.43474	11.6	20.98914
170	17.80952	0.1	0.1519	2.705267	11.6	23.32126
160	16.7619	0.12	0.18228	3.05536	11.6	26.33931
150	15.71429	0.13	0.19747	3.1031	11.6	26.75086
140	14.66667	0.14	0.21266	3.119013	11.6	26.88805
130	13.61905	0.15	0.22785	3.1031	11.6	26.75086
120	12.57143	0.16	0.24304	3.05536	11.6	26.33931
110	11.52381	0.175	0.265825	3.063317	11.6	26.4079
100	10.47619	0.19	0.28861	3.023533	11.6	26.06494
90	9.428571	0.195	0.296205	2.79279	11.6	24.07578
80	8.380952	0.2	0.3038	2.546133	11.6	21.94943
70	7.333333	0.21	0.31899	2.33926	11.6	20.16603
60	6.285714	0.225	0.341775	2.1483	11.6	18.51983

ภาคผนวก ก20 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 24 ใบ มุม 0 องศา รูปแบบที่ 2

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.09	0.13671	2.8644	14.26	20.08696
190	19.90476	0.1	0.1519	3.023533	14.26	21.2029
180	18.85714	0.115	0.174685	3.29406	14.26	23.1
170	17.80952	0.13	0.19747	3.516847	14.26	24.66232
160	16.7619	0.15	0.22785	3.8192	14.26	26.78261
150	15.71429	0.15	0.22785	3.5805	14.26	25.1087
140	14.66667	0.155	0.235445	3.453193	14.26	24.21594
130	13.61905	0.16	0.24304	3.309973	14.26	23.21159
120	12.57143	0.165	0.250635	3.15084	14.26	22.09565
110	11.52381	0.18	0.27342	3.15084	14.26	22.09565
100	10.47619	0.205	0.311395	3.262233	14.26	22.87681
90	9.428571	0.22	0.33418	3.15084	14.26	22.09565
80	8.380952	0.235	0.356965	2.991707	14.26	20.97971
70	7.333333	0.24	0.36456	2.67344	14.26	18.74783
60	6.285714	0.24	0.36456	2.29152	14.26	16.06957

ภาคผนวก ก21 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 24 ใบ มุม 0 องศา รูปแบบที่ 2

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.11	0.16709	3.500933	17.3	20.23661
190	19.90476	0.125	0.189875	3.779417	17.3	21.84634
180	18.85714	0.14	0.21266	4.01016	17.3	23.18012
170	17.80952	0.145	0.220255	3.922637	17.3	22.6742
160	16.7619	0.155	0.235445	3.946507	17.3	22.81218
150	15.71429	0.165	0.250635	3.93855	17.3	22.76618
140	14.66667	0.175	0.265825	3.898767	17.3	22.53622
130	13.61905	0.185	0.281015	3.827157	17.3	22.12229
120	12.57143	0.2	0.3038	3.8192	17.3	22.0763
110	11.52381	0.21	0.31899	3.67598	17.3	21.24844
100	10.47619	0.22	0.33418	3.500933	17.3	20.23661
90	9.428571	0.23	0.34937	3.29406	17.3	19.04081
80	8.380952	0.245	0.372155	3.119013	17.3	18.02898
70	7.333333	0.25	0.37975	2.784833	17.3	16.0973
60	6.285714	0.255	0.387345	2.43474	17.3	14.07364

ภาคผนวก ก22 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 24 ใบ มุม 5 องศา รูปแบบที่ 2

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.06	0.09114	1.9096	11.6	16.46207
190	19.90476	0.075	0.113925	2.26765	11.6	19.54871
180	18.85714	0.09	0.13671	2.57796	11.6	22.22379
170	17.80952	0.1	0.1519	2.705267	11.6	23.32126
160	16.7619	0.11	0.16709	2.800747	11.6	24.14437
150	15.71429	0.12	0.18228	2.8644	11.6	24.6931
140	14.66667	0.135	0.205065	3.00762	11.6	25.92776
130	13.61905	0.145	0.220255	2.999663	11.6	25.85917
120	12.57143	0.155	0.235445	2.95988	11.6	25.51621
110	11.52381	0.16	0.24304	2.800747	11.6	24.14437
100	10.47619	0.165	0.250635	2.6257	11.6	22.63534
90	9.428571	0.18	0.27342	2.57796	11.6	22.22379
80	8.380952	0.2	0.3038	2.546133	11.6	21.94943
70	7.333333	0.2	0.3038	2.227867	11.6	19.20575
60	6.285714	0.195	0.296205	1.86186	11.6	16.05052

ภาคผนวก ก23 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 24 ใบ มุม 5 องศา รูปแบบที่ 2

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.09	0.13671	2.8644	14.26	20.08696
190	19.90476	0.1	0.1519	3.023533	14.26	21.2029
180	18.85714	0.115	0.174685	3.29406	14.26	23.1
170	17.80952	0.125	0.189875	3.381583	14.26	23.71377
160	16.7619	0.135	0.205065	3.43728	14.26	24.10435
150	15.71429	0.145	0.220255	3.46115	14.26	24.27174
140	14.66667	0.155	0.235445	3.453193	14.26	24.21594
130	13.61905	0.175	0.265825	3.620283	14.26	25.38768
120	12.57143	0.19	0.28861	3.62824	14.26	25.44348
110	11.52381	0.19	0.28861	3.325887	14.26	23.32319
100	10.47619	0.195	0.296205	3.1031	14.26	21.76087
90	9.428571	0.2	0.3038	2.8644	14.26	20.08696
80	8.380952	0.22	0.33418	2.800747	14.26	19.64058
70	7.333333	0.23	0.34937	2.562047	14.26	17.96667
60	6.285714	0.24	0.36456	2.29152	14.26	16.06957

ภาคผนวก ก24 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 24 ใบ มุม 5 องศา รูปแบบที่ 2

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.09	0.13671	2.8644	17.3	16.55723
190	19.90476	0.1	0.1519	3.023533	17.3	17.47707
180	18.85714	0.115	0.174685	3.29406	17.3	19.04081
170	17.80952	0.12	0.18228	3.24632	17.3	18.76486
160	16.7619	0.13	0.19747	3.309973	17.3	19.13279
150	15.71429	0.145	0.220255	3.46115	17.3	20.00665
140	14.66667	0.165	0.250635	3.67598	17.3	21.24844
130	13.61905	0.175	0.265825	3.620283	17.3	20.92649
120	12.57143	0.185	0.281015	3.53276	17.3	20.42058
110	11.52381	0.195	0.296205	3.41341	17.3	19.73069
100	10.47619	0.205	0.311395	3.262233	17.3	18.85684
90	9.428571	0.215	0.326585	3.07923	17.3	17.79902
80	8.380952	0.225	0.341775	2.8644	17.3	16.55723
70	7.333333	0.23	0.34937	2.562047	17.3	14.80952
60	6.285714	0.235	0.356965	2.24378	17.3	12.96983

ภาคผนวก ก25 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 24 ใบ มุม -5 องศา รูปแบบที่ 2

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
180	18.85714	0.055	0.083545	1.57542	11.6	13.58121
170	17.80952	0.075	0.113925	2.02895	11.6	17.49095
160	16.7619	0.085	0.129115	2.164213	11.6	18.65701
150	15.71429	0.1	0.1519	2.387	11.6	20.57759
140	14.66667	0.11	0.16709	2.450653	11.6	21.12632
130	13.61905	0.125	0.189875	2.585917	11.6	22.29239
120	12.57143	0.13	0.19747	2.48248	11.6	21.40069
110	11.52381	0.14	0.21266	2.450653	11.6	21.12632
100	10.47619	0.155	0.235445	2.466567	11.6	21.26351
90	9.428571	0.17	0.25823	2.43474	11.6	20.98914
80	8.380952	0.18	0.27342	2.29152	11.6	19.75448
70	7.333333	0.185	0.281015	2.060777	11.6	17.76532
60	6.285714	0.19	0.28861	1.81412	11.6	15.63897

ภาคผนวก ก26 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 24 ใบ มุม -5 องศา รูปแบบที่ 2

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
180	18.85714	0.07	0.10633	2.00508	14.26	14.06087
170	17.80952	0.08	0.12152	2.164213	14.26	15.17681
160	16.7619	0.095	0.144305	2.418827	14.26	16.96232
150	15.71429	0.105	0.159495	2.50635	14.26	17.57609
140	14.66667	0.115	0.174685	2.562047	14.26	17.96667
130	13.61905	0.125	0.189875	2.585917	14.26	18.13406
120	12.57143	0.14	0.21266	2.67344	14.26	18.74783
110	11.52381	0.15	0.22785	2.6257	14.26	18.41304
100	10.47619	0.165	0.250635	2.6257	14.26	18.41304
90	9.428571	0.175	0.265825	2.50635	14.26	17.57609
80	8.380952	0.18	0.27342	2.29152	14.26	16.06957
70	7.333333	0.185	0.281015	2.060777	14.26	14.45145
60	6.285714	0.19	0.28861	1.81412	14.26	12.72174

ภาคผนวก ก27 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 24 ใบ มุม -5 องศา รูปแบบที่ 2

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
180	18.85714	0.08	0.12152	2.29152	17.3	13.24578
170	17.80952	0.085	0.129115	2.299477	17.3	13.29177
160	16.7619	0.095	0.144305	2.418827	17.3	13.98166
150	15.71429	0.105	0.159495	2.50635	17.3	14.48757
140	14.66667	0.115	0.174685	2.562047	17.3	14.80952
130	13.61905	0.13	0.19747	2.689353	17.3	15.54539
120	12.57143	0.145	0.220255	2.76892	17.3	16.00532
110	11.52381	0.16	0.24304	2.800747	17.3	16.18929
100	10.47619	0.17	0.25823	2.705267	17.3	15.63738
90	9.428571	0.175	0.265825	2.50635	17.3	14.48757
80	8.380952	0.185	0.281015	2.355173	17.3	13.61372
70	7.333333	0.195	0.296205	2.17217	17.3	12.5559
60	6.285714	0.2	0.3038	1.9096	17.3	11.03815

ภาคผนวก ก28 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 12 ใบ มุม 0 องศา รูปแบบที่ 2

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.03	0.04557	0.9548	11.6	8.231034
190	19.90476	0.045	0.068355	1.36059	11.6	11.72922
180	18.85714	0.06	0.09114	1.71864	11.6	14.81586
170	17.80952	0.065	0.098735	1.758423	11.6	15.15882
160	16.7619	0.07	0.10633	1.782293	11.6	15.3646
150	15.71429	0.085	0.129115	2.02895	11.6	17.49095
140	14.66667	0.105	0.159495	2.33926	11.6	20.16603
130	13.61905	0.115	0.174685	2.379043	11.6	20.50899
120	12.57143	0.125	0.189875	2.387	11.6	20.57759
110	11.52381	0.13	0.19747	2.275607	11.6	19.6173
100	10.47619	0.135	0.205065	2.1483	11.6	18.51983
90	9.428571	0.14	0.21266	2.00508	11.6	17.28517
80	8.380952	0.145	0.220255	1.845947	11.6	15.91333
70	7.333333	0.155	0.235445	1.726597	11.6	14.88445
60	6.285714	0.165	0.250635	1.57542	11.6	13.58121

ภาคผนวก ก29 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 12 ใบ มุม 0 องศา รูปแบบที่ 2

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.04	0.06076	1.273067	14.26	8.927536
190	19.90476	0.05	0.07595	1.511767	14.26	10.60145
180	18.85714	0.06	0.09114	1.71864	14.26	12.05217
170	17.80952	0.07	0.10633	1.893687	14.26	13.27971
160	16.7619	0.075	0.113925	1.9096	14.26	13.3913
150	15.71429	0.08	0.12152	1.9096	14.26	13.3913
140	14.66667	0.085	0.129115	1.893687	14.26	13.27971
130	13.61905	0.1	0.1519	2.068733	14.26	14.50725
120	12.57143	0.125	0.189875	2.387	14.26	16.73913
110	11.52381	0.13	0.19747	2.275607	14.26	15.95797
100	10.47619	0.135	0.205065	2.1483	14.26	15.06522
90	9.428571	0.14	0.21266	2.00508	14.26	14.06087
80	8.380952	0.145	0.220255	1.845947	14.26	12.94493
70	7.333333	0.15	0.22785	1.6709	14.26	11.71739
60	6.285714	0.16	0.24304	1.52768	14.26	10.71304

ภาคผนวก ก30 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 12 ใบ มุม 0 องศา รูปแบบที่ 2

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.075	0.113925	2.387	17.3	13.79769
190	19.90476	0.085	0.129115	2.570003	17.3	14.85551
180	18.85714	0.095	0.144305	2.72118	17.3	15.72936
170	17.80952	0.105	0.159495	2.84053	17.3	16.41925
160	16.7619	0.12	0.18228	3.05536	17.3	17.66104
150	15.71429	0.13	0.19747	3.1031	17.3	17.93699
140	14.66667	0.145	0.220255	3.230407	17.3	18.67287
130	13.61905	0.14	0.21266	2.896227	17.3	16.74119
120	12.57143	0.155	0.235445	2.95988	17.3	17.10913
110	11.52381	0.16	0.24304	2.800747	17.3	16.18929
100	10.47619	0.17	0.25823	2.705267	17.3	15.63738
90	9.428571	0.18	0.27342	2.57796	17.3	14.9015
80	8.380952	0.2	0.3038	2.546133	17.3	14.71753
70	7.333333	0.21	0.31899	2.33926	17.3	13.52173
60	6.285714	0.215	0.326585	2.05282	17.3	11.86601

ภาคผนวก ก31 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 12 ใบ มุม 5 องศา รูปแบบที่ 2

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.065	0.098735	2.068733	11.6	17.83391
190	19.90476	0.07	0.10633	2.116473	11.6	18.24546
180	18.85714	0.075	0.113925	2.1483	11.6	18.51983
170	17.80952	0.08	0.12152	2.164213	11.6	18.65701
160	16.7619	0.105	0.159495	2.67344	11.6	23.0469
150	15.71429	0.12	0.18228	2.8644	11.6	24.6931
140	14.66667	0.13	0.19747	2.896227	11.6	24.96747
130	13.61905	0.14	0.21266	2.896227	11.6	24.96747
120	12.57143	0.165	0.250635	3.15084	11.6	27.16241
110	11.52381	0.17	0.25823	2.975793	11.6	25.65339
100	10.47619	0.175	0.265825	2.784833	11.6	24.00718
90	9.428571	0.18	0.27342	2.57796	11.6	22.22379
80	8.380952	0.19	0.28861	2.418827	11.6	20.85195
70	7.333333	0.21	0.31899	2.33926	11.6	20.16603
60	6.285714	0.22	0.33418	2.10056	11.6	18.10828

ภาคผนวก ก32 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 12 ใบ มุม 5 องศา รูปแบบที่ 2

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.075	0.113925	2.387	14.26	16.73913
190	19.90476	0.085	0.129115	2.570003	14.26	18.02246
180	18.85714	0.1	0.1519	2.8644	14.26	20.08696
170	17.80952	0.12	0.18228	3.24632	14.26	22.76522
160	16.7619	0.135	0.205065	3.43728	14.26	24.10435
150	15.71429	0.14	0.21266	3.3418	14.26	23.43478
140	14.66667	0.15	0.22785	3.3418	14.26	23.43478
130	13.61905	0.16	0.24304	3.309973	14.26	23.21159
120	12.57143	0.175	0.265825	3.3418	14.26	23.43478
110	11.52381	0.185	0.281015	3.238363	14.26	22.70942
100	10.47619	0.2	0.3038	3.182667	14.26	22.31884
90	9.428571	0.215	0.326585	3.07923	14.26	21.59348
80	8.380952	0.24	0.36456	3.05536	14.26	21.42609
70	7.333333	0.25	0.37975	2.784833	14.26	19.52899
60	6.285714	0.255	0.387345	2.43474	14.26	17.07391

ภาคผนวก ก33 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการไหล 1.6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 12 ใบ มุม 5 องศา รูปแบบที่ 2

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
200	20.95238	0.08	0.12152	2.546133	17.3	14.71753
190	19.90476	0.1	0.1519	3.023533	17.3	17.47707
180	18.85714	0.125	0.189875	3.5805	17.3	20.69653
170	17.80952	0.135	0.205065	3.65211	17.3	21.11046
160	16.7619	0.15	0.22785	3.8192	17.3	22.0763
150	15.71429	0.16	0.24304	3.8192	17.3	22.0763
140	14.66667	0.175	0.265825	3.898767	17.3	22.53622
130	13.61905	0.19	0.28861	3.930593	17.3	22.72019
120	12.57143	0.21	0.31899	4.01016	17.3	23.18012
110	11.52381	0.22	0.33418	3.851027	17.3	22.26027
100	10.47619	0.24	0.36456	3.8192	17.3	22.0763
90	9.428571	0.25	0.37975	3.5805	17.3	20.69653
80	8.380952	0.255	0.387345	3.24632	17.3	18.76486
70	7.333333	0.27	0.41013	3.00762	17.3	17.38509
60	6.285714	0.28	0.42532	2.67344	17.3	15.45341

ภาคผนวก ก34 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 12 ใบ มุม -5 องศา รูปแบบที่ 2

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
180	18.85714	0.03	0.04557	0.85932	11.6	7.407931
170	17.80952	0.05	0.07595	1.352633	11.6	11.66063
160	16.7619	0.06	0.09114	1.52768	11.6	13.16966
150	15.71429	0.07	0.10633	1.6709	11.6	14.40431
140	14.66667	0.075	0.113925	1.6709	11.6	14.40431
130	13.61905	0.08	0.12152	1.654987	11.6	14.26713
120	12.57143	0.09	0.13671	1.71864	11.6	14.81586
110	11.52381	0.1	0.1519	1.750467	11.6	15.09023
100	10.47619	0.11	0.16709	1.750467	11.6	15.09023
90	9.428571	0.12	0.18228	1.71864	11.6	14.81586
80	8.380952	0.125	0.189875	1.591333	11.6	13.71839
70	7.333333	0.13	0.19747	1.448113	11.6	12.48374
60	6.285714	0.13	0.19747	1.24124	11.6	10.70034

ภาคผนวก ก35 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 12 ใบ มุม -5 องศา รูปแบบที่ 2

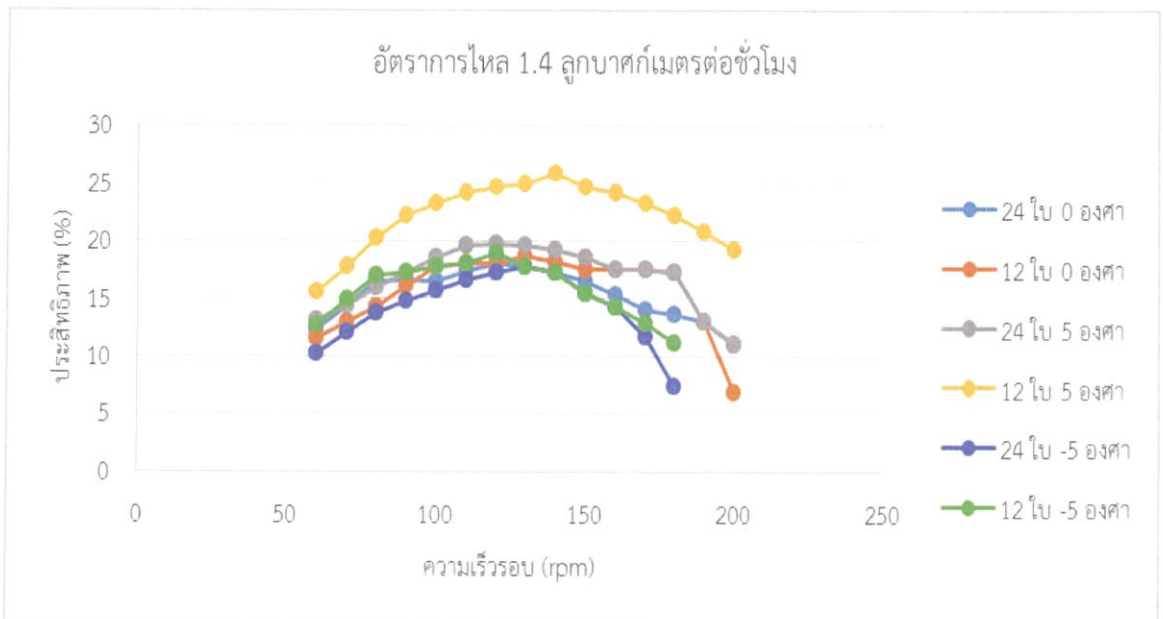
ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
180	18.85714	0.04	0.06076	1.14576	14.26	8.034783
170	17.80952	0.055	0.083545	1.487897	14.26	10.43406
160	16.7619	0.075	0.113925	1.9096	14.26	13.3913
150	15.71429	0.08	0.12152	1.9096	14.26	13.3913
140	14.66667	0.09	0.13671	2.00508	14.26	14.06087
130	13.61905	0.11	0.16709	2.275607	14.26	15.95797
120	12.57143	0.115	0.174685	2.19604	14.26	15.4
110	11.52381	0.125	0.189875	2.188083	14.26	15.3442
100	10.47619	0.14	0.21266	2.227867	14.26	15.62319
90	9.428571	0.15	0.22785	2.1483	14.26	15.06522
80	8.380952	0.155	0.235445	1.973253	14.26	13.83768
70	7.333333	0.16	0.24304	1.782293	14.26	12.49855
60	6.285714	0.165	0.250635	1.57542	14.26	11.04783

ภาคผนวก ก36 ตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการใช้ 1.6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 12 ใบ มุม -5 องศา รูปแบบที่ 2

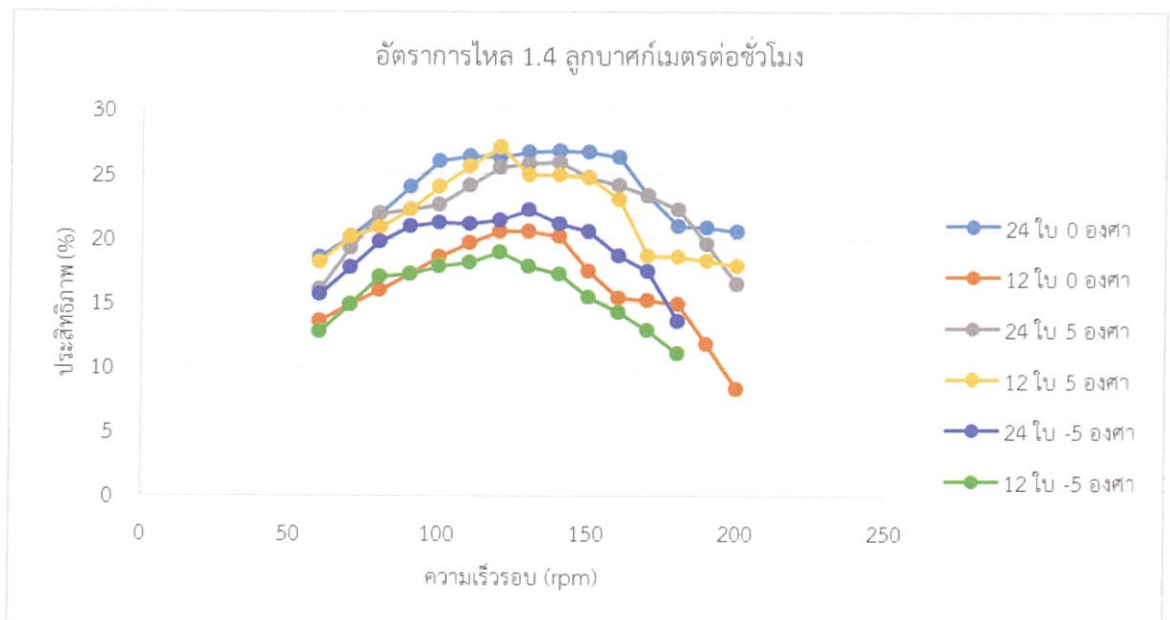
ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	น้ำหนัก (K.G.)	แรงบิด (N.m)	กำลังออก (W)	กำลังเข้า (W)	ประสิทธิภาพ (%)
180	18.85714	0.04	0.06076	1.14576	17.3	6.62289
170	17.80952	0.06	0.09114	1.62316	17.3	9.382428
160	16.7619	0.08	0.12152	2.036907	17.3	11.77403
150	15.71429	0.085	0.129115	2.02895	17.3	11.72803
140	14.66667	0.095	0.144305	2.116473	17.3	12.23395
130	13.61905	0.115	0.174685	2.379043	17.3	13.7517
120	12.57143	0.125	0.189875	2.387	17.3	13.79769
110	11.52381	0.135	0.205065	2.36313	17.3	13.65971
100	10.47619	0.145	0.220255	2.307433	17.3	13.33776
90	9.428571	0.15	0.22785	2.1483	17.3	12.41792
80	8.380952	0.155	0.235445	1.973253	17.3	11.40609
70	7.333333	0.175	0.265825	1.949383	17.3	11.26811
60	6.285714	0.195	0.296205	1.86186	17.3	10.7622

ภาคผนวก ข.

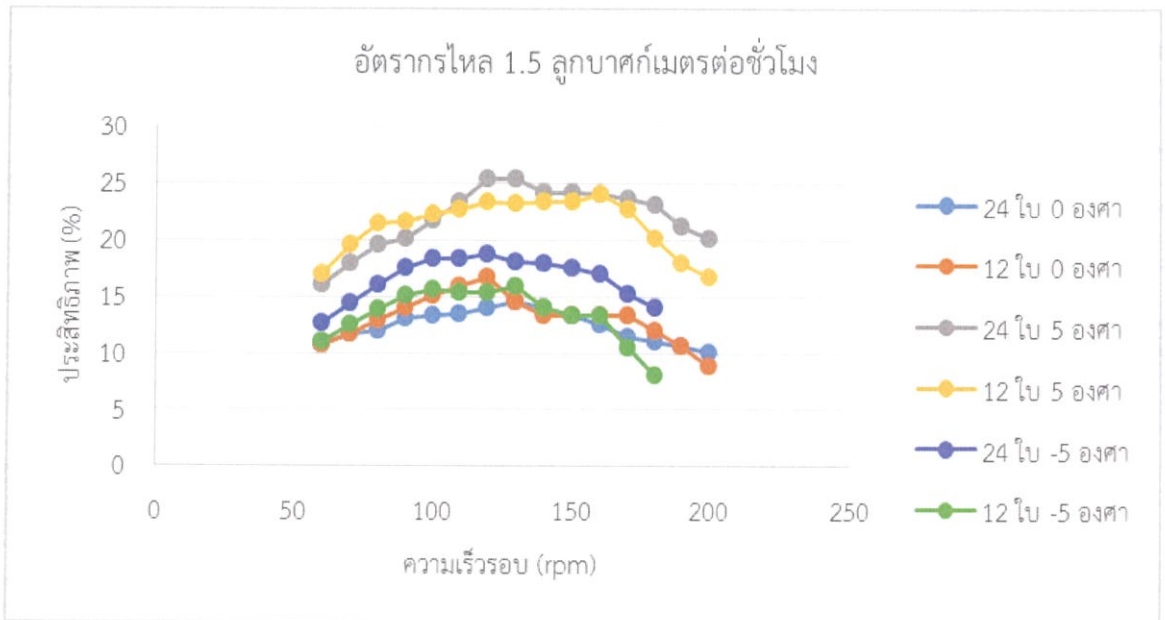
ภาคผนวก ข1 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ กับความเร็วรอบ ที่อัตราการใช้ 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง รูปแบบที่ 1



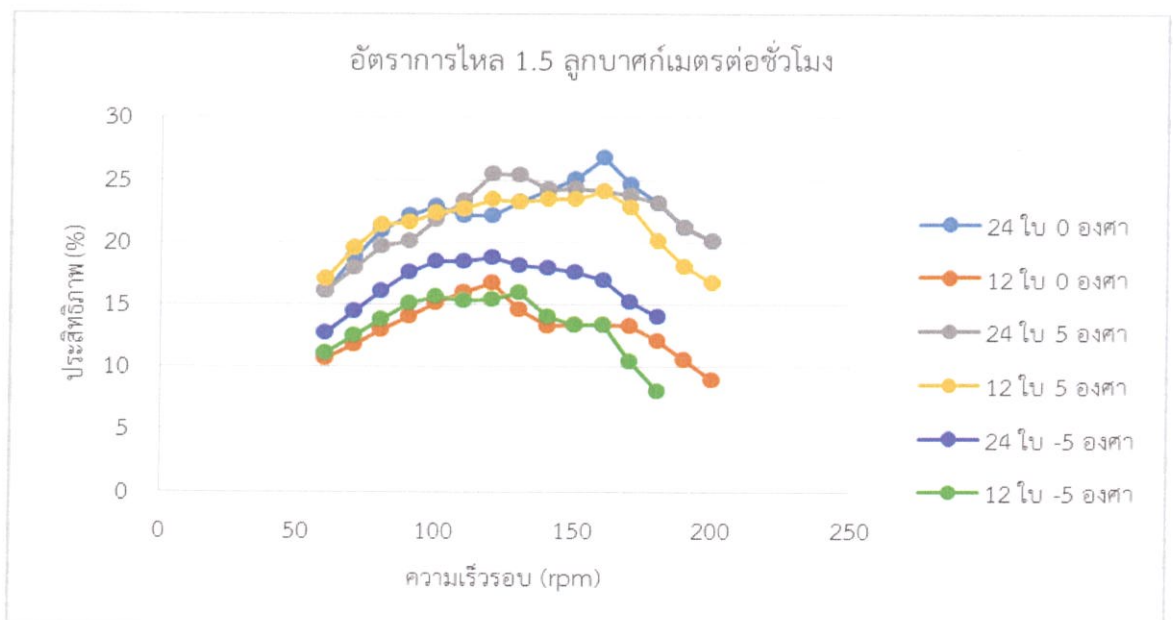
ภาคผนวก ข2 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ กับความเร็วรอบ ที่อัตราการใช้ 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง รูปแบบที่ 2



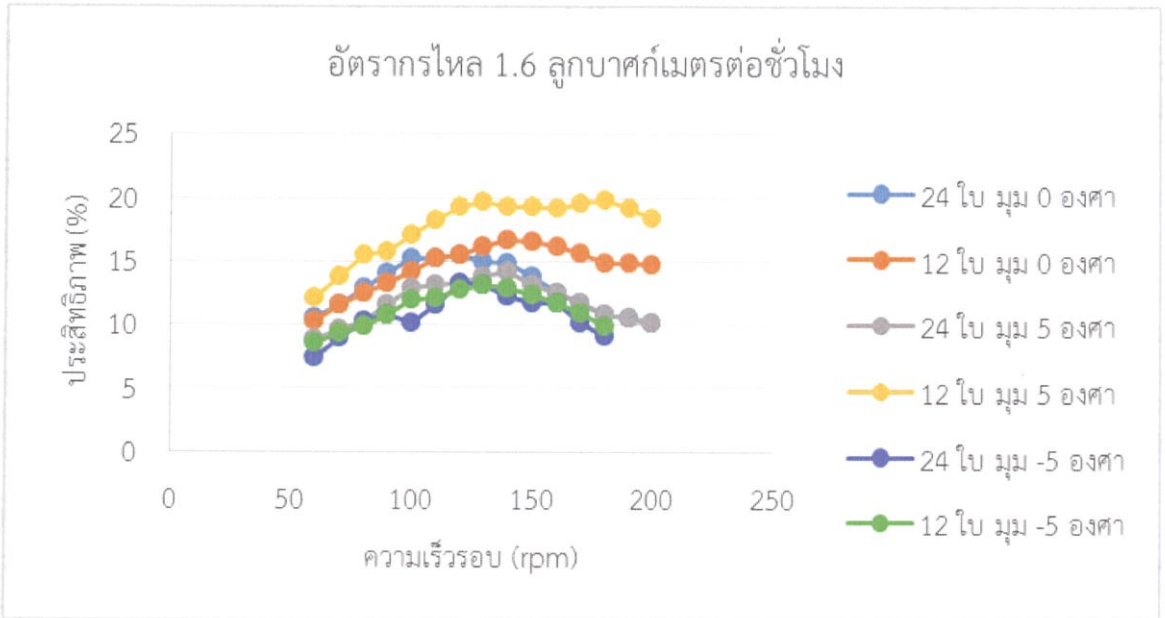
ภาคผนวก ข3 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ กับความเร็วรอบ ที่อัตราไหล 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง รูปแบบที่ 2



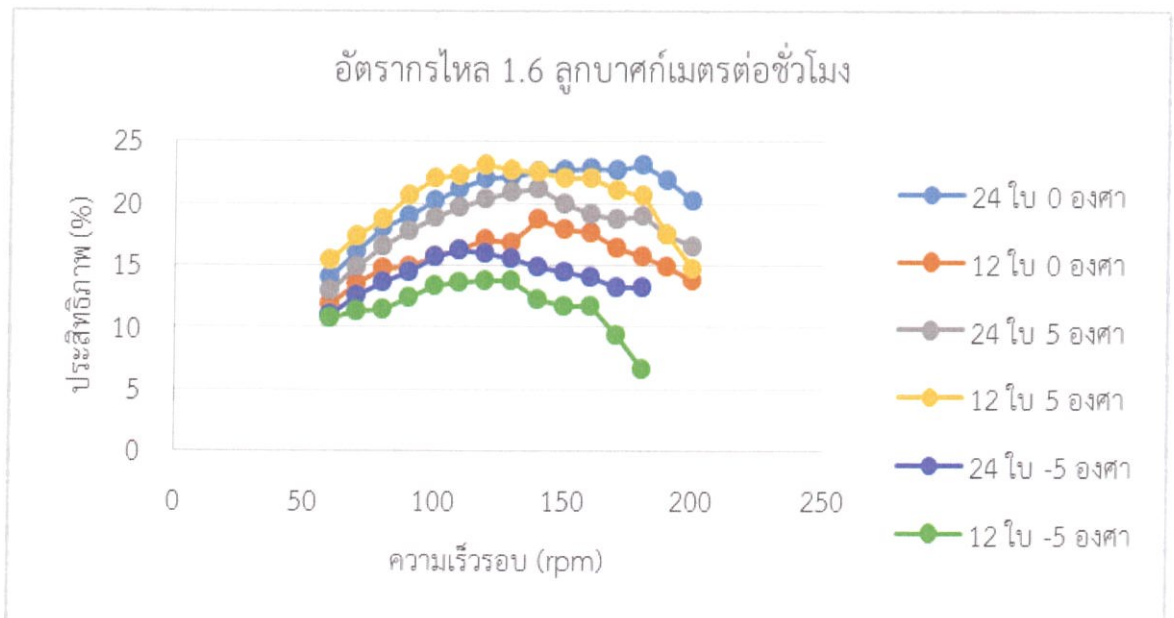
ภาคผนวก ข4 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ กับความเร็วรอบ ที่อัตราไหล 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง รูปแบบที่ 1



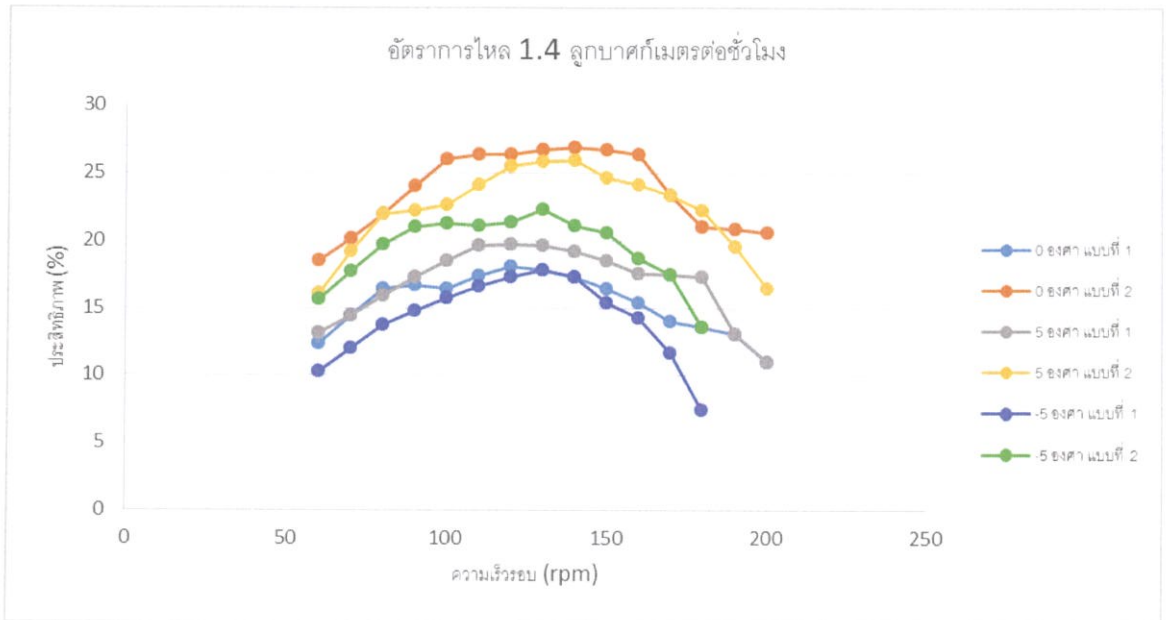
ภาคผนวก ข5 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ กับความเร็วรอบ ที่อัตราไหล 1.6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง รูปแบบที่ 1



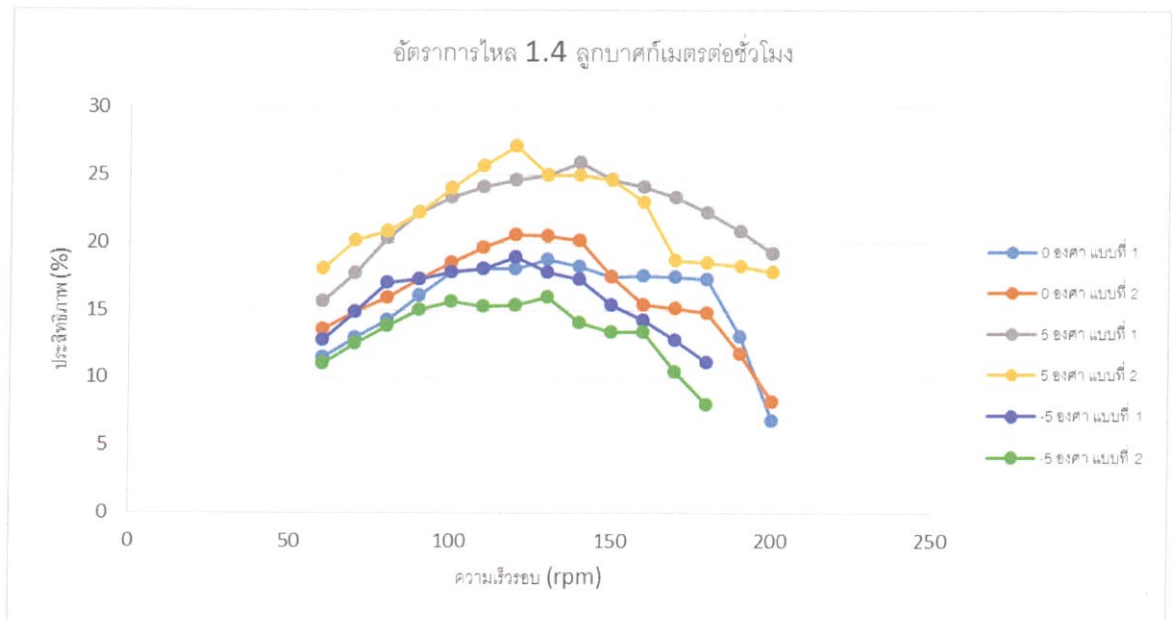
ภาคผนวก ข6 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ กับความเร็วรอบ ที่อัตราไหล 1.6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง รูปแบบที่ 2



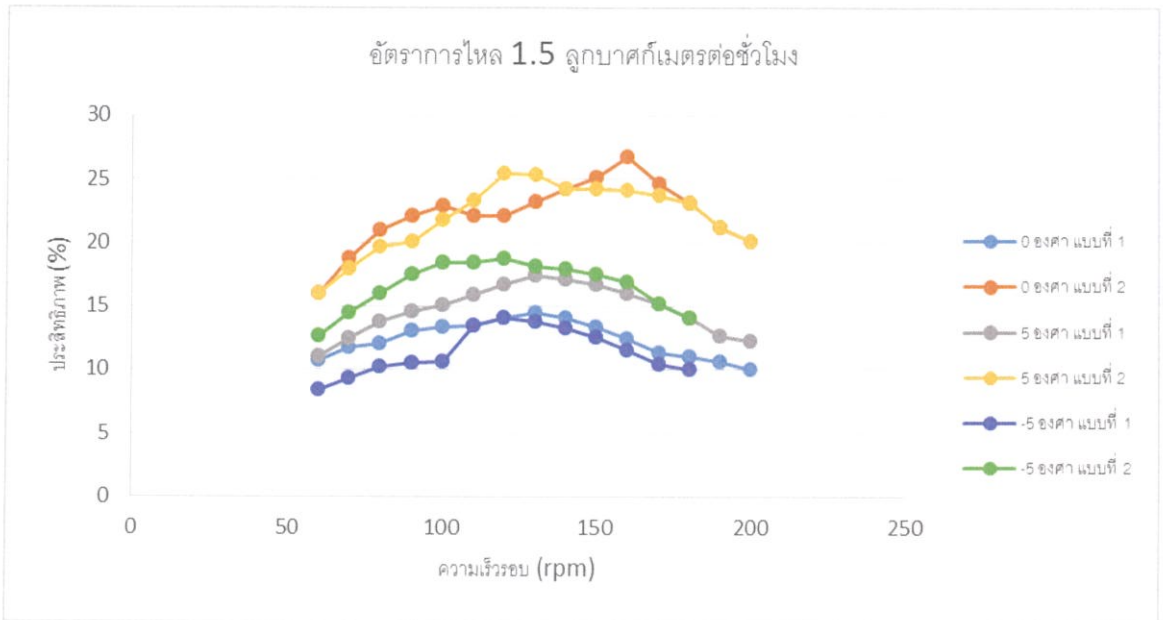
ภาคผนวก ข7 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ กับความเร็วรอบ ที่อัตราการใช้ 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 24 ใบ



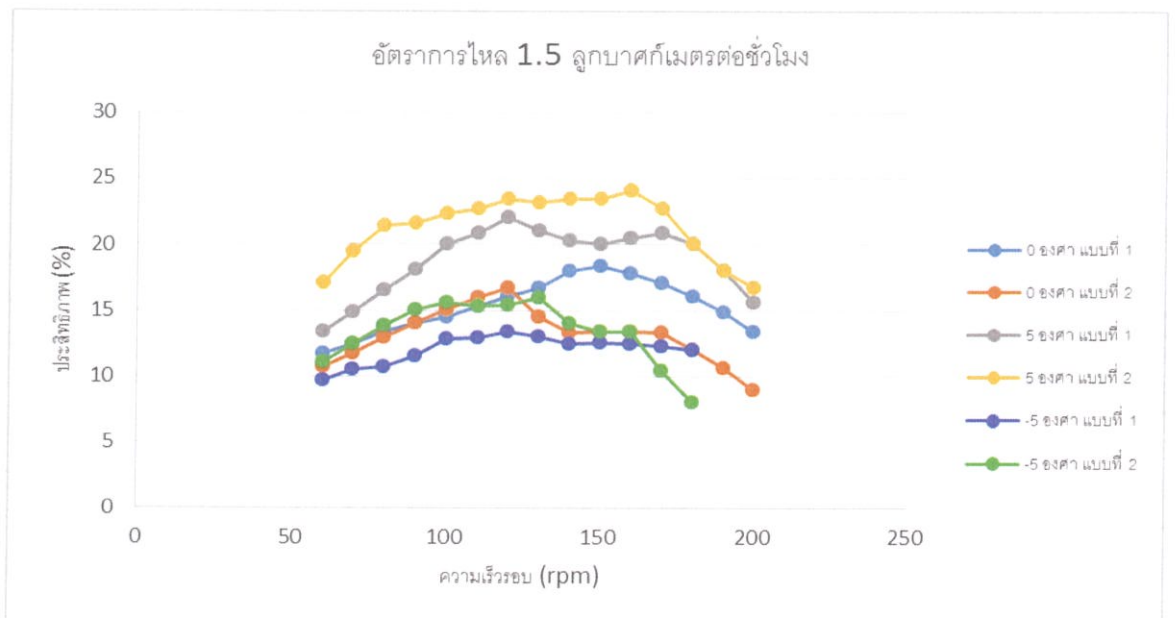
ภาคผนวก ข8 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ กับความเร็วรอบ ที่อัตราการใช้ 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 12 ใบ



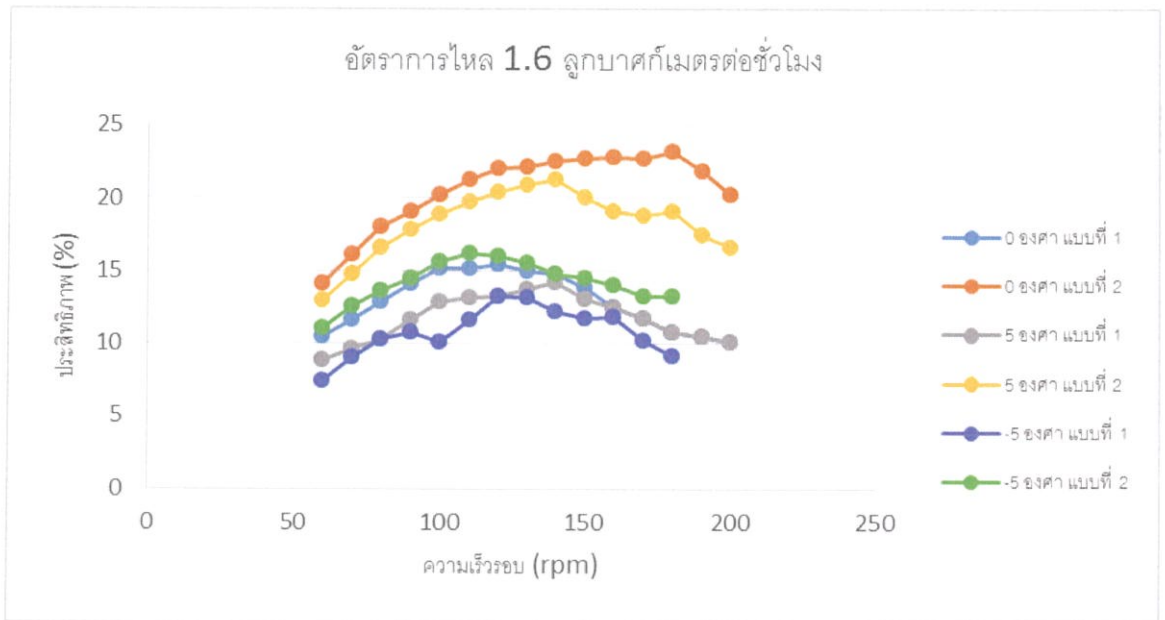
ภาคผนวก ข9 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ กับความเร็วรอบ ที่อัตราการใช้ 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 24 ใบ



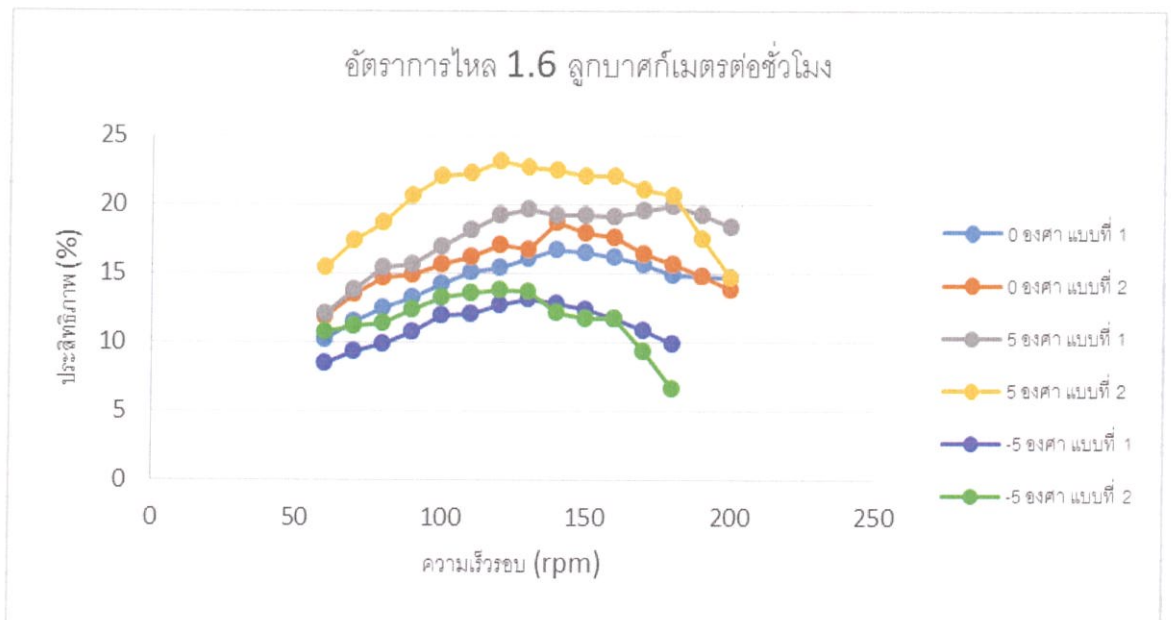
ภาคผนวก ข10 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ กับความเร็วรอบ ที่อัตราการใช้ 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 12 ใบ



ภาคผนวก ข11 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ กับความเร็วรอบ ที่อัตราการใช้ 1.6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 24 ใบ

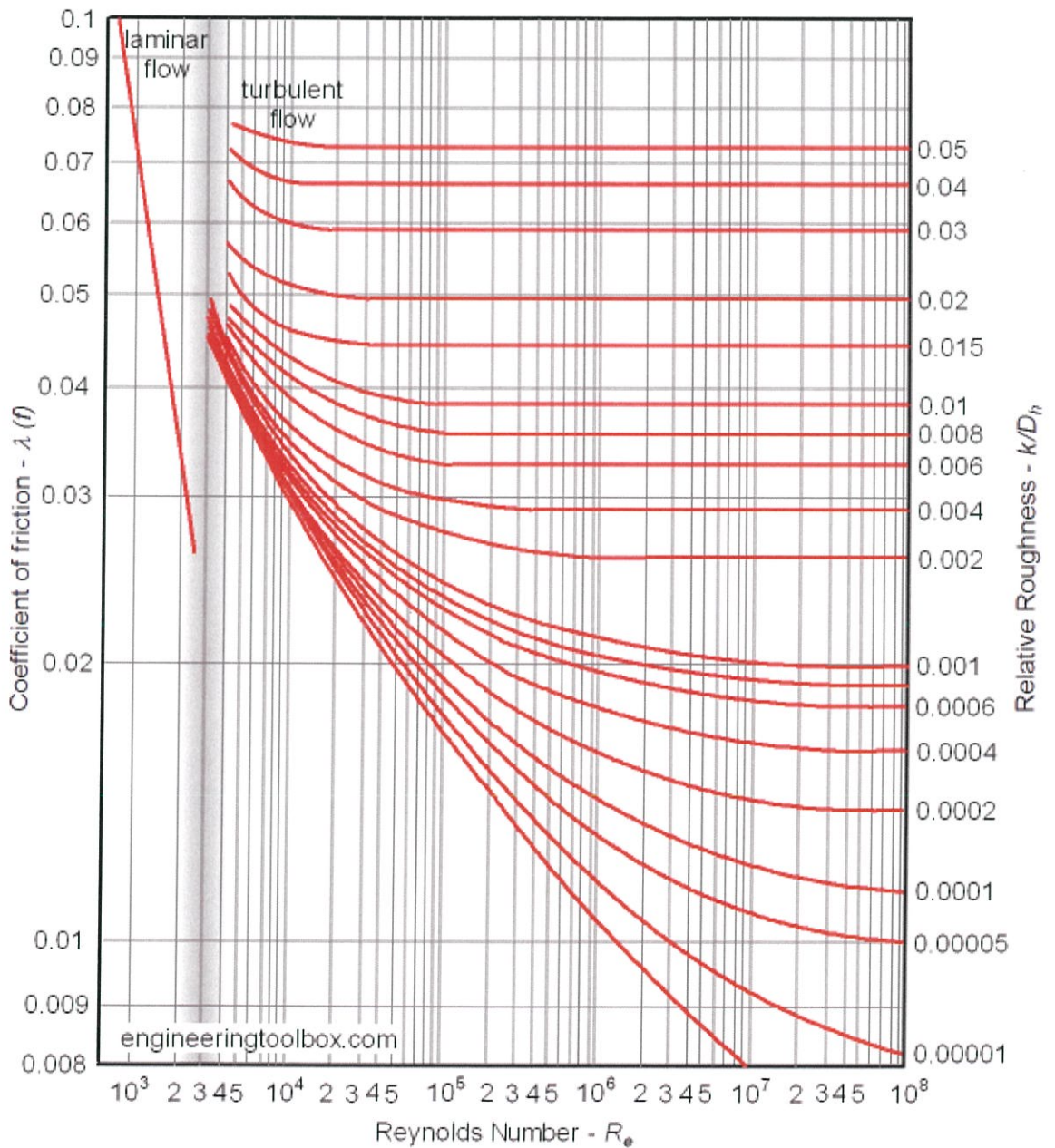


ภาคผนวก ข12 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ กับความเร็วรอบ ที่อัตราการใช้ 1.6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนใบพัด 12 ใบ

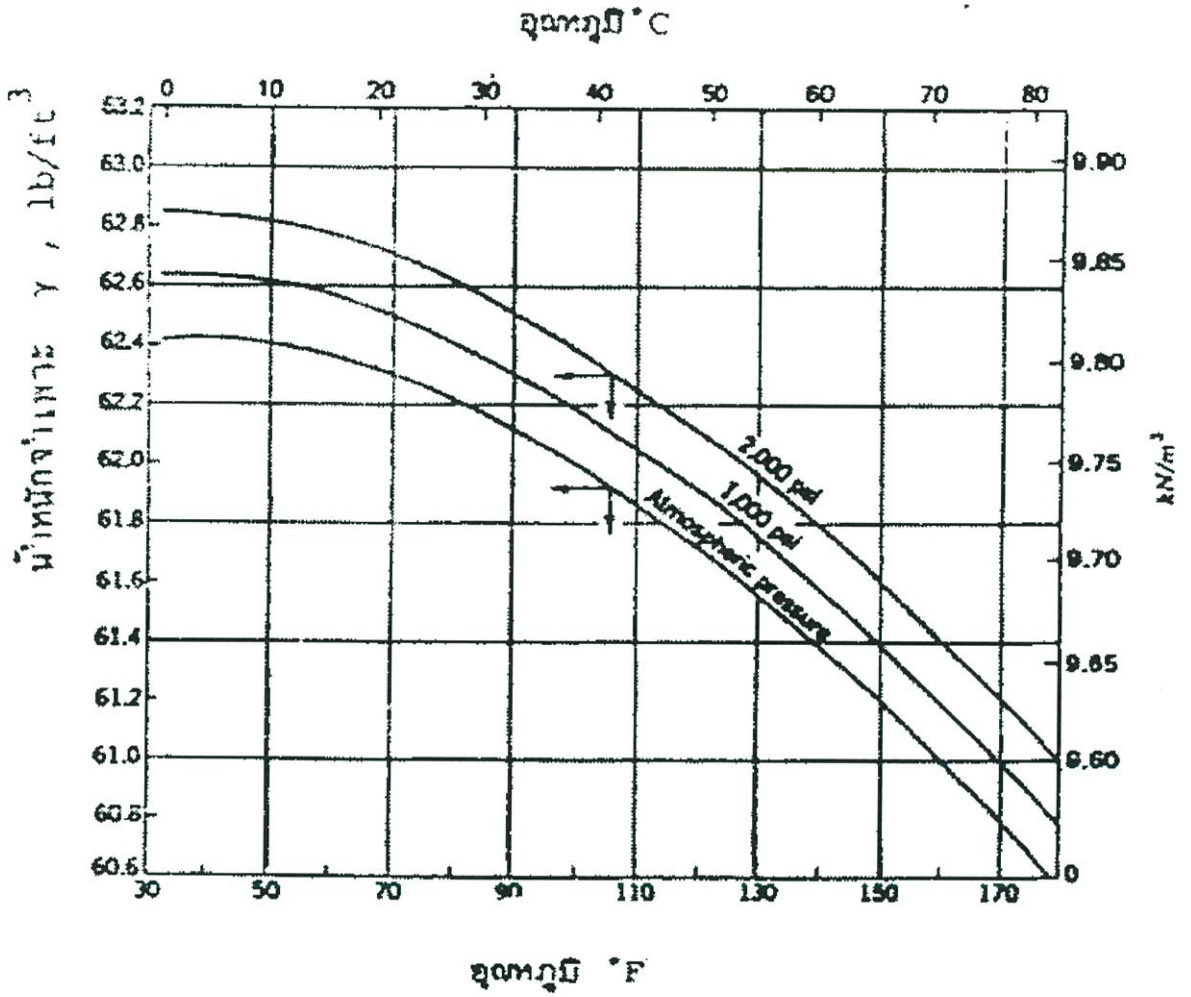


ภาคผนวก ค.

ภาคผนวก ค1 Moody's diagram



ภาคผนวก ค2 น้ำหนักจำเพาะของน้ำบริสุทธิ์ที่ $g=9.81$



ภาคผนวก ค3 ช่วงการทำงานของกังหันน้ำชนิดต่างๆ

	กังหันล้อเพลตัน	กังหันฟรานซิส	กังหันคัปแลน
ความเร็วรอบ(rad)	0.05-0.4	0.4-2.2	1.8-4.6
หัวพลังงาน(m)	100-1700	80-500	ไม่เกิน400
กำลังผลิตสูงสุด(kw)	55	40	30
ประสิทธิภาพสูงสุด(%)	93	94	94
กลไกการปรับภาระ	วาล์วเข็มและครีบน้ำ	ใบครีบน้ำ	ใบครีบน้ำ

ภาคผนวก ค4 สมบัติทางฟิสิกส์ของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ(หน่วยเอสไอ)

อุณหภูมิ ^o c	น้ำหนัก จำเพาะ γ , N/m ²	ความ หนาแน่น ρ , kg/m ³	ความ หนืด μ , Pa.s ($\times 10^{-3}$)	ความหนืด จลน์ ν , m ² /s ($\times 10^{-6}$)	ความตึง ผิว ($\times 10^{-2}$)	ความ ดัน ไอ p_v , kPa	มอดุลัส เชิง ปริมาตร K, GPa	อัตราเร็วเสียง c, m /s
0	9805	999.9	1.792	1.792	1.792	0.6	2.04	1403
5	9806	1000.0	1.519	1.519	7.54	0.9	2.06	1427
10	9803	999.7	1.308	1.308	7.48	1.2	2.11	1447
15	9798	999.1	1.140	1.141	7.41	1.7	2.14	1464
20	9789	998.2	1.005	1.007	7.36	2.5	2.20	1482
25	9779	997.1	0.894	0.897	7.26	3.2	2.22	1493
30	9767	995.7	0.801	0.804	7.18	4.3	2.23	1507
35	9752	994.1	0.723	0.727	7.10	5.7	2.24	1516
40	9735	992.2	0.656	0.661	7.01	7.5	2.27	1526
45	9720	990.2	0.599	0.605	6.92	9.6	2.29	1533
50	9697	988.1	0.549	0.556	6.82	12.4	2.30	1541
55	9679	985.7	0.506	0.513	6.74	15.8	2.31	1546
60	9658	983.2	0.469	0.477	6.68	19.9	2.28	1552
65	9635	980.6	0.436	0.444	6.58	25.1	2.26	1553
70	9600	977.8	0.406	0.415	6.50	31.4	2.25	1555
75	9589	974.9	0.380	0.390	6.40	38.8	2.23	1555
80	9557	971.8	0.357	0.367	6.30	47.7	2.21	1555
85	9529	968.6	0.336	0.347	6.20	58.1	2.17	1553
90	9499	965.3	0.317	0.328	6.12	70.4	2.16	1550
95	9469	961.9	0.299	0.311	6.02	84.5	2.11	1547
100	9438	954.8	0.284	0.296	5.94	101.3	2.07	1543

ภาคผนวก ง.

1. วัตถุประสงค์

1. ออกแบบใบพัดและทำการปรับปรุงให้หัวฉีดสามารถปรับมุมการยิงได้
2. ทำการติดตั้ง Flow meter เครื่องวัดภาระเบรก และปรับปรุงการทำงานของชุดสาธิต
3. หาประสิทธิภาพที่เปลี่ยนไปของกังหันน้ำ

2. ทฤษฎี

ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบสำหรับตัวแปรที่มีผลต่อเทอร์โบปั๊มประเภทอิมพัลส์นั้น เกี่ยวข้องกับทฤษฎีต่างๆเช่น ของไหล ป้อน กังหันน้ำ และอื่นๆ ซึ่งจำเป็นต้องทำการศึกษาถึงหลักการงานเพื่อสร้างแบบจำลองการทำงานของกังหันน้ำ ได้อย่างถูกต้อง

3. การคำนวณ

3.1 สมการในการคำนวณ

การหาความเร็วเชิงมุม สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\omega = \frac{2\pi N(200)}{60}$$

การหาทอร์คสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$T = F \cdot r$$

กำลังที่ขาออกคำนวณได้จากสมการ

$$P_{\text{output}} = T \cdot \omega$$

กำลังขาเข้าคำนวณได้จากสมการ

$$P_{\text{input}} = \frac{1}{2} \rho Q v_j^2$$

ประสิทธิภาพคำนวณได้จากสมการ

$$\eta_p = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}} \times 100$$

3.2 ค่าที่ใช้ในการทดลอง

สถานที่ทำการทดลองอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อุณหภูมิน้ำเฉลี่ยประมาณ 27 องศาเซลเซียส

ค่า ρ มีค่าเท่ากับ 996.95 kg/m^3

ค่า g มีค่าเท่ากับ 9.81 m/s^2

พื้นที่หน้าตัดของหัวฉีดมีค่าเท่ากับ 502 mm^2

4. วิธีการทดลอง

4.4.1 ใช้ปั๊มขนาด 0.5 แรงม้า และมีจำนวนใบพัดของกังหันจำนวน 24 ใบ ฉีดน้ำผ่านหัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร โดยกำหนดอัตราการไหลที่เปิดวาล์วสุด

4.4.2 ตั้งองศาของหัวฉีดไว้ที่มุม 0 องศา จากนั้น รอให้ใบพัดหมุนด้วยความเร็วคงที่และทำการวัดทอร์ค โดย ล็อคเครื่องมือกับเพลลาขณะที่เพลลาหมุนคงที่ จากนั้นค่อยๆ บิดน็อตเพื่อให้เครื่องมือเริ่มล๊อคเพลลา และอ่านค่าน้ำหนักจากเครื่องชั่งพร้อมทั้งวัดความเร็วรอบที่ขณะนั้นโดยทำการวัด 3 ครั้งและหาค่าเฉลี่ย

4.4.3 ทำการทดลองเหมือนกับข้อ 4.4.1-4.4.2 แต่ทำการลดอัตราการไหลลง โดยการหรีวาล์ว เก็บค่าการทดลอง และบันทึกผล

4.4.4 ทำการเปลี่ยนมุมมององศาในการยิงของหัวฉีดทีละค่า โดยเปลี่ยนจาก 0 องศา เป็น -5 และ 5 องศา จากนั้นทำการทดลองเหมือนกับข้อ 4.4.1-4.4.3

4.4.5 ลดจำนวนใบพัดลง จาก 24 ใบ เป็น 12 ใบ และทำการทดลองเหมือนกับข้อ 4.4.1-4.4.4

4.4.6 เปลี่ยนรูปแบบของใบพัดอีกรูปแบบหนึ่งและทำการทดลองเหมือนกับข้อ 4.4.1-4.4.5 โดยทำทุกกรณี บันทึกผลการทดลอง

4.4.7 นำค่าที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับความเร็วยรอบ

6. วิเคราะห์ผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

7. สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

8. วิจารณ์ผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....