

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาประสิทธิภาพของกังหันน้ำตามแนวแกนแบบหลายชั้น

MULTI STAGE AXIAL FLOW TURBINE



ปฏิญานินพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาประสิทธิภาพของกังหันน้ำตามแนวแกนแบบหลายชั้น

## MULTI STAGE AXIAL FLOW TURBINE

โดย

นายเมธาสิทธิ์ เครื่องศรีพงษ์

นายวราชัย วงศ์สืบ

นายเอกพล พนาอภิชน

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. มณฑล ใจกุลศด

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาประสิทธิภาพของกังหันน้ำตามแนวแกนแบบหลายชั้น

**MULTI STAGE AXIAL FLOW TURBINE**

ผู้จัดทำ

1. นายเมธาสิทธิ์ เครื่องศรีพงษ์ 46010610
2. นายวรราชย์ วงศ์สืบ 46010667
3. นายเอกพล พนาอภิชน 46010991



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. มณฑล ใจกุลต)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาประสิทธิภาพของกังหันน้ำตามแนวแกนแบบหลายชั้น

นายเมธาสิทธิ์ เครื่องศรีพงษ์ 46010610  
 นายวราชัย วงศ์สีบ 46010667  
 นายเอกพล พนาอภิชน 46010991  
 ผศ. มณฑล ใจกุลศล อาจารย์ที่ปรึกษา  
 ปีการศึกษา 2549

### บทคัดย่อ

การศึกษาประสิทธิภาพของกังหันน้ำตามแนวแกนแบบหลายชั้น เป็นการออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์การทดลองสำหรับใช้ในวิชา Mechanical engineering laboratory เพื่อเพิ่มความรู้ความเข้าใจในวิชากลศาสตร์ของไหล (Fluid mechanics) ถึงหลักการทำงานของกังหันชนิด NACA 6510, 4 ใบพัด, ลักษณะการไหลของของไหลผ่านระบบกังหันและศึกษาถึงตัวแปรที่จะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของชุดกังหันน้ำตามแนวแกนแบบหลายชั้น ผลการทดลองพบว่าอัตราการไหลของไหล การปรับมุมใบพัด และการปรับมุมใบบังคับทิศทางจะส่งผลถึงประสิทธิภาพการทำงานของชุดกังหันน้ำตามแนวแกนแบบหลายชั้น หากมีการเพิ่มอัตราการไหลให้สูงขึ้นประสิทธิภาพจะสูงขึ้น และเมื่อมีการปรับมุมใบบังคับทิศทางให้กระแสที่เข้ามาถูกเปลี่ยนไปมาก ควรปรับมุมใบพัดให้ทำมุมกับแนวการไหลให้น้อยลง จึงจะได้ประสิทธิภาพที่สูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Multi stage axial flow turbine

Maythasitt Kruangsripong

Varachai Vongsueb

Akekapol Panaapichon

Monton Jhaikuson      Advisor

### Abstract

The purpose of this project is to study the efficiency of multi-stage axial flow turbine. Furthermore, this project is researched to design and build experimental device used in Mechanical engineering laboratory to increase knowledge for better understanding in Fluid mechanic. In addition, a set of multi-stage turbine will increase understanding of turbine 4 blades NACA 6510 series working system in which it changes fluid power to mechanical power, and understand what are factors that will affect the working efficiency of the set of multi-stage turbine. From result it was found the flow rate of water input, attack angle of runner and attack angle of guide vane had effected to the efficiency of the multi stage turbine. When it was increased the flow rate of water input also increased the efficiency. When it was increased attack angle of guide vane it could be decrease attack angle of runner for the highest efficiency.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การศึกษาประสิทธิภาพของกังหันน้ำตามแนวแกนแบบหลายชั้น ไม่อาจสำเร็จลงได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลายๆฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ศศ. มณฑล ใจกุศล อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ และ รศ.ดร. จำลอง ปรามแก้ว ที่ต้องกล่าวถึง เพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ด้วยดี ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือมาโดยตลอด ซึ่งต้องขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ขอขอบพระคุณ อาจารย์เมธี ลิมกุล, คุณมณฑา เทียมเมือง คณาจารย์ และบุคลากรของ ภาควิชาเครื่องกล รวมทั้ง ที่คอยให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือมาโดยตลอด

ขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่ให้คำแนะนำ ติ-ชม ความช่วยเหลือ และกำลังใจให้ผู้จัดทำมาโดยตลอดและท้ายที่สุดนี้ ขอขอบคุณบิดา มารดา ที่สนับสนุนและเป็นแรงบันดาลใจในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายเมธาสิทธิ์ เครื่องศรีพงษ์

นายวราชัย วงศ์สืบ

นายเอกพล พนาภิชน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	1
1.4 วิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
2.1 เครื่องจักรกลของไหล.....	3
2.1.1 เครื่องสูบ.....	4
2.1.2 เครื่องกังหัน.....	5
2.2 เครื่องกังหันน้ำ.....	9
2.2.1 เครื่องกังหันเพลดัน.....	9
2.2.2 เครื่องกังหันฟรานซิส.....	9
2.2.3 เครื่องกังหันแคปลัน.....	10
2.3 คำจำกัดความที่สำคัญ.....	13
2.4 หลักการทำงานและการคำนวณภาระเบื้องต้นของเครื่องกังหันน้ำ.....	15
2.5 การไหลในท่อ.....	17
2.5.1 เลขเรย์โนลด์ส์.....	17
2.5.2 เลขออยเลอร์.....	18
2.5.3 ความเร็วจำเพาะของเครื่องกังหันน้ำ.....	19
2.5.4 ระยะปากทางเข้า.....	20
2.5.5 สมการแบร์นูลลี.....	21
2.6 Lift and Drag.....	23
2.7 ทฤษฎีแพนอากาศ.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.1 ชนิดของแพนอากาศ.....	27
2.7.2 แพนอากาศนากา.....	29
2.8 กฎความคล้าย.....	31
2.9 การวิเคราะห์เวกเตอร์ความเร็ว.....	33
2.10 โมเมนตัมและแรงกระทำต่อใบพัดเนื่องจากการคล.....	36
2.11 ทฤษฎีการหาประสิทธิภาพของกังหัน.....	40
2.11.1 สมการกังหันของออยเลอร์.....	40
2.11.2 สมการการหาประสิทธิภาพ.....	41
2.12 ปรากฏการณ์คาวิตีชัน.....	42
บทที่ 3 การออกแบบชุดทดลอง.....	45
3.1 การเลือกคุณสมบัติของปั้มน้ำที่ใช้ในการทดลอง.....	45
3.1.1 การหาอัตราการไหลของระบบ.....	45
3.1.2 การหาเสดปั้มน้ำ.....	47
3.2 การออกแบบใบพัด.....	50
3.3 การออกแบบใบบังคับทิศทาง.....	51
บทที่ 4 การทดลอง.....	54
4.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	54
4.2 วิธีการทดลอง.....	55
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	58
5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ กับมุมใบพัด เมื่อมุมใบบังคับทิศทางคงที่ ที่มุมต่างๆ.....	58
5.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับมุมใบพัดที่อัตรา การไหลต่างกัน.....	62
5.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับมุมใบพัด ที่มุมใบบังคับ ทิศทางต่างกัน.....	63
5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ กับมุมใบบังคับทิศทาง เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ มุมต่างๆ.....	65
5.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับมุมใบบังคับทิศทาง ที่มุม ใบพัดต่างกัน.....	70
บทที่ 6 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลองเมื่อ นุ่มใบบั้งค้ำทิศทางคองที่.....	72
6.2	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลองเมื่อ นุ่มใบพัดคองที่ .....	73
	บรรณานุกรม .....	74
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก .....	75
	ภาคผนวก ข .....	79
	ภาคผนวก ค .....	80
	ภาคผนวก ง .....	81
	ภาคผนวก จ .....	103



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าความเร็วจำเพาะของเครื่องกังหันแต่ละชนิด.....	20
2.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติแผนอากาศนากา.....	30
6.1 แสดงค่ามุมใบพัดที่เหมาะสม เมื่อมุมใบพัดบังคับทิศทางมีค่าคงที่ .....	73
6.2 แสดงค่ามุมใบพัดบังคับทิศทางที่เหมาะสม เมื่อมุมใบพัดมีค่าคงที่ .....	74



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้าที่
2.1 แสดงหลักการการทำงานของเครื่องจักรกลของไหล.....	3
2.2 แสดงชนิดของเครื่องสูบ.....	4
2.3 แสดงเครื่องสูบ.....	5
2.4 แสดงประเภทของเครื่องยนต์กังหันแก๊ส.....	5
2.5 แสดงกระบวนการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำ.....	6
2.6 ลักษณะการทำงานของกังหันน้ำชนิดเพลตัน (Pelton turbine).....	7
2.7 ภาพตัดขวางของลูกถ้วยรูป.....	7
2.8 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องกังหันน้ำชนิดปฏิริยา.....	8
2.9 แสดงลักษณะกังหันน้ำแบบเพลตัน.....	9
2.10 แสดงลักษณะเครื่องกังหันน้ำแบบฟรานซิส.....	10
2.11 แสดงลักษณะเครื่องกังหันน้ำแบบเคปตัน.....	10
2.12 ส่วนประกอบหลักของเครื่องกังหันน้ำชนิดเคปตัน.....	11
2.13 ลักษณะของมุมใบพัดเมื่อทำงานเต็มที่และทำงานเพียงบางส่วน.....	12
2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการทำงานกับประสิทธิภาพของ เครื่องกังหันน้ำชนิดปฏิริยา.....	13
2.15 ลักษณะการทำงานของเครื่องกังหันน้ำ.....	15
2.16 แสดงบริเวณทางเข้าและบริเวณการไหลเต็มท่อสำหรับการไหลภายในท่อ.....	17
2.17 การวิเคราะห์พลังงานจากปริมาตรควบคุมย่อยขนานกับเส้นกระแส.....	21
2.18 แสดงแรงกระทำต่อวัตถุผิวโค้ง.....	23
2.19 แสดงแรงเฉือนและแรงดันบนพื้นที่ย่อย $dA$ .....	23
2.20 แสดงถึงส่วนประกอบของแพนอากาศ.....	25
2.21 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงของรูปแพนอากาศ NACA 4415 ที่แปรตามมุม ปะทะ ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์์ต่างกัน.....	26
2.22 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงของแพนอากาศที่แสดงอยู่บนกราฟเดียวกัน.....	27
2.23 แผนภาพความเร็วที่ทางเข้าและทางออก.....	33
2.24 ลักษณะการไหลเข้าและไหลออกจากเครื่องกังหันน้ำ.....	34
2.25 แผนภาพความเร็วของลำของไหลที่พุ่งกระทบใบพัดที่กำลังเคลื่อนที่.....	37
2.26 แสดงถึงปรากฏการณ์ควิวเดชันที่เกิดขึ้นบนแพนอากาศที่เห็นเป็นฟองไอ.....	43
3.1 แสดงลักษณะใบพัดสองและสามมิติที่ได้จากการคำนวณ.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
3.2 แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบใบพัดบั้งค้ำทิศทาง .....	51
3.3 แสดงใบพัดบั้งค้ำทิศทางเมื่อวาดตามความยาวเส้นคอร์ด .....	53
3.4 แสดงใบพัดบั้งค้ำทิศทางที่สร้างตามการคำนวณ .....	53
4.1 แสดงชุดทดลองหลัก .....	54
4.2 แสดงส่วนประกอบของชุดทดลองหลัก .....	54
4.3 แสดงชุดบั้งค้ำทิศทางและอุปกรณ์ปรับมุม .....	55
4.4 แสดงอุปกรณ์วัดค่าต่างๆ .....	55
4.5 แสดงใบพัด คุมใบพัด และ อุปกรณ์ปรับมุมใบพัด .....	55
4.6 แสดงการประกอบชุดใบพัด .....	56
4.7 แสดงการใช้อุปกรณ์ปรับมุมปรับมุมใบพัด .....	56
4.8 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ปรับมุม .....	56
4.9 แสดงการปรับมุมชุดบั้งค้ำทิศทาง .....	56
4.10 แสดงการติดตั้งชุดใบพัดชุดที่ 2 .....	57
4.11 แสดงการติดตั้งชุดบั้งค้ำทิศทางชุดที่ 2 .....	57
4.12 แสดงการติดตั้งชุดใบพัดชุดที่ 1 .....	57
4.13 แสดงการติดตั้งชุดบั้งค้ำทิศทางชุดที่ 1 .....	57
4.14 แสดงชุดกังหันน้ำแบบหลายชั้นที่ติดตั้งสมบูรณ์ .....	57
5.1 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบบั้งค้ำทิศทางคงที่ที่ 0 องศาอัตราการไหล 1020 liter/min	58
5.2 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบบั้งค้ำทิศทางคงที่ที่ 0 องศาอัตราการไหล 1080 liter/min	58
5.3 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบบั้งค้ำทิศทางคงที่ที่ 0 องศาอัตราการไหล 1200 liter/min	59
5.4 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบบั้งค้ำทิศทางคงที่ที่ 10 องศาอัตราการไหล 1020 liter/min	59
5.5 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบบั้งค้ำทิศทางคงที่ที่ 10 องศาอัตราการไหล 1080 liter/min	59
5.6 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบบั้งค้ำทิศทางคงที่ที่ 10 องศาอัตราการไหล 1200 liter/min	60
5.7 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบบั้งค้ำทิศทางคงที่ที่ 20 องศาอัตราการไหล 1020 liter/m	60
5.8 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบบั้งค้ำทิศทางคงที่ที่ 20 องศาอัตราการไหล 1080 liter/m	60
5.9 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบบั้งค้ำทิศทางคงที่ที่ 20 องศาอัตราการไหล 1200 liter/m	61
5.10 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบบั้งค้ำทิศทางคงที่ที่ 30 องศาอัตราการไหล 1020 liter/m	61
5.11 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบบั้งค้ำทิศทางคงที่ที่ 30 องศาอัตราการไหล 1080 liter/m	61
5.12 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบบั้งค้ำทิศทางคงที่ที่ 30 องศาอัตราการไหล 1200 liter/m	62
5.13 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับมุมใบพัดเมื่อมุมใบบั้งค้ำทิศทางคงที่ที่ 0 องศา	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
5.14 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับมุมใบพัดเมื่อมุมใบบังคับทิศทางคงที่ที่ 10 องศา	62
5.15 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับมุมใบพัดเมื่อมุมใบบังคับทิศทางคงที่ที่ 20 องศา	63
5.16 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับมุมใบพัดเมื่อมุมใบบังคับทิศทางคงที่ที่ 30 องศา	63
5.17 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับมุมใบพัดเมื่ออัตราการไหลคงที่ที่ 1020 liter/m	63
5.18 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับมุมใบพัดเมื่ออัตราการไหลคงที่ที่ 1080 liter/m	64
5.19 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับมุมใบพัดเมื่ออัตราการไหลคงที่ที่ 1200 liter/m	64
5.20 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 40 องศา อัตราการไหล 1020 liter/m	65
5.21 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 40 องศา อัตราการไหล 1080 liter/m	65
5.22 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 40 องศา อัตราการไหล 1200 liter/m	65
5.23 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 45 องศา อัตราการไหล 1020 liter/m	66
5.24 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 45 องศา อัตราการไหล 1080 liter/m	66
5.25 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 45 องศา อัตราการไหล 1200 liter/m	66
5.26 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 50 องศา อัตราการไหล 1020 liter/m	67
5.27 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 50 องศา อัตราการไหล 1080 liter/m	67
5.28 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 50 องศา อัตราการไหล 1200 liter/m	67
5.29 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 55 องศา อัตราการไหล 1020 liter/m	68
5.30 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 55 องศา อัตราการไหล 1080 liter/m	68
5.31 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 55 องศา อัตราการไหล 1200 liter/m	68
5.32 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 60 องศา อัตราการไหล 1020 liter/m	69
5.33 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 60 องศา อัตราการไหล 1080 liter/m	69
5.34 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 60 องศา อัตราการไหล 1200 liter/m	69
5.35 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับมุมใบพัดเมื่ออัตราการไหลคงที่ที่ 1020 liter/m	70
5.36 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับมุมใบพัดเมื่ออัตราการไหลคงที่ที่ 1080 liter/m	70
5.37 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับมุมใบพัดเมื่ออัตราการไหลคงที่ที่ 1200 liter/m	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

ในสภาพการณ์ปัจจุบันได้มีการใช้พลังงานกันอย่างมหาศาล โดยเฉพาะพลังงานไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าสามารถสร้างได้จากหลายวิธี โดยการสร้างพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานน้ำเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ซึ่งการแปลงพลังงานของของไหล (Fluid energy) ให้เป็นพลังงานเชิงกล (Mechanical energy) นั้น จำเป็นต้องใช้ระบบกังหัน (Turbine) ในการแปลงพลังงานนี้ แล้วจึงนำพลังงานเชิงกลที่ได้เปลี่ยนมาเป็นพลังงานไฟฟ้าต่อไป ด้วยเหตุนี้จึงได้ทำการศึกษา และวิจัยถึงประสิทธิภาพของกังหันน้ำตามแนวแกนแบบหลายชั้น เพื่อหารูปแบบกังหันที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด

กังหันน้ำแบบหลายชั้นเป็นกังหันน้ำที่มีใบพัดส่วนหมุน (Runner) มากกว่าหนึ่งชุดขึ้นไป ทำให้มีกระบวนการเปลี่ยนพลังงานของของไหลเป็นพลังงานเชิงกลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเหมาะกับการนำมาใช้ควบคู่กับของไหลที่มีอัตราการไหลสูงๆ

ประวัติความเป็นมาของ Kaplan turbine เกิดขึ้นจาก Viktor Kaplan (27 พฤศจิกายน 1876 - 23 สิงหาคม 1934) วิศวกรชาวออสเตรียเป็นผู้ประดิษฐ์กังหันน้ำตามแนวแกน (Kaplan turbine) ในปี 1912 Kaplan turbine เกิดจากการพัฒนา Francis turbine เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ เมื่อทำงานที่ค่าความดัน (head) ต่ำๆซึ่งใน Francis turbine ไม่สามารถทำได้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาการทำงานของกังหันน้ำตามแนวแกนแบบหลายชั้น (Multi Stage Turbine)
2. สร้างใบพัด (Runner) และใบพัดบังคับทิศทาง (Guide Vane)
3. ทดสอบหาประสิทธิภาพกังหันน้ำที่สภาวะต่างๆ
4. ทดสอบ และเก็บข้อมูลสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ทำการทดสอบหาประสิทธิภาพของชุดใบพัดตามแนวแกนแบบหลายชั้น (Multi Stage turbine) แบบติดตั้งชุดใบพัดบังคับทิศทาง (Guide Vane) เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการไหล
  2. ทำการทดสอบหาประสิทธิภาพของชุดใบพัดตามแนวแกนแบบหลายชั้น (Multi Stage turbine) แบบติดตั้งชุดใบพัดบังคับทิศทาง (Guide Vane) เมื่อมีการปรับเปลี่ยนมุมใบพัดบังคับทิศทาง (Guide Vane)
  3. ทำการทดสอบหาประสิทธิภาพของชุดใบพัดตามแนวแกนแบบหลายชั้น (Multi Stage turbine)
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบติดตั้งชุดใบพัดบังคับทิศทาง (Guide Vane) เมื่อมีการปรับเปลี่ยนมุมใบพัด (Runner)

#### 1.4 วิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาลักษณะการทำงานของกังหันน้ำตามแนวแกนแบบหลายชั้น
2. ออกแบบชุดทดลองให้สอดคล้องกับลักษณะการทำงานของกังหันน้ำ
3. ศึกษา และออกแบบแผนอากาศที่เหมาะสม
4. เลือกวัสดุ และทำการสร้างใบพัด (Runner) และใบพัดบังคับทิศทาง (Guide Vane)
5. ประกอบชุดทดสอบเข้าด้วยกัน
6. ทดสอบ และบันทึกผลการทดลอง
7. วิเคราะห์ และวิจารณ์ผลการทดลอง
8. ประเมิน และสรุปผลการวิจัย

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

1. นำชุดทดสอบประสิทธิภาพกังหันน้ำตามแนวแกนแบบหลายชั้น ไปเป็นส่วนหนึ่งในชุดทดลองในรายวิชา Mechanic Laboratory
2. เป็นการเสริมสร้างความเข้าใจในรายวิชา Fluid Mechanics แก่นักศึกษาที่ได้ทำการทดลอง
3. นำความรู้ความเข้าใจในหลักการทำงานของใบพัด (Runner) และใบพัดบังคับทิศทาง (Guide Vane) ไปประยุกต์ใช้กับเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (Gas Turbine Engine) ได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎี

### 2.1 เครื่องจักรกลของไหล

เครื่องจักรกลของไหล (Turbo Machinery) คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงพลังงานของของไหลเป็นพลังงานเชิงกล

เครื่องจักรกลของไหลสามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้ 2 ลักษณะ คือ เครื่องจักรที่ใช้ในการดึงกำลังจากของไหล (เช่น เครื่องกังหันน้ำ, เครื่องกังหันแก๊ส) และเครื่องจักรที่ใช้ในการเพิ่มกำลังให้แก่ของไหล (เช่น เครื่องสูบน้ำ, เครื่องอัดอากาศ) ดังนี้

เครื่องกังหัน (Turbine) เป็นเครื่องจักรที่สามารถผลิตกำลังได้จากการดึงกำลังของของไหลทั้งหมดที่เป็นของเหลว เช่น เครื่องกังหันน้ำ (hydraulic turbine) และแก๊ส เช่น เครื่องกังหันแก๊ส (gas turbine)

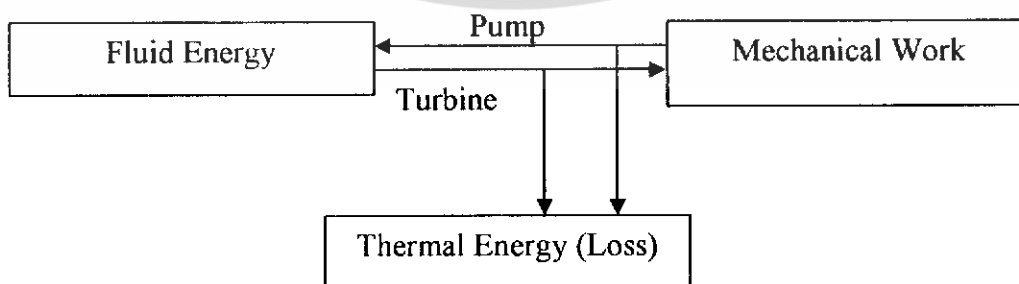
เครื่องสูบน้ำ (Pump) เป็นเครื่องจักรที่ใช้ในการเพิ่มกำลังให้แก่ของเหลว

เครื่องอัดอากาศ (Compressor) เป็นเครื่องจักรที่ใช้ในการเพิ่มกำลังให้แก่ของไหล เช่น อากาศ โดยเครื่องอัดอากาศสามารถเพิ่มความดันให้แก่อากาศได้สูงกว่า 35 psi หรือ 241 kPa

เครื่องเป่าอากาศ (Blower) เป็นเครื่องจักรที่ใช้ในการเพิ่มกำลังให้แก่ของไหล เช่น อากาศ โดยเครื่องเป่าอากาศจะเพิ่มความดันให้แก่อากาศได้ระหว่าง 2 psi – 35 psi หรือ 13.7 kPa – 241 kPa

พัดลม (Fan) เป็นเครื่องจักรที่ใช้ในการเพิ่มกำลังให้แก่ของไหล เช่น อากาศ โดยพัดลมจะผลิตความดันได้ต่ำกว่า 2 psi หรือ 13.7 kPa

หรือหากจะแบ่งชนิดของเครื่องจักรกลของไหลตามลักษณะการไหลของของไหลเข้าสู่เครื่องจักรกลจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดที่ของไหลไหลผ่านตามแนวแกนของใบพัด (axial flow) และชนิดที่ของไหลไหลผ่านตามแนวรัศมีของใบพัด (radial flow)

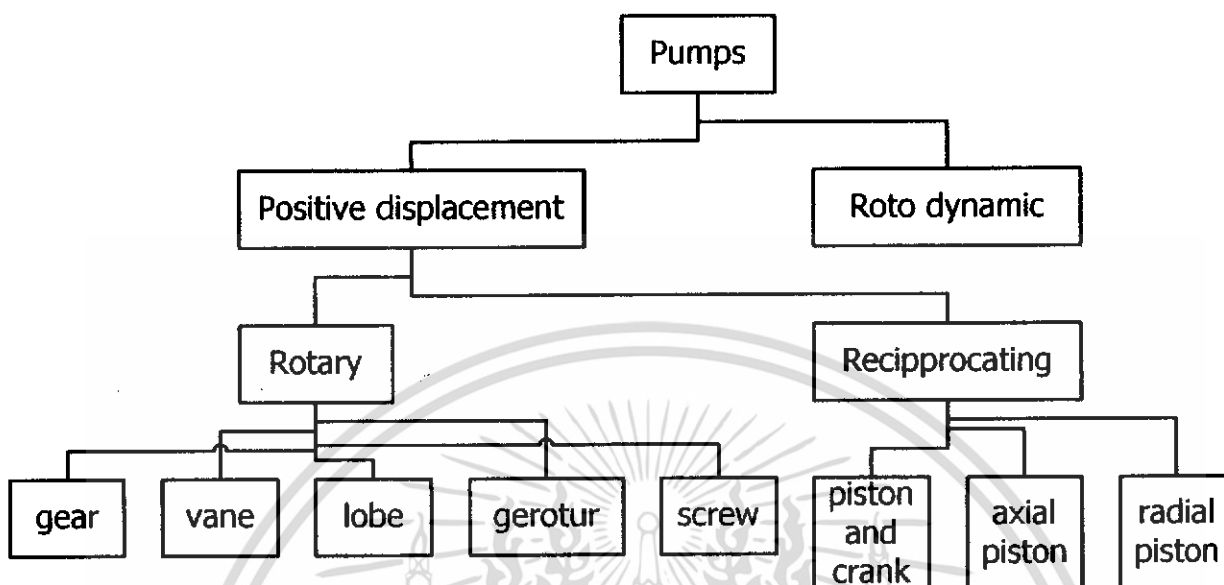


รูปที่ 2.1 แสดงหลักการทำงานของเครื่องจักรกลของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1 เครื่องสูบล

เครื่องสูบล (Pump) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ



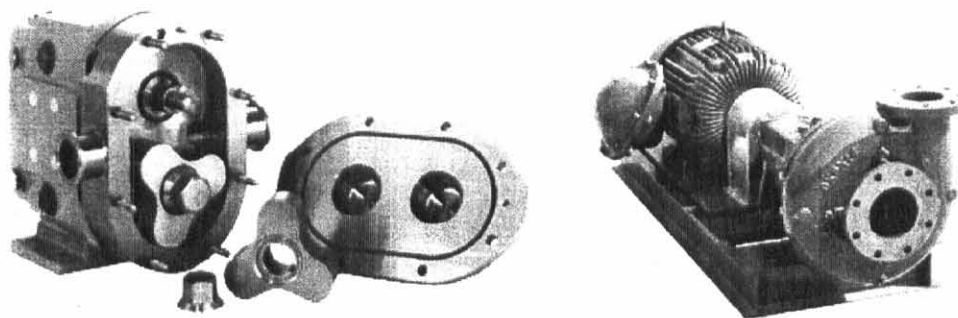
รูปที่ 2.2 แสดงชนิดของเครื่องสูบล

#### 2.1.1.1 โพลีทีพ ดิสเพลสเมนต์ ปั๊ม

โพลีทีพ ดิสเพลสเมนต์ ปั๊ม (Positive displacement pump) ทำงานโดยอาศัยหลักการสอดปริมาตรของเหลวเข้าไปทางท่อดูดแล้วส่งถ่ายผ่านเครื่องสูบลไปยังท่อส่งซึ่งของเหลวจะพุ่งออกไปที่ความดันสูงในปริมาณที่แน่นอน โดยจะพุ่งออกมาที่ท่อส่งทุกๆรอบของการหมุนของเพลลาเครื่องสูบล โดยไม่คำนึงถึงความดันออก ในทางปฏิบัติจะมีการสูญเสีย ที่เกิดจากการไหลย้อนกลับ (รั่ว) ซึ่งจะมีมากเมื่อแรงดันทางท่อส่งเพิ่มขึ้น

#### 2.1.1.2 โรโต ไดนามิก ปั๊ม

โรโตไดนามิก ปั๊ม (Roto dynamic pump) เป็นเครื่องสูบลที่ให้การไหลแบบต่อเนื่องได้รับการออกแบบให้เปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานของไหลโดยอาศัยใบจักรซึ่งหมุนด้วยความเร็วคงที่อัดให้ของไหลมีพลังงานมากขึ้น แล้วไหลผ่านช่องของใบจักรออกทางท่อส่ง ไปสู่ที่สูง หรืออัดเข้าถึงความดัน



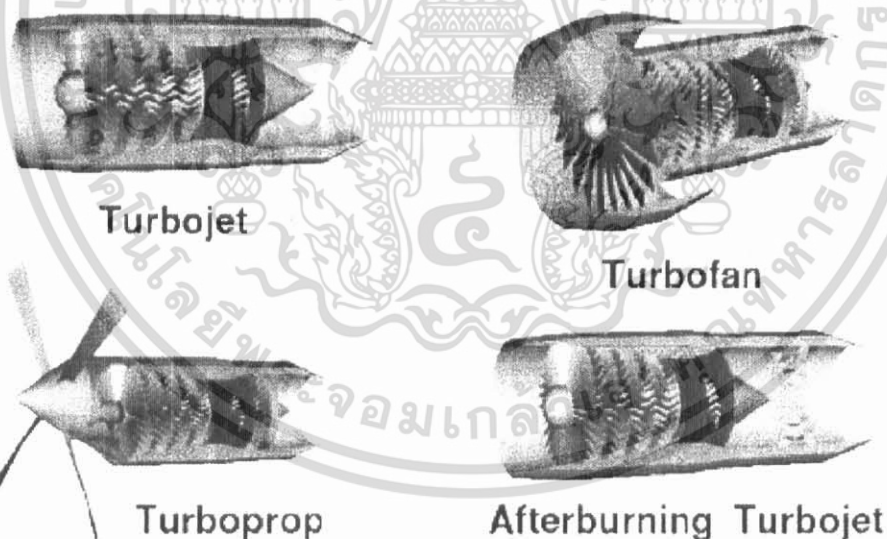
รูปที่ 2.3 แสดงเครื่องสูบ

### 2.1.2 เครื่องกังหัน

เครื่องกังหัน(Turbine) แบ่งตามชนิดของต้นกำลัง ได้ 3 ชนิดดังนี้

#### 2.1.2.1 เครื่องกังหันแก๊ส

เครื่องกังหันแก๊ส(Gas turbine) หรือ เครื่องยนต์แก๊ส (Jet Engine) คือ เป็นการเรียกชื่อโดยรวมทั่วไปของเครื่องยนต์ ซึ่งมีหลักการทำงานพื้นฐานเดียวกัน แต่แตกต่างกันที่ประโยชน์การนำไปใช้ที่เหมาะสมต่างกัน โดยเครื่องยนต์แก๊ส แบ่งประเภทได้ดังนี้คือ เทอร์โบเจ็ท (Turbojet), เทอร์โบแฟน (Turbofan), เทอร์โบพรอพ (Turboprop) และเทอร์โบชาฟท์ (Turbo shaft)



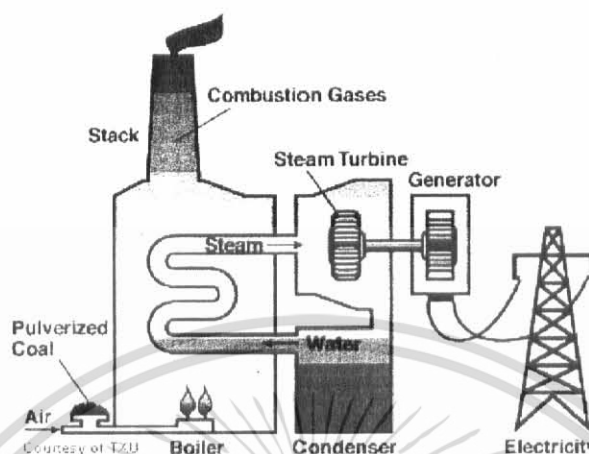
รูปที่ 2.4 แสดงประเภทของเครื่องยนต์กังหันแก๊ส

#### 2.1.2.2 เครื่องกังหันไอน้ำ

เครื่องกังหันไอน้ำ (Steam turbine) เป็นเครื่องยนต์ที่มีต้นกำลังในการขับใบกังหันโดยใช้ไอน้ำที่ได้จากการผ่านBoilerหม้อต้มแล้วจึงส่งเข้าสู่ระบบกังหัน โดยมีเพลาาร่วมต่อกับไดนาโม (Generator) ใ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำที่ผ่านชุดกังหันจะวนเข้ามาผ่านเครื่องควบแน่น (Condenser) เพื่อกลั่นไอน้ำให้เป็นน้ำในสถานะของเหลวแล้วส่งเข้าสู่ระบบอีกต่อไป



รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำ

### 2.1.2.3 เครื่องกังหันน้ำ

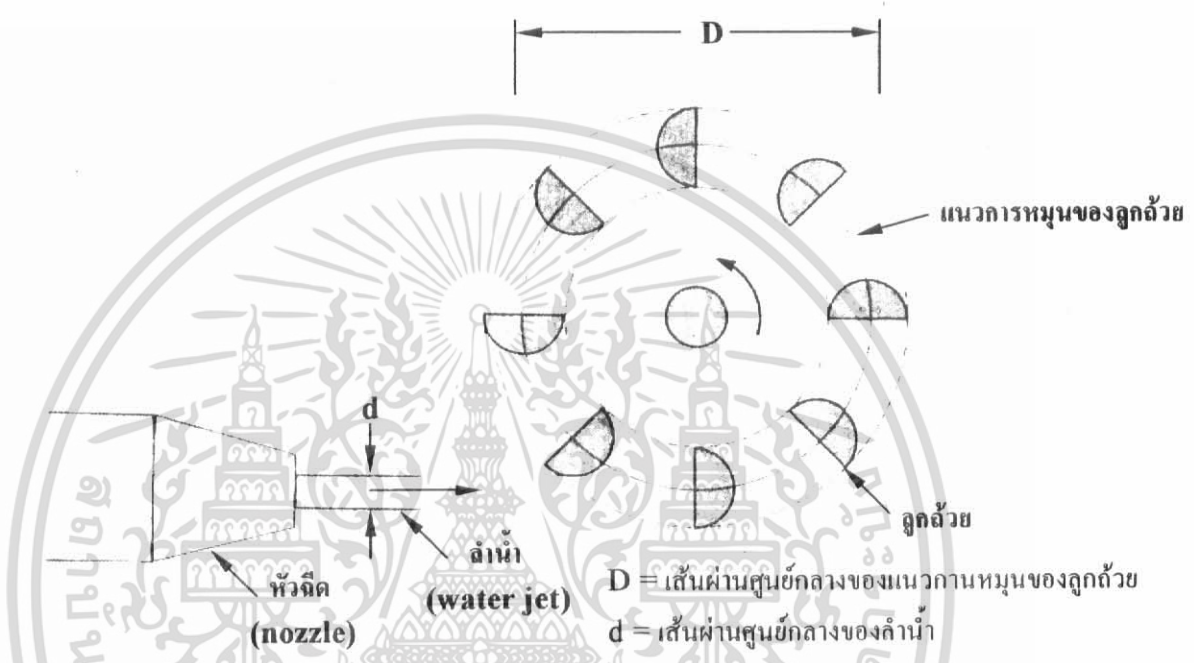
เครื่องกังหันน้ำ (Hydro turbine) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มตามรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของพลังงานซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงจากพลังงานอยู่ในรูปการไหลของน้ำไปเป็นพลังงานกล คือแบ่งออกได้เป็น เครื่องกังหันน้ำชนิดปฏิกิริยา (reaction turbine) และ เครื่องกังหันน้ำชนิดแรงดล (impulse turbine) โดยทั้ง 2 ชนิดนี้น้ำจะไหลผ่านใบพัดในแนวสัมผัส การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของน้ำในแนวสัมผัสกับใบพัดจะทำให้เกิดแรงกระทำในแนวสัมผัสกับใบพัด ส่งผลให้เกิดแรงบิดกระทำต่อใบพัด เมื่อใบพัดหมุนก็จะได้ออกกำลังจากเครื่องกังหันน้ำ

สำหรับเครื่องกังหันชนิดรีแอกชันนั้นความดันสถิต (static pressure) ของน้ำจะมีความลดลงเมื่อไหลผ่านใบพัด แต่ในกรณีของเครื่องกังหันชนิดแรงดลจะไม่เปลี่ยนแปลงความดันสถิตในระหว่างที่น้ำไหลเข้าปะทะกับใบพัด

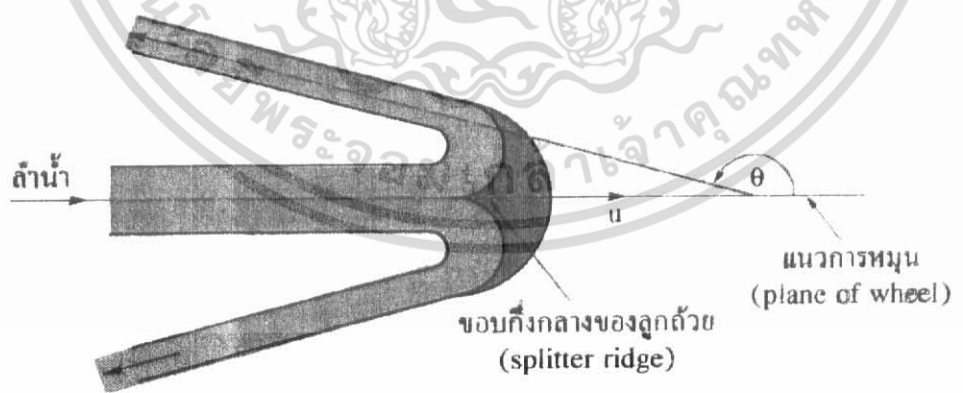
เครื่องกังหันน้ำทำหน้าที่แปลงพลังงานศักย์ของน้ำให้เป็นงานเชิงกลแบ่งตามแรงกระทำได้ 2 ประเภท ดังนี้

- I. เครื่องกังหันน้ำชนิดแรงดลจะเปลี่ยนรูปพลังงานจากการไหลทั้งหมดเป็นพลังงานจลน์ของลำน้ำ ก่อนที่จะพุ่งเข้าปะทะกับลูกถ้วย (bucket) การเปลี่ยนรูปของพลังงานศักย์เป็นพลังงานจลน์เกิดขึ้นได้ด้วยการให้น้ำไหลผ่านหัวฉีด โดยความดันที่กระทำต่อลำน้ำทั้งก่อนและหลังจากกระทบกับลูกถ้วยแล้วมีค่าเท่ากัน ดังนั้นในบางครั้งจึงเรียกเครื่องกังหันชนิดนี้ว่า เครื่องกังหันน้ำชนิดความดันคงตัว ความดันที่กระทำต่อลำน้ำที่ทางเข้าและทางออกของลูกถ้วยจะมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ นั่นคือ  $P_1 = P_2 = P_{atm} = 101.3 \text{ kPa}$  เครื่องกังหันน้ำชนิดแรงดลจะใช้งานได้ดีภายใต้สภาวะการทำงานที่เสถียรสูงและอัตราการไหลต่ำ โดยเสถียรของแหล่งน้ำควรมีค่าระหว่าง 600-2000 m
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 2.6 แสดงลักษณะการทำงานของเครื่องกังหันน้ำชนิดเพลตัน ส่วนรูป 2.7 แสดงภาพตัดขวางของลูกถ้วยที่ยึดติดอยู่กับเพลลาซึ่งหมุนรอบแกน โดยเครื่องกังหันน้ำชนิดแรงดลนี้สามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เครื่องกังหันน้ำชนิดเพลตัน เนื่องจากในปี ค.ศ. 1880 วิศวกรชาวอเมริกันชื่อ เลสเตอร์ เอ. เพลตัน (Lester A. Pelton) ได้พัฒนาเครื่องกังหันน้ำชนิดแรงดลซึ่งมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายให้สามารถทำงานภายใต้เสดสูง ๆ ได้ ซึ่งลูกถ้วยครึ่งทรงกลม (ดังรูป 2.7) ควรมีจำนวนอยู่ระหว่าง 18-22 ลูกถ้วย แต่ไม่ควรต่ำกว่า 15 ลูกถ้วย



รูปที่ 2.6 ลักษณะการทำงานของกังหันน้ำชนิดเพลตัน (Pelton turbine)



รูปที่ 2.7 ภาพตัดขวางของลูกถ้วยรูป

จากรูป 2.6 น้ำจะพุ่งออกจากหัวฉีดเข้าปะทะกับลูกถ้วยในแนวกึ่งกลางของแนวการหมุนของลูกถ้วย โดยหัวฉีดจะเป็นส่วนที่ยึดติดอยู่กับทางเข้าของน้ำซึ่งสามารถปรับอัตราการไหลให้เหมาะสมกับการผลิตกำลังได้ และจากรูป 2.7 ซึ่งแสดงภาพตัดขวางของลูกถ้วย พบว่าลูกถ้วยจะมีลักษณะเป็นครึ่งเอกซารินเป็นเอกซารินที่สวางไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติเห็นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรงกลม 2 ชั้นเพื่อลำนํ้าหลังจากพุ่งเข้าปะทะแล้วสามารถที่จะไหลย้อนกลับในทิศทางเดิมได้ ทำให้แรงปะทะมีค่าเพิ่มขึ้น

ลูกถ้วยที่ใช้ในเครื่องกังหันน้ำชนิดนี้จะทำจากเหล็กพืดสำหรับการทำงานภายใต้เสดที่ไม่สูงมาก และทำจากเหล็กหรือสัมฤทธิ์สำหรับการทำงานภายใต้เสดสูง ๆ โดยพื้นผิวของลูกถ้วยจะต้องมีความเรียบลื่น

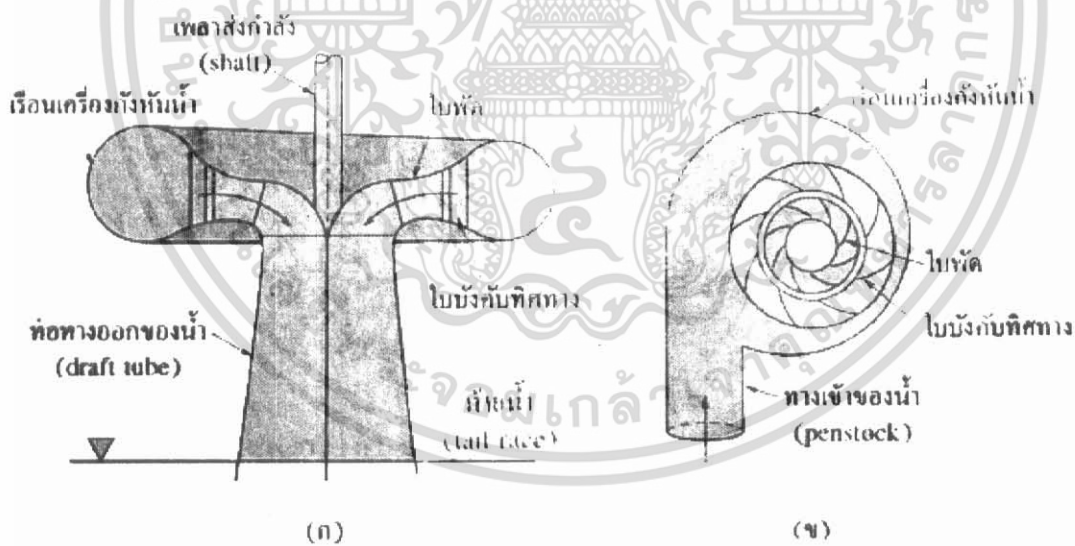
2. เครื่องกังหันน้ำชนิดปฏิบัติการไหลในเครื่องกังหันน้ำชนิดรีแอกชันสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ

1. การไหลผ่านตามแนวแกน (axial flow) นํ้าที่ไหลเข้าเครื่องกังหันน้ำมีทิศทางการไหลที่ขนานกับแกนหมุนของเครื่องกังหันน้ำ

2. การไหลผ่านตามแนวรัศมี (radial flow) นํ้าที่ไหลเข้าเครื่องกังหันน้ำมีทิศทางการไหลที่ตั้งฉากกับแกนหมุนของเครื่องกังหันน้ำ

3. การไหลแบบผสม (mixed flow) นํ้าที่ไหลเข้าเครื่องกังหันน้ำมีทิศทางการไหลที่ผสมกันระหว่างการไหลตั้งฉากและไหลขนานกับแกนหมุนของเครื่องกังหันน้ำ

โดยเครื่องกังหันน้ำชนิดรีแอกชันที่มีการใช้งานกันส่วนใหญ่จะเป็นชนิดที่ของไหลผ่านตามแนวแกนและไหลแบบผสม เครื่องกังหันน้ำชนิดรีแอกชันมีส่วนประกอบสำคัญดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องกังหันน้ำชนิดปฏิบัติการ

1. เรือเครื่องกังหันน้ำ เป็นช่องทางที่น้ำไหลผ่าน โดยจะมีพื้นที่หน้าตัดค่อยๆเรียวเล็กลง ทำหน้าที่ให้นํ้าที่ไหลเข้าสู่ใบพัดมีความเร็วในแนวสัมผัสเท่ากันทุกจุด

2. ชุดใบบังคับทิศทาง (guide vane) เมื่อนํ้าไหลผ่านเรือเครื่องสูบน้ำ ก่อนที่จะไหลเข้าสู่ใบพัดจะถูกบังคับทิศทางการไหลด้วยใบบังคับทิศทางซึ่งสามารถปรับมุมได้ตามต้องการ โดยการปรับเอกสกรีนเป็นเอกสกรีนที่ส่งแรงไว้สำหรับการเชิงในเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่อนักผู้ดูแลเห็นไปเซปประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมของใบบังคับทิศทางน้ำทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกับโมเมนตัมที่ทางเข้า ซึ่งจะส่งผลต่อกำลังที่ได้จากเครื่องกังหันน้ำ ประโยชน์อีกอย่างหนึ่งของชุดใบบังคับทิศทางคือสามารถเป็นแผ่นปิดไม่ให้ของไหลไหลเข้าสู่ชุดใบพัดของเครื่องกังหันน้ำได้ในกรณีเกิดเหตุฉุกเฉิน

3. ใบพัด เป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของเครื่องกังหันน้ำ โดยใบพัดจะประกอบด้วยชุดของใบพัดโค้ง เมื่อของไหลไหลผ่านชุดใบพัดจะทำให้เกิดโมเมนตัมเชิงมุมลดลงและทำให้เกิดแรงบิดที่แกนหมุน

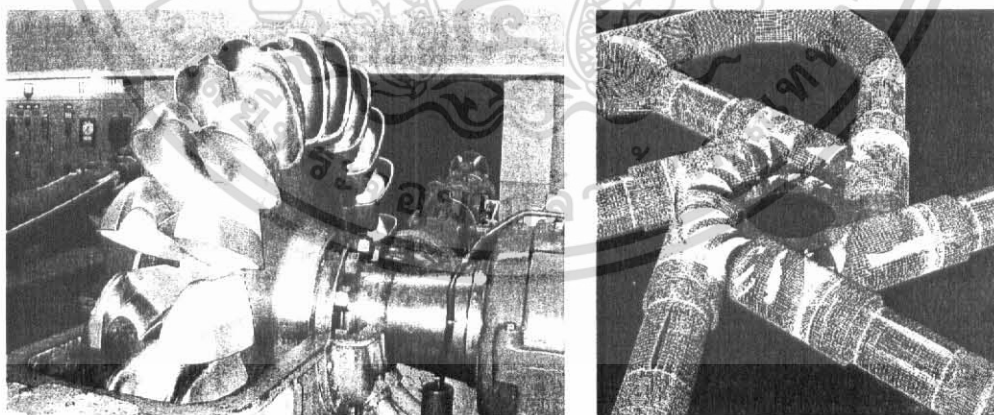
4. ท่อทางออกของน้ำ เป็นช่องทางปิดที่มีพื้นที่หน้าตัดค่อย ๆ ขยายออกเพื่อลดพลังงานจลน์ของน้ำที่ไหลออกจากเครื่องกังหันน้ำ เพราะเมื่อพื้นที่หน้าตัดใหญ่ขึ้นความเร็วของน้ำก็จะลดลง ซึ่งจะส่งผลให้พลังงานจลน์มีค่าลดลงนั่นเอง โดยพลังงานจลน์ของของไหลที่ลดลงจะเปลี่ยนเป็นการเพิ่มของพลังงานในรูปความดันก่อนที่น้ำจะไหลออกสู่ท้ายน้ำ

เครื่องกังหันน้ำชนิดปฏิกริยามักจะใช้งานกับเขตหรือความสูงของแหล่งน้ำที่มีค่าตั้งแต่ 3-600 m โดยในช่วงความสูง 40-80 m จะใช้เครื่องกังหันน้ำชนิดแคปแลน และช่วงความสูง 80-600 m จะใช้เครื่องกังหันน้ำ ฟรานซิส

## 2.2 เครื่องกังหันน้ำ

### 2.2.1 เครื่องกังหันเพลตัน

กังหันเพลตัน (Pelton wheel) เป็น กังหันน้ำแบบแรงดล ที่ปรกติใช้กับหัวน้ำสูงกว่า 150 ft. เป็นชนิดที่ใช้อัตราไหลของน้ำค่อนข้างต่ำ ปรับความเร็วน้ำโดยใช้หัวฉีด (nozzle) ถ้วย (bucket) บนกงล้อจะมีกะบัง (splatter) ทำหน้าที่เบี่ยงเบนน้ำออกเป็นสองข้างเพื่อลดแรงดันในแนวแกน (axial thrust) ของกงล้อ กังหันเพลตันมีประสิทธิภาพในการแปลงรูปพลังงานได้สูง ในช่วงอัตราไหลของน้ำที่กว้าง

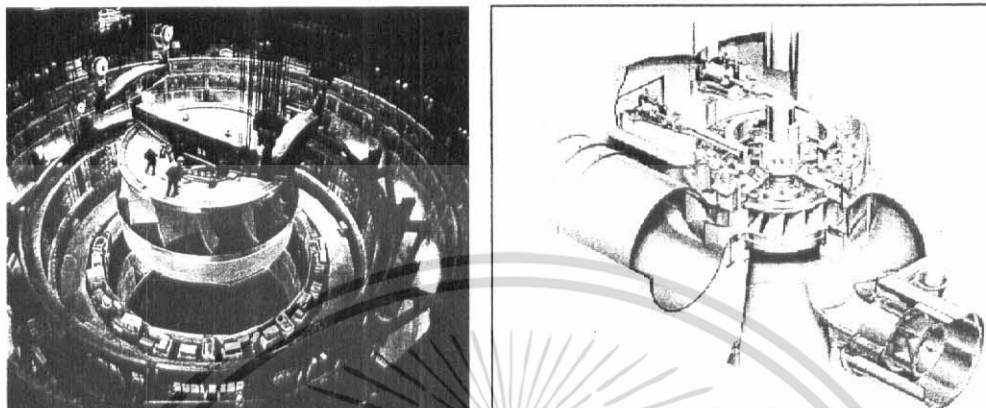


รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะกังหันน้ำแบบเพลตัน

### 2.2.2 เครื่องกังหันฟรานซิส

เครื่องกังหันน้ำชนิดฟรานซิส เป็นเครื่องกังหันน้ำชนิดปฏิกริยาที่คิดค้นขึ้นโดยวิศวกรชาวอเมริกันชื่อ เจมส์ บี. ฟรานซิส (James B. Francis, ค.ศ. 1815-1892) ในปี ค.ศ. 1849 โดยเครื่องกังหันน้ำชนิดนี้ จะมีการไหลแบบผสม คือที่ทางเข้าจะเป็นการไหลในแนวรัศมีและการไหลในแนวแกนที่ทางออกผสมกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

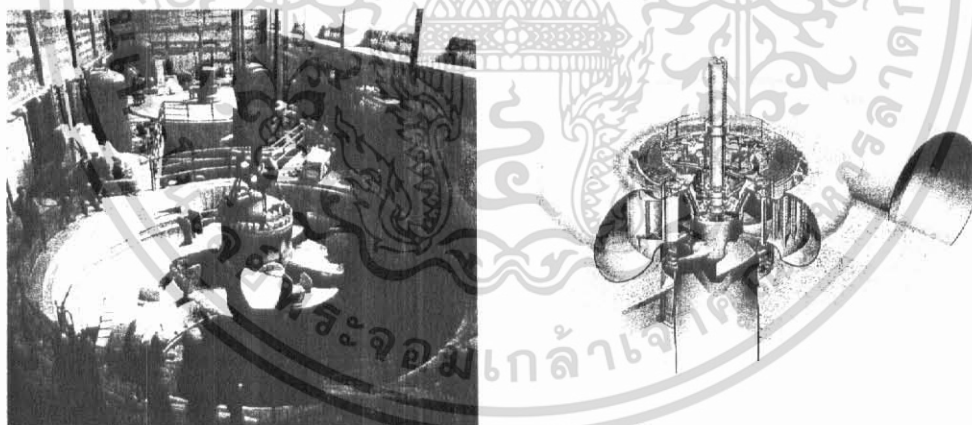
เครื่องกังหันฟรานซิส (Francis turbine) เป็นเครื่องกังหันน้ำแบบที่ใช้แพร่หลาย เป็นชนิดไหลผสมในแนวรัศมี (radial, mixed-flow turbine) ใช้สำหรับความสูงหัวน้ำปานกลาง (15 ถึง 1500 ft.) มีประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้งานเต็มภาระ แต่จะมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำเมื่อใช้งานที่ภาระต่ำ



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะเครื่องกังหันน้ำแบบฟรานซิส

### 2.2.3 เครื่องกังหันแคปตัน

เครื่องกังหันแคปตัน (Kaplan turbine) เป็นเครื่องกังหันแบบใบพัดที่ใบพัดปรับมุมได้ ทำให้สามารถปรับมุมใบพัดให้ได้ ประสิทธิภาพสูง แม้ว่าทำงานที่สภาพภาระต่ำ



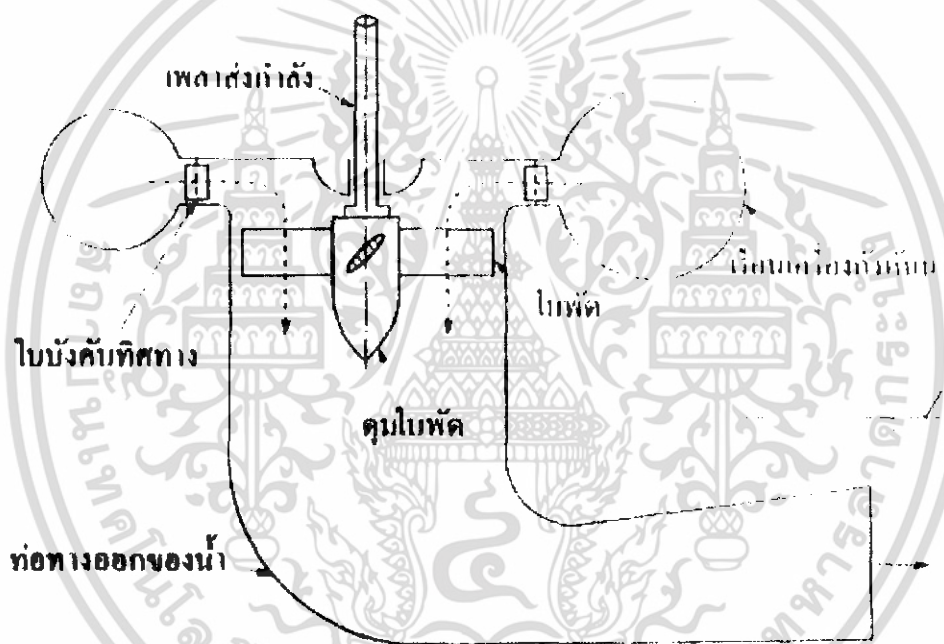
รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะเครื่องกังหันน้ำแบบแคปตัน

เครื่องกังหันน้ำชนิดโพรเพลเลอร์ (propeller turbine) มีการไหลของน้ำเข้าสู่เครื่องกังหันน้ำแบบไหลผ่านตามแนวแกน เหมาะสำหรับการทำงานภายใต้เสดของแหล่งจ่ายน้ำที่ไม่สูงมากนัก คือไม่มากกว่า 30 m แต่สามารถทำงานกับอัตราการไหลของน้ำที่สูงได้ ใบพัดของเครื่องกังหันชนิดนี้จะยึดติดกับแกนหมุน ทำให้ไม่สามารถปรับเปลี่ยนมุมของใบพัดได้ตามสภาวะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป โดยเครื่องกังหันน้ำจะทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุดภายใต้สภาวะการทำงานเต็มที่ (full load) และประสิทธิภาพจะลดลงหากทำงานภายใต้สภาวะที่เปลี่ยนแปลงไป

เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ ไม่รับผิดชอบต่อการใช้งานที่ไม่ถูกต้อง หรือการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อมา วิกเตอร์ แคปแลน (Victor Kaplan) นักประดิษฐ์ชาวออสเตรียได้คิดปรับปรุงให้ใบพัดของเครื่องกังหันน้ำชนิดโพรเพลเลอร์สามารถปรับมุมของใบพัดได้ เพื่อให้เหมาะสมกับสภาวะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไปได้อย่างเหมาะสม ทำให้การทำงานเกิดประสิทธิภาพสูงสุดได้ในสภาวะการทำงานที่กว้างขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดชื่อเรียกเครื่องกังหันน้ำชนิดโพรเพลเลอร์ที่ปรับมุมของใบพัดได้เสียใหม่ว่า เครื่องกังหันน้ำชนิดแคปแลน

ส่วนประกอบหลักของเครื่องกังหันน้ำชนิดแคปแลน คือ ใบพัด เรือนกังหันน้ำ ใบบังคับทิศทางและท่อทางออกของน้ำ ซึ่งก็ไม่ได้แตกต่างไปจากส่วนประกอบหลักของเครื่องกังหันน้ำชนิดฟรานซิส เมื่อน้ำไหลเข้าสู่ใบบังคับทิศทางน้ำจะไหลตั้งฉากกับแกนหมุน แต่เมื่อน้ำไหลเข้าสู่ใบพัดน้ำจะมีการไหลตามแนวแกนหมุนดังรูป 2.12



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบหลักของเครื่องกังหันน้ำชนิดแคปแลน

จำนวนใบพัดของเครื่องกังหันน้ำชนิดแคปแลนจะอยู่ระหว่าง 3-6 ใบ ซึ่งใบพัดจะทำจากเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมและยึดติดอยู่กับคุมใบพัด (hub) เครื่องกังหันน้ำชนิดแคปแลนนี้สามารถทำงานที่สภาวะสูงกว่าสภาวะทำงานเต็มที่ได้ถึง 15-20% โดยการเปลี่ยนมุมของใบพัดจะทำให้โคแองแกรมความเร็วของน้ำที่ไหลเข้าและไหลออกจากใบพัดเปลี่ยนแปลงไป รูป 2.13 แสดงลักษณะของมุมใบพัดเมื่อทำงานเต็มที่และทำงานเพียงบางส่วน (part load)

อัตราส่วนการทำงานที่สำคัญ

1.  $n$  คืออัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคุมใบพัดต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n = \frac{d}{D} \quad (2.1)$$

- เมื่อ  $d$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคุมใบพัด มีหน่วย m  
 $D$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของใบพัด มีหน่วย m

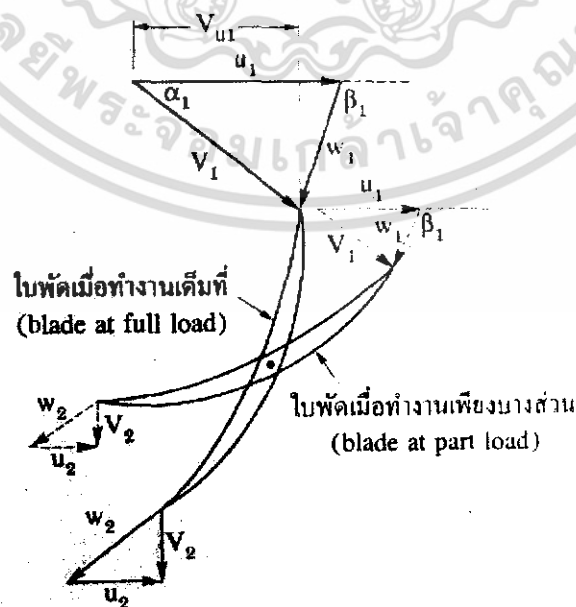
2. อัตราการไหลของน้ำเข้าสู่เครื่องกังหันน้ำคำนวณได้จาก

$$Q = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \psi \sqrt{2gH} \quad (2.2)$$

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 (1 - n^2) \psi \sqrt{2gH} \quad (2.3)$$

- เมื่อ  $Q$  = อัตราการไหลของน้ำเข้าสู่เครื่องกังหัน มีหน่วย  $m^3/s$   
 $\psi$  = อัตราส่วนการไหล มีค่าประมาณ 0.70  
 $H$  = ความสูงของแหล่งน้ำที่จ่ายให้แก่เครื่องกังหันน้ำ มีหน่วย m  
 $n$  = อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง มีค่าประมาณ 0.35-0.6

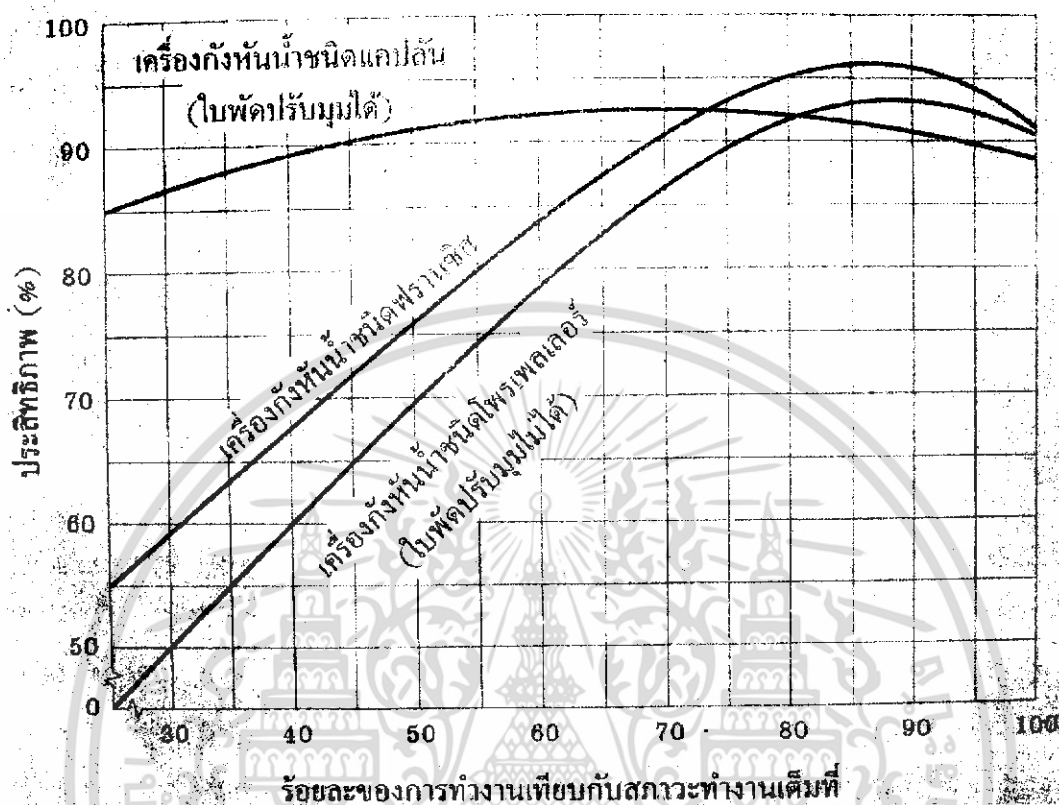
ความเร็วของใบพัด  $u$  จำเปลี่ยนแปลงไปตามรัศมีของตำแหน่งที่ต้องการหาความเร็ว จากจุดศูนย์กลางของใบพัดซึ่งจะมีความเร็วสูงสุด โดย  $u = \frac{\pi DN}{60}$  เมื่อ  $N$  เป็นความเร็วรอบ มีหน่วย rpm



รูปที่ 2.13 ลักษณะของมุมใบพัดเมื่อทำงานเต็มที่และทำงานเพียงบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เช่าเห็นใบเซอร์ใบอนุญาตการดำเนินงาน  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพของเครื่องกังหันน้ำชนิดโพรเพลเลอร์เมื่อทำงานภายใต้สภาวะทำงานเพียงบางส่วนจะมีค่าต่ำกว่าทั้งเครื่องกังหันน้ำชนิดฟรานซิสและแคปแลนดังแสดงในรูป 2.14



รูปที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการทำงานกับประสิทธิภาพของเครื่องกังหันน้ำชนิดปฏิบัติการ

จากกราฟในรูป 2.14 จะเห็นว่าเครื่องกังหันน้ำชนิดโพรเพลเลอร์มีประสิทธิภาพการทำงานที่ต่ำกว่าเครื่องกังหันน้ำชนิดอื่น ๆ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเกิดการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ที่ทางเข้าของใบพัด (เกิดการไหลแบบ shock) ซึ่งแคปแลนก็ได้คิดปรับปรุงให้ใบพัดสามารถหมุนได้รอบจุดของตัวเองเพื่อให้การไหลของน้ำเข้าสู่ทางเข้าของใบพัดไม่เกิดการไหลแบบปั่นป่วน ส่งผลให้ประสิทธิภาพมีค่าสูงสำหรับช่วงการทำงานที่กว้างขึ้นดังรูป 2.14

### 2.3 คำจำกัดความที่สำคัญ

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทำความเข้าใจให้ตรงกันถึงคำจำกัดความที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณของเครื่องจักรของไหล

เฮดสถิต (static head,  $h$ ) คือ ความแตกต่างระหว่างความสูงระหว่างแหล่งน้ำด้านบนกับแหล่งน้ำด้านล่างซึ่งเป็นบริเวณหรือตำแหน่งที่ต้องการใช้น้ำ โดยสามารถแบ่งเฮดสถิตออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เฮดสถิตด้านดูด (suction head,  $h_s$ ) คือ ระดับความสูงจากผิวหน้าของแหล่งน้ำด้านล่างมายังกึ่งกลางของท่อทางเข้าสู่เรือนเครื่องสูบน้ำ

2. เฮดสถิตด้านส่ง (delivery head,  $h_d$ ) คือ ระดับความสูงจากกึ่งกลางของท่อทางออกจากตัวเรือนเครื่องสูบน้ำไปยังผิวหน้าของแหล่งน้ำด้านบน

โดยสามารถเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$h = h_s + h_d \quad (2.4)$$

เมื่อ  $h$  = เฮดสถิต มีหน่วย  $m$   
 $h_s$  = เฮดสถิตด้านดูด มีหน่วย  $m$   
 $h_d$  = เฮดสถิตด้านส่ง มีหน่วย  $m$

ในกรณีของเครื่องกั้นน้ำก็เช่นเดียวกัน นั่นคือ เฮดสถิตจะหมายถึงความสูงที่แตกต่างกันของระดับน้ำของแหล่งน้ำด้านบน (เช่น เขื่อน) กับระดับน้ำด้านล่างที่ท้ายน้ำ

เฮดสุทธิ

เฮดสุทธิ (net head,  $h_{net}$ ) คือ ค่าถึงในรูปของความสูงของน้ำ โดยในกรณีของเครื่องกั้นน้ำนั้น เฮดสุทธิคือค่าถึงในรูปความสูงของน้ำที่สามารถนำไปหมุนกังหันน้ำได้ ส่วนในกรณีของเครื่องสูบน้ำ เฮดสุทธิคือค่าถึงในรูปความสูงของน้ำที่เครื่องสูบน้ำต้องให้แก่้ำเพื่อให้สามารถส่งน้ำในอัตราการไหลที่กำหนดขึ้นไปได้สูงตามต้องการ

เฮดแมนอเมตริก

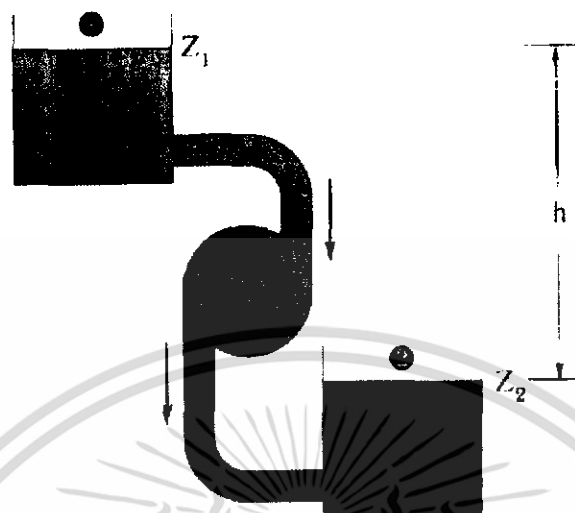
เฮดแมนอเมตริก (manometric head,  $h_m$ ) คือ เฮดจริงที่เครื่องสูบน้ำให้แก่้ำ โดยมักจะมีค่าต่ำกว่าเฮดทางทฤษฎีที่เครื่องสูบน้ำควรจะทำให้ การวัดค่า  $h_m$  สามารถวัดได้โดยการติดตั้งเกจวัดความดันไว้ที่ท่อด้านส่ง (วัดค่า  $P_{OUT}$ ) และท่อทางเข้า (วัดค่า  $P_{IN}$ ) จากเครื่องสูบน้ำ หลังจากนั้นจึงแปลงค่าที่อ่านได้จากความดันให้เป็นเฮดด้วยความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$h_m = \frac{P_{OUT} - P_{IN}}{\rho g} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $h_m$  = เฮดแมนอเมตริก มีหน่วย  $h_m$   
 $\rho$  = ความหนาแน่นของน้ำ มีหน่วย  $kg/m^3$   
 $P_{OUT}, P_{IN}$  = ความดันที่อ่านได้จากเกจ มีหน่วย  $N/m^2$  หรือ  $Pa$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 หลักการทำงานและการคำนวณภาระเบื้องต้นของเครื่องกังหันน้ำ



รูปที่ 2.15 ลักษณะการทำงานของเครื่องกังหันน้ำ

จากรูปเป็นการแสดงหลักการทำงานอย่างง่ายของเครื่องกังหันน้ำ คือ มีแหล่งน้ำขนาดใหญ่ที่มีตำแหน่งผิวหน้าของน้ำอยู่สูงกว่าแหล่งน้ำที่อยู่ด้านล่าง ทำการต่อท่อจากแหล่งน้ำด้านบนมายังเครื่องกังหันน้ำ และที่ทางออกของเครื่องกังหันน้ำต่อต่อไปยังแหล่งน้ำด้านล่าง ในขณะที่น้ำอยู่ในแหล่งน้ำด้านบนน้ำจะมีพลังงานศักย์ และเมื่อน้ำไหลลงมาพลังงานศักย์จะแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ เนื่องจากน้ำมีการไหลอย่างต่อเนื่องทำให้พลังงานจลน์เปลี่ยนรูปเป็นกำลังที่สามารถนำไปหมุนใบพัดของเครื่องกังหันน้ำและนำกำลังที่ได้ไปใช้งานต่างๆ ได้ตามต้องการ

สามารถเขียนสมการแสดงพลังงานทั่วไประหว่างหน้าตัด (1) และ (2) ได้ดังนี้

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} - h_T - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (2.6)$$

- เมื่อ
- $P_1$  = ความดันอากาศที่กระทำต่อผิวหน้าของน้ำที่หน้าตัด (1) มีหน่วย  $Pa$  (gage)
  - $P_2$  = ความดันอากาศที่กระทำต่อผิวหน้าของน้ำที่หน้าตัด (2) มีหน่วย  $Pa$  (gage)
  - $Z_1$  = ความสูงของน้ำที่หน้าตัด (1) มีหน่วย  $m$
  - $Z_2$  = ความสูงของน้ำที่หน้าตัด (2) มีหน่วย  $m$
  - $V_1$  = ความเร็วการลดลงของผิวน้ำที่หน้าตัด (1) มีหน่วย  $m/s$
  - $V_2$  = ความเร็วการลดลงของผิวน้ำที่หน้าตัด (2) มีหน่วย  $m/s$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(หากแหล่งน้ำที่ด้านบนหรือตำแหน่ง (1) และด้านล่างหรือตำแหน่ง (2) มีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางท่อส่งน้ำเกิน 10 เท่า จะสามารถพิจารณาให้ค่า  $V_1$  และ  $V_2$  เท่ากับ 0 ได้)

$h_T$  = พลังงานที่เครื่องกังหันน้ำได้รับ โดยอยู่ในรูปความสูงของน้ำ มีหน่วย  $m$

$h_L$  = พลังงานสูญเสียของการไหล โดยอยู่ในรูปความสูงของน้ำ มีหน่วย  $m$

$\gamma$  = น้ำหนักจำเพาะของน้ำ มีหน่วย  $N/m^3$

จากสมการข้างต้น จักรูปสมการใหม่ให้อยู่ในรูปของตัวแปร  $h_T$  ได้ดังนี้

$$h_T = \left( \frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma} \right) + (Z_1 - Z_2) + \left( \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \right) - h_L \quad (2.7)$$

พลังงานที่เครื่องกังหันน้ำได้รับอยู่ในรูปของความสูงตั้งสมการข้างต้น นี้เป็นพลังงานต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก ( $N \cdot m / N = m$ ) หากต้องการเปลี่ยนเป็นกำลังที่เครื่องกังหันน้ำได้รับ (หรือกำลังที่เครื่องกังหันน้ำผลิตได้) สามารถทำได้จากสมการต่อไปนี้

$$OP_T = \gamma Q h_T = T \omega \quad (2.8)$$

เมื่อ  $OP_T$  = กำลังที่ผลิตโดยเครื่องกังหันน้ำ มีหน่วย  $W$

$\gamma$  = น้ำหนักจำเพาะของน้ำ มีหน่วย  $N/m^3$

$Q$  = อัตราการไหลของน้ำมีหน่วย  $m^3/s$

$h_T$  = พลังงานที่เครื่องกังหันน้ำได้รับ โดยอยู่ในรูปความสูงของน้ำ มีหน่วย  $m$

โดยกำลังที่ได้นี้เป็นกำลังกรณีที่เครื่องกังหันน้ำมีประสิทธิภาพ 100% หรือเป็นกำลังทางทฤษฎี ในกรณีที่เครื่องกังหันน้ำมีประสิทธิภาพต่ำกว่า 100% จะสามารถคำนวณหา กำลังที่ผลิตได้จริงจากสมการต่อไปนี้

$$\eta_T = \frac{OP_{T,act}}{OP_{T,the}} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\eta_T$  = ประสิทธิภาพของเครื่องกังหันน้ำ (ประสิทธิภาพรวม) ไม่มีหน่วย

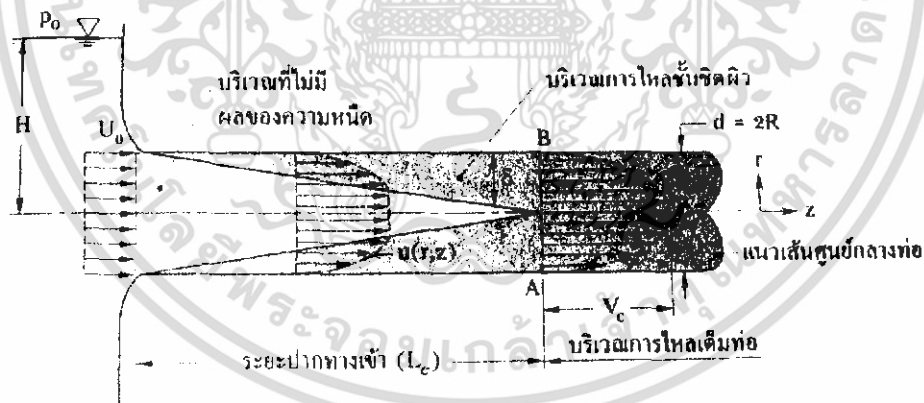
$OP_{T,the}$  = กำลังทางทฤษฎีที่เครื่องกังหันน้ำผลิตได้ มีหน่วย  $W$

$OP_{T,act}$  = กำลังที่เครื่องกังหันน้ำผลิตได้จริง มีหน่วย  $W$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 การไหลในท่อ

การไหลภายในท่อจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้นั้นต้องมีความดันที่แตกต่างระหว่างจุดทั้งสองของไหลจึงจะสามารถไหลผ่านท่อไปได้ รูป 2.16 เป็นการไหลเข้าท่อด้วยความเร็วคงตัว  $U_0$  ผลของความหนืดบริเวณใกล้กับผนังท่อจะเกิดความต้านทานต่อการไหล ทำให้เกิดชั้นขีดยาวในบริเวณใกล้กับผนังท่อนั้นภายใต้ข้อสมมติฐานที่ว่าไม่มีการกั้นไหลที่ผนังท่อ ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งตามความยาวท่อในบริเวณใกล้ๆทางเข้าท่อนั้นพบว่าความเร็วเปลี่ยนแปลงกับระยะทางที่วัดในแนวตั้งฉากกับผนังท่อ และเกิดความเค้นเฉือนกระทำต่อของไหลในทิศตรงข้ามกับการไหล และในบริเวณนี้ยังพบโปรไฟล์ความเร็วเปลี่ยนแปลงในทิศการไหลอีกด้วย บริเวณดังกล่าวนี้เรียกว่า บริเวณปากทางเข้า (entrance region) เมื่อของไหลไหลผ่านท่อในช่วงต่อไป ชั้นขีดยาวจะพัฒนาจนความหนาชั้นขีดยาว ( $\delta$ ) เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงแนวเส้นศูนย์กลางท่อ สำหรับบริเวณที่อยู่ภายนอกบริเวณการไหลชั้นขีดยาวจะเป็นบริเวณที่ไม่มีผลของความหนืด (in viscous core) ในบริเวณปากทางเข้านั้นการกระจายความเร็วเปลี่ยนแปลงกับระยะตามพิกัด  $r$  และระยะในทิศทางการไหลตามพิกัด  $z$  ( $u = u(r, z)$ ) เมื่อของไหลไหลผ่านบริเวณปากทางเข้าความเร็วจะไม่ขึ้นกับระยะทางในทิศการไหล แต่ความเร็วจะขึ้นกับพิกัด  $r$  เท่านั้น การไหลบริเวณนี้เรียกว่า บริเวณการไหลเต็มท่อ (fully developed region) และพบว่าการกระจายความเร็วที่หน้าตัดของท่อที่ตำแหน่งใดๆตามความยาวท่อนั้นจะเป็นฟังก์ชันของระยะตามพิกัด  $r$  เท่านั้น  $u = u(r)$  ทำให้โปรไฟล์ความเร็วไม่เปลี่ยนแปลงตามทิศทางการไหลในบริเวณการไหลเต็มท่อนี้



รูปที่ 2.16 แสดงบริเวณทางเข้าและบริเวณการไหลเต็มท่อสำหรับการไหลภายในท่อ

### 2.5.1 เลขเรย์โนลด์ส

วิศวกรชาวอังกฤษชื่อออสบอร์นเรย์โนลด์ส (Osborne Reynolds, 1842-1912) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงการไหลภายในท่อแบบราบเรียบไปสู่การไหลแบบปั่นป่วน จากผลการทดลองเขาค้นพบตัวแปรไร้มิติค่าหนึ่งซึ่งก็คือ อัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยต่อแรงเนื่องจากความหนืดของของไหล อัตราส่วนนี้เรียกว่า เลขเรย์โนลด์ (Reynolds number,  $Re$ ) ซึ่งมีผลต่อลักษณะการไหลของของไหล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ 72207 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวคือ เมื่อของไหลมีความเร็วต่ำจะได้เลขเรย์โนลด์ส์ต่ำ ถ้าของไหลมีความเร็วสูงขึ้นก็จะได้เลขเรย์โนลด์ส์ที่สูงขึ้นเช่นกัน

สำหรับการไหลที่มีความหนืด  $\mu$  และความหนาแน่น  $\rho$  ไหลผ่านแผ่นระนาบที่มีความยาว  $l$  ด้วยความเร็วสม่ำเสมอ  $V$  แรงเนื่องจากความหนืด ( $F_V$ ) ที่กระทำต่อของไหล และแรงเฉื่อยของของไหล ( $F_I$ ) คำนวณได้จาก

$$F_V = \{\text{ความเค้นเฉือนเนื่องจากผลของความหนืด}\} \times \{\text{พื้นที่}\} \\ = \left(\frac{\mu V}{l}\right)(l^2) = \mu V l \quad (2.10)$$

$$F_I = \{\text{ความดันพลวัต (dynamic pressure)}\} \times \{\text{พื้นที่}\} \\ = (\rho V^2)(l^2) = \rho V^2 l^2 \quad (2.11)$$

ดังนั้น

$$\text{Re} = \frac{F_I}{F_V} = \frac{\rho V^2 l}{\mu V} \\ \text{Re} = \frac{\rho V l}{\mu} \quad (2.12)$$

ในที่นี้  $l$  คือความยาวบ่งลักษณะเฉพาะ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการไหล ถ้าการไหลเป็นแบบท่อมแผ่นระนาบ  $l$  คือความยาวของแผ่นระนาบที่วัดในทิศทางการไหล ถ้าเป็นการไหลในท่อ  $l$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อ ถ้าเป็นการไหลขวางท่อมแท่งทรงกระบอก  $l$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของแท่งทรงกระบอก

### 2.5.2 เลขออยเลอร์

นักคณิตศาสตร์ชาวสวิสชื่อเลออนฮาร์ด ออยเลอร์ (Leonhard Euler, 1707-1783) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับการไหล โดยทำการทดลองผลของความแตกต่างระหว่างความดันของของไหล ( $\Delta p$ ) ต่อแรงเฉื่อยของของไหล ( $F_I$ ) อัตราส่วนระหว่างแรงเนื่องจากความแตกต่างของความดันต่อแรงเฉื่อยของของไหลนี้เรียกว่า เลขออยเลอร์ (Euler number, Eu) ในสนามการไหลหนึ่ง กำหนดความแตกต่างของความดันเป็น  $\Delta p$  ของไหลมีความหนาแน่น  $\rho$  มีความเร็ว  $V$  และมีความยาวบ่งลักษณะเฉพาะ  $l$  โดยแรงเนื่องจากผลต่างของความดัน ( $F_p$ ) และแรงเฉื่อย ( $F_I$ ) พิจารณาจาก

$$F_p = \{\text{ความแตกต่างความดัน}\} \times \{\text{พื้นที่}\} \\ = (\Delta p) l^2 \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน  $F_p = \rho V^2 l^2$  เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$Eu = \frac{F_p}{F_t} = \frac{(\Delta p)l^2}{\rho V^2 l^2}$$

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho V^2} \quad (2.14)$$

### 2.5.3 ความเร็วจำเพาะของเครื่องกังหันน้ำ

ตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งของเครื่องกังหันน้ำคือ ความเร็วจำเพาะ (specific speed,  $N_s$ ) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดคุณลักษณะต่าง ๆ ของเครื่องกังหันน้ำในการออกแบบ โดยมีความสัมพันธ์กับตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

$$N_s = \frac{N\sqrt{OP}}{H^{5/4}} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $N_s$  = ความเร็วจำเพาะ  
 $N$  = ความเร็วรอบ มีหน่วย rpm  
 $OP$  = กำลัง มีหน่วย kW  
 $H$  = เสดใช้งาน มีหน่วย m

โดยค่าของความเร็วจำเพาะสำหรับเครื่องกังหันน้ำชนิดต่าง ๆ แสดงในตาราง 2.1 ต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความเร็วจำเพาะของเครื่องกังหันแต่ละชนิด

ชนิดของเครื่องกังหันน้ำ	ช่วงของความเร็วจำเพาะที่เหมาะสม
เครื่องกังหันน้ำชนิดเพลตัน (ลำน้ำเดี่ยว)	8.5-3.0
เครื่องกังหันน้ำชนิดเพลตัน (หลายลำน้ำ)	30-50
เครื่องกังหันน้ำชนิดฟรานซิส ( $H < 370$ m)	50-340
เครื่องกังหันน้ำชนิดแคลป์ตัน ( $H < 60$ m)	250-1025

ครีเกอร์ (Creager) และจัสติน (Justin) ได้แนะนำค่าความเร็วจำเพาะที่เขียนอยู่ในรูปของความสัมพันธ์กับเสดใช้งานดังนี้

1. สำหรับเครื่องกังหันน้ำชนิดฟรานซิส

$$N_s = \frac{22200}{3.28H + 32} + 83.5 \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. สำหรับเครื่องกังหันน้ำชนิดแคปลัน

$$N_s = \frac{30800}{3.28H + 32} + 154 \quad (2.17)$$

ค่าความเร็วเฉพาะของเครื่องแปรตามเสดสามารถหาได้จากการศึกษาการออกแบบเครื่องกังหันน้ำในอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังนี้

### 1. สำหรับเครื่องกังหันน้ำชนิดฟรานซิส

$$N_s = 1750H^{-0.51} \quad (2.18)$$

### 2. สำหรับเครื่องกังหันน้ำชนิดแคปลัน

$$N_s = 1377H^{-0.33} \quad (2.19)$$

## 2.5.4 ระยะปากทางเข้า

ระยะปากทางเข้า (Fully developed flow) คือผลจากความหนืดของของไหลทำให้บริเวณปากทางเข้ามีการไหลที่ไม่เต็มท่อ จึงทำให้เกิดบริเวณการไหลชั้นขีดผิวภายในท่อ ดังรูป 2.16 ขณะของไหลไหลเข้าไปในท่อ ชั้นขีดผิวจะพัฒนาไปตามความยาวท่อและความหนาชั้นขีดผิวจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงแนวเส้นศูนย์กลางของท่อ ระยะที่วัดจากปากทางเข้าท่อจนถึงจุดนี้เรียกว่า ระยะปากทางเข้า (Entrance length,  $L_e$ ) ซึ่งถ้าของไหลเคลื่อนที่เลยบริเวณปากทางเข้านี้ของไหลจะไหลเต็มท่อ ในบริเวณการไหลเต็มท่อพบว่า

$$\frac{dv_c}{dz} = 0 \quad (\text{การไหลแบบราบเรียบเต็มท่อ}) \quad (2.20)$$

$$\frac{dv_z}{dz} = 0 \quad (\text{การไหลแบบปั่นป่วนเต็มท่อ}) \quad (2.21)$$

สำหรับระยะปากทางเข้า ( $L_e$ ) จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยต่อแรงเนื่องจากความหนืด (เลขเรย์โนลด์,  $Re$ ) โดยพิจารณาจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

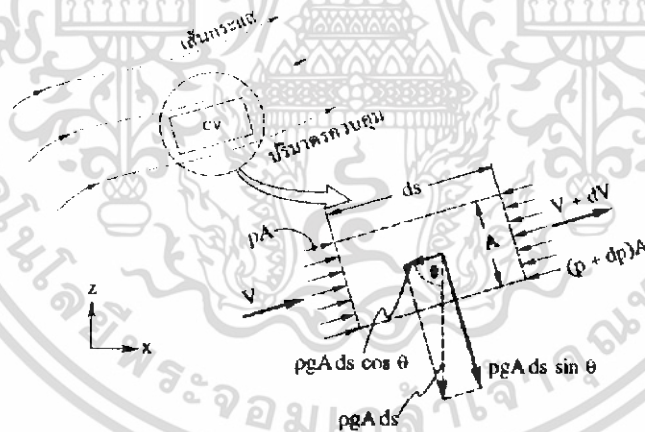
$$\frac{L_e}{D} = 0.06 Re \quad \text{สำหรับการไหลแบบราบเรียบ} \quad (2.22)$$

$$\frac{L_e}{D} = 4.4 Re^{1/6} \quad \text{สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน} \quad (2.23)$$

### 2.5.5 สมการแบร์นูลลี

สมการแบร์นูลลี (Bernoulli equation) คือสมการพลังงานกลสำหรับการไหลไปตามเส้นกระแสซึ่งบ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างเสดความดัน เสดความเร็ว และเสดระดับความสูง ภายในสนามการไหล ภายใต้สมมติฐานดังต่อไปนี้

1. ไม่คำนึงถึงผลของความหนืด จึงไม่คิดผลของความเสียดทาน
2. เป็นการไหลในสภาวะคงตัว
3. เป็นการไหลหยุดตัวไม่ได้
4. พิจารณาปริมาตรควบคุมตามเส้นกระแส
5. ของไหลมีความเร็วสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดการไหล



รูปที่ 2.17 การวิเคราะห์พลังงานจากปริมาตรควบคุมย่อยขนานกับเส้นกระแส

พิจารณาปริมาตรควบคุมย่อยขนานกับเส้นกระแสดังรูป 2.17 ความเร็วทุกๆตำแหน่งบนเส้นกระแสจะมีทิศทางอยู่ในแนวเส้นสัมผัส และจะไม่มีกรไหลขวางข้ามกระแสในสนามการไหล พิจารณาการเคลื่อนที่ของของไหลที่มีปริมาตร  $dQ = A ds$  ในทิศทางการไหล  $s$  จากสมการการเคลื่อนที่ จะได้

$$F'_S + F'_B = \frac{\partial \dot{Y}}{\partial t} \int_{CV} \rho V p dQ + \int_{CV} \rho V p V^2 - n dA$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[pA - (p + dp)A] - \rho g A ds \cos \theta = (V + dV)\rho VA - V\rho VA$$

$$-dp - \rho g ds \cos \theta = \rho V dV$$

$$\frac{1}{\rho} dp + V dV + g dz = 0 \quad (2.24)$$

โดยที่  $dz = ds \cos \theta$

อินทิเกรตสมการข้างต้นได้

$$\int \frac{1}{\rho} dp + \frac{1}{2} V^2 + gz = C \quad (2.25)$$

โดยที่  $C$  เป็นค่าคงตัว

เมื่อ ค่า  $\rho$  เป็นค่าคงตัวจะได้ว่า

$$p + \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho gz = \text{ค่าคงตัว} \quad (2.26)$$

หรือ

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z = \text{ค่าคงตัว} \quad (2.27)$$

หรือ

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (2.28)$$

ในที่นี้

$$\frac{p}{\rho g}$$

เรียกว่าเสดความดัน (Pressure head) มีหน่วยเป็นเมตรของไหล

$$\frac{V^2}{2g}$$

เรียกว่าเสดความเร็ว (Velocity head) มีหน่วยเป็นเมตรของไหล

$$z$$

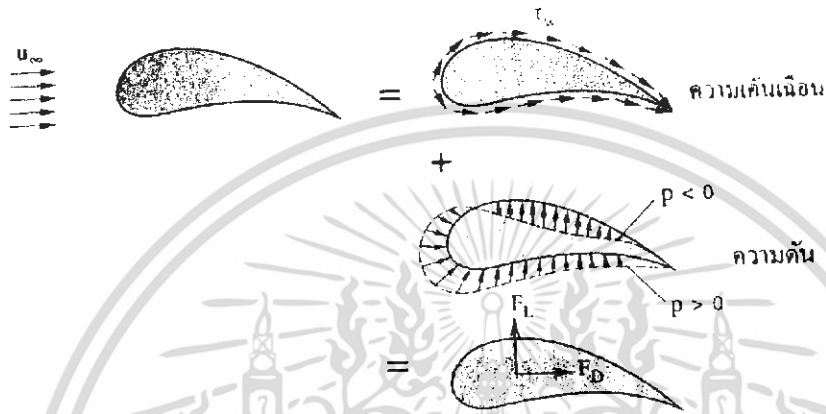
เรียกว่าเสดระดับความสูง (Elevation head) มีหน่วยเป็นเมตรของไหล

$$\text{สมการแบร์นูลลี : } \frac{v_1^2}{2} + gz_1 + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + h_{Loss} \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

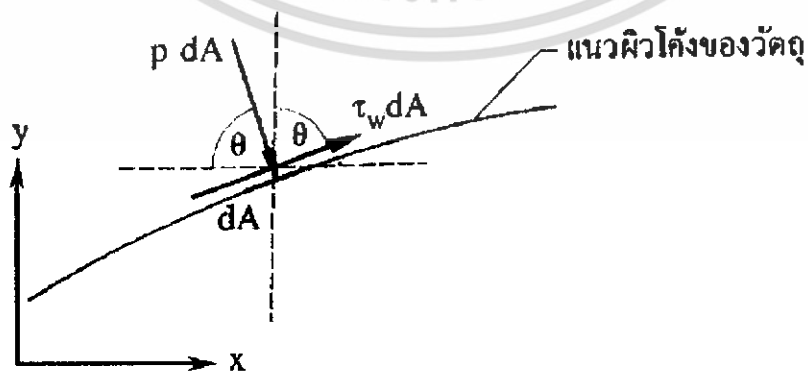
## 2.6 Lift and Drag

เมื่อของไหลมีการไหลผ่านพื้นที่ผิวโค้ง จะเกิดแรงปฏิกิริยากระทำต่อวัตถุโดยของไหลดังกล่าวในรูปของความเค้นซึ่งได้แก่ความเค้นเฉือนที่ผิววัตถุ ( $\tau_w$ ) อันเป็นผลมาจากความหนืดของของไหลที่สัมผัส และความเค้นตั้งฉากซึ่งเป็นผลมาจากความดันกระทำที่ผิวโค้งนั้น พิจารณาตัวอย่างการกระจายความเค้นเฉือนและความดันบนผิวโค้ง ดังรูป 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงแรงกระทำต่อวัตถุผิวโค้ง

พิจารณาการไหลของของไหลผ่านแพนอากาศ (airfoil) จะทำให้เกิดความเค้นเฉือนไปตามผิวแพนอากาศ นอกจากนี้ การติดตั้งแพนอากาศในตำแหน่งของมุมปะทะที่เหมาะสมจะทำให้ของไหลเหนือผิวโค้งเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าของไหลใต้ผิวโค้ง จึงทำให้ความดันที่กระทำต่อผิวโค้งด้านบนต่ำกว่าความดันที่กระทำต่อผิวโค้งด้านล่างของแพนอากาศ ผลต่างระหว่างความดันที่เกิดขึ้นทำให้เกิดแรงยก (Lifting force) กระทำต่อแพนอากาศ ผลการกระจายความเค้นเฉือนและความดันบนผิวของวัตถุดังกล่าวจะทำให้เกิดแรงจุด (Drag,  $F_D$ ) และแรงยก (Lift,  $F_L$ ) กระทำต่อวัตถุ



รูปที่ 2.19 แสดง แรงเฉือนและแรงดันบนพื้นที่ย่อย  $dA$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงย่อยลัพธ์บนแกน x

$$dF_x = p dA \cos \theta + \tau_w dA \sin \theta \quad (2.30)$$

แรงย่อยลัพธ์บนแกน y

$$dF_y = -p dA \sin \theta + \tau_w dA \cos \theta \quad (2.31)$$

ดังนั้นแรงกด ( $F_D$ ) และแรงยก ( $F_L$ ) หาได้จาก

$$F_D = \int dF_x = \int_A p \cos \theta dA + \int_A \tau_w \sin \theta dA \quad (2.32)$$

$$F_L = \int dF_y = -\int_A p \sin \theta dA + \int_A \tau_w \cos \theta dA \quad (2.33)$$

นอกจากนี้ จะพิจารณาแรงกดและแรงยกในพจน์ของสัมประสิทธิ์การกด,  $C_D$  และสัมประสิทธิ์การยก,  $C_L$  โดยเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho u_{\infty}^2 A} \quad (2.34)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho u_{\infty}^2 A} \quad (2.35)$$

ในที่นี้  $A$  คือ พื้นที่บ่งลักษณะเฉพาะของวัตถุ อาจเลือกตากรูปแบบอย่างใดอย่างหนึ่งในพื้นที่ 3 รูปแบบดังนี้

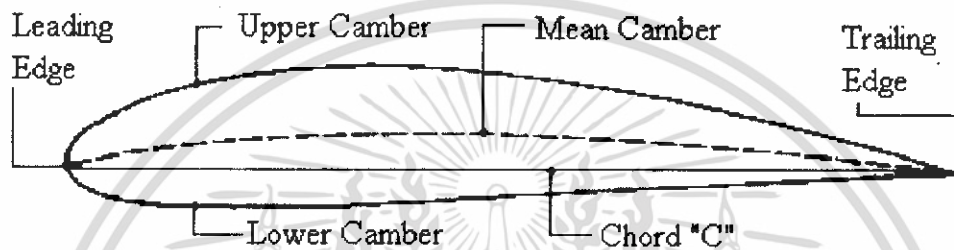
1. พื้นที่ฉายด้านหน้า (Frontal area) เป็นพื้นที่ฉายซึ่งมองในทิศทางการไหล  $U_{\infty}$  นิยมใช้กับวัตถุที่มีรูปทรงหนาทึบ
2. พื้นที่ขนานกับทิศทางการไหล (Planform area) เป็นพื้นที่ของวัตถุที่ฉายลงบนระนาบใดระนาบหนึ่งซึ่งขนานกับทิศทางการไหล นิยมใช้กับวัตถุที่มีรูปร่างค่อนข้างแบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. พื้นที่ผิวเปียก (Wetted surface area) เป็นพื้นที่ของวัตถุที่ผิวยื่นออกมาสัมผัสของไหล นิยมใช้กับพื้นผิวผสม (Compound surface)

## 2.7 ทฤษฎีแพนอากาศ

แพนอากาศ (Airfoil) จะถูกนิยามเป็นวัตถุที่มีรูปร่างเพรียวตามกระแสการไหลซึ่งออกแบบเพื่อทำให้เกิดแรงยกขึ้น วัตถุรูปร่างอื่นที่ทำให้เกิดแรงยกนอกเหนือจากแพนอากาศจะได้แก่แผ่น hydrofoil หรือแผ่นคัตโค้ง เป็นต้น รูป 2.13 แสดงถึงรูปร่างของแพนอากาศ



รูปที่ 2.20 แสดงถึงส่วนประกอบของแพนอากาศ

ส่วนประกอบของแพนอากาศมีดังนี้

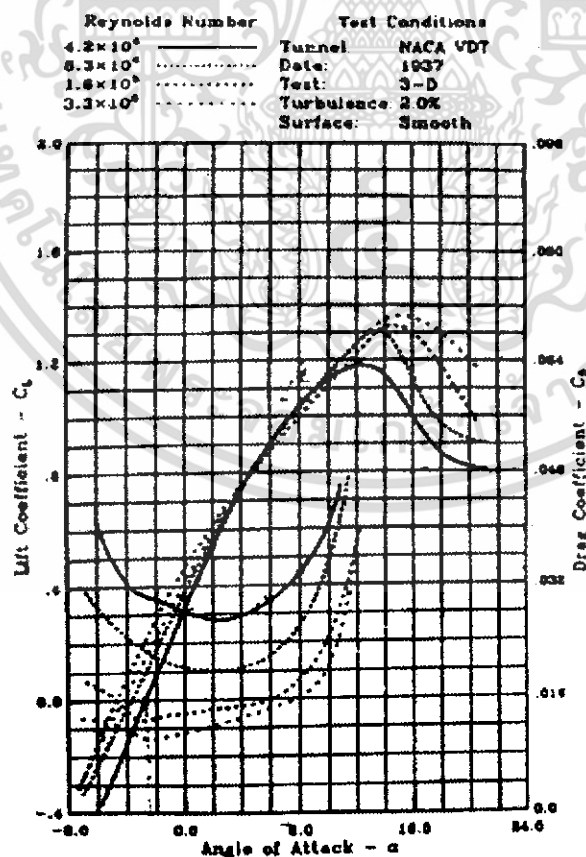
ขอบด้านหน้า (leading edge)	คือ ส่วนขอบหรือสันด้านหน้าของแพนอากาศที่หันเข้าหาการไหล
ขอบปลายด้านหลัง (trailing edge)	คือ ส่วนปลายด้านหลังของแพนอากาศ
เส้นคอร์ด (chord line)	คือ เส้นที่ลากเชื่อมระหว่างขอบด้านหน้าไปถึงขอบปลายด้านหลังในแนวเส้นตรง โดยมีขนาดความยาวเท่ากับค่าคอร์ด $c$
เส้นแคมเบอร์ (camber line)	คือ เส้นแบ่งครึ่งรูปของแพนอากาศโดยลากจากขอบด้านหน้าไปถึงขอบปลายด้านหลัง
ระยะแคมเบอร์ (camber)	คือ ค่าระยะห่างมากที่สุดระหว่างเส้นแคมเบอร์กับเส้นคอร์ด
เส้นที่ให้ค่าแรงยกเป็นศูนย์	คือ เส้นบนแพนอากาศที่เมื่อไหลเคลื่อนที่เข้าหาแพน (zero lift line) อากาศในแนวเส้นดังกล่าวจะไม่มีค่าแรงยกเกิดขึ้น
มุมปะทะ (angle of attack)	คือ มุมที่เกิดขึ้นระหว่างทิศของการไหลสัมพัทธ์ของของไหลกับเส้นคอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแพนอากาศเคลื่อนที่ผ่านของไหล หรือของไหลไหลผ่านแพนอากาศที่มีมุมปะทะค่าหนึ่ง ของไหลจะแยกเคลื่อนที่ผ่านผิวด้านบนและด้านล่างของแพนอากาศ ก่อให้เกิดชั้นขอบเขตชั้นบนผิวของแพนอากาศ ทั้งทางด้านบนและด้านล่าง หากมุมปะทะมีค่าเป็นบวกและยังมีค่าไม่สูงถึงค่าที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์แรงยกขึ้น ของไหลจะเคลื่อนที่ตามผิวด้านบนของแพนอากาศด้วยความเร็วสูงกว่าผิวด้านล่างของแพนอากาศ ทำให้ความดันที่ผิวด้านล่างของแพนอากาศมีค่าสูงกว่าความดันที่ผิวด้านบนของแพนอากาศ ผลลัพธ์ของความดันที่แตกต่างระหว่างผิวทั้งสองด้านของแพนอากาศจะทำให้เกิดเป็นแรงกระทำต่อแพนอากาศ และแรงดังกล่าวที่อยู่ในทิศที่ตั้งฉากกับการไหลจะถูกเรียกว่า แรงยก L แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบนผิวทั้งสองด้านของแพนอากาศซึ่งเกิดขึ้นจากความเค้นเฉือนที่ผิว และแรงจากค่าความดันแตกต่างที่อยู่ในทิศที่ขนานกับการไหลจะถูกเรียกว่าแรงหน่วง D

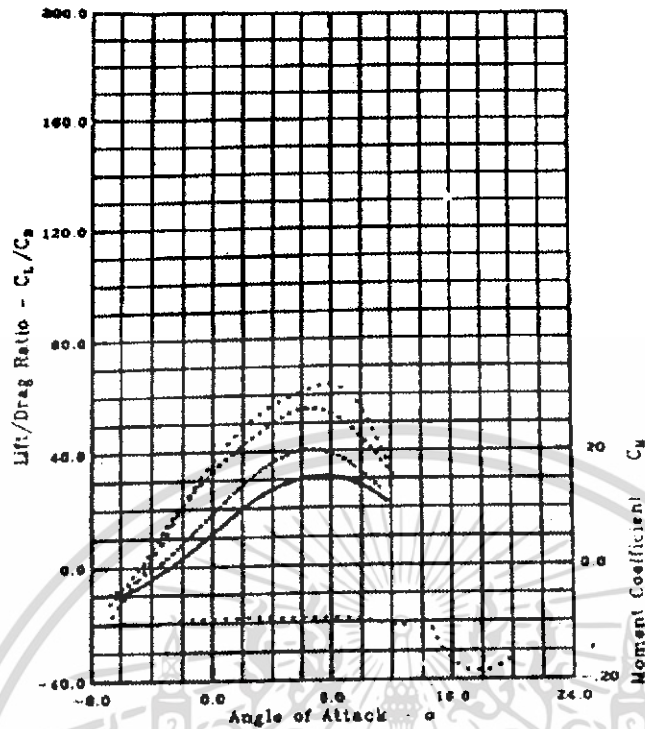
ค่าแรงยกและแรงหน่วง จะได้จากการทดสอบแพนอากาศดังกล่าวในอุโมงค์ลม ซึ่งมักจะแสดงค่าแรงยกและแรงหน่วงอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์แรงยก  $C_L$  และสัมประสิทธิ์แรงหน่วง  $C_D$

ข้อมูลที่เป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงที่ได้จากการทดลองมักจะถูกแสดงอยู่ในรูปกราฟที่แปรตามค่ามุมปะทะ ดังรูป 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงของรูปแพนอากาศ NACA 4415 ที่

แปรตามมุมปะทะ ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่างกัน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงของแพนอากาศที่แสดงอยู่บนกราฟเดียวกัน

จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกค่าสัมประสิทธิ์แรงยกจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่ามุมปะทะที่เพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกจะมีค่าสูงสุดที่ค่ามุมปะทะค่าหนึ่ง และก็จะเริ่มลดลง สาเหตุของการลดลงอย่างฉับพลันของค่าสัมประสิทธิ์แรงยกก็คือ การเกิดปรากฏการณ์การแยกชั้น ซึ่งจะส่งผลเกิดการไหลย้อนกลับบนผิวด้านบนของแพนอากาศ ทำให้ค่าแรงยกลดลงและยังทำให้เกิดแรงหน่วงจากค่าความดันแตกต่างจากปรากฏการณ์การแยกชั้น ส่งผลค่าสัมประสิทธิ์แรงหน่วงเพิ่มขึ้นอย่างมากและรวดเร็ว ปรากฏการณ์การลดลงอย่างฉับพลันของแรงยก และมีการเพิ่มของแรงหน่วงอย่างมากนี้จะถูกเรียกว่า การเกิด stall เมื่อมุมปะทะเพิ่มขึ้นอีก จุดที่เกิดการแยกจะเคลื่อนตัวไปด้านหน้าของแพนอากาศ และก่อให้เกิดการไหลย้อนกลับในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้เกิดลำอากาศด้านหลังแพนอากาศมีสภาพเป็น wake ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจะทำให้แรงยกยังมีค่าลดลง และแรงหน่วงยังมีค่ามากขึ้น จะเห็นได้จากค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงในรูป 2.21 และรูป 2.22 จะแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงที่เขียนอยู่บนกราฟเดียวกัน ซึ่งบางครั้งอาจเรียกว่า Polar plot

### 2.7.1 ชนิดของแพนอากาศ

#### แพนอากาศเอชคิว

แพนอากาศเอชคิว (HQ airfoil) จุดศูนย์กลางของแพนอากาศเอชคิว สามารถเลื่อนมาด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้มาก โดยที่ยังมีความเสถียรที่ดี มักสร้างปีกโดยใช้โมล ชื่อของแพนอากาศเอชคิวตัวเลขชุดแรกบอกค่าเส้นโค้ง (Camber) ตัวเลขชุดต่อมาบอกค่าความหนา

**แพนอากาศนาซาจีเอ(ดับเบิลยู)**

แพนอากาศนาซาจีเอ(ดับเบิลยู) (NASA GA (W) airfoil) สามารถทำงานที่เลขเรย์โนลด์ส์ต่ำได้ดีให้แรงยกที่สูงในขณะที่เดียวกันแรงต้านก็สูงมากด้วย

**แพนอากาศอาร์จี**

แพนอากาศอาร์จี (RG Airfoil) เป็นแพนอากาศที่มีเป้าหมายเดียวกับแพนอากาศเอชคิวอาร์จี เมื่อเปรียบเทียบกับแพนอากาศเอชคิวเมื่อความหนามีขนาดเท่ากันแพนอากาศอาร์จีจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าเล็กน้อย แต่มีสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag coefficient) ใกล้เคียงกัน

**แพนอากาศแอโรสเปเชียล**

แพนอากาศแอโรสเปเชียล (Aerospatiale airfoil) มีลักษณะเหมือนแพนอากาศนาซาจีเอ(ดับเบิลยู) มีค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุดถึง 1.8 ในขณะที่แพนอากาศอื่นๆไปค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุด 1.2

**แพนอากาศซีลิจ**

แพนอากาศซีลิจ (Selig airfoil) เป็นการนำแพนอากาศเอชคิวมาคำนวณใหม่ ดังนั้นแพนอากาศทั้งสองแบบจึงมีขนาดและประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน

**แพนอากาศเอ็ม.เอช**

แพนอากาศเอ็ม.เอช (M.H. airfoil) แพนอากาศชนิดนี้มีแรงเสียดทานต่ำ มีแรงยกสูงที่มุมปะทะมากโดยไม่ก่อให้เกิดแรงต้านมากเกินไป

**แพนอากาศคลาร์ค**

แพนอากาศคลาร์ค (Clark airfoil) เป็นแพนอากาศที่โค้งดัดมาก มีลักษณะเด่นคือมีชายล่างตรง แพนอากาศคลาร์ค วาย (Clark Y) เป็นแพนอากาศที่มีค่าความโค้งที่สูง มีชายล่างที่ตรง ทำให้การสร้างปีกทำได้ง่ายมีประสิทธิภาพที่ดี

แพนอากาศคลาร์ค เอ็กซ์ (Clark X) มีค่าความโค้งที่น้อยลงทำให้มันมีรูปร่างที่บางลง

แพนอากาศคลาร์คซีเอชวาย (Clark CHY) มีค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสูงกว่าแพนอากาศคลาร์ค เอ็กซ์ และแพนอากาศคลาร์ค วาย

**แพนอากาศนาคา**

แพนอากาศนาคา (National Advisory Committee for Aeronautics, NACA airfoil) เป็นแพนอากาศแรกที่ถูกออกแบบโดย ใช้การคำนวณทางวิทยาศาสตร์ เริ่มกำเนิดในช่วงระหว่างสงครามโลกครั้งที่หนึ่งและครั้งที่สอง ถึงแม้ว่าส่วนใหญ่ของแพนอากาศนาคาจะไม่ได้ถูกออกแบบมาสำหรับเลขเรย์โนลด์ส์ที่ต่ำ แต่ก็มีส่วนที่สามารถนำมาใช้สำหรับเลขเรย์โนลด์ส์ที่ต่ำได้

## 2.7.2 แพนอากาศนากา

### NACA 1 Series หรือ 16 Series

NACA 1 Series ถูกพัฒนาโดยการอ้างอิงจากทฤษฎีใบพัด (airfoil theory) มากกว่า ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิต มันถูกสร้างขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 1930 ด้วยขั้นตอนที่เรียกว่า inverse airfoil design แนวคิดพื้นฐานในการออกแบบคือ การกระจายตัวของความดันบนใบพัด (การกระจายตัวนี้จะส่งผลต่อลักษณะแรงยกที่มีต่อรูปร่างของใบพัด) หลังจากนั้นจะได้รูปร่างเชิงเรขาคณิต ที่จะทำให้เกิดการกระจายตัวของแรงดัน ใบพัดประเภทนี้มีการใช้ตัวเลขบ่งบอกที่ไม่เหมือนกับ series ที่มีตัวเลข 4-5 ตัวทั่วไป ยกตัวอย่างเช่น NACA 16-212 เลข 1 ตัวแรกหมายถึง series ( series นี้ถูกออกแบบให้ใช้ได้ดีเมื่อเป็น supersonic น้อยมาก ๆ ) เลข 6 แสดงถึงตำแหน่งที่มีความดันต่ำสุดบน chord ในที่นี้คือ 60% จากด้านหน้า เลข 2 ตัวแรกบอกถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่ได้ออกแบบมาในที่นี้คือ 0.2 และตัวเลขสองตัวสุดท้ายบอกถึงตำแหน่งความหนาสูงสุดของใบพัดในที่นี้คือ 12% chord เป็นต้น

### NACA 6 series

ถึงแม้ว่าจะมีการออกแบบและทดลองตามทฤษฎีแล้วแต่ใน series 2 - series 5 ก็ไม่ได้ผลที่ไม่เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ จึงได้ทำการออกแบบ series 6 ขึ้น โดยใช้วิธีการสร้างที่คล้ายกับ series 1 คือ การกำหนดการกระจายแรงดันที่ต้องการและใช้คณิตศาสตร์ขั้นสูงเพื่อหารูปร่างเชิงเรขาคณิต เป้าหมายคือการออกแบบให้ใบพัดใช้ได้กับการไหลที่สูงสุดของอากาศที่เป็นการไหลแบบ laminar และสามารถลด drag ได้เมื่อใบพัดอยู่ในช่วงค่าสัมประสิทธิ์แรงยกต่ำๆ การให้ชื่อกับใบพัดใน series 6 สร้างความสับสนมากที่สุดในทุก series ยกตัวอย่างเช่น NACA 64-212,  $a=0.6,6$  แสดงถึง series เลข 4 แสดงถึงตำแหน่งที่เกิดความดันต่ำสุดบน chord ในที่นี้คือ 40% chord ตัวห้อย 1 แสดงค่า drag ต่ำสุด ในที่นี้คือ 0.1 เลข 2 ตัวแรกหมายถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่ทำให้เกิด drag ต่ำสุด คือ 0.2 เลขสองตัวสุดท้ายบอกถึงความหนามากที่สุดของใบพัด คือ 12% chord และ a บอกถึงตำแหน่งบนใบพัดที่เริ่มมีการกระจายตัวแบบ uniform ในที่นี้คือ 60% chord

### NACA 7 series

ถูกสร้างขึ้นโดยมีจุดประสงค์คือ การออกแบบใบพัดที่เกิดความแตกต่างของตำแหน่งที่มีความดันต่ำที่สุดระหว่างด้านบนและด้านล่างของใบพัด ในการไหลแบบ laminar ตัวอย่างเช่น NACA 747A315 เลข 7 แสดงถึง series เลข 4 แสดงถึงตำแหน่งความดันต่ำสุดด้านบนใบพัด ในที่นี้คือ 40% chord เลข 7 แสดงถึงตำแหน่งที่มีความดันต่ำสุดด้านล่างของใบพัด ในที่นี้คือ 70% chord ตัวอักษรในตำแหน่งที่ 4 แสดงถึงรูปแบบความหนาและเส้น mean line เลขตัวที่ห้าแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่ได้ออกแบบไว้ ในที่นี้คือ 0.3 และตัวเลขสองตัวสุดท้ายหมายถึงความหนาสูงสุดของใบพัด ในที่นี้คือ 15% chord

### NACA 8 series

ถูกออกแบบให้สามารถใช้งานได้ใน supercritical speeds ตัวอย่างการให้ชื่อ NACA 835A216 เลข 8 แสดงถึง series เลข 3 หมายถึงตำแหน่งที่เกิดความดันต่ำสุดบนผิวด้านบนของใบพัด ในที่นี้คือ 30% ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

chord, 5 คือ ตำแหน่งที่มีความดันต่ำที่สุดที่ผิวด้านล่างของใบพัด ในที่นี้คือ 50% chord อักษร A แสดงถึงรูปแบบของความหนา เลข 2 หมายถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่ออกแบบไว้ คือ 0.2 ตัวเลขสองตัวสุดท้ายหมายถึง ความหนาสูงสุดของใบพัด คือ 16% chord

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติแพนอากาศยาน

หมวดหมู่	ข้อดี	ข้อเสีย
16 Series	1. แรงดูดน้อยที่ความเร็วสูง 2. มีการหลีกเลี่ยงการเกิดความดันต่ำ ณ จุดสูงสุดของใบ	1. แรงยกต่ำ
6 Series	1. ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุดสูง 2. ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันต่ำในช่วงปฏิบัติการ 3. ใช้งานได้ดีที่ความเร็วสูง	1. ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันสูง เมื่อทำการนอกช่วงปฏิบัติการ 2. เกิดโมเมนตัมที่จุดสูงสุดของแพนอากาศ 3. มีความไวต่อผิวขรุขระ
7 Series	1. ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันต่ำในช่วงการดำเนินการ 2. เกิดโมเมนตัมที่จุดสูงสุดของแพนอากาศ	1. ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุดต่ำ 2. ค่าสัมประสิทธิ์แรงดัน เมื่อทำการนอกช่วงปฏิบัติการ 3. ไวต่อความขรุขระ

จากการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียแล้ว พบว่าแพนอากาศยาน ซีรีส์ 6 เหมาะสมกับชุดทดลองมากที่สุดอันเนื่องมาจากเป็นแพนอากาศที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสูงแต่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันต่ำ การคำนวณหารูปร่างของแพนอากาศ

แพนอากาศยานชนิด 4 (NACA four-digit series) ตำแหน่ง ตัวเลขที่ปรากฏบอกถึงลักษณะของแพนอากาศดังนี้

ตัวเลขหลักที่ 1 คือ ขนาดขอบโค้งสูงสุด (Maximum camber) คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของความยาวคอร์ด (Chord) แทนด้วย  $m$

ตัวเลขหลักที่ 2 คือ ตำแหน่งจุดขอบโค้งสูงสุด (Maximum camber) คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของความยาวคอร์ด (Chord) แทนด้วย  $p$

ตัวเลขสองหลักสุดท้าย คือ ขนาดความหนาสูงสุดของแพนอากาศ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของความยาวคอร์ด (Chord) แทนด้วย  $t$

การคำนวณหารูปร่างของแพนอากาศสามารถหาได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. เลือกค่า  $x$  ตั้งแต่ 0 ถึงความยาวสุดของ chord
2. คำนวณค่าเฉลี่ยของเส้นโค้ง (Camber line) โดยคำนวณในแต่ละพิกัด  $x$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y_c = \frac{m}{p^2} (2px - x^2) \quad \text{from } x = 0 \text{ to } x = p \quad (2.36)$$

$$y_c = \frac{m}{(1-p)^2} [(1-2p) + 2px - x^2] \quad \text{from } x = p \text{ to } x = c \quad (2.37)$$

3. คำนวณการกระจายตัวของความหนาด้านบนแพนอากาศ (+) และด้านล่างแพนอากาศ (-) ของเส้นโค้ง (Camber line) โดยคำนวณในแต่ละพิกัด  $x$

$$\pm y_t = \frac{t}{0.2} (0.2969\sqrt{x} - 0.1260x - 0.3516x^2 + 0.2843x^3 - 0.1015x^4) \quad (2.38)$$

4. กำหนดพิกัดสุดท้ายสำหรับหาพิกัดพื้นผิวด้านบน (+) และพิกัดพื้นผิวด้านล่าง (-)

$$x_U = x - y_t \sin \theta \quad (2.39)$$

$$y_U = y_c + y_t \cos \theta \quad (2.40)$$

$$x_L = x + y_t \sin \theta \quad (2.41)$$

$$y_L = y_c - y_t \cos \theta \quad (2.42)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{dy_c}{dx}\right) \quad (2.43)$$

## 2.8 กฎความคล้าย

กฎความคล้าย (similarity law) เป็นกฎที่ใช้สำหรับการหาค่าตัวแปรต่าง ๆ สำหรับเครื่องกังหันน้ำ 2 เครื่องที่มีความคล้ายกันแต่มีขนาดต่างกัน เช่น ขนาดเล็กสำหรับทดสอบในห้องทดลองซึ่งเรียกว่าตัวแบบ (model) และขนาดใหญ่หรือขนาดจริงซึ่งเรียกว่า ต้นแบบ (prototype)

พิจารณาให้น้ำที่ไหลเข้าสู่เครื่องกังหันน้ำเป็นของไหลยวบตัวไม่ได้ (incompressible fluid) กำถึง  $P$  ที่ถ่ายโอนระหว่างน้ำกับเพลลาหมุนจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ความหนาแน่น ( $\rho$ ) ความหนืด ( $\mu$ ) เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด ( $D$ ) อัตราการไหล ( $Q$ ) ความเร็วรอบในการหมุน ( $N$ ) และพลังงานศักย์ต่อหนึ่งหน่วยมวล ( $gH$ ) โดยเขียนเป็นฟังก์ชันแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$P = f(\rho, \mu, D, Q, N, gH) \quad (2.44)$$

เมื่อเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ จะจัดกลุ่มได้ 4 กลุ่มดังนี้

$$\pi_1 = \frac{Q}{ND^3} \quad (2.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ  $\pi_1 = \frac{Q}{ND^3}$  เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\pi_2 = \frac{gH}{N^2 D^2} \quad (2.46)$$

$$\pi_3 = \frac{\rho N D^2}{\mu} \quad (2.47)$$

$$\pi_4 = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad (2.48)$$

ซึ่งการทำงานของเครื่องกังหันน้ำตัวแบบและต้นแบบที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพดีที่สุดที่จุดนั้น ค่าตัวแปรไร้มิติต่อไปนี้จะมีค่าเท่ากัน

$$\left( \frac{gH}{N^2 D^2} \right)_p = \left( \frac{gH}{N^2 D^2} \right)_m \quad (2.49)$$

และ 
$$\left( \frac{P}{\rho N^3 D^5} \right)_p = \left( \frac{P}{\rho N^3 D^5} \right)_m \quad (2.50)$$

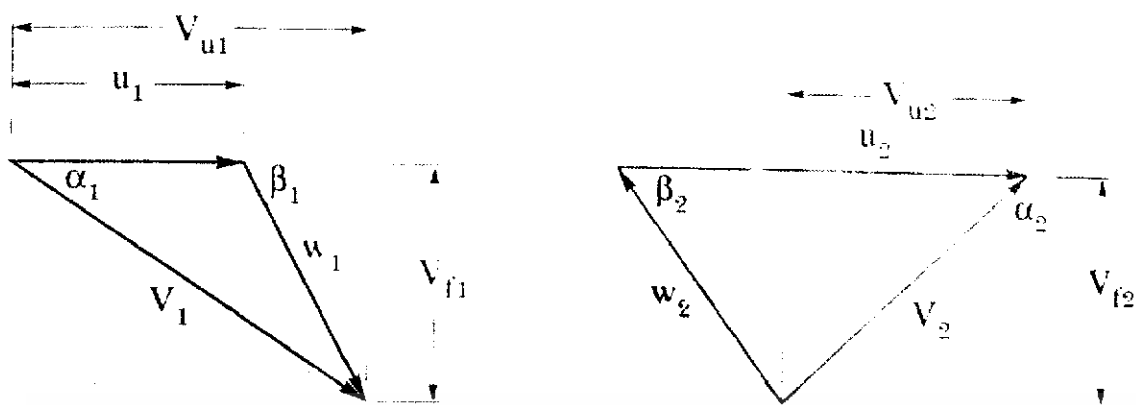
และ 
$$\left( \frac{Q}{N D^3} \right)_p = \left( \frac{Q}{N D^3} \right)_m \quad (2.51)$$

เมื่อ

$\rho$	=	ความหนาแน่น มีหน่วย kg/m <sup>3</sup>
$\mu$	=	ความหนืดสัมบูรณ์ มีหน่วย Ns/m <sup>2</sup>
D	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด มีหน่วย m
Q	=	อัตราการไหล มีหน่วย m <sup>3</sup> /s
N	=	ความเร็วรอบในการหมุนของใบพัด มีหน่วยเป็น rpm
gH	=	พลังงานศักย์ต่อหนึ่งหน่วยมวล มีหน่วย J/kg

## 2.9 การวิเคราะห์เวกเตอร์ความเร็ว

พิจารณารูป 2.24 กำหนดให้ตัวแปรที่มีตัวห้อยเป็น 1 ตัวแปรที่ทางเข้าของใบพัดโค้ง และตัวแปรที่มีตัวห้อยเป็น 2 คือตัวแปรที่ทางออกของใบพัดโค้งดังต่อไปนี้



(ก) แผนภาพความเร็วที่ทางเข้า

(ข) แผนภาพความเร็วที่ทางออก

รูปที่ 2.23 แผนภาพความเร็วที่ทางเข้าและทางออก

- เมื่อ  $V$  = ความเร็วสัมบูรณ์ของน้ำ  
 $u$  = ความเร็วในแนวสัมผัสของใบพัดโค้งซึ่งตั้งฉากกับรัศมีของใบพัด  
 $w$  = ความเร็วของน้ำเทียบกับใบพัด (ความเร็วสัมพัทธ์ของน้ำกับใบพัด)  
 $\alpha$  = ค่ามุมระหว่างความเร็วสัมบูรณ์ของน้ำ  $V$  กับความเร็วในแนวเส้นสัมผัสของใบพัด  $u$   
 $\beta$  = ค่ามุมระหว่างความเร็วของน้ำเทียบกับใบพัด  $w$  กับความเร็วในแนวเส้นสัมผัสของใบพัด  $u$   
 $V_u$  = องค์ประกอบของความเร็ว  $V$  ในแนวความเร็ว  $u$  โดยที่

$$V_{u1} = V_1 \cos \alpha_1 \quad (2.52)$$

$$V_{u2} = V_2 \cos \alpha_2 \quad (2.53)$$

กรณีที่  $\alpha_2 < 90^\circ$ 

$$V_{u2} = V_2 \cos(180^\circ - \alpha_2) \quad (2.54)$$

กรณีที่  $\alpha_2 > 90^\circ$  $V_f$  = ความเร็วในแนวรัศมีของความเร็ว  $V$  โดยที่

$$V_{f1} = V_1 \sin \alpha_1 \quad (2.55)$$

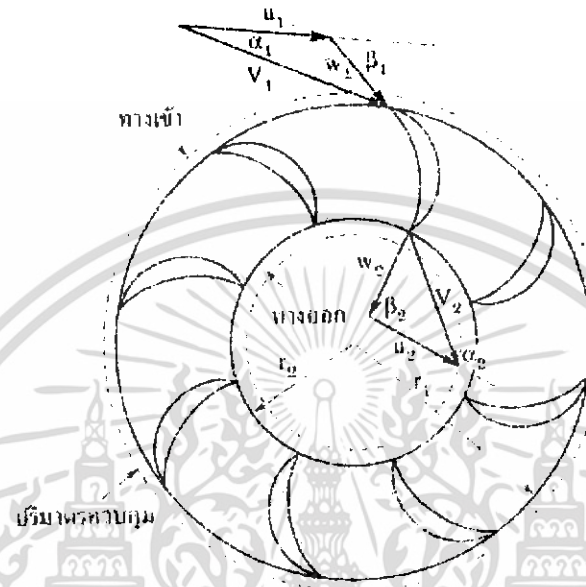
$$V_{f2} = V_2 \sin \alpha_2 \quad (2.56)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{f2} = V_2 \sin(180^\circ - \alpha_2) \quad (2.57)$$

กรณีที่  $\alpha_2 > 90^\circ$

พิจารณารูป 2.24 ซึ่งแสดงแผนภาพความเร็วของการไหลเข้าและไหลออกจากเครื่องกังหันน้ำ



รูปที่ 2.24 ลักษณะการไหลเข้าและไหลออกจากเครื่องกังหันน้ำ

จากปริมาตรควบคุมที่เป็นเส้นประล้อมรอบชุดใบพัดของเครื่องกังหันน้ำ จะสามารถหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรในรูปของความเร็วสัมบูรณ์ที่ทางเข้า  $V_1$  และทางออก  $V_2$  ได้ดังนี้

$$Q = 2\pi r_1 b_1 V_1 \sin \alpha_1 = 2\pi r_1 b_1 V_{f1} \quad (2.58)$$

และ

$$Q = 2\pi r_2 b_2 V_2 \sin \alpha_2 = 2\pi r_2 b_2 V_{f2} \quad (2.59)$$

เมื่อ  $b_1$  = ความกว้างของใบพัดที่ทางเข้า มีหน่วย  $m$

$b_2$  = ความกว้างของใบพัดที่ทางออก มีหน่วย  $m$

และแรงบิด  $T$  ที่เกิดขึ้นบนแกนหมุนอันเนื่องมาจากการไหลเข้าและไหลออกจากปริมาตรควบคุมของของไหลจากสมการต่อไปนี้

$$T = \rho Q (V_1 \cos \alpha_1 r_1 - V_2 \cos \alpha_2 r_2) \quad (2.60)$$

$$= \rho Q (V_{u1} r_1 - V_{u2} r_2) \quad (2.61)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $\rho$  = ความหนาแน่นของน้ำมีหน่วย  $kg/m^3$   
 $Q$  = อัตราการไหลของน้ำมีหน่วย  $m^3/s$   
 $V_{u1}$  = องค์ประกอบความเร็ว  $V$  ในแนวความเร็ว  $u$  ที่ทางเข้า มีหน่วย  $m/s$   
 $V_{u2}$  = องค์ประกอบความเร็ว  $V$  ในแนวความเร็ว  $u$  ที่ทางออก มีหน่วย  $m/s$   
 $r_1$  = รัศมีนอกที่ทางเข้า มีหน่วย  $m$   
 $r_2$  = รัศมีนอกที่ทางออก มีหน่วย  $m$

สมการข้างต้น มีพื้นฐานอยู่บนความจริงที่ว่าของไหลที่ทางเข้าและทางออกจะต้องเป็นของไหลเอกกรูป (uniform) หรืออีกนัยหนึ่งกล่าวได้ว่า น้ำจะต้องมีความหนาแน่นคงตัวตลอดการไหลผ่านเครื่องกั้นน้ำนั่นเอง

แต่แรงบิดจริงที่ได้จากเพลลาของแกนหมุนอาจจะต่ำกว่าค่าที่ได้จากสมการข้างต้น อันเนื่องมาจากความเสียดทานของรองเพลลาและความเสียดทานระหว่างของไหลกับใบพัด ค่าจริงที่ได้จากเพลลาหาได้ดังนี้

$$P = T\omega \quad (2.62)$$

- เมื่อ  $T$  = แรงบิด มีหน่วย  $N \cdot m$   
 $\omega$  = ความเร็วเชิงมุมของการหมุนของใบพัด มีหน่วย  $rad/s$

$$u_1 = r_1\omega_1 \quad (2.63)$$

$$u_2 = r_2\omega_2 \quad (2.64)$$

แทนค่าในสมการ จะได้

$$P = \rho Q \omega (V_{u1}r_1 - V_{u2}r_2) \quad (2.65)$$

หรือจัดรูปสมการใหม่ได้

$$P = \rho Q (V_{u1}u_1 - V_{u2}u_2) \quad (2.66)$$

เมื่อ  $u = \omega r$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกำลังที่ได้จากของไหลที่มีค่าเสด ( $H$ ), อัตราการไหล ( $Q$ ) และความหนาแน่น ( $\rho$ ) คือ

$$P = \rho Q g H \quad (2.67)$$

จัดสมการให้อยู่ในรูปของค่าเสด ( $H$ ) ซึ่งเป็นเสดที่ใช้งานจริง โดยเริ่มเขียนการเท่ากันของสมการทั้งสอง

$$\rho Q (u_1 V_{u1} - u_2 V_{u2}) = \rho Q g H \quad (2.68)$$

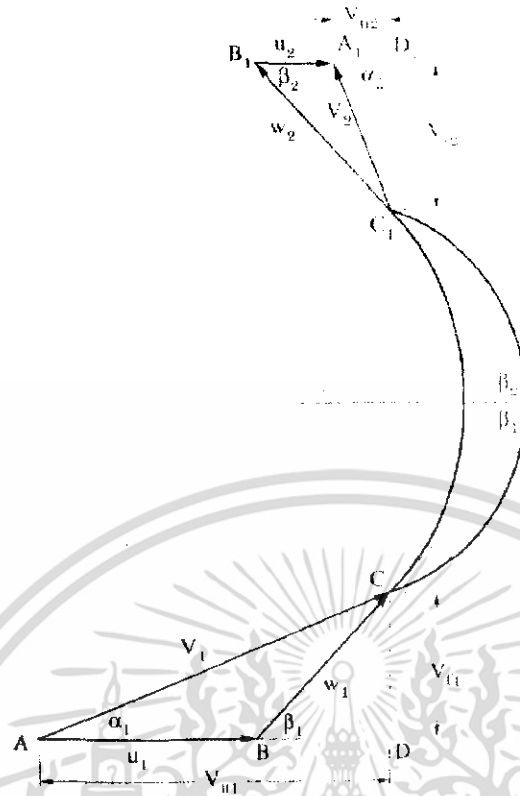
จะได้

$$H = \frac{u_1 V_{u1} - u_2 V_{u2}}{g} \quad (2.69)$$

## 2.10 โมเมนต์และแรงกระทำต่อใบพัดเนื่องจากการดล

เมื่อลำของไหลพุ่งกระทบใบพัด ทั้งใบพัดตรงและใบพัดโค้ง และทั้งในกรณีที่ใบพัดอยู่กับที่และเครื่องที่จะเกิดแรงกระทำต่อใบพัดซึ่งการพิจารณาการพุ่งกระทบนี้จะแตกต่างกันออกไปตามลักษณะของใบพัด รูปแบบการเคลื่อนที่ และมุมกระทบใบพัด ลำของไหลกระทบกับใบพัดโค้งเคลื่อนที่ในแนวสัมผัส

พิจารณารูป 2.26 ซึ่งเป็นแผนภาพแสดงการพุ่งกระทบของลำน้ำเข้าหาใบพัดโค้งในทิศทางทำมุมกับใบพัดโค้งที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $u$



รูปที่ 2.25 แผนภาพความเร็วของลำของไหลที่พุ่งกระทบใบพัดที่กำลังเคลื่อนที่

พิจารณาใบพัดโค้งที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $n$  และมีลำน้ำความเร็ว  $V_1$  พุ่งกระทบในทิศทางทำมุม  $\alpha_1$  กับแนวของความเร็ว  $n$  ส่วน  $V_{m1}$  เป็นองค์ประกอบของความเร็ว  $V_1$  ที่มีทิศทางอยู่ในแนวเดียวกับความเร็ว  $n$  และ  $w_1$  คือองค์ประกอบของความเร็ว  $V_1$  ในทิศทางสัมผัสกับใบพัดที่ทางเข้าและทำมุม  $\beta_1$  กับแนวของความเร็ว  $n$  ซึ่งหากพิจารณาให้ใบพัดมีความเรียบ ลื่น และไม่มีความฝืด ความเร็วของลำน้ำที่ไหลในแนวสัมผัสกับใบพัดโค้งที่ทางออก  $w_2$  จะมีค่าเท่ากับ  $w_1$  แต่เนื่องจากความฝืดและความเสียดทานของใบพัดจึงทำให้ความเร็ว  $w_2$  ที่ทางออกมีค่าต่ำกว่า  $w_1$  ( $w_2 < w_1$ ) ซึ่งผลกระทบของความเสียดทานที่ใบพัดกระทำต่อความเร็วนี้หาได้จากอัตราส่วน

$$K = w_2 / w_1 \quad (2.70)$$

เมื่อ  $K =$  สัมประสิทธิ์ความเร็วของใบพัด (blade velocity coefficient)

จากหลักการของโมเมนตัม สามารถหาแรงกระทำต่อใบพัดโค้งอันเนื่องมาจากการพุ่งกระทบของลำน้ำได้จากสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = -\frac{\Delta M}{t} = -\frac{M_{out} - M_{in}}{t} \quad (2.71)$$

$$= \frac{M_{in} - M_{out}}{t} = \frac{mV_{in} - mV_{out}}{t} = \frac{m}{t}(V_{in} - V_{out}) \quad (2.72)$$

หากพิจารณาจะเห็นว่าพจน์  $\frac{m}{t}$  เป็นค่ามวลของน้ำที่พุ่งเข้ากระทบใบพัดหารด้วยเวลาที่พุ่งเข้ากระทบ ดังนั้นค่า  $\frac{m}{t}$  จึงสามารถแทนได้ด้วยตัวแปรอัตราการไหลเชิงมวล  $\dot{m}$  เมื่อแทนค่ากลับไปในสมการจะได้

$$F = \dot{m}(V_{in} - V_{out}) \quad (2.73)$$

เมื่อ  $\dot{m} = \frac{\dot{W}}{g}, V_{in} = V_{u1}, V_{out} = -V_{u2}$

การที่กำหนดให้  $V_{in} = V_{u1}$  และ  $V_{out} = -V_{u2}$  ก็เพราะ  $V_{u1}$  และ  $V_{u2}$  เป็นองค์ประกอบของความเร็วสัมบูรณ์ของการไหลของน้ำในแนวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ของใบพัดซึ่งจะหมุนเป็นวงกลม และองค์ประกอบความเร็วดังกล่าวนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานในรูปของการไหลให้อยู่ในรูปของแรงที่กระทำต่อใบพัดและจะส่งผลต่อไปให้เกิดกำลังที่แกนเพลลาของเครื่องกังหันน้ำซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้นั่นเอง ส่วนความเร็ว  $V_{f1}$  และ  $V_{f2}$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบความเร็วสัมบูรณ์ในแนวรัศมีของชุดใบพัดนั้นจะไม่ส่งผลต่อการพิจารณากำลังของแกนเพลลา

แทนค่าตัวแปรต่างๆในสมการข้างต้นได้

$$F = \frac{\dot{W}}{g}(V_{u1} - (-V_{u2})) \quad (2.74)$$

$$= \frac{\dot{W}}{g}(V_{u1} + V_{u2}) \quad (2.75)$$

เมื่อ  $\dot{W}$  คือน้ำหนักของน้ำหรือของไหลที่พุ่งเข้ากระทบใบพัด ใต้งต่อนิ่งหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งสมการข้างต้นสามารถนำมาใช้งานได้เมื่อ  $\alpha_2 < 90^\circ$  สำหรับกรณีที่  $\alpha_2 > 90^\circ$  จะหาแรง  $F$  ได้จากสมการต่อไปนี้

$$F = \frac{\dot{W}}{g}(V_{u1} \pm V_{u2}) \quad (2.76)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย ใช้เครื่องหมาย (+) เมื่อ  $\alpha_2 < 90^\circ$   
 ใช้เครื่องหมาย (-) เมื่อ  $\alpha_2 > 90^\circ$

กำลังที่เกิดขึ้นที่ใบพัดโค้งสามารถหาได้จากการคูณแรง  $F$  กับความเร็ว  $u$  ของใบพัดโค้ง  
 ดังต่อไปนี้

$$P = F \cdot u \quad (2.77)$$

$$P = \frac{\dot{W}}{g} (V_{u1} \pm V_{u2}) \cdot u \quad (2.78)$$

และประสิทธิภาพของใบพัดหาได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\text{ประสิทธิภาพ } (\eta) = \frac{P}{\dot{E}_K} \quad (2.79)$$

เมื่อ  $\dot{E}_K =$  กำลังของการไหลของลำของไหล มีหน่วย  $W$

$$= \frac{mV^2}{2} = \frac{WV^2}{2g}$$

$P =$  กำลังที่เกิดขึ้นต่อใบพัด มีหน่วย  $W$

$$= \frac{\dot{W}}{g} (V_{u1} \pm V_{u2}) \cdot u$$

$\dot{W} = \dot{m}g =$  น้ำหนักของน้ำที่พุ่งเข้ากระทบใบพัดต่อหนึ่งหน่วยเวลา

แทนค่าเพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องกังหันน้ำ จะได้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\eta = \frac{\frac{\dot{W}}{g} (V_{u1} \pm V_{u2}) \cdot u}{\frac{\dot{W}V_1^2}{2g}} \quad (2.80)$$

$$\eta = \frac{2u(V_{u1} \pm V_{u2})}{V_1^2} \quad (2.81)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 ทฤษฎีการหาประสิทธิภาพของกังหัน

### 2.11.1 สมการกังหันของออยเลอร์

สมการกังหันของออยเลอร์ ใช้การพิจารณาจากเวกเตอร์รูปหลายเหลี่ยมของความเร็วตรงทางเข้า ถ้าทราบ  $\omega$ ,  $R_1$ ,  $U_1 = \omega R_1$ ,  $\alpha_1$  และ  $\beta_1$  ดังนั้นขนาดของความเร็วคือ

$$U_1 = V_{n1} \tan \alpha_1 + V_{t1} \cot \beta_1 \quad (2.82)$$

$$V_1 = \frac{V_{n1}}{\cos \alpha_1} \quad (2.83)$$

$$V_{t1} = V_1 \sin \alpha_1 \quad (2.84)$$

$$V_{rel1} = \frac{V_{n1}}{\sin \beta_1} \quad (2.85)$$

อัตราการไหลโดยปริมาตรคำนวณจาก

$$Q = V_{n1} A_1 = V_{n2} A_2 \quad (2.86)$$

เวกเตอร์รูปหลายเหลี่ยมของความเร็วตรงทางออก ถ้าทราบ  $R_2$ ,  $\beta_2$ ,  $U_2 = \omega R_2$  และ  $A_1 = A_2$  แล้ว ดังนั้น

$$\tan \alpha_2 = \frac{V_{t2}}{V_{n2}} = \frac{U_2 - V_{n2} \cot \beta_2}{V_{n2}} = \frac{U_2 - V_{n1} \cot \beta_2}{V_{n1}} \quad (2.87)$$

$$V_2 = \frac{V_{n2}}{\cos \alpha_2} = \frac{V_{n1}}{\cos \alpha_2} \quad (2.88)$$

$$V_{t2} = V_2 \sin \alpha_2 \quad (2.89)$$

จากสมการข้างต้น สามารถคำนวณทอร์กของกังหันจาก

$$T_{shaft} = (R_2 V_{t2} - R_1 V_{t1}) \rho Q \quad (2.90)$$

เรียกสมการนี้ว่า สมการกังหันออยเลอร์ (Euler turbine equation) และคำนวณหากำลังของส่วนหมุนของกังหันคำนวณจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Power = \omega T_{shaft} = (U_2 V_{t2} - U_1 V_{t1}) \rho Q \quad (2.91)$$

### 2.11.2 สมการการหาประสิทธิภาพ

#### ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร

ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร (volumetric efficiency,  $\eta_{vol}$ ) คือ อัตราส่วนของอัตราการไหลของน้ำในส่วนที่ก่อให้เกิดกำลังที่ใบพัด (runner) ของเครื่องกังหันน้ำต่ออัตราการไหลของน้ำทั้งหมดที่เข้าสู่เครื่องกังหันน้ำ โดยเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\eta_{vol} = \frac{Q - \Delta Q}{Q} \quad (2.92)$$

เมื่อ  $\eta_{vol}$  = ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร ไม่มีหน่วย  
 $Q$  = อัตราการไหลของน้ำทั้งหมดที่เข้าสู่เครื่องกังหันน้ำ มีหน่วย  $m^3/s$   
 $\Delta Q$  = อัตราการไหลของน้ำในส่วนที่ไม่ก่อให้เกิดการทำงานต่อเครื่องกังหันน้ำ มีหน่วย  $m^3/s$

#### ประสิทธิภาพพลศาสตร์

ประสิทธิภาพพลศาสตร์ (hydraulic efficiency,  $\eta_{hyd}$ ) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ประสิทธิภาพแมนอเมตริก (manometric efficiency,  $\eta_{mano}$ ) คือ อัตราส่วนระหว่างเฮดแมนอเมตริกหรือเฮดที่เกิดขึ้นจริงกับเฮดที่เครื่องสูบน้ำควรจะทำได้หรือเฮดทางทฤษฎี โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\eta_{mano} = \frac{gh_m}{u_2 V_{u2}} \quad (2.93)$$

เมื่อ  $\eta_{mano}$  = ประสิทธิภาพแมนอเมตริก ไม่มีหน่วย  
 $h_m$  = เฮดแมนอเมตริก มีหน่วย  $h_m$   
 $u_2$  = ความเร็วที่ทางออกในแนวเส้นสัมผัสของใบพัด มีหน่วย  $m/s$   
 $V_{u2}$  = ความเร็วสัมผัสของน้ำที่ทางออกในแนวสัมผัสของใบพัดมีหน่วย  $m/s$

#### ประสิทธิภาพเชิงกล

ประสิทธิภาพเชิงกล (mechanical efficiency,  $\eta_{mech}$ ) คือ ค่าของอัตราส่วนระหว่างกำลังที่สามารถใช้งานได้ที่เพลาคู่กำลังที่ผลิตได้จากใบพัด ซึ่งในกรณีเครื่องกังหันน้ำจะสามารถเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta_{mech} = \frac{OP_{shaft}}{OP_{blade}} \quad (2.94)$$

- เมื่อ  $\eta_{mech}$  = ประสิทธิภาพเชิงกล ไม่มีหน่วย  
 $P_{shaft}$  = กำลังที่สามารถใช้งานได้ที่เพลามีหน่วย  $W$   
 $P_{blade}$  = กำลังที่ผลิตได้จากใบพัด มีหน่วย  $W$

โดยกำลังที่เพลารับจะมีค่าน้อยกว่ากำลังที่ผลิตได้จากใบพัด เนื่องจากกำลังส่วนหนึ่งต้องใช้ไปในการเอาชนะความเสียดทานในส่วนต่างๆ เช่น ที่รองเพล่า เป็นต้น

### ประสิทธิภาพรวม

ประสิทธิภาพรวม (overall efficiency,  $\eta_o$ ) คือ อัตราส่วนของกำลังที่ต้องใช้ในการส่งน้ำที่อัตราการไหลที่กำหนดให้ขึ้นไปได้สูงตามที่ต้องการต่อกำลังที่ได้รับจากต้นกำลังขับโดยสามารถจะหาได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\eta_o = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} = \frac{\gamma Q h_m}{IP} = \frac{T\omega}{IP} \quad (2.95)$$

- เมื่อ  $h_m$  = เสดแมนอเมตริก มีหน่วย  $m$   
 $\gamma$  = น้ำหนักจำเพาะของน้ำ มีหน่วย  $N/m^3$   
 $Q$  = อัตราการไหลของน้ำ มีหน่วย  $m^3/s$   
 $IP$  = กำลังที่ได้รับจากต้นกำลังขับ มีหน่วย  $W$

หรือ

$$\eta_o = \eta_{hyd} \eta_{vol} \eta_{mech} \quad (2.96)$$

นั่นคือ จะสามารถหาประสิทธิภาพรวมได้จากการคูณกันของประสิทธิภาพพลศาสตร์ ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร ประสิทธิภาพเชิงกล

### 2.12 ปรากฏการณ์ควิเตชัน

ปรากฏการณ์ควิเตชัน (Cavitations) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากของเหลวมีค่าความดันสถิตเฉพาะที่ต่ำกว่าความดันไอของมัน ซึ่งก็จะทำให้ของเหลวดังกล่าวเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นฟองไอน้ำขึ้นเป็นจำนวนมาก เมื่อฟองไอน้ำนี้เคลื่อนตัวไปอยู่ในตำแหน่งที่ความดันสูงขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟองไอจะแตกออก และของเหลวที่อยู่รอบฟองจะไหลเข้าสู่ช่องว่างที่เกิดจากการแตกตัวของฟองอย่างฉับพลัน ทำให้เกิดการกระแทกของของเหลว ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือน และเกิดการกัดกร่อนของผิวโลหะที่อยู่ใกล้ นอกจากนี้ก็จะมีเสียงดังตามมาด้วย ปรากฏการณ์คาวิเทชันมักเกิดในบริเวณที่ของเหลวมีความเร็วสูง ซึ่งจะส่งผลให้ความดันสถิตเฉพาะที่ของของเหลวในบริเวณนั้น ๆ ลดต่ำลง และเมื่อความดันลดต่ำกว่าความดันไอ ก็จะเกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันขึ้น ปรากฏการณ์คาวิเทชัน มักเกิดขึ้นที่บริเวณทางเข้าและบริเวณใบพัดของเครื่องสูบน้ำ ในระบบท่อที่มีการออกแบบไม่ดี และในบริเวณหลังสิ่งกีดขวางการไหล เช่น ท่อด้านเข้าของเครื่องสูบน้ำ และหลังวาล์วที่มีการหรีดปิด เป็นต้น ในการตรวจสอบว่าระบบการไหลจะมีปรากฏการณ์คาวิเทชันเกิดขึ้นหรือไม่ หากไม่มีเครื่องมือเฉพาะก็อาจสามารถสังเกตได้ด้วยการฟังเสียงในส่วนที่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ซึ่งจะมีเสียงดังเหมือนก้อนกรวดกระแทกผิวโลหะ หรือสังเกตจากการสั่นสะเทือน



รูปที่ 2.26 แสดงถึงปรากฏการณ์คาวิเทชันที่เกิดขึ้นบนแผนอากาศที่เห็นเป็นฟองไอ

ในการออกแบบเครื่องกังหันน้ำเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดคาวิเทชันหรือการเดือดกลายเป็นไอของของเหลวภายในระบบจะสามารถพิจารณาจากสมการต่อไปนี้

$$\sigma_{inst} = \frac{H_{atm} - H_v - H_s}{H} \quad (2.101)$$

- เมื่อ  $\sigma_{inst}$  = สัมประสิทธิ์คาวิเทชันของการติดตั้งเครื่องกังหันน้ำ ไม่มีหน่วย  
 $H_{atm}$  = เสดความดันบรรยากาศ มีหน่วย m  
 $H_v$  = เสดความดันไอของของเหลว ณ อุณหภูมิที่กำหนด มีหน่วย m  
 $H_s$  = ความสูงจากใบพัดถึงท้ายน้ำ มีหน่วย m

โดยการออกแบบเครื่องกังหันน้ำให้มีความปลอดภัยต่อการเกิดคาวิเทชันควรกำหนดให้

$$\sigma_{inst} > \sigma_c \quad (2.102)$$

เมื่อ  $\sigma_c$  = สัมประสิทธิ์วิกฤติสำหรับการเกิดควิเตชันของเครื่องกังหันไอน้ำ

สำหรับความสูงมากที่สุดสำหรับเครื่องกังหันน้ำที่ติดตั้งไว้สูงจากท้ายน้ำ สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$Z_{max} = \frac{P_a - P_v}{\gamma} \sigma_c H \quad (2.103)$$

เมื่อ  $Z_{max}$  = ความสูงมากที่สุดสำหรับเครื่องกังหันน้ำที่ติดตั้งไว้สูงจากท้ายน้ำ มีหน่วย m  
 $\sigma_c$  = สัมประสิทธิ์วิกฤติสำหรับการเกิดควิเตชันของเครื่องกังหันไอน้ำ  
 $H$  = เสดสุทธิที่ใช้งานที่เครื่องกังหันน้ำ มีหน่วย m  
 $P_a$  = ความดันบรรยากาศ มีหน่วย Pa  
 $P_v$  = ความดันไอของน้ำ ณ อุณหภูมิที่กำหนด มีหน่วย Pa  
 $\gamma$  = น้ำหนักจำเพาะของน้ำ มีหน่วย  $N/m^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบชุดทดลอง

#### 3.1 การเลือกคุณสมบัติของปั้มน้ำที่ใช้ในการทดลอง

ในการพิจารณาเลือกเครื่องสูบน้ำให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานจะพิจารณาจากกราฟสมรรถนะหรือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเสดกับอัตราการไหล ซึ่งกราฟสมรรถนะนี้จะแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ กราฟเสดกับอัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำที่ทางบริษัทผู้ผลิตต้องเป็นผู้ทดสอบ และอีกส่วนหนึ่งจะเป็นกราฟเสดกับอัตราการไหลของระบบที่ต้องการนำเครื่องสูบน้ำนี้ไปใช้งานโครงการนี้จะให้ความสำคัญในการเลือกใช้ปั้มน้ำจากกราฟเสดกับอัตราการไหลของระบบโดยมีวิธีการคำนวณดังขั้นตอนต่อไปนี้

##### 3.1.1 การหาอัตราการไหลของระบบ

จะอ้างอิงทฤษฎีการคำนวณจากเรื่อง การคำนวณระยะการไหลเต็มท่อ (Fully developed flow)

$$\frac{L_e}{D} = 0.06Re \quad \text{สำหรับการไหลแบบราบเรียบ} \quad (2.22)$$

$$\frac{L_e}{D} = 4.4Re^{1/6} \quad \text{สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน} \quad (2.23)$$

กำหนดให้ชุดทดลองมีคุณสมบัติดังนี้

1. ระยะปากทางเข้า ( $L_e$ ) มีระยะเท่ากับ 1 m
2. เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อภายในระบบ เลือกใช้ที่ 100 mm หรือเท่ากับ 0.1 m
3. การทดลองอยู่ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ

จากคุณสมบัติข้างต้นสามารถหาเลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number, Re) ได้จากการนำมาแทนค่าในสมการการคำนวณระยะการไหลเต็มท่อสำหรับการไหลแบบราบเรียบจากสมการต่อไปนี้

$$\frac{L_e}{D} = 0.06Re \quad (2.22)$$

$$Re = \frac{L_e}{0.06D}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Re = \frac{1}{0.06 \times 0.1} = 166.667$$

นำเลขเรย์โนลด์ส์ที่ได้ข้างต้นมาคำนวณหาความเร็วเฉลี่ยของไหลภายในระบบ จากสมการต่อไปนี

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.12)$$

$$V = \frac{\mu Re}{\rho D}$$

เมื่อคุณสมบัติของน้ำ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีคุณสมบัติดังนี้

$$\mu = 7.975 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$$

$$\rho = 995.7 \text{ kg} / \text{m}^3$$

แทนค่าได้

$$V = \frac{\mu Re}{\rho D} = \frac{7.975 \times 10^{-4} \times 166.67}{995.7 \times 0.1}$$

$$V = 1.334 \times 10^{-3} \text{ m} / \text{s}$$

นำค่าความเร็วเฉลี่ยของไหลภายในระบบที่ได้จากการคำนวณมาหาค่าอัตราการไหลของไหลภายในระบบจากสมการ ดังต่อไปนี้

$$Q = AV \quad (3.1)$$

- เมื่อ
- Q = อัตราการไหล มีหน่วย  $\text{m}^3/\text{s}$
  - A = พื้นที่หน้าตัดของท่อน้ำ มีหน่วย  $\text{m}^2$
  - V = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล มีหน่วย  $\text{m}/\text{s}$

$$Q = \left( \frac{\pi \times 0.1^2}{4} \right) 1.334 \times 10^{-3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 Q &= 1.04 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s} \\
 &= 6.24 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{min} \\
 &= 0.624 \text{ liter} / \text{min}
 \end{aligned}$$

### 3.1.2 การหาเสดปั้มน้ำ

จากสมการการคำนวณเสดปั้มน้ำ

$$h_p = (Z_2 - Z_1) + h_L \quad (3.2)$$

- เมื่อ  $h_p$  = เสดของปั้มน้ำที่ต่ำที่สุดโดยอยู่ในรูปความสูงของน้ำ มีหน่วย m  
 $h_L$  = เสดสูญเสียของการไหล โดยอยู่ในรูปความสูงของน้ำ มีหน่วย m  
 $Z_1$  = ความสูงของน้ำที่หน้าตัด (1) มีหน่วย m  
 $Z_2$  = ความสูงของน้ำที่หน้าตัด (2) มีหน่วย m

เมื่อ  $Z_1$  เป็นระดับอ้างอิง ( $Z_1 = 0$ ) ความสูงของท่อจากระดับอ้างอิง ( $Z_2$ ) คือ 0.76 m และ  $h_L$  คือ เสดสูญเสียซึ่งหาได้จากสมการ

$$h_L = h_{\text{minor}} + h_{\text{major}} \quad (3.3)$$

หรือ

$$h_L = \sum K \frac{V^2}{2g} + f \left( \frac{L}{D} \right) \frac{V^2}{2g} \quad (3.4)$$

พิจารณาที่  $h_{\text{major}}$

$$h_{\text{major}} = f \left( \frac{L}{D} \right) \frac{V^2}{2g} = \frac{1.215 \times 10^{10} \times Q^{1.852} \times L}{C^{1.852} \times D^{4.87}} \quad (3.5)$$

- เมื่อ  $L$  = ความยาวท่อรวมของระบบ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.04 m.  
 $C$  = ค่าคงตัวของเฮเซน-วิลเลียมส์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 140  
 $Q$  = อัตราการไหล ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10.4 l/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$h_{major} = \frac{1.215 \times 10^{10} \times 10.4^{1.852} \times 4.04}{140^{1.852} \times 100^{4.87}}$$

$$= 0.07242 \text{ m}$$

พิจารณาที่  $h_{minor}$

$$h_{minor} = \sum K \frac{V^2}{2g} \quad (3.6)$$

เมื่อ  $K =$  สัมประสิทธิ์การสูญเสีย และสามารถแจกแจงค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย  
ได้ดังนี้

ความต้านการไหลก่อนเข้าท่อคูด  $K = 0.5$

ข้องอ  $90^\circ$  รศมีสัน 2 ท่อ  $K = 0.9$

ท่อสามทางไหลแยก แบบเกลียว 2 ท่อ  $K = 2.0 \times 2 = 4.0$

เกตวาล์วเปิดเต็มที่  $K = 0.15$

ดังนั้น

$$h_{minor} = (0.5 + 0.9 + 2.0 + 2.0 + 0.15 + 0.9) \frac{1.324^2}{2 \times 9.816}$$

$$= 0.57608 \text{ m}$$

ดังนั้นค่าเสดสูญเสยรวมมีค่าเท่ากับ

$$h_L = 0.57608 + 0.07242$$

$$= 0.6485 \text{ m}$$

นำค่าที่คำนวณได้มาแทนในสมการการคำนวณเสดปั้มน้ำ

$$h_p = (Z_2 - Z_1) + h_L$$

$$h_p = 0.76 + 0.6485$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h_p = 1.4085 \text{ m}$$

ความดันที่ตกคร่อมระหว่างชุดใบพัดเมื่อกำหนดให้ใบพัดทำความเร็วในย่านความเร็วรอบที่  $\omega = 300 \text{ rad/s}$  รัศมีเฉลี่ยจากจุดกึ่งกลางท่อเท่ากับ 3.25 mm และสมมุติให้การเปลี่ยนแปลงพลังงานระหว่างชุดใบพัดเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้น จะสามารถหาความดันที่ตกคร่อมได้ดังต่อไปนี้

$$\text{พลังงานจลน์} = \frac{1}{2} \rho V^2 = \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 \quad (3.7)$$

$$\text{พลังงานศักย์} = \rho gh \quad (3.8)$$

จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน พลังงานไม่มีการสูญเสีย

$$\rho gh = \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 \quad (3.9)$$

$$h = \frac{\frac{1}{2} \omega^2 r^2}{g} = \frac{\frac{1}{2} \times 300^2 \times (32.5 \times 10^{-3})^2}{9.816}$$

$$h = 4.842 \text{ m}$$

ทำการรวมเสดทั้งหมดที่ได้จากการคำนวณเพื่อหาเสดขั้นต่ำในการเลือกใช้ปั้ม

$$h = 1.4085 + 4.842$$

$$h = 6.2505 \text{ m}$$

ดังนั้นคุณสมบัติที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกใช้ปั้มน้ำ จะเลือกจากคุณสมบัติดังนี้

$$\text{อัตราการไหลไม่ต่ำกว่า} \quad 0.624 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\text{เสดปั้มน้ำไม่ต่ำกว่า} \quad 6.2505 \text{ m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การออกแบบใบพัด

ในการออกแบบใบพัดจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. ค่าความยาวเส้นคอร์ด ( $l$ )
2. จำนวนของใบพัด ( $Z$ )
3. รัศมีความยาวเฉลี่ยของใบพัด ( $r$ )

โดยกำหนดให้ใช้จำนวนใบพัด ( $Z$ ) 4 ใบ และมีรัศมีเฉลี่ย ( $r$ ) 32.5 mm นำค่าที่กำหนดมาหาค่าความยาวเส้นคอร์ดได้ ดังนี้

$$l = \frac{2\pi r}{Z} = \frac{2\pi(32.5 \times 10^{-3})}{4} = 0.051 \text{ m}$$

จากทฤษฎีแพนอากาศสามารถนำมาคำนวณเพื่อออกแบบลักษณะแพนอากาศของใบพัดได้ดังนี้

1. เลือกค่า  $x$  ตั้งแต่ 0 ถึงความยาวสุดของ chord
2. คำนวณค่าเฉลี่ยของเส้นโค้ง (Camber line) โดยคำนวณในแต่ละพิกัด  $x$

$$y_c = \frac{m}{p^2}(2px - x^2) \quad \text{from } x = 0 \text{ to } x = p \quad (2.36)$$

$$y_c = \frac{m}{(1-p)^2}[(1-2p) + 2px - x^2] \quad \text{from } x = p \text{ to } x = c \quad (2.37)$$

3. คำนวณการกระจายตัวของความหนาแน่นบนแพนอากาศ (+) และด้านล่างแพนอากาศ (-) ของเส้นโค้ง (Camber line) โดยคำนวณในแต่ละพิกัด  $x$

$$\pm y_t = \frac{l}{0.2} (0.2969\sqrt{x} - 0.1260x - 0.3516x^2 + 0.2843x^3 - 0.1015x^4) \quad (2.38)$$

4. กำหนดพิกัดสุดท้ายสำหรับหาพิกัดพื้นผิวด้านบน (+) และพิกัดพื้นผิวด้านล่าง (-)

$$x_U = x - y_t \sin \theta \quad (2.39)$$

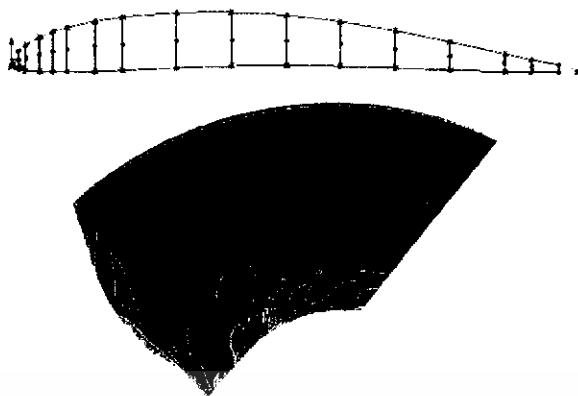
$$y_U = y_c + y_t \cos \theta \quad (2.40)$$

$$x_L = x + y_t \sin \theta \quad (2.41)$$

$$y_L = y_c - y_t \cos \theta \quad (2.42)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{dy_c}{dx}\right) \quad (2.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

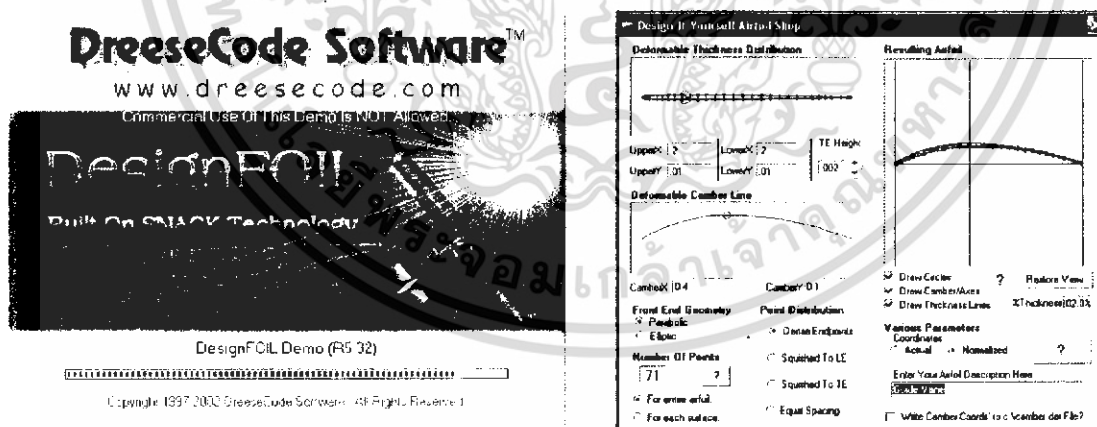


รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะใบพัดสองและสามมิติที่ได้จากการคำนวณ

### 3.3 การออกแบบใบพัดบังคับทิศทาง

ใบพัดบังคับทิศทาง (guide vane) คือ ใบพัดที่ติดตั้งอยู่กับที่ เพื่อปรับทิศทางกระแสลมที่ไหลภายในระบบให้มีทิศทาง และ ยังช่วยในการเพิ่มความเร็วให้ของไหลโดยการลดความดันของของไหลก่อนเข้าสู่ใบพัด (Runner) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของชุดกังหัน (Turbine) ให้ทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ โดยคุณสมบัติที่สำคัญในการออกแบบใบพัดบังคับทิศทางนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการคำนึงถึงคร่อมระหว่างก่อนเข้าและออกจากชุดใบพัดบังคับทิศทางให้น้อยที่สุด

โดยการวิเคราะห์เพื่อออกแบบในที่นี้จะให้ความสนใจในการเกิด แรงยก (lift force) และ แรงต้าน (drag force) ที่เกิดจากของไหล ไหลผ่านแพนอากาศให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด



รูปที่ 3.2 แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบใบพัดบังคับทิศทาง

ในการออกแบบจะใช้โปรแกรม DesignFOIL ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบลักษณะแพนอากาศตามหลักการแพนอากาศแบบนาคา และยังสามารถทำการวิเคราะห์หาภาระแรงกระทำที่เกิดจากของไหลไหลผ่านแพนอากาศแบบเบื้องต้นได้ ในที่นี้สามารถศึกษาวิธีการใช้โปรแกรมอย่างละเอียดได้ในภาคผนวกท้ายเล่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์เมื่อมีการปรับลักษณะใบพัดบังคับทิศทางให้มีลักษณะต่างกันพบว่าได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก และสัมประสิทธิ์แรงต้าน ดังนี้

เมื่อกำหนดให้ ลักษณะแผนอากาศของใบพัดบังคับทิศทางเป็นแบบแผ่นบาง

ค่า Upper X = 20%

ค่า Upper Y = 1%

ค่า Lower X = 20%

ค่า Lower Y = 1%

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมพบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ค่าคุณสมบัติ

Chamber X = 10%

Chamber Y = 40%

การคำนวณหาความยาวเส้นคอร์ดของใบพัดบังคับทิศทางใช้หลักการเดียวกับการหาความยาวเส้นคอร์ดของใบพัด คือ

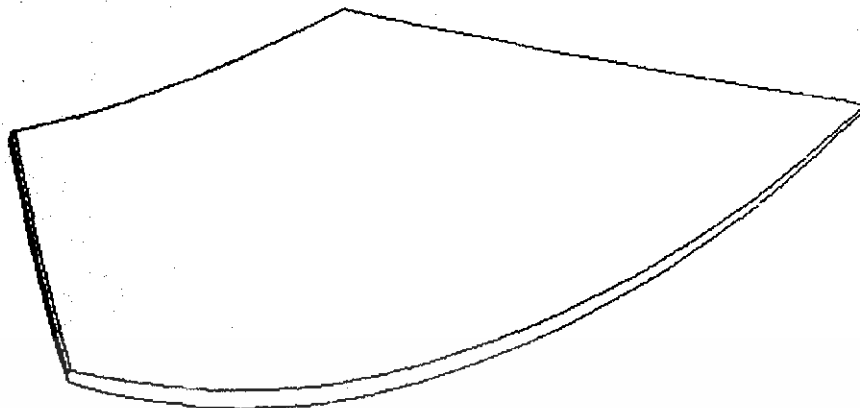
จากการกำหนดค่า รัศมีเฉลี่ยของใบพัด ( $r$ ) = 42.5 mm

จำนวนใบพัดชักนำ ( $Z$ ) = 8 ใบ

แทนค่าในสมการได้

$$l = \frac{2\pi r}{Z} = \frac{2\pi(42.5 \times 10^{-3})}{8} = 0.0339286$$

ค่าความยาวเส้นคอร์ดของใบพัดบังคับทิศทาง = 0.0339286 m = 3.39286 cm



รูปที่ 3.3 แสดงใบพัดบังคับทิศทางเมื่อวัดตามความยาวเส้นคอร์ค



รูปที่ 3.5 แสดงใบพัดบังคับทิศทางที่สร้างตามการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

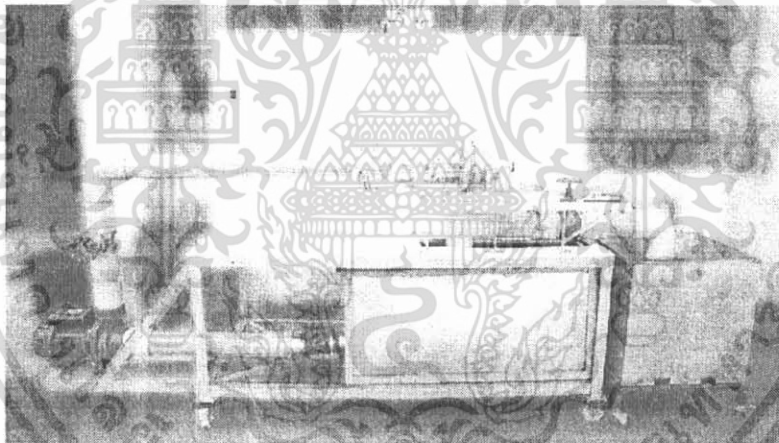
### การทดลอง

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงอุปกรณ์ต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการทดลอง และขั้นตอนการทดลอง ทั้งนี้ เพื่อเป็นแนวทางในการนำชุดทดลองไปทำการศึกษาหาประสิทธิภาพของกังหันน้ำตามแนวแกนแบบหลายชั้น

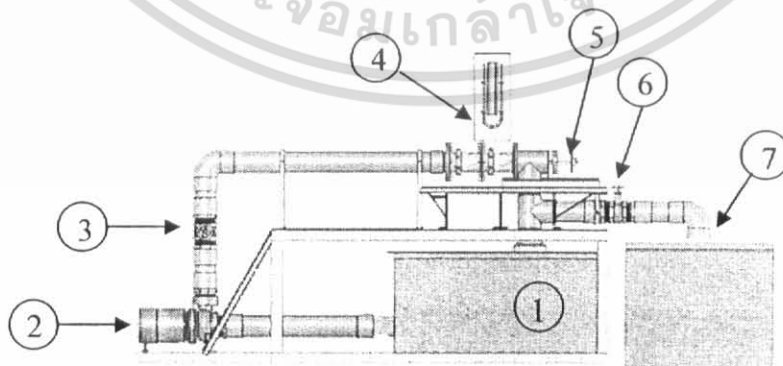
#### 4.1 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์การทดลองของชุดทดลองกังหันน้ำตามแนวแกนแบบหลายชั้นมีดังนี้

1. ใบพัดจำนวน 8 ใบ
2. คู่มือใบพัด 2 อัน
3. ชุดบังคับทิศทางชุดที่ 1
4. ชุดบังคับทิศทางชุดที่ 2
5. อุปกรณ์ปรับมุมใบพัด
6. อุปกรณ์ปรับมุมใบบังคับทิศทาง
7. อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ Tachometer
8. อุปกรณ์ชั่งน้ำหนักที่ 10 kg
9. ประแจ 6 เหลี่ยม เบอร์ 5
10. ประแจแหวน เบอร์ 17
11. เพลาประกอบ 2 ท่อน



รูปที่ 4.1 แสดงชุดทดลองหลัก



รูปที่ 4.2 แสดงส่วนประกอบของชุดทดลองหลัก

ชุดทดลองหลักมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ถังเก็บน้ำ
2. ป้อนน้ำ
3. ประคบน้ำ สำหรับปรับอัตราการไหล
4. U-tube
5. หน้าจาวัดแรงบิด
6. ประคบน้ำ สำหรับปรับกระแสน้ำลงถึงวัดอัตราการไหล
7. ชุดอุปกรณ์วัดอัตราการไหล



รูปที่ 4.3 แสดงชุดบังคับทิศทางและอุปกรณ์ปรับมุม

รูปที่ 4.4 แสดงอุปกรณ์วัดค่าต่างๆ

รูปที่ 4.5 แสดงใบพัด คู่มือใบพัด และ อุปกรณ์ปรับมุมใบพัด

#### 4.2 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองของชุดอุปกรณ์การทดลองกั้นน้ำตามแนวแกนแบบหลายชั้นมีดังนี้

1. จัดเตรียมอุปกรณ์
2. ทำการประกอบใบพัดเข้ากับคู่มือใบพัดทั้ง 2 ชุด
3. ปรับมุมใบพัดให้ได้ตามที่ต้องการ
4. นำคู่มือใบพัดชุดที่ 2 ที่ทำการประกอบใบพัด ติดตั้งกับชุดท้ายของชุดทดลองหลัก
5. นำชุดใบพัดบังคับทิศทางชุดที่ 2 ติดตั้งกับชุดท้ายของชุดทดลองหลัก
6. นำคู่มือใบพัดชุดที่ 1 ที่ทำการประกอบใบพัด ติดตั้งกับคู่มือใบพัดชุดที่ 2
7. นำชุดใบพัดบังคับทิศทางชุดที่ 1 ติดตั้งกับชุดใบพัดบังคับทิศทางชุดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. นำชุดทำที่ประกอบด้วย ชุดใบพัดบังคับทิศทางชุดที่ 1, 2 และ คุมใบพัดชุดที่ 1, 2 ติดตั้งเข้ากับชุดทดลองหลักด้านหน้า
9. ปรับมุมใบพัดทิศทางให้ได้ตามที่ต้องการ
10. เปิดปั้มน้ำ
11. บันทึกค่าต่างๆ ต่อไปนี้
  - 11.1 ความดันก่อนเข้าสู่ใบบังคับทิศทางชุดที่ 1
  - 11.2 ความดันตกร้อมก่อนเข้าใบบังคับทิศทางชุดที่ 1 และออกจากคุมใบพัดชุดที่ 2
  - 11.3 ความเร็วรอบโดยอุปกรณ์วัดความเร็วรอบ
  - 11.4 น้ำหนักที่ได้จากการหมุนของเพลา
  - 11.5 อัตราการไหลของน้ำ
12. ทำการเปลี่ยนมุม และทำการทดลองซ้ำจนครบตามที่ต้องการ



รูปที่ 4.6 แสดงการประกอบชุดใบพัด



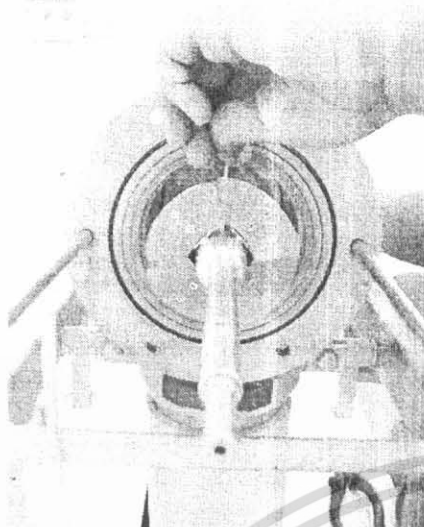
รูปที่ 4.7 แสดงการใช้อุปกรณ์ปรับมุมปรับมุมใบพัด



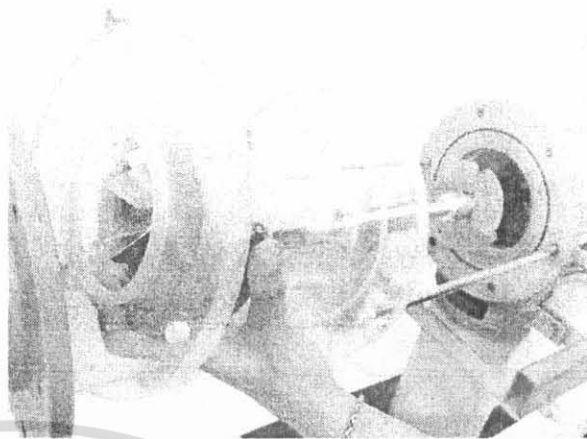
รูปที่ 4.8 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ปรับมุม รูปที่ 4.9 แสดงการปรับมุมชุดบังคับทิศทาง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงการติดตั้งชุดใบพัดชุดที่ 2

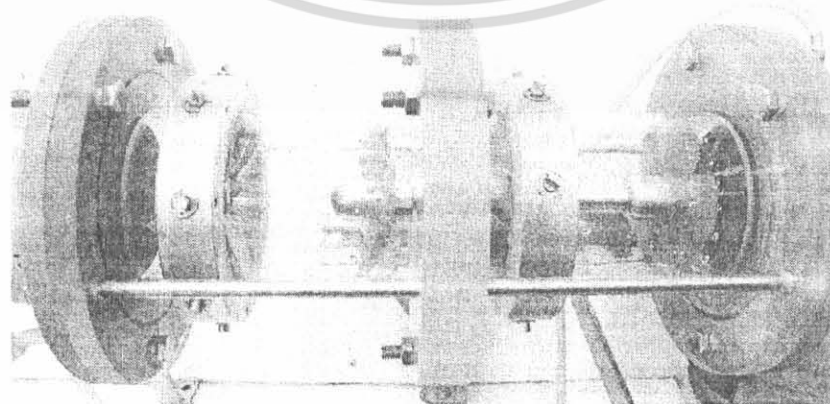


รูปที่ 4.11 แสดงการติดตั้งชุดบังคับทิศทางชุดที่ 2



รูปที่ 4.12 แสดงการติดตั้งชุดใบพัดชุดที่ 1

รูปที่ 4.13 แสดงการติดตั้งชุดบังคับทิศทางชุดที่ 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 4.14 แสดงชุดกั้นน้ำแบบหลายชั้นที่ติดตั้งสมบูรณ์ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

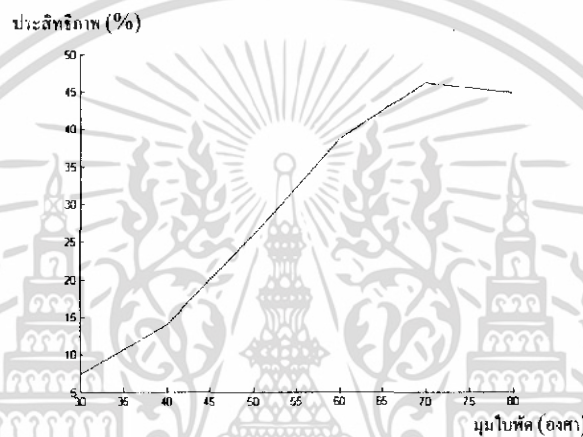
## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

ในบทที่แล้วได้กล่าวถึงอุปกรณ์และขั้นตอนการทดลองไปแล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองโดยการนำข้อมูลที่ทดลองได้ในกรณีต่าง ๆ มาเขียนกราฟเพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์

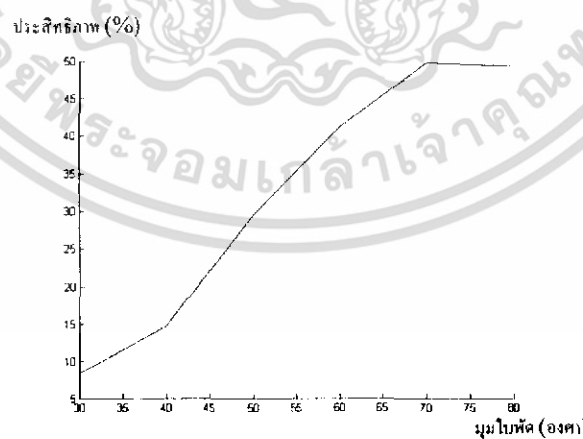
#### 5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ กับมุมใบพัด เมื่อมุมใบบังคับทิศทางคงที่ที่มุมต่างๆ

ในหัวข้อนี้เราจะทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบบังคับทิศทางคงที่ ที่มุมต่างๆ



รูปที่ 5.1 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบบังคับทิศทางคงที่ที่ 0 องศา อัตราการไหล 1020 liter/min

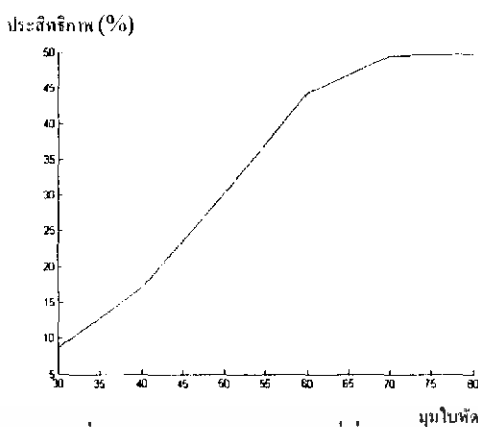
เมื่อมุมใบบังคับทิศทางคงที่ที่ 0 องศา อัตราการไหล 1020 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ 5.1 พบว่า ประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มุมใบพัดปรับที่มุม 73 องศา



รูปที่ 5.2 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบบังคับทิศทางคงที่ที่ 0 องศา อัตราการไหล 1080 liter/min

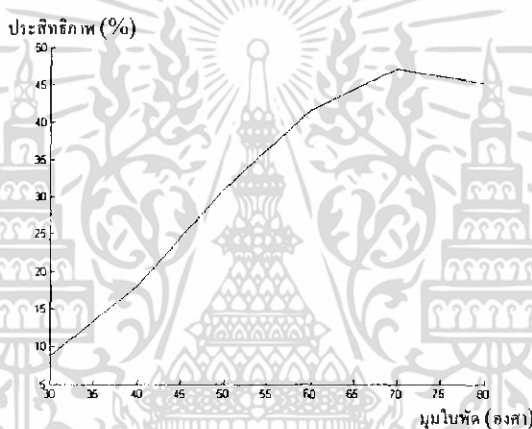
เมื่อมุมใบบังคับทิศทางคงที่ที่ 0 องศา อัตราการไหล 1080 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ 5.5 พบว่า ประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มุมใบพัดปรับที่มุม 74 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



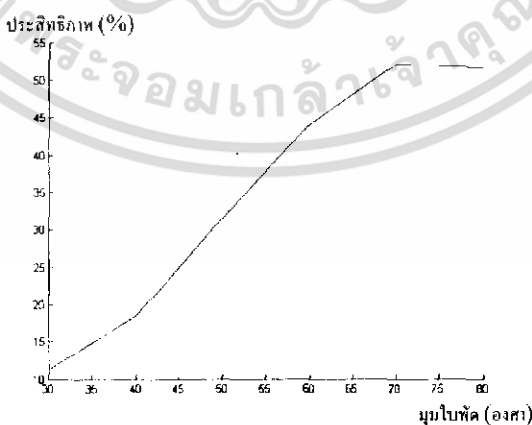
รูปที่ 5.3 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมูมไบบังคับทิศทางคงที่ที่ 0 องศา อัตราการไหล 1200 liter/min

เมื่อมูมไบบังคับทิศทางคงที่ที่ 0 องศา อัตราการไหล 1200 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.9 พบว่า ประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มูมไบพัดปรับที่มูม 75 องศา



รูปที่ 5.4 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมูมไบบังคับทิศทางคงที่ที่ 10 องศา อัตราการไหล 1020 liter/min

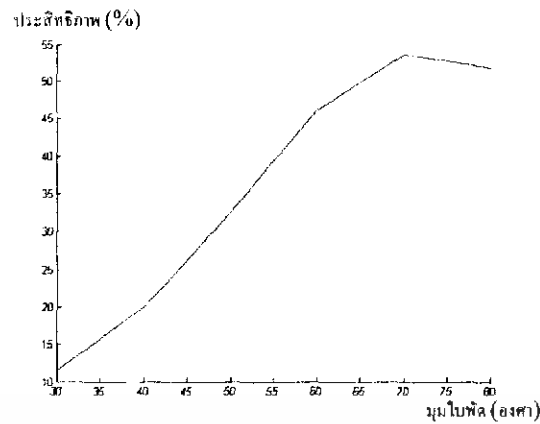
เมื่อมูมไบบังคับทิศทางคงที่ที่ 10 องศา อัตราการไหล 1020 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.2 พบว่า ประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มูมไบพัดปรับที่มูม 72.5 องศา



รูปที่ 5.5 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมูมไบบังคับทิศทางคงที่ที่ 10 องศา อัตราการไหล 1080 liter/min

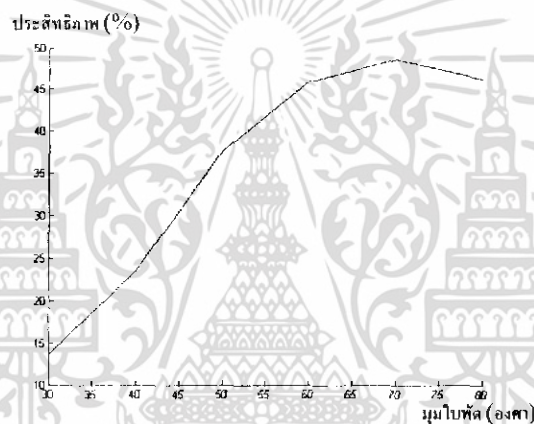
เมื่อมูมไบบังคับทิศทางคงที่ที่ 10 องศา อัตราการไหล 1080 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.6 พบว่า ประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มูมไบพัดปรับที่มูม 74.7 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



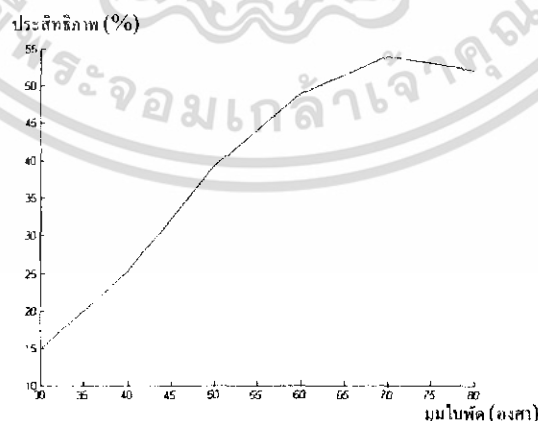
รูปที่ 5.6 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมูมไบบังคับทิศทางคงที่ที่ 10 องศา อัตราการไหล 1200 liter/min

เมื่อมูมไบบังคับทิศทางคงที่ที่ 10 องศา อัตราการไหล 1200 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.10 พบว่า ประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มูมไบพัดปรับที่มุม 75 องศา



รูปที่ 5.7 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมูมไบบังคับทิศทางคงที่ที่ 20 องศา อัตราการไหล 1020 liter/m

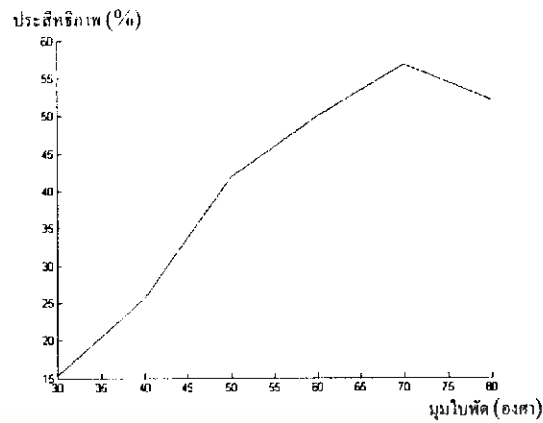
เมื่อมูมไบบังคับทิศทางคงที่ที่ 20 องศา อัตราการไหล 1020 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.3 พบว่า ประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มูมไบพัดปรับที่มุม 70.8 องศา



รูปที่ 5.8 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมูมไบบังคับทิศทางคงที่ที่ 20 องศา อัตราการไหล 1080 liter/m

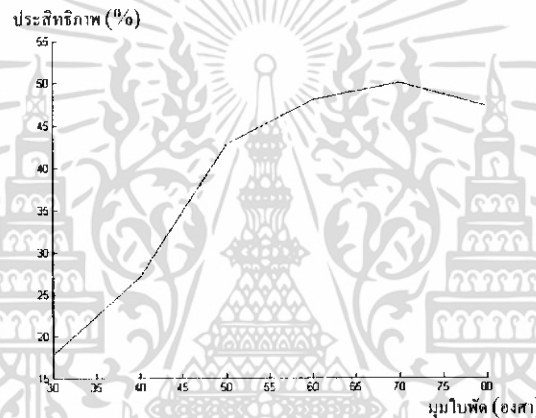
เมื่อมูมไบบังคับทิศทางคงที่ที่ 20 องศา อัตราการไหล 1080 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.7 พบว่า ประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มูมไบพัดปรับที่มุม 71.2 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



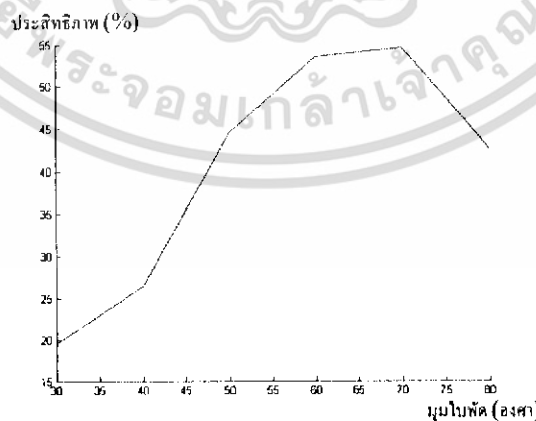
รูปที่ 5.9 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมูมไบบังคับทิศทางคงที่ที่ 20 องศา อัตราการไหล 1200 liter/m

เมื่อมูมไบบังคับทิศทางคงที่ที่ 20 องศา อัตราการไหล 1200 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.11 พบว่า ประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มูมไบพัดปรับที่มุม 71.40 องศา



รูปที่ 5.10 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมูมไบบังคับทิศทางคงที่ที่ 30 องศา อัตราการไหล 1020 liter/m

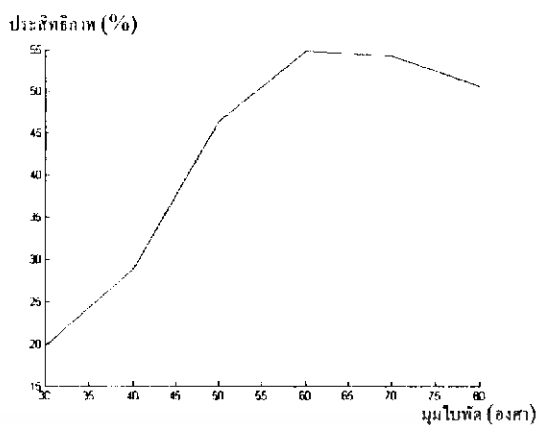
เมื่อมูมไบบังคับทิศทางคงที่ที่ 30 องศา อัตราการไหล 1020 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.4 พบว่า ประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มูมไบพัดปรับที่มุม 69.2 องศา



รูปที่ 5.11 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมูมไบบังคับทิศทางคงที่ที่ 30 องศา อัตราการไหล 1080 liter/m

เมื่อมูมไบบังคับทิศทางคงที่ที่ 30 องศา อัตราการไหล 1080 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.8 พบว่า ประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มูมไบพัดปรับที่มุม 66.8 องศา

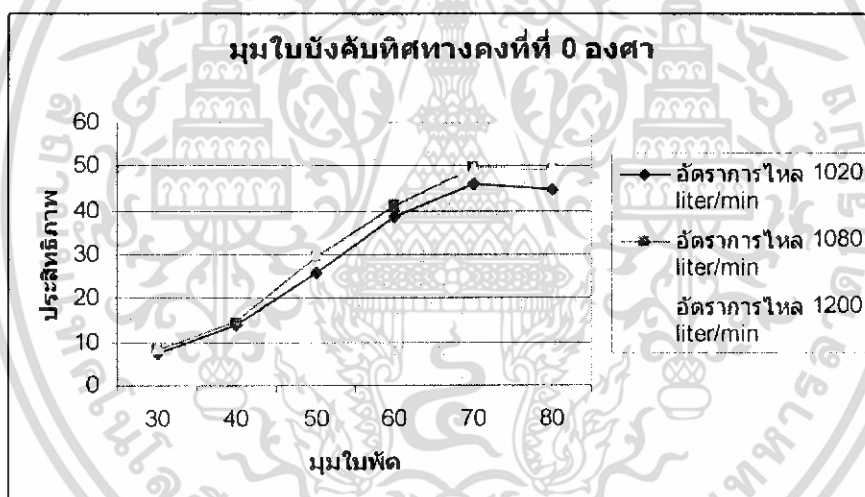
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



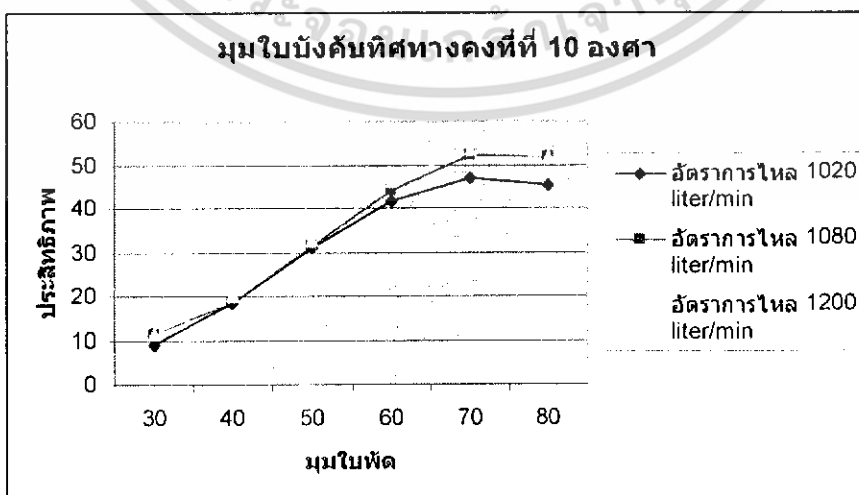
รูปที่ 5.12 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบบังคับทิศทางคงที่ที่ 30 องศา อัตราการไหล 1200 liter/m

เมื่อมุมใบบังคับทิศทางคงที่ที่ 30 องศา อัตราการไหล 1200 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ 5.12 พบว่า ประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มุมใบพัดปรับที่มุม 68.9 องศา

5.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับมุมใบพัดที่อัตราการไหลต่างกัน เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ในกรณีมุมใบบังคับทิศทางคงที่ต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกันจะได้กราฟดังนี้

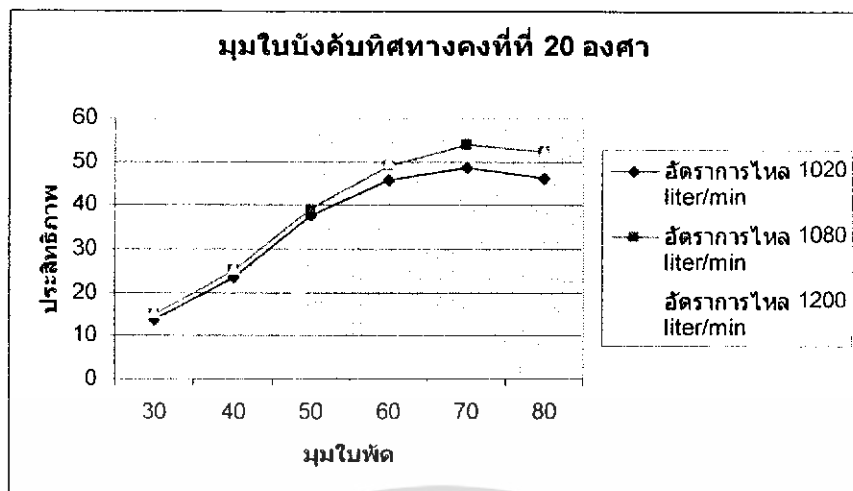


รูปที่ 5.13 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับมุมใบพัดเมื่อมุมใบบังคับทิศทางคงที่ที่ 0 องศา

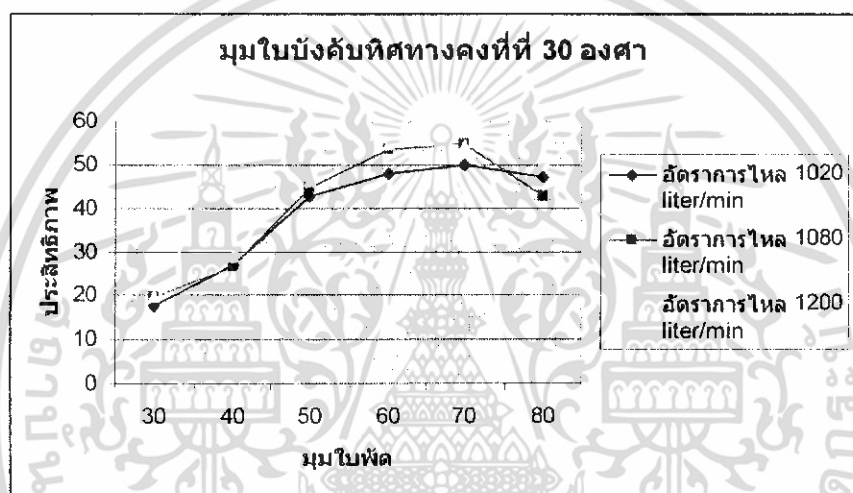


รูปที่ 5.14 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับมุมใบพัดเมื่อมุมใบบังคับทิศทางคงที่ที่ 10 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยูสเซอร์ได้เข้ามาใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



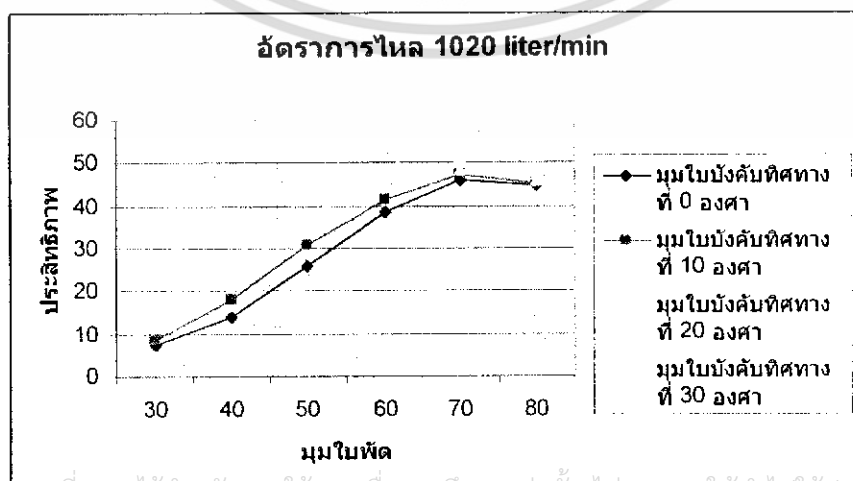
รูปที่ 5.15 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับมุมใบพัดเมื่อมุมใบบังคับทิศทางคงที่ที่ 20 องศา



รูปที่ 5.16 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับมุมใบพัดเมื่อมุมใบบังคับทิศทางคงที่ที่ 30 องศา

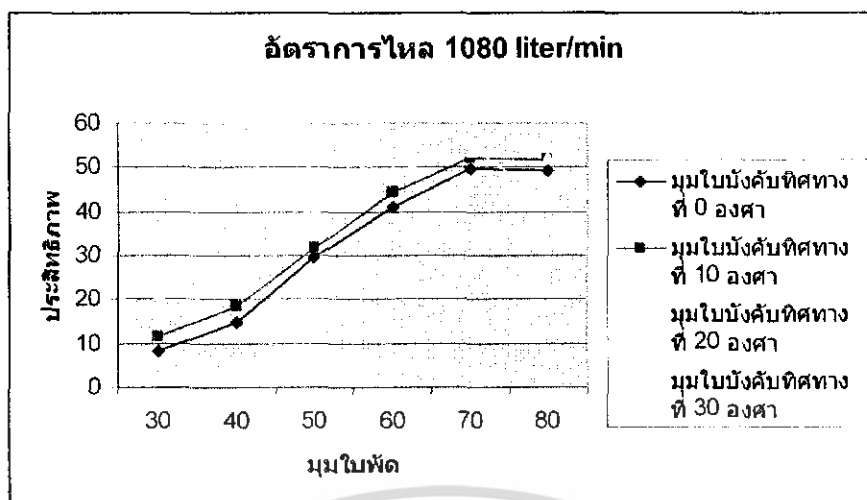
จากกราฟการเปรียบเทียบข้างต้นจะพบว่า เมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลให้สูงขึ้น ประสิทธิภาพจะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เป็นเพราะความเร็วของน้ำเป็นสัดส่วน โดยตรงต่ออัตราการไหลนั่นเอง

5.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับมุมใบพัด ที่มุมใบบังคับทิศทางต่างกัน เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ในกรณีมุมใบบังคับทิศทางคงที่ต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกันจะได้กราฟดังนี้

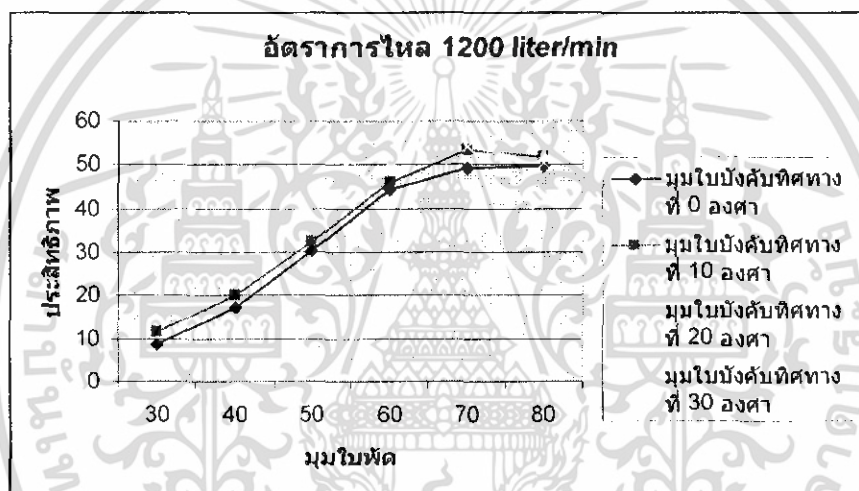


รูปที่ 5.17 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับมุมใบพัดเมื่ออัตราการไหลคงที่ที่ 1020 liter/m

ไม่ว่ากรณีใดๆ พงษ์สิน อักษรหามมีเหตุผลแบล่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



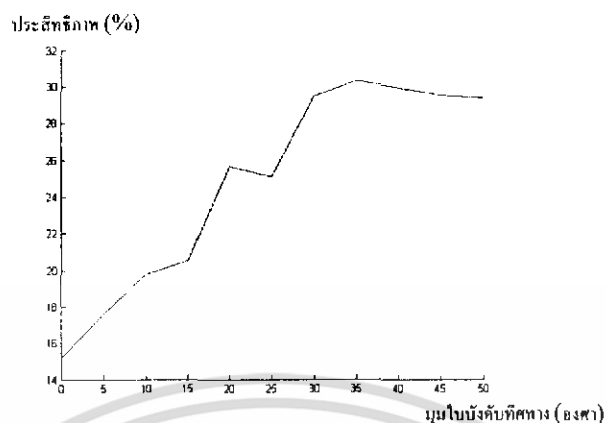
รูปที่ 5.18 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับมุมใบพัดเมื่ออัตราการไหลคงที่ที่ 1080 liter/m



รูปที่ 5.19 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับมุมใบพัดเมื่ออัตราการไหลคงที่ที่ 1200 liter/m

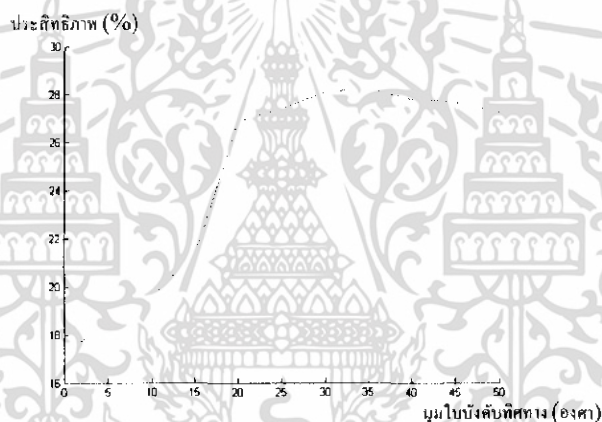
จากกราฟการเปรียบเทียบข้างต้นจะพบว่า เมื่ออัตราการไหลมีค่าคงที่ หากมีการปรับมุมใบบังคับทิศทางให้กระแสน้ำที่เข้ามาถูกเปลี่ยนไปมาก ควรปรับมุมใบพัดให้ทำมุมกับแนวการไหลให้น้อยลง ทั้งนี้ เนื่องจากการลดแรงต้าน ที่มากขึ้นไป

5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ กับมุมใบบังคับทิศทาง เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่มุมต่างๆ  
 ในหัวข้อนี้เราจะทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ ที่มุมต่างๆ



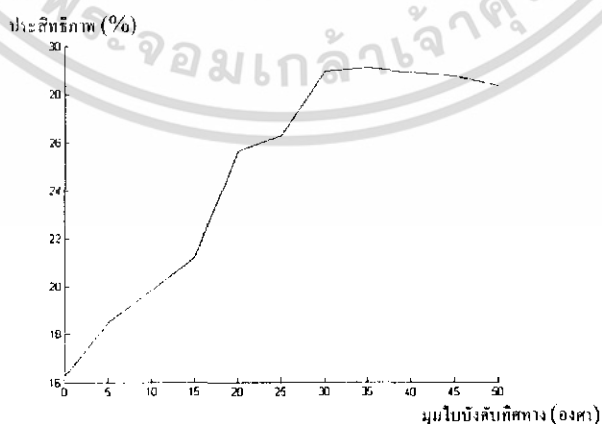
รูปที่ 5.20 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 40 องศา อัตราการไหล 1020 liter/m

เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 40 องศา อัตราการไหล 1020 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.13 พบว่า  
 ประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มุมใบบังคับทิศทางปรับที่มุม 42.1 องศา



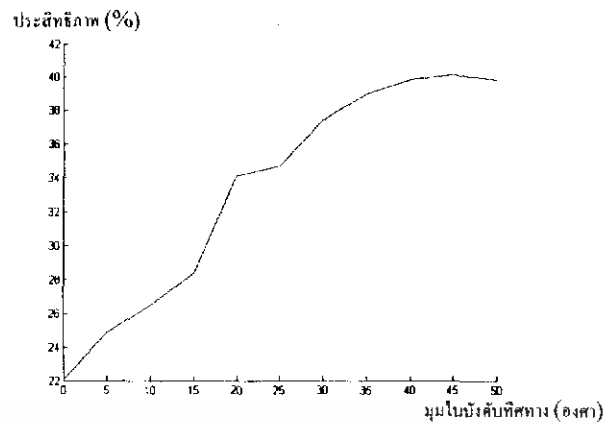
รูปที่ 5.21 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 40 องศา อัตราการไหล 1080 liter/m

เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 40 องศา อัตราการไหล 1080 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.20 พบว่า  
 ประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มุมใบบังคับทิศทางปรับที่มุม 39 องศา



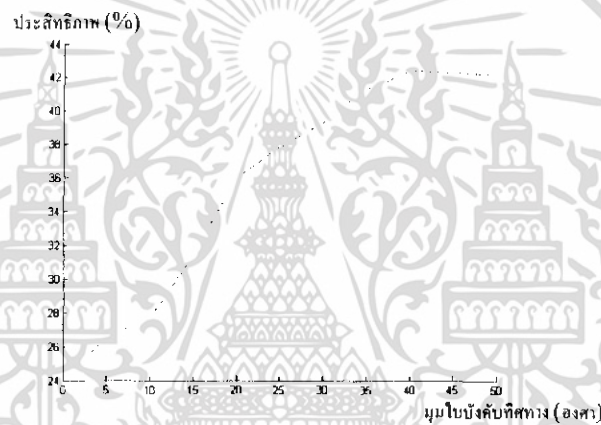
รูปที่ 5.22 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 40 องศา อัตราการไหล 1200 liter/m

เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 40 องศา อัตราการไหล 1200 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.27 พบว่า  
 ประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มุมใบบังคับทิศทางปรับที่มุม 40 องศา  
 เอกสารชิ้นนี้อาจมีลิขสิทธิ์หรือเครื่องหมายการค้าของผู้อื่น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



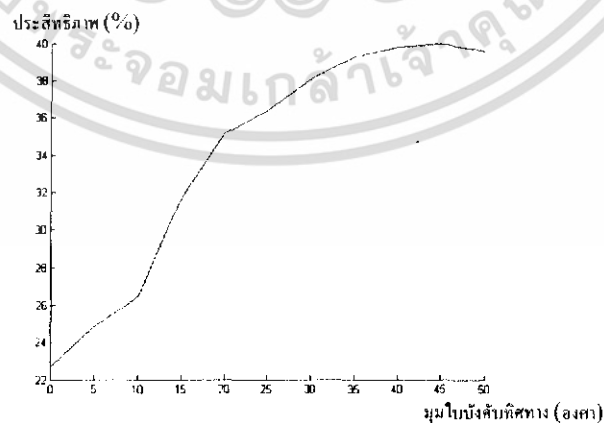
รูปที่ 5.23 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 45 องศา อัตราการไหล 1020 liter/m

เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 45 องศา อัตราการไหล 1020 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.14 พบว่าประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มุมใบบังคับทิศทางปรับที่มุม 44.4 องศา



รูปที่ 5.24 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 45 องศา อัตราการไหล 1080 liter/m

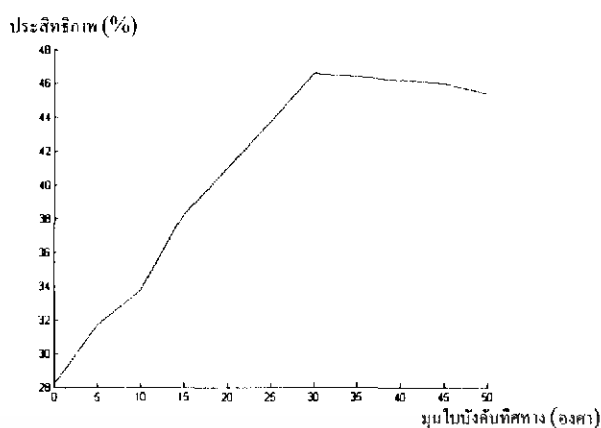
เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 45 องศา อัตราการไหล 1080 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.21 พบว่าประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มุมใบบังคับทิศทางปรับที่มุม 44 องศา



รูปที่ 5.25 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 45 องศา อัตราการไหล 1200 liter/m

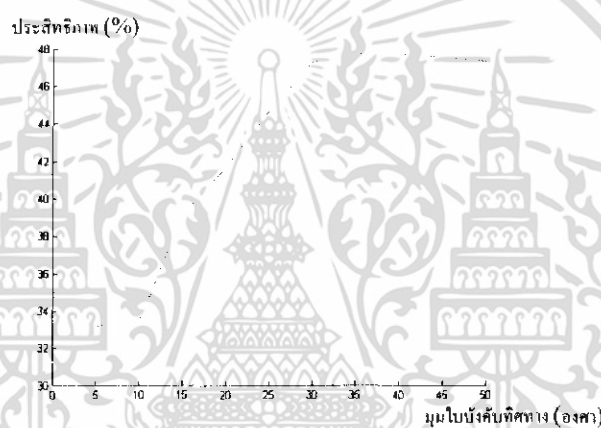
เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 45 องศา อัตราการไหล 1200 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.28 พบว่าประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มุมใบบังคับทิศทางปรับที่มุม 41.8 องศา

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของกรมเจ้าท่า กระทรวงคมนาคม ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



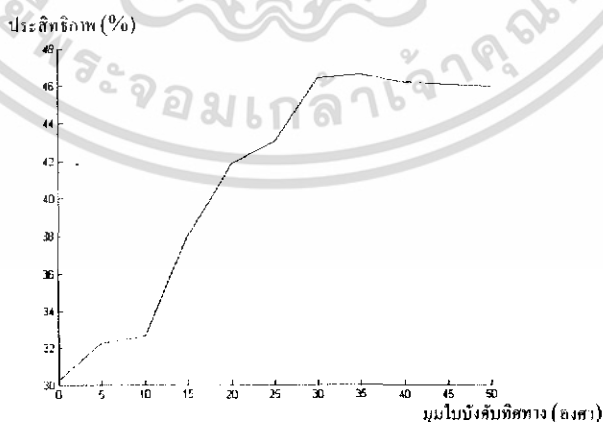
รูปที่ 5.26 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 50 องศา อัตราการไหล 1020 liter/m

เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 50 องศา อัตราการไหล 1020 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.15 พบว่าประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มุมใบกังหันทิศทางปรับที่มุม 40 องศา



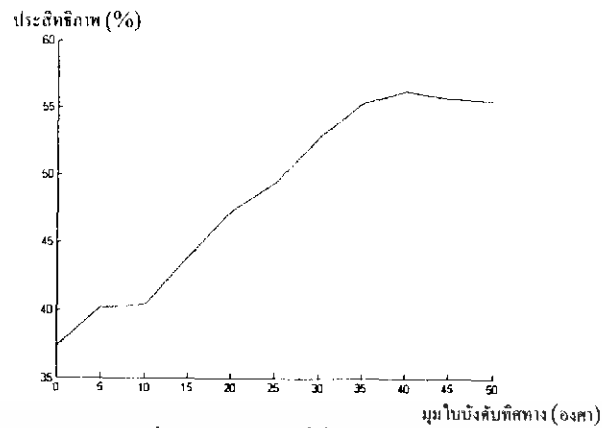
รูปที่ 5.27 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 50 องศา อัตราการไหล 1080 liter/m

เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 50 องศา อัตราการไหล 1080 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.22 พบว่าประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มุมใบกังหันทิศทางปรับที่มุม 41 องศา



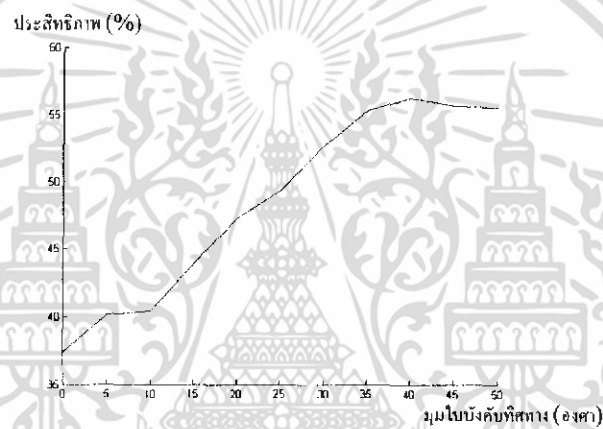
รูปที่ 5.28 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 50 องศา อัตราการไหล 1200 liter/m

เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 50 องศา อัตราการไหล 1200 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.29 พบว่าประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มุมใบกังหันทิศทางปรับที่มุม 40.8 องศา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



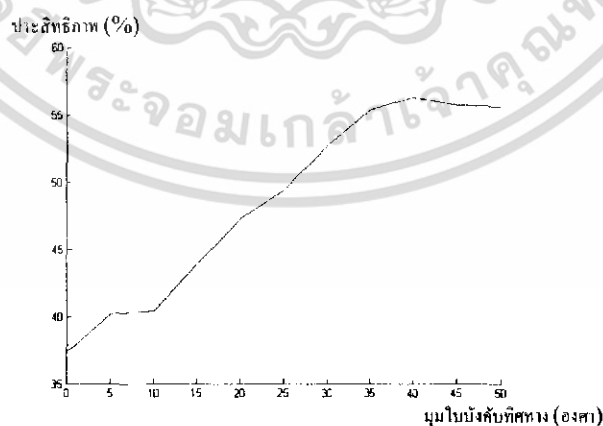
รูปที่ 5.29 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมูมใบพัดคงที่ที่ 55 องศา อัตราการไหล 1020 liter/m

เมื่อมูมใบพัดคงที่ที่ 55 องศา อัตราการไหล 1020 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.16 พบว่าประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มูมใบบังคับทิศทางปรับที่มุม 43.8 องศา



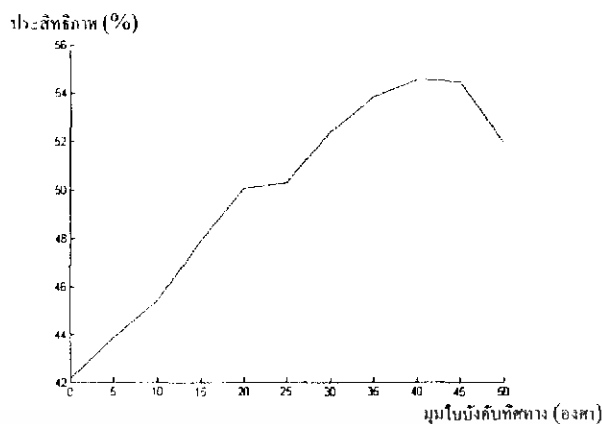
รูปที่ 5.30 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมูมใบพัดคงที่ที่ 55 องศา อัตราการไหล 1080 liter/m

เมื่อมูมใบพัดคงที่ที่ 55 องศา อัตราการไหล 1080 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.23 พบว่าประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มูมใบบังคับทิศทางปรับที่มุม 44 องศา



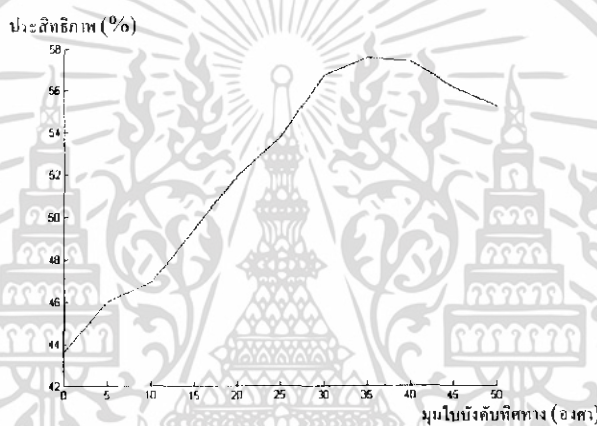
รูปที่ 5.31 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมูมใบพัดคงที่ที่ 55 องศา อัตราการไหล 1200 liter/m

เมื่อมูมใบพัดคงที่ที่ 55 องศา อัตราการไหล 1200 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.30 พบว่าประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มูมใบบังคับทิศทางปรับที่มุม 44 องศา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



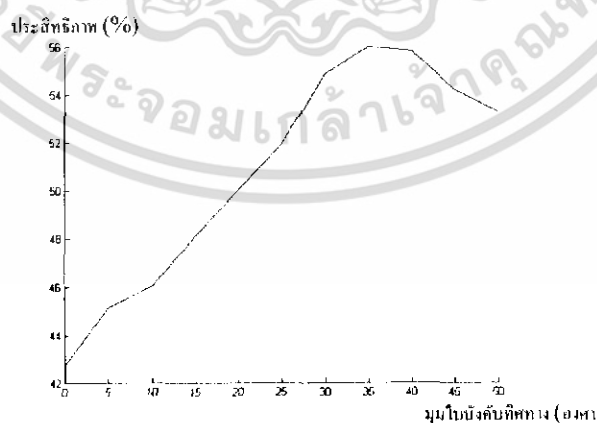
รูปที่ 5.32 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 60 องศา อัตราการไหล 1020 liter/m

เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 60 องศา อัตราการไหล 1020 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.17 พบว่าประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มุมใบบังคับทิศทางปรับที่มุม 40.3 องศา



รูปที่ 5.33 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 60 องศา อัตราการไหล 1080 liter/m

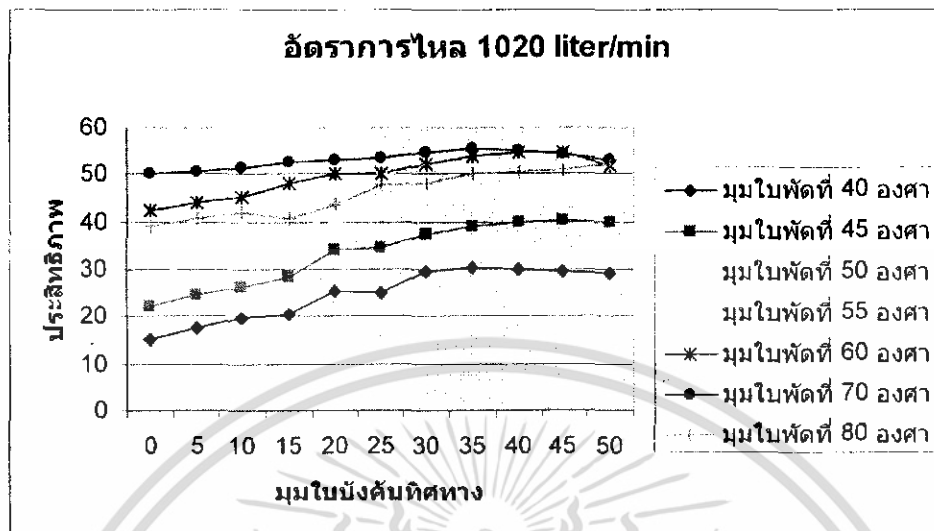
เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 60 องศา อัตราการไหล 1080 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.24 พบว่าประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มุมใบบังคับทิศทางปรับที่มุม 39.2 องศา



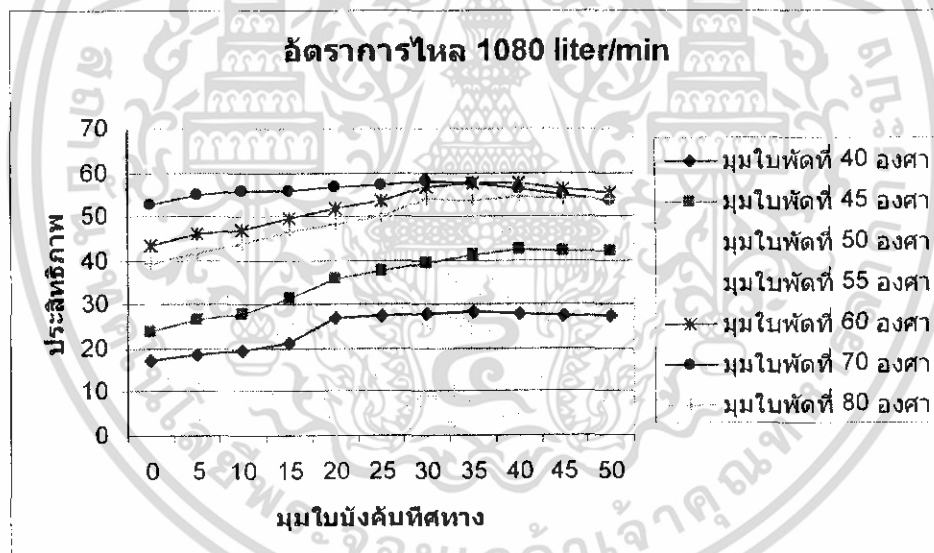
รูปที่ 5.34 กราฟประสิทธิภาพ เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 60 องศา อัตราการไหล 1200 liter/m

เมื่อมุมใบพัดคงที่ที่ 60 องศา อัตราการไหล 1200 liter/min ตามผลการทดลองในตารางที่ ง.31 พบว่าประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ มุมใบบังคับทิศทางปรับที่มุม 40 องศา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับมุมใบบังคับทิศทาง ที่มุมใบพัดต่างกัน เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ในกรณีมุมใบพัดคงที่ต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกับกันจะได้กราฟดังนี้

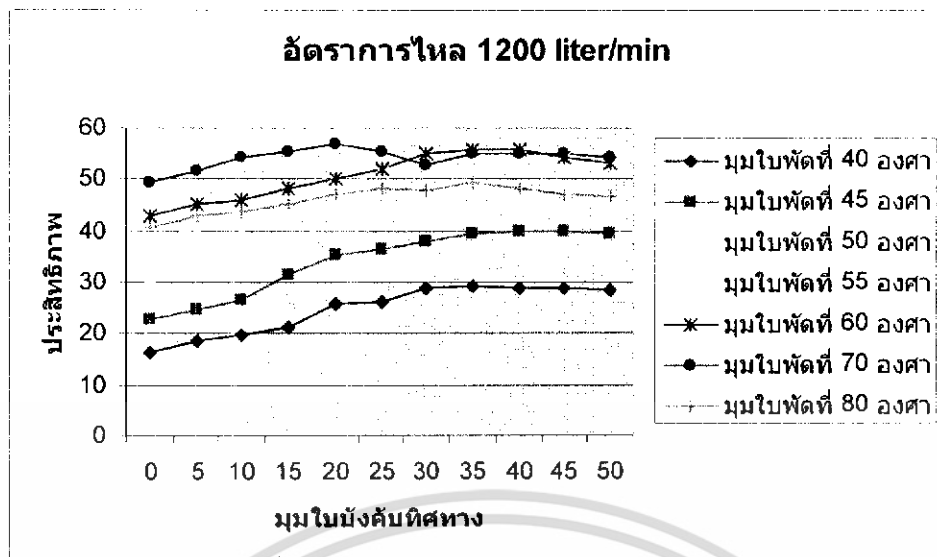


รูปที่ 5.35 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับมุมใบพัดเมื่ออัตราการไหลคงที่ที่ 1020 liter/m



รูปที่ 5.36 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับมุมใบพัดเมื่ออัตราการไหลคงที่ที่ 1080 liter/m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.37 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับมุมใบพัดเมื่ออัตราการไหลคงที่ที่ 1200 liter/m

จากกราฟการเปรียบเทียบข้างต้นจะพบว่า ประสิทธิภาพสูงสุดจะเกิดขึ้นหากใช้ใบพัดไม่เกิน 75 องศา หากปรับมุมใบพัดมากกว่า 75 องศาประสิทธิภาพจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน อันเนื่องมาจากมุมปะทะมากเกินไปทำให้เกิดแรงต้านมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดแรงยกน้อยลง

## บทที่ 6

### สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากได้ทำการทดลองและทราบผลการทดลองมาแล้วนั้น ในบทนี้จะได้กล่าวถึงการสรุปผล ค่าองค์ประกอบต่างๆที่เหมาะสมและทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพที่สูงที่สุด รวมถึงการวิเคราะห์ถึงเหตุผลที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดด้วย

#### 6.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลองเมื่อ มุมใบบังคับทิศทางคงที่

ค่าขององค์ประกอบที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในกรณีมุมใบบังคับทิศทางคงที่ ที่มุมต่างๆ เป็นไปดังตาราง 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงค่ามุมใบพัดที่เหมาะสม เมื่อมุมใบพัดบังคับทิศทางมีค่าคงที่

อัตราการไหล (liter/min)	มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัดที่เหมาะสม (องศา)
1020	0	73
1080	0	74
1200	0	75
1020	10	72.5
1080	10	74.7
1200	10	75
1020	20	70.8
1080	20	71.2
1200	20	71.4
1020	30	69.2
1080	30	66.8
1200	30	68.9

เมื่อกำหนดให้มุมใบบังคับทิศทางมีมุมคงที่ จะพบว่ามุมใบพัดที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงสุดนั้น จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น เนื่องจากความเร็วของของไหลมีค่าสูงขึ้น

เมื่อมีการปรับมุมใบบังคับทิศทางให้ทำมุมปะทะเพิ่มขึ้น (attack angle of guide vane มีค่ามากขึ้น) ควรปรับมุมใบพัดให้ทำมุมน้อยลง (attack angle of runner มีค่าน้อยลง) เพื่อไม่ให้เกิดแรงต้านมากเกินไปจนทำให้เกิดการลดลงของประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลองเมื่อ มุมใบพัดคงที่

ค่าขององค์ประกอบที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในกรณีมุมใบพัดคงที่ ที่มุมต่างๆเป็นไปดัง

ตาราง 6.2

ตารางที่ 6.2 แสดงค่ามุมใบพัดบังคับทิศทางที่เหมาะสม เมื่อมุมใบพัดมีค่าคงที่

อัตราการไหล (liter/min)	มุมใบพัด (องศา)	มุมใบบังคับทิศทางที่ เหมาะสม (องศา)
1020	40	42.1
1080	40	39
1200	40	40
1020	45	44.4
1080	45	44
1200	45	41.8
1020	50	40
1080	50	41
1200	50	40.8
1020	55	43.8
1080	55	44
1200	55	44
1020	60	40.3
1080	60	39.2
1200	60	40

จากรูปการเปรียบเทียบข้างต้นจะพบว่า ประสิทธิภาพสูงสุดจะเกิดขึ้นหากใช้ใบพัดไม่เกิน 75 องศา หากปรับมุมใบพัดมากกว่า 75 องศาประสิทธิภาพจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน อันเนื่องมาจากมุมปะทะมากเกินไปทำให้เกิดแรงต้านมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดแรงยกน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บรรณานุกรม

- [1] มนตรี พิรุณกษตร. 2547. กลศาสตร์ของไหล. วิทยพัฒน์ จำกัด.
- [2] เสรี ศุภาทิตย์. 2546. กลศาสตร์ของไหล. มหาวิทยาลัยรังสิต.
- [3] วีระชัย ถิมพรชัยเจริญ และพงศักดิ์ ชินนาบุญ. 2544. กลศาสตร์ของไหล. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [4] สุธรรม นียมवास และบัญญัติ นียมवास 2549. เครื่องจักรกลของไหล. วิทยพัฒน์ จำกัด.
- [5] Doble WA. The Tangential Water Wheel. Transactions of the American Institute of Mining Engineers. Vol. XXIX. 1899
- [6] Durrand WF. The Pelton Water Wheel. Stanford University. Mechanical Engineering. 1939
- [7] Rao NS. Fluid Flow Machines. McGraw-Hill. 1984



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.  
ค่าคงที่ในการคำนวณ

ค่าคงตัวของ เฮเซน-วิลเลียมส์ เป็นค่าที่จำเป็นในการออกแบบชุดทดลอง จึงได้รวบรวมค่าที่จำเป็นไว้ดังนี้








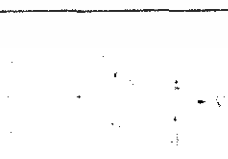
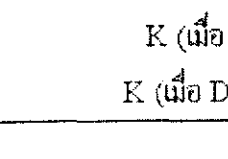
ตารางที่ ค.1 ค่าคงตัวของเฮเซน-วิลเลียมส์ (C)

ชนิดของท่อ	ช่วง(m)	ท่อขนาด(m)	C ใช้ออกแบบ
เหล็กกล้า (steel)			
เหล็กเชื่อมไว้รอยต่อ (welded and seamless)	80-150	140	100
เหล็ก (iron)			
เหล็กหล่อ (cast iron)	80-150	130	100
เหล็กพืด (wrought iron)	80-150	130	100
อื่น ๆ (miscellaneous)			
เส้นใย (fiber)		150	140
ทองแดงและทองเหลือง (copper and brass)	120-150	140	130
ตะกั่ว ดีบุก แก้ว (lead, tin, glass)	120-150	140	130
พลาสติก (plastic)	120-150	140	130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย เป็นค่าที่จำเป็นในการออกแบบชุดทดลอง จึงได้รวบรวมค่าที่จำเป็นไว้ดังนี้

ตารางที่ ๖ : ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย K

1.		$K = 0.50$
2.		$R/D = 0.05 \quad 0.1 \quad 0.2 \quad 0.3 \quad 0.4$ $K = 0.25 \quad 0.17 \quad 0.08 \quad 0.05 \quad 0.04$
3.		$K = 0.8$
4.		$K = 0.505 + 0.303 \sin \alpha + 0.226 \sin^2 \alpha$
5.		$h_f = \left(1 - \frac{V_2}{V_1}\right) \frac{V_1^2}{2g}$
6.		$(d/D)^2 = 0.01 \quad 0.1 \quad 0.2 \quad 0.4 \quad 0.6 \quad 0.8$ $K = 0.5 \quad 0.5 \quad 0.42 \quad 0.33 \quad 0.25 \quad 0.15$
7.		$h_f = K \left( \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} \right)$ $\alpha' = 20 \quad 40 \quad 60 \quad 80$ $K = 0.20 \quad 0.28 \quad 0.32 \quad 0.35$
8.		$h_f = K \left( \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} \right)$ $\alpha' = 6 \quad 10 \quad 20 \quad 40 \quad 60 \quad 80 \quad 100$ $K \text{ (เมื่อ } D = 3d) = 0.12 \quad 0.16 \quad 0.39 \quad 0.80 \quad 1.0 \quad 1.06 \quad 1.04$ $K \text{ (เมื่อ } D = 1.5d) = 0.12 \quad 0.16 \quad 0.39 \quad 0.96 \quad 1.22 \quad 1.16 \quad 1.10$
9.		$K = 67.6 \times 10^{-6} (\alpha')^{2.17}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.	$K = \left( 0.13 + 1.85 \left( \frac{r}{R} \right)^{3.5} \right) \sqrt{\frac{\alpha^\circ}{180^\circ}}$																				
11.	$K = 2.2$																				
12.	$K = 1.0$																				
13.	<p>ประตูน้ำ (gate valve)</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>e/D =</td> <td>0</td> <td>1/4</td> <td>3/8</td> <td>1/2</td> <td>5/8</td> <td>3/4</td> <td>7/8</td> </tr> <tr> <td>K =</td> <td>0.15</td> <td>0.26</td> <td>0.81</td> <td>2.06</td> <td>5.52</td> <td>17.0</td> <td>97.8</td> </tr> </tbody> </table>	e/D =	0	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8	K =	0.15	0.26	0.81	2.06	5.52	17.0	97.8				
e/D =	0	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8														
K =	0.15	0.26	0.81	2.06	5.52	17.0	97.8														
14.	<p>โรตารีวาล์ว (rotary valve)</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td><math>\alpha^\circ =</math></td> <td>5</td> <td>10</td> <td>20</td> <td>30</td> <td>40</td> <td>50</td> <td>60</td> <td>70</td> <td>80</td> </tr> <tr> <td>K =</td> <td>0.05</td> <td>0.29</td> <td>1.56</td> <td>5.47</td> <td>17.3</td> <td>52.6</td> <td>206</td> <td>485</td> <td><math>\infty</math></td> </tr> </tbody> </table>	$\alpha^\circ =$	5	10	20	30	40	50	60	70	80	K =	0.05	0.29	1.56	5.47	17.3	52.6	206	485	$\infty$
$\alpha^\circ =$	5	10	20	30	40	50	60	70	80												
K =	0.05	0.29	1.56	5.47	17.3	52.6	206	485	$\infty$												
15.	<p>วาล์วกันกลับ (เปิดสุด) (check valve (fully open))</p> <p>แบบสวิง (swing type) <math>K = 0.25</math></p> <p>แบบลูกปืน (ball type) <math>K = 0.75</math></p> <p>แบบลิฟต์ (lift type) <math>K = 12.0</math></p>																				
16.	<p>ข้อมุด (elbow)</p> <p>90° (ปกติ) แบบหน้าแปลน <math>K = 0.3</math></p> <p>90° (ปกติ) แบบเกลียว <math>K = 1.5</math></p> <p>90° (รัศมีสั้น) <math>K = 0.9</math></p> <p>90° (รัศมีปานกลาง) <math>K = 0.75</math></p> <p>90° (รัศมียาว) <math>K = 0.6</math></p> <p>45° <math>K = 0.42</math></p>																				
17.	<p>ข้อต่อสามทาง (tee)</p> <p>โหลในแนวเดิม, แบบหน้าแปลน <math>K = 0.2</math></p> <p>โหลในแนวเดิม, แบบเกลียว <math>K = 0.9</math></p>																				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลแยก, แบบหน้าแปลน	$K = 1.0$
ไหลแยก, แบบเกลียว	$K = 2.0$
18. เกตวาล์ว (gate valve)	
เปิดเต็มที่	$K = 0.1$
เกตวาล์วปิด $\frac{1}{4}$	$K = 0.2$
เกตวาล์วปิด $\frac{3}{8}$	$K = 0.8$
เกตวาล์วปิด $\frac{1}{2}$	$K = 2.0$
เกตวาล์วปิด $\frac{5}{8}$	$K = 5.5$
เกตวาล์วปิด $\frac{3}{4}$	$K = 17.0$
เกตวาล์วปิด $\frac{7}{8}$	$K = 97.8$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

## ผลการวิเคราะห์รูปร่างและสร้างใบพัด

จากการคำนวณหารูปร่างของใบพัด ด้วยวิธีการคำนวณในบทที่ 2 นั้น ผลที่ได้เป็นรูปร่างของหน้าตัด ด้านใกล้ดุมและไกลดุม ดังตารางที่ ข.1 และข.2 ดังนี้

ตารางที่ ข.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความยาวและความหนาของใบพัด หน้าตัดใบพัดด้านใกล้ดุม ระยะคอर्ड = 31.4159 mm.

ความยาว Chord (%)	ความหนาของใบพัด (mm.)
0.5	0.242530748
0.75	0.292796188
1.25	0.367251871
2.5	0.494486266
5.0	0.683924143
7.5	0.8401
10	0.95504336
15	1.151706894
20	1.30156737
25	1.414657977
30	1.49539684
35	1.546918916
40	1.569538364
45	1.559171117
50	1.511733108
55	1.42314027
60	1.302503214
65	1.156733438
70	0.991485804
75	0.811786856
80	0.624233933
85	0.435110215
90	0.25446879
95	0.096132654

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความยาวและความหนาของใบพัด หน้าตัดใบพัดด้าน  
 ไกลดุม ระยะคอर्ड = 106.3925 mm.

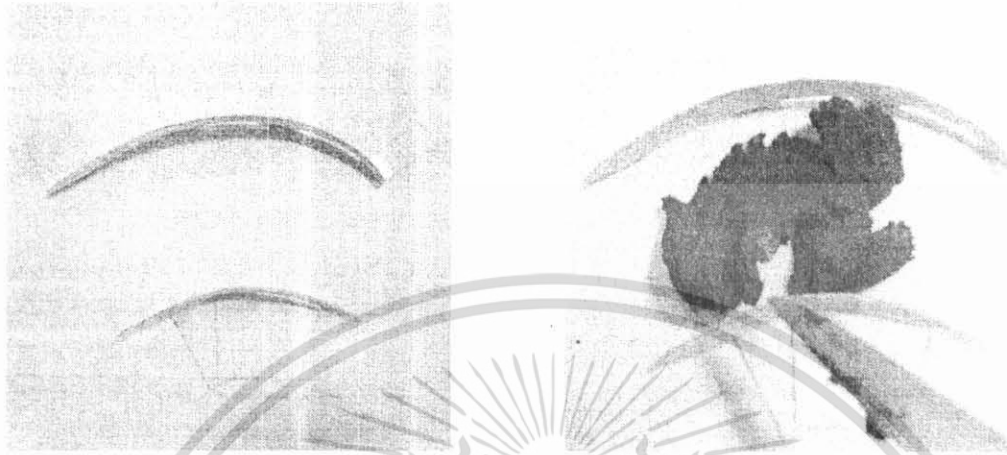
ความยาว Chord (%)	ความหนาของใบ(mm.)
0.5	0.821370944
0.75	0.991603264
1.25	1.243759888
2.5	1.674660448
5.0	2.316883504
7.5	2.845007648
10	3.23441408
15	3.900448032
20	4.407953136
25	4.790975856
30	5.06441152
35	5.238899648
40	5.315504192
45	5.280393776
50	5.119737024
55	4.81970256
60	4.411144992
65	3.917671264
70	3.357832512
75	2.749251968
80	2.114072624
85	1.47357352
90	0.86180112
95	0.325569312

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ขั้นตอนการสร้างใบพัด

หลังจากการคำนวณหารูปร่างของใบพัดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการลงมือสร้างใบพัดต้นแบบที่จะใช้ในการทดลองต่อไป โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

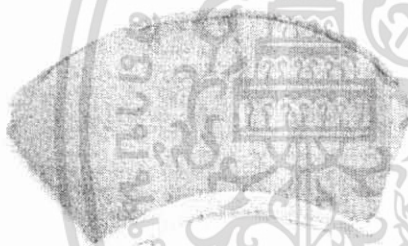
1. สร้างต้นแบบจากปูนปลาสเตอร์ให้เป็นรูปใบพัดตามที่ได้คำนวณไว้



รูปที่ ข.1 แสดงการวางขอบบนและล่างของใบพัด



รูปที่ ข.2 แสดงการปั้นแม่แบบ



รูปที่ ข.3 แสดงการจัดตั้งชิ้นงาน



รูปที่ ข.4 แสดงชิ้นงานแม่แบบที่สมบูรณ์

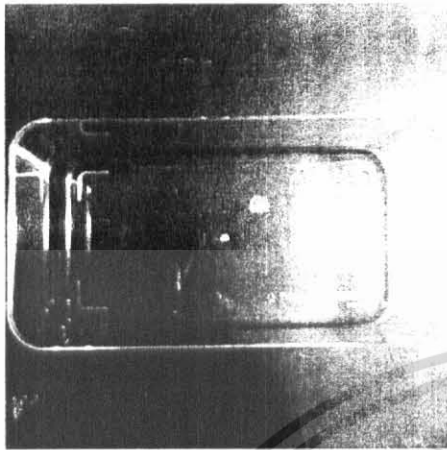


รูปที่ ข.5 แสดงการประกอบช่องเทอร์ซีนเข้ากับใบพัด

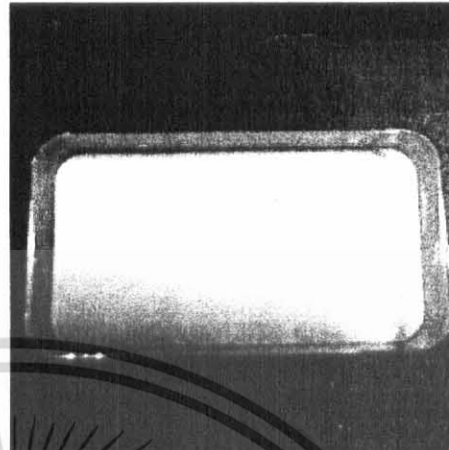
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สร้างโมลซิลิโคน

- 1.1 ผสมยางซิลิโคนกับ ฮาร์ดเดนเนอร์ในอัตราส่วน 1:0.3
- 1.2 เทซิลิโคนที่ผสมไว้แล้วลงไปครึ่งหนึ่งของกล่องแบบ



รูปที่ ข.6 จัดเตรียมภาชนะสำหรับเทซิลิโคน  
ครึ่งล่าง



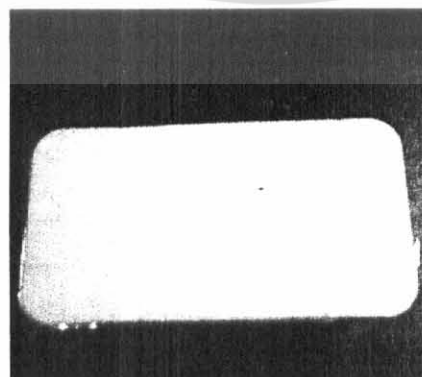
รูปที่ ข.7 แสดงการเทซิลิโคนสำหรับแม่แบบ

- 1.3 รอจนซิลิโคนอยู่ที่ตัวแล้ววางใบพัดคั่นแบบ โดยกดลงไปครึ่งหนึ่งของใบ



รูปที่ ข.8 แสดงการจัดวางคั่นแบบลงบนแม่แบบซิลิโคน

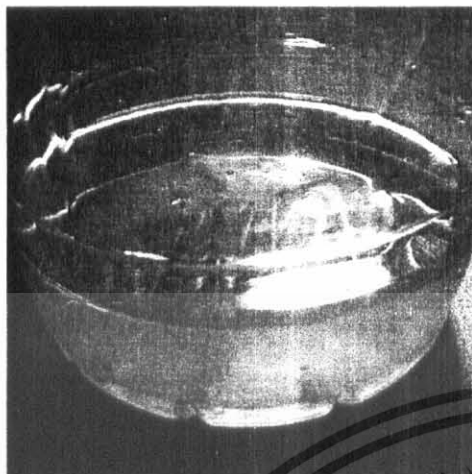
- 1.4 เทซิลิโคนที่ผสมแล้วทับลงไปให้เต็มกล่องแบบ รอให้แห้งแล้วถอดออกจากกล่องแบบ



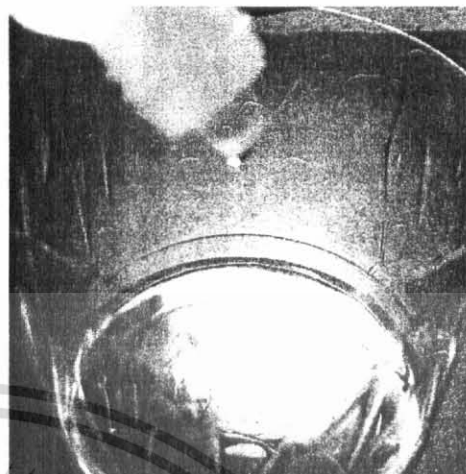
รูปที่ ข.9 แสดงการเทซิลิโคนสำหรับแม่แบบส่วนบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ถอดโมลเพื่อนำใบพัดต้นแบบออกมา พร้อมในการหล่อใบพัด
3. ผสมเรซินกับฮาร์ดเด็นเนอรัในอัตราส่วน 1:0.3



รูปที่ ข.10 แสดงการจัดเตรียมเรซิน



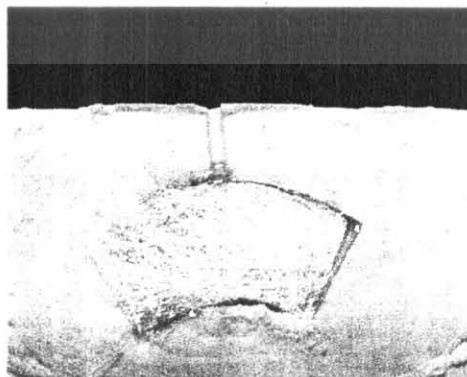
รูปที่ ข.11 แสดงการผสมเรซินเข้ากับฮาร์ดเด็นเนอรั

4. เทเรซินที่ผสมแล้วลงไปครึ่งหนึ่งของโมล



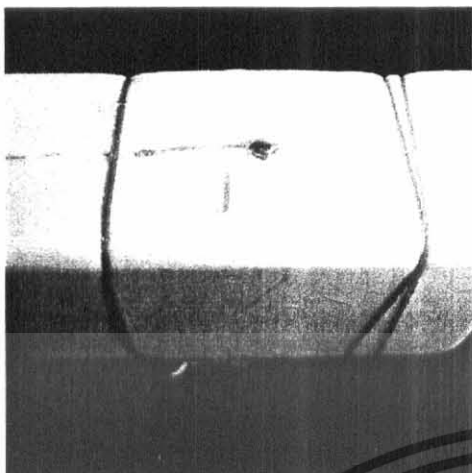
รูปที่ ข.12 แสดงการเทเรซินลงในแม่แบบครึ่งหนึ่ง

5. ตัดไฟเบอร์กลาสให้พอดีกับใบต้นแบบไปวางไว้ในโมล

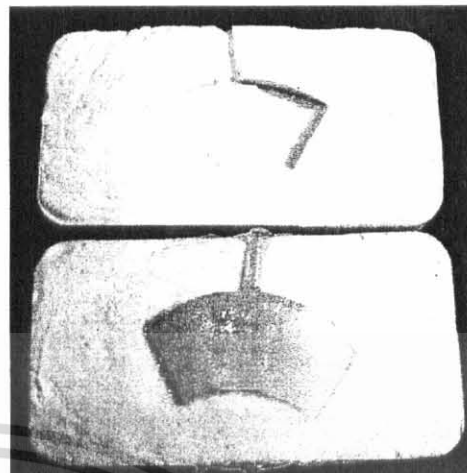


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ ข.13 แสดงการวางไฟเบอร์กลาสลงบนเรซินที่เทไว้ก่อนหน้านี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เทเรซินที่ผสมแล้วลงไปน โมลจนเต็มรอยจเรชินแห่งจิงกะโมลออก

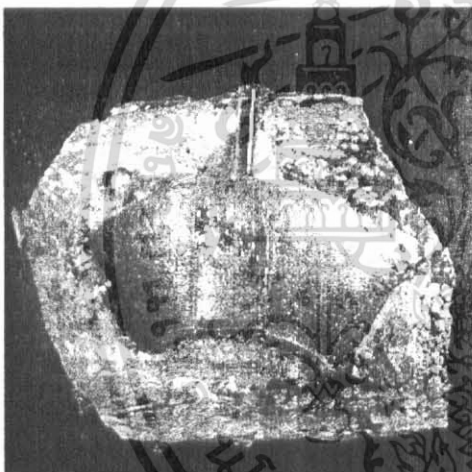


รูปที่ ข.14 แสดงการประกอบแม่แบบส่วนบนและล่าง

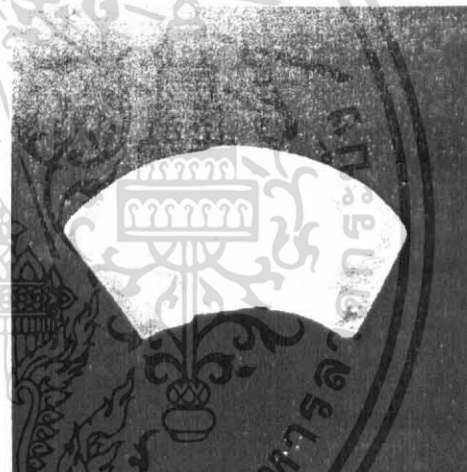


รูปที่ ข.15 แสดงการเปิดแม่แบบเพื่อถอดชิ้นงาน

7. นำใบพัดที่หล่อได้ในข้อ 7 มาตกแต่งให้เรียบร้อย



รูปที่ ข.16 แสดงชิ้นงานเรซินที่ถอดจากแม่แบบ



รูปที่ ข.17 แสดงใบพัดเรซินที่ผ่านการแต่งชิ้นงานแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค.

## ผลการวิเคราะห์และการใช้โปรแกรมออกแบบใบบังคับทิศทาง

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 นั้นถึงการออกแบบใบบังคับทิศทาง โดยใช้โปรแกรม DesignFOIL ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม มีดังนี้

ตารางที่ ค.1 ตัวเลขที่แสดงเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของความยาวเส้นคอร์ดเมื่อเส้น Deformable Chamber

Line คงที่ค่า Chamber Y = 10%

Chamber X	Coefficient of Lift	Coefficient of Drag
0.1	0.663	0.0320
0.2	0.162	0.0359
0.3	0.078	0.0472
0.4	0.044	0.0420
0.5	- 0.022	0.0452
0.6	- 0.087	0.0485
0.7	- 0.187	0.0597
0.8	- 0.261	0.0757
0.9	- 0.399	0.1074

ตารางที่ ค.2 ตัวเลขที่แสดงเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของความยาวเส้นคอร์ดเมื่อเส้น Deformable Chamber

Line คงที่ค่า Chamber Y = 20%

Chamber X	Coefficient of Lift	Coefficient of Drag
0.1	0.576	0.0403
0.2	0.069	0.0421
0.3	- 0.014	0.0553
0.4	- 0.024	0.0564
0.5	- 0.072	0.0502
0.6	- 0.155	0.0739
0.7	- 0.244	0.0837
0.8	- 0.325	0.1028
0.9	- 0.250	0.1243

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ตัวเลขที่แสดงเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของความยาวเส้นคอร์ด์เมื่อเส้น Deformable Chamber  
Line คงที่ค่า Chamber Y = 30%

Chamber X	Coefficient of Lift	Coefficient of Drag
0.1	0.499	0.0423
0.2	0.026	0.0706
0.3	- 0.012	0.0721
0.4	- 0.129	0.0752
0.5	- 0.202	0.0584
0.6	- 0.295	0.0601
0.7	- 0.357	0.1036
0.8	- 0.398	0.0954
0.9	- 0.515	0.1348

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมพบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ค่าคุณสมบัติ

Chamber X = 10%

Chamber Y = 40%

ได้ใบบังคับทิศทางมีลักษณะดังนี้

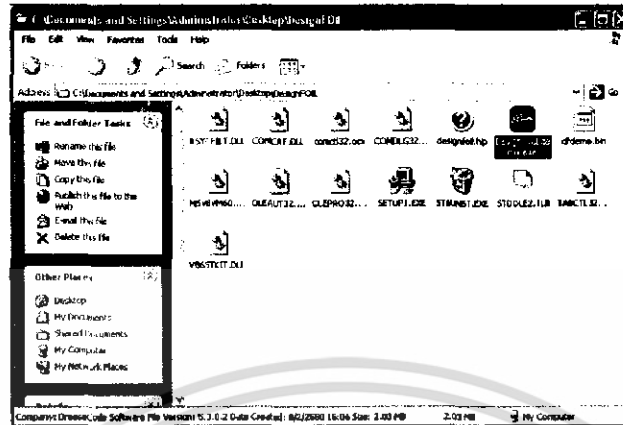


รูปที่ ค.1 แสดงลักษณะแผนอากาศของใบบังคับทิศทางที่ได้จากการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

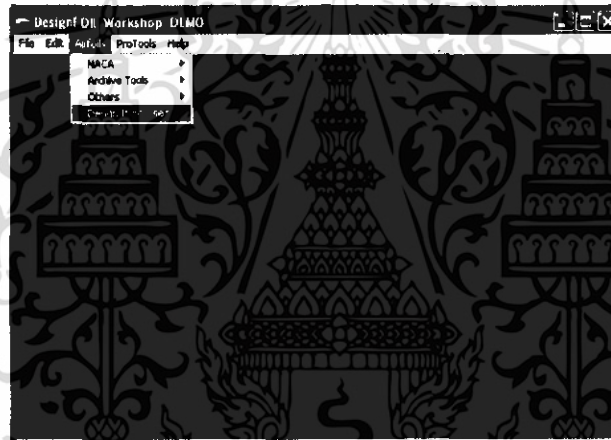
## การใช้โปรแกรม DesignFOIL

1. เข้าสู่โปรแกรมโดย double click ที่ icon ชื่อ DesignFOILDemo.exe



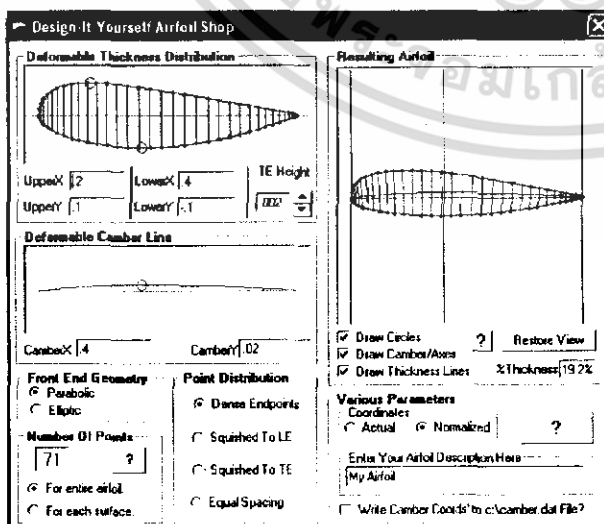
รูปที่ ค.2 แสดง icon ของโปรแกรม DesignFOIL

2. เริ่มการสร้างแผนอากาศโดยเลือก menu bar ไปที่ Airfoils>>Design It Yourself



รูปที่ ค.3 แสดงการเริ่มเข้าสู่การสร้างแผนอากาศ

3. โปรแกรมจะให้ทำการตั้งค่าต่างๆดังนี้



Deformable Thickness Distribution

ค่า Upper X

ค่า Upper Y

ค่า Lower X

ค่า Lower Y

Deformable Camber Line

ค่า Chamber X

ค่า Chamber Y

รูปที่ ค.4 แสดงหน้าการตั้งค่าคุณสมบัติใบพัด

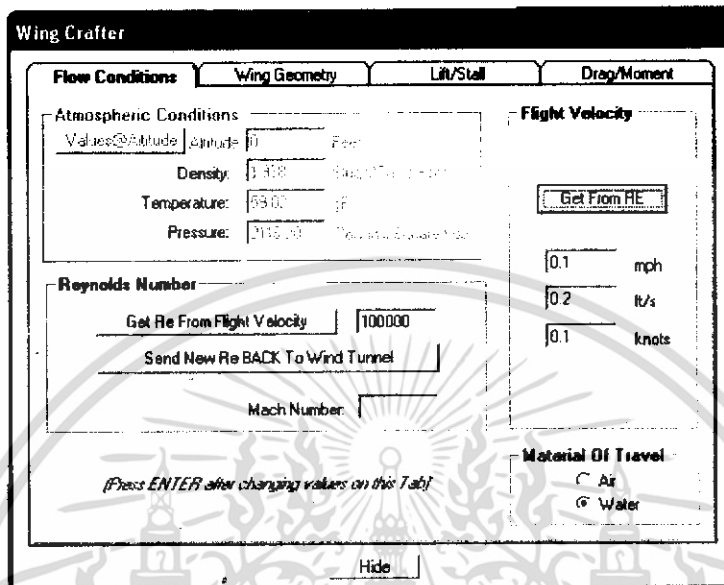
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



6. ให้เริ่มจากการเข้าไปที่ Send Above Values To WingCrafter เพื่อตั้งค่าดังต่อไปนี้  
 ที่หัวข้อ Flow Conditions

Material of Travel เลือกเป็น Water

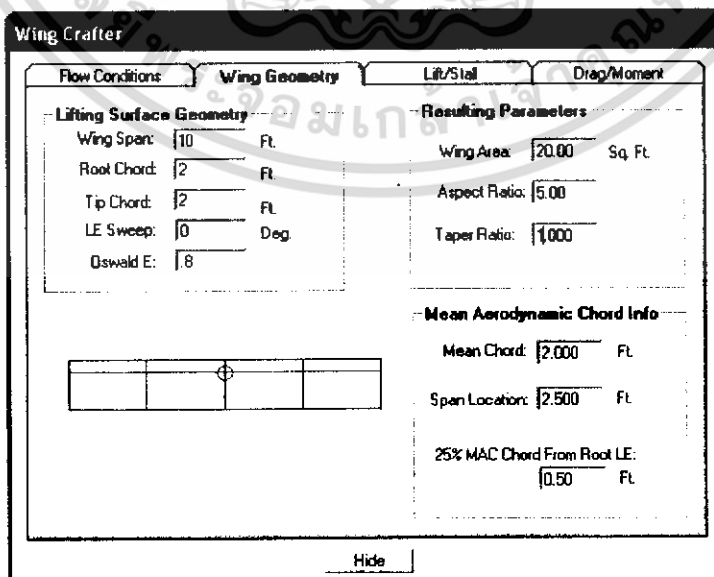
Reynolds Number ตั้งที่ 100,000



รูปที่ ๗ แสดงการกำหนดค่าคุณสมบัติของของไหล

ที่หัวข้อ Wing Geometry

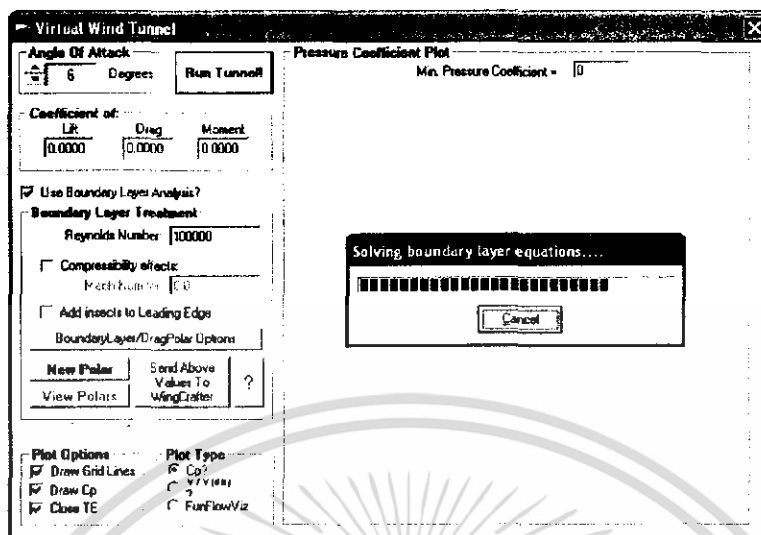
Wing Span ตั้งที่ 10 Ft.  
 Root Chord ตั้งที่ 2 Ft.  
 Tip Chord ตั้งที่ 2 Ft.  
 LE Sweep ตั้งที่ 0 Deg.  
 Oswald E ตั้งที่ 0.8



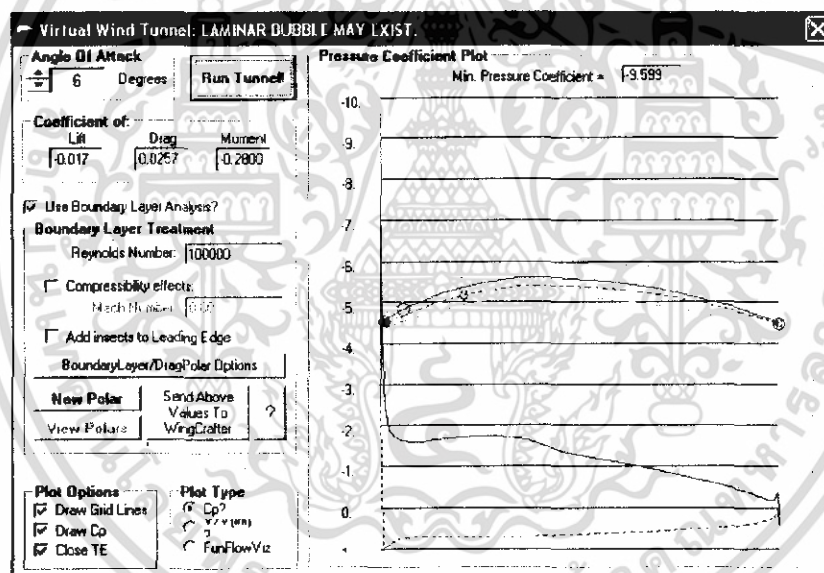
รูปที่ ๘ แสดงการกำหนดขนาดใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. โปรแกรมจะให้ทำการตั้งค่า Angler of Attack คือ มุมปะทะระหว่างแนวกรไหลของของไหลกับใบพัด ให้ตั้งที่ 6 Degrees แล้วเริ่ม Run Tunnel



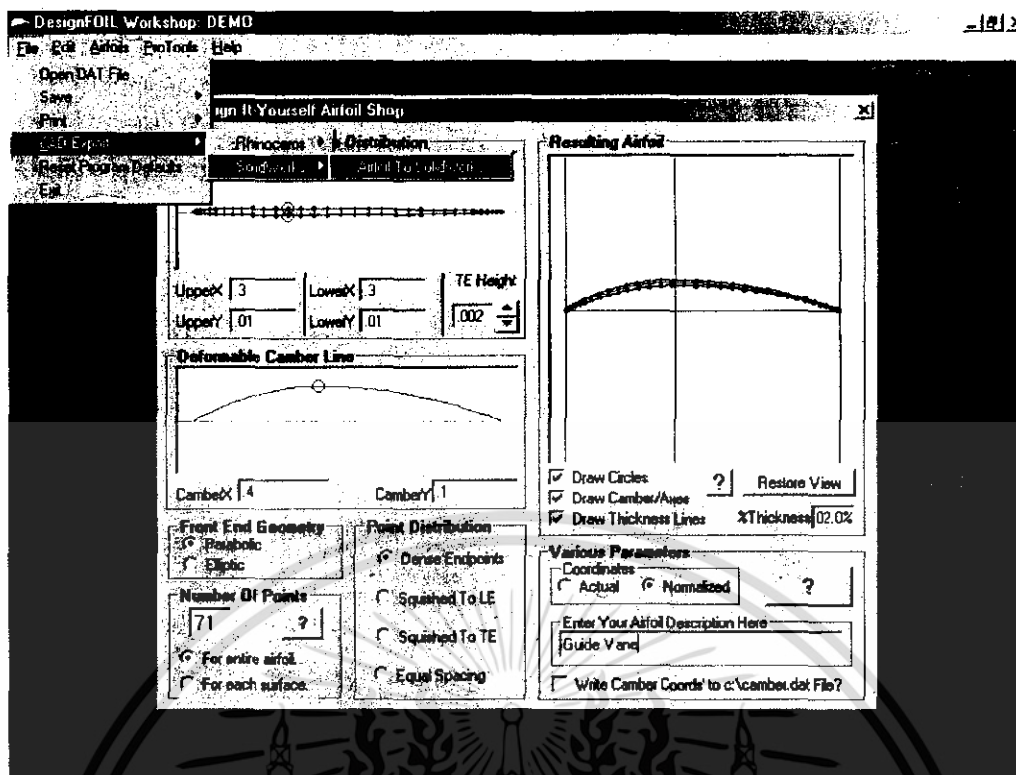
รูปที่ ค.9 แสดงการเริ่มต้นการวิเคราะห์ผลจากของไหลเข้าปะทะใบพัด



รูปที่ ค.10 แสดงผลการวิเคราะห์การปะทะของของไหลกับใบพัด

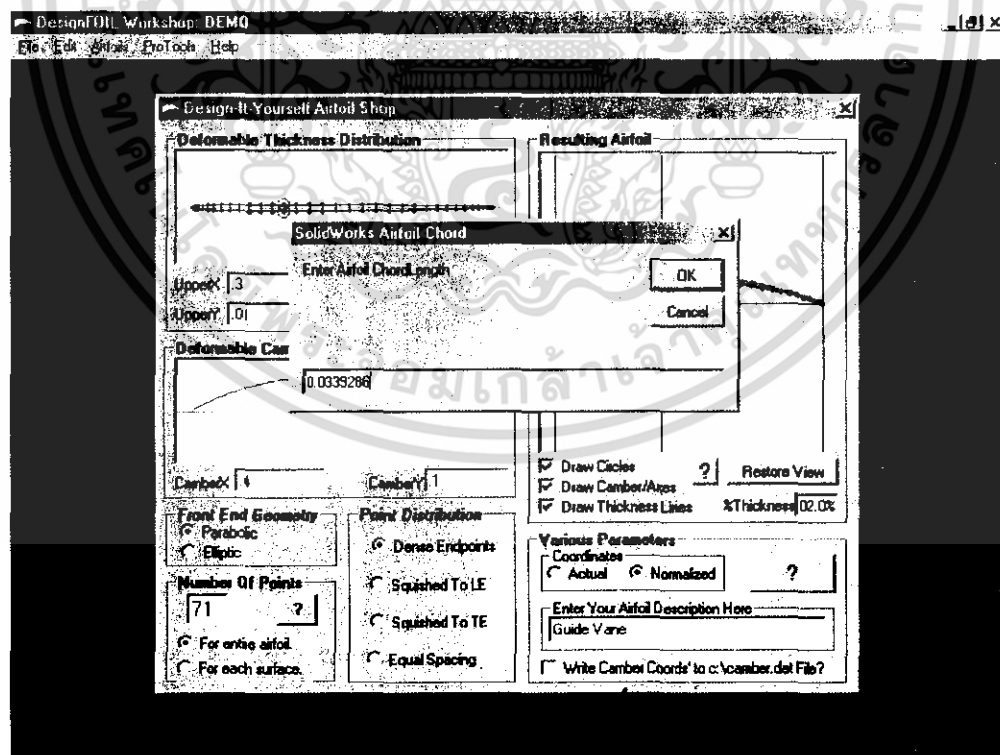
8. โปรแกรม DesignFOIL ยังสามารถทำการส่งการออกแบบใบพัด ไปยังโปรแกรมเขียนแบบเพื่อความสะดวกในการเขียนแบบ โดยเข้าที่ menu bar เลือก File >> CAD Export >> SolidWorks >> Airfoil to SolidWorks

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



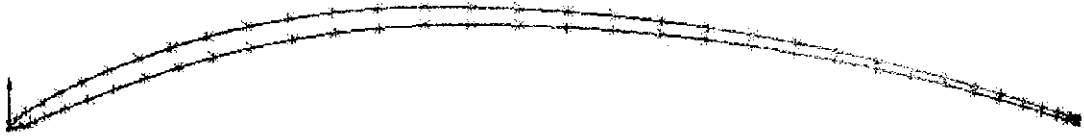
รูปที่ ค.11 แสดงการส่งข้อมูลภาพสู่โปรแกรมเขียนแบบ

9. โปรแกรมจะทำการถามความยาวเส้นคอร์ด ในที่นี้ใช้ที่ความยาว 3.39286 cm ให้ทำการพิมพ์ใส่เป็น 0.0339286



รูปที่ ค.12 แสดงการกำหนดความยาวเส้นคอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.13 แสดงภาพแพนอากาศที่ส่งออกมายังโปรแกรมเขียนแบบ



รูปที่ ค.14 แสดงใบบังคับทิศทางเมื่อวาดตามความยาวเส้นคอร์ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง.

## ผลการทดลอง

ในส่วนนี้จะได้กล่าวถึงผลการทดลอง ที่ได้ทำการทดลอง โดยวิธีการในบทที่ 4 โดยมี การปรับเปลี่ยนค่าต่าง ๆ ซึ่งส่งผลถึงประสิทธิภาพ ดังผลการทดลองนี้

## 1. ใบบังคับทิศทางคงที่

1.1 เมื่อ Flow rate  $1.75E-02 \text{ m}^3/\text{s}$  หรือ 1020 liter/min

$h_2-h_1$  8 cm.

$P_{\text{input}}$  100784.8 Pa

r 6 cm.

ตารางที่ ง.1 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบบังคับทิศทางคงที่ ที่ 0 องศา และอัตราการไหล 1020 ลิตรต่อวินาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	30	3.6	641	142.2932091	7.406856278
0	40	5.1	853	268.2519274	13.96344551
0	50	6.6	1223	497.7302503	25.90859009
0	60	7.4	1629	743.3210777	38.69244656
0	70	7.4	1940	885.2319771	46.07940229
0	80	6.9	2022	860.3078503	44.78201483

ตารางที่ ง.2 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบบังคับทิศทางคงที่ ที่ 10 องศา และอัตราการไหล 1020 ลิตรต่อวินาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
10	30	3.7	743	169.5173606	8.823968016
10	40	5.8	977	349.4187463	18.18846064
10	50	7.4	1305	595.4782114	30.99671133
10	60	7.6	1708	800.433216	41.66533193
10	70	7.5	1958	905.5190571	47.13541534
10	80	6.7	2101	868.0095411	45.18291462

ตารางที่ ง.3 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบบังคับทิศทางคงที่ ที่ 20 องศา และอัตราการไหล 1020 ลิตรต่อวินาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
20	30	5.1	837	263.2202383	13.7015286
20	40	6.7	1095.5	452.596122	23.55920179
20	50	8.2	1432	724.0699337	37.69035758
20	60	8	1790	883.0121143	45.96385071
20	70	7.3	2077	934.9384063	48.66679475
20	80	6.5	2214	887.3901771	46.1917441

ตารางที่ ง.4 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบบังคับทิศทางคงที่ ที่ 30 องศา และอัตราการไหล 1020 ลิตรต่อวินาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
30	30	5.6	988	341.168256	17.75899394
30	40	7.1	1186.5	519.457158	27.03955118
30	50	8.6	1550	821.9658857	42.78618226
30	60	7.8	1920	923.4629486	48.06945728
30	70	7.4	2108	961.8912411	50.06978352
30	80	6.2	2372	906.8386423	47.20410434

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 เมื่อ Flow rate  $1.79E-02$  m<sup>3</sup>/s หรือ 1080 liter/min

$h_2-h_1$  8 cm.

$P_{input}$  100804.42 Pa

r 6 cm.

ตารางที่ 3.5 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบบังคับทิศทางคงที่ ที่ 0 องศา และอัตราการไหล 1080 ลิตรต่อนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	30	3.9	670	161.1250457	8.387118848
0	40	5.1	898	282.4035531	14.70008684
0	50	7.3	1260	567.17496	29.52342869
0	60	7.7	1663	789.599052	41.10137603
0	70	7.9	1960	954.78768	49.70001846
0	80	7.2	2132	946.5495223	49.27119371

ตารางที่ 3.6 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบบังคับทิศทางคงที่ ที่ 10 องศา และอัตราการไหล 1080 ลิตรต่อนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
10	30	4.6	766	217.2752434	11.30993187
10	40	5.8	992.3	354.8907082	18.47329529
10	50	7.3	1347	606.3370406	31.56195115
10	60	8.1	1702	850.0964811	44.25047756
10	70	8	2029	1000.911497	52.10092351
10	80	7.4	2180	994.7452114	51.7799469

ตารางที่ 3.7 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบบังคับทิศทางคงที่ ที่ 20 องศา และอัตราการไหล 1080 ลิตรต่อนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
20	30	5.3	874	285.6346869	14.86827858
20	40	7	1127	486.45828	25.32184485
20	50	8.3	1476	755.4193303	39.32220267
20	60	8.4	1818	941.665824	49.01698023
20	70	8	2103	1037.415909	54.00110505
20	80	7.5	2167	1002.175586	52.16672372

ตารางที่ 3.8 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบบังคับทิศทางคงที่ ที่ 30 องศา และอัตราการไหล 1080 ลิตรต่อนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
30	30	6	1016	375.8967771	19.56673421
30	40	7.1	1162	508.730904	26.48121237
30	50	8.7	1598	857.2740377	44.62409434
30	60	8.5	1961	1027.827334	53.50198642
30	70	7.8	2180	1048.515223	54.57886295
30	80	6.5	2045	819.6535286	42.66581603

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 เมื่อ Flow rate $1.90E-02$ m<sup>3</sup>/s หรือ 1200 liter/min

$h_2 - h_1$  8 cm.

$P_{input}$  100824.04 Pa

r 6 cm.

ตารางที่ 9.9 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบบังคับทิศทางคงที่ ที่ 0 องศา และอัตราการไหล 1200 ลิตรต่อนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	30	4	671	165.5031086	8.615012242
0	40	5.8	922	329.7482949	17.16454526
0	50	7.4	1274	581.332752	30.26039099
0	60	7.8	1770	851.3174057	44.31403093
0	70	7.8	1975	949.9163143	49.44644694
0	80	7.3	2123	955.6447937	49.74463421

ตารางที่ 9.10 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบบังคับทิศทางคงที่ ที่ 10 องศา และอัตราการไหล 1200 ลิตรต่อนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
10	30	4.7	763	221.129172	11.51054225
10	40	6.2	1003	383.4566434	19.96025154
10	50	7.5	1355	626.6487857	32.6192481
10	60	8.1	1770	884.0603829	46.01841673
10	70	8	2086	1029.02976	53.56457686
10	80	7.2	2243	995.8304777	51.83643879

ตารางที่ 9.11 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบบังคับทิศทางคงที่ ที่ 20 องศา และอัตราการไหล 1200 ลิตรต่อนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
20	30	5.4	891	296.6846709	15.44346867
20	40	7	1141	492.50124	25.63640193
20	50	8.8	1483	804.7249509	41.88873166
20	60	8.3	1877	960.6518177	50.00526722
20	70	8.2	2157	1090.655619	56.77241711
20	80	6.5	2497	1000.819003	52.09610886

ตารางที่ 9.12 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบบังคับทิศทางคงที่ ที่ 30 องศา และอัตราการไหล 1200 ลิตรต่อนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
30	30	6	1028	380.3365029	19.79783737
30	40	7.4	1218	555.779664	28.93026391
30	50	9	1606	891.2749371	46.39395937
30	60	8.6	1988	1054.237536	54.87672925
30	70	7.6	2224	1042.250277	54.25275071
30	80	6.7	2356	973.3605326	50.66680002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ใบพัดคงที่

2.1 เมื่อ Flow rate  $1.75E-02 \text{ m}^3/\text{s}$  หรือ 1020 liter/min

$h_2-h_1$  8 cm.

$P_{\text{input}}$  100784.8 Pa

r 6 cm.

ตารางที่ ง.13 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบพัดคงที่ ที่ 40 องศา และอัตราการไหล 1020 ลิตรต่อวินาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	40	5.1	853	268.2519274	15.20931883
5	40	5.5	915.3	310.4200723	17.60016376
10	40	5.8	977	349.4187463	19.81130637
15	40	5.8	1011.3	361.6859551	20.50683125
20	40	6.7	1095.5	452.596122	25.66124608
25	40	6.5	1103.5	442.2922586	25.07703875
30	40	7.1	1186.5	519.457158	29.45212589
35	40	7.2	1204	534.542976	30.30745997
40	40	7	1221	527.03244	29.88162841
45	40	6.8	1241	520.3605189	29.50334454
50	40	6.7	1253	517.665852	29.35056261

ตารางที่ ง.14 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบพัดคงที่ ที่ 45 องศา และอัตราการไหล 1020 ลิตรต่อวินาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	45	6	1053	389.5859314	22.0887011
5	45	6.4	1110.5	438.2502583	24.84786585
10	45	6.7	1130	466.8494914	26.46938209
15	45	6.8	1194.5	500.8627234	28.39786064
20	45	7.5	1303	602.6002714	34.16616516
25	45	7.4	1342	612.3615017	34.71960634
30	45	7.7	1390	659.97756	37.41933648
35	45	7.6	1468	687.9601646	39.00589117
40	45	7.5	1520	702.9565714	39.85615583
45	45	7.4	1552	708.1855817	40.15262969
50	45	7.2	1584	703.2525531	39.87293737

ตารางที่ ง.15 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบพัดคงที่ ที่ 50 องศา และอัตราการไหล 1020 ลิตรต่อวินาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	50	6.6	1223	497.7302503	28.22025602
5	50	7.2	1259	558.9614674	31.69193696
10	50	7.4	1305	595.4782114	33.76235937
15	50	8	1367	674.3450057	38.23394036
20	50	8.2	1432	724.0699337	41.05323896
25	50	8.4	1490	771.77232	43.75786371
30	50	8.6	1550	821.9658857	46.60373309
35	50	8.5	1562	818.6977543	46.41843692
40	50	8.4	1574	815.281632	46.22474999
45	50	8.3	1586	811.7175189	46.02267229
50	50	8.1	1604	801.1485051	45.42343149

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.16 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบพัดคงที่ ที่ 55 องศา และอัตราความเร็วไหล 1020 ลิตรต่อนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	55	7.5	1424	658.5593143	37.33892493
5	55	7.8	1474	708.9502011	40.195982
10	55	7.7	1501	712.680804	40.40749932
15	55	8.1	1548	773.1782331	43.83757603
20	55	8.3	1630	834.2367943	47.29946774
25	55	8.5	1661	870.5870486	49.36045053
30	55	8.7	1736	931.306464	52.80311339
35	55	8.9	1780	976.8629829	55.38607198
40	55	8.8	1832	994.1039177	56.36359665
45	55	8.6	1854	983.1772594	55.74407816
50	55	8.5	1872	981.1793829	55.63080277

ตารางที่ ง.17 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบพัดคงที่ ที่ 60 องศา และอัตราความเร็วไหล 1020 ลิตรต่อนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	60	7.4	1629	743.3210777	42.14473825
5	60	7.4	1694	772.980912	43.82638833
10	60	7.6	1708	800.433216	45.3828761
15	60	7.7	1780	845.15112	47.918287
20	60	8	1790	883.0121143	50.06492557
25	60	7.9	1820	886.58856	50.2677025
30	60	7.8	1920	923.4629486	52.3584026
35	60	7.8	1975	949.9163143	53.85825268
40	60	7.8	2000	961.9405714	54.54000271
45	60	7.7	2023	960.528492	54.45994078
50	60	7.2	2063	915.9154149	51.93047335

ตารางที่ ง.18 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบพัดคงที่ ที่ 70 องศา และอัตราความเร็วไหล 1020 ลิตรต่อนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	70	7.4	1940	885.2319771	50.19078711
5	70	7.4	1950	889.7950286	50.44950251
10	70	7.5	1958	905.5190571	51.34102178
15	70	7.5	2004	926.7927429	52.54719492
20	70	7.3	2077	934.9384063	53.00903687
25	70	7.3	2091	941.2403503	53.36634381
30	70	7.4	2108	961.8912411	54.53720579
35	70	7.5	2113	977.2021286	55.40530083
40	70	7.3	2150	967.7985429	54.87213734
45	70	7	2216	956.51424	54.23234116
50	70	6.8	2231	935.4748731	53.03945341

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.19 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบพัดคงที่ ที่ 80 องศา และอัตราการไหล 1020 ลิตรต่อนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	80	6.5	1714	686.9858914	38.95065194
5	80	6.6	1756	714.6478491	40.51902663
10	80	6.8	1763	739.2389966	41.91329285
15	80	6.2	1874	716.4484046	40.62111433
20	80	6.3	1984	770.736384	43.69912833
25	80	6.4	2134	842.1666377	47.74907314
30	80	6.2	2210	844.9044686	47.90430238
35	80	6	2384	882.0255086	50.0089871
40	80	6	2412	892.3848686	50.59634098
45	80	5.9	2462	895.7023303	50.78443406
50	80	5.9	2525	918.6224143	52.08395451

2.2 เมื่อ Flow rate 1.79E-02 m<sup>3</sup>/s หรือ 1080 liter/min $h_2 - h_1$  8 cm. $P_{input}$  100804.42 Pa

r 6 cm.

ตารางที่ ง.20 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบพัดคงที่ ที่ 40 องศา และอัตราการไหล 1080 ลิตรต่อนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	40	5.6	898	310.090176	17.11428905
5	40	5.7	966	339.528024	18.73900301
10	40	5.8	992.3	354.8907082	19.58688998
15	40	6.1	1027.6	386.5249872	21.33282789
20	40	7	1127	486.45828	26.84827917
25	40	7.1	1133.5	496.2534249	27.38888623
30	40	7.1	1162	508.730904	28.0775349
35	40	7	1185	511.4934	28.23000072
40	40	6.8	1201	503.5882217	27.79370342
45	40	6.7	1214	501.5533474	27.68139601
50	40	6.4	1251	493.6974994	27.24782131

ตารางที่ ง.21 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบพัดคงที่ ที่ 45 องศา และอัตราการไหล 1080 ลิตรต่อนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	45	6.5	1085	434.8773	24.00145631
5	45	6.8	1147	480.9456206	26.54402817
10	45	7	1165	502.8606	27.75354501
15	45	7.4	1249	569.9251234	31.45492522
20	45	7.9	1343	654.2244154	36.10751521
25	45	8.1	1373	685.7711331	37.8486205
30	45	8.1	1426	712.2429977	39.30963789
35	45	8.2	1481	748.8460697	41.3298101
40	45	8.2	1521	769.0714869	42.44607776
45	45	8	1554	766.59264	42.3092669
50	45	7.9	1569	764.3172806	42.18368679

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.22 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบพัดคงที่ ที่ 50 องศา และอัตราการไหล 1080 ลิตรต่อนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	50	7.3	1260	567.17496	31.30314004
5	50	7.5	1300	601.2128571	33.18173683
10	50	7.3	1347	606.3370406	33.46454733
15	50	8.2	1403	709.4065063	39.15308816
20	50	8.3	1476	755.4193303	41.69259709
25	50	8.5	1545	809.7874714	44.69324707
30	50	8.7	1598	857.2740377	47.3140938
35	50	8.6	1632	865.4505326	47.76536542
40	50	8.5	1651	865.3457057	47.75957988
45	50	8.3	1684	861.8740869	47.56797662
50	50	8.2	1697	858.0633223	47.35765546

ตารางที่ ง.23 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบพัดคงที่ ที่ 55 องศา และอัตราการไหล 1080 ลิตรต่อนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	55	7.8	1462	703.1785577	38.8093594
5	55	8	1520	749.8203429	41.38358153
10	55	8.3	1537	786.6392349	43.41566512
15	55	8.4	1588	822.533184	45.39669989
21	55	8.9	1669	915.9462463	50.55229098
25	55	9	1712	950.1013029	52.43735396
30	55	9	1788	992.2786971	54.76518042
35	55	9.1	1812	1016.771184	56.11695333
40	55	9	1844	1023.356777	56.48042097
45	55	8.8	1875	1017.437143	56.15370849
50	55	8.6	1901	1008.101386	55.63845567

ตารางที่ ง.24 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบพัดคงที่ ที่ 60 องศา และอัตราการไหล 1080 ลิตรต่อนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	60	7.7	1663	789.599052	43.57902137
5	60	8	1689	833.1885257	45.98478237
10	60	8.1	1702	850.0964811	46.91795491
15	60	8.2	1771	895.480344	49.42275063
20	60	8.4	1818	941.665824	51.97178867
25	60	8.3	1904	974.470464	53.78232036
30	60	8.5	1961	1027.827334	56.72715697
35	60	8.4	2014	1043.187552	57.5749078
40	60	8.2	2058	1040.597712	57.43197109
45	60	8	2064	1018.177097	56.19454755
50	60	7.8	2082	1001.380135	55.26750087

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.25 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบพัดคงที่ ที่ 70 องศา และอัตราการไหล 1080 ลิตรต่อนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	70	7.9	1960	954.78768	52.69600135
5	70	8	2015	994.0052571	54.86047157
10	70	8	2043	1007.817737	55.6228007
15	70	7.9	2081	1013.731205	55.94917286
20	70	7.8	2128	1023.504768	56.48858879
25	70	7.8	2151	1034.567085	57.09913274
30	70	7.8	2180	1048.515223	57.86894904
35	70	7.7	2206	1047.417624	57.8083711
40	70	7.4	2229	1017.104163	56.13533091
45	70	7.1	2267	992.5068497	54.77777247
50	70	6.9	2279	969.6545949	53.51652614

ตารางที่ ง.26 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบพัดคงที่ ที่ 80 องศา และอัตราการไหล 1080 ลิตรต่อนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	80	6.3	1840	714.79584	39.45053265
5	80	6.4	1904	751.398912	41.47070486
10	80	6.5	1974	791.19612	43.66716567
15	80	6.7	2046	845.2867783	46.65250101
20	80	6.6	2154	876.6238423	48.38203523
25	80	6.5	2260	905.8273714	49.99381683
30	80	6.5	2445	979.9769571	54.08623104
35	80	6.3	2510	975.07476	53.81567226
40	80	6.2	2588	989.4175406	54.60726939
45	80	6.1	2606	980.2297749	54.10018438
50	80	6.1	2593	975.3399103	53.83030626

2.3 เมื่อ Flow rate  $1.90E-02$  m<sup>3</sup>/s หรือ 1200 liter/min

$h_2-h_1$  8 cm.

$P_{input}$  100824.04 Pa

r 6 cm.

ตารางที่ ง.27 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบพัดคงที่ ที่ 40 องศา และอัตราการไหล 1200 ลิตรต่อนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	40	5.5	922	312.6923486	16.27672395
5	40	6	960	355.1780571	18.4882528
10	40	6.2	997	381.1627851	19.84084824
15	40	6.4	1031.5	407.0735177	21.18959196
20	40	7	1141	492.50124	25.63640193
25	40	7.1	1152	504.3528411	26.25331898
30	40	7.4	1218.5	556.0078166	28.94214005
35	40	7.3	1240	558.1721829	29.05480284
40	40	7.2	1251	555.4096869	28.91100532
45	40	7.1	1262	552.5115326	28.76014631
50	40	6.9	1280	544.6063543	28.34865429

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.28 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบพัดคงที่ ที่ 45 องศา และอัตราการไหล 1200 ลิตรต่อนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	45	6.5	1088	436.0797257	22.69946594
5	45	6.9	1120	476.53056	24.80507251
10	45	7	1179	508.90356	26.49019971
15	45	7.8	1265	608.4274114	31.67076222
20	45	8.1	1352	675.2822811	35.15079064
25	45	8.2	1382	698.7881623	36.37435348
30	45	8.2	1447	731.6544651	38.08515881
35	45	8.2	1494	755.4193303	39.32220267
40	45	8.1	1531	764.6872577	39.80463052
45	45	8	1556	767.5792457	39.95516855
50	45	7.8	1582	760.894992	39.6072299

ตารางที่ 3.29 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบพัดคงที่ ที่ 50 องศา และอัตราการไหล 1200 ลิตรต่อนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	50	7.4	1274	581.332752	30.26039099
5	50	7.7	1306	620.094024	32.27804997
10	50	7.5	1355	626.6487857	32.6192481
15	50	8.4	1410	730.33488	38.01646982
20	50	8.8	1483	804.7249509	41.88873166
25	50	8.7	1540	826.15896	43.00444636
30	50	9	1606	891.2749371	46.39395937
35	50	8.9	1630	894.5430686	46.56407697
40	50	8.7	1653	886.7797149	46.15996742
45	50	8.6	1667	884.0110526	46.01584892
50	50	8.5	1684	882.6421371	45.94459211

ตารางที่ 3.30 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบพัดคงที่ ที่ 55 องศา และอัตราการไหล 1200 ลิตรต่อนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	55	8.1	1483	740.7127389	38.55667346
5	55	8.2	1528	772.6109349	40.21708546
10	55	8.1	1554	776.175048	40.40260995
15	55	8.5	1605	841.2355286	43.78923417
20	55	9	1684	934.5622629	48.64721518
25	55	9.2	1740	987.0990171	51.38193591
30	55	9.2	1795	1018.300423	53.00607756
35	55	9.2	1832	1039.290459	54.09868194
40	55	9.1	1856	1041.460992	54.21166571
45	55	8.9	1884	1033.938123	53.82007424
50	55	8.8	1901	1031.545605	53.69553532

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.31 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบพัดคงที่ ที่ 60 องศา และอัตราเร็วไหล 1200 ลิตรต่ออนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	60	7.8	1708	821.497248	42.76178804
5	60	8	1757	866.73312	45.11647246
10	60	8.1	1770	884.0603829	46.01841673
15	60	8.2	1828	924.3015634	48.1131101
20	60	8.3	1877	960.6518177	50.00526722
25	60	8.5	1902	996.9034114	51.89228872
30	60	8.6	1988	1054.237536	54.87672925
35	60	8.6	2028	1075.449559	55.98088879
40	60	8.4	2070	1072.19376	55.81141314
45	60	8	2111	1041.362331	54.20653008
50	60	7.9	2100	1022.9868	53.25001978

ตารางที่ ง.32 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบพัดคงที่ ที่ 70 องศา และอัตราเร็วไหล 1200 ลิตรต่ออนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	70	7.8	1975	949.9163143	49.44644694
5	70	7.9	2037	992.297196	51.65251919
10	70	8.1	2086	1041.892632	54.23413407
15	70	8.1	2134	1065.867151	55.48209114
20	70	8.2	2157	1090.655619	56.77241711
25	70	7.9	2179	1061.470589	55.25323481
30	70	7.5	2194	1014.662314	52.81670136
35	70	7.5	2286	1057.209686	55.03143997
40	70	7.3	2343	1054.675342	54.89951859
45	70	7.1	2413	1056.426567	54.99067594
50	70	7	2424	1046.29536	54.46331137

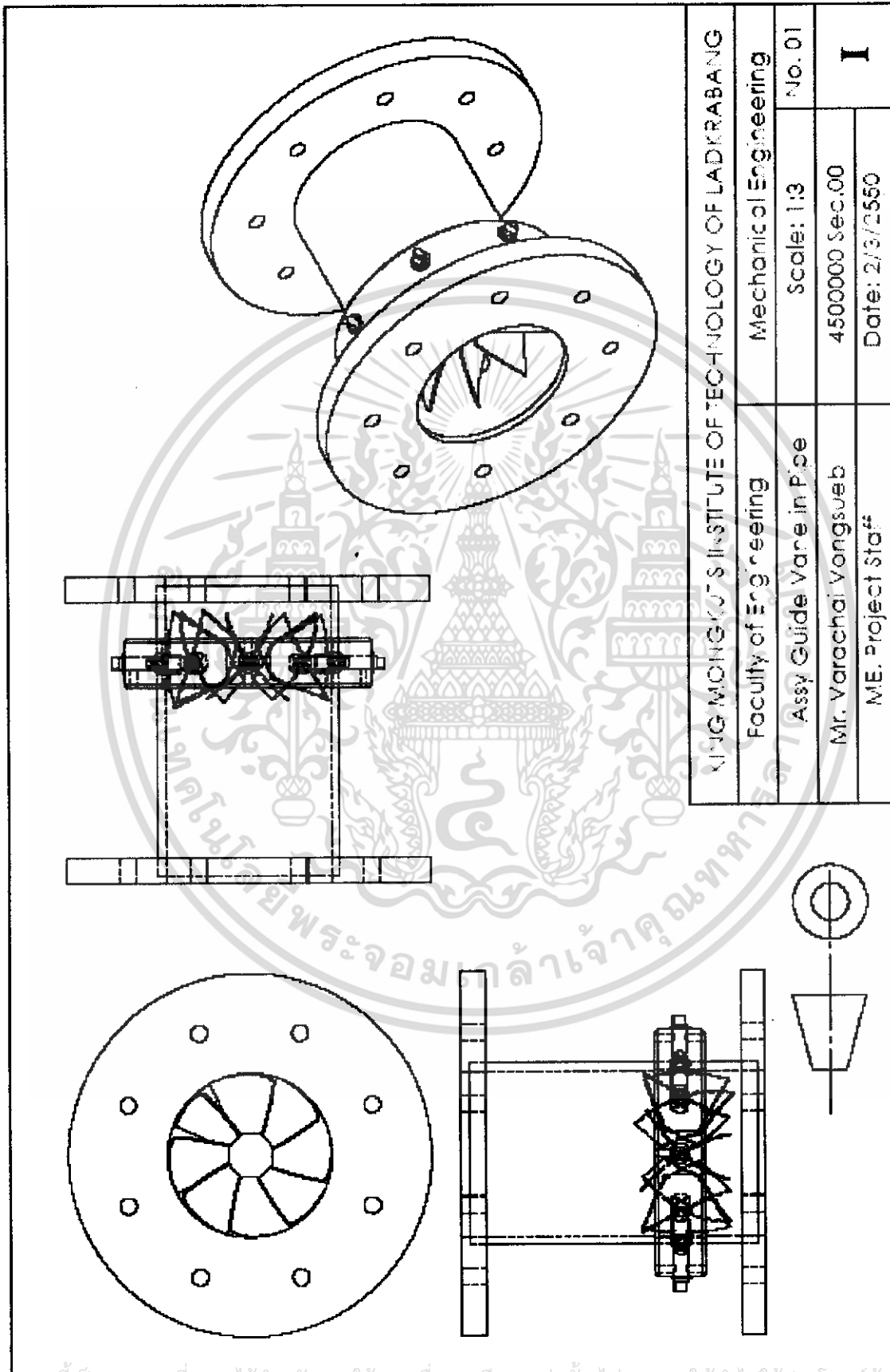
ตารางที่ ง.33 ผลการทดลอง เมื่อให้มุมใบพัดคงที่ ที่ 80 องศา และอัตราเร็วไหล 1200 ลิตรต่ออนาที

มุมใบบังคับทิศทาง (องศา)	มุมใบพัด (องศา)	น้ำหนัก (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	พลังงานลัพท์ (w)	ประสิทธิภาพ (%)
0	80	7	1814	782.99496	40.75761008
5	80	7.2	1861	826.2329554	43.00829807
10	80	7.3	1863	838.6086909	43.65249813
15	80	7.4	1910	871.5428229	45.36683421
20	80	7.6	1934	906.3453394	47.17842621
25	80	7.5	1997	923.5554429	48.07427193
30	80	7.3	2045	920.5339629	47.91699339
35	80	7.4	2076	947.2894766	49.3097109
40	80	7.1	2120	928.1493257	48.3133995
45	80	6.8	2163	906.961968	47.21052387
50	80	6.6	2204	896.9725851	46.69054176

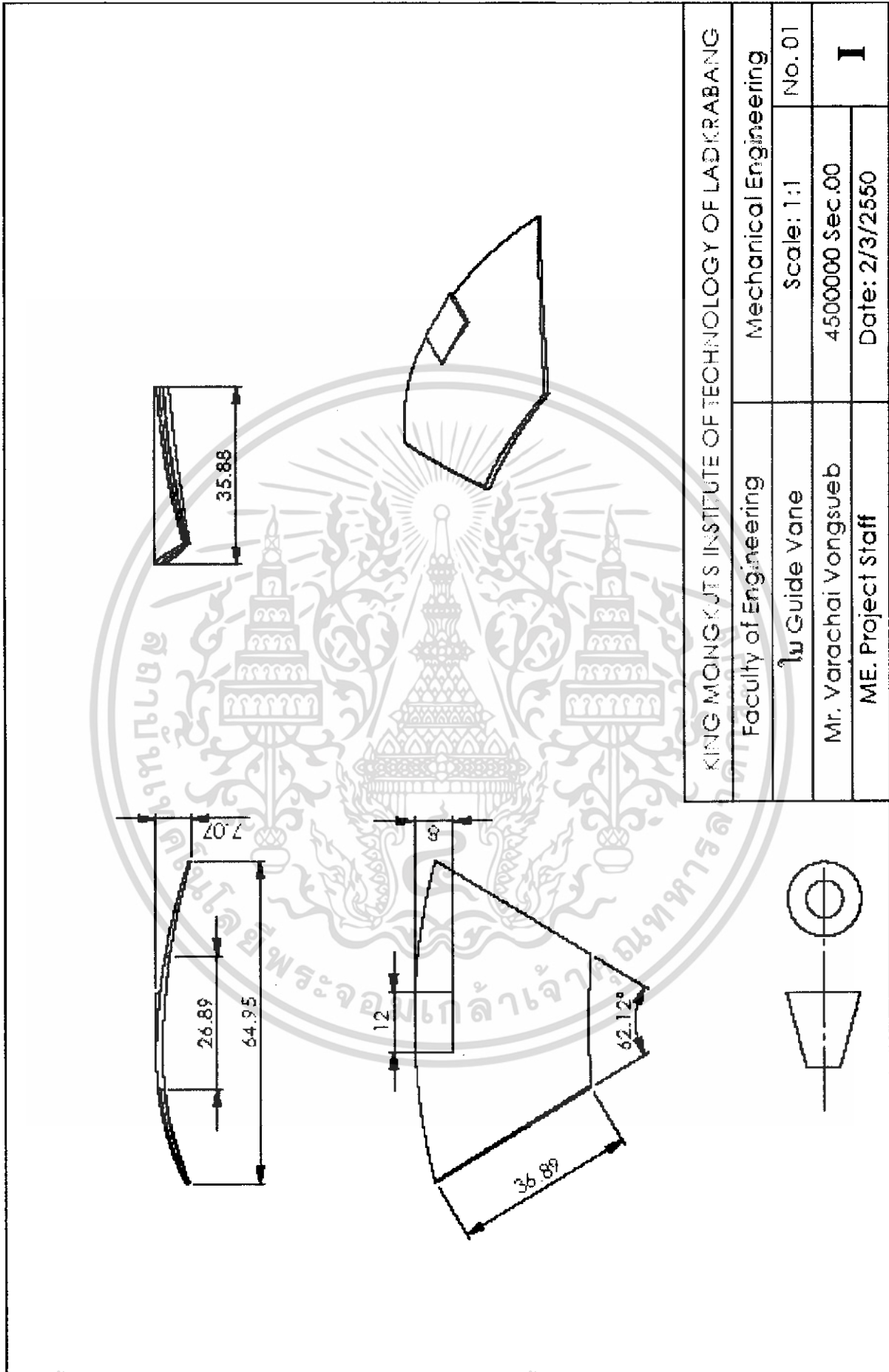
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

## แบบใบบังคับทิศทาง และใบพัดรันเนอร์

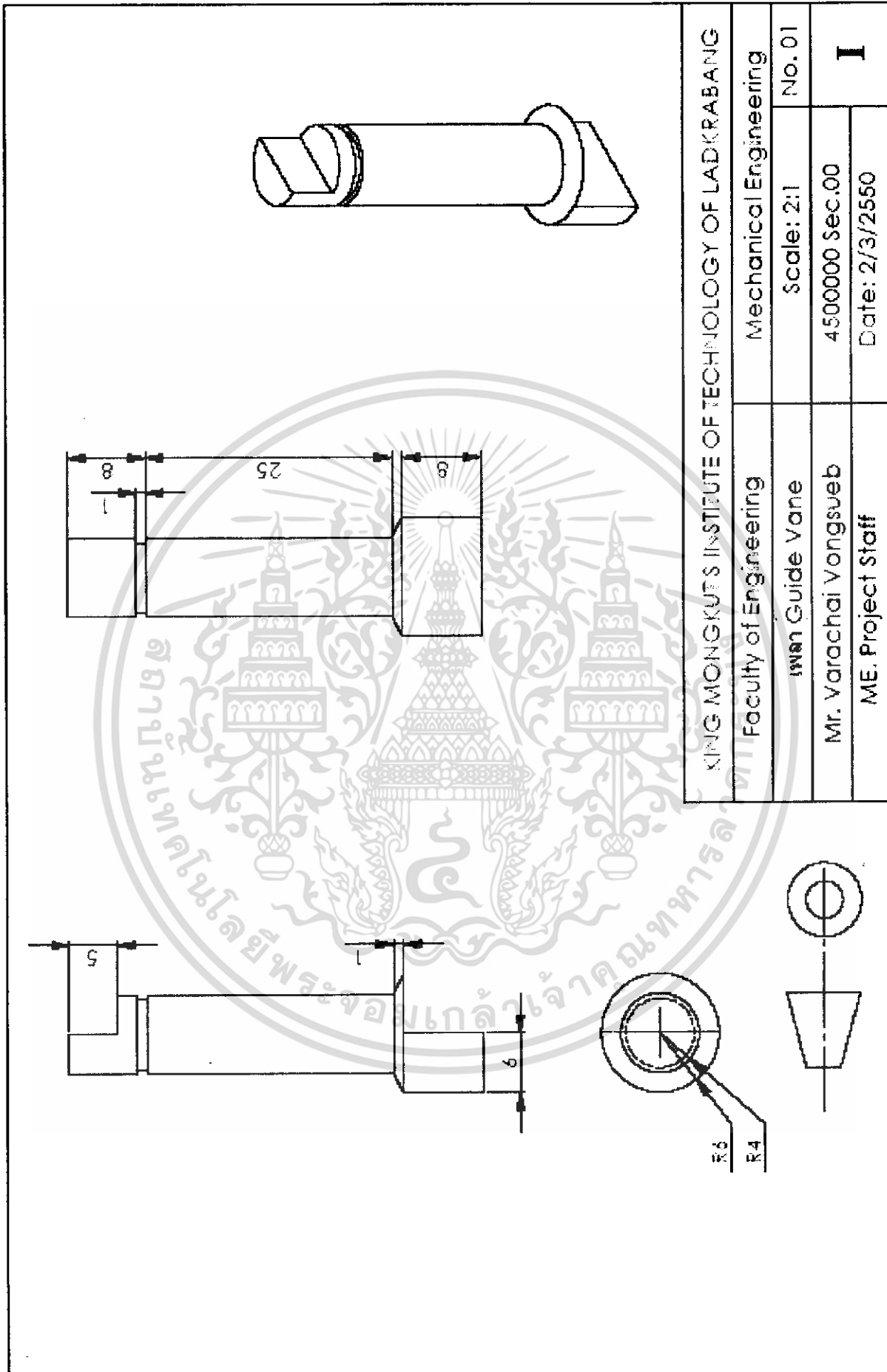


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

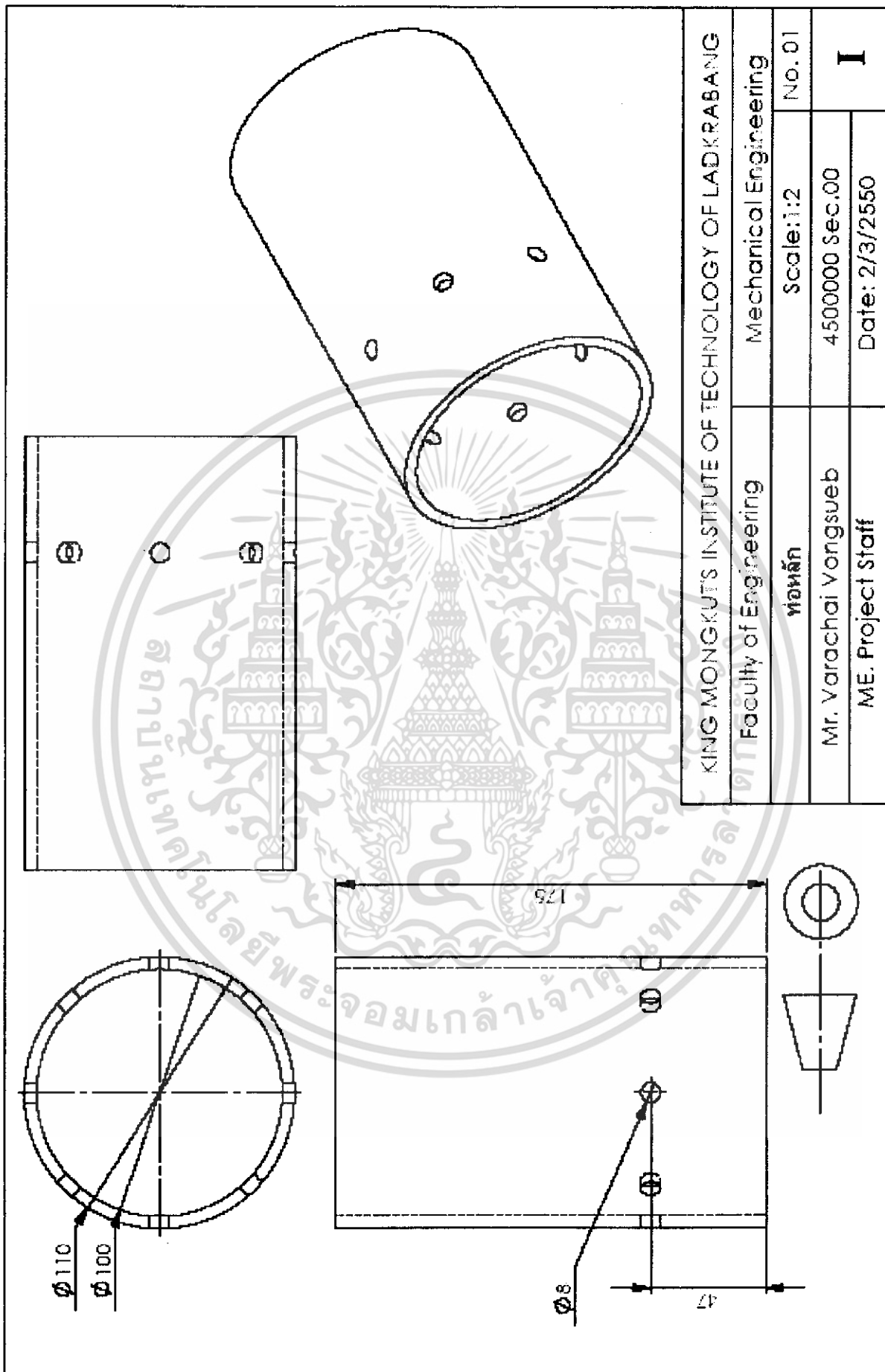


KING MONKUTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF LADKRABANG	
Faculty of Engineering	Mechanical Engineering
ใบ Guide Vane	Scale: 1:1
Mr. Varachai Vongsueb	4500000 Sec.00
ME. Project Staff	Date: 2/3/2550
	No. 01
	<b>I</b>

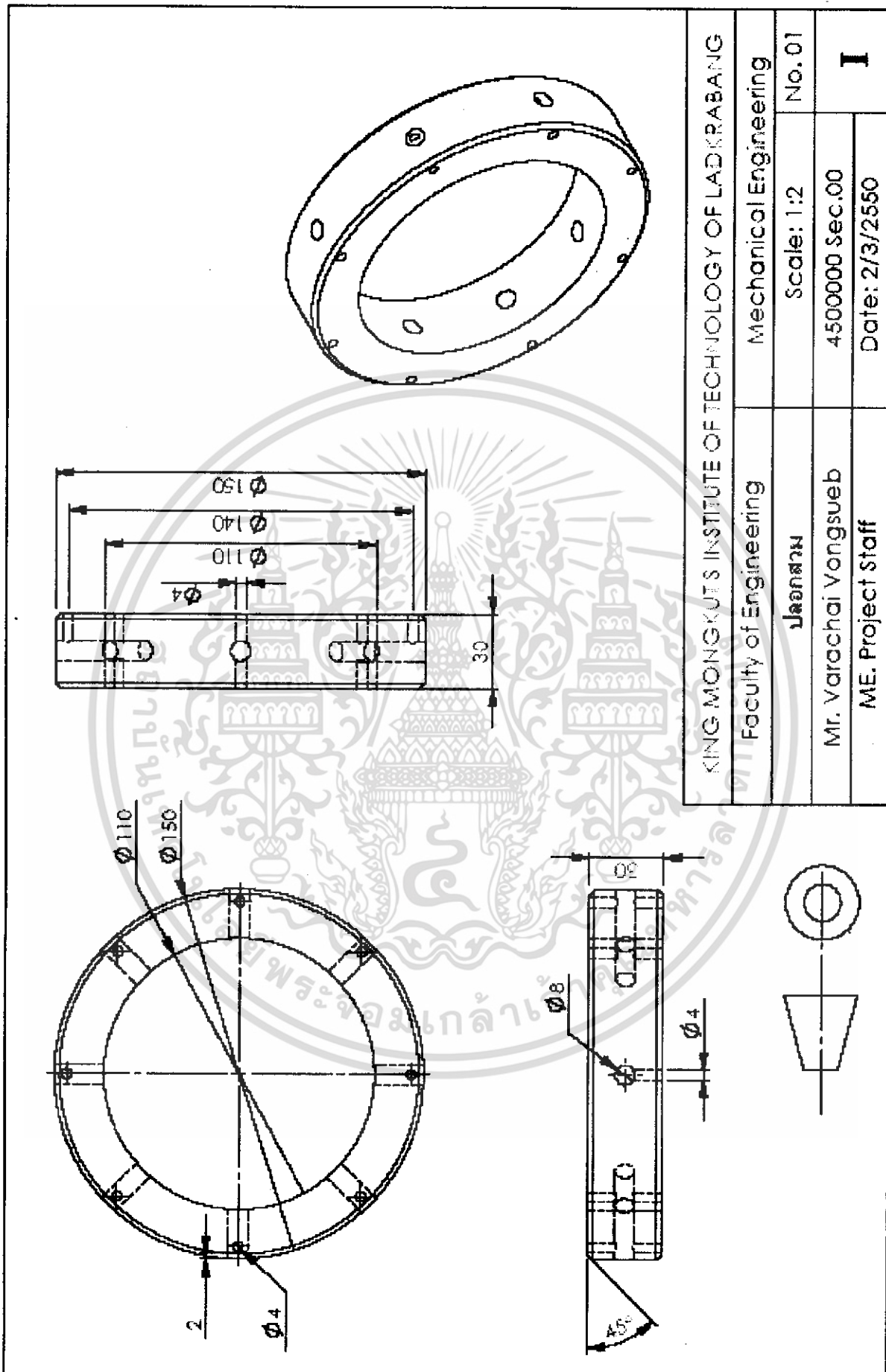
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



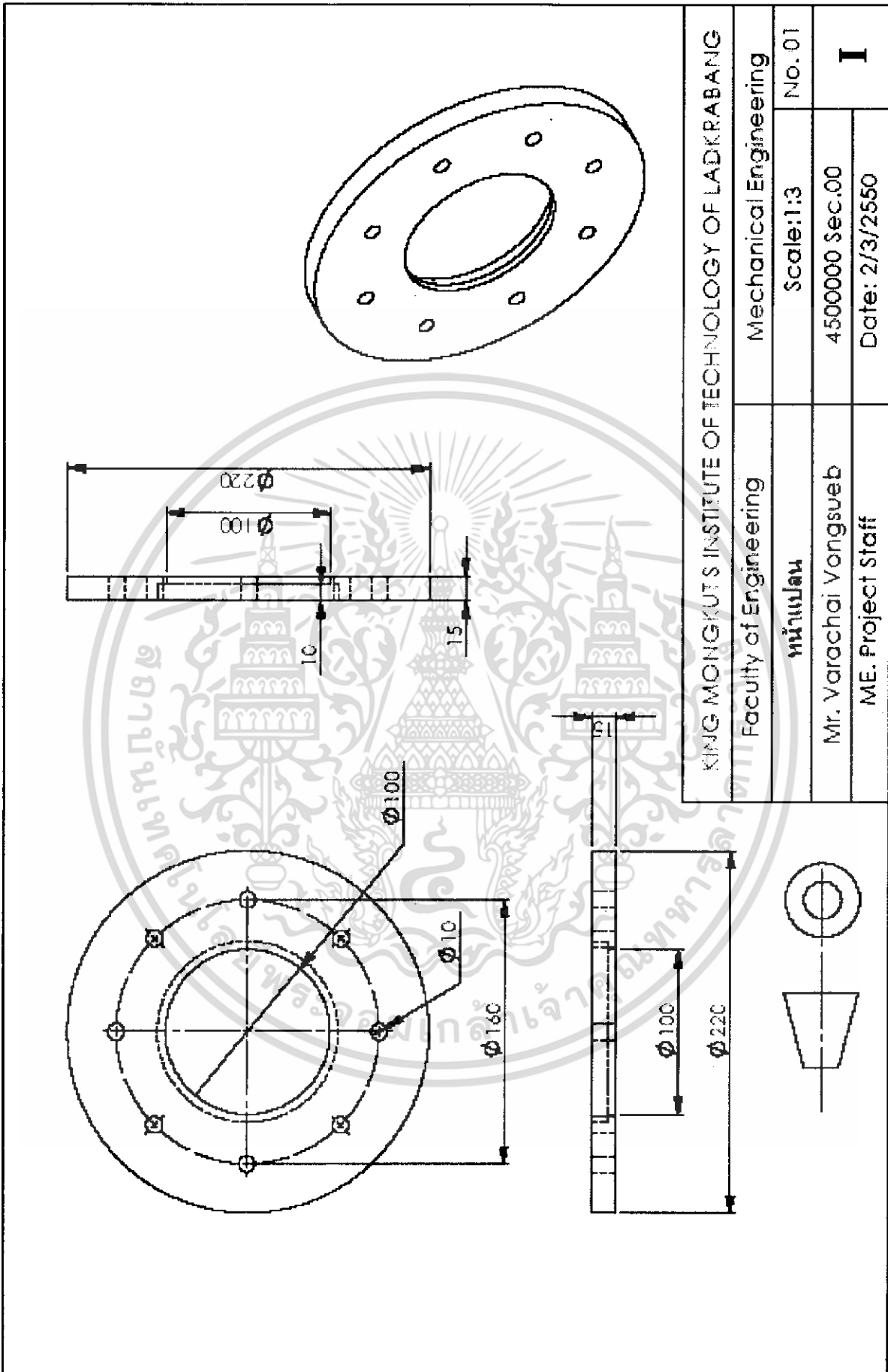
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

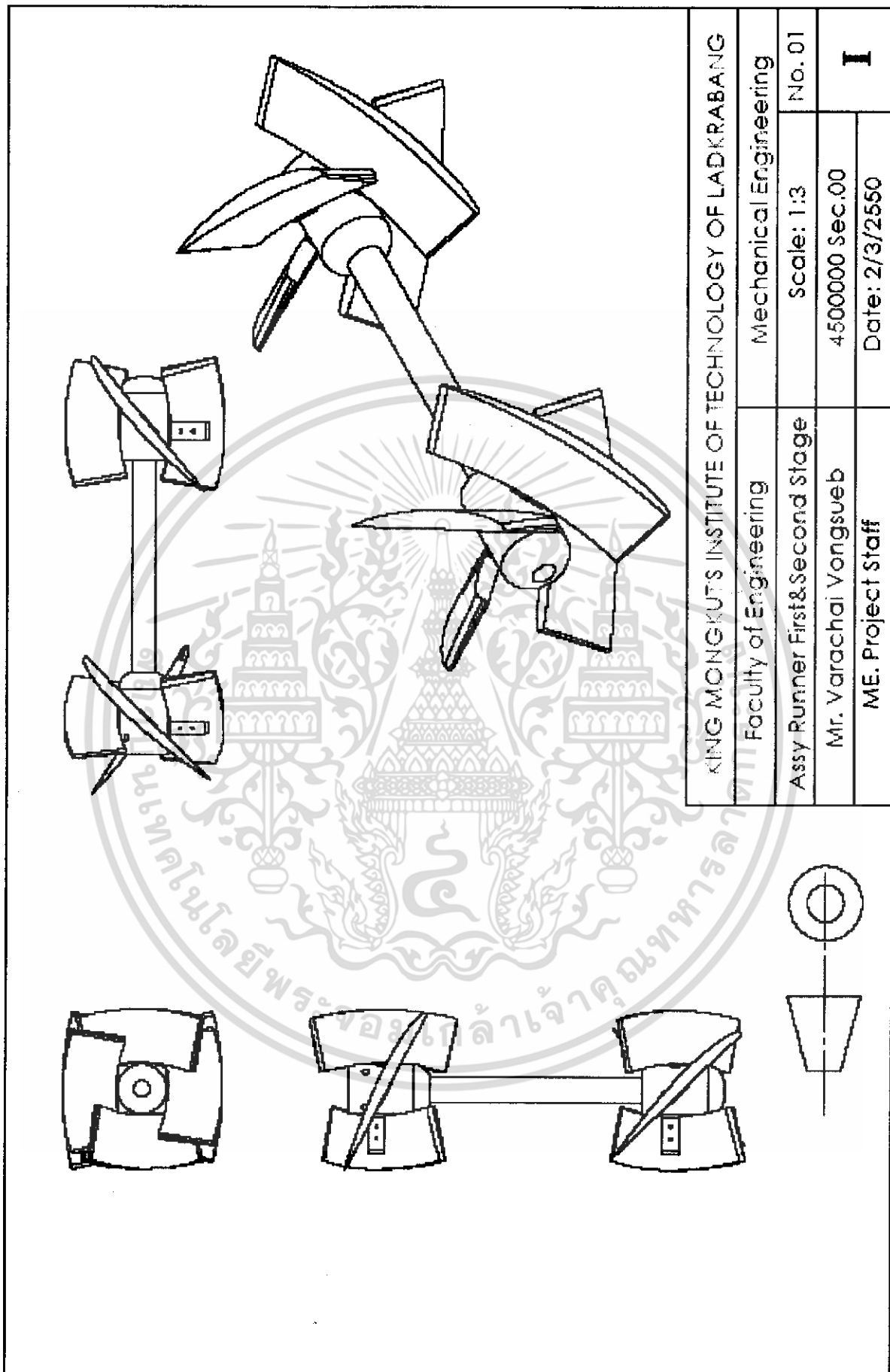


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

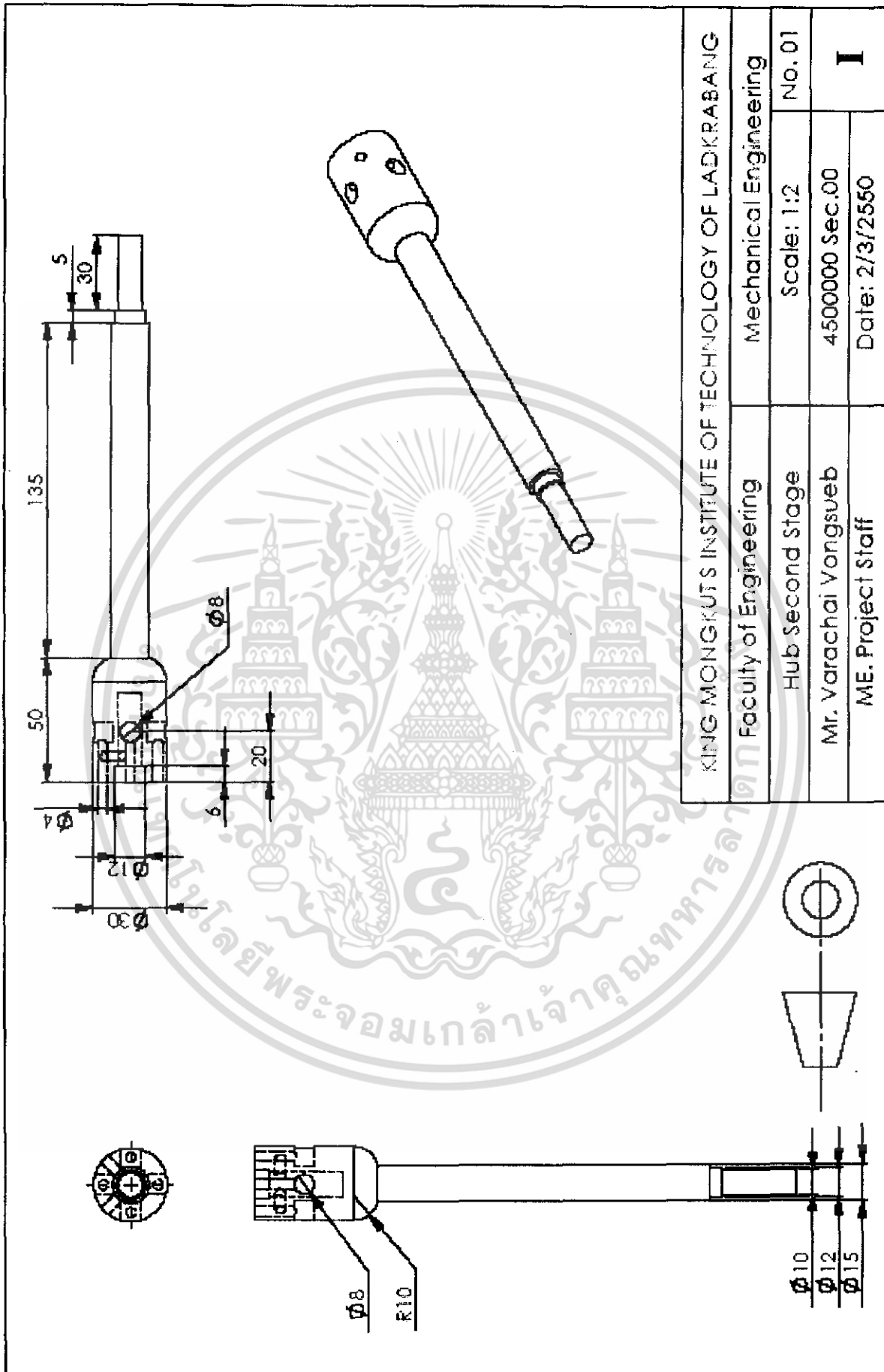


KING MONGKUTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF LADKRABANG	
Faculty of Engineering	Mechanical Engineering
หน้าปก	Scale: 1:3
Mr. Varachai Vongsueb	450000 Sec.00
ME. Project Staff	Date: 2/3/2550
	<b>I</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

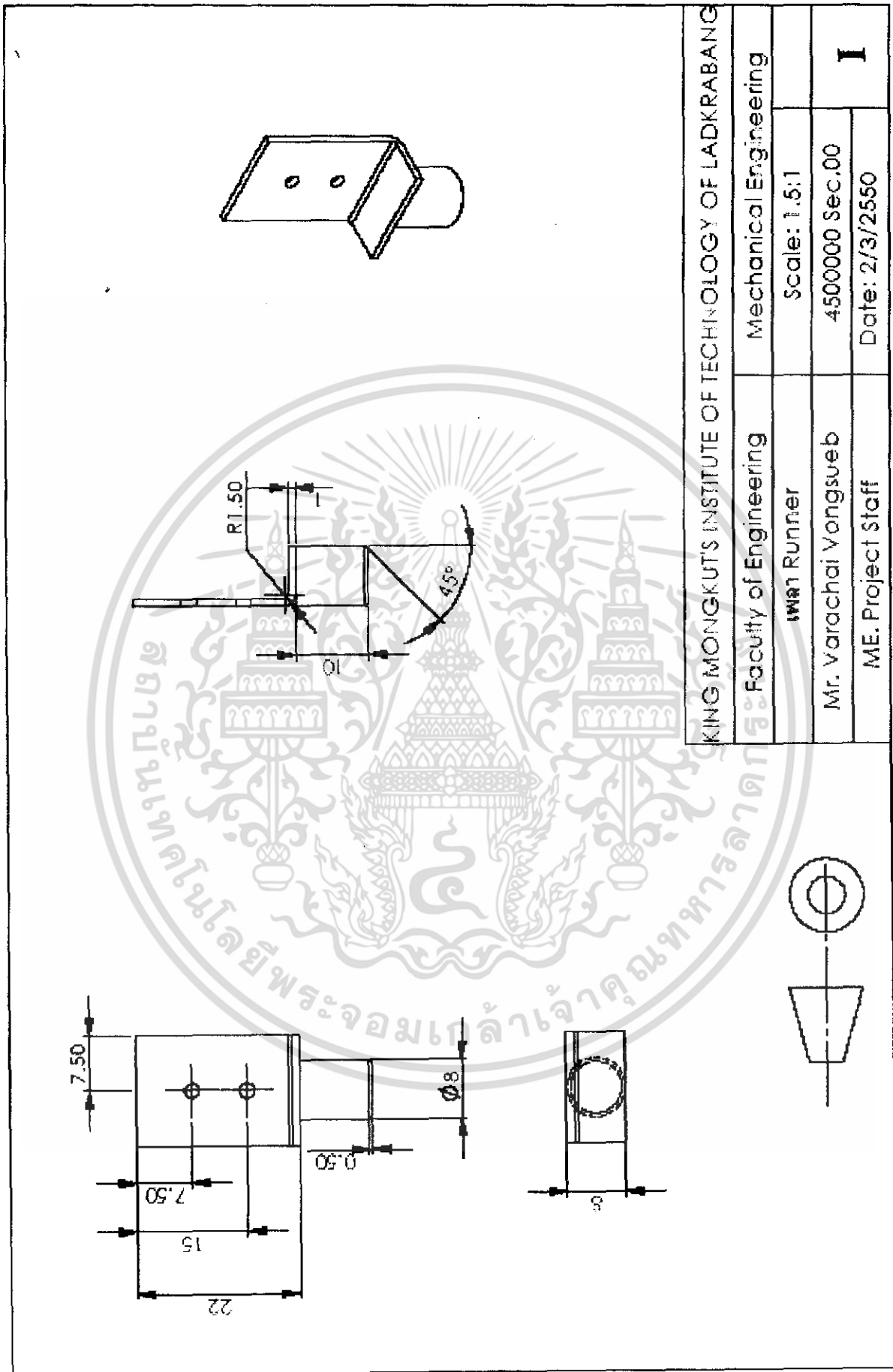


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

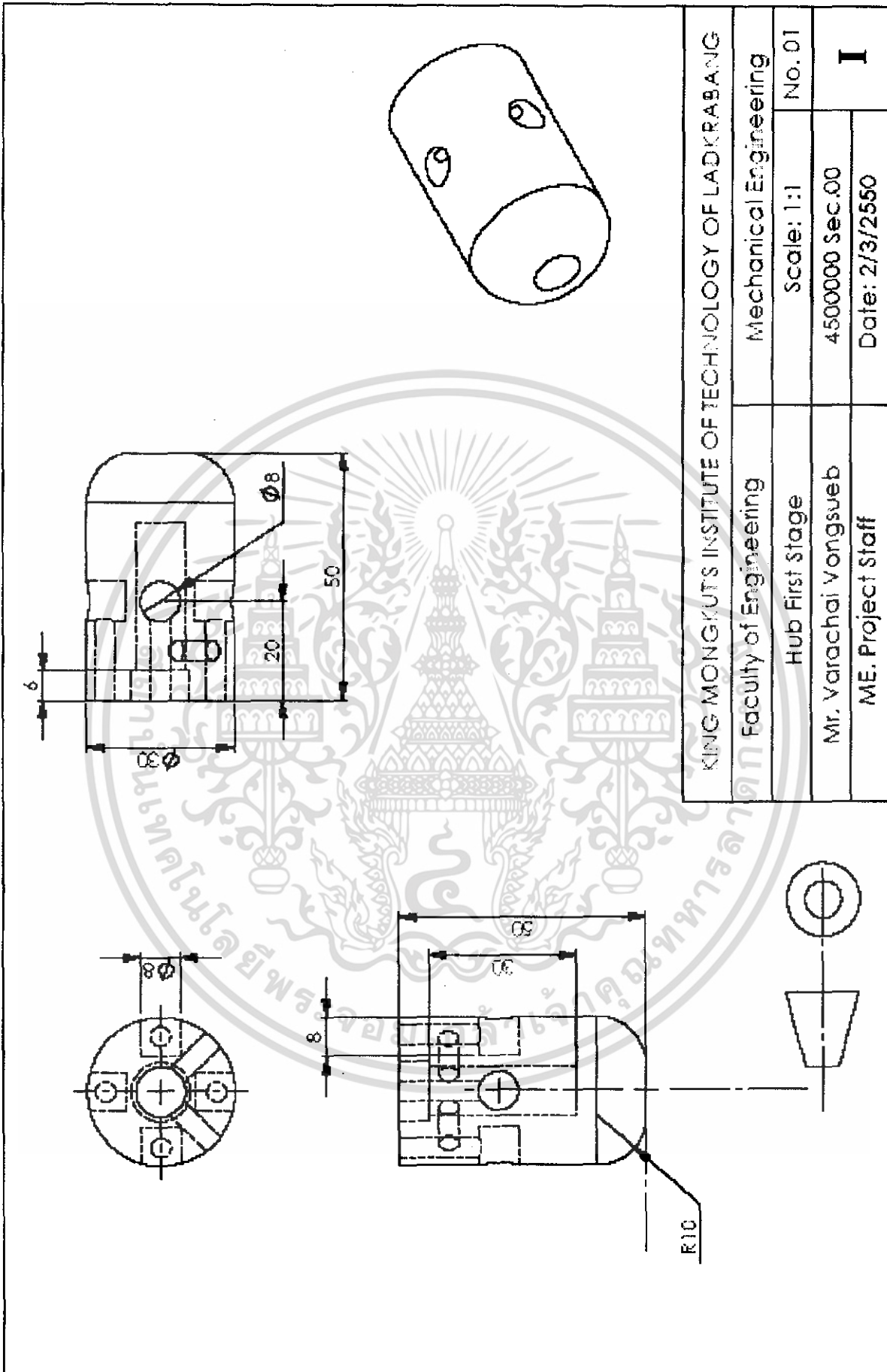


KING MONGKUTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF LADKRABANG	
Faculty of Engineering	Mechanical Engineering
Hub Second Stage	Scale: 1:2
Mr. Varachai Vongsueb	4500000 Sec.00
ME. Project Staff	Date: 2/3/2550
	No.01
	<b>I</b>

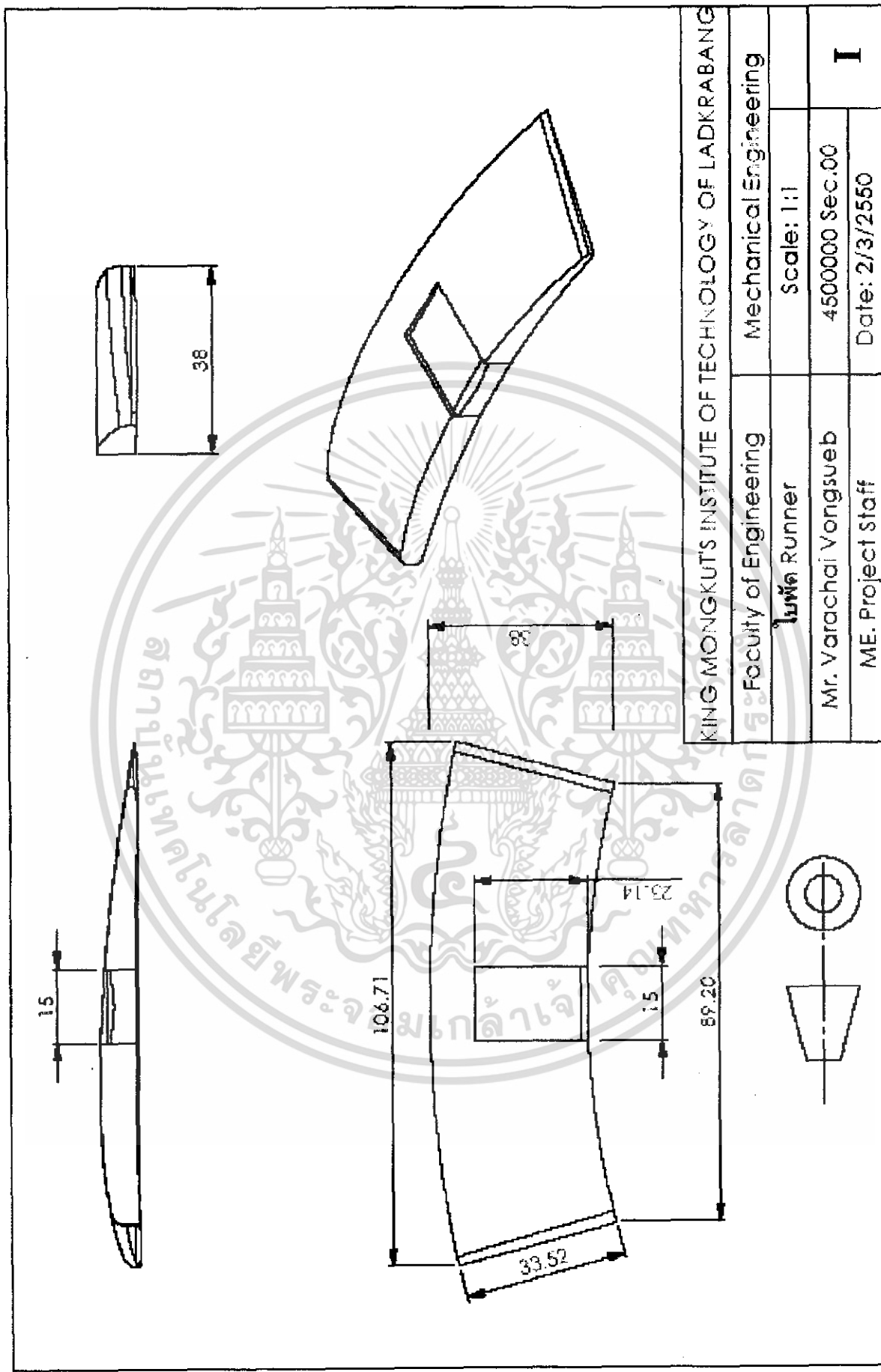
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบห้องเผาไหม้เครื่องยนต์ดีเซลใช้น้ำมันพืช

DESIGNING COMBUSTION CHAMBER OF A DIESEL ENGINE USING NEAT VEGETABLE OIL



นายณัฐพนธ์ ศักดิ์เจริญ  
นายมังกร ชันทะบุตร

๗๒๒๓๙๗

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 72872  
วัน,เดือน,ปี..... 25 ส.ย. 2550

๖. ๗๗๖๔๔๐๗  
๗.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบห้องเผาไหม้เครื่องยนต์ดีเซลใช้น้ำมันพืช  
DESIGNING COMBUSTION CHAMBER OF A DIESEL ENGINE USING NEAT VEGETABLE OIL



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบห้องเผาไหม้เครื่องยนต์ดีเซลใช้น้ำมันพืช

(DESIGNING COMBUSTION CHAMBER OF A DIESEL ENGINE USING NEAT VEGETABLE OIL)

ผู้จัดทำ

1. นาย ฉัฐพนธ์ สักดิ์เจริญ รหัสประจำตัว 46010206
2. นาย มังกร ชันทะบุตร รหัสประจำตัว 46010604



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้