

**สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**การทดลองหาประสิทธิภาพการทำงาน**

**ของอิมพัลส์เทอร์ไบน์**

**THE EXPERIMENT WITH EFFICIENCY  
OF IMPULSE TURBINE**

โดย

นายชาญชัย จำรูญถาวร 47010176

นายชาติรี เวียงพลระออม 47010179

นายอรรถพร จิงสงวนสิทธิ์ 47010953

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.มณฑล ใจกุศล

ร/พ.

๔๕๔๘๕ ๓

๒๕๕๐

เลขที่.....  
81778  
เลขที่.....  
วัน,เดือน,ปี 24 ส.ย. 2551

b.....119 32323  
i.....

**ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**

**ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล**

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**

**สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**ปีการศึกษา ๒๕๕๐**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2550

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การทดลองหาประสิทธิภาพการทำงานของอิมพัลส์เทอร์ไบน์

THE EXPERIMENT WITH EFFICIENCY OF IMPULSE TURBINE

ผู้จัดทำ

1. นาย ชานูชัย จำรูญถาวร รหัสประจำตัว 47010176
2. นาย ชาดวี เวียงพลระออม รหัสประจำตัว 47010179
3. นาย อรรถพร จึงสงวนสิทธิ รหัสประจำตัว 47010953



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดลองหาประสิทธิภาพการทำงานของอิมพัลส์เทอร์ไบน์

นาย ชานูรัช จำรูญถาวร 47010176  
นาย ชาตรี เวียงพลระออม 47010179  
นาย อรรถพร อังสงวนสิทธิ์ 47010953  
ผศ.มณฑล ไชยศอ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2550

### บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้เสนอการทำงานและทดลองหาประสิทธิภาพของกังหันน้ำแบบแรงกระแทก(impulse turbine) แบบ 1 หัวฉีด และ 2 หัวฉีด โดยใช้เครื่องสูบน้ำขนาด 0.5 แรงม้า และมีการจ่ายน้ำที่มีอัตราการไหลสูงสุด 35 ลิตร ต่อนาที โดยส่งจ่ายน้ำผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว และใช้หัวฉีดที่มีขนาดหัวฉีด 10 มิลลิเมตร จำนวน 2 หัวฉีด น้ำที่ไหลจากหัวฉีดมีความเร็ว 7.43 เมตรต่อวินาที ฉีดน้ำไปกระทบกับใบกังหันน้ำขนาด 49 ตารางเซนติเมตร จำนวน 30 ใบ โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล และจากผลการทดลองพบว่า หัวฉีด 1 หัวฉีด มีประสิทธิภาพดีกว่า 2 หัวฉีด สำหรับในกรณี 1 หัวฉีด หัวฉีดบนมีประสิทธิภาพดีกว่าหัวฉีดล่างเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# THE EXPERIMENT WITH EFFICIENCY OF IMPULSE TURBINE

Mr. Charnchai Jumroonthawarn 47010176

Mr. Chatree Wiangpolraom 47010179

Mr. Atthaporn Jungsuangsit 47010953

## Abstract

This project prouds to present another operation and experiment with efficiency of Impulse turbine by one nozzle and double 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, 2 hose(10 mm. for each hole) were speeded to spring 7.43 meter per second. This splashes to a turbine that sizes 49 centimeters amount 30 ones by change flow rate. The result is efficiency of one nozzle higher than double nozzle for case one nozzle, efficiency of upper-nozzle higher than lower-nozzle.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อประกอบการเรียนวิชา Project ซึ่งนับว่าเป็นโอกาสอันดีที่ทำให้ นักศึกษาได้นำความรู้ในภาคทฤษฎีมาปฏิบัติกร เป็นการเพิ่มพูนความรู้ และประสบการณ์ให้แก่นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศศ.มณฑล ใจกุศล อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ คำแนะนำ และคำปรึกษาเกี่ยวกับการทำโครงการนี้

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรัก ยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูข้าพเจ้ามาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังคงกำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุกๆวัน ค้าน อันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสูงสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



นายชาญชัย จำรูญถาวร  
นายชาติวี เวียงพลระออม  
นาย อรรถพร จิงสงวนสิทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII

### บทที่ 1 บทนำ

1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	2

### บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติของของไหล	3
2.2 คิเนมาติกส์ของการไหล	4
2.3 การไหลของของไหลในท่อ	9
2.4 หลักการของโมเมนตัม	13
2.5 กังหันน้ำ	20
2.6 เครื่องสูบน้ำ	21
2.7 เครื่องกังหันน้ำ	23
2.8 พลศาสตร์การหมุน	32

### บทที่ 3 การออกแบบ การคำนวณ และอุปกรณ์

3.1 การออกแบบการจัดวางแนวแกนของล้อกังหัน	40
3.2 การออกแบบโครงเครื่อง	40
3.3 การออกแบบใบกังหัน	41
3.4 การออกแบบล้อกังหัน	41
3.5 การออกแบบชุดฝาครอบ	42
3.6 ตลับลูกปืน	43
3.7 การหาขนาดและชนิดของท่อ	43
3.8 การเลือกใช้ชนิดของวาล์ว	44
3.9 การออกแบบปั๊ม	45
3.10 ดึงบรรจุน้ำ	48
3.11 ชุดวัดความเร็วรอบ	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.12	ฐานปรับมุมการฉีด	49
3.13	การออกแบบระบบท่อและหัวฉีด	50
<b>บทที่ 4 ขั้นตอนและผลการทดลอง</b>		
4.1	หลักการและเหตุผลในการทดลอง	52
4.2	ขั้นตอนและอุปกรณ์การหาอัตราการไหลของน้ำ	52
4.3	วิธีการวัดเทอร์ค	53
4.4	วิธีการทดลอง	53
4.5	ผลการทดลอง	55
4.6	สรุปผลการทดลอง	95
<b>ภาคผนวก</b>		97
<b>บรรณานุกรม</b>		102



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	ช่วงการทำงานของกังหันน้ำชนิดต่างๆ	20
ตารางที่ 4.1	แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนนมม 0 องศา	55
ตารางที่ 4.2	แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนนมม 5 องศา	57
ตารางที่ 4.3	แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนนมมกค 5 องศา	60
ตารางที่ 4.4	แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวล่างนมม 0 องศา	62
ตารางที่ 4.5	แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวล่างนมม 5 องศา	64
ตารางที่ 4.6	แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวล่างนมมกค 5 องศา	66
ตารางที่ 4.7	แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนนมม 5 องศา และหัวล่าง 0 องศา	68
ตารางที่ 4.8	แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนนมม 5 องศา และหัวล่างนมม 5 องศา	71
ตารางที่ 4.9	แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนนมม 5 องศา และหัวล่างนมมกค 5 องศา	73
ตารางที่ 4.10	แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ ในกรณีที่หัวบนและหัวล่างทำนมม 0 องศาทั้ง 2 หัว	75
ตารางที่ 4.11	แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนนมม 0 องศา และหัวล่างนมม 5 องศา	78
ตารางที่ 4.12	แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนนมม 0 องศา และหัวล่างนมมกค 5 องศา	80
ตารางที่ 4.13	แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนนมมกค 5 องศา และหัวล่างนมม 0 องศา	82
ตารางที่ 4.14	แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนนมมกค 5 องศา และหัวล่างนมม 5 องศา	85
ตารางที่ 4.15	แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนนมมกค 5 องศา และหัวล่างนมมกค 5 องศา	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

### บทที่ 2

รูปที่ 2.1	น้ำหนักจำเพาะของน้ำบริสุทธิ์ภายใต้สภาวะปกติที่ค่า $g = 9.81 \text{ m/s}^2$	4
รูปที่ 2.2	การไหลแบบลามินาร์	5
รูปที่ 2.3	การไหลแบบเทอร์บิวเลนต์	5
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	รอยต่อของท่อ และถังแบบต่างๆ	12
รูปที่ 2.9	การสูญเสียเนื่องจากการไหลจากท่อเข้าสู่ถัง	12
รูปที่ 2.10	ท่อค้อยๆลดขนาด	13
รูปที่ 2.11	ท่อลดขนาดที่เป็นกรวย	13
รูปที่ 2.12	หลักการพื้นฐานของแรงกระทบและ โมเมนตัม	14
รูปที่ 2.13	ของไหลกระทบแผ่นผิวเรียบสถิต	14
รูปที่ 2.14	แผ่นผิวเรียบเคลื่อนที่หนีของไหล	15
รูปที่ 2.15	แผ่นผิวเรียบเคลื่อนที่สวนทางกับของไหล	15
รูปที่ 2.16	ของไหลกระทบแผ่นผิวโค้งสถิต	16
รูปที่ 2.17	ของไหลกระทบแผ่นผิวโค้งที่กำลังเคลื่อนที่	17
รูปที่ 2.18	กังหันแบบกระแทก	18
รูปที่ 2.19	ความสัมพันธ์ระหว่าง $P$ กับ $U_v$	19
รูปที่ 2.20	การจำแนกประเภทของเครื่องสูบลม	22
รูปที่ 2.21	ลักษณะใบพัดของเครื่องสูบลมแต่ละประเภท	22
รูปที่ 2.22	ลักษณะการไหลของน้ำภายในเครื่องสูบลมแบบหอยโข่ง	23
รูปที่ 2.23	แผนภาพของเวกเตอร์ความเร็วตรงจุดที่ออกของใบพัด	24
รูปที่ 2.24	ระบบใบจักรต่อเนื่องอย่างง่าย	24
รูปที่ 2.25	ใบจักรต่อเนื่องรอบวงกลม (ก) กงจักรติดกับที่ (ข) กงจักรภายในหมุน	25
รูปที่ 2.26	การไหลเข้าสู่ใบจักร (ก) ในแนวสัมผัสใบจักร (ข) ไม่สัมผัสใบจักร	26
รูปที่ 2.27	การไหลตัวผ่านปริมาตรควบคุมที่สามารถรอบวงกลม	26
รูปที่ 2.28	แผนภาพเวกเตอร์ของความเร็วรอบจุดกึ่งกลาง	27
รูปที่ 2.29	ลักษณะของใบพัดรูปถ้วย	28
รูปที่ 2.30	ตัวล้อของกังหัน	28
รูปที่ 2.31	ระบบการทำงานของกังหันแบบแรงกระทบ	29
รูปที่ 2.32	แสดงทิศทางการไหลของน้ำกระทบกับใบพัด	29
รูปที่ 2.33	การวางใบกังหันของล้อกังหันแบบเพลตัน	30
รูปที่ 2.34	ลักษณะการทำงานของ Nozzle และ วงล้อกังหัน	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.35 ล้อกึ่งหันเพลตันชนิดมีหัวฉีดเดี่ยว	31
รูปที่ 2.36 ระบบล้อกึ่งหันเพลตันชนิด 4 หัวฉีด ใช้กับเพลตตั้ง	32
รูปที่ 2.37 ความเร่งเชิงมุม	32
รูปที่ 2.38 กราฟแสดงความเร็ว- เวลา	33
รูปที่ 2.39 การเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร่งคงที่	35
รูปที่ 2.40 กราฟ $\omega - t$	35
รูปที่ 2.41 การหมุนของชิ้นส่วนเล็กๆ	35
รูปที่ 2.42 การหมุนของวัตถุที่มีความเร่งรอบแกนหมุน	36
รูปที่ 2.43 การเร่งเพลลา	37
รูปที่ 2.44 การเร่งมีแรงเสียดทาน	37
รูปที่ 2.45 เพลารับ โรเตอร์	37
รูปที่ 2.46 เพลาดัน	38
รูปที่ 2.47 เพลากลวง	38
<b>บทที่ 3</b>	
รูปที่ 3.1 ลักษณะเครื่อง	40
รูปที่ 3.2 ใบกึ่งหัน	41
รูปที่ 3.3 ล้อกึ่งหันน้ำ	42
รูปที่ 3.4 ชุดฝาครอบ	42
รูปที่ 3.5 ตลับลูกปืนแบบวาย	43
รูปที่ 3.6 โกลบวาล์ว	44
รูปที่ 3.7 ข้อต่อสามทาง	44
รูปที่ 3.8 ข้องขนาด 90 องศา	44
รูปที่ 3.9 สายยางขนาด 1 นิ้ว	45
รูปที่ 3.10 ปืนน้ำ รุ่น MODEL PS-130 AUTO	48
รูปที่ 3.11 ถังบรรจุน้ำ	48
รูปที่ 3.12 มิเตอร์วัดรอบ Photo Tachometer MDT-2244B	49
รูปที่ 3.13 ฐานปรับมุมการฉีดด้านล่าง	49
รูปที่ 3.14 ฐานปรับมุมการฉีดด้านบน	50
รูปที่ 3.15 ท่อและหัวฉีด	50
รูปที่ 3.16 หัวฉีด	51
รูปที่ 3.17 การวางหัวฉีดด้านบน	51
รูปที่ 3.18 การวางหัวฉีดด้านล่าง	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

รูปที่ 4.1 แสดงกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง ทอร์คกับความเร็วรอบ ในกรณี 1 และ 2 หัวฉีด	90
รูปที่ 4.2 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่าง ทอร์ค และความเร็วรอบ ในกรณีเปิดเพียง 1 หัว	90
รูปที่ 4.3 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่าง ทอร์ค และความเร็วรอบ ในกรณีเปิด 2 หัว	91
รูปที่ 4.4 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ และ ความเร็วรอบ ในกรณีเปิดหัวฉีดบนเพียงอย่างเดียว	91
รูปที่ 4.5 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ และ ความเร็วรอบ ในกรณีเปิดหัวฉีดล่างเพียงอย่างเดียว	92
รูปที่ 4.6 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ และ ความเร็วรอบ ในกรณีเปิดหัวฉีด 2 หัวพร้อมกัน	93
รูปที่ 4.6.1 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ และ ความเร็วรอบ ในกรณีเปิดหัวฉีด 2 หัวพร้อมกันและหัวบนทำมุม 5 องศา	94
รูปที่ 4.6.2 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ และ ความเร็วรอบ ในกรณีเปิดหัวฉีด 2 หัวพร้อมกันและหัวบนทำมุม 0 องศา	94
รูปที่ 4.6.3 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ และ ความเร็วรอบ ในกรณีเปิดหัวฉีด 2 หัวพร้อมกันและหัวบนทำมุม 5 องศา	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันมีการนำพลังงานจากน้ำมาใช้อย่างกว้างขวาง สังเกตได้จากมีการสร้างเขื่อนกักเก็บน้ำและนำพลังงานน้ำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นการทดแทนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิง ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านมลพิษ การนำพลังงานจากน้ำมาใช้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ในน้ำมาใช้ งาน อุปกรณ์นั้นก็คือ “กังหันน้ำ” กังหันน้ำมีใช้กันอย่างกว้างขวางหลายรูปแบบ ในที่นี้จะเน้นศึกษาเรื่องกังหันน้ำแบบแรงผลักดัน ( Impulse ) ในการศึกษาเรื่องกังหันน้ำมีอุปสรรคที่สำคัญคือนักศึกษาไม่เห็นสภาพการทำงานของกังหันน้ำและส่วนประกอบที่แท้จริงได้ ชุดสาธิตกังหันน้ำแบบเพลตันสามารถช่วยให้นักศึกษาเห็นรูปร่างที่แท้จริงได้รวมทั้งสามารถเห็นการทำงานและทดลองการทำงานให้ได้โดยง่ายกังหันน้ำเพลตันเป็นแบบหนึ่งที่มีนิยมนำใช้กันมาก กังหันน้ำเพลตันเป็นล้อกังหันที่หมุนได้เพราะแรงผลักดัน( Impulse ) ใช้กับน้ำที่มีหัวน้ำสูงๆ โดยฉีดผ่านหัวฉีดลงไปที่ล้อ ล้อกังหันมีลักษณะเป็นถ้วยติดไว้เป็นล้อกังหัน ชุดกังหันหรือล้อนี้ตรงกลางมีสันคมมีดเพื่อแบ่งกระแสของน้ำที่ออกจากหัวฉีดให้แล่นออกไปทางข้างทั้งสองข้างผิวด้วยของล้อโค้งนั้นและจะค่อยๆ โค้งกลับทำให้ลำน้ำแล่นกลับทิศทางได้ประมาณเกือบ  $180^{\circ}$  วิธีนี้เองทำให้พลังงานจลน์( Kinetic Energy ) ทั้งหมดที่อยู่ในลำน้ำส่งพลังให้แก่ล้อกังหันทั้งหมด ในกรณีที่ถูกค้ำทางทฤษฎีที่เร็วที่สุดความเร็วน้ำเมื่อวกกลับประมาณ  $180^{\circ}$  ดังกล่าวจะลดลงถึงค่าศูนย์โดยถ่ายเทพลังงานให้แก่ล้อกังหันจนหมดสิ้น ในเชิงปฏิบัติจริงเราจะไม่สามารถวกทางเดินน้ำบนล้อกังหันให้กลับเป็น  $180^{\circ}$  ได้เลยแต่จะกระทำได้ประมาณ  $170^{\circ}$  เพราะลำน้ำอาจไปกระทบกับล้อกังหันตัวถัดไป ทำให้ด้านการหมุนของล้อกังหันให้หมุนช้าลง ซึ่งเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการ

จากข้อมูลที่ได้ทำการศึกษา จึงได้วางเป้าหมายเพื่อที่จะสร้างชุดสาธิตการทำงานของกังหันน้ำแบบล้อเพลตัน เป็นประเภทของเครื่องจักรพลังงานน้ำ โดยโครงการนี้จะใช้กังหันแบบล้อเพลตันเป็นตัวขับและใช้ชุดวัดภาระเบรกเป็นตัวแทนประสิทธิภาพ แล้วทำการวิเคราะห์ออกแบบระบบการทำงาน

### วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ออกแบบและสร้างชุดสาธิตกังหันน้ำเพลตันสองหัวฉีด
2. หาประสิทธิภาพกังหันน้ำแบบเพลตันที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำจำกัดความ

เขต หมายถึง ความสูงระหว่างผิวหน้าของของไหลกับทางออกของของไหล

ปั๊ม หมายถึง เครื่องมือกลที่ทำหน้าเพิ่มพลังงานให้แก่ของไหล

กังหันพลังของไหล หมายถึง เครื่องมือที่เปลี่ยนพลังงานของของไหลในรูปของกำลังงานเพลานำไป

## ผลิกระแสไฟฟ้า

ความดันมาตร หมายถึง ความดันที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความดัน โดยเปรียบเทียบกับความดันบรรยากาศเฉพาะที่

ความดันสมบูรณ์ หมายถึง ความดันที่วัดเปรียบเทียบกับความดันศูนย์สัมบูรณ์หรือสุญญากาศ

ทอร์ค หมายถึง แรงบิดที่ได้จากเพลากังหัน

พลังงานจลน์ หมายถึง พลังงานที่แฝงอยู่ในวัตถุเมื่อวัตถุนั้นมีการเคลื่อนที่

พลังงานศักย์ หมายถึง พลังงานที่แฝงอยู่ในวัตถุนั้นเมื่อวัตถุนั้นมีความเร็วสูงหรือพลังงานที่แฝงอยู่ในวัตถุนั้นมีความยืดหยุ่น

## ข้อตกลงเบื้องต้น

1. เห็นรูปและการทำงานของกังหันน้ำแบบเพลตัน
2. หากำลังงาน แรงบิดและประสิทธิภาพของกังหันน้ำเพลตันได้

## ขอบเขตของโครงการ

1. ชุดสาธิตกังหันน้ำเป็นแบบ 2 หัวฉีดนี้เครื่องสูบน้ำ ( Pump) ที่มีอัตราการสูบ 35 ลิตร/นาที สูบผ่านท่อพีวีซี ข้อต่อสามทาง โกลบวาล์ว สายยางและผ่านหัวฉีดอคูมิเนียมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 2 หัว
2. ตัวล้อกังหันทำจากเหล็ก ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร ส่วนใบกังหันทำจากอคูมิเนียม โดยการหล่อขึ้นรูป มีจำนวนทั้งหมด 40 ใบ และมีมุมวกน้ำกลับ 173°
3. ฐานของหัวฉีดสามารถทำการปรับมุมของการฉีดได้ทั้งส่วนของการฉีดด้านบนและส่วนของการฉีดด้านล่าง
4. สามารถแสดงค่าประสิทธิภาพโดยคำนวณจากชุดการะเบรคและแสดงรอบการหมุนของเพลานำโดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

## ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มองเห็นภาพลักษณะการทำงานของกังหันแบบเพลตัน
2. ใช้เป็นข้อมูลทางวิชาการ ในเรื่องเครื่องต้นกำลังหัวข้อกังหันน้ำแบบล้อเพลตัน ของนักศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง และ ปรินญาตรี
3. เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษา และพัฒนาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ แบบจำลองการทำงานของกังหันน้ำแบบล้อยืดหยุ่น จะว่าด้วยหลักทฤษฎีของของไหล เครื่องสูบน้ำ กังหันน้ำ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆ ซึ่งทฤษฎีเหล่านี้จำเป็นต้องทำการศึกษาถึงหลักการการทำงานเพื่อสร้างแบบจำลองการทำงานของกังหันน้ำแบบล้อยืดหยุ่น ได้อย่างถูกต้อง

#### 2.1 คุณสมบัติของของไหล

##### 2.1.1 ของไหล (Fluid)

ของไหล หมายถึง สสารที่สามารถไหลได้ โดยมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปตามภาชนะที่บรรจุ เมื่ออยู่ในสภาพสมดุลของไหลจะไม่สามารถรับแรงเฉือนได้ของไหลทุกชนิดจะขยับตัวตามความดันได้เล็กน้อย

##### 2.1.2 ความหนาแน่นเฉลี่ย (Mean density, $\rho$ )

เป็นอัตราส่วนระหว่างมวล กับ ปริมาตรของสารนั้น ถ้าความหนาแน่นเฉลี่ยทุกๆ ส่วนของสารนั้นเท่ากันหมดก็แสดงว่าสารก้อนนั้น มีความหนาแน่นสม่ำเสมอ ในที่นี้จะเรียกความหนาแน่นเฉลี่ยนี้สั้นๆ ว่า ความหนาแน่น

ความหนาแน่น มวล และปริมาตรมีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$(\rho = m/V) ; \quad m = \text{มวล มีหน่วยเป็น kg}$$

$$V = \text{ปริมาตร มีหน่วยเป็น m}^3$$

##### 2.1.3 ความหนาแน่นเฉพาะจุด (Density at a point)

เป็นความหนาแน่นเฉลี่ยเมื่อปริมาตรของสารนั้นเข้าใกล้ศูนย์หรือตามคำจำกัดความทางคณิตศาสตร์นั่นเอง อย่างไรก็ตามสารมักประกอบด้วยโมเลกุลที่อยู่แยกจากกันดังนั้นปริมาตรของสารจะลดลงเป็นศูนย์ไม่ได้ แต่จะลดได้เพียงที่จะให้โมเลกุลอยู่ได้จำนวนหนึ่งเท่านั้น ดังนั้น Concept ของการอยู่กันเป็นกลุ่มกันจึงช่วยสนับสนุนคำจำกัดความของ ความหนาแน่นเฉพาะจุด

##### 2.1.4 น้ำหนักจำเพาะ (Specific Weight, $\gamma$ )

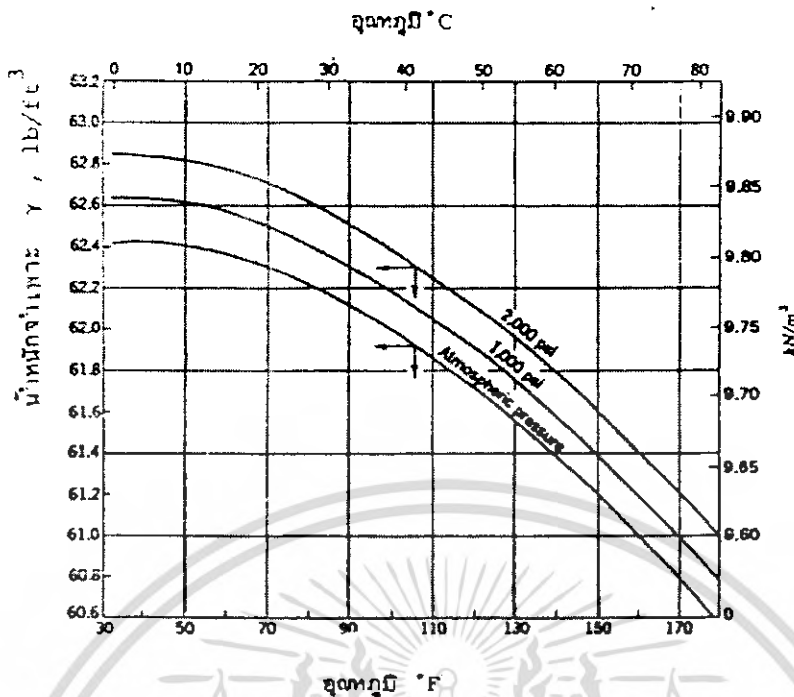
เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักหรือแรงดึงดูดของโลกกับปริมาตรสารนั้น ดังนั้นหน่วยของน้ำหนักจำเพาะจึงเป็นหน่วยของแรงต่อหน่วยของปริมาตร

น้ำหนักจำเพาะ และความหนาแน่น มีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$(\rho = \gamma / g) \quad \text{หรือ} \quad (\gamma = \rho g) \quad \text{มีหน่วยเป็น kg/m}^3$$

น้ำหนักจำเพาะของของเหลวจะเปลี่ยนแปลงตามความดันได้เล็กน้อย ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นอยู่กับ Bulk modulus ของของเหลวและขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของของเหลว เนื่องจากน้ำหนักจำเพาะ  $\gamma = \rho g$  ดังนั้นน้ำหนักจำเพาะของของไหลขึ้นอยู่กับ  $g$  ด้วย ค่าน้ำหนักจำเพาะของน้ำที่แปรตามอุณหภูมิกายได้สภาวะปกติที่ค่า  $g = 9.81$  นั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 น้ำหนักจำเพาะของน้ำบริสุทธิ์ภายใต้สภาวะปกติที่ค่า  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

### 2.15 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, $s$ )

เป็นอัตราส่วนระหว่าง ความหนาแน่นของสาร กับความหนาแน่นมาตรฐานความหนาแน่นมาตรฐานที่ใช้เปรียบเทียบกับความหนาแน่นของของแข็งและของเหลวคือ ความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์  $4^\circ\text{C}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1,000 \text{ kg/m}^3$  ส่วนความหนาแน่นมาตรฐานที่ใช้เปรียบเทียบกับความหนาแน่นของแก๊สก็คือ ความหนาแน่นของอากาศ หรือไฮโดรเจน

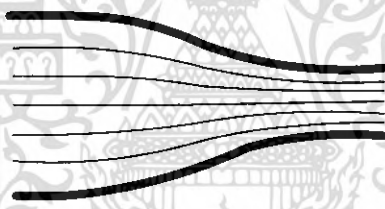
ความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนของค่าสองค่าที่มีหน่วยเหมือนกัน ดังนั้นความถ่วงจำเพาะจึงเป็นตัวเลขที่ไม่มีหน่วย และเนื่องจากความหนาแน่นของของไหลแปรตามอุณหภูมิ ดังนั้นจึงต้องกำหนดให้ชัดเจนว่า เป็นความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิใด

### 2.2 จินเนมาติกส์ของการไหล

เวลาพูดถึง การไหลของของไหลซึ่งมักจะหมายถึง การไหลของของไหลในจินตนาการของไหลในจินตนาการนี้ถือว่าเป็นของไหลที่ไม่มีความหนืด คุณสมบัติดังกล่าวนี้จะไม่มีในของไหลจริงซึ่งอย่างไรก็ดี ข้อสมมุตินี้มีประโยชน์ต่องานวิศวกรรมบางอัน แต่ถ้าเป็นการไหลของของไหลจริง ก็จะมีผลกระทบต่อความหนืดเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ความหนืดที่ว่านี้จะทำให้เกิดความเค้นเฉือนขึ้นในระหว่างอนุภาคของของไหล เมื่ออนุภาคของของไหลนั้นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ต่างกัน

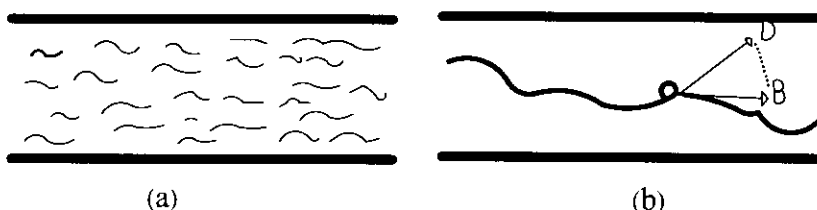
### 2.2.1 การไหลแบบลามินาร์และการไหลแบบเทอร์บิวเลนซ์

ในหัวข้อนี้จะบรรยายเฉพาะความเร็ว ความเร่ง และการเคลื่อนที่ของของไหล ในที่ว่างต่างๆ โดยไม่พูดถึงเรื่องแรงเฉื่อย ลักษณะการไหลสองแบบที่จะบรรยายในที่นี้คือ การไหลแบบลามินาร์และการไหลแบบเทอร์บิวเลนซ์ Osborne Reynolds ได้แสดงให้เห็นลักษณะการไหลทั้งสองแบบดังกล่าว ในปี 1883 โดยการฉีดสีเข้าไปที่ปากของหลอดแก้วที่ต่อจากถังน้ำ ทางปลายของหลอดแก้วมีวาล์วสำหรับปรับความเร็วของน้ำไหลผ่านหลอดแก้วจากการสาธิตของ Osborne Reynolds นั้นปรากฏว่าเมื่อน้ำในหลอดแก้วมีความเร็วต่ำจะเห็นสีที่ฉีดเข้าไปนั้นไหลเป็นเส้นตรงตลอดความยาวท่อ ลักษณะการไหลดังกล่าว แสดงว่าอนุภาคของน้ำเคลื่อนที่ขนานกันเป็นเส้นตรง แต่เมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วโดยการเปิดวาล์วให้กว้างขึ้น ก็ปรากฏว่าลักษณะของการไหลของน้ำในท่อเปลี่ยนไป ตอนแรกขนาดของสีเส้นที่อยู่ในหลอดแก้วจะหนาขึ้นจากนั้นเส้นสีที่อยู่บริเวณปากทางเข้าของหลอดแก้วจะแตกตัวรวมเข้าไปในน้ำวนที่เกิดขึ้น ส่วนเส้นสีที่อยู่ถัดไปได้ น้ำก็จะกระจายตัวออกอย่างสม่ำเสมอจนกระทั่งไม่เห็นเส้นสีที่อยู่ดังกล่าวเลย จากการสังเกตแสดงว่าการไหลแบบหลังนี้ ความเร็วของอนุภาคต่างๆ ของของไหลนั้นเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและทิศทางอยู่ตลอดเวลา ลักษณะการไหลจากการสาธิตแบบนี้มีชื่อเรียกว่า การไหลแบบลามินาร์(Laminar flow), การไหลแบบStreamline, หรือการไหลแบบ Viscous flow ลักษณะสำคัญของการไหลแบบนี้คือ ของไหลชั้นบางๆ จะเคลื่อนที่โดยการเลื่อนตัว ไปบนชั้นถัดไป และอนุภาคของของไหล ในแต่ละชั้นจะเคลื่อนที่ไปในเส้นทางที่แน่นอนและสามารถสังเกตเห็นได้หรือเคลื่อนที่เป็น streamline ดังรูปที่ 2.2 การไหลแบบนี้เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่มีความหนืดสูงหรือความหนืดของของไหล นั้นมีอิทธิพลมากกว่าคุณสมบัติอย่างอื่น



รูปที่ 2.2 การไหลแบบลามินาร์

ลักษณะการไหลแบบที่สองมีชื่อเรียกว่าการไหลแบบเทอร์บิวเลนซ์ ดังรูปที่ 2.3 ในรูป (a) นั้นเป็นการเคลื่อนที่ที่ไม่เป็นระเบียบของอนุภาคจำนวนมากในช่วงเวลาสั้นๆ ส่วนรูป (b) แสดงให้เห็นเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ไม่เป็นระเบียบ และไม่แน่นอนของอนุภาคเพียงอนุภาคเดียวในช่วงเวลาที่ยาวนานขึ้นลักษณะเด่นของการไหลแบบนี้คือ ความไม่เป็นระเบียบที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคต่างๆ นั้นเอง ถ้าหากการไหลแบบเทอร์บิวเลนซ์นี้มีคลื่น คลื่นนั้นจะมีความถี่ที่ไม่แน่นอนและถ้าหากมีการไหลวน (eddy) เกิดขึ้นก็จะไม่มีการไหลวนนั้น



รูปที่ 2.3 การไหลแบบเทอร์บิวเลนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหลวน(Eddy) ขนาดใหญ่ การไหลหมุน (swirl) และการเคลื่อนที่ที่ผิดปกติของก้อนของไหลขนาดใหญ่ ที่มีต้นตอที่ทำให้เกิดการไหลดังกล่าวนี้ ไม่ใช่สาเหตุจะทำให้เกิดการไหลแบบเทอร์บิวเลนต์เลย อาจจะเรียกการไหลแบบนี้ว่า เป็นการไหลแบบ disturbed flow ในทางตรงกันข้ามการไหลแบบสงบราบเรียบ และไม่มีต้นตอที่ทำให้เกิดการไหลแบบนี้ ก็อาจจะเป็นการไหลแบบเทอร์บิวเลนต์ก็ได้ ความเร็วที่มีลักษณะขึ้นๆ ลงๆ นั้นจะมีขนาดค่อนข้างเล็กตรวจพบได้เฉพาะในกรณีที่มีเครื่องมือพิเศษเท่านั้น

ตามตัวอย่างในรูปที่ 2.3 (b) นั้นอนุภาคที่จุด 0 อาจเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว OD แต่ในการไหลแบบเทอร์บิวเลนต์นั้น OD จะเปลี่ยนทั้งขนาดและทิศทางอยู่ตลอดเวลาการเปลี่ยนแปลงในลักษณะขึ้นๆ ลงๆ (fluctuation) ของความเร็วจะเกิดขึ้นพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงในลักษณะขึ้นๆ ลงๆ ของความดันนี้ก็เป็นคำตอบว่าทำไมระดับของเหลวในมานอมิเตอร์ หรือความดันที่อ่านได้จากเกจวัดความดันซึ่งต่อกับท่อที่มีของไหลที่กำลังไหลอยู่มีความดันเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การเคลื่อนที่ของอนุภาคของของไหลที่มีการไหลแบบเทอร์บิวเลนต์นี้จะผิดปกติ และมีเส้นทางที่ไม่แน่นอนเส้นทางที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคของของไหลสองอนุภาคที่มีการไหลแบบเทอร์บิวเลนต์ จะไม่มีโอกาสเหมือนกันเลย ดังนั้นจึงไม่มีวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ตายตัวสำหรับใช้กับการไหลแบบเทอร์บิวเลนต์นี้ ต้องใช้วิธีการประเมินทางสถิติแทน

## 2.2.2 การไหลแบบ Steady flow และการไหลแบบ Uniform flow

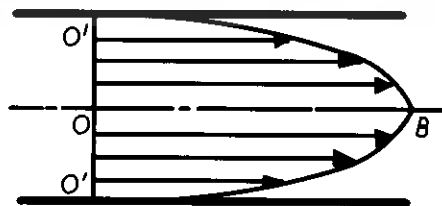
### -Steady flow

Steady flow เป็นลักษณะการไหลที่ทุกๆ สถานะของจุดใดๆ ในลำของไหลที่มีค่าคงที่เมื่อเทียบกับเวลาหรือไม่แปรค่าตามกาลเวลานั่นเอง

### -Uniform flow

Uniform flow ที่แท้จริงนั้นเป็นลักษณะการไหลที่ทุกๆ จุดในท่อดังกล่าวของขณะใดขณะหนึ่งนั้นมีความเร็วเหมือนกันทั้งขนาดและทิศทาง

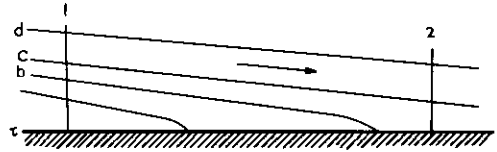
การไหลแบบStead flow (หรือ unsteady flow) และ uniform flow (หรือ nonuniform flow) อาจจะเกิดขึ้นกับของไหลใดๆ ได้โดยไม่จำเป็นต้องมีความสัมพันธ์กัน ดังนั้นของไหลใดๆ จึงอาจมีลักษณะการไหลแบบใดแบบหนึ่งในการไหลรวมซึ่งสามารถมีได้ถึง 4 แบบ ฉะนั้นของเหลวที่มีการไหลผ่านท่อที่มีขนาดสม่ำเสมอ ในอัตราการไหลที่คงที่ก็จะเป็นการไหลที่คงที่ ก็จะเป็นการไหลแบบ steady uniform flow ของไหลที่ไหลผ่านท่อเร็วด้วยอัตราการไหลคงที่ก็จะเป็นการไหลแบบ steady nonuniform flow แต่ถ้าของไหลไหลผ่านท่อตรงที่มีขนาดสม่ำเสมอแต่อัตราไหลไม่คงที่ การไหลก็จะเป็นอย่าง unsteady uniform flow และถ้าของไหลผ่านท่อเร็วด้วยอัตราการไหลที่มากที่การไหลก็จะเป็นอย่าง unsteady no uniform flow



รูปที่ 2.4 Velocity profile ของของไหลจริงภายในท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหลแบบ Unsteady flow นี้ อาจจะเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเพียงชั่วคราวหลังจากนั้นก็อาจจะเป็นได้ทั้ง steady flow หรือ ไม่มีการไหลเลยก็ได้ ตัวอย่างในการไหลแบบ unsteady flow นี้ก็จะเห็นได้ดังรูป 2.5



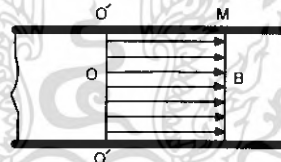
รูปที่ 2.5 แสดงการไหลแบบ Unsteady flow ที่เกิดขึ้นในลำคลอง

การไหลแบบ Unsteady flow ยังอาจรวมถึงช่วงเวลาการเคลื่อนที่ เช่น การเคลื่อนที่ของคลื่นตามชายฝั่ง อากาศขึ้นลงของน้ำที่ปากอ่าวตรงที่น้ำจืดและน้ำทะเลไปพบกันและการแกว่งไปมาของสิ่งของสิ่งต่างๆ ความแตกต่างระหว่างกรณีดังกล่าวกับ mean steady flow ก็คือความขบายนอกจากค่าเฉลี่ยนี้มีค่ามากและช่วงเวลาก็ดูยาวนานกว่า

### 2.2.3 อัตราการไหลและความเร็วเฉลี่ย

ปริมาณของไหลที่ไหลผ่านหน้าตัดใดๆ ในหนึ่งหน่วยเวลาเรียกว่า อัตราการไหล มักนิยมเรียกสั้นๆ ว่า Discharge หรือ flow เราสามารถบอกอัตราการไหลในหน่วยต่างๆ เช่น  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $\text{N}/\text{s}$ , ลิตร/นาที หรือหน่วยอื่นๆ ตามลักษณะการใช้งานเฉพาะอย่างในระบบเอสไอ นั้นอัตราการไหลจะมีหน่วยเป็น  $\text{m}^3/\text{s}$

ในกรณีที่เป็นกรไหลในจินตนาการการไหลในช่องทางต่างๆ อนุภาคของของไหลก็จะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงที่ขนานกันด้วยความเร็วเท่ากันจะเห็นได้ดังรูปที่ 2.6 ว่าขนาดความเร็วของของไหลคือ OB และมี Velocity profile เป็น MBN ในกรณีนี้อัตราการไหลจะเท่ากับความเร็ว OB ซึ่งมีขนาดที่สม่ำเสมอคูณกับขนาดของพื้นที่หน้าตัดของลำน้ำที่ตั้งฉากกับ OB



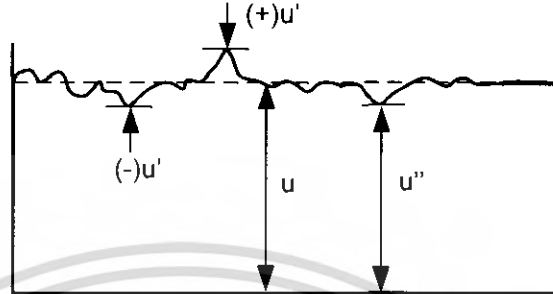
รูปที่ 2.6 การไหลของของไหลในจินตนาการ

สำหรับการไหลของของไหลจริงนั้นของไหลชั้นที่ติดอยู่กับผนังจะมีความเร็วเป็นศูนย์จากนั้นก็เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออยู่ห่างจากผนังออกไปและจะมี Velocity profile ดังในรูปที่ 2.4 ในกรณีที่เป็นกรไหลแบบลามินาร์จะพิจารณาแต่เพียง Velocity profile เท่านั้น แต่ถ้าเป็นการไหลแบบเทอร์บิวเลนต์แล้วความเร็ว นอกจากจะแปรผันตลอดพื้นที่หน้าตัดแล้วความเร็วของแต่ละจุดยังเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ขึ้นๆ ลงๆ อีกด้วย ในรูปที่ 2.3 (b) แสดงให้เห็นว่าความเร็วเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตั้งนั้นจะทำให้ขนาดของ OB เปลี่ยนแปลงไปด้วย OB เป็นความเร็วตามแนวแกน

ให้ความเร็วย่อยขณะใดขณะหนึ่ง ในแนวขนานกับช่องทางการไหลของจุดกำหนดให้มันเป็น  $u'$  ดังรูปที่ 2.7 แกนเฉลี่ยตลอดทั้งช่วงเวลาของ  $u'$  คือค่าความเร็วเฉลี่ยชั่วคราว  $u$  ของจุดนั้น ค่าความเร็ว  $u$  ในที่นี้คือ ค่าความเร็ว  $u$  ในรูปที่ 2.4 นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแตกต่างระหว่าง  $u''$  และ  $u'$  นี้เรียก Turbulent fluctuation ของความเร็วย่อยนั้น ค่าเฉลี่ยชั่วคราวของ  $u'$  จะต้องมีค่าเป็นศูนย์เช่นเดียวกับค่าเฉลี่ยของความเร็วย่อยตลอดหน้าตัดของช่องทางการไหล ดังเช่น BD ในรูปที่ 2.3 ดังนั้นที่ขณะใดขณะหนึ่งนั้น ดังสมการที่ 2.1



รูปที่ 2.7 Fluctuating velocity ของจุดจุดหนึ่ง

$$u'' = u + u' \tag{2.1}$$

ค่า  $u$  ของช่วงเวลา  $t$  ที่แน่นอนนั้นหาได้จาก

$$\frac{u}{t} = \frac{1}{t} \int_0^t u'' \cdot dt$$

ความเร็ว  $u$  นี้จะแปรผันตลอดพื้นที่หน้าตัด ในลักษณะใดลักษณะหนึ่ง เช่น แปรในลักษณะดังรูปที่ 3.3 ลักษณะดังกล่าวนี้จะมีอัตราการไหลเป็น

$$Q = \int_A u \cdot dA = AV \tag{2.2}$$

เมื่อ  $u$  = ความเร็วเฉลี่ยของจุดที่ผ่านพื้นที่เล็กๆ  $dA$

$V$  = ความเร็วเฉลี่ยทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัด  $A$

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

$$Q = A_a \cdot V_a + A_b \cdot V_b + \dots A_n \cdot V_n = A \cdot V \tag{2.3}$$

ในทิศทางตรงกันข้ามถ้าหากรู้อัตราการไหลซึ่งอาจจะหาค่าโดยวิธีใดวิธีหนึ่ง ก็สามารถจะหาความเร็วเฉลี่ยได้จากความสัมพันธ์

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{G}{\gamma \cdot A} \tag{2.4}$$

เมื่อ  $Q$  = อัตราการไหลโดยปริมาตร

$G$  = อัตราการไหลโดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.2.4 สมการการไหลต่อเนื่อง**

จะเห็นได้จากรูปที่ 2.5 เมื่อผิวของน้ำอยู่ที่ a ก็จะมีน้ำไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด (1) ในอัตรา  $Q_1$  แต่  $Q_2$  เป็นศูนย์ และมีผิวของน้ำอยู่ที่ c อัตราไหล  $Q_1$  ก็ต้องมากกว่า  $Q_2$  เพื่อที่จะชดเชยปริมาณของน้ำที่สะสมเพิ่มขึ้นในระหว่าง (1) และ (2) แต่เมื่อถึงสภาวะที่สมดุลแล้วการไหลก็เป็นแบบ steady flow และปริมาณของน้ำที่สะสมในระหว่างพื้นที่หน้าตัด (1) และ (2) ก็จะคงที่ดังนั้นอัตราการไหลของของไหลผ่านหน้าตัด (1) ก็จะเท่ากับอัตราการไหลที่ไหลผ่านหน้าตัด (2) ดังนั้นจะได้

$$G = \gamma_1 \cdot A_1 \cdot V_1 = \gamma_2 \cdot A_2 \cdot V_2 = \dots = \gamma \cdot A \cdot V = \text{constant}$$

สมการข้างบนนี้ใช้ได้กับการไหลทุกชนิด แต่ค่าของไหลนั้นเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ ( $\gamma$  คงที่) สมการดังกล่าวก็เหลือเพียง

$$G = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 = \dots = A \cdot V = \text{constant} \dots\dots\dots (2.5)$$

ในสมการที่ 2.5 นั้นจะต้องทราบเสียก่อนว่าน้ำหนักจำเพาะ  $\gamma$  แปรตามความดันและอุณหภูมิอย่างไร แต่สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้มันจะเห็นได้จากสมการที่ 2.6 ความเร็วแปรตรงกันข้ามกับพื้นที่หน้าตัดของลำของไหล

**2.3 การไหลของของไหลในท่อ**

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการไหลของของไหลในท่อ ซึ่งเป็นการประยุกต์ทฤษฎีการไหลของของไหล สมการการไหลสม่ำเสมอ และทฤษฎีของความต้านทานในการไหลของของไหลเข้าด้วยกัน

**2.3.1 การสูญเสียกำลังงานในท่อ**

การสูญเสียกำลังงานในท่อเนื่องจากความต้านทาน สามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ

- การสูญเสียหลัก (Major Loss)

ปกติการสูญเสียหลักนี้เกิดจากความเสียดทานของผิวท่อ ขนาดของท่อ ความยาวของท่อ และความเร็วในการไหลไหลในผิวท่อที่ขรุขระความยาวของท่อ มาก และความเร็วในการไหลสูงการสูญเสียกำลังงานจะสูงตามไป แต่การสูญเสียกำลังงานลดลงถ้าท่อมีขนาดโคขึ้น

- การสูญเสียรอง (Minor Loss)

การสูญเสียกำลังงาน เนื่องจากการไหลของของไหลในท่อ เมื่อของไหลไหลผ่านข้อต่อ ข้ออลิ้น ฯลฯ ปกติถ้าท่อมีความยาวมาก ค่าการสูญเสียรองนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับการสูญเสียหลักจะมีค่าน้อย แต่ถ้าท่อมีความยาวน้อย และมีการหักงอ หรือท่อมีการลดขนาดหลายแห่ง ค่าการสูญเสียรองจะมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับ การสูญเสียหลัก

**2.3.2 Reynolds Number ( $N_R$  หรือ  $R_e$ )**

เป็นตัวเลขที่ไม่มีหน่วย หาได้จากอัตราส่วนของแรง เนื่องจากความเฉื่อย และแรงเนื่องจากความหนืดของของไหล Reynolds Number นี้เป็นตัวเลขที่สำคัญที่จะบอกถึงลักษณะการไหลของของไหลเป็นแบบใดคือการไหลแบบราบเรียบ หรือการไหลแบบปั่นป่วนและเป็นตัวสำคัญในการหาแฟคเตอร์ของความเสียดทาน ถ้า  $N_R$  น้อยกว่า 2,000 การไหลของของไหลเป็นแบบราบเรียบ ถ้า  $N_R$  มากกว่า 2,000 มากๆ การไหลของของไหลจะเป็นแบบปั่นป่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สำหรับท่อกลม

$$N_R = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

เมื่อ

R = Reynolds Number

D = เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ

V = ความเร็วในการไหลของของไหล

$\rho$  = ความหนาแน่นของของไหล

$\mu$  = ความหนืดสมบูรณ์ของของไหล

$\nu$  = ความหนืดจลน์ของของไหล

- สำหรับท่อไม่กลม

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

เมื่อ

R = Hydraulic radius = A/P

A = พื้นที่หน้าตัดของของไหล

P = เส้นรอบรูปพื้นที่หน้าตัด

### 2.3.3 แฟคเตอร์ความเสียดทาน (f)

เป็นแฟคเตอร์ที่ไม่มีหน่วยใช้สำหรับการสูญเสียปกติแฟคเตอร์ของแรงเสียดทานนี้แปรผกผันกับ Reynolds Number

- แฟคเตอร์ความเสียดทานของการไหลแบบราบเรียบ ( $N_R < 2,000$ )

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

- แฟคเตอร์ความเสียดทานของการไหลแบบปั่นป่วน

ปกติการไหลของของไหลแบบปั่นป่วนไม่มีสูตรหาค่า f ที่แน่นอน เช่นเดียวกับในการไหลแบบราบเรียบเพียงแต่ทราบว่า f เป็นฟังก์ชันของ  $N_R$  และค่าความขรุขระของท่อ (e) (ตารางที่ ก.3) เท่านั้น ดังนั้นค่าของ f ที่ใช้จึงต้องหาจากกราฟที่ได้จากการทดลอง ดังตารางที่ ก.6 ซึ่งจะต้องทราบค่า Reynolds Number ( $N_R$ ) และค่าอัตราส่วนของความขรุขระต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ (e/D) เสียก่อน

### 2.3.4 ลำดับการหาแฟคเตอร์ความเสียดทาน

- หา Reynolds Number จากสูตร  $N_R = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu}$

หรือจากสูตร  $N_R = \frac{(4R)V\rho}{\mu}$  หรือ  $\frac{4RV}{\nu}$

- ถ้า  $N_R$  น้อยกว่า 2,000 หาค่าแฟคเตอร์ความเสียดทาน จากสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{f}{N_R} = 64$$

- ถ้า  $N_R$  มากกว่า 2,000 ค่าแฟคเตอร์ความเสียดทานตามลำดับ คือ

- 1) ค่าความขรุขระของท่อ  $e$  จากชนิดของวัสดุที่ทำ
- 2) หาค่าอัตราส่วน  $e/D$  คือความขรุขระ/เส้นผ่านศูนย์กลาง
- 3) ค่า  $f$  จากกราฟตารางที่ ก.6 โดยใช้  $N_R$  และ  $e/D$

### 2.3.5 การหาค่าการสูญเสียหลักในท่อกลม

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

เมื่อ  $h_L$  = การสูญเสียหลัก  
 $f$  = แฟคเตอร์ความเสียดทาน  
 $L$  = ความยาวท่อ  
 $R$  = Hydraulic radius =  $A/P$   
 $V$  = ความเร็วในการไหลของของไหล  
 $g$  = อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

### 2.3.6 การสูญเสียรอง

พลังงานที่สูญเสียไปกับความเสียดทานภายในท่อ ที่ได้กล่าวมาในหัวข้อข้างต้นเป็นการสูญเสียหลัก สำหรับการสูญเสียที่เกิดจากการที่มีสิ่งมารบกวนการไหลในที่เฉพาะแห่งเช่น ทางโค้งงอ การเพิ่มหรือลดขนาดของท่อ การไหลผ่านวาล์ว เป็นต้น เรียกว่า การสูญเสียรอง

ในกรณีที่ท่อหรือช่องทางที่มีขนาดยาวมาก การสูญเสียรองจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับการสูญเสียหลักที่เกิดจากความเสียดทาน แต่ถ้าท่อหรือช่องทางนั้นมีขนาดสั้น การสูญเสียรองก็อาจจะมีค่ามากกว่าการสูญเสียหลัก ดังนั้น Head loss ที่ปากทางเข้าของท่อคูดของเครื่องสูบน้ำที่มีตะแกรงสำหรับกรองวัสดุชิ้นโต และวาล์วกันน้ำไหลกลับจึงอาจมีค่ามากกว่าพลังงานที่สูญเสียไปกับความเสียดทานของท่อคูด สูตรการหาค่าการสูญเสียรอง คือ

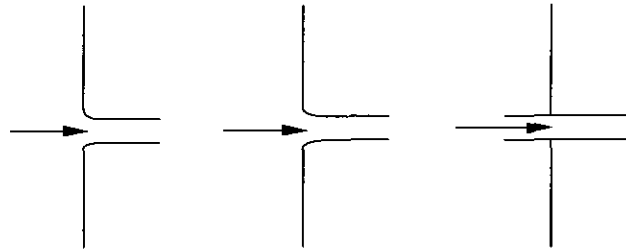
$$h_L = k_L \frac{V^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

เมื่อ  $h_L$  = การสูญเสียรอง  
 $k_L$  = สัมประสิทธิ์ของการสูญเสีย  
 $V$  = ความเร็วในการไหลของของไหล  
 $g$  = อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

#### 1) การสูญเสียเนื่องจากถังเข้าสู่ท่อ

เมื่อของไหลไหลจากถังเข้าสู่ท่อ ของไหลจะพยายามไหลเข้าสู่ท่ออย่างรวดเร็วจึงทำให้เกิดกระแสน้ำปั่นป่วนขึ้น หลังจากของไหลเข้าสู่ท่อได้ระยะหนึ่งจึงจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานขึ้นอย่างมากภายในบริเวณดังกล่าวเมื่อเทียบความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานธรรมดาในระยะทางเท่ากัน การสูญเสียเนื่องจากการไหลจากถังเข้าสู่ท่อนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างการต่อระหว่างถังกับท่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รอยต่อมีความโค้ง  
 $k_L = 0.04$

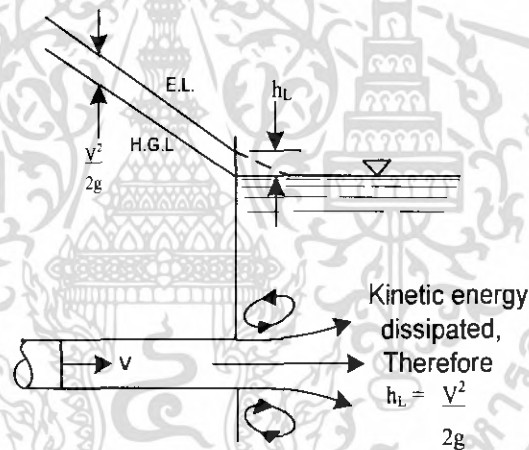
รอยต่อเป็นมุม  
 $k_L = 0.5$

รอยต่อมีส่วนยื่นเข้าในถัง  
 $k_L = 1.0$

รูปที่ 2.8 รอยต่อของท่อ และถังแบบต่างๆ

2) การสูญเสียเนื่องจากการไหลจากท่อเข้าสู่ถัง

เมื่อของไหลไหลออกจากท่อเข้าสู่ถังเก็บความเร็วของของไหลจะเปลี่ยนจาก  $V$  เป็น  $0$  ดังนั้นพลังงานจลน์ที่แฝงอยู่ในของไหลจึงถูกกระจายออกไป ในที่นี้ถือว่า ส.ป.ส.ของการสูญเสีย จะเท่ากับ 1 เมื่อหารค่า  $h_L$  จากสูตร ค่า  $V$  ที่ใช้คือ ความเร็วของของไหลในท่อ



รูปที่ 2.9 การสูญเสียเนื่องจากการไหลจากท่อเข้าสู่ถัง

3) การสูญเสียเนื่องจากท่อลดขนาดทันที

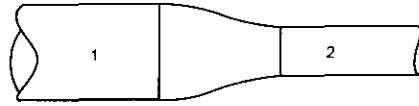
การสูญเสียในกรณีคล้ายๆ กับกรณีสูญเสียเมื่อของไหลจากถังเข้าสู่ท่อ คือ ของไหลมีความเร็วเพิ่มขึ้นและความดันลดลง ทั้งทำให้เกิดกระแสน้ำวนขึ้นในของไหลหรือการไหลแบบเทอร์บิวเลนต์ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของท่อที่มีการลดขนาดดังตารางที่ ก.1

เมื่อทราบอัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลาง  $D_2/D_1$  แล้วสามารถหาค่า ส.ป.ส. การสูญเสียพลังงาน ( $K_L$ ) จากสูตร

$$h_L = k_L \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots (2.11)$$

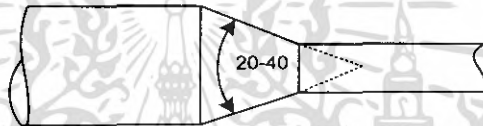
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4) การสูญเสียเนื่องจากท่อค่อยๆลดขนาด



รูปที่ 2.10 ท่อค่อยๆลดขนาด

ในท่อค่อยๆลดขนาดการสูญเสียพลังงานของของไหลจะเกิดขึ้นในช่วงที่มีการเปลี่ยนขนาดของท่อ ส่วนที่ไม่มีช่วงในการเปลี่ยนแปลงการสูญเสียกับการสูญเสียเนื่องจากการเสียดทานธรรมดา ค่า ส.ป.ส. การสูญเสียพลังงานปกติจะมีค่าประมาณ 0.04 แต่ในการใช้งานจริงส่วนโค้งของท่อขณะที่มีการลดขนาดไม่มีการทำให้ส่วนโค้งตาม Stream line คือ โค้งงอไม่ทำให้ของไหลไม่เกิดการปั่นป่วน แต่ส่วนที่มีการลดขนาดมักทำเป็นกรวย ซึ่งทำให้การสูญเสียเพิ่มขึ้นกว่าแบบข้างต้น ถ้ามุมกรวยมากเกินไป การลดขนาดของท่อจะเป็นแบบลดลงทอนที่ในกรณีที่ท่อลดขนาดเป็นกรวยและมีมุมกรวยในช่วง 20-40 องศา



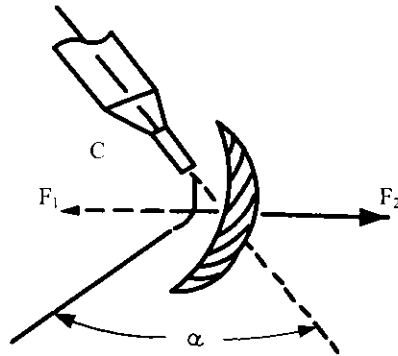
รูปที่ 2.11 ท่อลดขนาดที่เป็นกรวย

#### 5) การสูญเสียในข้อต่อของท่อและวาล์ว

เมื่อของไหลไหลผ่านข้อต่อและวาล์วของท่อต่างๆไปจะเกิดการสูญเสียพลังงานในการไหลขึ้นเพราะความขรุขระหรือรูปร่างของข้อต่อที่ทำให้ของไหลเกิดการปั่นป่วน การหาการสูญเสียยังสามารใช้สูตร  $h_L = k_L V^2/2g$  โดยการใช้ค่า  $k_L$  ดังตารางที่ ก.2

## 2.4 หลักการของโมเมนตัม

หลักการพื้นฐานของแรงกระทบและ โมเมนตัม (Impulse- momentum principle) แรงกระทบหรือแรง ผลัก (Impulse force) เป็นแรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของของเหลว ไปกระทบกับวัตถุแล้วผลักดันให้วัตถุนั้น เคลื่อนที่ หรือเป็นแรงที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลง โมเมนตัมในของไหล ส่วน โมเมนตัม คือ ผลคูณของมวลกับ อัตราเร็วของวัตถุนั้น โมเมนตัมเป็นจำนวนทางเวกเตอร์ ที่มีทั้งขนาดและทิศทางอัตราเปลี่ยนแปลงของ โมเมนตัม ในของไหลจะเกิดขึ้นได้ก็ต่ออาศัยแรงภายนอกมาช่วย และจากกฎข้อที่ 3 ของนิวตัน ที่เกี่ยวข้องกับแรงปฏิกิริยา เมื่อมีแรงภายนอกซึ่งเป็นแรงปฏิกิริยามากกระทำก็จะเกิดแรงปฏิกิริยาที่มีขนาดเท่ากันแต่ทิศทางตรงข้ามเกิดขึ้นจาก ของไหลมากระทำกับวัตถุที่ทำให้ความเร็วของไหลเปลี่ยนแปลง หรืออัตราโมเมนตัมเปลี่ยนแปลงได้ทั้งขนาด และทิศทาง ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของ โมเมนตัมของไหลก็จะหมายถึง การนำแรงเข้ามาใช้ เช่น เมื่อเรา พิจารณาถึงหัวฉีด ซึ่งใช้ฉีดของเหลวให้ไปกระทบกับใบพัดที่อยู่กับที่ใบหนึ่ง ดังรูปที่ 2.12 ด้วยอัตราการฉีดที่ สม่าเสมอ และมีความเร็วของไหลคงที่ ลำของไหลที่กระทบกับใบพัด ก็จะเบนตัวออกจากแนวเดิมเป็นมุม ทำให้ ทิศทางการเคลื่อนที่เปลี่ยนไป ความเร็วของลำของไหลก็เปลี่ยนไปด้วย มีผลให้โมเมนตัมของของไหล มีค่า เท่ากับผลคูณของมวลของไหลเปลี่ยนไปแสดงว่าต้องมีแรงปฏิกิริยาจากลำของไหลที่ไปกระทบคือ  $F_1$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

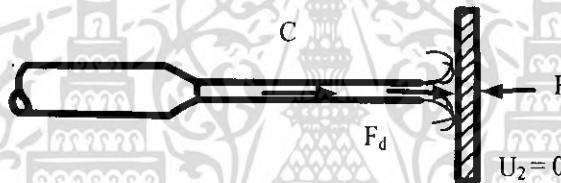


รูปที่ 2.12 หลักการพื้นฐานของแรงกระทบและ โมเมนตัม

**การประยุกต์ใช้สมการโมเมนตัม**

การประยุกต์ใช้สมการโมเมนตัมมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. แรงพลวัตกระทำต่อแผ่นเรียบสถิต (Dynamic force on a static flat plate) ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ของไหลกระทบแผ่นผิวเรียบสถิต

เมื่อมีของไหลที่มีความเร็ว  $C$  พุ่งกระทบแผ่นผิวเรียบอยู่กับที่ ดังรูปที่ 2.13 จะมีแรงพลวัต  $F_d$  เกิดจากโมเมนตัมของของไหลขณะกระทบแผ่นผิวเรียบ เป็นผลให้เกิดแรงต้านที่แผ่นผิวเรียบมีขนาดเท่ากัน คือ  $F_1$  แต่มีทิศตรงกันข้าม

จากสมการ โมเมนตัม  $\sum F_x = \rho Q(U_1 - U_2)$  .....(2.12)

โดยที่  $U_1 = C$  คือ ความเร็วของของไหล  
 $U_2 = 0$  เพราะแผ่นผิวเรียบอยู่กับที่

ดังนั้น จากสมการที่ 2.12 จะ ได้

$$-F_1 = \rho Q (0 - C)$$

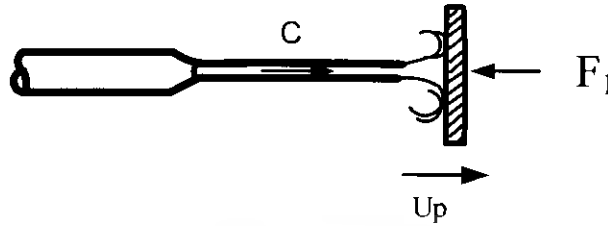
หรือ  $F_1 = \rho Q C$  ..... (2.13)

โดยที่ อัตราการไหล  $Q = A_j C$  ..... (2.14)

เมื่อ  $A_j$  คือพื้นที่หน้าตัดของของไหล

2. แรงพลวัตกระทำต่อแผ่นเรียบที่เคลื่อนที่ (Dynamic force upon a moving flat plate) แบ่งได้ 2 กรณี คือ

2.1 แผ่นเรียบเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับของไหล แสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แผ่นผิวเรียบเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับของไหล

เมื่อแผ่นผิวเรียบที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $U_p$  ในทิศทางเดียวกับกับของไหลที่มีความเร็ว  $C$  ดังนั้น ความเร็ว  $U_1 = C$  และ  $U_2 = U_p$

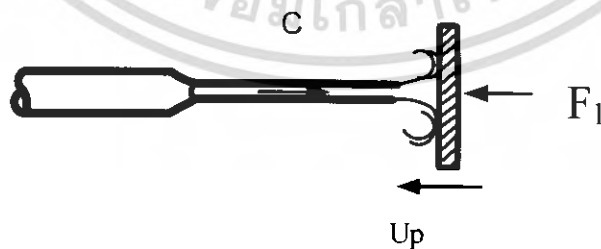
จากสมการ โมเมนตัม  $\sum F_x = \rho Q (U_2 - U_1)$   
 หรือ  $-F_x = \rho Q (U_p - C)$   
 $F_1 = \rho Q (C - U_p)$  ..... (2.15)

โดยอัตราการไหลของไหลส่วนที่กระทบกับแผ่นผิวเรียบหาได้จาก ผลคูณของพื้นที่หน้าตัดของไหล (A) กับความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างของไหลและแผ่นเรียบ  $(C - U_p)$

ดังนั้นอัตราการไหล  $Q = A_j (C - U_p)$  ..... (2.16)

จากสมการที่ 2.16 จะเห็นได้ว่าแรงพลวัต  $F_1$  มีค่าที่ต่อเมื่อ  $C > U_p$   
 ถ้า  $C \leq U_p$  จะ ไม่มีแรงพลวัตเกิดขึ้น ( $F_1 = 0$ )

2.2 แผ่นผิวเรียบเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามกับของไหล ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แผ่นผิวเรียบเคลื่อนที่สวนทางกับของไหล

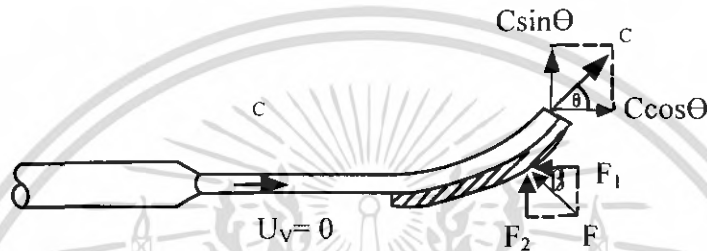
เมื่อแผ่นผิวเรียบเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $U_p$  ในทิศทางตรงกันข้ามกับของไหลที่มีความเร็ว  $C$  ดังนั้น  $U_1 = C$  และ  $U_2 = -U_p$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ โมเมนตัม  $\Sigma F_x = \rho Q (U_2 - U_1)$   
 $- F_x = \rho Q (-U_p - C)$   
 หรือ  $F_1 = \rho Q (C + U_p)$  ..... (2.17)  
 โดยที่อัตราไหล  $Q = A_j (C + U_p)$  ..... (2.18)

2.3 แรงพลวัตกระทำต่อแผ่นผิวโค้งสถิต (Dynamic force on a static vance) แสดงได้ดังรูปที่ 2.16

เมื่อของไหลที่มีความเร็ว C กระแทกผิวโค้งเรียบที่อยู่กับที่ดังรูปที่ 2.16 จะทำให้ความเร็วที่จุดเข้าแผ่นผิวโค้งเท่ากับความเร็วที่ออกจากแผ่นผิวโค้งเป็นมุม  $\theta$  กับแนวราบ ซึ่งขนาดของแรง F และมุม  $\beta$  นั้น สามารถหาได้จากการรู้ขนาดของแรง  $F_1$  และแรง  $F_2$  ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.16 ของไหลกระทบแผ่นผิวโค้งสถิต

การหาแรงในแนวแกน x ( $F_1$ )  
 สมการ โมเมนตัม  
 เมื่อความเร็ว  $\Sigma F_x = \rho Q (U_1 - U_2)$   
 $U_2 = C \cos \theta$   
 $U_1 = C$   
 ดังนั้น  $- F_x = \rho Q (C \cos \theta - C)$   
 หรือ  $F_1 = \rho Q C (1 - \cos \theta)$  ..... (2.19)  
 โดยที่อัตราการไหล  $Q = A_j C$  ..... (2.20)

การหาแรงในแนวแกน y ( $F_2$ )  
 สมการ โมเมนตัม  $\Sigma F_y = \rho Q (U_2 - U_1)$   
 เมื่อความเร็ว  $C_2 = C \sin \theta$  และ  $C_1 = 0$   
 ดังนั้น  $- F_2 = \rho Q (C \sin \theta - 0)$   
 $F_2 = \rho Q C \sin \theta$  ..... (2.21)

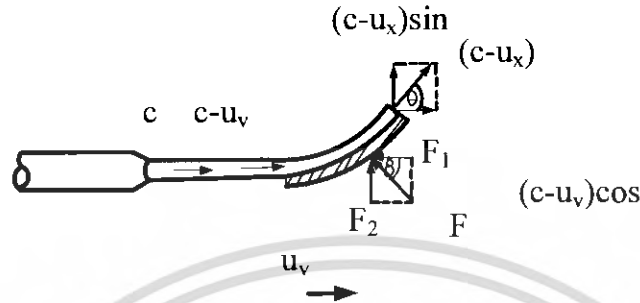
นั่นคือแรงรวม  $\vec{F} = \vec{F}_1 i + \vec{F}_2 j$  ..... (2.22)  
 $|\vec{F}| = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$  ..... (2.23)

ทิศทางของแรงรวม  $\beta = \tan^{-1} \left[ \frac{F_1}{F_2} \right]$  ..... (2.24)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 แรงพลวัตกระทำต่อผิวโค้งเคลื่อนที่ แสดงได้ดังรูปที่ 2.17

เมื่อของไหลที่มีความเร็ว  $C$  กระแทกแผ่นผิวโค้งที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเร็ว  $U_v$  ไปในทิศทางเดียวกัน ดังรูปที่ 2.17 จะทำให้เกิดความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างความเร็วของของไหล  $C$  และความเร็วของแผ่นผิวโค้ง  $U_v$  เท่ากับ  $C - U_v$  ซึ่งขนาดของแรง  $F$  และมุม  $\beta$  สามารถหาได้จากการรู้ขนาดแรง  $F_1$  และแรง  $F_2$  ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.17 ของไหลกระทบแผ่นผิวโค้งที่กำลังเคลื่อนที่

การหาแรงในแนวแกน x ( $F_1$ )

สมการ โมเมนตัม

$$\sum F_x = \rho Q (U_2 - U_1)$$

เมื่อความเร็ว

$$U_2 = (C - U_v) \cos \theta \quad \text{และ} \quad U_1 = (C - U_v)$$

ดังนั้น

$$-F_x = \rho Q [(C - U_v) \cos \theta - (C - U_v)]$$

หรือ

$$F_1 = \rho Q (C - U_v) (1 - \cos \theta) \quad \dots\dots\dots(2.25)$$

โดยที่อัตราการไหล

$$Q = A_v (C - U_v) \quad \dots\dots\dots(2.26)$$

การหาแรงในแนวแกน y ( $F_2$ )

สมการ โมเมนตัม

$$\sum F_y = \rho Q (U_2 - U_1)$$

เมื่อความเร็ว

$$C_2 = (C - U_v) \sin \theta \quad \text{และ} \quad C_1 = 0$$

ดังนั้น

$$F_2 = \rho Q [(C - U_v) \sin \theta - 0] \quad \dots\dots\dots(2.27)$$

โดยที่

$$F_2 = \rho Q (C - U_v) \sin \theta$$

นั่นคือแรงรวม

$$\vec{F} = \vec{F}_1 i + \vec{F}_2 j \quad \dots\dots\dots(2.28)$$

$$|\vec{F}| = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$$

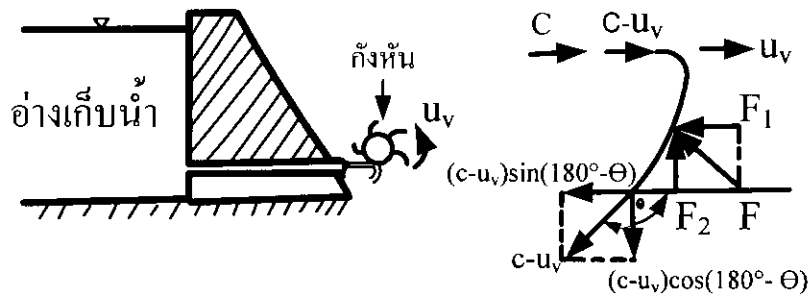
ทิศทางของแรงรวม

$$\beta = \tan^{-1} \left[ \frac{F_1}{F_2} \right]$$

ในทำนองเดียวกันถ้าเป็นกรณีที่แผ่นผิวโค้งเคลื่อนที่สวนทางกับทิศทางการไหลก็แทนค่าความเร็วของแผ่นผิวโค้งทั้งหมดให้มีเครื่องหมายลบ จะสามารถหาขนาดและทิศทางของแรงรวมได้

2.5 แรงพลวัตของของไหลกระทำต่อกังหันแบบกระแทก

กังหันแบบกระแทกมีลักษณะเป็นวงล้อขนาดใหญ่ โดยมีแพนโลหะ วางตัวเป็นอนุกรม รอบวงล้อดังรูปที่ 2.18k มีลักษณะการทำงาน คือ จะต้องมีการอาศัยของของไหลมาขับเคลื่อนวงล้อจากนั้นเพลลาของกังหันก็จะเอหมุนทำให้เกิดกำลังงานสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. กระแสน้ำจากเขื่อนกระทำต่อกังหันแบบกระแทก      ข. เวกเตอร์ของแรงและความเร็ว

รูปที่ 2.18 กังหันแบบกระแทก

ถ้าให้  $U_v$  คือ ความเร็วของวงล้อกังหันแบบกระแทกที่มีรัศมี  $r$  m.

$N$  คือ จำนวนรอบต่อนาทีของกังหัน

ดังนั้นความเร็วของวงล้อกังหัน

$$U_v = \frac{2\pi r N}{60} \quad \text{m/s} \quad \dots\dots\dots (2.29)$$

เมื่อกระแสของไหลมีความเร็ว  $C$  พุ่งเข้ากระทบแผ่นโลหะของกังหัน จะทำให้เกิดความเร็วสัมพัทธ์ตามแนวโค้งของแพนกังหันคือ  $C - U_v$

แรงตามแนวราบ  $F_1$  หาได้จากสมการโมเมนตัมต่อไปนี้

$$\sum F_x = \rho Q (U_2 - U_1)$$

เนื่องจากความเร็ว

$$U_2 = (C - U_v) \cos(180 - \theta) \quad \text{และ} \quad U_1 = (C - U_v)$$

ดังนั้น

$$- F_1 = \rho Q [-(C - U_v) \cos(180 - \theta) - (C - U_v)]$$

หรือ

$$F_1 = \rho Q (C - U_v) [1 + \cos(180 - \theta)] \quad \dots\dots\dots (2.30)$$

โดยที่อัตราการไหล

$$Q = A_j V \quad \dots\dots\dots (2.31)$$

เมื่อ  $A_j$  คือ พื้นที่หน้าตัดของของไหล

แรงตามแนวตั้ง  $F_2$  หาได้จากสมการโมเมนตัมต่อไปนี้

$$\sum F_y = \rho Q (C_2 - C_1)$$

เนื่องจากความเร็ว

$$V_2 = (C - U_v) \sin(180 - \theta) \quad \text{และ} \quad C_1 = 0$$

ดังนั้น

$$F_2 = \rho Q [-(C - U_v) \sin(180 - \theta) - 0]$$

$$F_2 = -\rho Q (C - U_v) \sin[(180 - \theta)] \quad \dots\dots\dots (2.32)$$

กำลังงานที่ได้จากกังหัน

$$P = F_1 U_v \quad \dots\dots\dots (2.33)$$

แทนค่า  $F_1$  จากสมการที่ 2.30 ลงในสมการที่ 2.33 จะได้

$$P = \rho Q U_v (C - U_v) [1 + \cos(180 - \theta)]$$

$$P = \rho Q (C U_v - U_v^2) [1 + \cos(180 - \theta)] \quad \dots\dots\dots (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณี  $\rho, C, Q$  และ  $\theta$  เป็นค่าคงที่ ดังนั้น  $U_v$  จะเป็นตัวแปรอิสระ (Independent variable) นั่นคือ กำลังงานสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อ

$$\frac{dP}{dU_v} = 0 \quad \dots\dots\dots(2.35)$$

แทนค่า P จากสมการที่ 2.34 ในสมการที่ 2.35 จะได้

$$\rho Q(C - 2U_v)[1 + \cos(180 - \theta)] = 0 \quad \dots\dots\dots(2.36)$$

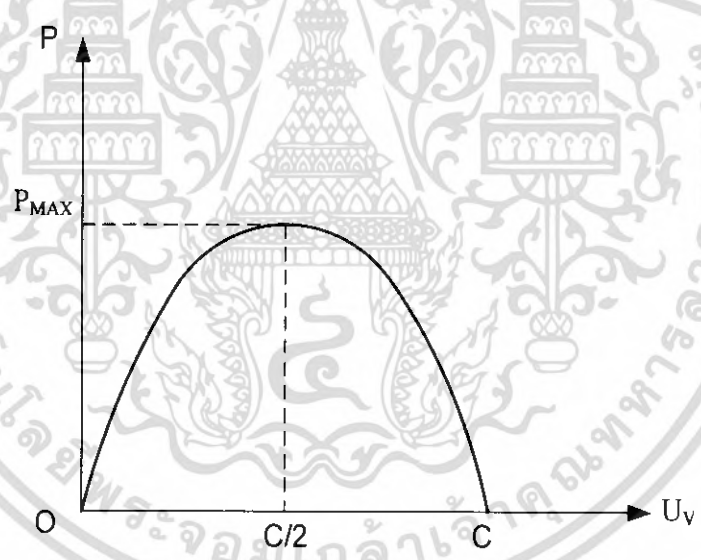
สมการที่ 2.36 จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อ  $C - 2U_v = 0$

หรือ 
$$U_v = \frac{C}{2} \quad \dots\dots\dots(2.37)$$

นั่นคือ P สูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อ  $U_v = C/2$  ถ้าแทนค่า  $U_v$  นี้ในสมการที่ 2.34 จะได้ กำลังงานสูงสุดคือ

$$P_{MAX} = \frac{\rho Q C^2}{4} [1 + \cos(180 - \theta)] \quad \dots\dots\dots(2.38)$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและความเร็วรอบของวงล้อกังหัน จะได้ว่าความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง P กับ  $U_v$

หลักการดังกล่าวจะนำไปใช้กับกังหันเพลตัน จะออกแบบให้มีถ้วยรับน้ำผ่าครึ่งประกบกันอยู่คู่กัน เป็นไปในลักษณะ ไบกันหัน(Bucket) การชนของน้ำจะกระทำกับจุดศูนย์กลางของไบกันหัน และจะกระจายออกทำมุม 160-170 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 กังหันน้ำ (Hydraulic turbines) เป็นเครื่องจักรที่ใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลงพลังงานในตัวของน้ำที่มีอยู่ในรูปของพลังงานกล ให้เป็นพลังงานกล และนำพลังงานที่ได้รับการเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าในที่สุด ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการติดตั้งโรงไฟฟ้ากังหันน้ำ ได้แก่ อ่างเก็บน้ำ ท่อสำหรับส่งน้ำ ตัวกังหัน สูงกว่าโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแต่อาจจะมีข้อได้เปรียบมากกว่าซึ่งก็คือ

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

กังหันน้ำจะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือกังหันแรงดล (Impulse turbine) และกังหันแรงปฏิกิริยา (Reaction turbine)

กังหันแรงดล คือ กังหันที่ไม่เกิดการลดความดันของน้ำ ในขณะที่น้ำไหลผ่านกังหัน กังหันแรงดลชนิดที่ใช้กันทั่วไป คือ กังหันเพลตัน ซึ่งเหมาะสมสำหรับหัวพลังงานของน้ำที่สูงๆประมาณ 150-2000 เมตร

สำหรับกังหันแรงปฏิกิริยา คือ กังหันลดความดันของน้ำ ในขณะที่น้ำไหลผ่านกังหัน แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะการไหลของน้ำ คือ

1. กังหันแบบไหลตามรัศมีหรือแบบใบพัดผสม (radial flow or mixed flow)
2. กังหันแบบไหลตามแนวแกน (axial flow)

กังหันน้ำแบบไหลตามรัศมี ที่สำคัญมีชื่อว่า กังหันฟรานซิส (Francis turbine) ส่วนกังหันเป็นไหลตามแนวแกนที่สำคัญมีอยู่ 2 ชนิดคือ กังหันใบพัด (propeller turbine) และกังหันคัปแลน (Kaplan turbine) กังหันชนิดแรกมีใบครีป (blade) แบบยึดอยู่กับที่ แต่ชนิดหลังมีใบครีปแบบที่สามารถปรับมุมได้ ในตาราง 2.1 แสดงถึงค่าหัวพลังงาน ค่ากำลังงาน และค่าประสิทธิภาพโดยทั่วไปของใบกังหันแต่ละใบ

ตารางที่ 2.1 ช่วงการทำงานของกังหันน้ำชนิดต่างๆ

	กังหันล้อเพลตัน	กังหันฟรานซิส	กังหันคัปแลน
ความเร็วรอบ(rad)	0.05-0.4	0.4-2.2	1.8-4.6
หัวพลังงาน (m)	100-1700	80-500	ไม่เกิน 400
กำลังผลิตสูงสุด (kw)	55	40	30
ประสิทธิภาพสูงสุด(%)	93	94	94
กลไกการปรับภาระ	วาล์วเข็มและครีปผันน้ำ	ใบครีปน้ำ	ใบครีปน้ำ

กังหันน้ำแบบสูบกลับ (Pump turbine) คือเครื่องจักรที่สามารถทำงานเป็นได้ทั้งเครื่องสูบน้ำและกังหัน โดยในช่วงระยะเวลาที่ต้องการพลังงานไฟฟ้าต่ำ เช่นในเวลากลางคืน จะถูกใช้เป็นปั๊มในการสูบน้ำขึ้นไปเก็บในอ่างเก็บน้ำระดับสูง ซึ่งน้ำถูกสูบขึ้นมาเก็บนี้อาจจะถูกนำมาใช้สำหรับผลิตกำลังงาน ในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 เครื่องสูบน้ำ (Pump)

เครื่องสูบน้ำหรือปั๊ม (Pump) คือเครื่องกลสำหรับสูบของไหล เพื่อให้ของไหลนั้นให้เคลื่อนที่หรือเปลี่ยนระดับความสูงการสูบของไหล (Pumping) หมายถึงการนำเอาพลังงานจำนวนหนึ่งมาใส่ให้กับของไหลแล้วทำให้ของไหลเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปอีกตำแหน่งหนึ่ง เช่น การไหลไปตามท่อหรือทางอื่นๆ ฯลฯ หรือทำให้ของไหลเคลื่อนที่เพื่อทำให้เปลี่ยนระดับความสูงจากระดับหนึ่งไปยังอีกระดับหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในที่ซึ่งมีระดับความสูงกว่าเมื่อมองในแง่การถ่ายโอนพลังงาน เครื่องสูบคือเครื่องจักรกลที่ทำงานกลับข้างกับไฮดรอลิกมอเตอร์ ใช้แปลงพลังงานของไหลผ่านให้กลายเป็นพลังงานกลที่เพลาลูกสูบและกล่าวได้ว่า เครื่องสูบบแบบลูกสูบชักจะสมนัยกับไฮดรอลิกมอเตอร์แบบลูกสูบชัก เครื่องสูบกังหันน้ำจะสมนัยกับกังหันน้ำแบบปฏิกิริยา (Hydraulic reaction turbine) หากของไหลที่สูบเป็นน้ำ ก็เรียกเครื่องสูบที่ใช้สูบน้ำว่า เครื่องสูบน้ำ ถ้าใช้เครื่องสูบน้ำสูบลูกอากาศก็เรียกเครื่องสูบน้ำว่า เครื่องสูบลูกอากาศ หรือเครื่องดูดอากาศ

### 2.6.1 แบบเครื่องสูบน้ำ

เครื่องสูบสามารถจำแนกได้หลายวิธี เช่น ตามลักษณะการใช้งาน (เช่น Suction system, Flood suction system, Siphon system) หรือ ตามชนิดของตัวขับ (ขับด้วยมือ, ขับด้วยเครื่องยนต์) หรือตามลักษณะรูปร่าง (เพลานอน เรือนผ่า, เพลาคตั้ง) ซึ่งในแต่ละวิธีมีข้อจำกัดข้อแตกต่างและการเชื่อมล้ากัน การจำแนกประเภทที่รัดกุมปราศจากอิทธิพลภายนอก และได้รับความนิยมมากในปัจจุบันคือ การจำแนกประเภทโดยพิจารณาการเพิ่มพลังงานแก่ของเหลว โดยวิธีนี้เครื่องสูบจะแยกออกเป็น 2 ประเภท ใหญ่ๆ คือ

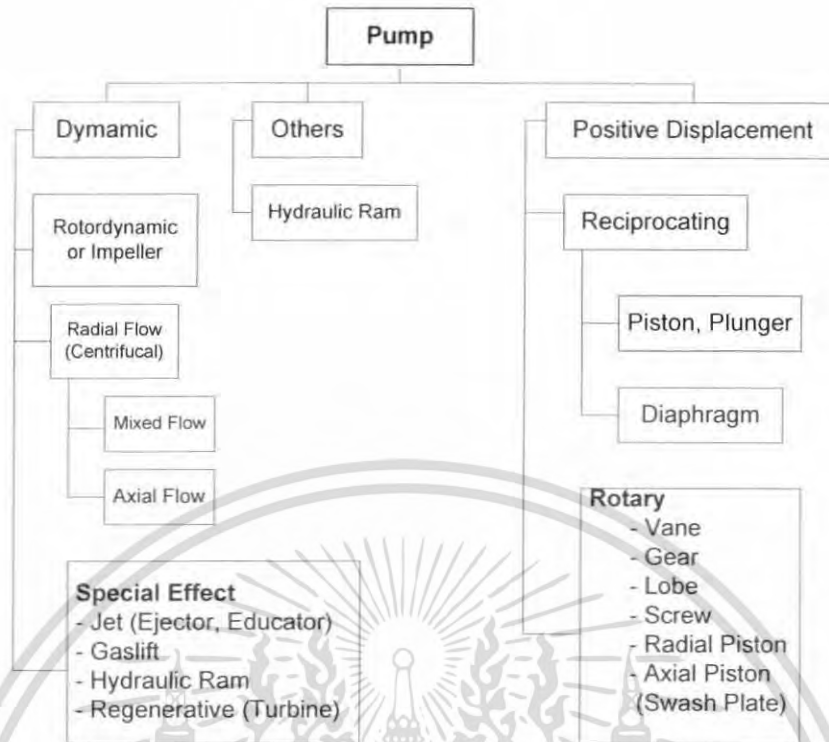
#### - เครื่องสูบน้ำแบบไหลต่อเนื่อง (Dynamic pump)

เป็นเครื่องสูบที่เพิ่มพลังงานให้ของไหล โดยการเพิ่มความเร็วให้กับของไหลก่อนแล้วหลังจากนั้นจะลดความเร็วของของไหลลงเพื่อเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นพลังงานศักย์หรือความดัน ในรูปความดันที่ปลายส่งต่อ

#### - เครื่องสูบน้ำแบบไหลที่สะกอน

เป็นเครื่องสูบที่เพิ่มพลังงานให้กับของไหล โดยชิ้นส่วนเคลื่อนที่เพื่ออัดหรือดันของเหลวภายในปริมาตรปิดให้มีความดันสูงขึ้น แล้วไหลผ่านลิ้น หรือช่องเปิด

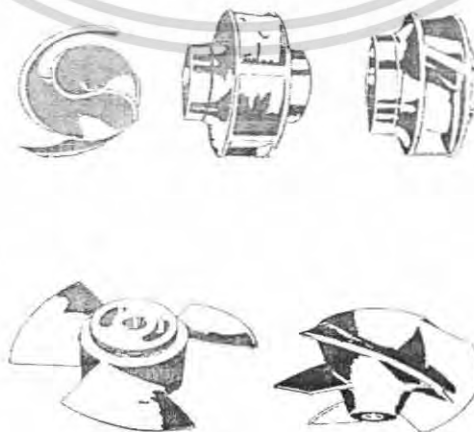
นอกจากการจำแนกเครื่องสูบออกเป็น 2 ประเภท ใหญ่ๆ นั้น เครื่องสูบยังถูกแบ่งประเภทย่อย ลงไปอีก ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การจำแนกประเภทของเครื่องสูบน้ำ

2.6.2 เครื่องสูบน้ำกังหันหรือเครื่องสูบน้ำแบบใบพัดหมุน (Rotor dynamic pump)

เครื่องสูบน้ำแบบใบพัดหมุนนี้ คือ เครื่องสูบน้ำที่มีชิ้นส่วนเคลื่อนที่ติดอยู่บนเพลลาหรือแกนหมุนและมีครีบบหรือบานใบพัด (Blade or Vane) ประกอบอยู่กับชิ้นส่วนที่หมุนนี้เรียกว่าใบพัดหรือใบจักร (Impeller) การหมุนของเพลลาทำให้อุณหภูมิของของเหลวที่เคลื่อนที่อยู่ภายใน ช่องว่างระหว่างครีบบใบพัดกับใบพัด และไหลออกไปจากทางด้านดูดเข้าสู่ด้านดูดเข้าสู่ด้านส่งทำให้ความดันทางด้านดูดลดลง และของเหลวภายในท่อจึงไหลเข้าสู่ปากทางด้านเข้าของใบพัด การที่ของเหลวถูกบังคับให้หมุนไปกับใบพัด พลังงานจากใบพัดจะถูกส่งต่อให้กับของเหลวในรูปพลังงานจลน์ พลังงานที่เพิ่มขึ้นในระหว่างที่ว่างของเหลวไหลสู่ใบพัดนั้น จะถูกแปลงความดัน โดยการทำให้ช่องออกค่อยๆ ขยายใหญ่ขึ้นเพื่อลดความเร็ว ในรูปที่ 2.21 จะแสดงลักษณะใบพัดของเครื่องสูบน้ำแต่ละประเภท

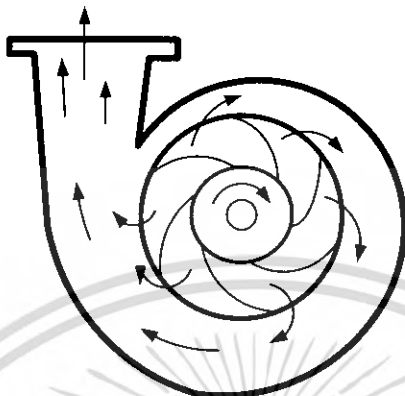


รูปที่ 2.21 ลักษณะใบพัดของเครื่องสูบน้ำแต่ละประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.3 เครื่องสูบบแบบไหลตามรัศมีหรือแบบหอยโข่ง (Radial flow or Centrifugal pump)

ของเหลวจะไหลเข้าสู่ใบพัดตรงช่องบริเวณศูนย์กลางที่เรียกว่า Impeller eye แล้วไหลเข้าช่องทางระหว่างครีบบใบพัดที่ทางออกที่ขอบนอก โดยอาศัยหลักการแรงหนีศูนย์กลาง ซึ่งประมาณได้ว่าเป็นการไหลในแนวรัศมี ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ลักษณะการไหลของน้ำภายในเครื่องสูบบแบบหอยโข่ง

## 2.7 เครื่องกังหันน้ำ

เครื่องกังหันน้ำเป็นเครื่องจักรกลของไหล (Turbo machinery) ชนิดหนึ่ง ทำงานโดยการถ่ายโอนพลังงานระหว่างเครื่องจักรกลกับของไหล ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ เครื่องสูบ (Pump) ดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 2.6 และเทอร์ไบน์หรือกังหัน (Turbine) โดยที่เครื่องสูบจะเป็นตัวใส่พลังงานให้กับของไหลโดยเปลี่ยนจากพลังงานเชิงกลเป็นพลังงานเชิงกลศาสตร์ ส่วนกังหันนั้นเป็นตัวรับพลังงานเชิงกลศาสตร์มาจากของไหลแล้วแปลงมาเป็นพลังงานเชิงกล เพื่อไปหมุนเพลาคู่ออกแรงไฟฟ้า (Electric generator) ต่อไป ทั้งนี้เครื่องจักรกลของไหลจะมีแรงกระทำระหว่างใบจักรกับของไหล ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์ระหว่างใบจักรกับของไหล

เครื่องจักรกลของไหลแต่ละประเภทจะมีเนื้อหาอยู่มากผู้สนใจสามารถศึกษาในรายละเอียดเฉพาะเรื่องในโอกาสต่อไป ในที่นี้จะกล่าวถึงเนื้อหาเบื้องต้น ซึ่งประกอบด้วยประเภทของเครื่องจักรกลของไหล(เครื่องกังหันน้ำ) ได้แก่ กังหันปฏิกิริยา (Reaction turbine) และกังหันแบบแรงกระทบ (Impulse turbine)

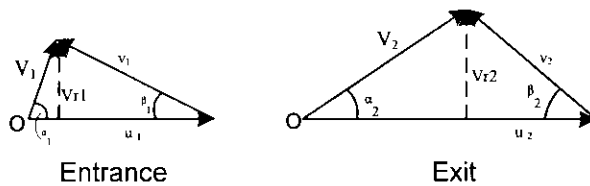
รวมทั้งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเร็วจำเพาะของกังหันแบบแรงกระทบ

### 2.7.1 เครื่องจักรกลที่คล้ายคลึงกัน

ในการสร้างแบบจำลองเพื่อออกแบบ และทดสอบเครื่องจักรกลของไหลนั้น แบบจำลองต้องมีสภาพเหมือนเชิงเรขาคณิตกับต้นแบบ และจะต้องมีแผนภาพ ของเวกเตอร์ความเร็วตรงทางเข้าและที่ทางออกจากใบพัดเหมือนกันด้วยถือว่าแบบจำลองกับต้นแบบมีความคล้ายคลึงกัน

เมื่อพิจารณาแผนภาพของเวกเตอร์ความเร็วตรงจุดที่ออกของใบพัดดังแสดงในรูปที่ 2.59 โดย  $\beta$  คือมุมของใบจักร  $u$  เป็นความเร็วของใบจักรตรงปลายใบจักร  $v$  เป็นความเร็วสัมผัสของของไหลกับใบจักร  $V$  เป็นความเร็วจริงที่ของไหลไหลออกจากใบจักร ซึ่งเป็นผลรวมของเวกเตอร์ของ  $u$  และ  $v$  ส่วน  $V_r$  เป็นความเร็วประกอบแนวรัศมีของ  $V$  ซึ่งเป็นอัตราส่วนกับอัตราการไหล และ  $\alpha$  คือมุมระหว่างความเร็วจริง  $V$  ทำกับ  $u$  ซึ่งอยู่

ในแนวสัมผัสกับวงล้อใบพัด ถ้าหากแบบจำลองมีความคล้ายคลึงเชิงเรขาคณิตกับต้นแบบ แสดงว่ามุม  $\alpha$  ต้องเท่ากันทั้งแบบจำลองกับต้นแบบ



รูปที่ 2.23 แผนภาพของเวกเตอร์ความเร็วตรงจุดที่ออกของใบพัด

2.7.2 ความเร็วจำเพาะ (Specific speed)

ในการออกแบบขั้นต้นและการเลือกใช้เครื่องจักรกลของไหล ได้ยึดหลักการของเครื่องจักรกลที่มีความคล้ายคลึงกัน จะต้องมีค่าความเร็วจำเพาะเท่ากัน ความเร็วจำเพาะ ( $N_s$ ) ของกังหันที่มีความคล้ายคลึงกันคือความเร็วรอบที่สามารถให้กำลังงาน 1 หน่วยที่เฮด 1 หน่วยและเนื่องจากกำลังงาน P เป็นสัดส่วนกับ Q.H ดังนั้น

$$\frac{P}{Q \cdot H} = \text{ค่าคงที่} \dots\dots\dots (2.39)$$

เมื่อจัด D และ Q ออกจะได้

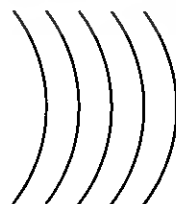
$$\frac{N \cdot P^{1/2}}{H^{5/4}} = \text{ค่าคงที่} \dots\dots\dots (2.40)$$

สำหรับกำลังงาน 1 หน่วย ที่เฮด 1 หน่วย จะได้ความเร็วจำเพาะของกังหัน

$$N = \frac{N \cdot P^{1/2}}{H^{5/4}} \dots\dots\dots (2.41)$$

2.7.3 ทฤษฎีใบจักรต่อเนื่อง

เครื่องจักรกลของไหลทำงานได้โดยการรับพลังงานมาจากของไหล หรือใส่พลังงานให้กับของไหลในลักษณะของการไหลที่ต่อเนื่อง กับผ่านชุดใบจักรที่เคลื่อนที่ ซึ่งชุดใบจักรเหล่านี้เรียกว่า ใบจักรต่อเนื่อง (Cascade) และเมื่อพิจารณาการไหลผ่านใบจักรต่อเนื่องก็สามารถหาประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของเครื่องจักรกลได้ ระบบใบจักรต่อเนื่องอย่างง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.24 เวกเตอร์ความเร็วจะถูกบดบังเบนไปตามมุมใบจักร จะเกิดแรงกระทำต่อของไหล แต่จะไม่มีงานเกิดขึ้นกับของไหลเพราะงานจะเกิดขึ้นเมื่อใบจักรหมุน



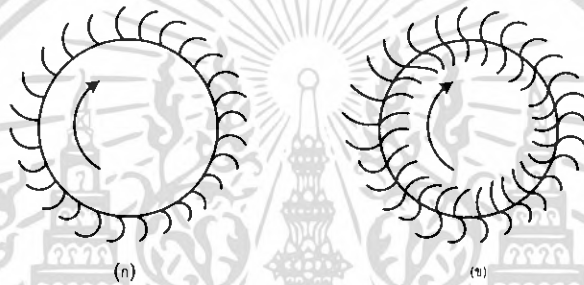
รูปที่ 2.24 ระบบใบจักรต่อเนื่องอย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเครื่องจักรกลของไหลทำงานโดยการหมุน ดังนั้นระบบใบจักรต่อเนื่องจึงมักจัดวางให้สมมาตรรอบของวงกลม ดังแสดงในรูปที่ 2.25 (ก) ถ้าหากของไหลไหลเข้าสู่ใบจักรต่อเนื่องที่อยู่กับที่ในทิศทางรัศมี โมเมนต์จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์ ซึ่ง โมเมนต์จะเพิ่มขึ้นมากกว่าหรือเพิ่มขึ้นน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับปริมาณมวลสารต่อหน่วยเวลา ของการไหลและเกิดความเร็วประกอบในแนวสัมผัส  $V_t$  จึงสามารถเขียนแรงบิดที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

$$T = \rho Q \cdot r \cdot V_t \quad \dots\dots\dots (2.42)$$

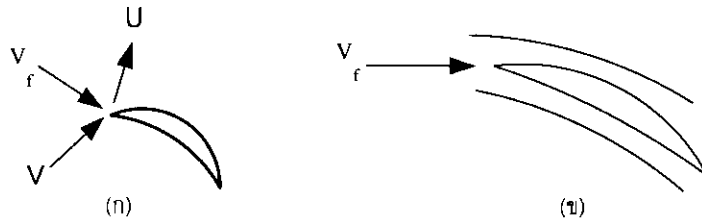
เมื่อพิจารณาชุดใบจักรในรูปที่ 2.25 (ข) เมื่อองจักรในหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม  $\omega$  อยู่ในองจักรตัวนอกซึ่งอยู่กับที่ ระบบดังกล่าวจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องให้การไหลเข้าสู่ใบจักร เกิดความปั่นป่วนน้อยที่สุดนั่นคือของไหลเข้าสู่ใบจักรในทิศทางสัมผัสกับตัวใบจักร ดังแสดงในรูปที่ 2.26 (ก) แต่ถ้าหากความเร็วสัมผัสไม่อยู่ในแนวสัมผัสกับใบจักรแล้วจะเกิดความแยกตัว (Separation) ดังแสดงในรูปที่ 2.26 (ข)



รูปที่ 2.25 ใบจักรต่อเนื่องรอบวงกลม (ก) องจักรติดกับที่ (ข) องจักรภายในหมุน

การแยกตัวในรูปที่ 2.26 (ข) จะก่อให้เกิดความสูญเสียมากขึ้นอย่างรวดเร็ว (ประมาณเป็นค่ายกกำลังสอง) ตามมุมที่เบี่ยงเบนไปจากแนวสัมผัสก็อาจเกิดการแยกตัวขึ้นได้ทั้งนี้เนื่องจากความโค้งของใบจักรหรือการขยายตัวของกรไหลซึ่งจะทำให้ชั้นขอบเขต (Boundary layer) หนาขึ้น จนกระทั่งหยุดนิ่งในที่สุดการสูญเสียเหล่านี้เรียกว่า การสูญเสียเนื่องจากการกระตุกหรือความปั่นป่วน (Shock or turbulence losses) เมื่อของไหลออกจากชุดใบจักรต่อเนื่องจะเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วทั้งขนาดและทิศทาง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ของโมเมนต์และเกิดงานกระทำต่อใบจักรต่อเนื่อง (กรณีของกังหัน) โดยหลักการกังหันนั้นต้องการให้ของไหลไม่มีโมเมนต์เหลืออยู่เลยหลังจากกระทบใบจักรแล้วหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ต้องการให้ของไหลถ่ายโอนพลังงานทั้งหมดให้กับใบจักร เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

การออกแบบเครื่องจักรของไหลจำเป็นต้องมีการจัดวางใบพัดและรูปลักษณะของทางน้ำเข้ากับใบจักรให้เหมาะสมจึงได้ประสิทธิภาพสูงสุดสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการออกแบบในขณะเดียวกันการออกแบบจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของเครื่องจักรกลปริมาณต่อหน่วยมวลสารที่ต้องการ ตลอดจนความหนาแน่นของไหล



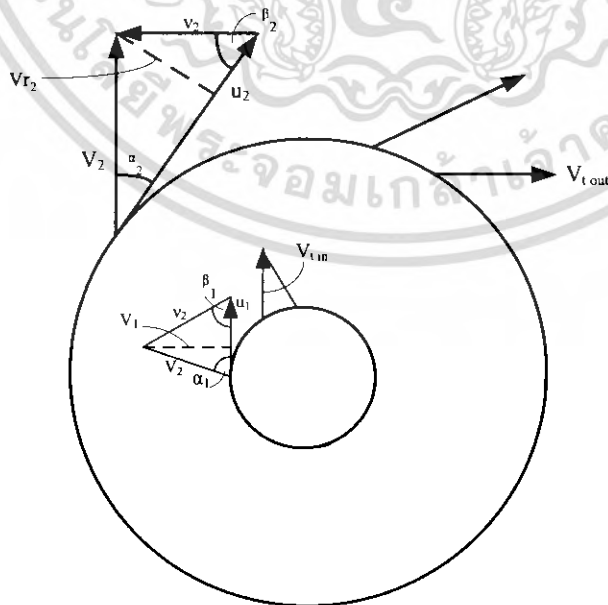
รูปที่ 2.26 การไหลเข้าสู่ใบจักร (ก) ในแนวสัมผัสใบจักร (ข) ไม่สัมผัสใบจักร

2.7.4 ทฤษฎีเครื่องจักรกลของไหล

ดังได้กล่าวมาแล้วว่า กังหันรับพลังงานมาจากของไหล ส่วนเครื่องสูบ เครื่องเป่าลม และคอมเพรสเซอร์เป็นตัวเพิ่มพลังงานให้กับของไหลโดยผ่านกังหัน (Runner) ซึ่งมีใบจักรติดอยู่โดยรอบเนื่องจากการเคลื่อนที่ของใบจักรอยู่ที่ทิศทางสัมผัสดังนั้นงานที่ได้จึงเกิดจากแรงประกอบในทิศทางสัมผัสและในระนาบทิศทางเดียวกัน ส่วนแรงประกอบในทิศทางรัศมีจะไม่ทำให้เกิดงานขึ้น เพราะไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวรัศมี ในทฤษฎีเครื่องจักรกลของไหล จะถือว่าไม่มีความเสียดทานและทำให้ของไหลไหลผ่านเครื่องจักรกลอย่างราบรื่น ก็คือสมมุติว่ามีใบจักรจำนวนไม่จำกัดที่ทำให้ความเร็วสัมผัสของของไหลในทิศทางสัมผัสกับใบจักรเสมอ และสามารถใช้สมการโมเมนต์ของโมเมนตัมในการคำนวณได้ นั่นคือสำหรับการไหลคงตัวภายในปริมาตรควบคุมดังแสดงในรูปที่ 2.27 จะได้

$$T = \rho Q [(r \cdot V_t)_{OUT} - (r \cdot V_t)_{IN}] \dots\dots\dots (2.43)$$

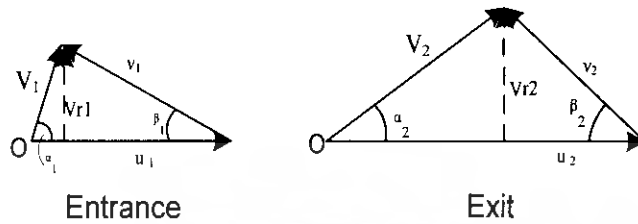
โดยที่  $T$  คือ แรงบิด (Torque) ที่กระทำต่อของไหลในปริมาตรควบคุม  
 $\rho Q (r \cdot V_t)_{OUT}$  คือ โมเมนต์ของโมเมนตัมที่ออกจากปริมาตรควบคุม  
 $\rho Q (r \cdot V_t)_{IN}$  คือ โมเมนต์ของโมเมนตัมที่เข้ามาสู่ปริมาตรควบคุม



รูปที่ 2.27 การไหลตัวผ่านปริมาตรควบคุมที่สามารถรอบวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาความสัมพันธ์ต่างๆของใบจักรมักพิจารณาจากแผนภาพของเวกเตอร์ความเร็วรอบจุดศูนย์กลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.28 โดยที่เลขกำกับ 1 และ 2 แทนความเร็วของของไหล (ความเร็วจริง)  $u$  คือความเร็วขอบนอกของกังจักร และ  $v$  คือความเร็วสัมผัสของของไหลเทียบกับกังจักร



รูปที่ 2.28 แผนภาพเวกเตอร์ของความเร็วรอบจุดกึ่งกลาง

จากรูปที่ 2.28 ความเร็วจริง  $V$  และ  $u$  เริ่มจากจุด 0 โดยมีความเร็วสัมผัส  $v$  ต่อระหว่างความเร็วทั้ง 2 ในที่นี้  $V$  เป็นความเร็วประกอบของความเร็วในทิศทางสัมผัส  $\alpha$  คือมุมความเร็วจริง  $V$  ทำกับความเร็วขอบนอก  $u$  และ  $\beta$  เป็นความเร็วสัมผัสทำกับความเร็ว  $-u$  ก็คือมุมของใบจักร (Blade angle) จากสมมุติฐานการไหลของของไหลเป็นไปอย่างสมบูรณ์และความเร็วประกอบของความเร็วจริง ในแนวรัศมี  $V$  มีทิศทางตั้งฉากกับขอบนอกของกังจักร ดังนั้น เมื่อแทนค่าต่างๆ เหล่านี้ลงในสมการที่ 2.43 จะได้

$$\begin{aligned}
 T &= \rho Q (r_2 \cdot V_2 \cdot \cos \alpha_2 - r_1 \cdot V_1 \cdot \cos \alpha_1) \\
 &= \rho Q (r_2 \cdot Vu_2 - r_1 \cdot Vu_1) \\
 &= m (r_2 \cdot Vu_2 - r_1 \cdot Vu_1) \dots\dots\dots (2.44)
 \end{aligned}$$

โดยที่  $m$  คือ ปริมาณมวลสารต่อหนึ่งหน่วยเวลาของการไหล นั่นคือ

$$m = \rho Q = (\rho Q)_{OUT} = (\rho Q)_{IN} \dots\dots\dots(2.45)$$

จากสมการที่ (2.44) เมื่อ  $T$  เป็นบวก แสดงว่าของไหลจะมีโมเมนตัมของโมเมนตัมเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านปริมาตรควบคุมสำหรับเครื่องสูบน้ำส่วนในกรณีกึ่งหันทันนั้น เมื่อ  $T$  เป็นค่าบวก แสดงว่าของไหลจะมีโมเมนตัมลดลงเมื่อของไหลไหลผ่านปริมาตรควบคุม และเมื่อ  $T = 0$  คือการไหลในกรณีที่ไม่มีการปั๊ม จะทำให้  $r, V, u$  มีค่าคงที่ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบกระแสวนอิสระ ซึ่งมีความเร็วประกอบในทิศทางสัมผัสจะแปรเปลี่ยนผกผันกับรัศมี

ประสิทธิภาพรวมของเครื่องจักรกลของไหล เป็นผลคูณของ ประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์ (Hydraulic eff.;  $e_h$ ) ประสิทธิภาพเชิงกล (Mechanical eff. ;  $e_m$  ) และประสิทธิภาพเชิงปริมาตร (Volumetric eff. ;  $e_v$ ) ดังนั้น ประสิทธิภาพรวมมีค่าเท่ากับ

$$e = e_h \cdot e_m \cdot e_v \dots\dots\dots (2.46)$$

ประสิทธิภาพเชิงกลเป็นผลมาจากความเสียดทานภายในเครื่องจักรกล เช่น ในระบบลูกปืนและระบบขับเคลื่อนต่างๆ ส่วนประสิทธิภาพเชิงปริมาตรนั้น เป็นผลมาจากการรั่วของน้ำ กล่าวคือน้ำจำนวนหนึ่งจะไหลผ่านช่องว่างต่างๆ ในตัวเรือนเครื่องจักรกลที่ไม่ผ่านตัวกังจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.5 กังหันแบบแรงกระทบ (Impulse Turbine)

เป็นเครื่องกังหันน้ำที่มีลักษณะเป็นวงล้อขนาดใหญ่มีรูปใบพัดรูปถ้วย(Bucket) ติดอยู่ที่ขอบนอกของวงล้อดังแสดงในรูปที่ 2.30 ใบพัดรูปถ้วยเหล่านี้จะผลิต โดยการหล่อสำเร็จแล้วมาขันน็อตติดกับวงล้อภายหลัง หรืออาจจะหล่อวงหล่อวงล้อและใบพัดรูปถ้วยเป็นชิ้นเดียวกันก็ได้ เมื่อมีลำของน้ำ (Jet) พ่นมาจากหัวฉีด (Nozzle) มากระทบใบพัดรูปถ้วยตรงกลางดังรูปที่ 2.29 ซึ่งมีสันแบ่งลำของน้ำจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนออกไปทางด้านซ้าย - ขวา ของใบพัด พลังงานศักย์ของน้ำจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์และจากพลังงานจลน์ของน้ำจะเปลี่ยนเป็นพลังงานเชิงกล ทำให้ใบพัดเคลื่อนที่และหมุนเพลาวงล้อต่อไปกังหันแบบแรงกระทบที่ใช้กันใน ปัจจุบัน คือ แบบวงล้อเพลตัน(Pelton wheel) ซึ่งตั้งชื่อเป็นเกียรติแก่ Lester A.Pelton (1892-1908) กังหันชนิดนี้เหมาะสำหรับที่มีเสถียรสูงๆ



กังหันแบบแรงกระทบเป็นเครื่องจักรกลที่ได้รับพลังงานมาจาก ของไหลที่พ่นออกจากหัวฉีดภายใต้ ความดันบรรยากาศ ลำของไหลซึ่งมีความเร็วสูงพุ่งเข้ากระทบใบจักรทำให้ใบจักรหมุนน้ำที่ตกไว้จะถูกส่งมาตาม เอกสารที่ตีพิมพ์กระทรวงฯ ดังแสดงในรูปที่ 2.67 การสูญเสียเสถียร ระหว่างลำน้ำถึงหัวฉีด สามารถคำนวณได้จากค่า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

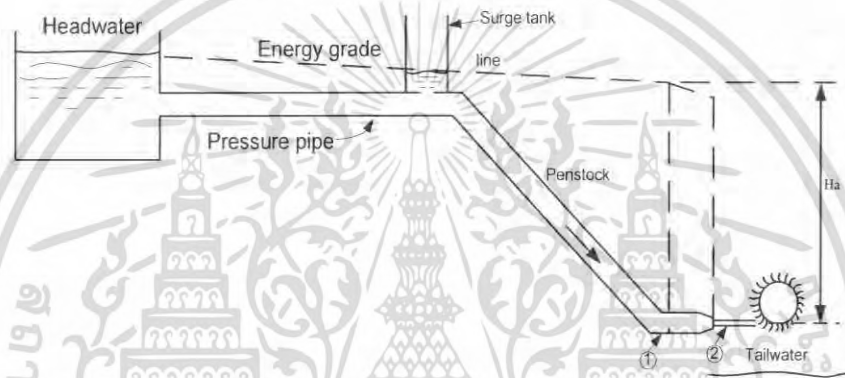
ข้อมูลความเสียดทานของท่อและสมการการคำนวณหาการสูญเสียเฮดการไหลในท่อโดยใช้สมการของเบอร์นูลลี จะพบว่าเฮดรวมที่หัวฉีดคือ

$$H = \frac{p_1}{\gamma} - \frac{v_1^2}{2g} \dots\dots\dots (2.98)$$

$$v_2 = C_v \cdot \sqrt{2g H_a} = C_v \sqrt{2g H_a} \dots\dots\dots(2.99)$$

การสูญเสียเฮดที่หัวฉีดคือ

$$\begin{aligned} H_a - \frac{v_2^2}{2g} &= H_a - C_v^2 \cdot H_a \\ &= H_a (1 - C_v^2) \dots\dots\dots(2.49) \end{aligned}$$



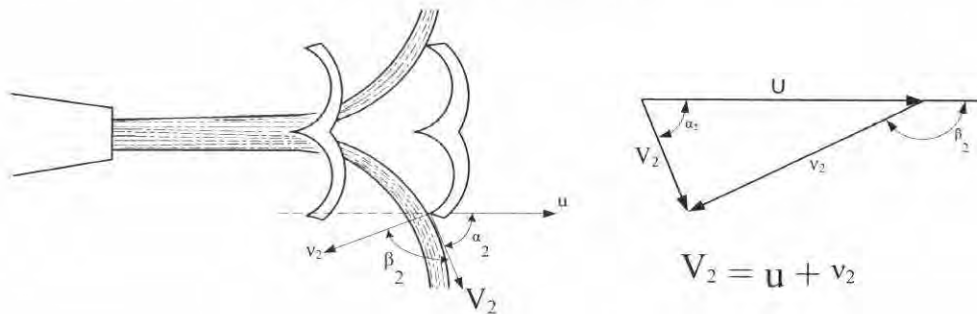
รูปที่ 2.31 ระบบการทำงานของกังหันแบบแรงกระทบ

ประสิทธิภาพหัวฉีด คือ

$$\frac{v_1^2 / 2g}{H_a} = \frac{C_v^2 \cdot H_a}{H_a} = C_v^2 \dots\dots\dots(2.50)$$

ลำน้ำซึ่งมีความเร็ว v พุ่งกระทบใบจักรซึ่งเป็นรูปถ้วยซึ่งมีสันตรงกลาง(Double-cupped buckets) ดังแสดงในรูปที่ 2.32 ทำให้การไหลแยกออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆ กัน แล้วความเร็วสัมผัสที่ปลายเบนไปเป็นมุม β ดังแสดงในรูปที่ 2.32 เมื่อพิจารณาในรูปที่ 2.32 ตรงในแนวแกน x ที่กระทำต่อใบพัดคือ  $F = \rho Q \cdot (V_r - V_r \cos \beta_2)$  จะได้กำลังงานที่กระทำต่อใบพัดเท่ากับ

$$P = F \cdot u = \rho Q \cdot u V_r (1 - \cos \beta_2) \dots\dots\dots(2.52)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.32 แสดงทิศทางการไหลของน้ำกระทบกับใบพัด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่จะให้กำลังสูงสุดตามทฤษฎีนั้น จะต้องถือเอาได้เงื่อนไข 2 ประการ คือ มุม  $\beta = 180^\circ$  และ  $u = V_2$  มีค่าสูงสุด กล่าวคือค่าของ  $u(V_2 - u)$  จะต้องมามีค่าสูงสุด ซึ่งสามารถหาค่าได้โดยการหาอนุพันธ์ เทียบกับ  $u$  แล้วให้มีค่าเท่ากับ 0 จะได้

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

นั่นคือ

$$u = V_2 / 2$$

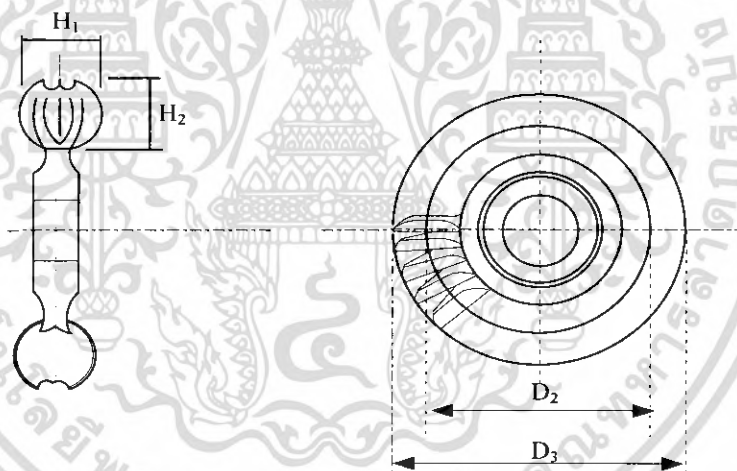
แทนค่า  $u$  ลงในสมการที่ (2.32) จะได้

$$F \cdot u = \gamma \cdot Q \cdot \frac{V_2^2}{2g} \tag{2.51}$$

เมื่อ

$$F = 2 M_s (V_2 - U) \tag{2.52}$$

ซึ่งพลังงานทั้งหมดของลำน้ำ ในทางทฤษฎีเมื่อจัดวางใบจักรวงล้อดังในรูปที่ 2.33 และเมื่อพิจารณาแผนภาพของความเร็วแล้ว จะพบว่าความเร็วจริงซึ่งน้ำที่ออกจากใบพัดจะต้องมีค่าเป็น 0 จึงทำให้เกิดกำลังงานสูงสุด



รูปที่ 2.33 การวางใบกังหันของล้อกังหันแบบเพลตัน

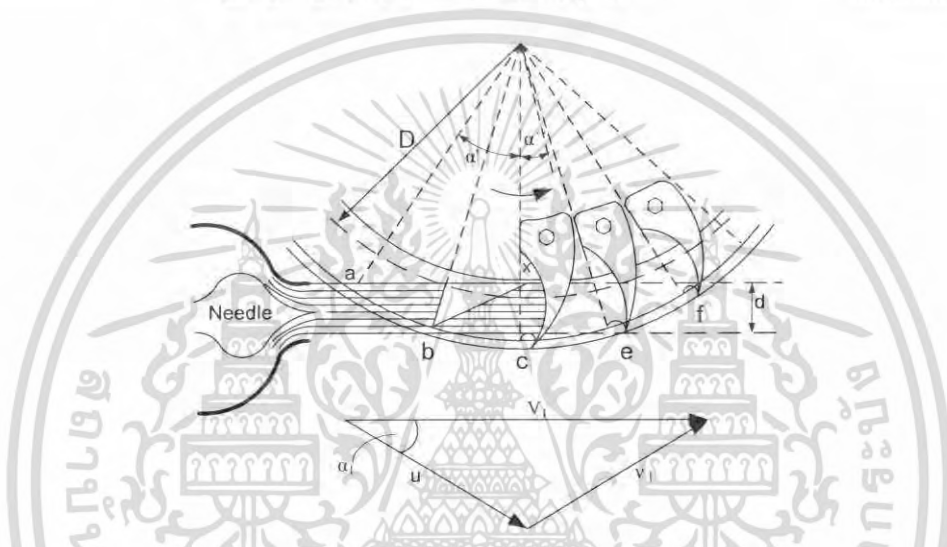
ในทางปฏิบัติเมื่อจัดวางใบรอบวงล้อ และเมื่อนำพุ่งเข้ากระทบใบจักรแล้วมีความเร็วเหลืออยู่เพื่อที่จะไหลออกได้โดยไม่ปะทะกับใบจักรอีกใบหนึ่งที่เคลื่อนที่ตามมา ตัวอย่างที่ดีของกังหันชนิดนี้ คือ แบบวงล้อเพลตัน โดยลำน้ำจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆกันหลังจากกระทบใบจักรแล้วจะไหลออกไปทางด้านข้างในแนวระดับทั้งด้านซ้ายและด้านขวา ทั้งนี้เพื่อป้องกันแรงเนื่องจาก การไม่สมดุลกระทำต่อเพลลาในขั้นตอนนี้จะมีการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้น เนื่องจากการแยกส่วนลำของน้ำ และเนื่องจากความเสียดทานของลำน้ำกับผิวของใบจักร ซึ่งจะทำให้ความเร็ว  $u$  น้อยกว่า  $V_2 / 2$  และส่วนมากจะใช้อัตราส่วนความเร็วของลำน้ำกับความเร็วใบกังหัน หรือเรียกว่า คำนีความเร็ว ( Speed factor ;  $\phi$ ) ในการหาค่าความเร็วที่เหมาะสม โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varphi = \frac{u}{\sqrt{2gH_a}} \quad \text{..... (2.54)}$$

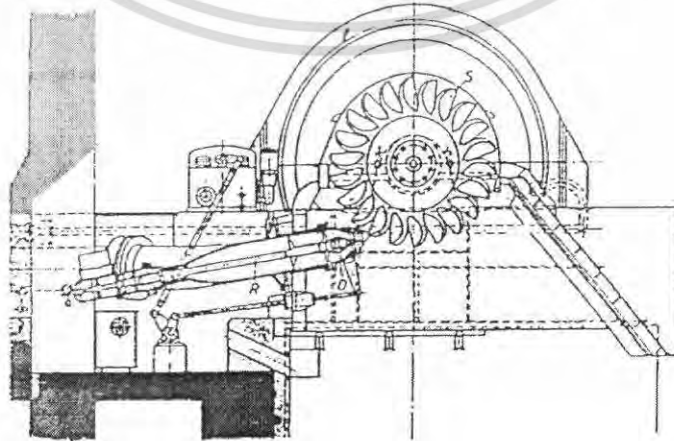
สำหรับกังหันที่ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ค่าดัชนีความเร็วจะขึ้นอยู่กับ ความเร็วจำเพาะ โดยมีมุมใบจักรรูปถั่วประมาณ 173° - 176° ถ้าให้  $d$  เป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดและ  $D$  เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของวงล้อถึงจุดกึ่งกลางของใบพัด ดังแสดงในรูปที่ 2.34 ในทางปฏิบัติพบว่า เพื่อที่จะให้กังหันมีประสิทธิภาพสูงสุด อัตราส่วนของ  $D/d$  จะต้องมีค่าประมาณดังนี้

$$\begin{aligned} D / d &= 54 / N_s && ; \text{ (ft, hp, rpm)} \\ D / d &= 206 / N_s && ; \text{ (m, kW, rpm)} \end{aligned} \quad \text{..... (2.55)}$$

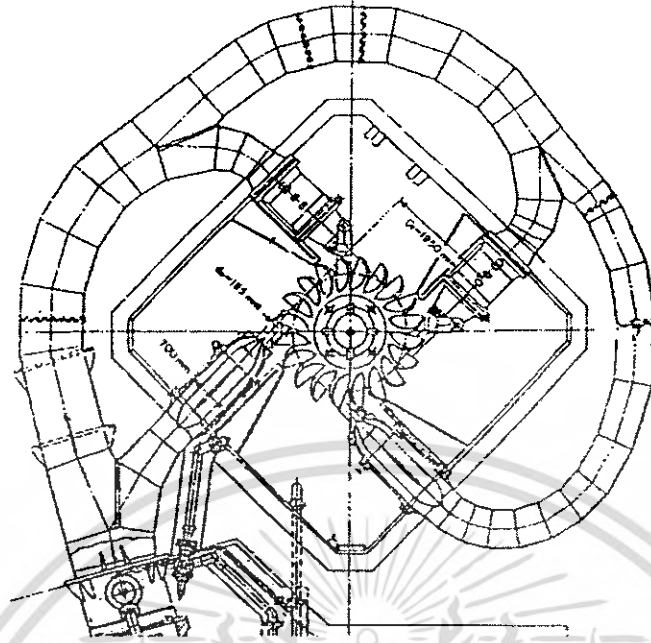


รูปที่ 2.34 ลักษณะการทำงานของ Nozzle และ วงล้อกังหัน

โดยทั่วไปกังหันแบบแรงกระทบส่วนมากจะใช้หัวฉีดเดี่ยวพ่นน้ำออกมาในแนวระดับ เข้าไปกระทบกับใบจักรที่อยู่ด้านล่างของวงล้อ ดังแสดงในรูปที่ 2.34 และ 2.35 ความเร็วของวงล้อจะถูกควบคุมให้มีความสม่ำเสมอเพื่อใช้ในการปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การควบคุมความเร็วดังกล่าวทำได้โดยการควบคุมอัตราการไหลผ่านหัวฉีดเป็นตัวควบคุมการปรับพื้นที่หน้าตัดของหัวฉีด ดังนั้นความเร็ว  $V_2$  จะมีค่าเกือบคงที่



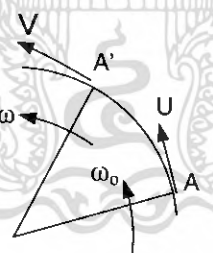
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.35 ล้อกังหันเพลาต้นขาคีมหัวฉีดเดี่ยว ใช้ประกอบเข้าหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.36 ระบบล้อกังหันเฟลตต้นชนิด 4 หัวฉีด ใช้กับเพลาดัง

2.8 พลศาสตร์การหมุน

2.8.1 ความเร่งเชิงมุม (Angular Acceleration) ถ้าเส้น OA ดังรูปที่ 2.37 ซึ่งหมุนอยู่รอบจุด O มีความเร็วเพิ่มขึ้นจาก  $\omega_0$  ในตำแหน่ง OA ถึง  $\omega$  ในตำแหน่ง OA' ในเวลา t



รูปที่ 2.37 ความเร่งเชิงมุม

ดังนั้นความเร่งเชิงมุมเฉลี่ย (Average angular acceleration) กำหนดสัญลักษณ์ คือ  $\alpha$  จะกำหนดเป็นสูตรดังนี้

$$\alpha = \frac{\text{การเปลี่ยนแปลงของความเร็วเชิงมุม}}{\text{เวลาที่ใช่}}$$

$$= \frac{\omega - \omega_0}{t} \dots\dots\dots (2.56)$$

หน่วยของ  $\alpha$  คือ  $\text{rad/sec}^2$  ถ้าหน่วยของ  $\omega$  คือ  $\text{rad/sec}$  และหน่วยของ t คือ sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าความเร็วเชิงมุมเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนเท่ากับกับจำนวนของเวลามากขึ้น โดยมีอัตราความเร่งที่คงที่ เราก็สามารถที่จะจัดเป็นสมการดังต่อไปนี้

$$\omega = \omega_0 + \alpha t \quad \dots\dots\dots (2.57)$$

ถ้าเมื่อ  $u$  และ  $v$  เป็นความเร็วเชิงเส้นของจุด A เมื่อนั้นความเร็วเชิงเส้นของ OA จะเป็น  $\omega_0$  และ  $\omega$  ตามลำดับ และ  $f$  เป็นอัตราเร่งเชิงเส้นของจุด A, ดังนั้น

$$u = \omega_0 r$$

$$v = \omega r$$

ซึ่ง  $OA = r$ , และ

$$v = u + ft$$

ดังนั้น

$$\omega r = \omega_0 r + ft$$

หรือ

$$\omega = \omega_0 + \frac{f}{r} t$$

เปรียบเทียบสมการนี้กับสมการที่ 2.57 จะเห็นได้ว่า

$$\frac{f}{r} = \alpha$$

หรือ

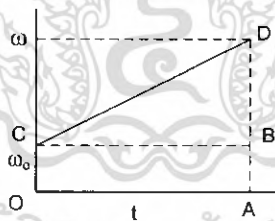
$$f = \alpha r$$

**2.8.2 กราฟ ความเร็วเชิงมุม- เวลา (Angular Velocity – Time Graph)**

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมและเวลาด้วยอัตราเร่งเชิงมุมคงที่ โดยกำหนดเป็นสมการก็คือ

$$\omega = \omega_0 + \alpha t$$

สามารถแสดงให้เห็นเป็นรูปแบบของกราฟความเร็ว- เวลา ดังในรูปที่ 2.38 สำหรับ เส้นกราฟแนวนอน CB แสดงถึงความเร็วเชิงมุมที่คงที่ และ  $OC = \omega_0$



รูปที่ 2.38 กราฟแสดงความเร็ว- เวลา

สำหรับเส้นตรง CD แทนการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร่งคงที่ และ  $AD = \omega$ ,  $OA = t$  ดังนั้น

$$\alpha = \frac{\omega - \omega_0}{t} = \frac{AD - OC}{OA} = \frac{BD}{CB}$$

ดังนั้นความเร่งเชิงมุม  $\alpha$  ที่กำหนดให้โดยเส้นความชัน  $BD/CB$  จากกราฟ

เมื่อความเร่งคงที่ ค่าความเร็ว ก็คือ ค่าเฉลี่ยของความเร็วเริ่มต้น และความเร็วปลาย, หรือ

$$\text{ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ย} = \frac{\omega - \omega_0}{t} \quad \dots\dots\dots (2.58)$$

แต่  $\text{ความเร็วเฉลี่ย} = \frac{\text{มุมที่เปลี่ยนไป}}{\text{เวลาที่ใช้}} = \frac{\theta}{t}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น 
$$\frac{\theta}{t} = \frac{\omega + \omega_0}{2}$$

หรือ

$$\theta = \frac{1}{2} (\omega + \omega_0) \times t \quad \dots\dots\dots (2.59)$$

แต่  $\omega = \omega_0 + \alpha t$  ด้วยเหตุนี้

$$\theta = \frac{1}{2} [(\omega_0 + \alpha t) + \omega_0] \times t$$

ดังนั้น

$$\theta = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad \dots\dots\dots (2.60)$$

ในส่วนนี้ที่ได้ คือ มุมที่หมุนผ่านไปเป็นเวลา  $t$  กลับไปดูสมการที่ 2.59 อีกครั้ง

$$\theta = \frac{1}{2} (\omega + \omega_0) t$$

แต่

$$t = \frac{\omega + \omega_0}{\alpha}$$

ด้วยเหตุนี้

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{1}{2} (\omega + \omega_0) \times \frac{(\omega + \omega_0)}{\alpha} \\ &= \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{2\alpha} \end{aligned}$$

จัดรูปแบบใหม่เป็น

$$\omega^2 = \omega_0^2 + 2\alpha\theta \quad \dots\dots\dots (2.61)$$

### 2.8.3 การใช้กราฟ $\omega - t$

ปัญหาต่างๆ สามารถแก้ไขได้อย่างง่ายและสะดวกโดยการหาจากพื้นที่ใต้กราฟ  $\omega - t$  ซึ่งเท่ากับขอบของการหมุนผ่านไป รูปที่ 2.39 แสดงการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร่งคงที่

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่ใต้กราฟ } \omega - t &= \text{พื้นที่ OADC} \\ &= \text{พื้นที่ OABC} + \text{พื้นที่ CBD} \\ &= OC \times OA + \frac{1}{2} \times CB \times BD \\ &= \omega_0 t + \frac{1}{2} \times t \times (\omega + \omega_0) \end{aligned}$$

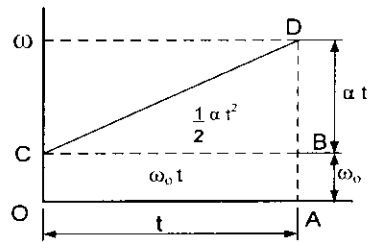
$$= \omega_0 t + \frac{1}{2} \times \alpha t^2 \quad ; \text{ จาก } \omega + \omega_0 = \alpha t$$

$$= \omega t + \frac{1}{2} \alpha t^2$$

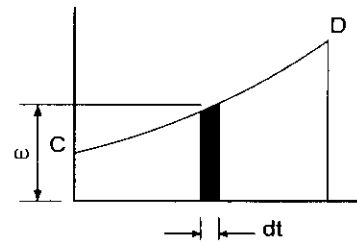
$$= \theta \quad ; \text{ จากสมการ (2.60)}$$

$$= \text{มุมที่หมุนผ่านไปเป็นเวลา } t$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.39 การเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร่งคงที่

รูปที่ 2.40 กราฟ  $\omega - t$ 

โดยทั่วไป เมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ ในเส้น CD ในรูปที่ 2.40 ดังแสดงให้เห็นในกราฟ  $\omega - t$  เมื่อเป็นดังนี้

ดังนั้น

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega$$

และ

$$d\theta = \omega dt$$

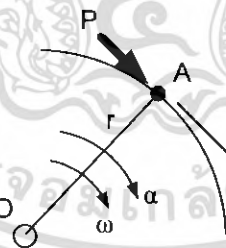
$$\theta = \int \omega dt$$

= พื้นที่ใต้กราฟ  $\omega - t$

#### 2.8.4 พลศาสตร์การหมุนของชิ้นส่วนเล็กๆ (Dynamics of a Rotating Particle)

ในการเคลื่อนที่เชิงเส้นจำเป็นต้องใช้แรง เราจะพบได้ว่าการเคลื่อนที่เชิงมุมก็จำเป็นต้องใช้แรงบิดในการขับ

กำหนดให้มวลที่มีน้ำหนักเท่ากับ  $W$  ยึดอยู่ที่ปลายแขน OA คือ จุด A ที่มีรัศมีเท่ากับ  $r$ , จุดหมุนคือ O, ในรูปที่ 2.41 OA จะหมุนโดยอิสระ ปราศจากการใช้แรง โดยมีเงื่อนไขว่าจะต้องไม่มีแรงเสียดทานที่จุดหมุน O ในการเริ่มต้นของการหมุน, หรือการเร่งของมวล แรง  $P$  จำเป็นที่จะต้องตั้งฉากกับ OA ถ้ามีการนำแรงบิดมาใช้ที่แขน ดังนั้นแรง  $P$  ที่นำมาใช้ต้องมีการเชื่อมโยงของแขนกับมวล ถ้าให้  $\alpha$  คือความเร่งเชิงมุม ณ จุดใด ๆ และ  $f$  คือความเร่งเชิงเส้นที่สัมผัสกับส่วนของวงกลมที่เคลื่อนที่, ดังนั้นแรงที่จำเป็นต้องใช้ในจุด A ก็คือ



รูปที่ 2.41 การหมุนของชิ้นส่วนเล็กๆ

$$P = \frac{Wf}{g}$$

$$= \frac{W\omega r}{g} \quad \text{ดังนั้น} \quad f = \alpha r$$

แรง  $P$  ที่เกิดขึ้นรอบๆ จุด O คือแรงบิด torque ( $T$ ) มีส่วนที่เกี่ยวข้องในรูปของสมการดังต่อไปนี้

$$T = P \times r$$

$$= \frac{W\alpha r \times r}{g}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{W}{g} r^2 \alpha \quad \dots\dots\dots (2.62)$$

เทอมของ  $(W/g)r^2$  เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่เราเรียกว่าคือ second moment of mass รอบจุด O หรือเรียกอีกอย่างว่า โมเมนต์ความเฉื่อย (moment of inertia) กำหนดโดยใช้สัญลักษณ์ I รัศมี r (สำหรับการกระจายน้ำหนักของมวล) เรียกว่ารัศมีไจเรชั่น (radius of gyration) ของมวลที่จุด O กำหนดโดยใช้สัญลักษณ์ k

**2.8.5 พลศาสตร์การหมุนของวัตถุ (Dynamics of Rotation Body)**

พิจารณาวัตถุที่มีมวล M มีความเร็วรอบๆ แกนหมุน O, ในรูปที่ 2.42 จำเป็นที่ต้องหาแรงบิดที่ใช้ต่อวัตถุเพื่อให้เกิดความเร่งเชิงมุม  $\alpha$  รอบจุด O



รูปที่ 2.42 การหมุนของวัตถุที่มีความเร็วรอบแกนหมุน

มันมีความจำเป็นที่จะต้องหาแรงบิด เพื่อความต้องการในการเร่งของแต่ละชั้นส่วนเช่น ที่ตำแหน่ง A ของมวล dM และนำแรงบิดพื้นฐานอันนี้ ไปพิจารณาแรงบิดที่ต้องใช้ทั้งหมด แรงบิดที่ต้องการในจุด A คือ

$$dP = dM f_A \quad , \quad \text{ที่เกิดขึ้นบนเส้นตรง OA}$$

ซึ่ง  $f_A$  คือ ความเร่งเชิงเส้นของ A ที่สัมพันธ์กับแนวการเคลื่อนที่แบบวงกลม แรงบิดที่ต้องการเพื่อให้เกิดความเร่งในจุด A

$$dT = dP \times r$$

$$= dM f_A \times r$$

ซึ่ง r คือ รัศมีการหมุนของ A รอบจุด O แรงบิดทั้งหมด T สามารถหาได้โดยการรวมแรงบิดย่อยทั้งหมด dT ที่เกิดขึ้นในวัตถุ ดังนั้น

$$T = \int dT$$

$$= \int dM f_A r$$

แต่  $f_A$  ของแต่ละชั้นส่วนจะแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับรัศมี r ดังนั้นจึงต้องเขียนว่า

$$f_A = \alpha r$$

$$T = \int dM \alpha r \times r$$

ดังนั้น

และเมื่อความเร่งเชิงมุม  $\alpha$  เป็นค่าเดียวกันหมดเช่นที่จุด OA เมื่อเป็นเช่นนั้นจะนำค่าคงที่เมื่อขณะเวลาใดๆ มาพิจารณา ดังนั้น

$$T = \alpha \int dM r^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ  $T = I \alpha$   
 ซึ่ง  $I = \int dM r^2$

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (moment of inertia) ของมวลทั้งหมดของวัตถุ ซึ่งมีแกนหมุนคือ O, I เป็นผลรวมของมวล (mass) กับระยะ (radius)<sup>2</sup> สำหรับทุกๆ ชิ้นส่วนของวัตถุ และจะต้องขึ้นอยู่กับรูปทรงและขนาดของวัตถุ ค่าของมันจะขึ้นอยู่กับกระจายของมวลที่เกิดขึ้นกับวัตถุทั้งหมด

มันจะเป็นประโยชน์ในการคิดผลรวมของมวลทั้งหมด ในตำแหน่งจำเพาะที่รัศมี k, จากแกน O ดังนั้น โมเมนต์ของความเฉื่อยในการกระจายมวล ที่เกิดขึ้นกับวัตถุ ด้วยรัศมีของการกระจายมวล (radius of gyration) จะสามารถกำหนดนิยามได้ดังนี้

$$Mk^2 = I$$

$$\frac{W}{G} k^2 = I$$

**2.8.6 ความเฉื่อยควบคู่ (Inertia Couple)**

เปรียบเทียบกับสูตร

$$P = Mf$$

และ

$$T = I \alpha$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า I ซึ่งเป็น โมเมนต์ความเฉื่อยของการเคลื่อนที่เชิงมุม ซึ่งมีลักษณะเหมือนกันกับ M ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่เชิงเส้น โดยถ้าเราเอาความเข้าใจในเรื่องแรงเฉื่อยเราจะพิจารณาเห็นว่า แรงบิด (T) สามารถที่จะสมดุลได้ด้วย โดย แรงบิดเฉื่อยควบคู่ (Inertia couple)  $I\alpha$  ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับความเร่งเชิงมุม  $\alpha$  ดังแสดงในรูปที่ 2.43

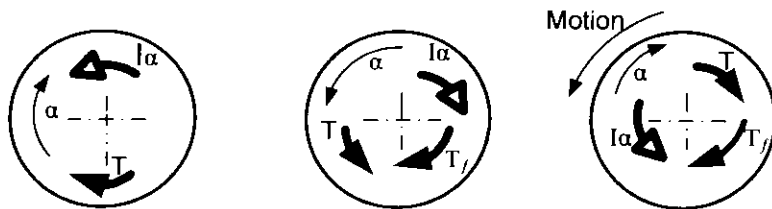
ตัวอย่างที่สามารถที่จะทำให้เข้าใจดีขึ้นในเรื่องของแรงเฉื่อยควบคู่ก็คือ ถ้าเราเร่งความเร็วของล้อจักรยานให้เร็วขึ้น โดยใช้มือหมุนแทน โดยถึงแม้ว่าน้ำหนักทั้งหมดจะรองรับโดยลูกปืน เราก็ยังจะต้องประคองความเร็วของล้อ โดยการหมุนต่อไปเพื่อให้อัตราเร็วคงที่ โดยอาจจะกล่าวได้ว่าแรงเฉื่อยควบคู่ ก็คือ แรงปฏิกิริยา

**2.8.7 การเร่งของเพลา (Accelerated Shaft)**

พิจารณาในรูปที่ 2.44 เพลาขับโรเตอร์ที่มีการเคลื่อนที่ด้วยแรงเฉื่อย I รอบๆ แกนเพลา ถ้ามีแรงเสียดทานของแบร์ริง (Tf) ควบเข้าไป ดังนั้นในการที่จะเร่งเพลาและโรเตอร์ในการขับเพลาด้วยแรงบิด T เพื่อให้เกิดการสมดุลย์ จะต้องรวมแรงควบคู่เฉื่อย  $I\alpha$  และแรงเสียดทานของแบร์ริง  $T_f$  เข้าไปด้วย

ดังนั้น

$$T = I\alpha + T_f$$



รูปที่ 2.43 การเร่งเพลา รูปที่ 2.44 การเร่งมีแรงเสียดทาน รูปที่ 2.45 เพลาขับ โรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.8 การทำให้เพลายหยุด

ถ้าเพลารับแรงด้านเพื่อให้เกิดการหยุด โดยใช้แรงบิดในการเบรก  $T$  และมีแรงเสียดทานของแบร์ริง ( $T_f$ ) เป็นตัวช่วย เพื่อที่จะทำให้สมดุลกับแรงเฉื่อยควบคู่  $I\alpha$ ; ถึงตอนนี้  $\alpha$  จะช้าลง โดยจะแสดงออกมาในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.45 ดังนั้น

$$T + T_f = I\alpha$$

ถ้าไม่มีแรงบิดในการเบรก  $T$  เมื่อเป็นเช่นนั้น แรงที่ใช้ในการหยุดเพลาก็เหลือแค่แรงเสียดทานอันเนื่องมาจากแบร์ริง  $T_f$  อย่างเดียว ดังนั้น

$$T_f = I\alpha$$

ข้อควรจำ, ทั้งสองสาเหตุกล่าวว่า

- (1) แรงเสียดทานคู่ควบ  $T$  มีการต้านทานกับแรงการเคลื่อนที่
- (2) แรงเฉื่อยควบคู่  $I\alpha$  ต้านทานกับการเปลี่ยนการเคลื่อนที่

### 2.8.9 ค่าของ $I$ ในเพลาม้วน (Simple rotor)

สูตรที่ได้มาของการเคลื่อนที่ของมวลอันเนื่องมาจากแรงเฉื่อย ในที่นี้ ได้มาจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ไม่ได้มาจากการปฏิบัติการทดลอง

#### 1. รูปทรงกระบอกตัน (Solid Disk or Cylinder)

สำหรับรูปทรงที่เป็นทรงกระบอกตันมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ  $d$  มีค่าโมเมนต์ของแรงเฉื่อยรอบๆ แกน O-O, ดังรูปที่ 2.46 คือ

$$I = \frac{W}{g} \cdot \frac{d^2}{8}$$

ซึ่ง  $W$  เท่ากับน้ำหนักของรูปทรงกระบอก โดยเปรียบเทียบกับสูตร

$$I = \frac{W}{g} k^2$$

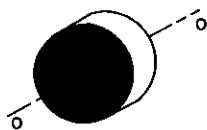
เราจะเห็นได้ว่า รัศมีไจเรชั่น  $k$  สำหรับรูปทรงกระบอกตันที่ได้ก็คือ

$$k^2 = \frac{d^2}{8}$$

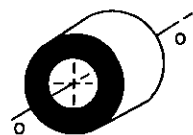
$$= \frac{(2r)^2}{8}$$

ซึ่ง  $r$  เท่ากับรัศมีของทรงกระบอก  $k = \frac{r}{\sqrt{2}}$  หรือ  $0.707 r$

ดังนั้นรัศมีไจเรชั่นของรูปทรงกระบอกตัน จึงมีค่าเท่ากับ  $0.71$  เท่าของรัศมี



รูปที่ 2.46 เพลาดัน



รูปที่ 2.47 เพลากวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. รูปทรงกระบอกกลวง (Hollow Circular Cylinder)

รูปแบบของทรงกระบอกกลวง ก็คือการนำเอารูปทรงกระบอกอันที่เล็กกว่า ซึ่งมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน ออก ดังรูปที่ 2.47 ถ้าให้สัญลักษณ์ 1 และ 2 แทนความหมายทรงกระบอกใน และทรงกระบอกนอก ตามลำดับ ดังนั้น โมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกระบอกกลวง รอบๆ แกนตามความยาว O-O จะต้องมีกรลบออกจากกัน ดังนี้

$$I = I_1 - I_2$$

$$= \frac{W_1}{g} d_1^2 - \frac{W_2}{g} d_2^2$$

ซึ่ง  $W_1$  คือ น้ำหนักของทรงกระบอกตัน และ  $W_2$  คือ น้ำหนักของทรงกระบอกคว้าน

ถ้า  $w$  คือ น้ำหนักของวัสดุต่อหน่วยปริมาตร และ  $l$  คือ ความยาวของรูปทรงกระบอก ดังนั้น

$$W_1 = w \times \pi d_1^2 \times l$$

$$W_2 = w \times \pi d_2^2 \times l$$

และถ้า  $W$  คือ น้ำหนักของทรงกระบอกกลวง ดังนั้น

$$W = W_1 - W_2$$

$$= w \times \pi \left( \frac{d_1^2 - d_2^2}{4} \right) \times l$$

ดังนั้น

$$I = \frac{W}{g} \left[ \frac{\pi d_1^2 l \times d_1^2}{4} - \frac{W}{g} \left[ \frac{\pi d_2^2 l \times d_2^2}{4} \right] \right]$$

$$= \frac{w \pi}{g} \left( \frac{d_1^4 - d_2^4}{8} \right) \times l$$

$$= \frac{1}{g} \left[ W \pi \frac{(d_1^2 - d_2^2)}{4} \times l \right] \frac{(d_1^2 - d_2^2)}{8}$$

$$= \frac{W (d_1^2 - d_2^2)}{8}$$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า

$$k = \frac{d_1^2 + d_2^2}{8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบ การคำนวณ และอุปกรณ์

#### การออกแบบและการคำนวณ

ในการสร้างแบบจำลองในการทำงานของล้อยก้นเหล็ก จำเป็นที่จะต้องเข้าใจถึง หลักการในการทำงาน ปัจจัยต่างๆที่สำคัญ รวมถึงอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด

#### 3.1 การออกแบบการจัดวางแนวแกนของล้อยก้น

การจัดวางแนวแกนของล้อยก้นน้ำแบบเพลตัน แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

ก. การจัดวางแนวแกนแบบแกนนอน

- การจัดวางแนวแกนแบบแกนนอน ล้อยก้นเดี่ยว ( 1 หัวฉีด และ 2 หัวฉีด )
- การจัดวางแนวแกนแบบแกนนอน ล้อยก้นคู่ ( 2 หัวฉีด และ 4 หัวฉีด )

ข. การจัดวางแนวแกนแบบแกนตั้ง ( หลายหัวฉีด )

#### 3.2 การออกแบบโครงสร้างเครื่อง

- หลักเหตุผลในการออกแบบ

1. สามารถควบคุมการทำงานได้สะดวก
2. มีความมั่นคงแข็งแรงของเครื่อง
3. สามารถแยกส่วนต่างๆเพื่อการสร้างได้อย่างสะดวก
4. สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก



รูปที่ 3.1 ลักษณะเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### -วัสดุที่ใช้

จากหลักการที่จำเป็นในการออกแบบและรูปที่แสดงสามารถแบ่งเป็นส่วนต่างๆดังนี้

#### 1. แผ่นฐานบน

- ขนาด 800×800×5 mm.

### - วัสดุทำจาก ไม้อัด

#### 2. ฐานเครื่อง

- ขนาด 800×800×800 mm

- วัสดุ เหล็กฉาก และ เหล็กแป๊บ

### 3.3 การออกแบบใบกังหัน

- หลักการและเหตุผลในการออกแบบ

ใบกังหันน้ำแบบล้อยเพลตัน มีลักษณะเป็นรูปถ้วยมีสันตรงกลางแบ่งใบกังหันรูปถ้วยเป็น 2 ห้อง สันตรงกลางนี้จะทำหน้าที่แบ่งลำน้ำออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน จะทำให้เกิดแรงดันและทิศทางการน้ำออกได้ดีไม่มีวกกลับมาหาใบกังหัน ซึ่งมีเหตุผลในการออกแบบดังนี้

1. น้ำหนักเบา
2. ทนทานต่อการกัดกร่อน
3. ความง่ายต่อการทำผิวสำเร็จ
4. ความสามารถในการตัดปาดได้ง่าย
5. คุณสมบัติขัดมันดี

การเลือกใช้วัสดุ

วัสดุที่ใช้ทำใบกังหัน แบบล้อยเพลตัน ทำจากวัสดุอะลูมิเนียมผสมหล่อ



รูปที่ 3.2 ใบกังหัน

### 3.4 การออกแบบล้อยกังหัน

- หลักการออกแบบ

ตัวล้อยของกังหันน้ำในโครงการนี้จะมีรูปที่ใช้สำหรับใส่น้ำเพื่อทำการล้อยตัวล้อยของกังหันน้ำกับใบกังหันน้ำ และในส่วนของตัวที่จะทำการล้อยเข้ากับเพลลาจะใช้น้ำ 2 ชั้นเพื่อความแข็งแรง ซึ่งจะมีเหตุผลการออกแบบดังนี้ การที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.สามารถทนต่อการสึกกร่อนได้
- 2.สามารถขึ้นรูปได้ง่าย
- 3.มีน้ำหนักจำเพาะที่เหมาะสม
- 4.มีน้ำหนักพอเหมาะในการถ่วงล้อ
- 5.มีความแข็งแรงทนทาน

-หลักการในการเลือกใช้วัสดุ

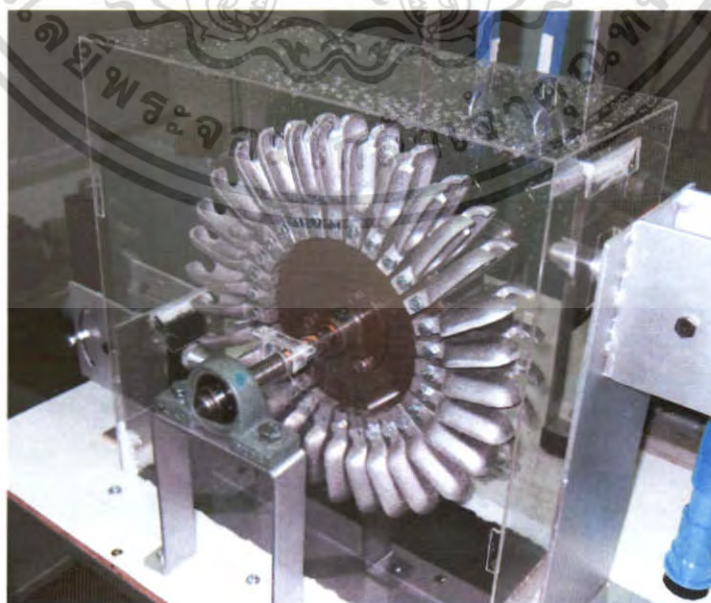
วัสดุที่ใช้ทำตัวล้อกังหันจะใช้วัสดุ ชูบ โครเมียม (เพื่อป้องกันสนิม)



รูปที่ 3.3 ล้อกังหันน้ำ

### 3.5 การออกแบบชุดฝากรอบ

- โครงสร้างทำจากพลาสติกใสหนา 2 มิลลิเมตร
- ฝากรอบนี้ ทำหน้าที่กั้นน้ำกระเซ็นออกจากเครื่องทดสอบ
- มีน้ำหนักเบา ทนทานแข็งแรง



รูปที่ 3.4 ชุดฝากรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 คลับลูกปืน

ใช้คลับลูกปืนแบบวาย (y-bearing unit) รหัส XJ P204 ทำหน้าที่รองรับการหมุนของเพลาและลดความเสียหายในการหมุนของเพลา



รูปที่ 3.5 คลับลูกปืนแบบวาย

### 3.7 การหาขนาดและชนิดของท่อ

ข้อมูลเพื่อการตัดสินใจ

- ช่วงอุณหภูมิใช้งาน โดยประมาณ 20-35 องศาเซลเซียส
- ทนแรงดันได้ไม่เกิน 2 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร
- เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว
- น้ำหนักเบา
- ราคาถูก
- ปลอดภัย

จากข้อมูลข้างต้น สามารถใช้ท่อ พี.วี.ซี. ที่ใช้เป็นท่อน้ำดื่ม มีคุณสมบัติดังนี้

- ความหนาแน่น 1.38 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร
- ทนแรงดันได้ไม่เกิน 3 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร
- ติดตั้งและประกอบโดยใช้ข้อต่อ พี.วี.ซี. โดยการสวมอัดและประสานด้วยกาวยาง
- อุณหภูมิไม่เกิน 70 องศาเซลเซียส

### 3.8 การเลือกใช้ชนิดของวาล์ว

ข้อมูลในการตัดสินใจ

- ปรับอัตราการไหลได้
- มีความเสียหายต่ำ
- ใช้เนื้อที่ติดตั้งน้อย
- ไม่เป็นสนิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 โกลบวาล์ว

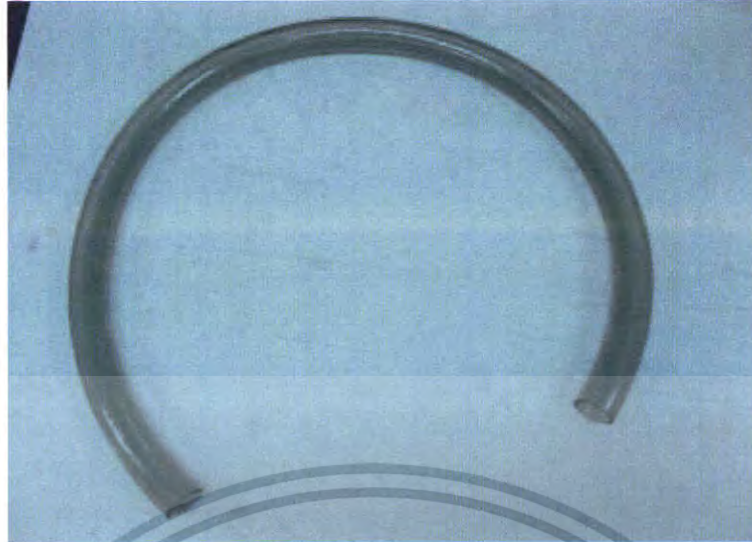


รูปที่ 3.7 ซี่งต่อสามทาง



รูปที่ 3.8 ซี่งองขนาด 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 สายยางขนาด 1 นิ้ว

### 3.9 การออกแบบปั๊ม

ข้อมูลการตัดสินใจ

- มีขนาดที่เหมาะสม
- มีระดับของหัวน้ำสูง
- มีความเป็นไปได้ในการจัดหา

การคำนวณหาขนาดของปั๊ม

ระบบใช้ท่อ พี.วี.ซี. 13.5 ขนาด 1 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเฉลี่ย  $36 \pm 0.15$  มิลลิเมตร ความหนา  $3.0 \pm 0.15$  มิลลิเมตร

ดังนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ  $36 - 6 = 30$  มิลลิเมตร

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times 0.03^2}{4} = 0.000707 \text{ ตารางเมตร}$$

$$Q = 35 \text{ ลิตร/นาที} = \frac{35 \times 10^{-3}}{60} = 0.000583 \text{ ลูกบาศก์เมตร/วินาที}$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.000583}{0.000707} = 0.8251 \text{ เมตร/วินาที}$$

ข้อมูลค่า K สำหรับการไหลผ่านท่อต่างๆ (จากภาคผนวก)

ข้องอขนาด 90 องศา      K = 1.5

โกลบวาล์ว                      K = 10

ข้อต่อสามทาง                K = 2.0

ความยาวของท่อตรงทั้งหมด = 0.6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลภาคผนวก

น้ำที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส  $\rho = 996.6$  กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร  
 $\mu = 5.906 \times 10^{-3}$  กิโลกรัม/เมตร.วินาที

$$N_r = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{996.6 \times 0.5941 \times 0.03}{5.906 \times 10^{-3}} = 3007.52 \text{ (turbulent flow)}$$

ค่า  $\epsilon$  ของท่อ พี.วี.ซี. = 0.0015 มิลลิเมตร

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0.0015}{30} = 0.00005$$

ค่า  $f$  จากกราฟแฟคเตอร์ความเสียดทาน = 0.042

เมื่อเกิดเนื่องจากความฝืดในท่อ พี.วี.ซี.

$$h = 0.042 \times \frac{0.6}{0.03} \times \frac{0.8251^2}{2 \times 9.81} = 0.02915 \text{ เมตร}$$

เกิดเนื่องจาก ข้ออ ข้อต่อสามทาง และวาล์ว

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

ข้ออขนาด 90 องศา จำนวน 1 ตัว

$$h = \frac{1.5 \times 0.8251^2}{2 \times 9.81}$$

$$h = 0.0520 \text{ เมตร}$$

โกลบวาล์ว จำนวน 2 ตัว

$$h = 2 \times 10 \times \frac{0.8251^2}{2 \times 9.81}$$

$$h = 0.6940 \text{ เมตร}$$

ข้อต่อสามทาง จำนวน 1 ตัว

$$h = 2.0 \times \frac{0.8251^2}{2 \times 9.81}$$

$$= 0.0694 \text{ เมตร}$$

ท่อขาง ทำจากพลาสติก โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ สามารถโค้งงอได้สะดวกและมีความยืดหยุ่นดี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเฉลี่ย  $25.0 \pm 0.3$  มิลลิเมตร ความหนาผนังท่อ  $1.9 \pm 0.4$  มิลลิเมตร ความยาวเส้นแรก 0.9 เมตร เส้นที่สองยาว 1.9 เมตร ความยาวรวมทั้งสิ้น 2.8 เมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน เท่ากับ  $0.025 - (0.0019 \times 2) = 0.0212$  เมตร

$$A = \pi D^2 = \pi \times 0.0212^2 = 0.0003529 \text{ ตารางเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้<sup>4</sup>ในการ<sup>4</sup>ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.000583}{0.0003529} = 1.6520 \text{ เมตร/วินาที}$$

$$N_r = \frac{996.6 \times 1.6520 \times 0.0212}{5.906 \times 10^{-3}} = 5909.81 \text{ (turbulent flow)}$$

คิดเป็นผนังท่อใหม่ เป็นผิวเรียบ  $\epsilon = 0.0015$

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0.0015}{21.2} = 0.00007075$$

หาค่า  $f$  จากแฟคเตอร์ความเสียดทาน = 0.038

$$h = f \times L \times \frac{V^2}{D \times 2g} \quad \text{เมตร}$$

$$h = 0.038 \times \frac{2.8}{0.0212} \times \frac{1.6520^2}{2 \times 9.81}$$

$$h = 0.6981 \text{ เมตร}$$

เพราะฉะนั้น มีการเสียเฮดเนื่องจากความเสียดทานในท่ออย่าง 0.6981 เมตร  
เฮดรวมทั้งระบบ

$$h_T = 0.02915 + 0.0520 + 0.6940 + 0.0694 + 0.6981$$

$$= 1.54265 \text{ เมตร}$$

ให้ปั๊มมีประสิทธิภาพ 70% เพราะฉะนั้นกำลังของปั๊ม

$$P_w = \frac{Q \rho g h_T}{\eta}$$

$$= \frac{0.000583 \times 0.9966 \times 10^3 \times 9.81 \times 1.54265}{0.7}$$

$$P_w = 12.6 \text{ วัตต์}$$

ดังนั้น จึงเลือกใช้ปั๊มขนาด 0.5 แรงม้า ขนาดท่อดูด และท่อส่ง 1 นิ้ว อัตราการไหลน้ำ 35 ลิตร/นาที  
สามารถสูบได้สูงสุด 9 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ป้อนน้ำ ร้อน MODEL PS-130 AUTO

### 3.10 ถังบรรจุน้ำ

ข้อมูลเพื่อการตัดสินใจ

- มีความแข็งแรง
- ไม่รั่วซึม ได้ง่าย
- ไม่เกิดสนิม

จากข้อมูลข้างต้น ใช้ถังที่ทำจากสังกะสี ที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร เพื่อความแข็งแรง



รูปที่ 3.11 ถังบรรจุน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.11 ชุดวัดความเร็วรอบ

วัดรอบโดยใช้มิเตอร์วัดรอบ Photo Tachometer MDT-2244B



รูปที่ 3.12 มิเตอร์วัดรอบ Photo Tachometer MDT-2244B

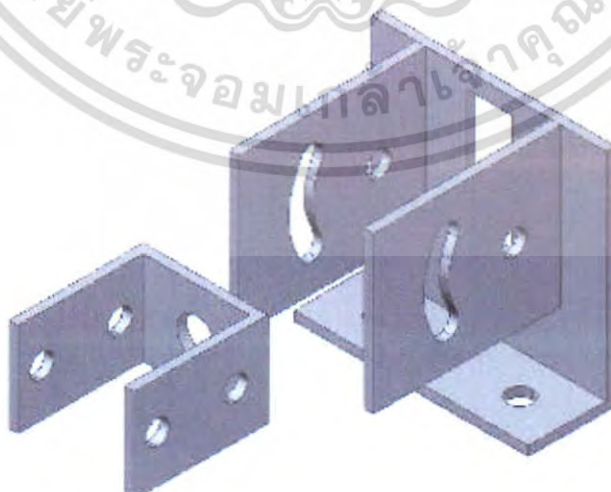
### 3.12 ฐานปรับมุมการฉีด

ใช้สำหรับปรับมุมของการฉีด และ ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับใบกังหัน  
หลักการและเหตุผลในการออกแบบ

- ความแข็งแรงทนทาน
- สะดวกในปรับระยะการฉีด

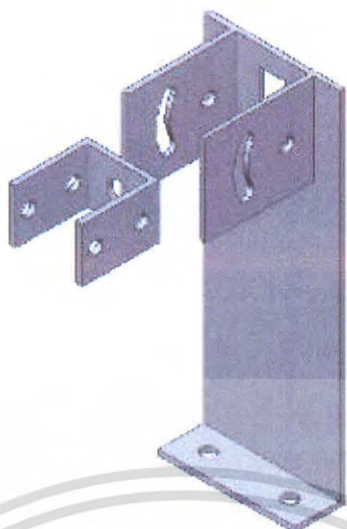
ฐานปรับมุมการฉีดแบ่งออกเป็น 2 ส่วน

1. ฐานปรับมุมการฉีดที่ด้านล่าง
2. ฐานปรับมุมการฉีดด้านบน



รูปที่ 3.13 ฐานปรับมุมการฉีดด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 งานปรับมุมการยึดด้านบน

### 3.13 การออกแบบระบบท่อและหัวฉีด

- หลักการและเหตุผลในการออกแบบ

1. ออกแบบให้เกิดค่าแรงเสียดทานของของไหลที่ผ่านจากท่อและข้อต่อต่างๆ ให้มีค่าน้อยที่สุด คือ การหลีกเลี่ยงการลดขนาดของท่อโดยฉับพลัน และลดจำนวนข้อต่อและวาล์วที่ไม่จำเป็น
2. ออกแบบในส่วนที่เชื่อมต่อระหว่าง ท่อส่งน้ำหลัก กับท่อหัวฉีดให้สามารถเคลื่อนย้ายปรับศูนย์ของหัวฉีดได้
3. ออกแบบให้หัวฉีดและท่อฉีดซึ่งเป็นส่วนที่สัมผัสกับน้ำมากที่สุดสามารถป้องกันการเกิดสนิมได้



รูปที่ 3.15 ท่อและหัวฉีด

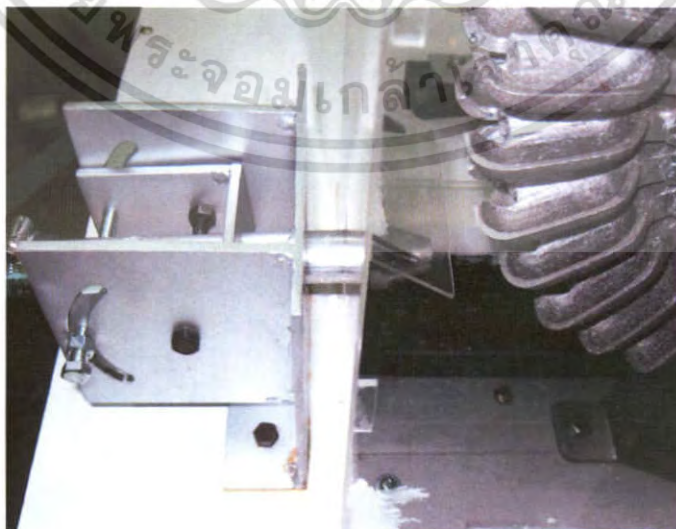
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 หัวฉีด



รูปที่ 3.17 การวางหัวฉีดด้านบน



รูปที่ 3.18 การวางหัวฉีดด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3 วิธีการวัดทอร์ก

ในการทำชุดวัดทอร์กนี้เพื่อที่ต้องการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กกับความเร็วรอบ จากนั้นเมื่อได้สมการแล้วก็จะนำสมการที่ได้มาคำนวณหาค่าทอร์กที่แท้จริงจากการปฏิบัติ โดยมีวิธีการดังนี้

1. กรณีแรกคือเปิดหัวฉีดเพียงหัวฉีด โดยทำการปรับอัตราการไหลที่เปิดวาล์วสุด
2. เริ่มต้นด้วยการวัดระยะสปริงในขณะที่ยังไม่ได้ใส่แรง บันทึกผลการทดลอง
3. ใส่น้ำหนักที่มีขนาด 0.1765 kg จากนั้นวัดระยะยืดของสปริง และวัดความเร็วรอบ บันทึกผลการทดลอง
4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 3 แต่เปลี่ยนน้ำหนักที่ใส่เข้าไป บันทึกผลการทดลอง
5. ทำการทดลองเหมือนกับข้อที่ 1-4 แต่เปลี่ยนจากการเปิดเพียงหัวฉีดเดียวเป็น 2 หัวฉีด
6. นำผลที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟระหว่างทอร์ก กับ ความเร็วรอบ และสมการความสัมพันธ์

#### 4.4 วิธีการทดลอง

สำหรับการทดลองในโครงการนี้จะเน้นถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในแต่ละกรณี ซึ่งในปริยภูณานิพนธ์ฉบับนี้จะยึดการเปลี่ยนค่าของ 3 ตัวแปรเป็นหลักคือ

- 1.) การเปลี่ยนค่าอัตราการไหล (Q) ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงที่ค่าต่างๆ จากการปรับลดวาล์วลงเรื่อยๆ
- 2.) การเปลี่ยนแปลงจำนวนหัวฉีด จาก 1 หัวฉีด เป็น 2 หัวฉีด
- 3.) มุมของการฉีด โดยจะปรับขึ้นและลงอย่างละ 5 องศา

ในส่วนการหาประสิทธิภาพนั้นสามารถคำนวณได้จาก

$$\eta_t = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

โดยที่ 
$$P_{\text{input}} = \frac{1}{2} \rho Q v_j^2 \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

$$P_{\text{output}} = T \cdot \omega \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

โดยที่ 
$$T = F \cdot r = mg \cdot \frac{d}{2} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

และ 
$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

จะเห็นว่าจากสมการ 4.7 และ สมการ 4.8 จะมีค่าที่เก็บได้จากการทดลองคือ ค่าความเร็วรอบ(N)

และค่าแรงค้ำจากดาซิ่งสปริง (m)

สำหรับวิธีการทดลองนั้นมีดังนี้

4.3.1 ใช้ปั๊มขนาด 0.5 แรงม้า และมีจำนวนใบพัด 30 ใบ และทำการฉีดน้ำผ่านหัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร โดยกำหนดอัตราการไหลที่เปิดวาล์วสุด

4.3.2 ทำการเปิดหัวฉีดบนเพียงอย่างเดียวตั้งไว้ที่มุม  $0^\circ$  จากนั้นก็ทำการเก็บค่าความเร็วรอบ (N) จากการ ใช้ Photo Tachometer เก็บค่าและหาค่าเฉลี่ยของความเร็วรอบจาก

$$N_{\text{av}} = \frac{N_1 + N_2 + N_3}{3} \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

และทำการปรับมุมของการฉีดเป็น 5 องศา และ -5 องศา ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ทำการทดลองเหมือนกับข้อ 4.3.1 - 4.3.2 แต่ทำการลดอัตราการใช้พลังงานโดยการบิดควาล์วลง ทำการเก็บค่าการทดลองและบันทึกผลการทดลอง

4.3.4 ทำการเปิดหัวฉีดล่างเพียงหัวฉีดเดียวและดำเนินการเหมือนข้อ 4.3.1- 4.3.3 และทำการเก็บค่าการทดลอง และทำการบันทึกผลการทดลอง

4.3.5 ทำการเปิดหัวฉีดทั้ง 2 หัวฉีดพร้อมกัน 2 หัว และดำเนินการเหมือนกับข้อ 4.3.1 – 4.3.3

โดยกำหนดค่ามุมที่หัวฉีดบนเป็นมุม  $0^\circ$  และหัวฉีดล่างเป็นมุม  $0^\circ$  แล้วทำการเก็บค่าผลการทดลอง และทำการปรับมุมการฉีด 5 องศา และ -5 องศา ในแต่ละหัวฉีด โดยทำในทุกกรณี บันทึกผลการทดลอง

4.3.6 นำค่าที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพกับอัตราการใช้พลังงานที่เข้ากับความเร็วยรอบ และกำลังที่ออกกับความเร็วยรอบ แต่ละกรณี

ตัวอย่างการคำนวณหาประสิทธิภาพของกังหันจากการทดลองของ 1 หัวฉีด(หัวฉีดบน)

ใช้ในกรณีที่หัวฉีดบนทำมุม  $0^\circ$  เปิดควาล์วสุดและมีอัตราการใช้พลังงาน 26.88 ลิตร/ นาที

จากการทดลองจะพบว่าค่าความเร็วยรอบ 3 ค่าคือ 283.2, 282.9, 283 รอบ/นาที

ดังนั้น จากสมการที่ 4.9 จึงได้  $N_{av} = 283.03$  รอบ/นาที และค่าทอร์คเราก็จะหาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ทอร์ค กับ ความเร็วยรอบ ค่อยจากนั้นเราจะหาค่า  $P_{output}$  ออกมาได้จากสมการ 4.6, 4.7 และ 4.8

จะได้ 
$$\omega = \frac{2\pi(283.03)}{60} = 29.64 \text{ รอบ/วินาที}$$

และ

$$T = mg \cdot \frac{d}{2} = 1(9.81)(0.05) = 0.4905 \text{ N.m}$$

จากสมการ 4.6

$$P_{output} = T \cdot \omega = (0.4905)(29.64) = 14.54 \text{ W}$$

และจาก

$$Q = A \cdot v_j$$

จะได้

$$\left( \frac{26.88 \times 10^{-3}}{60} \right) = \pi(0.008/2)^2 \cdot v_j$$

ดังนั้น

$$v_j = 8.91 \text{ m}^2 / \text{s}$$

จากสมการ 4.5 จะได้

$$P_{input} = \frac{1}{2} (996.95) \left( \frac{26.88 \times 10^{-3}}{60} \right) (8.91)^2 = 17.73$$

เพราะฉะนั้น

$$\eta = \frac{14.54}{17.73} \times 100 = 82.01\% \quad ***$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 ผลการทดลอง

ผลของการฉีดแบบหัวเดียว (หัวฉีดบน-ล่าง) และฉีดแบบหัวฉีด2หัว มีค่าปรากฏตามตารางและกราฟต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความสัมพัทธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนมุม 0 องศา

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วรอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงานที่ออกจากกังหัน (w)	พลังงานที่ให้เข้าไปยังกังหัน (w)	อัตราการไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็วของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิภาพ (%)
283.2								
282.9	283.03	29.6242	0.08065	2.3891	17.7783	0.000449	8.9225	13.4384
283.0								
283.5								
282.6	282.93	29.6137	0.08062	2.3874	17.5663	0.000447	8.8816	13.5908
282.7								
280.7								
283.2	282.37	29.5544	0.08045	2.3777	17.5443	0.000447	8.8778	13.5527
283.2								
284.1								
282.2	282.80	29.5997	0.08058	2.3851	17.4562	0.000446	8.8630	13.6634
282.1								
281.6								
282.1	282.20	29.5369	0.08040	2.3749	17.1722	0.000443	8.8146	13.8297
282.9								
279.7								
283.0	282.80	29.5997	0.08058	2.3851	16.9343	0.000441	8.7738	14.0845
285.7								
275.0								
280.7	279.13	29.2160	0.07950	2.3228	16.8913	0.000441	8.7663	13.7515
281.7								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

280.1								
282.6	280.97	29.4078	0.08004	2.3539	16.6347	0.000439	8.7217	14.1503
280.2								
280.4								
281.0	280.90	29.4009	0.08002	2.3527	15.9219	0.000432	8.5953	14.7766
281.3								
273.9								
277.9	276.93	28.9857	0.07890	2.2858	15.6753	0.00043	8.5507	14.5822
279								
275.2								
277.4	276.27	28.9159	0.07867	2.2747	15.5326	0.000429	8.5247	14.6444
276.2								
271.2								
273.7	272.90	28.5635	0.07768	2.2187	15.3908	0.000427	8.4986	14.4161
273.8								
262.4								
270.4	267.63	28.0123	0.07613	2.1327	15.0698	0.000424	8.4392	14.1521
270.1								
267.1								
268.9	268.70	28.1239	0.07645	2.1499	15.0698	0.000424	8.4392	14.2668
270.1								
264.0								
262.9	263.57	27.5866	0.07494	2.0674	14.9309	0.000423	8.4131	13.8465
263.8								
258.0								
259.6	258.93	27.1017	0.07359	1.9943	12.6794	0.000401	7.9670	15.7284
259.2								
246.1								
246.0	246.13	25.7620	0.06983	1.7990	11.4273	0.000387	7.6956	15.7434

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

246.3								
228.6								
227.3	228.23	23.8884	0.06459	1.5429	8.7394	0.000354	7.0376	17.6544
228.8								
196.1								
195.3	195.37	20.4484	0.05495	1.1237	4.7698	0.000289	5.7513	23.5595
194.7								
137.8								
110.8	120.53	12.6158	0.03302	0.4166	2.0110	0.000217	4.3125	20.7178
113.0								

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนมุมเงย 5 องศา

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว รอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงาน ที่ออกจาก กึ่งหัน (W)	พลังงาน ที่ให้เข้าไปยัง กึ่งหัน (W)	อัตรา การไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็ว ของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิ ภาพ (%)
258.6								
257.8	257.93	26.9970	0.0733	1.9787	17.8101	0.000448	8.9225	11.1097
257.4								
256.2								
255.9	255.90	26.7842	0.0727	1.9471	17.5663	0.000447	8.8816	11.0843
255.6								
255.5								
255.0	255.10	26.7005	0.0724	1.9348	17.5443	0.000447	8.8778	11.0278
254.8								
248.3								
247.7	247.33	25.8876	0.0702	1.8169	17.4563	0.000446	8.8630	10.4084
246.0								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

247.0								
247.8	247.33	25.8876	0.0702	1.8169	17.1722	0.000443	8.8146	10.5806
247.2								
253.2								
251.3	252.20	26.3969	0.0716	1.8903	16.9343	0.000441	8.7738	11.1626
252.1								
255.7								
255.2	255.13	26.7040	0.0724	1.9353	16.8913	0.000441	8.7663	11.4571
254.5								
253.6								
251.1	252.86	26.4667	0.0718	1.9005	16.6348	0.000439	8.7217	11.4248
253.9								
248.2								
247.0	247.60	25.9155	0.0703	1.8209	15.9219	0.000432	8.5953	11.4365
247.6								
249.1								
248.5	248.80	26.0411	0.0706	1.8389	15.6753	0.000430	8.5507	11.7311
248.8								
247.4								
246.8	246.80	25.8317	0.0701	1.8089	15.5326	0.000429	8.5247	11.6462
246.2								
231.4								
234.4	233.60	24.4501	0.0662	1.6176	15.3908	0.000427	8.4986	10.5104
235.0								
228.4								
228.8	228.20	23.8849	0.0646	1.5424	15.0698	0.000424	8.4392	10.2352
227.4								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

235.7								
236.4	236.23	24.7258	0.0669	1.6549	15.0699	0.000424	8.4392	10.9818
236.6								
231.6								
231.5	231.63	24.2443	0.0656	1.5900	14.9309	0.000423	8.4131	10.6493
231.8								
216.6								
216.5	216.30	22.6394	0.0611	1.3830	12.6794	0.000401	7.9670	10.9078
215.8								
208.9								
207.6	207.90	21.7602	0.0586	1.2758	11.4273	0.000387	7.6956	11.1642
207.2								
189.4								
189.7	189.67	19.8518	0.0533	1.0578	8.7394	0.000354	7.0376	12.1037
189.9								
145.7								
146.0	145.97	15.2778	0.0405	0.6184	4.7698	0.000289	5.7513	12.9651
146.2								

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนมุมกด 5 องศา

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว รอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงาน ที่ออกจาก ก้าน (W)	พลังงาน ที่ให้เข้าไปยัง ก้าน (W)	อัตรา การไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็ว ของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิ ภาพ (%)
213.3								
215.8	214.73	22.4754	0.0606	1.3627	17.8101	0.000448	8.9225	7.6513
215.1								
215.3								
215.0	215.00	22.5033	0.0607	1.3662	17.5663	0.000447	8.8816	7.7772
214.7								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

214.4								
213.4	213.90	22.3882	0.0604	1.3519	17.5443	0.000447	8.8778	7.7060
213.9								
215.1								
214.3	214.66	22.4684	0.0606	1.3618	17.4562	0.000446	8.8630	7.8015
214.6								
213.3								
213.1	213.26	22.3219	0.0602	1.3438	17.1722	0.000443	8.8146	7.8255
213.4								
213.0								
213.1	213.16	22.3114	0.0602	1.3425	16.9343	0.000441	8.7738	7.9278
213.4								
213.0								
213.2	212.93	22.2870	0.0601	1.3395	16.8913	0.000441	8.7663	7.9303
212.6								
213.3								
213.7	213.56	22.3533	0.0603	1.3476	16.6347	0.000439	8.7217	8.1015
213.7								
214.1								
214.7	214.46	22.4475	0.0605	1.3593	15.9219	0.000432	8.5953	8.5371
214.6								
213.3								
213.3	213.20	22.3149	0.0601	1.3429	15.6753	0.000430	8.5507	8.5673
213.0								
210.8								
211.0	210.90	22.0742	0.0595	1.3136	15.5326	0.000429	8.5247	8.4570
210.9								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

208.2								
207.6	207.76	21.7462	0.0586	1.2741	15.3908	0.000427	8.4986	8.2783
207.5								
206.1								
206.4	206.40	21.6032	0.0582	1.2571	15.0699	0.000424	8.4392	8.3416
206.7								
204.4								
204.6	204.50	21.4043	0.0576	1.2336	15.0699	0.000424	8.4392	8.1857
204.5								
200.4								
200.6	200.36	20.9717	0.0564	1.1832	14.9309	0.000423	8.4131	7.9248
200.1								
194.5								
194.6	194.50	20.3577	0.0547	1.1136	12.6794	0.000401	7.9670	8.7827
194.4								
186.0								
185.8	186.00	19.4680	0.0522	1.0164	11.4273	0.000387	7.6956	8.8948
186.2								
169.3								
169.4	169.40	17.7305	0.0473	0.8395	8.7394	0.000354	7.0376	9.6054
169.5								
140.0								
140.5	140.26	14.6812	0.0388	0.5697	4.7698	0.000289	5.7513	11.9447
140.3								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวถังนม 0 องศา

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วรอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงานที่ออกจากกังหัน (w)	พลังงานที่ให้เข้าไปยังกังหัน (w)	อัตราไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็วของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิภาพ (%)
253.0								
251.0	252.27	26.4039	0.0716	1.8913	16.7413	0.000439	8.7403	11.2974
252.8								
265.0								
266.0	264.80	27.7157	0.0753	2.0871	16.7841	0.000440	8.7477	12.4350
263.4								
255.2								
251.8	253.23	26.5051	0.0719	1.9061	16.6560	0.000438	8.7254	11.4439
252.7								
252.4								
250.3	251.43	26.3167	0.0714	1.8787	16.6986	0.000439	8.7329	11.2504
251.6								
249.9								
251.4	249.43	26.1074	0.0708	1.8484	16.4018	0.000437	8.6808	11.2696
247.0								
248.4								
252.7	251.10	26.2818	0.0713	1.8736	16.1503	0.000434	8.6362	11.6011
252.2								
247.3								
252.2	250.23	26.1911	0.0710	1.8605	15.8806	0.000432	8.5879	11.7154
251.2								
250.6								
249.6	249.67	26.1318	0.0709	1.8519	15.5936	0.000429	8.5358	11.8762
248.8								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

248.5								
249.8	249.30	26.0934	0.0708	1.8464	15.4109	0.000428	8.5024	11.9811
249.6								
245.7								
247.9	247.23	25.8771	0.0702	1.8154	15.1097	0.000425	8.4466	12.0149
248.1								
247.1								
247.2	246.97	25.8492	0.0701	1.8114	14.9309	0.000423	8.4131	12.1322
246.6								
242.8								
243.6	243.80	25.5177	0.0691	1.7645	14.6751	0.000421	8.3648	12.0241
245.0								
238.4								
241.1	240.30	25.1514	0.0681	1.7134	14.6164	0.000420	8.3536	11.7225
241.4								
240.2								
241.5	240.33	25.1549	0.0681	1.7139	14.4803	0.000419	8.3276	11.8361
239.3								
237.0								
240.6	238.77	24.9909	0.0677	1.6912	15.2097	0.000426	8.4652	11.1195
238.7								
239.7								
237.3	238.00	24.9107	0.0674	1.6802	11.5937	0.000389	7.7328	14.4925
237.0								
232.8								
234.2	233.13	24.4013	0.0660	1.6111	10.1989	0.000373	7.4094	15.7964
232.4								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

224.2								
235.6	228.60	23.9268	0.0647	1.5479	7.8956	0.000342	6.8034	19.6052
226.0								
152.4								
153.0	152.27	15.9372	0.0423	0.6745	3.8229	0.000269	5.3423	17.6441
151.4								
81.7								
83.3	82.43	8.6280	0.0218	0.1886	0.7718	0.000158	3.1340	24.4352
82.3								

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวต้งมุมยก 5 องศา

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วรอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงานที่ออกจากกังหัน (W)	พลังงานที่ให้เข้าไปยังกังหัน (W)	อัตราไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็วของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิภาพ (%)
197.2								
197.3	197.30	20.6507	0.0555	1.1466	16.7413	0.000439	8.7403	6.8487
197.4								
198.6								
197.4	197.70	20.6926	0.0556	1.1513	16.7841	0.000440	8.7477	6.8596
197.1								
197.1								
194.7	196.23	20.5391	0.0552	1.1339	16.6560	0.000438	8.7254	6.8081
196.9								
195.5								
196.2	196.13	20.5286	0.0552	1.1328	16.6987	0.000439	8.7329	6.7836
196.7								
198.0								
197.4	197.57	20.6787	0.0556	1.1497	16.4019	0.000437	8.6808	7.0098
197.3								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

196.6								
197.8	197.20	20.6403	0.0555	1.1454	16.1503	0.000434	8.6362	7.0921
197.2								
195.4								
198.5	196.50	20.5670	0.0553	1.1371	15.8807	0.000432	8.5879	7.1603
195.6								
196.4								
198.0	197.30	20.6507	0.0555	1.1466	15.5937	0.000429	8.5358	7.3528
197.5								
195.6								
198.1	196.03	20.5182	0.0551	1.1316	15.4110	0.000428	8.5024	7.3427
194.4								
195.3								
195.3	195.03	20.4135	0.0549	1.1198	15.1098	0.000425	8.4466	7.4114
194.5								
194.8								
193.3	194.27	20.3332	0.0546	1.1109	14.9309	0.000423	8.4131	7.4401
194.7								
190.8								
191.4	191.47	20.0402	0.0538	1.0784	14.6751	0.000421	8.3648	7.3486
192.2								
188.9								
188.7	189.03	19.7855	0.0531	1.0506	14.6164	0.000420	8.3536	7.1878
189.5								
187.4								
187.2	187.47	19.6215	0.0526	1.0329	14.4803	0.000419	8.3276	7.1330
187.8								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้วงงเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

186.0								
185.7	185.97	19.4645	0.0522	1.0161	15.2097	0.000426	8.4652	6.6803
186.2								
180.8								
180.6	180.67	18.9098	0.0506	0.9577	11.5937	0.000389	7.7328	8.2608
180.6								
173.9								
173.6	173.80	18.1911	0.0486	0.8847	10.1989	0.000373	7.4094	8.6747
173.9								
162.8								
163.4	162.97	17.0572	0.0455	0.7754	7.8956	0.000342	6.8034	9.8209
162.7								
114.8								
115.8	115.40	12.0785	0.0315	0.3807	3.8230	0.000269	5.3423	9.9585
115.6								

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวล่างมุมกด 5 องศา

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว รอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงาน ที่ออกจาก ก้าน (W)	พลังงาน ที่ให้เข้าไปยัง ก้าน (W)	อัตรา การไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็ว ของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิ ภาพ (%)
262.5								
260.8	261.77	27.3982	0.0744	2.0388	16.7413	0.000439	8.7403	12.1785
262.0								
261.7								
261.2	260.70	27.2866	0.0741	2.0220	16.7841	0.000440	8.7477	12.0472
259.2								
261.0								
261.4	261.40	27.3599	0.0743	2.0330	16.6560	0.000438	8.7254	12.2061
261.8								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

260.8								
261.0	261.17	27.3354	0.0742	2.0294	16.4019	0.000439	8.7329	12.3728
261.7								
260.8								
260.4	260.60	27.2761	0.0741	2.0204	16.1503	0.000437	8.6808	12.5102
260.6								
260.5								
260.6	260.57	27.2726	0.0741	2.0199	15.8807	0.000434	8.6362	12.7193
260.6								
261.0								
260.8	260.77	27.2936	0.0741	2.0231	15.5937	0.000432	8.5879	12.9736
260.5								
260.6								
260.7	260.70	27.2866	0.0741	2.0220	15.4110	0.000429	8.5358	13.1205
260.8								
259.7								
259.8	259.90	27.2029	0.0739	2.0094	15.1098	0.000428	8.5024	13.2989
260.2								
257.4								
257.8	257.43	26.9447	0.0731	1.9709	14.9309	0.000425	8.4466	13.1999
257.1								
255.3								
255.1	255.27	26.7179	0.0725	1.9373	14.6751	0.000423	8.4131	13.2015
255.4								
252.2								
252.3	252.43	26.4214	0.0717	1.8939	14.6164	0.000421	8.3648	12.9572
252.8								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

246.6								
247.2	247.00	25.8527	0.0701	1.8119	14.4803	0.000420	8.3536	12.5132
247.2								
244.0								
243.7	243.93	25.5317	0.0692	1.7665	15.2097	0.000419	8.3276	11.6143
244.1								
238.0								
238.0	238.13	24.9246	0.0675	1.6821	11.5937	0.000426	8.4652	14.5091
238.4								
228.1								
226.9	227.53	23.8152	0.0644	1.5333	10.1989	0.000389	7.7328	15.0337
227.6								
209.1								
209.1	209.20	21.8963	0.0590	1.2921	7.8956	0.000373	7.4094	16.3647
209.4								
141.3								
141.2	141.13	14.7719	0.0391	0.5770	3.8230	0.000342	6.8034	15.0933
140.9								

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนมุมยก 5 องศา และหัวล่าง 0 องศา

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว รอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงาน ที่ออกจาก กังหัน (W)	พลังงาน ที่ให้เข้า ไปยัง กังหัน (W)	อัตรา การไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็ว ของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิ ภาพ (%)
152.2								
152.1	152.20	15.9303	0.0738	1.1752	25.1338	0.000506	10.0638	4.675679
152.3								
152.4								
153.0	152.70	15.9826	0.0739	1.1818	25.0219	0.000505	10.0526	4.723044
152.7								

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

153.2								
153.1	153.20	16.0349	0.0741	1.1884	24.9103	0.000505	10.0377	4.770843
153.3								
152.4								
152.2	152.23	15.9338	0.0738	1.1756	24.7991	0.000504	10.0229	4.740546
152.1								
152.5								
152.3	152.40	15.9512	0.0738	1.1778	24.6883	0.000503	10.0080	4.770769
152.4								
151.9								
152.1	151.93	15.9024	0.0737	1.1717	24.5777	0.000503	9.9932	4.767123
151.8								
152.4								
151.5	152.06	15.9163	0.0737	1.1734	24.4675	0.000502	9.9783	4.795795
152.3								
151.8								
152.2	152.10	15.9198	0.0737	1.1738	24.3576	0.000501	9.9634	4.819238
152.3								
152.3								
152.2	152.23	15.9338	0.0738	1.1756	24.2481	0.000500	9.9485	4.848282
152.2								
151.9								
151.8	151.86	15.8954	0.0737	1.1708	24.1388	0.000499	9.9337	4.850150
151.9								
151.7								
151.8	151.63	15.8710	0.0736	1.1677	24.0299	0.000499	9.9188	4.859321
151.4								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

151.6								
151.2	151.46	15.8535	0.0735	1.1655	23.9214	0.000498	9.9039	4.872195
151.6								
150.7								
150.1	150.33	15.7349	0.0731	1.1506	23.8131	0.000497	9.8891	4.831854
150.2								
149.9								
149.4	149.63	15.6616	0.0729	1.1415	23.7052	0.000496	9.8742	4.815275
149.6								
149.2								
149.0	149.03	15.5988	0.0727	1.1337	21.3625	0.000496	9.8593	5.306776
148.9								
147.8								
147.5	147.73	15.4628	0.0722	1.1168	16.6560	0.000495	9.8444	6.705259
147.9								
145.9								
146.3	146.26	15.3092	0.0717	1.0980	13.3476	0.000494	9.8296	8.226127
146.6								
143.3								
143.1	143.23	14.9918	0.0707	1.0595	11.8125	0.000494	9.8147	8.969430
143.3								
138.6								
138.1	138.43	14.4894	0.0690	0.9999	5.1495	0.000477	9.4801	19.41908
138.6								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนมุมเงย 5 องศา และหัวล่างมุมเงย 5 องศา

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วรอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงานที่ออกจากกังหัน (W)	พลังงานที่ให้เข้าไปยังกังหัน (W)	อัตราการไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็วของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิภาพ (%)
124.6								
124.6	124.50	13.0310	0.0642	0.8366	25.1338	0.000506	10.0638	3.3287
124.3								
123.9								
123.9	124.07	12.9856	0.0640	0.8318	25.0219	0.000505	10.0526	3.3241
124.4								
124.0								
124.2	124.10	12.9891	0.0641	0.8321	24.9103	0.000505	10.0377	3.3405
124.1								
124.6								
124.6	124.57	13.0380	0.0642	0.8374	24.7991	0.000504	10.0229	3.3766
124.5								
124.5								
124.3	124.33	13.0136	0.0641	0.8347	24.6883	0.000503	10.0080	3.3812
124.2								
123.7								
124.3	124.13	12.9926	0.0640	0.8325	24.5777	0.000503	9.9932	3.3873
124.4								
124.4								
124.2	124.16	12.9961	0.0641	0.8329	24.4675	0.000502	9.9783	3.4040
123.9								
124.6								
124.3	124.36	13.0170	0.0642	0.8351	24.3576	0.000501	9.9634	3.4286
124.2								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

124.1								
124.3	124.23	13.0031	0.0641	0.8336	24.2481	0.000500	9.9485	3.4379
124.3								
124.7								
123.9	124.26	13.0066	0.0641	0.8340	24.1388	0.000499	9.9337	3.4550
124.2								
122.8								
123.4	123.16	12.8914	0.0637	0.8217	24.0299	0.000499	9.9188	3.4196
123.3								
123.3								
123.1	123.03	12.8775	0.0637	0.8202	23.9214	0.000498	9.9039	3.4289
122.7								
123.3								
123.3	123.1333	12.8880	0.0637	0.8213	23.8131	0.000497	9.8891	3.4492
122.8								
121.9								
122.0	121.83	12.7519	0.0633	0.8070	23.7052	0.000496	9.8742	3.4041
121.6								
121.0								
121.0	121.16	12.6821	0.0630	0.7996	21.3625	0.000496	9.8593	3.743092
121.5								
119.7								
118.5	119.03	12.4588	0.0623	0.7764	16.6560	0.000495	9.8444	4.661137
118.9								
118.4								
118.2	118.23	12.3751	0.0620	0.7677	13.3476	0.000494	9.8296	5.751789
118.1								
117.7								
117.5	117.26	12.2739	0.0617	0.7573	11.8124	0.000494	9.8147	6.411442

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

116.6								
114.6								
113.6	113.83	11.9146	0.0605	0.7210	5.1495	0.000477	9.4801	14.00231
113.3								

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความสั่นพ้องต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนมุมเงย 5 องศา และหัวล่างมุมกด 5 องศา

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว รอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad)	แรงบิด ตามจริง (N.m)	พลังงาน ที่ออกจาก กังหัน (W)	พลังงาน ที่ให้เข้าไปยัง กังหัน (W)	อัตรา การไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็ว ของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิ ภาพ (%)
140.1								
139.8	139.90	14.6429	0.0695	1.0180	25.1337	0.000506	10.0638	4.0503
139.8								
139.0								
138.8	138.87	14.5347	0.0692	1.0053	25.0219	0.000505	10.0526	4.0176
138.8								
138.6								
139.0	138.83	14.5312	0.0691	1.0049	24.9104	0.000505	10.0377	4.0339
138.9								
138.4								
138.5	138.43	14.4894	0.0690	0.9999	24.7991	0.000504	10.0229	4.0323
138.4								
138.4								
138.5	138.30	14.4754	0.0689	0.9984	24.6883	0.000503	10.0080	4.0438
138.0								
138.2								
137.5	137.93	14.4370	0.0688	0.9939	24.5777	0.000502	9.9932	4.0438
138.1								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

137.3								
137.9	137.63	14.4056	0.0687	0.9902	24.4675	0.000502	9.9783	4.0471
137.7								
137.7								
137.8	137.83	14.4266	0.0688	0.9927	24.3576	0.000501	9.9634	4.0753
138.0								
137.4								
137.5	137.40	14.3812	0.0687	0.9874	24.2481	0.000500	9.9485	4.0720
137.3								
136.6								
136.7	136.70	14.3079	0.0684	0.9789	24.1388	0.000499	9.9337	4.0553
136.8								
137.2								
136.5	136.90	14.3289	0.0685	0.9813	24.0299	0.000499	9.9188	4.0837
137.0								
136.3								
136.6	136.46	14.2835	0.0683	0.9761	23.9214	0.000498	9.9039	4.0803
136.5								
135.4								
135.1	135.53	14.1858	0.0680	0.9648	23.8131	0.000497	9.8891	4.0516
136.1								
135.0								
134.4	134.76	14.1056	0.0677	0.9556	23.7052	0.000497	9.8742	4.0313
134.9								
133.1								
133.5	133.43	13.9660	0.0673	0.9397	21.3625	0.000496	9.8593	4.3990
133.7								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

131.6								
131.6	131.77	13.7916	0.0667	0.9201	16.6560	0.000495	9.8444	5.5239
132.1								
128.2								
128.1	128.20	13.4183	0.0655	0.8786	13.3476	0.000494	9.8296	6.5827
128.3								
125.4								
124.9	125.03	13.0868	0.0644	0.8426	11.8125	0.000494	9.8147	7.1333
124.8								
114.6								
114.3	114.50	11.9843	0.0607	0.7280	5.1495	0.000477	9.4801	14.1379
114.6								

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ ในกรณีที่หัวบนและหัวล่างทำมุม 0 องศาทั้ง 2 หัว

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว รอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงาน ที่ออกจาก ก้าน (W)	พลังงาน ที่ให้เข้าไปยัง ก้าน (W)	อัตรา การไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็ว ของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิ ภาพ (%)
149.7								
150.3	150.13	15.7140	0.0731	1.1480	25.5562	0.000506	10.0638	4.4921
150.4								
146.9								
149.4	148.63	15.5570	0.0725	1.1285	25.4714	0.000505	10.0526	4.4303
149.6								
146.7								
150.7	149.10	15.6058	0.0727	1.1345	25.3585	0.000505	10.0377	4.4739
149.9								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

149.6								
150.4	149.90	15.6895	0.0730	1.1449	25.2460	0.000504	10.0229	4.5352
149.7								
145.5								
149.2	147.47	15.4348	0.0721	1.11339	25.1338	0.000503	10.0080	4.4299
147.7								
148.1								
147.8	147.30	15.4174	0.0721	1.1112	25.0219	0.000502	9.9932	4.4411
146.0								
147.7								
148.0	148.60	15.5535	0.0725	1.1280	24.9103	0.000502	9.9783	4.5284
150.1								
146.2								
149.4	148.43	15.5360	0.0725	1.1259	24.7991	0.000501	9.9634	4.5400
149.7								
148.1								
147.9	148.47	15.5395	0.0725	1.1263	24.6883	0.000500	9.9485	4.5621
149.4								
150.3								
148.4	149.20	15.6163	0.0727	1.1358	24.5777	0.000499	9.9337	4.6214
148.9								
147.9								
149.8	148.60	15.5535	0.0725	1.1280	24.4675	0.000499	9.9188	4.6103
148.1								
148.0								
147.9	147.60	15.4488	0.0721	1.1151	24.3576	0.000498	9.9039	4.5781
146.9								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

143.9								
148.3	146.30	15.3127	0.0717	1.0984	24.2481	0.000497	9.8891	4.5299
146.7								
148.4								
146.2	147.27	15.4139	0.0721	1.1108	24.1388	0.000497	9.8742	4.6018
147.2								
147.7								
147.7	147.37	15.4244	0.0721	1.1121	24.0299	0.000496	9.8593	4.6280
146.7								
147.2								
148.9	147.67	15.4558	0.0722	1.1160	23.9214	0.000495	9.8444	4.6652
146.9								
146.3								
145.6	146.60	15.3441	0.0718	1.1023	23.8131	0.000494	9.8296	4.6288
147.9								
147.6								
147.9	147.70	15.4593	0.0722	1.1164	23.7052	0.000494	9.8147	4.7095
147.6								
144.5								
143.7	144.73	15.1488	0.0712	1.0784	21.3625	0.000477	9.4801	5.0483
146.0								
135.7								
135.7	134.63	14.0916	0.0677	0.9540	16.6560	0.000439	8.7254	5.7279
132.5								
133.4								
132.5	132.87	13.9067	0.0671	0.9330	13.3475	0.000408	8.1046	6.9903
132.7								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้เองเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเอาไปทำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

128.9								
125.5	126.93	13.2857	0.0650	0.8641	11.8124	0.000391	7.7811	11.0466
126.4								
92.2								
92.8	92.633	6.6956	0.0433	0.2899	5.1495	0.000297	5.8999	10.1709
92.9								

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าความสั่นพ้องต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนมุม 0 องศา และหัวล่างมุมเงย 5 องศา

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว รอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงานที่ ออกจาก ก้าน (W)	พลังงาน ที่ให้เข้าไปยัง ก้าน (W)	อัตรา การไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็ว ของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิ ภาพ (%)
125.9								
126.1	126.07	13.1950	0.0647	0.8543	25.1338	0.000506	10.0638	3.3990
126.2								
125.6								
125.8	125.63	13.1496	0.0646	0.8494	25.0219	0.000505	10.0526	3.3946
125.5								
126.1								
125.4	125.87	13.1740	0.0647	0.8520	24.9103	0.000505	10.0377	3.4203
126.1								
125.6								
125.6	125.77	13.1636	0.0646	0.8509	24.7991	0.000504	10.0229	3.431132
126.1								
125.6								
125.8	125.63	13.1496	0.0646	0.8494	24.6883	0.000503	10.0080	3.440434
125.5								
125.4								
125.4	125.30	13.1147	0.0645	0.8456	24.5777	0.000503	9.9932	3.4406
125.1								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

125.4								
125.1	125.33	13.1182	0.0645	0.8460	24.4675	0.000502	9.9783	3.4576
125.5								
124.8								
124.8	124.93	13.0764	0.0643	0.8415	24.3576	0.000501	9.9634	3.4547
125.2								
124.9								
124.6	124.83	13.0659	0.0643	0.8404	24.2481	0.000500	9.9485	3.4657
125.0								
124.5								
124.3	124.43	13.0240	0.0642	0.8359	24.1388	0.000499	9.9337	3.4628
124.5								
124.3								
124.3	124.27	13.0066	0.0641	0.8340	24.0299	0.000499	9.9188	3.4707
124.2								
123.5								
124.3	123.87	12.9647	0.0640	0.8295	23.9214	0.000498	9.9039	3.4677
123.8								
123.2								
123.2	123.00	12.8740	0.0637	0.8199	23.8131	0.000497	9.8891	3.4429
122.6								
122.0								
122.1	122.10	12.7798	0.0634	0.8099	23.7052	0.000497	9.8742	3.4165
122.2								
120.9								
120.5	120.63	12.6263	0.0629	0.7938	21.3625	0.000496	9.8593	3.7157
120.5								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้เองเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

119.2								
119.5	119.40	12.4972	0.0624	0.7803	16.6560	0.000495	9.8444	4.6845
119.5								
116.9								
116.4	116.60	12.2041	0.0615	0.7502	13.3475	0.000494	9.8296	5.6207
116.5								
111.0								
111.1	110.97	11.6145	0.0595	0.6914	11.8124	0.000494	9.8147	5.8530
110.8								
99.3								
99.0	99.23	10.3864	0.0555	0.5762	5.14948	0.000477	9.4801	11.1893
99.4								

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความสั่นพ้องต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนมุม 0 องศา และหัวล่างมุมกด 5 องศา

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วรอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงานที่ออกจากกังหัน (W)	พลังงานที่ให้เข้าไปยังกังหัน (W)	อัตราการไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็วของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิภาพ (%)
152.1								
152.0	152.10	15.9198	0.0737	1.1738	25.1338	0.000506	10.0638	4.6704
152.2								
151.2								
151.1	150.90	15.7942	0.0733	1.1580	25.0219	0.000505	10.0526	4.6281
150.4								
151.8								
151.6	151.80	15.8884	0.0736	1.1699	24.9103	0.000505	10.0377	4.6964
152.0								
151.6								
151.4	151.47	15.8535	0.0735	1.1655	24.7991	0.000504	10.0229	4.6997
151.4								

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

151.5								
152.1	151.93	15.9024	0.0737	1.1716	24.6883	0.000503	10.0080	4.7458
152.2								
151.6								
152.0	151.87	15.8954	0.0737	1.1708	24.5777	0.000503	9.9932	4.7635
152.0								
151.6								
151.6	151.67	15.8744	0.0736	1.1681	24.4675	0.000502	9.9783	4.7742
151.8								
151.3								
151.0	151.40	15.8465	0.0735	1.1646	24.3576	0.000501	9.9634	4.7813
151.9								
151.3								
151.7	151.27	15.8326	0.0734	1.1629	24.2481	0.000500	9.9485	4.7957
150.8								
150.7								
151.6	151.17	15.8221	0.0734	1.1615	24.1388	0.000499	9.9337	4.8119
151.2								
151.3								
150.8	151.00	15.8047	0.0733	1.1594	24.0299	0.000499	9.9188	4.8246
150.9								
150.8								
149.4	150.10	15.7105	0.0730	1.1476	23.9214	0.000498	9.9039	4.7972
150.1								
148.9								
148.9	149.07	15.6023	0.0727	1.1341	23.8131	0.000497	9.8891	4.7625
149.4								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ขั้นตอนและผลการทดลอง

#### 4.1 หลักการและเหตุผลในการทดลอง

จากการออกแบบและสร้างแบบจำลองการทำงานของล้อยก้นแบบล้อยก้นเพลดันจำเป็นที่จะต้องมีการทดลอง ผลจากการทำงานของเครื่องเพื่อทดสอบประสิทธิภาพและสรุปผลต่างๆที่เกิดขึ้นด้วยเหตุนี้จึงสามารถแบ่งสภาวะการทดลองได้คือ สภาวะการหมุนของล้อยก้นที่หมุนอิสระ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี

- 4.1.1 กรณีเปิดหัวฉีดล่างเพียงหัวเดียว
- 4.1.2 กรณีเปิดหัวฉีดบนเพียงหัวเดียว
- 4.1.3 กรณีเปิดพร้อมกันทั้ง 2 หัวฉีด

#### 4.2 ขั้นตอนและอุปกรณ์การหาอัตราการไหลของน้ำ

ในการหาอัตราการไหลของน้ำนั้น

อุปกรณ์ในการหาอัตราการไหลนั้นหลักๆคือ

1. ถังน้ำทรงสี่เหลี่ยม ซึ่งมีพิกัด กว้าง : ยาว : สูง = 0.28 เมตร : 0.4 เมตร : 0.3 เมตร
2. อุปกรณ์จับเวลา

และขั้นตอนการหาอัตราการไหลมีดังนี้ คือ

- 4.2.1 ทำการเปิดปั๊ม, เปิดวาล์ว โดยรอเวลาที่น้ำทำการวิ่งเต็มท่อ
- 4.2.2 เมื่อน้ำวิ่งเต็มท่อและคงที่แล้ว จึงนำสายยางพร้อมหัวฉีดมาฉีดใส่ถังบรรจุน้ำ และเริ่มต้นจับเวลา 1 นาที
- 4.2.3 เมื่อครบ 1 นาทีแล้ว ก็นำสายยางออกจากถัง และทำการวัดความสูงของระดับน้ำในถัง
- 4.2.4 เมื่อได้ความสูงเฉลี่ยมาแล้ว เราจะมาหาค่าอัตราการไหลจาก

$$\text{อัตราการไหล (ลิตร/ min)} = \text{ปริมาตรของน้ำ (ลิตร)/ เวลา (min)} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

และ

$$\text{ปริมาตร (m}^3\text{)} = \text{กว้าง (m) x ยาว (m) x สูง (m)} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

$$\text{โดยที่ 1 ลิตร} = 10^{-3} \text{ m}^3$$

ตัวอย่างการคำนวณอัตราการไหลของ 1 หัวฉีด (หัวฉีดบน)

$$\text{โดย กำหนดให้ทำการเปิดวาล์วแล้ว และ 1 ลิตร} = 10^{-3} \text{ m}^3$$

ดังนั้นได้ความสูง  $h = 0.24 \text{ m}$  มาแล้วก็จะหาปริมาตรได้จากสมการ 4.2 คือ

$$\text{ปริมาตร} = 0.4 \times 0.28 \times 0.24 = 0.02688 \text{ m}^3 = 26.88 \text{ ลิตร}$$

เพราะฉะนั้น จะหาอัตราการไหลได้จาก สมการ 4.2 คือ

$$\text{อัตราการไหล} = 26.88 \text{ ลิตร} / 1 \text{ นาที} = 26.88 \text{ ลิตร/นาที} = 0.448 \text{ ลิตร/วินาที}$$

$= 0.02688 \text{ m}^3 / \text{min} = 4.48 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s} \quad \text{***}$  ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 วิธีการวัดทอร์ก

ในการทำชุดวัดทอร์กนี้เพื่อที่ต้องการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กกับความเร็วรอบ จากนั้นเมื่อได้สมการแล้วก็จะนำสมการที่ได้มาคำนวณหาค่าทอร์กที่แท้จริงจากการปฏิบัติ โดยมีวิธีการดังนี้

1. กรณีแรกคือเปิดหัวฉีดเพียงหัวฉีด โดยทำการปรับอัตราการไหลที่เปิดควาล์วสุด
2. เริ่มต้นด้วยการวัดระยะสปริงในขณะที่ยังไม่ได้ใส่แรง บันทึกผลการทดลอง
3. ใส่น้ำหนักที่มีขนาด 0.1765 kg จากนั้นวัดระยะยืดของสปริง และวัดความเร็วรอบ บันทึกผลการทดลอง
4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 3 แต่เปลี่ยนน้ำหนักที่ใส่เข้าไป บันทึกผลการทดลอง
5. ทำการทดลองเหมือนกับข้อที่ 1-4 แต่เปลี่ยนจากการเปิดเพียงหัวฉีดเดียวเป็น 2 หัวฉีด
6. นำผลที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟระหว่างทอร์ก กับ ความเร็วรอบ และสมการความสัมพันธ์

4.4 วิธีการทดลอง

สำหรับการทดลองในโครงการนี้จะเน้นถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในแต่ละกรณี ซึ่งในปริยภูณานิพนธ์ฉบับนี้จะยึดการเปลี่ยนค่าของ 3 ตัวแปรเป็นหลักคือ

- 1.) การเปลี่ยนค่าอัตราการไหล (Q) ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงที่ค่าต่างๆ จากการปรับควาล์วลงเรื่อยๆ
- 2.) การเปลี่ยนแปลงจำนวนหัวฉีด จาก 1 หัวฉีด เป็น 2 หัวฉีด
- 3.) มุมของการฉีด โดยจะปรับขึ้นและลงอย่างละ 5 องศา

ในส่วนการหาประสิทธิภาพนั้นสามารถคำนวณหาได้จาก

$$\eta_t = \frac{P_{output}}{P_{input}} \times 100 \dots\dots\dots (4.3)$$

โดยที่ 
$$P_{input} = \frac{1}{2} \rho Q v_j^2 \dots\dots\dots (4.4)$$

$$P_{output} = T \cdot \omega \dots\dots\dots (4.5)$$

โดยที่ 
$$T = F \cdot r = mg \cdot \frac{d}{2} \dots\dots\dots (4.6)$$

และ 
$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \dots\dots\dots (4.7)$$

จะเห็นว่าจากสมการ 4.7 และ สมการ 4.8 จะมีค่าที่เก็บได้จากการทดลองคือ ค่าความเร็วรอบ(N) และค่าแรงค้ำจากดาซิ่งสปริง (m)

สำหรับวิธีการทดลองนั้นมีดังนี้

- 4.3.1 ใช้ปั๊มขนาด 0.5 แรงม้า และมีจำนวนใบพัด 30 ใบ และทำการฉีดน้ำผ่านหัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร โดยกำหนดอัตราการไหลที่เปิดควาล์วสุด
- 4.3.2 ทำการเปิดหัวฉีดบนเพียงอย่างเดียวตั้งไว้ที่มุม 0° จากนั้นก็ทำการเก็บค่าความเร็วรอบ (N) จากการ ใช้ Photo Tachometer เก็บค่าและหาค่าเฉลี่ยของความเร็วรอบจาก

$$N_{av} = \frac{N_1 + N_2 + N_3}{3} \dots\dots\dots (4.8)$$

และทำการปรับมุมของการฉีดเป็น 5 องศา และ -5 องศา ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ทำการทดลองเหมือนกับข้อ 4.3.1 - 4.3.2 แต่ทำการลดอัตราการใช้โดยการบิดควาล์วลง ทำการเก็บค่าการทดลองและบันทึกผลการทดลอง

4.3.4 ทำการเปิดหัวฉีดล่างเพียงหัวฉีดเดียวและดำเนินการเหมือนข้อ 4.3.1- 4.3.3 และทำการเก็บค่าการทดลอง และทำการบันทึกผลการทดลอง

4.3.5 ทำการเปิดหัวฉีดทั้ง 2 หัวฉีดพร้อมกัน 2 หัว และดำเนินการเหมือนกับข้อ 4.3.1 – 4.3.3

โดยกำหนดค่ามุมที่หัวฉีดบนเป็นมุม  $0^\circ$  และหัวฉีดล่างเป็นมุม  $0^\circ$  แล้วทำการเก็บค่าผลการทดลอง และทำการปรับมุมการฉีด 5 องศา และ -5 องศา ในแต่ละหัวฉีด โดยทำในทุกกรณี บันทึกผลการทดลอง

4.3.6 นำค่าที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพกับอัตราการใช้ กำลังที่เข้ากับความเร็วยรอบ และกำลังที่ออกกับความเร็วยรอบ แต่ละกรณี

ตัวอย่างการคำนวณหาประสิทธิภาพของกังหันจากการทดลองของ 1 หัวฉีด(หัวฉีดบน)

ใช้ในกรณีที่หัวฉีดบนทำมุม  $0^\circ$  เปิดควาล์วสุดและมีอัตราการใช้ 26.88 ลิตร/ นาที

จากการทดลองจะพบว่าค่าความเร็วยรอบ 3 ค่าคือ 283.2, 282.9, 283 รอบ/นาที

ดังนั้น จากสมการที่ 4.9 จึงได้  $N_{av} = 283.03$  รอบ/นาที และค่าทอร์คเราก็จะหาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ทอร์ค กับ ความเร็วยรอบ ค่อยจากนั้นเราจะหาค่า  $P_{output}$  ออกมาได้จากสมการ 4.6, 4.7 และ 4.8

จะได้ 
$$\omega = \frac{2\pi(283.03)}{60} = 29.64 \text{ รอบ/วินาที}$$

และ

$$T = mg \cdot \frac{d}{2} = 1(9.81)(0.05) = 0.4905 \text{ N.m}$$

จากสมการ 4.6

$$P_{output} = T \cdot \omega = (0.4905)(29.64) = 14.54 \text{ W}$$

และจาก

$$Q = A \cdot v_j$$

จะได้

$$\left( \frac{26.88 \times 10^{-3}}{60} \right) = \pi(0.008/2)^2 \cdot v_j$$

ดังนั้น

$$v_j = 8.91 \text{ m}^2 / \text{s}$$

จากสมการ 4.5 จะได้

$$P_{input} = \frac{1}{2} (996.95) \left( \frac{26.88 \times 10^{-3}}{60} \right) (8.91)^2 = 17.73$$

เพราะฉะนั้น

$$\eta = \frac{14.54}{17.73} \times 100 = 82.01\% \quad ***$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 ผลการทดลอง

ผลของการฉีดแบบหัวเดียว (หัวฉีดบน-ล่าง) และฉีดแบบหัวฉีด2หัว มีค่าปรากฏตามตารางและกราฟต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความสัมพัทธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนมุม 0 องศา

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วรอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงานที่ออกจากกังหัน (w)	พลังงานที่ให้เข้าไปยังกังหัน (w)	อัตราการไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็วของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิภาพ (%)
283.2								
282.9	283.03	29.6242	0.08065	2.3891	17.7783	0.000449	8.9225	13.4384
283.0								
283.5								
282.6	282.93	29.6137	0.08062	2.3874	17.5663	0.000447	8.8816	13.5908
282.7								
280.7								
283.2	282.37	29.5544	0.08045	2.3777	17.5443	0.000447	8.8778	13.5527
283.2								
284.1								
282.2	282.80	29.5997	0.08058	2.3851	17.4562	0.000446	8.8630	13.6634
282.1								
281.6								
282.1	282.20	29.5369	0.08040	2.3749	17.1722	0.000443	8.8146	13.8297
282.9								
279.7								
283.0	282.80	29.5997	0.08058	2.3851	16.9343	0.000441	8.7738	14.0845
285.7								
275.0								
280.7	279.13	29.2160	0.07950	2.3228	16.8913	0.000441	8.7663	13.7515
281.7								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

280.1								
282.6	280.97	29.4078	0.08004	2.3539	16.6347	0.000439	8.7217	14.1503
280.2								
280.4								
281.0	280.90	29.4009	0.08002	2.3527	15.9219	0.000432	8.5953	14.7766
281.3								
273.9								
277.9	276.93	28.9857	0.07890	2.2858	15.6753	0.00043	8.5507	14.5822
279								
275.2								
277.4	276.27	28.9159	0.07867	2.2747	15.5326	0.000429	8.5247	14.6444
276.2								
271.2								
273.7	272.90	28.5635	0.07768	2.2187	15.3908	0.000427	8.4986	14.4161
273.8								
262.4								
270.4	267.63	28.0123	0.07613	2.1327	15.0698	0.000424	8.4392	14.1521
270.1								
267.1								
268.9	268.70	28.1239	0.07645	2.1499	15.0698	0.000424	8.4392	14.2668
270.1								
264.0								
262.9	263.57	27.5866	0.07494	2.0674	14.9309	0.000423	8.4131	13.8465
263.8								
258.0								
259.6	258.93	27.1017	0.07359	1.9943	12.6794	0.000401	7.9670	15.7284
259.2								
246.1								
246.0	246.13	25.7620	0.06983	1.7990	11.4273	0.000387	7.6956	15.7434

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

246.3								
228.6								
227.3	228.23	23.8884	0.06459	1.5429	8.7394	0.000354	7.0376	17.6544
228.8								
196.1								
195.3	195.37	20.4484	0.05495	1.1237	4.7698	0.000289	5.7513	23.5595
194.7								
137.8								
110.8	120.53	12.6158	0.03302	0.4166	2.0110	0.000217	4.3125	20.7178
113.0								

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนมุมเงย 5 องศา

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว รอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงาน ที่ออกจาก กึ่งหัน (W)	พลังงาน ที่ให้เข้าไปยัง กึ่งหัน (W)	อัตรา การไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็ว ของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิ ภาพ (%)
258.6								
257.8	257.93	26.9970	0.0733	1.9787	17.8101	0.000448	8.9225	11.1097
257.4								
256.2								
255.9	255.90	26.7842	0.0727	1.9471	17.5663	0.000447	8.8816	11.0843
255.6								
255.5								
255.0	255.10	26.7005	0.0724	1.9348	17.5443	0.000447	8.8778	11.0278
254.8								
248.3								
247.7	247.33	25.8876	0.0702	1.8169	17.4563	0.000446	8.8630	10.4084
246.0								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

247.0								
247.8	247.33	25.8876	0.0702	1.8169	17.1722	0.000443	8.8146	10.5806
247.2								
253.2								
251.3	252.20	26.3969	0.0716	1.8903	16.9343	0.000441	8.7738	11.1626
252.1								
255.7								
255.2	255.13	26.7040	0.0724	1.9353	16.8913	0.000441	8.7663	11.4571
254.5								
253.6								
251.1	252.86	26.4667	0.0718	1.9005	16.6348	0.000439	8.7217	11.4248
253.9								
248.2								
247.0	247.60	25.9155	0.0703	1.8209	15.9219	0.000432	8.5953	11.4365
247.6								
249.1								
248.5	248.80	26.0411	0.0706	1.8389	15.6753	0.000430	8.5507	11.7311
248.8								
247.4								
246.8	246.80	25.8317	0.0701	1.8089	15.5326	0.000429	8.5247	11.6462
246.2								
231.4								
234.4	233.60	24.4501	0.0662	1.6176	15.3908	0.000427	8.4986	10.5104
235.0								
228.4								
228.8	228.20	23.8849	0.0646	1.5424	15.0698	0.000424	8.4392	10.2352
227.4								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

235.7								
236.4	236.23	24.7258	0.0669	1.6549	15.0699	0.000424	8.4392	10.9818
236.6								
231.6								
231.5	231.63	24.2443	0.0656	1.5900	14.9309	0.000423	8.4131	10.6493
231.8								
216.6								
216.5	216.30	22.6394	0.0611	1.3830	12.6794	0.000401	7.9670	10.9078
215.8								
208.9								
207.6	207.90	21.7602	0.0586	1.2758	11.4273	0.000387	7.6956	11.1642
207.2								
189.4								
189.7	189.67	19.8518	0.0533	1.0578	8.7394	0.000354	7.0376	12.1037
189.9								
145.7								
146.0	145.97	15.2778	0.0405	0.6184	4.7698	0.000289	5.7513	12.9651
146.2								

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนมุมกด 5 องศา

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วรอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงานที่ออกจากก้าน (W)	พลังงานที่ให้เข้าไปยังก้าน (W)	อัตราไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็วของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิภาพ (%)
213.3								
215.8	214.73	22.4754	0.0606	1.3627	17.8101	0.000448	8.9225	7.6513
215.1								
215.3								
215.0	215.00	22.5033	0.0607	1.3662	17.5663	0.000447	8.8816	7.7772
214.7								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

214.4								
213.4	213.90	22.3882	0.0604	1.3519	17.5443	0.000447	8.8778	7.7060
213.9								
215.1								
214.3	214.66	22.4684	0.0606	1.3618	17.4562	0.000446	8.8630	7.8015
214.6								
213.3								
213.1	213.26	22.3219	0.0602	1.3438	17.1722	0.000443	8.8146	7.8255
213.4								
213.0								
213.1	213.16	22.3114	0.0602	1.3425	16.9343	0.000441	8.7738	7.9278
213.4								
213.0								
213.2	212.93	22.2870	0.0601	1.3395	16.8913	0.000441	8.7663	7.9303
212.6								
213.3								
213.7	213.56	22.3533	0.0603	1.3476	16.6347	0.000439	8.7217	8.1015
213.7								
214.1								
214.7	214.46	22.4475	0.0605	1.3593	15.9219	0.000432	8.5953	8.5371
214.6								
213.3								
213.3	213.20	22.3149	0.0601	1.3429	15.6753	0.000430	8.5507	8.5673
213.0								
210.8								
211.0	210.90	22.0742	0.0595	1.3136	15.5326	0.000429	8.5247	8.4570
210.9								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

208.2								
207.6	207.76	21.7462	0.0586	1.2741	15.3908	0.000427	8.4986	8.2783
207.5								
206.1								
206.4	206.40	21.6032	0.0582	1.2571	15.0699	0.000424	8.4392	8.3416
206.7								
204.4								
204.6	204.50	21.4043	0.0576	1.2336	15.0699	0.000424	8.4392	8.1857
204.5								
200.4								
200.6	200.36	20.9717	0.0564	1.1832	14.9309	0.000423	8.4131	7.9248
200.1								
194.5								
194.6	194.50	20.3577	0.0547	1.1136	12.6794	0.000401	7.9670	8.7827
194.4								
186.0								
185.8	186.00	19.4680	0.0522	1.0164	11.4273	0.000387	7.6956	8.8948
186.2								
169.3								
169.4	169.40	17.7305	0.0473	0.8395	8.7394	0.000354	7.0376	9.6054
169.5								
140.0								
140.5	140.26	14.6812	0.0388	0.5697	4.7698	0.000289	5.7513	11.9447
140.3								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวถังนม 0 องศา

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วรอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงานที่ออกจากกังหัน (w)	พลังงานที่ให้เข้าไปยังกังหัน (w)	อัตราไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็วของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิภาพ (%)
253.0								
251.0	252.27	26.4039	0.0716	1.8913	16.7413	0.000439	8.7403	11.2974
252.8								
265.0								
266.0	264.80	27.7157	0.0753	2.0871	16.7841	0.000440	8.7477	12.4350
263.4								
255.2								
251.8	253.23	26.5051	0.0719	1.9061	16.6560	0.000438	8.7254	11.4439
252.7								
252.4								
250.3	251.43	26.3167	0.0714	1.8787	16.6986	0.000439	8.7329	11.2504
251.6								
249.9								
251.4	249.43	26.1074	0.0708	1.8484	16.4018	0.000437	8.6808	11.2696
247.0								
248.4								
252.7	251.10	26.2818	0.0713	1.8736	16.1503	0.000434	8.6362	11.6011
252.2								
247.3								
252.2	250.23	26.1911	0.0710	1.8605	15.8806	0.000432	8.5879	11.7154
251.2								
250.6								
249.6	249.67	26.1318	0.0709	1.8519	15.5936	0.000429	8.5358	11.8762
248.8								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

248.5								
249.8	249.30	26.0934	0.0708	1.8464	15.4109	0.000428	8.5024	11.9811
249.6								
245.7								
247.9	247.23	25.8771	0.0702	1.8154	15.1097	0.000425	8.4466	12.0149
248.1								
247.1								
247.2	246.97	25.8492	0.0701	1.8114	14.9309	0.000423	8.4131	12.1322
246.6								
242.8								
243.6	243.80	25.5177	0.0691	1.7645	14.6751	0.000421	8.3648	12.0241
245.0								
238.4								
241.1	240.30	25.1514	0.0681	1.7134	14.6164	0.000420	8.3536	11.7225
241.4								
240.2								
241.5	240.33	25.1549	0.0681	1.7139	14.4803	0.000419	8.3276	11.8361
239.3								
237.0								
240.6	238.77	24.9909	0.0677	1.6912	15.2097	0.000426	8.4652	11.1195
238.7								
239.7								
237.3	238.00	24.9107	0.0674	1.6802	11.5937	0.000389	7.7328	14.4925
237.0								
232.8								
234.2	233.13	24.4013	0.0660	1.6111	10.1989	0.000373	7.4094	15.7964
232.4								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

224.2								
235.6	228.60	23.9268	0.0647	1.5479	7.8956	0.000342	6.8034	19.6052
226.0								
152.4								
153.0	152.27	15.9372	0.0423	0.6745	3.8229	0.000269	5.3423	17.6441
151.4								
81.7								
83.3	82.43	8.6280	0.0218	0.1886	0.7718	0.000158	3.1340	24.4352
82.3								

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวต้งมุมยก 5 องศา

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วรอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงานที่ออกจากกังหัน (W)	พลังงานที่ให้เข้าไปยังกังหัน (W)	อัตราไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็วของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิภาพ (%)
197.2								
197.3	197.30	20.6507	0.0555	1.1466	16.7413	0.000439	8.7403	6.8487
197.4								
198.6								
197.4	197.70	20.6926	0.0556	1.1513	16.7841	0.000440	8.7477	6.8596
197.1								
197.1								
194.7	196.23	20.5391	0.0552	1.1339	16.6560	0.000438	8.7254	6.8081
196.9								
195.5								
196.2	196.13	20.5286	0.0552	1.1328	16.6987	0.000439	8.7329	6.7836
196.7								
198.0								
197.4	197.57	20.6787	0.0556	1.1497	16.4019	0.000437	8.6808	7.0098
197.3								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

196.6								
197.8	197.20	20.6403	0.0555	1.1454	16.1503	0.000434	8.6362	7.0921
197.2								
195.4								
198.5	196.50	20.5670	0.0553	1.1371	15.8807	0.000432	8.5879	7.1603
195.6								
196.4								
198.0	197.30	20.6507	0.0555	1.1466	15.5937	0.000429	8.5358	7.3528
197.5								
195.6								
198.1	196.03	20.5182	0.0551	1.1316	15.4110	0.000428	8.5024	7.3427
194.4								
195.3								
195.3	195.03	20.4135	0.0549	1.1198	15.1098	0.000425	8.4466	7.4114
194.5								
194.8								
193.3	194.27	20.3332	0.0546	1.1109	14.9309	0.000423	8.4131	7.4401
194.7								
190.8								
191.4	191.47	20.0402	0.0538	1.0784	14.6751	0.000421	8.3648	7.3486
192.2								
188.9								
188.7	189.03	19.7855	0.0531	1.0506	14.6164	0.000420	8.3536	7.1878
189.5								
187.4								
187.2	187.47	19.6215	0.0526	1.0329	14.4803	0.000419	8.3276	7.1330
187.8								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

186.0								
185.7	185.97	19.4645	0.0522	1.0161	15.2097	0.000426	8.4652	6.6803
186.2								
180.8								
180.6	180.67	18.9098	0.0506	0.9577	11.5937	0.000389	7.7328	8.2608
180.6								
173.9								
173.6	173.80	18.1911	0.0486	0.8847	10.1989	0.000373	7.4094	8.6747
173.9								
162.8								
163.4	162.97	17.0572	0.0455	0.7754	7.8956	0.000342	6.8034	9.8209
162.7								
114.8								
115.8	115.40	12.0785	0.0315	0.3807	3.8230	0.000269	5.3423	9.9585
115.6								

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวล่างมุมกด 5 องศา

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว รอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงาน ที่ออกจาก ก้าน (W)	พลังงาน ที่ให้เข้าไปยัง ก้าน (W)	อัตรา การไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็ว ของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิ ภาพ (%)
262.5								
260.8	261.77	27.3982	0.0744	2.0388	16.7413	0.000439	8.7403	12.1785
262.0								
261.7								
261.2	260.70	27.2866	0.0741	2.0220	16.7841	0.000440	8.7477	12.0472
259.2								
261.0								
261.4	261.40	27.3599	0.0743	2.0330	16.6560	0.000438	8.7254	12.2061
261.8								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

260.8								
261.0	261.17	27.3354	0.0742	2.0294	16.4019	0.000439	8.7329	12.3728
261.7								
260.8								
260.4	260.60	27.2761	0.0741	2.0204	16.1503	0.000437	8.6808	12.5102
260.6								
260.5								
260.6	260.57	27.2726	0.0741	2.0199	15.8807	0.000434	8.6362	12.7193
260.6								
261.0								
260.8	260.77	27.2936	0.0741	2.0231	15.5937	0.000432	8.5879	12.9736
260.5								
260.6								
260.7	260.70	27.2866	0.0741	2.0220	15.4110	0.000429	8.5358	13.1205
260.8								
259.7								
259.8	259.90	27.2029	0.0739	2.0094	15.1098	0.000428	8.5024	13.2989
260.2								
257.4								
257.8	257.43	26.9447	0.0731	1.9709	14.9309	0.000425	8.4466	13.1999
257.1								
255.3								
255.1	255.27	26.7179	0.0725	1.9373	14.6751	0.000423	8.4131	13.2015
255.4								
252.2								
252.3	252.43	26.4214	0.0717	1.8939	14.6164	0.000421	8.3648	12.9572
252.8								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

246.6								
247.2	247.00	25.8527	0.0701	1.8119	14.4803	0.000420	8.3536	12.5132
247.2								
244.0								
243.7	243.93	25.5317	0.0692	1.7665	15.2097	0.000419	8.3276	11.6143
244.1								
238.0								
238.0	238.13	24.9246	0.0675	1.6821	11.5937	0.000426	8.4652	14.5091
238.4								
228.1								
226.9	227.53	23.8152	0.0644	1.5333	10.1989	0.000389	7.7328	15.0337
227.6								
209.1								
209.1	209.20	21.8963	0.0590	1.2921	7.8956	0.000373	7.4094	16.3647
209.4								
141.3								
141.2	141.13	14.7719	0.0391	0.5770	3.8230	0.000342	6.8034	15.0933
140.9								

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนมุมยก 5 องศา และหัวล่าง 0 องศา

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วรอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงานที่ออกจากกังหัน (W)	พลังงานที่ให้เข้าไปยังกังหัน (W)	อัตราไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็วของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิภาพ (%)
152.2								
152.1	152.20	15.9303	0.0738	1.1752	25.1338	0.000506	10.0638	4.675679
152.3								
152.4								
153.0	152.70	15.9826	0.0739	1.1818	25.0219	0.000505	10.0526	4.723044
152.7								

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

153.2								
153.1	153.20	16.0349	0.0741	1.1884	24.9103	0.000505	10.0377	4.770843
153.3								
152.4								
152.2	152.23	15.9338	0.0738	1.1756	24.7991	0.000504	10.0229	4.740546
152.1								
152.5								
152.3	152.40	15.9512	0.0738	1.1778	24.6883	0.000503	10.0080	4.770769
152.4								
151.9								
152.1	151.93	15.9024	0.0737	1.1717	24.5777	0.000503	9.9932	4.767123
151.8								
152.4								
151.5	152.06	15.9163	0.0737	1.1734	24.4675	0.000502	9.9783	4.795795
152.3								
151.8								
152.2	152.10	15.9198	0.0737	1.1738	24.3576	0.000501	9.9634	4.819238
152.3								
152.3								
152.2	152.23	15.9338	0.0738	1.1756	24.2481	0.000500	9.9485	4.848282
152.2								
151.9								
151.8	151.86	15.8954	0.0737	1.1708	24.1388	0.000499	9.9337	4.850150
151.9								
151.7								
151.8	151.63	15.8710	0.0736	1.1677	24.0299	0.000499	9.9188	4.859321
151.4								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

151.6								
151.2	151.46	15.8535	0.0735	1.1655	23.9214	0.000498	9.9039	4.872195
151.6								
150.7								
150.1	150.33	15.7349	0.0731	1.1506	23.8131	0.000497	9.8891	4.831854
150.2								
149.9								
149.4	149.63	15.6616	0.0729	1.1415	23.7052	0.000496	9.8742	4.815275
149.6								
149.2								
149.0	149.03	15.5988	0.0727	1.1337	21.3625	0.000496	9.8593	5.306776
148.9								
147.8								
147.5	147.73	15.4628	0.0722	1.1168	16.6560	0.000495	9.8444	6.705259
147.9								
145.9								
146.3	146.26	15.3092	0.0717	1.0980	13.3476	0.000494	9.8296	8.226127
146.6								
143.3								
143.1	143.23	14.9918	0.0707	1.0595	11.8125	0.000494	9.8147	8.969430
143.3								
138.6								
138.1	138.43	14.4894	0.0690	0.9999	5.1495	0.000477	9.4801	19.41908
138.6								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนมุมเงย 5 องศา และหัวล่างมุมเงย 5 องศา

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วรอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงานที่ออกจากกังหัน (W)	พลังงานที่ให้เข้าไปยังกังหัน (W)	อัตราการไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็วของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิภาพ (%)
124.6								
124.6	124.50	13.0310	0.0642	0.8366	25.1338	0.000506	10.0638	3.3287
124.3								
123.9								
123.9	124.07	12.9856	0.0640	0.8318	25.0219	0.000505	10.0526	3.3241
124.4								
124.0								
124.2	124.10	12.9891	0.0641	0.8321	24.9103	0.000505	10.0377	3.3405
124.1								
124.6								
124.6	124.57	13.0380	0.0642	0.8374	24.7991	0.000504	10.0229	3.3766
124.5								
124.5								
124.3	124.33	13.0136	0.0641	0.8347	24.6883	0.000503	10.0080	3.3812
124.2								
123.7								
124.3	124.13	12.9926	0.0640	0.8325	24.5777	0.000503	9.9932	3.3873
124.4								
124.4								
124.2	124.16	12.9961	0.0641	0.8329	24.4675	0.000502	9.9783	3.4040
123.9								
124.6								
124.3	124.36	13.0170	0.0642	0.8351	24.3576	0.000501	9.9634	3.4286
124.2								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

124.1								
124.3	124.23	13.0031	0.0641	0.8336	24.2481	0.000500	9.9485	3.4379
124.3								
124.7								
123.9	124.26	13.0066	0.0641	0.8340	24.1388	0.000499	9.9337	3.4550
124.2								
122.8								
123.4	123.16	12.8914	0.0637	0.8217	24.0299	0.000499	9.9188	3.4196
123.3								
123.3								
123.1	123.03	12.8775	0.0637	0.8202	23.9214	0.000498	9.9039	3.4289
122.7								
123.3								
123.3	123.1333	12.8880	0.0637	0.8213	23.8131	0.000497	9.8891	3.4492
122.8								
121.9								
122.0	121.83	12.7519	0.0633	0.8070	23.7052	0.000496	9.8742	3.4041
121.6								
121.0								
121.0	121.16	12.6821	0.0630	0.7996	21.3625	0.000496	9.8593	3.743092
121.5								
119.7								
118.5	119.03	12.4588	0.0623	0.7764	16.6560	0.000495	9.8444	4.661137
118.9								
118.4								
118.2	118.23	12.3751	0.0620	0.7677	13.3476	0.000494	9.8296	5.751789
118.1								
117.7								
117.5	117.26	12.2739	0.0617	0.7573	11.8124	0.000494	9.8147	6.411442

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

116.6								
114.6								
113.6	113.83	11.9146	0.0605	0.7210	5.1495	0.000477	9.4801	14.00231
113.3								

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความสั่นพ้องต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนมุมเงย 5 องศา และหัวล่างมุมกด 5 องศา

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว รอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad)	แรงบิด ตามจริง (N.m)	พลังงาน ที่ออกจาก กังหัน (W)	พลังงาน ที่ให้เข้าไปยัง กังหัน (W)	อัตรา การไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็ว ของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิ ภาพ (%)
140.1								
139.8	139.90	14.6429	0.0695	1.0180	25.1337	0.000506	10.0638	4.0503
139.8								
139.0								
138.8	138.87	14.5347	0.0692	1.0053	25.0219	0.000505	10.0526	4.0176
138.8								
138.6								
139.0	138.83	14.5312	0.0691	1.0049	24.9104	0.000505	10.0377	4.0339
138.9								
138.4								
138.5	138.43	14.4894	0.0690	0.9999	24.7991	0.000504	10.0229	4.0323
138.4								
138.4								
138.5	138.30	14.4754	0.0689	0.9984	24.6883	0.000503	10.0080	4.0438
138.0								
138.2								
137.5	137.93	14.4370	0.0688	0.9939	24.5777	0.000502	9.9932	4.0438
138.1								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

137.3								
137.9	137.63	14.4056	0.0687	0.9902	24.4675	0.000502	9.9783	4.0471
137.7								
137.7								
137.8	137.83	14.4266	0.0688	0.9927	24.3576	0.000501	9.9634	4.0753
138.0								
137.4								
137.5	137.40	14.3812	0.0687	0.9874	24.2481	0.000500	9.9485	4.0720
137.3								
136.6								
136.7	136.70	14.3079	0.0684	0.9789	24.1388	0.000499	9.9337	4.0553
136.8								
137.2								
136.5	136.90	14.3289	0.0685	0.9813	24.0299	0.000499	9.9188	4.0837
137.0								
136.3								
136.6	136.46	14.2835	0.0683	0.9761	23.9214	0.000498	9.9039	4.0803
136.5								
135.4								
135.1	135.53	14.1858	0.0680	0.9648	23.8131	0.000497	9.8891	4.0516
136.1								
135.0								
134.4	134.76	14.1056	0.0677	0.9556	23.7052	0.000497	9.8742	4.0313
134.9								
133.1								
133.5	133.43	13.9660	0.0673	0.9397	21.3625	0.000496	9.8593	4.3990
133.7								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

131.6								
131.6	131.77	13.7916	0.0667	0.9201	16.6560	0.000495	9.8444	5.5239
132.1								
128.2								
128.1	128.20	13.4183	0.0655	0.8786	13.3476	0.000494	9.8296	6.5827
128.3								
125.4								
124.9	125.03	13.0868	0.0644	0.8426	11.8125	0.000494	9.8147	7.1333
124.8								
114.6								
114.3	114.50	11.9843	0.0607	0.7280	5.1495	0.000477	9.4801	14.1379
114.6								

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ ในกรณีที่หัวบนและหัวล่างทำมุม 0 องศาทั้ง 2 หัว

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว รอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงาน ที่ออกจาก ก้าน (W)	พลังงาน ที่ให้เข้าไปยัง ก้าน (W)	อัตรา การไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็ว ของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิ ภาพ (%)
149.7								
150.3	150.13	15.7140	0.0731	1.1480	25.5562	0.000506	10.0638	4.4921
150.4								
146.9								
149.4	148.63	15.5570	0.0725	1.1285	25.4714	0.000505	10.0526	4.4303
149.6								
146.7								
150.7	149.10	15.6058	0.0727	1.1345	25.3585	0.000505	10.0377	4.4739
149.9								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

149.6								
150.4	149.90	15.6895	0.0730	1.1449	25.2460	0.000504	10.0229	4.5352
149.7								
145.5								
149.2	147.47	15.4348	0.0721	1.11339	25.1338	0.000503	10.0080	4.4299
147.7								
148.1								
147.8	147.30	15.4174	0.0721	1.1112	25.0219	0.000502	9.9932	4.4411
146.0								
147.7								
148.0	148.60	15.5535	0.0725	1.1280	24.9103	0.000502	9.9783	4.5284
150.1								
146.2								
149.4	148.43	15.5360	0.0725	1.1259	24.7991	0.000501	9.9634	4.5400
149.7								
148.1								
147.9	148.47	15.5395	0.0725	1.1263	24.6883	0.000500	9.9485	4.5621
149.4								
150.3								
148.4	149.20	15.6163	0.0727	1.1358	24.5777	0.000499	9.9337	4.6214
148.9								
147.9								
149.8	148.60	15.5535	0.0725	1.1280	24.4675	0.000499	9.9188	4.6103
148.1								
148.0								
147.9	147.60	15.4488	0.0721	1.1151	24.3576	0.000498	9.9039	4.5781
146.9								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

143.9								
148.3	146.30	15.3127	0.0717	1.0984	24.2481	0.000497	9.8891	4.5299
146.7								
148.4								
146.2	147.27	15.4139	0.0721	1.1108	24.1388	0.000497	9.8742	4.6018
147.2								
147.7								
147.7	147.37	15.4244	0.0721	1.1121	24.0299	0.000496	9.8593	4.6280
146.7								
147.2								
148.9	147.67	15.4558	0.0722	1.1160	23.9214	0.000495	9.8444	4.6652
146.9								
146.3								
145.6	146.60	15.3441	0.0718	1.1023	23.8131	0.000494	9.8296	4.6288
147.9								
147.6								
147.9	147.70	15.4593	0.0722	1.1164	23.7052	0.000494	9.8147	4.7095
147.6								
144.5								
143.7	144.73	15.1488	0.0712	1.0784	21.3625	0.000477	9.4801	5.0483
146.0								
135.7								
135.7	134.63	14.0916	0.0677	0.9540	16.6560	0.000439	8.7254	5.7279
132.5								
133.4								
132.5	132.87	13.9067	0.0671	0.9330	13.3475	0.000408	8.1046	6.9903
132.7								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้เองเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเอาไปทำไปให้ประโยชน์ของบุคคล

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

128.9								
125.5	126.93	13.2857	0.0650	0.8641	11.8124	0.000391	7.7811	11.0466
126.4								
92.2								
92.8	92.633	6.6956	0.0433	0.2899	5.1495	0.000297	5.8999	10.1709
92.9								

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าความสั่นพ้องต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนมุม 0 องศา และหัวล่างมุมเงย 5 องศา

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว รอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงานที่ ออกจาก ก้าน (W)	พลังงาน ที่ให้เข้าไปยัง ก้าน (W)	อัตรา การไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็ว ของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิ ภาพ (%)
125.9								
126.1	126.07	13.1950	0.0647	0.8543	25.1338	0.000506	10.0638	3.3990
126.2								
125.6								
125.8	125.63	13.1496	0.0646	0.8494	25.0219	0.000505	10.0526	3.3946
125.5								
126.1								
125.4	125.87	13.1740	0.0647	0.8520	24.9103	0.000505	10.0377	3.4203
126.1								
125.6								
125.6	125.77	13.1636	0.0646	0.8509	24.7991	0.000504	10.0229	3.431132
126.1								
125.6								
125.8	125.63	13.1496	0.0646	0.8494	24.6883	0.000503	10.0080	3.440434
125.5								
125.4								
125.4	125.30	13.1147	0.0645	0.8456	24.5777	0.000503	9.9932	3.4406
125.1								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

125.4								
125.1	125.33	13.1182	0.0645	0.8460	24.4675	0.000502	9.9783	3.4576
125.5								
124.8								
124.8	124.93	13.0764	0.0643	0.8415	24.3576	0.000501	9.9634	3.4547
125.2								
124.9								
124.6	124.83	13.0659	0.0643	0.8404	24.2481	0.000500	9.9485	3.4657
125.0								
124.5								
124.3	124.43	13.0240	0.0642	0.8359	24.1388	0.000499	9.9337	3.4628
124.5								
124.3								
124.3	124.27	13.0066	0.0641	0.8340	24.0299	0.000499	9.9188	3.4707
124.2								
123.5								
124.3	123.87	12.9647	0.0640	0.8295	23.9214	0.000498	9.9039	3.4677
123.8								
123.2								
123.2	123.00	12.8740	0.0637	0.8199	23.8131	0.000497	9.8891	3.4429
122.6								
122.0								
122.1	122.10	12.7798	0.0634	0.8099	23.7052	0.000497	9.8742	3.4165
122.2								
120.9								
120.5	120.63	12.6263	0.0629	0.7938	21.3625	0.000496	9.8593	3.7157
120.5								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้เองเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

119.2								
119.5	119.40	12.4972	0.0624	0.7803	16.6560	0.000495	9.8444	4.6845
119.5								
116.9								
116.4	116.60	12.2041	0.0615	0.7502	13.3475	0.000494	9.8296	5.6207
116.5								
111.0								
111.1	110.97	11.6145	0.0595	0.6914	11.8124	0.000494	9.8147	5.8530
110.8								
99.3								
99.0	99.23	10.3864	0.0555	0.5762	5.14948	0.000477	9.4801	11.1893
99.4								

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความสั่นพ้องต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนมุม 0 องศา และหัวล่างมุมกด 5 องศา

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วรอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงานที่ออกจากกังหัน (W)	พลังงานที่ให้เข้าไปยังกังหัน (W)	อัตราการไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็วของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิภาพ (%)
152.1								
152.0	152.10	15.9198	0.0737	1.1738	25.1338	0.000506	10.0638	4.6704
152.2								
151.2								
151.1	150.90	15.7942	0.0733	1.1580	25.0219	0.000505	10.0526	4.6281
150.4								
151.8								
151.6	151.80	15.8884	0.0736	1.1699	24.9103	0.000505	10.0377	4.6964
152.0								
151.6								
151.4	151.47	15.8535	0.0735	1.1655	24.7991	0.000504	10.0229	4.6997
151.4								

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

151.5								
152.1	151.93	15.9024	0.0737	1.1716	24.6883	0.000503	10.0080	4.7458
152.2								
151.6								
152.0	151.87	15.8954	0.0737	1.1708	24.5777	0.000503	9.9932	4.7635
152.0								
151.6								
151.6	151.67	15.8744	0.0736	1.1681	24.4675	0.000502	9.9783	4.7742
151.8								
151.3								
151.0	151.40	15.8465	0.0735	1.1646	24.3576	0.000501	9.9634	4.7813
151.9								
151.3								
151.7	151.27	15.8326	0.0734	1.1629	24.2481	0.000500	9.9485	4.7957
150.8								
150.7								
151.6	151.17	15.8221	0.0734	1.1615	24.1388	0.000499	9.9337	4.8119
151.2								
151.3								
150.8	151.00	15.8047	0.0733	1.1594	24.0299	0.000499	9.9188	4.8246
150.9								
150.8								
149.4	150.10	15.7105	0.0730	1.1476	23.9214	0.000498	9.9039	4.7972
150.1								
148.9								
148.9	149.07	15.6023	0.0727	1.1341	23.8131	0.000497	9.8891	4.7625
149.4								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

147.7								
147.4	147.60	15.4488	0.0722	1.1151	23.7052	0.000497	9.8742	4.7041
147.7								
146.7								
146.6	146.73	15.3581	0.0719	1.1040	21.3625	0.000496	9.8593	5.1678
146.9								
146.2								
146.0	146.10	15.2918	0.0717	1.0959	16.6560	0.000495	9.8444	6.5793
146.1								
142.7								
143.1	143.03	14.9708	0.0706	1.0570	13.3475	0.000494	9.8296	7.9190
143.3								
136.3								
136.6	136.47	14.2835	0.0683	0.9761	11.8124	0.000494	9.8147	8.2631
136.5								
123.1								
122.4	122.67	12.8391	0.0636	0.8162	5.1495	0.000477	9.4801	15.8496
122.5								

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนมุมกด 5 องศา และหัวล่างมุม 0 องศา

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วรอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงานที่ออกจากกังหัน (w)	พลังงานที่ให้เข้าไปยังกังหัน (w)	อัตราไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็วของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิภาพ (%)
141.1								
142.2	141.67	14.8278	0.0701	1.0399	25.1338	0.000506	10.0638	4.1374
141.7								
142.2								
141.9	141.97	14.8592	0.0702	1.0436	25.0219	0.000505	10.0526	4.1709
141.8								

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

141.6								
141.5	141.57	14.8173	0.0701	1.0386	24.9103	0.000505	10.0377	4.1695
141.6								
142.3								
141.9	141.97	14.8592	0.0702	1.0436	24.7991	0.000504	10.0229	4.2084
141.7								
141.6								
141.9	141.80	14.8417	0.0702	1.0416	24.6883	0.000503	10.0080	4.2188
141.9								
141.7								
142.1	141.87	14.8487	0.0702	1.0424	24.5777	0.000503	9.9932	4.2412
141.8								
141.5								
141.8	141.50	14.8103	0.0701	1.0378	24.4675	0.000502	9.9783	4.2416
141.2								
141.1								
141.0	141.20	14.7789	0.0699	1.0341	24.3576	0.000501	9.9634	4.2454
141.5								
141.8								
141.2	141.40	14.7999	0.0700	1.0366	24.2481	0.000500	9.9485	4.2749
141.2								
141.4								
141.6	141.53	14.8138	0.0701	1.0382	24.1388	0.000499	9.9337	4.3011
141.6								
140.7								
141.0	140.93	14.7510	0.0699	1.0308	24.0299	0.000499	9.9188	4.2895
141.1								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

139.8								
140.1	140.03	14.6568	0.0696	1.0196	23.9214	0.000498	9.9039	4.2624
140.2								
140.1								
140.2	140.03	14.6568	0.0696	1.0196	23.8131	0.000497	9.8891	4.2818
139.8								
139.5								
139.6	139.53	14.6045	0.0694	1.0135	23.7052	0.000497	9.8742	4.2753
139.5								
138.5								
138.6	138.60	14.5068	0.0691	1.0020	21.3625	0.000496	9.8593	4.6905
138.7								
137.7								
138.2	137.93	14.4370	0.0688	0.9939	16.6560	0.000495	9.8444	5.9671
137.9								
136.0								
136.6	136.30	14.2661	0.0683	0.9740	13.3475	0.000494	9.8296	7.2976
136.3								
133.5								
133.9	133.57	13.9799	0.0673	0.9413	11.8124	0.000494	9.8147	7.9689
133.3								
127.2								
127.3	127.23	13.3171	0.0651	0.8676	5.1495	0.000477	9.4801	16.8475
127.2								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนมุมกด 5 องศา และหัวล่างมุมยก 5 องศา

ความเร็ว รอบ (rpm)	ความเร็ว รอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็ว เชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงานที่ ออกจาก ก้าน (W)	พลังงาน ที่ให้เข้าไปยัง ก้าน (W)	อัตรา การไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็ว ของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิ ภาพ (%)
126.8								
126.7	126.83	13.2752	0.0650	0.8630	25.1338	0.000506	10.0638	3.4336
127.0								
126.7								
126.9	126.83	13.2752	0.0650	0.8630	25.0219	0.000505	10.0526	3.4490
126.9								
126.3								
125.2	125.96	13.1845	0.0647	0.8531	24.9103	0.000505	10.0377	3.4249
126.4								
126.1								
125.7	125.96	13.1845	0.0647	0.8531	24.7991	0.000504	10.0229	3.4403
126.1								
126.3								
125.8	126.10	13.1985	0.0647	0.8547	24.6883	0.000503	10.0080	3.4618
126.2								
126.2								
126.1	126.20	13.2089	0.0648	0.8558	24.5777	0.000503	9.9932	3.4820
126.3								
125.6								
125.7	125.53	13.1392	0.0646	0.8482	24.4675	0.000502	9.9783	3.4669
125.3								
125.9								
125.5	125.56	13.1426	0.0646	0.8486	24.3576	0.000501	9.9634	3.4840
125.3								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ในเชิงพาณิชย์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

125.2								
125.8	125.53	13.1392	0.0646	0.8482	24.2481	0.000500	9.9485	3.4982
125.6								
125.5								
125.5	125.50	13.1357	0.0645	0.8479	24.1388	0.000499	9.9337	3.5125
125.5								
124.5								
125.0	124.70	13.0519	0.0643	0.8389	24.0299	0.000499	9.9188	3.4909
124.6								
124.1								
124.3	124.23	13.0031	0.0641	0.8336	23.9214	0.000498	9.9039	3.4849
124.3								
123.7								
123.7	123.66	12.9438	0.0639	0.8273	23.8131	0.000497	9.8891	3.4741
123.6								
123.2								
122.8	123.10	12.8845	0.0637	0.8209	23.7052	0.000497	9.8742	3.4633
123.3								
122.9								
122.8	122.86	12.8600	0.0636	0.8184	21.3625	0.000496	9.8593	3.8310
122.9								
121.7								
121.3	121.43	12.7100	0.0631	0.8025	16.6560	0.000495	9.8444	4.8184
121.3								
118.8								
118.9	118.93	12.4484	0.0623	0.7753	13.3475	0.000494	9.8296	5.8084
119.1								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

115.4								
115.8	115.70	12.1099	0.0612	0.7407	11.8124	0.000494	9.8147	6.2703
115.9								
106.5								
106.6	106.40	11.1365	0.0579	0.6454	5.1495	0.000477	9.4801	12.5327
106.1								

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เมื่อเปิดหัวบนมุมกค 5 องศา และหัวล่างมุมกค 5 องศา

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วรอบเฉลี่ย (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad)	แรงบิด (N.m)	พลังงานที่ออกจากกังหัน (W)	พลังงานที่ให้เข้าไปยังกังหัน (W)	อัตราไหล (m <sup>3</sup> /s)	ความเร็วของหัวฉีด (m/s)	ประสิทธิภาพ (%)
136.5								
137.1	136.77	14.3149	0.0684	0.9797	25.1338	0.000506	10.0638	3.8979
136.7								
136.7								
137.0	136.83	14.3219	0.0685	0.9805	25.0219	0.000505	10.0526	3.9186
136.8								
136.9								
137.0	137.13	14.3533	0.0686	0.9841	24.9103	0.000505	10.0377	3.9508
137.5								
136.8								
136.2	136.70	14.3079	0.0684	0.9789	24.7991	0.000504	10.0229	3.9473
137.1								
136.7								
136.4	136.47	14.2835	0.0683	0.9761	24.6883	0.000503	10.0080	3.9536
136.3								
136.1								
135.3	135.83	14.2172	0.0681	0.9684	24.5777	0.000503	9.9932	3.9403
136.1								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับครูได้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ในเชิงพาณิชย์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

136.0								
136.3	136.20	14.2556	0.0682	0.9728	24.4675	0.000502	9.9783	3.9761
136.3								
136.1								
136.3	136.13	14.2486	0.0682	0.9720	24.3576	0.000501	9.9634	3.9907
136.0								
136.7								
136.7	136.70	14.3079	0.0684	0.9789	24.2481	0.000500	9.9485	4.0370
136.7								
136.9								
136.8	136.80	14.3184	0.0685	0.9801	24.1388	0.000499	9.9337	4.0603
136.7								
135.8								
136.0	135.97	14.2312	0.0682	0.9700	24.0299	0.000499	9.9188	4.0368
136.1								
135.5								
134.9	135.23	14.1544	0.0679	0.9612	23.9214	0.000498	9.9039	4.0182
135.3								
134.1								
134.1	134.10	14.0358	0.0675	0.9477	23.8131	0.000497	9.8891	3.9796
134.1								
133.3								
133.1	133.20	13.9416	0.0672	0.9370	23.7052	0.000497	9.8742	3.9526
133.2								
132.3								
132.1	132.03	13.8195	0.0668	0.9232	21.3625	0.000496	9.8593	4.3216
131.7								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

130.0								
130.4	130.23	13.6311	0.0662	0.9021	16.6560	0.000495	9.8444	5.4163
130.3								
126.8								
127.1	127.20	13.3136	0.0651	0.8672	13.3475	0.000494	9.8296	6.4969
127.7								
120.5								
120.1	120.27	13.3136	0.0651	0.8672	11.8124	0.000493	9.8147	7.3412
120.2								
108.3								
108.6	108.43	11.3494	0.0586	0.6657	5.1495	0.000477	9.4801	12.9270
108.4								

#### 4.6 สรุปผลการทดลอง

4.5.1 จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 ในการเปิดหัวฉีดเพียงหัวเดียวจะมีแนวโน้มของประสิทธิภาพในช่วงแรกเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดๆหนึ่งซึ่งมีค่าสูงสุดและจากนั้นแนวโน้มของประสิทธิภาพมีค่าลดลง ซึ่งค่าประสิทธิภาพสูงสุดจะมีค่าประมาณ 95.68 เปอร์เซ็นต์

4.5.2 จากรูปที่ 4.3 ในการเปิดหัวฉีดเพียง 2 หัวจะมีแนวโน้มของประสิทธิภาพในช่วงแรกเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดๆหนึ่งซึ่งมีค่าสูงสุดและจากนั้นแนวโน้มของประสิทธิภาพมีค่าลดลง ซึ่งค่าประสิทธิภาพสูงสุดจะมีค่าประมาณ 17.41 เปอร์เซ็นต์

4.5.3 จากรูปที่ 4.4 แนวโน้มของประสิทธิภาพในการเปิด 1 หัว และเปิด 2 หัว จะมีแนวโน้มคล้ายๆกัน คือ จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดสูงสุดและหลังจากนั้นจะลดลงไปเรื่อย

4.5.4 จากรูปที่ 4.4 เห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพ ของการเปิด 1 หัว และเปิด 2 หัว มีค่าต่างกันมาก โดยที่เปิด 2 หัว จะมีค่าประสิทธิภาพน้อยกว่ามาก นั่นอาจจะเป็นเพราะว่า

1. การออกแบบตัวเครื่องที่ไม่แข็งแรงพอและมีน้ำหนักของตัวเครื่องที่เบาเกินไปจึงทำให้ขณะทำการทดลองตัวเครื่องสั่นสะเทือน และทำให้ค่าที่วัดได้เกิดการผิดพลาด

2. จากสมการการหาจำนวนใบพัดที่เหมาะสม

$$Z=15+0.5\left(\frac{D_T}{d}\right) \quad \dots\dots\dots(4.9)$$

โดยที่  $D_T$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของเทอร์ไบน์ = 300 มิลลิเมตร

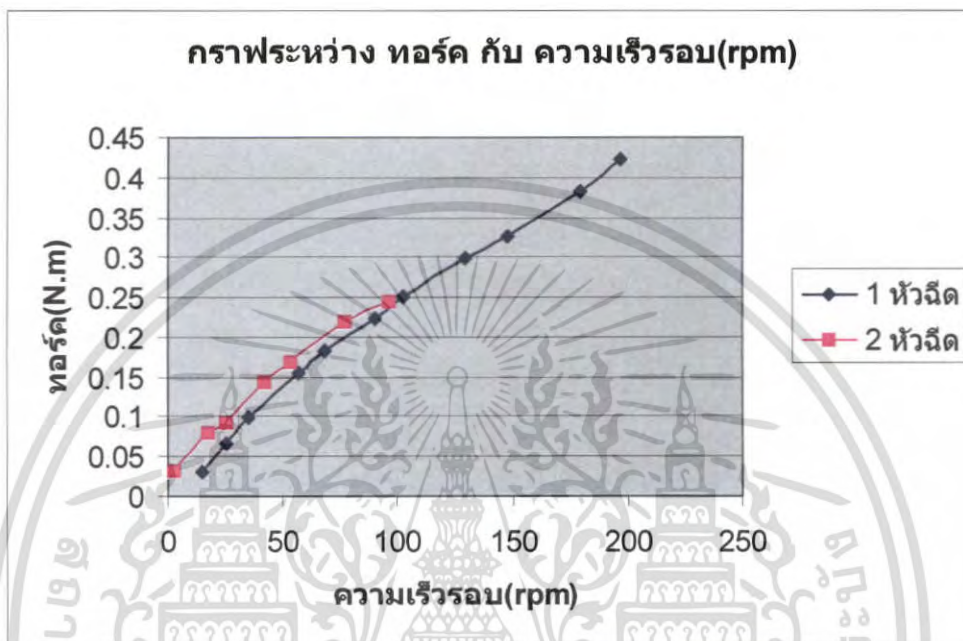
$d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด = 10 มิลลิเมตร

$\frac{D_T}{d}$  = อัตราส่วน Jet Ratio

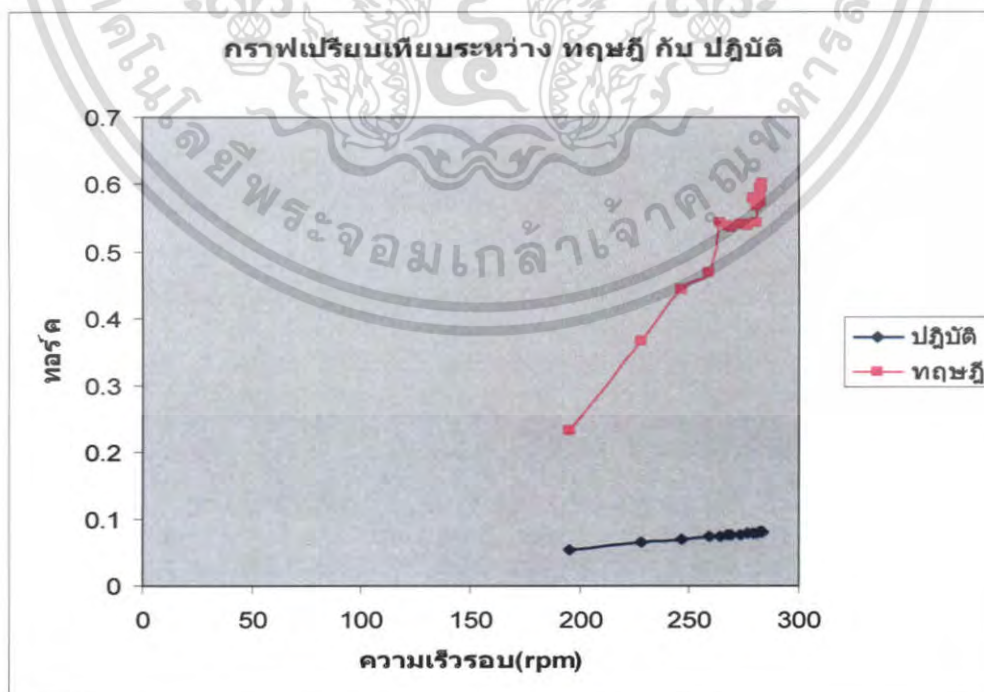
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า  $Z = 15 + 0.5\left(\frac{300}{10}\right) = 30$  ไบ

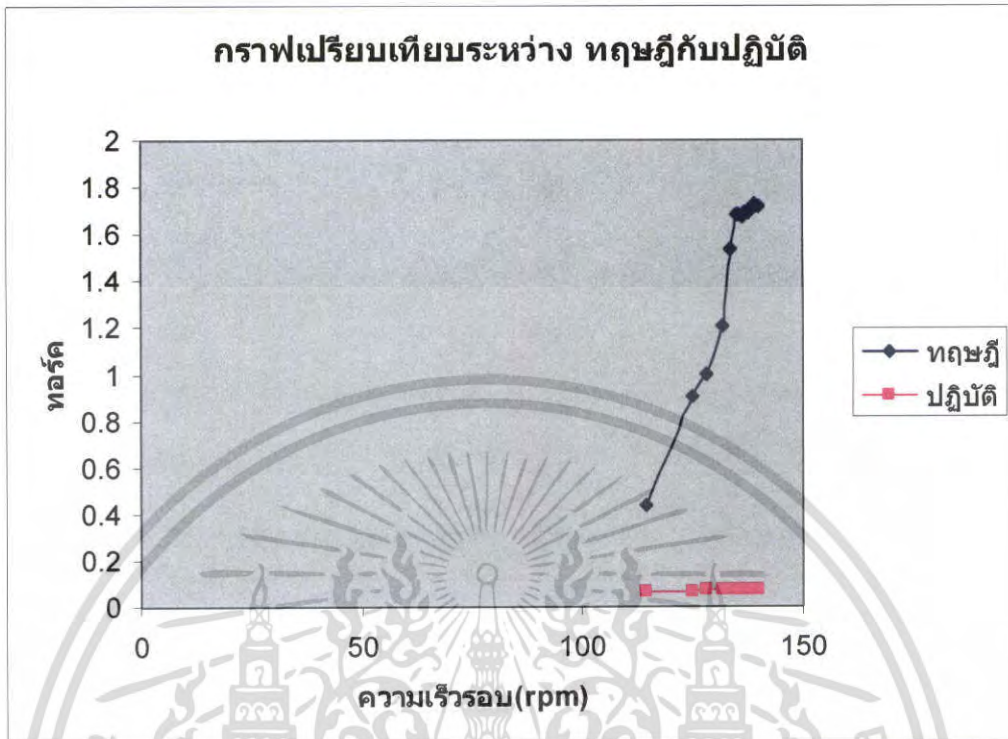
ซึ่งตามสมการนี้อาจจะเหมาะสมในกรณีหัวฉีดเดียว เพราะจากกราฟรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.4 จะให้ค่าประสิทธิภาพที่ออกมาสูงมาก แต่ในกรณี 2 หัวฉีดจะมีค่าประสิทธิภาพออกมาน้อยกว่า ซึ่งอาจจะสรุปได้ว่าสมการนี้ไม่เหมาะสมในกรณี 2 หัวฉีด



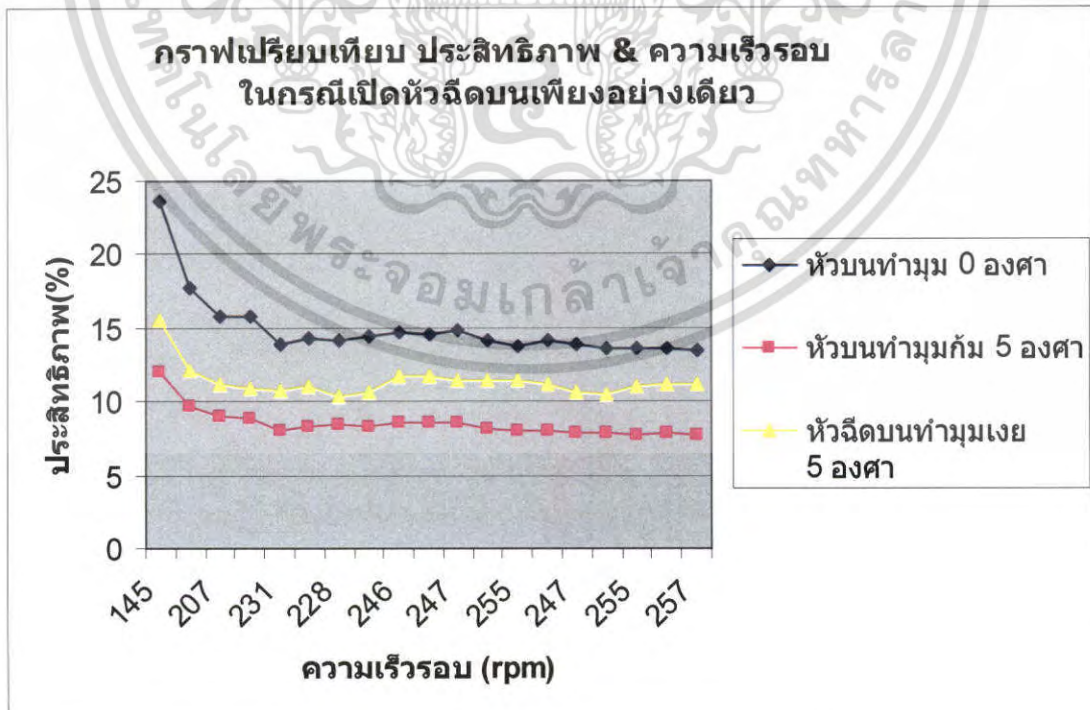
รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง ทอร์กกับความเร็วนรอบ ในกรณี 1 และ 2 หัวฉีด



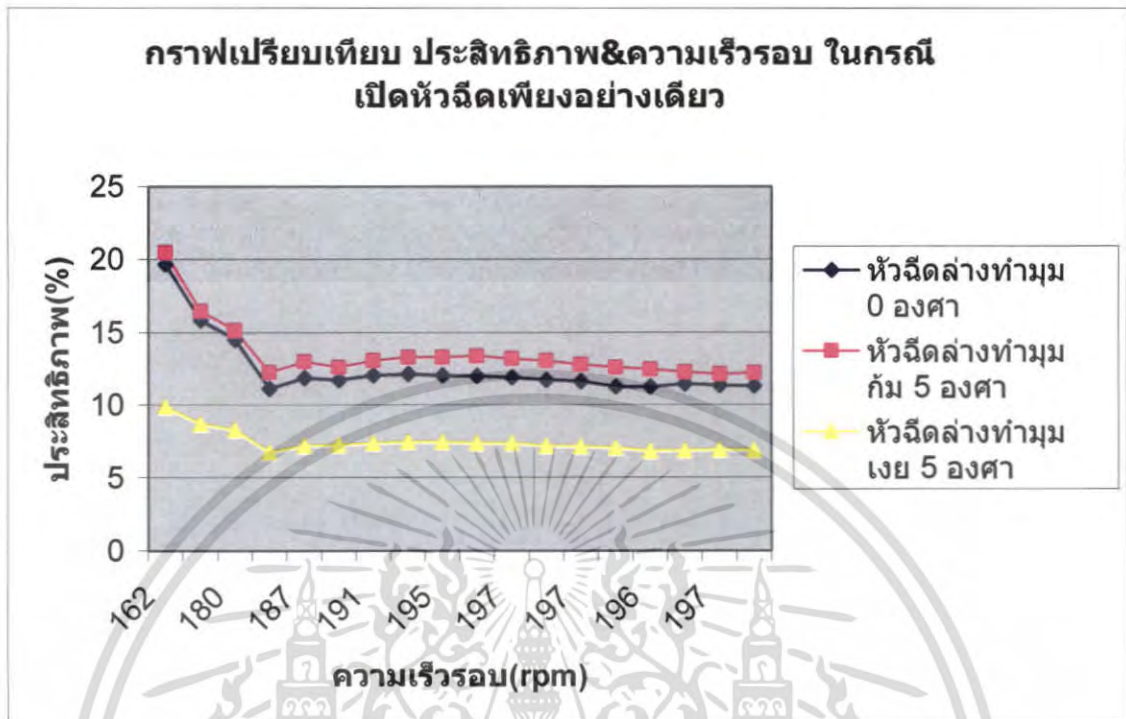
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ทอร์ก และความเร็วนรอบ ในกรณีเปิดเพียง 1 หัว  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ทอร์ค และความเร็วรอบ ในกรณีเปิดเพียง 2 หัว

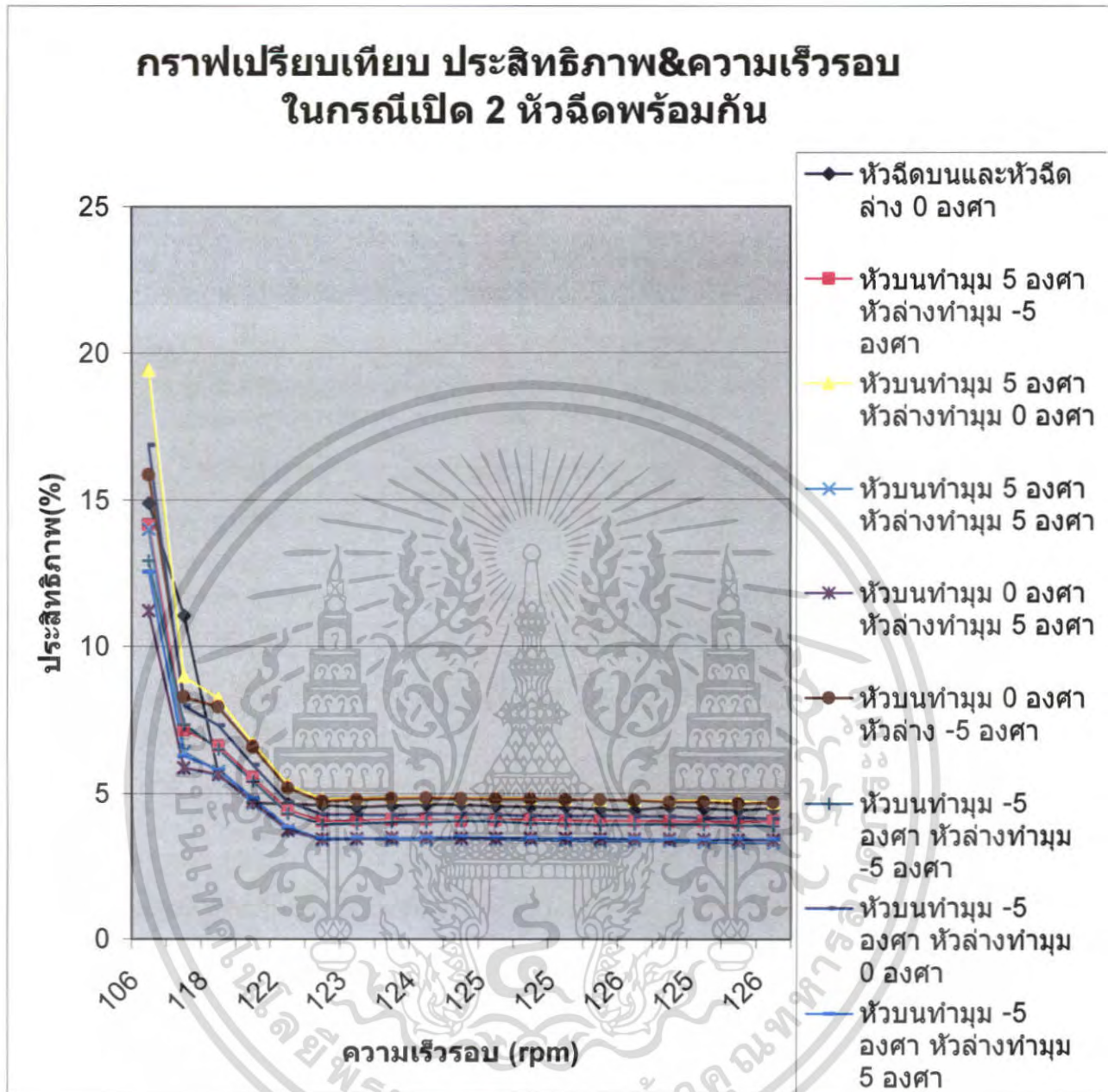


รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ และ ความเร็วรอบ ในกรณีเปิดหัวฉีดบนเพียงอย่างเดียว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้เพื่อประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตให้ถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย



รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ และ ความเร็วรอบ ในกรณีเปิดหัวฉีดล่างเพียงอย่างเดียว

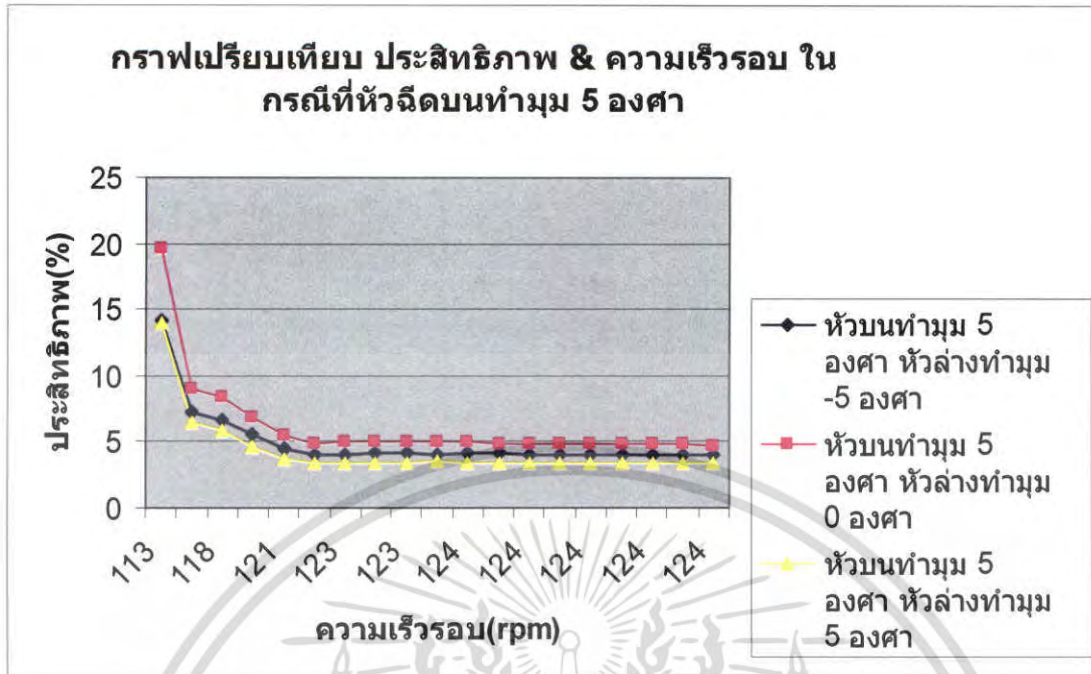
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



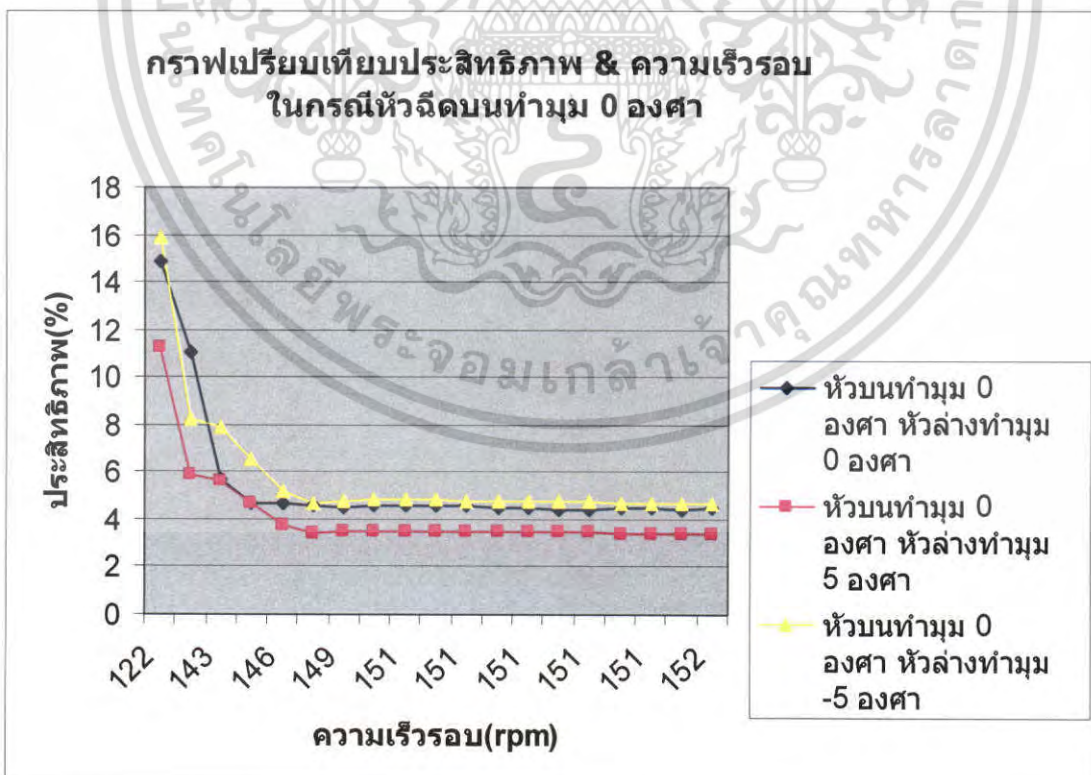
รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ และ ความเร็วรอบ ในกรณีเปิดหัวฉีด 2 หัวพร้อมกัน

เนื่องจากกราฟรูปที่ 4.6 มีความสับสนมากจึงขอแยกมาเป็น 3 กราฟย่อยๆ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

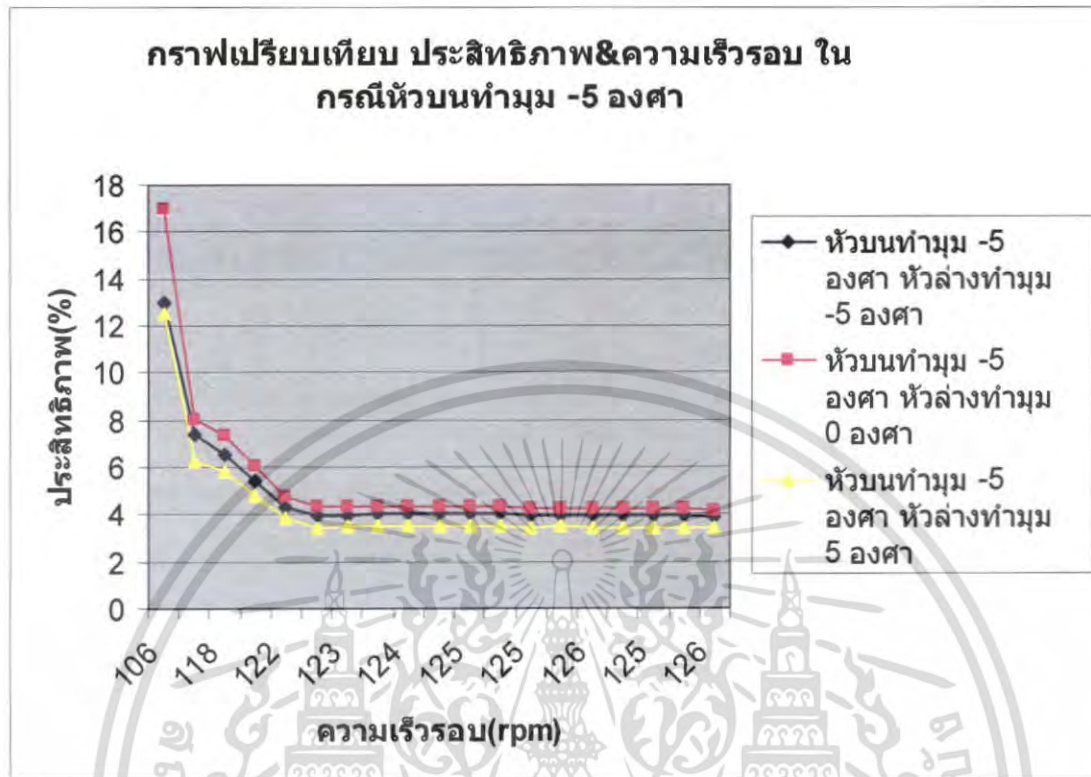


รูปที่ 4.6.1 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ และ ความเร็วรอบ ในกรณีเปิดหัวฉีด 2 หัวพร้อมกันและหัวบนท่ามม 5 องศา



รูปที่ 4.6.2 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ และ ความเร็วรอบ ในกรณีเปิดหัวฉีด 2 หัวพร้อมกันและหัวบนท่ามม 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6.3 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ และ ความเร็วรอบ ในกรณีเปิดหัวฉีด 2 หัวพร้อมกันและหัวบนทำมุม -5 องศา

#### 4.6 สรุปผลการทดลอง

4.6.1 สำหรับหัวฉีด 1 หัวฉีดและ 2 หัวฉีด จากผลการทดลองพบว่าหัวฉีด 1 หัวฉีด มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า 2 หัวฉีด

4.6.2 สำหรับในกรณี 1 หัวฉีด หัวฉีดบนมีประสิทธิภาพมากกว่าหัวฉีดล่างเล็กน้อย โดยที่มุมของการฉีดที่ 0 องศา มีประสิทธิภาพที่สูงสุดมากกว่ามุมอื่นๆคือ 23.55 %

##### 4.6.3 สำหรับมุมในการฉีด

4.6.3.1 ในกรณีฉีดหัวฉีดบนเพียงอย่างเดียว มุม 0 องศาจะให้ประสิทธิภาพดีที่สุด

4.6.3.2 ในกรณีฉีดหัวฉีดล่างเพียงอย่างเดียว มุม 5 องศาจะให้ประสิทธิภาพดีที่สุด

4.6.3.3 ในกรณีฉีด 2 หัวพร้อมกัน หัวฉีดบนทำมุม 5 องศา และหัวฉีดล่างทำมุม 0 องศา จะให้ประสิทธิภาพดีที่สุด

#### ข้อเสนอแนะและการวิจารณ์การทดลอง

1. ปัญญาประดิษฐ์ฉบับนี้จะเป็นการทดลองที่ได้มีการใช้หัวฉีดขนาด 8 มิลลิเมตร เพียงขนาดเดียว โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของหัวฉีด ทำให้ประสิทธิภาพของ 2 หัวฉีด จึงมีค่าน้อยกว่า 1 หัวฉีด เนื่องมาจากการที่เรารับอัตราการไหลที่เท่ากันของ 1 หัวฉีด และ 2 หัวฉีด แต่ 2 หัวฉีด ได้มีการถูกแบ่งอัตราการไหลออกเป็น 2 เอกสารเป็นเอกสารที่ส่งวนเวียนสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญเตเห็นาเปไซประะเยชนดานการค้ำ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วน ทำให้ความเร็วที่ออกจากหัวฉีด 1 หัวฉีด มีค่า 2 เท่าของ 2 หัวฉีด จึงทำให้ประสิทธิภาพของ 2 หัวฉีดมีค่าลดลงกว่า 1 หัวฉีด ในส่วนของการแก้ไขปัญหานี้ก็คือ เมื่อเราทำการปรับอัตราการไหลของ 2 หัวฉีด ก็ต้องทำการลดขนาดของหัวฉีดลงด้วย เพื่อปรับความเร็วของหัวฉีดในแต่ละหัว มีความเร็วเท่ากับความเร็วการเปิดเพียง 1 หัวฉีด เมื่อปรับความเร็วที่ออกจากหัวฉีดให้มีความเร็วเท่ากันแล้ว จึงนำค่านี้มาเปรียบเทียบกับระหว่าง 1 หัวฉีด กับ 2 หัวฉีด ค่าที่ได้จึงมีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น

2. จากสมการการหาจำนวนใบพัดที่เหมาะสม

$$Z=15+0.5\left(\frac{D_T}{d}\right) \dots\dots\dots (4.9)$$

โดยที่  $D_T$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของเทอร์ไบน์ = 300 มิลลิเมตร

$d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด = 10 มิลลิเมตร

$\frac{D_T}{d}$  = อัตราส่วน Jet Ratio

แทนค่า  $Z = 15 + 0.5\left(\frac{300}{10}\right) = 30$  ใบ

ซึ่งตามสมการนี้อาจจะเหมาะสมในกรณีหัวฉีดเดียว ส่วนในกรณี 2 หัวฉีดนั้นอาจจะมีการหาจำนวนใบพัดที่เหมาะสมอีกสมการ

## บรรณานุกรม

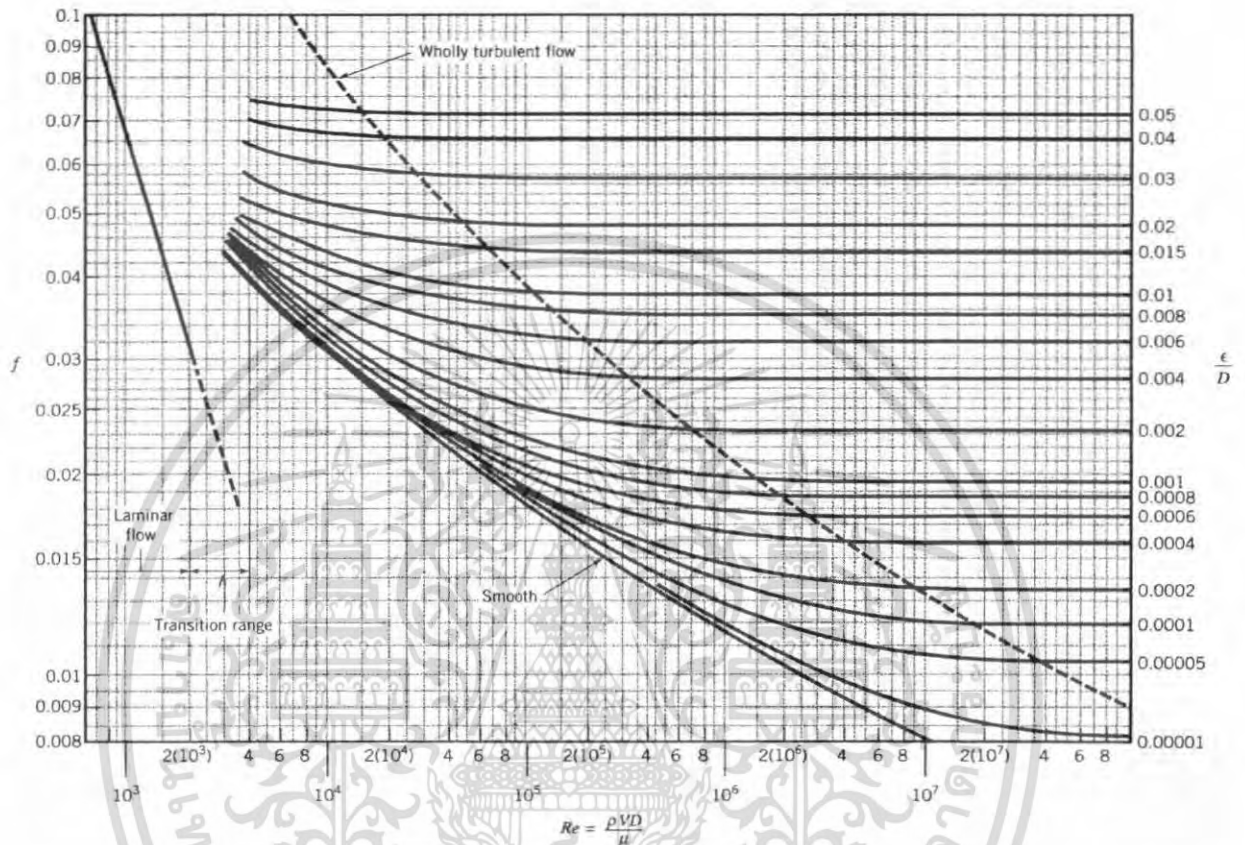
- [1]Engineering Fluid Mechanics, Clayton T.Crown, Donald F.Elger, John A. Roberson.
- [2]Fluid Mechanics with Engineering, Robert L.Daugherty, Joseph B.Franzini, E.john.
- [3]Engineering Fluid Mechanics, John J.Bertin.
- [4]Fluid Mechanics with Engineering Application, Robert L.Daugherty, Joseph B.Franzini, E.John



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

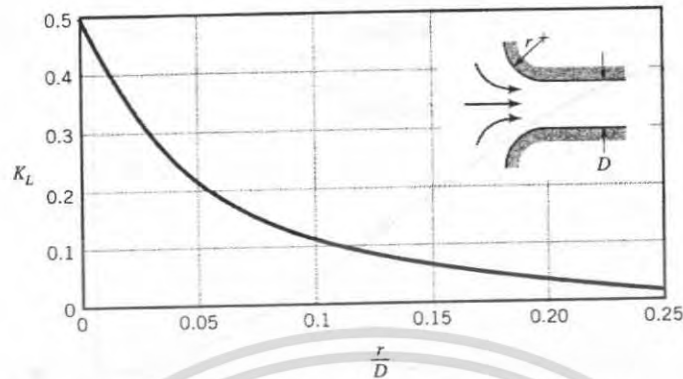


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

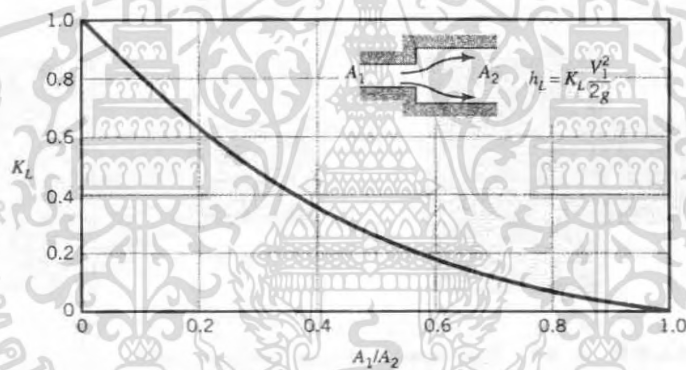


รูปที่ ก-1 แผนภูมิใช้หาตัวประกอบความเสียดทาน

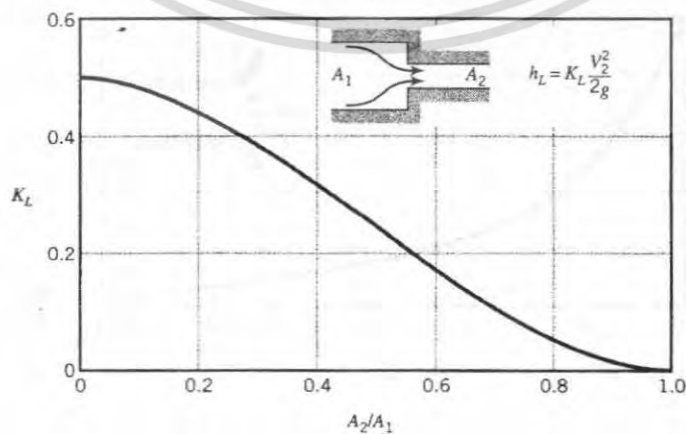
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



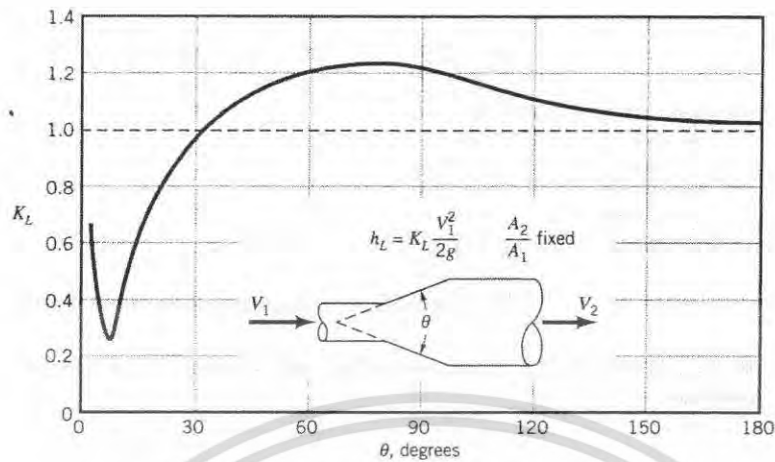
รูปที่ ก-2 แสดงค่า  $K_L$  ที่ปากท่อทางเข้าแบบเป็นมุมมน



รูปที่ ก-3 แสดงค่า  $K_L$  ที่ปากท่อทางออกแบบเป็นมุมฉาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ ก-4 แสดงค่า  $K_L$  ที่ปากท่อทางเข้าแบบเป็นมุมฉาก  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-5 แสดงค่า  $K_L$  สำหรับการไหลผ่านท่อที่มีการเพิ่มขนาดพื้นที่หน้าตัดอย่างค่อยเป็นค่อยไป

$A_2/A_1$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$K_C$	0.617	0.624	0.632	0.643	0.659	0.681	0.712	0.755	0.813	0.892	1.0
$K_L$	0.50	0.46	0.41	0.36	0.30	0.24	0.18	0.12	0.06	0.02	0

ตารางที่ ก-1 แสดงค่า  $K_L$  และ  $K_C$  สำหรับการไหลผ่านท่อที่มีการลดขนาด

COMPONENT	$K_L$
ข้องอ (Elbow)	
ข้องอ 90°(ปกติ), แบบหน้าแปลน	0.3
ข้องอ 90°(ปกติ), แบบเกลียว	1.5
ข้องอ 90°(รัศมียาว), แบบหน้าแปลน	0.2
ข้องอ 90°(รัศมียาว), แบบเกลียว	0.7
ข้องอ 45°(รัศมียาว), แบบหน้าแปลน	0.2
ข้องอ 45°(ปกติ), แบบเกลียว	0.4
ข้อโค้งกลับ (return bend)	
โค้งกลับ 180° แบบหน้าแปลน	0.2
โค้งกลับ 180° แบบเกลียว	1.5
ข้อต่อสามทาง	
ไหลในแนวเดิม, แบบหน้าแปลน	0.2
ไหลในแนวเดิม, แบบเกลียว	0.9
ไหลแยก, แบบหน้าแปลน	1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทฯ ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลแยก ,แบบเกลียว	2.0
วาล์ว (Valve)	
โกลบวาล์ว ,เปิดเต็มที่	10
แองเกิลวาล์ว (angle valve), เปิดเต็มที่	2
เกตวาล์ว (gate valve) ,เปิดเต็มที่	0.15
เกตวาล์วปิด 1/4	0.26
เกตวาล์วปิด 3/8	0.81
เกตวาล์วปิด 1/2	2.06
เกตวาล์วปิด 5/8	5.52
เกตวาล์วปิด 3/4	17.0
เกตวาล์วปิด 7/8	97.8

ตารางที่ ก-2 แสดงค่า  $K_L$  สำหรับการไหลผ่านข้องอ ข้อโค้งกลับ ข้อต่อสามทาง ข้อต่อยูเนียน และวาล์ว

อุณหภูมิ <sup>o</sup> c	น้ำหนัก จำเพาะ $\gamma, N/m^3$	ความ หนาแน่น $\rho, kg/m^3$	ความ หนืด $\mu$ , Pa.s ( $\times 10^{-3}$ )	ความหนืด จลน์ $\nu$ , $m^2/s$ ( $\times 10^{-6}$ )	ความตึง ผิว ( $\times 10^{-2}$ )	ความ ดัน ไอ $p_v$ , kPa	มอดูลัส 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

ตารางที่ ก-3 สมบัติทางฟิสิกส์ของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ (หน่วยเอสไอ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## การทดลองหาประสิทธิภาพการทำงานของอิมพัลส์เทอร์ไบน์

ชาญชัย จำรูญถาวร <sup>1</sup>, ชาตรี เวียงพลระออม <sup>2</sup>, อรรถพร จึงสงวนสิทธิ์ <sup>2</sup>, มณฑล ใจกุลศล <sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้เสนอการทำงานและทดลองหาประสิทธิภาพของกังหันน้ำแบบแรงกระแทก(Impulse turbine) แบบ 1 หัวฉีด และ 2 หัวฉีด โดยใช้เครื่องสูบน้ำขนาด 0.5 แรงม้า และมีการจ่ายน้ำที่มีอัตราการไหลสูงสุด 35 ลิตรต่อนาที โดยส่งจ่ายน้ำผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว และใช้หัวฉีดที่มีขนาดรูหัวฉีด 10 มิลลิเมตร จำนวน 2 หัวฉีด น้ำที่ไหลจากหัวฉีดมีความเร็ว 7.43 เมตรต่อวินาที ฉีดน้ำไปกระทบกับใบกังหันน้ำขนาด 49 ตารางเซนติเมตร จำนวน 30 ใบ โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล และจากผลการทดลองพบว่า หัวฉีด 1 หัวฉีด มีประสิทธิภาพดีกว่า 2 หัวฉีด สำหรับใบกรณี 1 หัวฉีด หัวฉีดบนมีประสิทธิภาพดีกว่าหัวฉีดล่างเล็กน้อย

### Abstract

This project prouds to present another operation and experiment with efficiency of Impulse turbine by one nozzle and double 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, 2 hose(10 mm. for each hole) were speeded to spring 7.43 meter per second. This splashes to a turbine that sizes 49 centimeters amount 30 ones by change flow rate. The result is efficiency of one nozzle higher than double nozzle for case one nozzle, efficiency of upper-nozzle higher than lower-nozzle.

© 2007 Department of Mechanical Engineering, KMITL. All rights reserved

*Keywords: Impulse turbine; Double jet; Efficiency*

### 1. บทนำ

ปี ค.ศ. 1829-1908 Lester A. Pelton ผู้ซึ่งเสียชีวิตอย่างมากมายในการที่จะพัฒนา Impulse turbine และในปี ค.ศ. 1880 เขาก็ได้จดสิทธิบัตรในการออกแบบใบกังหันซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งเป็นพื้นฐานในการออกแบบสร้างแบบจำลอง และแบบจำลองที่ได้เสนอนั้นคือการฉีดน้ำแบบต่อเนื่อง ไปเรื่อยๆ โดยใช้การฉีดน้ำแบบหัวฉีดเดียว แต่ในแบบจำลองนี้จะเป็นการนำเสนอการทำงานของกังหันแบบแรงกระแทกชนิดสองหัวฉีด จากนั้นก็จะทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนของใบพัดและอัตราการไหล เพื่อหาจำนวนที่เหมาะสมที่สุดที่จะได้ประสิทธิภาพมากที่สุด

<sup>1</sup> ชื่ออังกฤษ "The experiment with efficiency of impulse turbine" เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงมือแล้วหรือมีการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

<sup>2</sup> นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล. ห้อง 4G รหัส 47010176, 47010179 และ 47010953 ตามลำดับ

<sup>3</sup> อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล., โทร. 0 2326 4197, อีเมล kssoyam@kmitl.ac.th

## สัญลักษณ์

$P_1$	ความดันที่ผิวของบ่อน้ำ	$P_2$	ความดันที่ปลายทางออกของหัวฉีด
$\gamma$	น้ำหนักจำเพาะ	$z_1$	เฮตระดับความสูงที่ผิวบ่อน้ำ
$\rho$	ความหนาแน่น	$z_2$	เฮตระดับความสูงที่ปลายทางออกของหัวฉีด
$g$	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	$h_f$	เฮตสูญเสียหลัก
$v_1$	ความเร็วที่ผิวของบ่อน้ำ	$h_m$	เฮตสูญเสียรอง
$v_2$	ความเร็วที่ปลายทางออกของหัวฉีด	$A_p$	พื้นที่หน้าตัดของท่อหัวฉีด
$K$	สัมประสิทธิ์ของการสูญเสีย	$A_j$	พื้นที่หน้าตัดของหัวฉีด
$f$	ตัวประกอบความเสียดทาน	$D$	เส้นผ่านศูนย์กลางของเทอร์ไบน์
$L$	ความยาวของท่อ	$m$	ค่าที่วัดได้จากตาซึ่งสปริง
$\varepsilon$	ความขรุขระสมมูล	$\mu$	ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล
$h_p$	เฮตของปั๊ม	$T$	แรงบิดของกังหัน
$V_B$	ความเร็วของถ้วย Bucket	$Q$	อัตราการไหลของน้ำ
$\omega$	ความเร็วเชิงมุม	$P$	กำลังของกังหัน
$r$	รัศมีของเทอร์ไบน์	$\eta$	ประสิทธิภาพ
$Z$	จำนวนของใบกังหัน	$N$	ความเร็วรอบ

## อักษรท้อย

$p$	ท่อ (Pipe)	$B$	ใบกังหัน
$j$	หัวฉีด (Jet)	$I$	ผิวน้ำ
$2$	ปลายทางของหัวฉีด		

## 2. การคำนวณทางทฤษฎี

## 2.1 การทำงานและการคำนวณของ Impulse turbine แบบ 1 หัวฉีด

เครื่องกังหันน้ำแบบแรงกระแทก (Impulse turbine) เป็นการเปลี่ยนรูปพลังงานจากการไหลทั้งหมดของลำน้ำก่อนที่จะพุ่งเข้าปะทะกับลูกถ้วย (Bucket) การเปลี่ยนรูปของพลังงานศักย์เป็นพลังงานจลน์เกิดขึ้นได้ด้วยการให้น้ำไหลลงมาจากที่สูงมาตามท่อที่ลดขนาดลงมาเรื่อยๆ และผ่านออกทางหัวฉีด โดยความดันที่กระทำต่อลำน้ำทั้งก่อนและหลังจากถูกกระทบกับลูกถ้วยแล้วจะมีค่าเท่ากัน ดังนั้นในบางครั้งจึงเรียกเครื่องกังหันชนิดนี้ว่า เครื่องกังหันน้ำชนิดความดันคงตัว ความดันที่กระทำต่อลำน้ำที่ทางเข้าและทางออกของลูกถ้วยจะมีค่าเท่ากับบรรยากาศ ซึ่งก็คือ 101.3 kPa

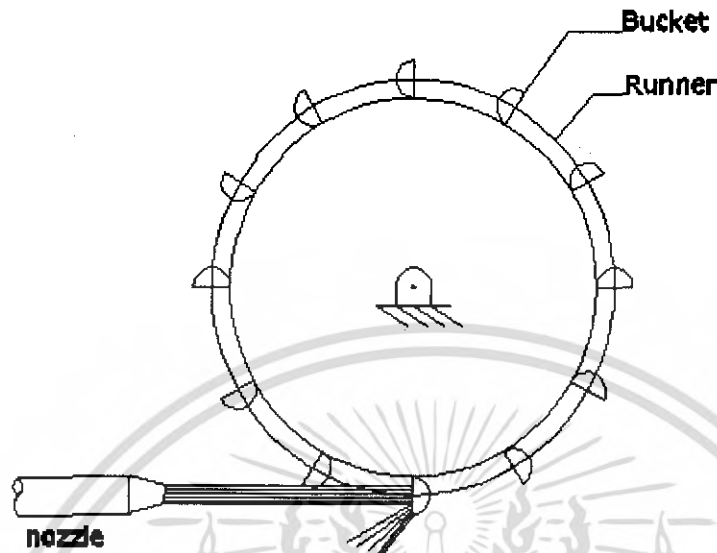
สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าเฮต Impulse turbine แบบ 1 หัวฉีด

$$h = \left(\frac{1}{C_v^2} - 1\right) \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right] \frac{V_1^2}{2g} + k \frac{v_1^2}{2g} + \frac{V_2^2}{2g} + h'' \quad \dots \dots \dots (1)$$

โดยที่	$C_v$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็ว Nozzle
	$A_1$	คือ พื้นที่หน้าตัดการไหลของท่อน้ำของ Nozzle
	$A_2$	คือ พื้นที่หน้าตัดการไหลของหัวฉีด
	$v_2$	คือ ความเร็วของน้ำที่สัมผัสกับใบกังหันที่ออกจากใบกังหัน
	$V_2$	คือ ความเร็วสุทธิของน้ำที่ออกจากใบกังหัน
	$h''$	คือ พลังงานที่ส่งใบกังหัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ของ  $k$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานของใบกังหัน จะมีค่าจาก 0.2 ถึงประมาณ 0.6 พลังงานส่วนใหญ่จะส่งจากใบกังหันไปยังเพลลา แต่บางส่วนจะใช้ในการเอาชนะแรงเสียดทานที่ใบรับรองและในแรงลม ดังรูปที่ 1 ที่แสดงการทำงานของ Impulse turbine



รูป 1 แสดงการทำงานของ Impulse turbine แบบ 1 หัวฉีด

## 2.2 การคำนวณของใบพัด

โดยการที่น้ำพุ่งออกจากหัวฉีดเข้าปะทะกับลูกถ้วยในแนวกึ่งกลางของแนวการหมุนของลูกถ้วย โดยหัวฉีดจะเป็นส่วนที่ยึดติดอยู่กับทางเข้าของน้ำซึ่งสามารถปรับอัตราไหลให้เหมาะสมกับความต้องการ พบว่ารูปถ้วยจะมีลักษณะเป็นครึ่งวงกลม 2 ชิ้น เพื่อลำนน้ำหลังจากพุ่งเข้าปะทะแล้วสามารถที่จะไม่ไหลย้อนกลับในทิศทางเดิมได้ ทำให้แรงปะทะมีค่าเพิ่มขึ้น

### การคำนวณหาจำนวนของใบกังหัน

โดยที่จะหาได้จากสมการ

$$Z = 0.5 \left( \frac{D}{d} \right) + 15 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$Z$  คือ จำนวนของใบกังหัน

$D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเทอร์ไบน์

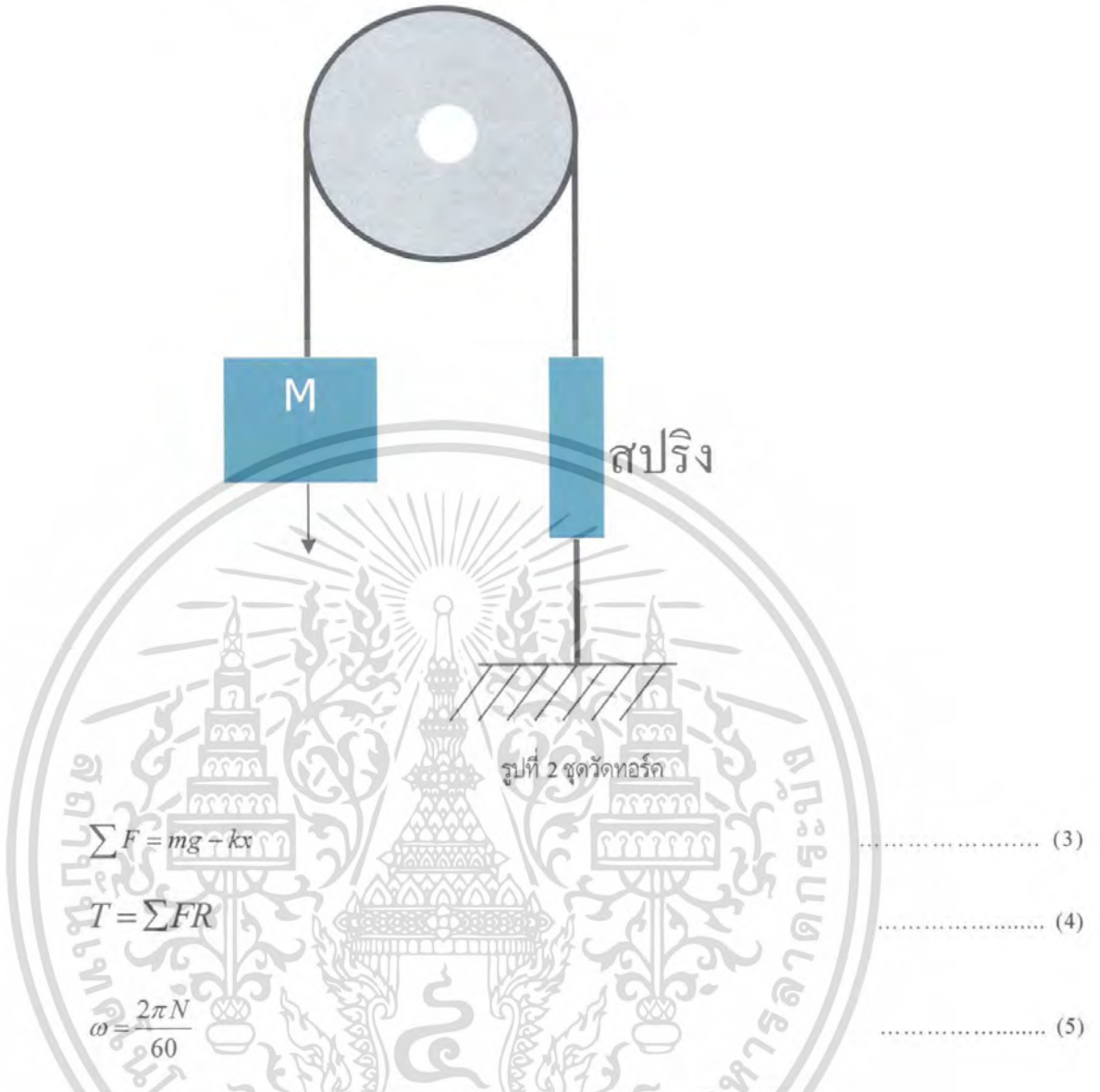
$d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด

โดย อัตราส่วน  $\frac{D}{d}$  จะเรียกว่า Jet Ratio

## 2.3 การคำนวณหาแรงบิด (Torque) -

- กำหนดให้  $k$  = ค่าคงที่ของสปริง (5.9187 N/cm)
- $X$  = ระยะยืดของสปริง (cm)
- $R$  = รัศมีของ bearing (0.02315 m.)
- $m$  = ตูมน้ำหนัก (kg)

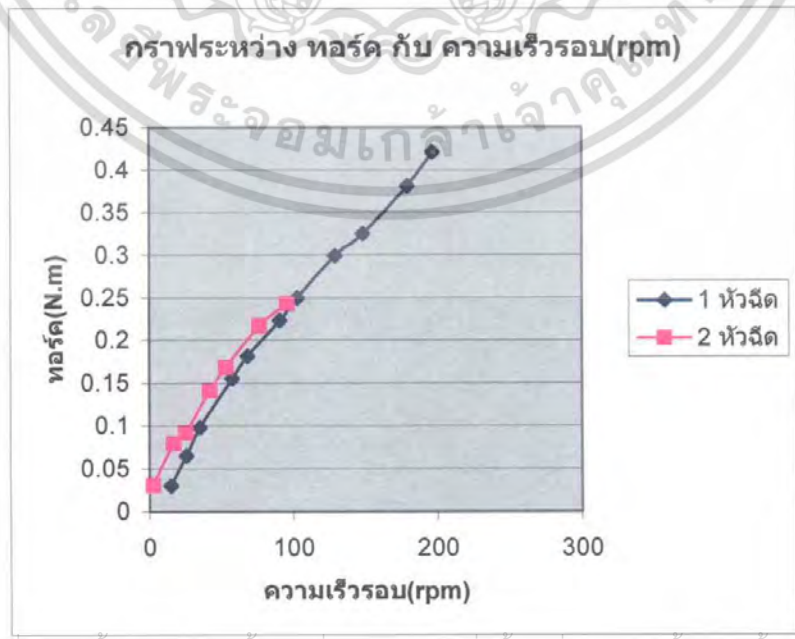
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$\sum F = mg - kx$  ..... (3)

$T = \sum FR$  ..... (4)

$\omega = \frac{2\pi N}{60}$  ..... (5)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องกังหันน้ำ

ประสิทธิภาพของเครื่องกังหันน้ำ จะพิจารณาได้จาก

$$P_{output} = T\omega \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$P_{input} = \frac{1}{2} \rho Q V_j^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (8)$$

3. การหาประสิทธิภาพด้วยชุดทดลอง

3.1 แสดงการทำงานของกังหันแบบแรงกระแทกชนิด 2 หัวฉีด



รูปที่ 4 แสดงการทำงานของกังหันแบบแรงกระแทกชนิด 2 หัวฉีด

- โดยที่
- หมายเลข 1 คือ Bucket
  - หมายเลข 2 คือ Nozzle 1
  - หมายเลข 3 คือ Nozzle 2
  - หมายเลข 4 คือ wheel

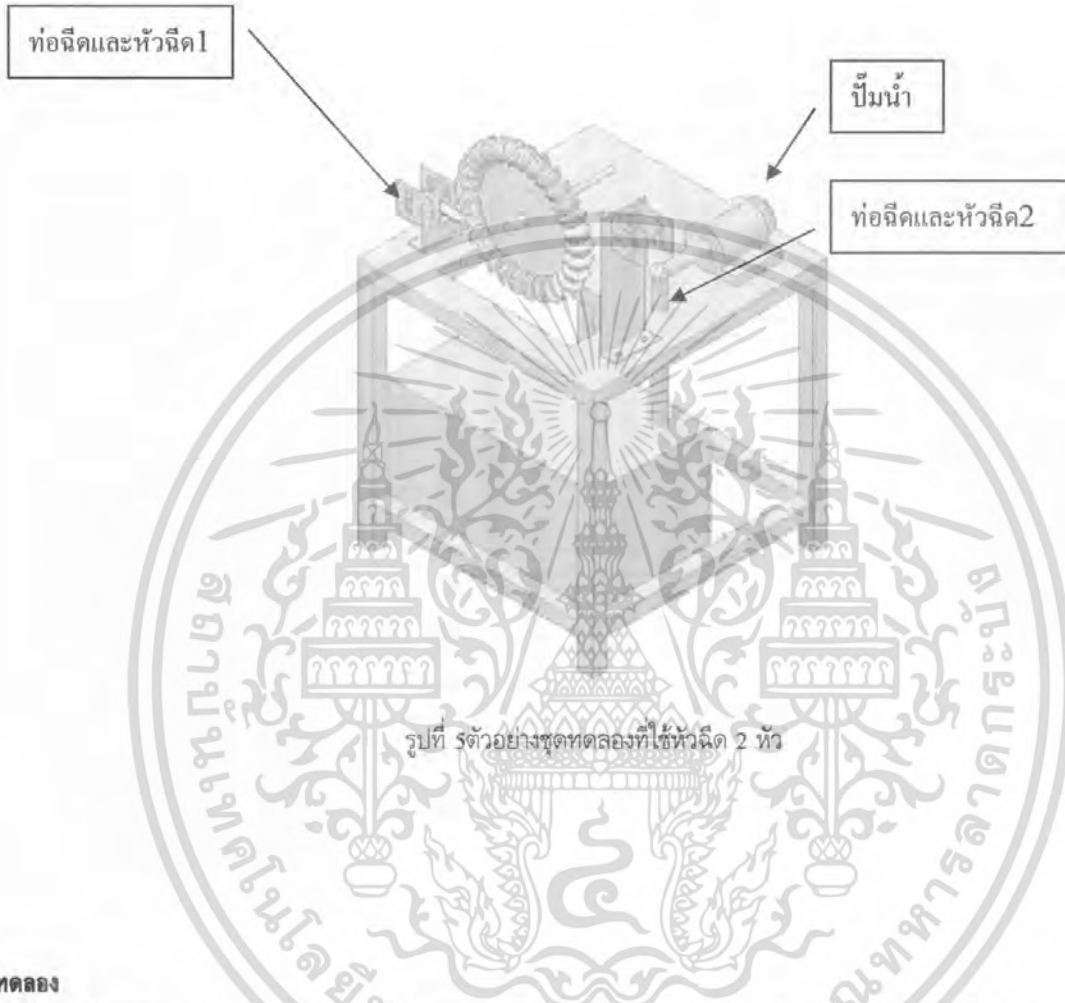
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ของชุดทดลองที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพของกังหันแบบแรงกระทำ ดังรูปที่ 4

3.2.1 ป้อนน้ำ

3.2.2 ท่อฉีด และหัวฉีด

3.2.3 เครื่องวัดความเร็วรอบ



รูปที่ ๔ ตัวอย่างชุดทดลองที่ใช้หัวฉีด 2 หัว

#### 4. วิธีการทดลอง

4.1 ใช้ปั๊มขนาด 0.5 แรงม้า และมีจำนวนใบพัด 30 ใบ ทำการฉีดน้ำผ่านหัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร โดยเริ่มต้นกำหนดการเปิดวาล์วสุด

4.2 ทำการเปิดหัวฉีดบนเพียงอย่างเดียวตั้งไว้ที่มุม 0 จากนั้นก็ทำการเก็บค่าความเร็วรอบ (N) จากการใช้ Photo Tachometer เก็บค่าและหาค่าเฉลี่ยของความเร็วรอบและทำการปรับมุมของการฉีดเป็น 5 องศาและ -5 องศาตามลำดับ

4.3 ทำการลดการเปิดวาล์วลงทีละน้อย จากนั้นทำการทดลองเหมือนกับข้อ 2 แล้วทำการบันทึกผลการทดลอง

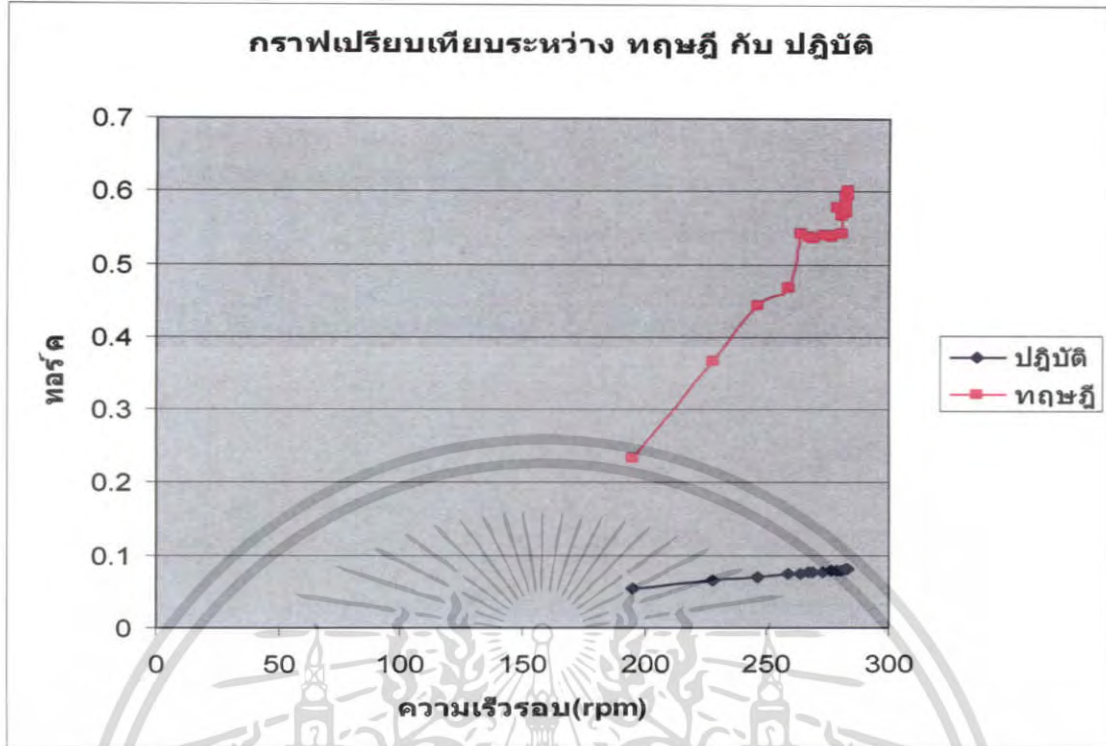
4.4 ทำการทดลองเหมือนข้อ 1-3 แต่เปลี่ยนจากการเปิดหัวฉีดบน เป็นการเปิดหัวฉีดล่างเพียงอย่างเดียว และบันทึกผลการทดลอง

4.5 ทำการทดลองเหมือนข้อ 1-3 แต่เปลี่ยนเป็นการเปิดทั้ง 2 หัวฉีด และบันทึกผลการทดลอง โดยกำหนดค่ามุมที่หัวฉีดบนเป็นมุม 0 องศา และหัวฉีดล่างเป็นมุม 0 องศา แล้วทำการเก็บค่าผลการทดลองและทำการปรับมุมการฉีด 5 องศา และ -5 องศา ในแต่ละหัวฉีด โดยทำในทุกกรณี บันทึกผลการทดลอง

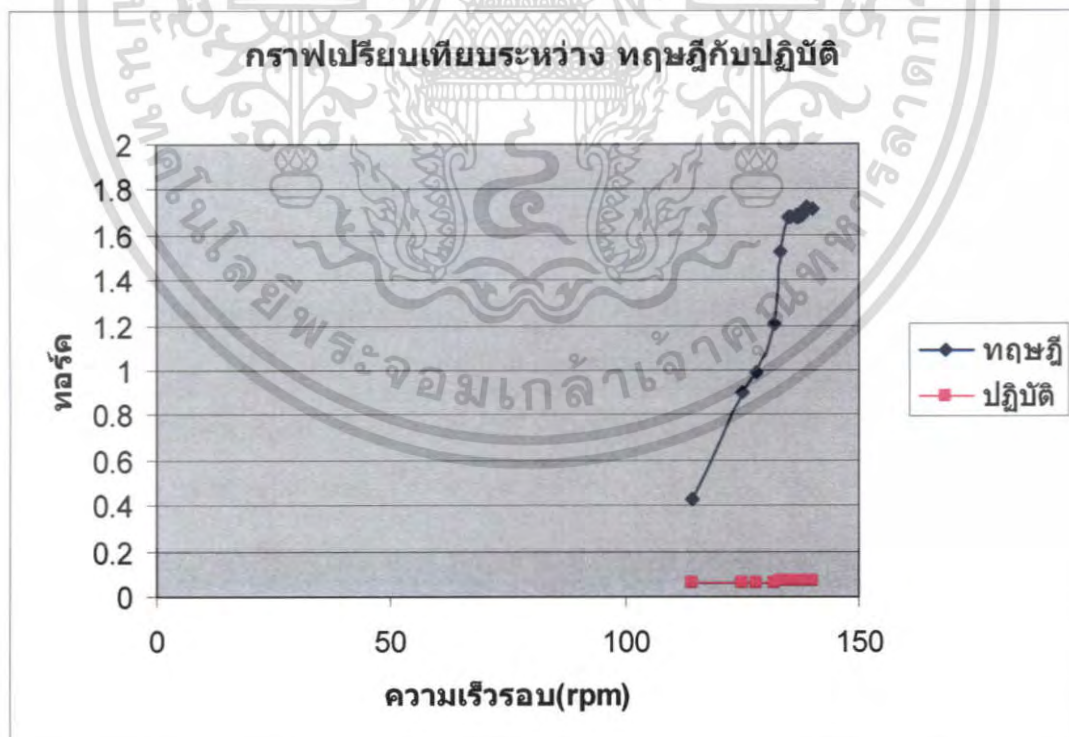
4.6 นำค่าที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพกับความเร็วรอบ ในแต่ละกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ผลการทดลอง

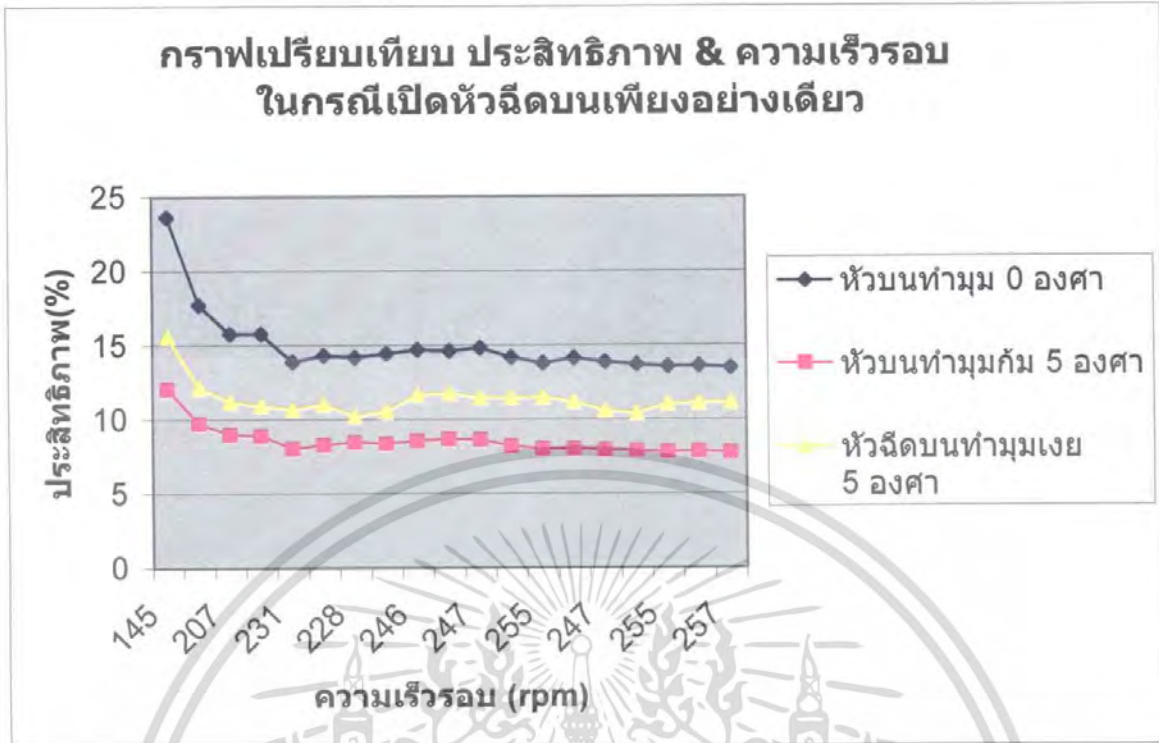


รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ทอร์ค และความเร็วรอบในกรณีเปิดเพียง 1 หัว

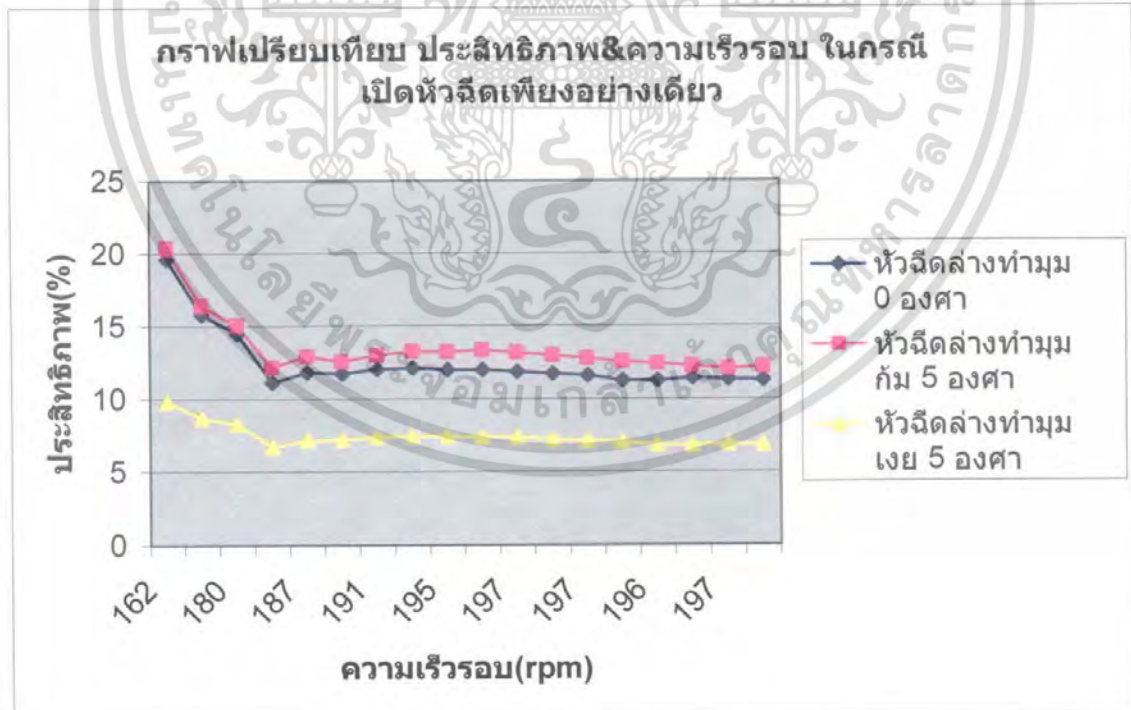


รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ทอร์ค และความเร็วรอบในกรณีเปิดเพียง 2 หัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

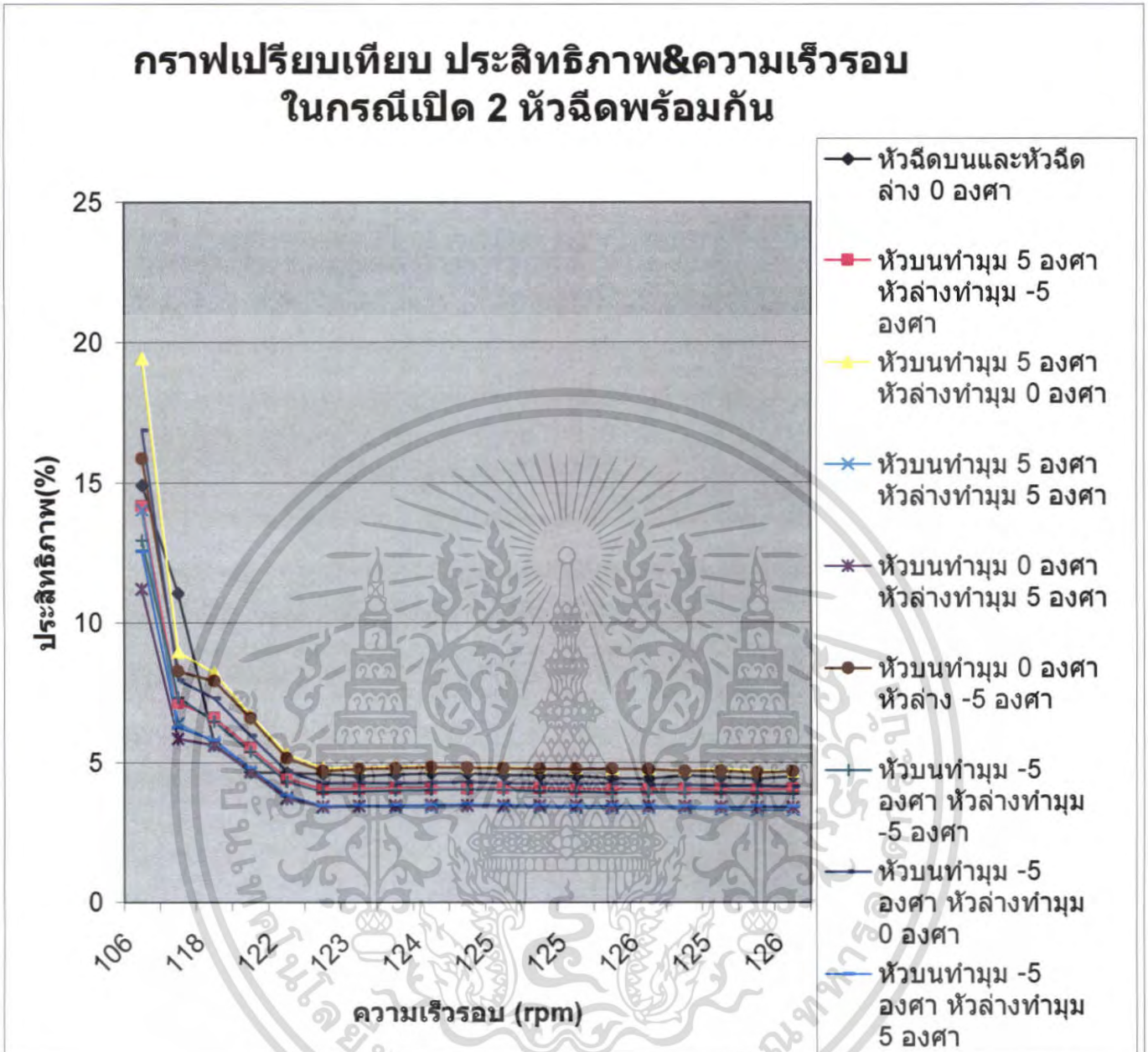


รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ และ ความเร็วรอบ ในกรณีเปิดหัวฉีดบนเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ และ ความเร็วรอบ ในกรณีเปิดหัวฉีดล่างเพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

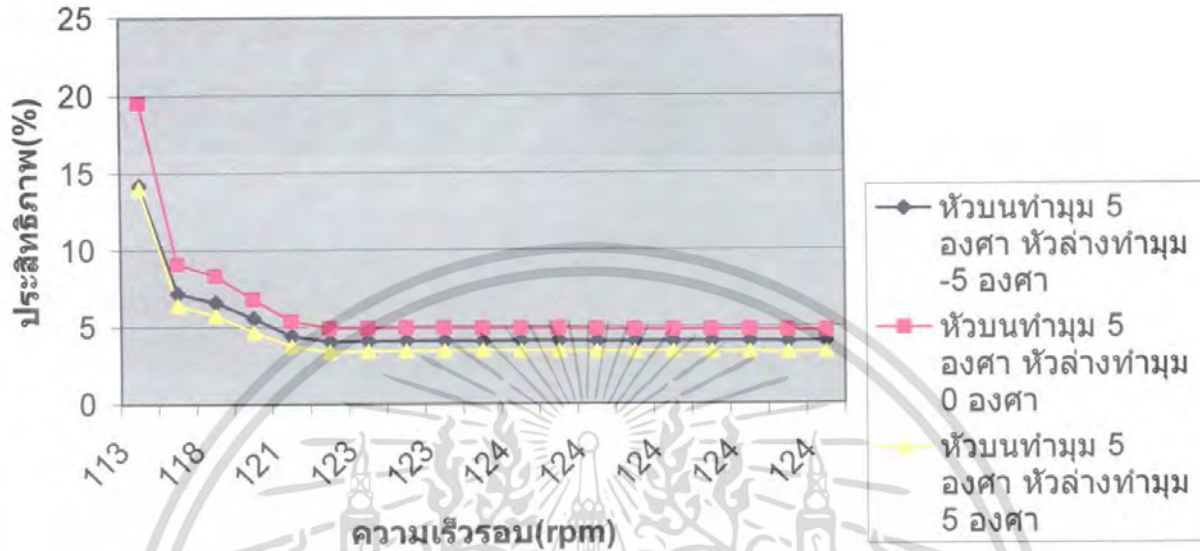


รูปที่10 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ และ ความเร็วรอบ ในกรณีเปิดหัวฉีด 2 หัวพร้อมกัน

เนื่องจากกราฟรูปที่10 มีความสับสนมากจึงขอแยกมาเป็น 3 กราฟย่อยๆคือ

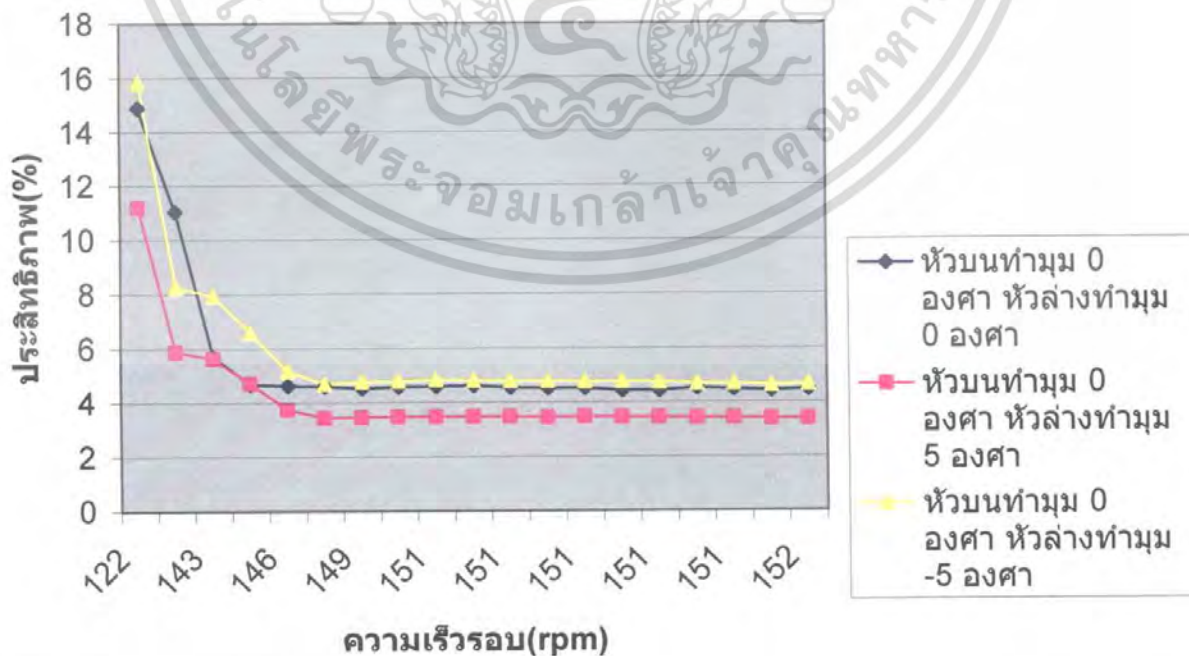
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กราฟเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพ & ความเร็วรอบ ในกรณีที่หัวฉีดบนท่ามุม 5 องศา

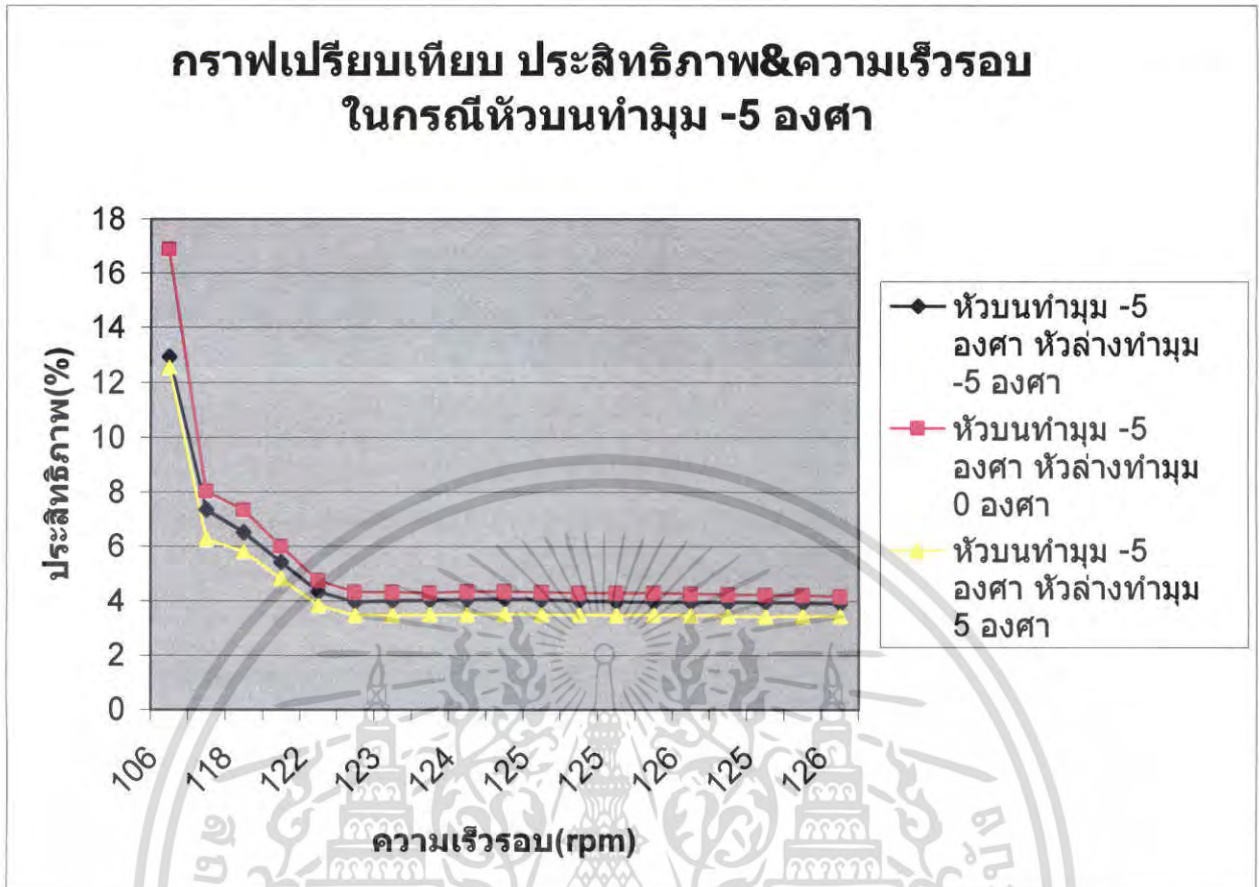


รูปที่ 10.1 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ และ ความเร็วรอบ ในกรณีเปิดหัวฉีด 2 หัวพร้อมกันและหัวบนท่ามุม 5 องศา

### กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพ & ความเร็วรอบ ในกรณีที่หัวฉีดบนท่ามุม 0 องศา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 10.2 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ และ ความเร็วรอบ ในกรณีเปิดหัวฉีด 2 หัวพร้อมกันและหัวบนท่ามุม 0 องศา  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่10.3 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง ประสิทธิภาพ และ ความเร็วรอบ ในกรณีเปิดหัวฉีด 2 หัวพร้อมกันและหัวบนทำมุม -5 องศา

## 6. สรุปผลการทดลอง

- 6.1 สำหรับหัวฉีด 1 หัวฉีดและ 2 หัวฉีด จากผลการทดลองพบว่าหัวฉีด 1 หัวฉีด มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า 2 หัวฉีด
- 6.2 สำหรับหัวฉีดบนมีประสิทธิภาพมากกว่าหัวฉีดล่างเล็กน้อย โดยที่มุมของการฉีดที่ 0 องศา มีประสิทธิภาพที่สูงสุดมากกว่ามุมอื่นๆคือ 23.55 %
- 6.3 สำหรับมุมในการฉีด
  - 6.3.1 ในกรณีฉีดหัวฉีดบนเพียงอย่างเดียว มุม 0 องศาจะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด
  - 6.3.2 ในกรณีฉีดหัวฉีดล่างเพียงอย่างเดียว มุม -5 องศาจะให้ประสิทธิภาพดีที่สุด
  - 6.3.3 ในกรณีฉีด 2 หัวพร้อมกัน หัวฉีดบนทำมุม 5 องศา และหัวฉีดล่างทำมุม 0 องศาจะให้ประสิทธิภาพดีที่สุด

## 7.ขอบเขตการดำเนินงาน

- 7.1 เปลี่ยนจำนวนหัวฉีดจาก 1 หัวฉีดเป็น 2 หัวฉีด
- 7.2 เปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำ
- 7.3 เปลี่ยนมุมในการฉีดของหัวฉีด เป็น 0, 5 และ -5 องศา

## 8. ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 8.1 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพระหว่างหัวฉีดจำนวน 1 หัว และ 2 หัว
- 8.2 สามารถเป็นชุดทดลองเพื่อใช้ในการศึกษาวิชา Fluid mechanics

## 9. เอกสารอ้างอิง

- [1]Engineering Fluid Mechanics, Clayton T.Crown, Donald F.Elger, John A. Roberson.
- [2]Fluid Mechanics with Engineering, Robert L.Daugherty, Joseph B.Franzini, E.John.
- [3]Engineering Fluid Mechanics, John J.Bertin.
- [4]Fluid Mechanics with Engineering Application, Robert L.Daugherty, Joseph B.Franzini, E.John.