

การศึกษากังหันไอความดันต่ำขนาด เล็กสำหรับใช้กับพลังงานแสงอาทิตย์



นายกิม ศักดิ์หัสณา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

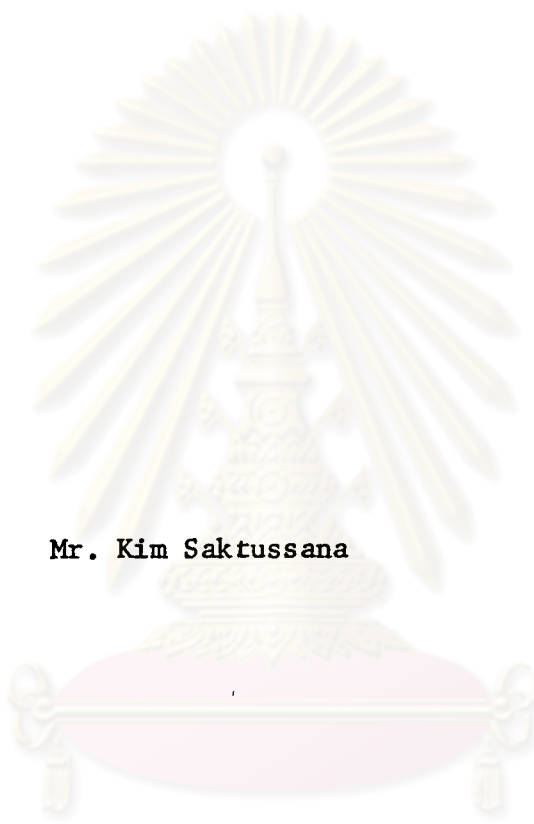
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ.2527

ISBN 974-563-206-6

013146

A STUDY OF SMALL LOW PRESSURE VAPOUR TURBINES  
FOR SOLAR ENERGY USES



Mr. Kim Saktussana

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science  
Department of Physics  
Graduate School  
Chulalongkorn University

1984

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษากังหันไอความดันต่ำขนาดเล็กสำหรับใช้กับ

พลังงานแสงอาทิตย์

โดย

นายกิม คักดีห์คานา

ภาควิชา

ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.พิฑูร ตรีวิจิตรเกษม



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

*[Signature]*  
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุประดิษฐ์ บุนนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

*[Signature]*  
.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร เล็งหะพันธ์)

*[Signature]*  
.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิโย บันยารุ่น)

*[Signature]*  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ยุทธ อัครมาลี)

*[Signature]*  
.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิฑูร ตรีวิจิตรเกษม)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษากังหันไอความดันต่ำขนาดเล็กสำหรับใช้กับ

พลังงานแสงอาทิตย์

ชื่อผู้ผลิต

นายกิม ศักดิ์ที่คณา

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.พิฑูร ตรีวิจิตรเกษม

ภาควิชา

ฟิสิกส์

ปีการศึกษา

2526



บทคัดย่อ

ในการศึกษากังหันไอความดันต่ำขนาดเล็กนี้ ได้สร้างเครื่องกังหันแบบแรงผลักดัน 2 ชั้นความเร็ว มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยวงล้อใบกังหันไม่เกิน 152 มิลลิเมตร ทำการทดลองหาข้อมูลเกี่ยวกับสมรรถนะการทำงานของเครื่องกังหัน โดยใช้อากาศอัดที่มีความดันขนาดต่าง ๆ ระหว่าง 0.5 ถึง 4.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของความดันเกจภายใต้เงื่อนไขหรือภาวะของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดและจำนวนหัวฉีด จากผลการทดลองพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับอัตราหมุน และกำลังงานกับอัตราหมุน ที่ภาวะต่าง ๆ สอดคล้องกับทางทฤษฎี เมื่ออัตราไหลของมวลของอากาศลดลง แรงบิดและกำลังงานจะไม่ลดลงอย่างเป็นสัดส่วนกันแต่จะลดลงมากขึ้นเมื่ออัตราไหลมีค่าต่ำลง เช่น เมื่อลดจำนวนหัวฉีดจาก 4 รู เหลือ 2 รู แรงบิดและกำลังงานที่ได้จะลดลงมากกว่าร้อยละ 50 แสดงให้เห็นว่า ถ้าให้เครื่องกังหันขนาดเล็กทำงานที่ขนาดกำลังต่ำจะยังมีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากการสูญเสียกำลังงานจะเป็นสัดส่วนที่มากเมื่อเทียบกับกำลังงานที่เครื่องกังหันจะให้ได้ สำหรับการใช้อัตราไหลของมวลของอากาศที่เท่ากัน พบว่า เมื่อใช้หัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร จะให้กำลังงานสูงสุดสูงกว่าเมื่อใช้หัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.0 และ 2.5 มิลลิเมตร เช่น อัตราไหลของมวลอากาศเท่ากับ  $6 \times 10^{-3}$  กิโลกรัมต่อวินาที เมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร จะให้กำลังงานสูงสุดสูงกว่าเมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร เท่ากับ 9.8 วัตต์ และสูงกว่าเมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร เท่ากับ 12.8 วัตต์ และจากการทดลองใช้ใบหมุนเพียงแถวเดียว สามารถสรุปได้ว่า ในกรณีเครื่องกังหันไอขนาดเล็ก เครื่องกังหันชนิด 2 ชั้นความเร็ว นอกจากจะสร้างยากแล้วยังมีการสูญเสียภายในมากอาจจะทำให้ได้ผลไม่คุ้มค่า

Thesis Title            A Study of Small Low Pressure Vapour Turbines  
                                  for Solar Energy Uses

Name                      Mr. Kim Saktussana

Thesis Advisor        Associate Professor Phietoon Trivijitkasom, Dr. Ing.

Department            Physics

Academic Year        1983



#### ABSTRACT

In the present work, two-stage velocity compound impulse turbine with mean diameter of rotor not larger than 152 millimeter are constructed. To get informations about their characteristics and performances, compressed air at the gauge pressure ranging from 0.5 to 4.0 kg/cm<sup>2</sup> has been applied under the conditions of varying the size and number of nozzles. It is found that the relation between torque and speed, power and speed at various conditions are consistent with theory. By lowering the mass flow rate of air, torque and power of the turbine do not decrease linearly but they decrease with greater rate with lower mass flow rate. For example, by varying the number of nozzle decreasing from 4 to 2, the torque and power decrease more than 50 percent. The results show that the small vapour turbine operate at low power will provide lower efficiency which due to the substantial internal energy lost compare to the total power. For a given mass rate of flow, it is found that, the using of nozzle with diameter 1.5 millimeter gives the maximum power larger than the ones given by using of nozzle with

diameter 2.0 and 2.5 millimeter. eg. at the air mass flow rate  $6 \times 10^{-3}$  kg/s, the maximum power given by using the nozzle with diameter 1.5 millimeter is higher than that using the nozzle with diameter 2.0 millimeter by 9.8 watts and is also higher than that using the nozzle with diameter 2.5 millimeter by 12.8 watts. The experimental result with single row of moving blades has indicated that, for a small vapour turbine, the two-stage velocity compound type is not only difficult to constructed but also possessing much more internal friction lost so that it may not be advantage to use the second row of moving blades.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อ รองศาสตราจารย์ ดร.พิฑูร ตรีวิจิตรเกษม อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้แนวความคิดในการวิจัย พร้อมทั้งแนะนำและสนับสนุนการแก้ปัญหาต่าง ๆ เป็นอย่างดี

นอกจากนี้ผู้เขียนยังได้รับความช่วยเหลือ จากคุณพระยุทธ เรื่องศิลปวิไล ที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ในโรงงานของศูนย์ซ่อมและสร้างเครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ได้รับคำแนะนำในการสร้างชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่าง ๆ จากคุณ มงคล ไชยศิริ คุณวันชัย ดวงสิทธิกุลชัย คุณสถาพร อัชชสัมบูรณ์ จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ และผู้เขียนขอขอบคุณ คุณสุญาดา หงษ์พวัล และเพื่อน ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ .....	ช
รายการตารางประกอบ .....	ฉ
รายการรูปประกอบ .....	ฉ
บทที่	
1      บทนำ .....	1
1.1    เครื่องกังหันไอ .....	3
1.2    การแบ่งประเภทเครื่องกังหันไอ .....	4
1.2.1    เครื่องกังหันประเภทไหลตามแนวแกน .....	4
1.2.1.1    เครื่องกังหันแบบแรงผลักดัน .....	4
1.2.1.2    เครื่องแบบแรงดันกลับ .....	8
1.2.2    เครื่องกังหันประเภทไหลตามแนวรัศมี .....	10
1.3    วัตถุประสงค์ หลักการและข้อับเขตการวิจัย .....	13
2      ทฤษฎีเครื่องกังหันไอแบบแรงผลักดัน .....	15
2.1    การใช้หลักของโมเมนตัมกับการไหลผ่านล้อหมุน .....	15
2.1.1    แรงรูนแนวแกนบนล้อหมุน .....	16
2.1.2    แรงบิดที่กระทำบนล้อหมุน .....	17
2.2    การไหลของไอผ่านใบกังหันแบบแรงผลักดัน .....	20
2.2.1    ไตอะแกรมความเร็ว .....	22
2.2.2    ประสิทธิภาพไตอะแกรม .....	28
2.2.3    ผลของอัตราส่วนความเร็วที่มีต่อสัมประณธ์ของใบกังหัน .....	31



สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	2.3 ช่องทางผ่านของการไหลในเครื่องกังหันแบบแรงผลักดัน.....	32
	2.3.1 รูปร่างใบกังหัน.....	33
	2.3.2 ระยะห่างและความกว้างของใบกังหัน.....	34
	2.3.3 ความสูงของใบกังหัน.....	35
	2.3.4 เรขาคณิตของรูปแบบใบกังหันแบบแรงผลักดัน.....	37
	2.4 หลักการออกแบบเครื่องกังหันไอ.....	39
	2.5 หัวฉีด.....	44
	2.5.1 การไหลผ่านหัวฉีด.....	46
	2.5.2 ความดันวิกฤต.....	50
	2.5.3 สัดส่วนของหัวฉีด.....	51
	2.5.4 การสูญเสียในหัวฉีด.....	52
	2.6 ความสูญเสียต่าง ๆ ของเครื่องกังหันไอ.....	53
	2.6.1 ความสูญเสียภายใน.....	53
	2.6.2 ความสูญเสียภายนอก.....	54
	2.7 ประสิทธิภาพของเครื่องกังหันไอ.....	54
3	การทดลอง.....	57
	3.1 การสร้างเครื่องกังหัน.....	57
	3.1.1 การคำนวณออกแบบเครื่องกังหัน.....	57
	3.1.2 การสร้างส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องกังหัน.....	66
	3.1.3 การประกอบเครื่องกังหัน.....	72
	3.2 การวัดแรงบิดและกำลังงาน.....	74
	3.2.1 หลักการวัดแรงบิดและกำลังงาน.....	75
	3.2.2 วิธีวัดแรงบิดและกำลังงาน.....	79

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
3	3.3 การวัดอัตราไหล .....	82
	3.3.1 หลักการวัดอัตราไหล .....	82
	3.3.2 วิธีวัดอัตราไหล .....	91
	3.4 วิธีทำการทดลอง .....	96
4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล .....	98
	4.1 อัตราหมุนขณะไม่มีภาระ .....	98
	4.2 อัตราไหลของมวลของอากาศ .....	101
	4.3 ผลของการใช้ความดันอากาศอัดขนาดต่าง ๆ .....	106
	4.4 ผลของการใช้หัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่างกัน .....	128
	4.5 ผลของการลดจำนวนหัวฉีด .....	139
	4.6 ผลการทดลองเมื่อใช้ใบกังหันเพียงหนึ่งแถว .....	151
	4.7 ผลการทดลอง เครื่องกังหันชนิด 1 ชั้นความเร็ว .....	158
	4.8 ผลการทดลอง เครื่องกังหันแบบไหลตามแนวรัศมีชนิดมีใบหมุน 1 แถว .....	164
5	สรุปผลและเสนอแนะ .....	170
	เอกสารอ้างอิง .....	174
	ภาคผนวก .....	179
	ประวัติผู้เขียน .....	225

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการตารางประกอบ

ตารางที่		หน้า
4.1	แสดงผลการทดลองเครื่องกังหันเครื่องที่ 1 เมื่อเครื่องกังหันให้กำลังงานสูงสุด .....	113
	ก. เมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.59 มิลลิเมตร .....	113
	ข. เมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร .....	113
	ค. เมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.38 มิลลิเมตร .....	114
	ง. แสดงสมรรถนะในการผลิตกำลังงานของเครื่องกังหันเครื่องที่ 1	115
4.2	แสดงผลการทดลองเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 เมื่อเครื่องกังหันให้กำลังงานสูงสุด .....	124
	ก. เมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร .....	124
	ข. เมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร .....	125
	ค. เมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร .....	125
	ง. แสดงสมรรถนะในการผลิตกำลังงานของเครื่องกังหันเครื่องที่ 2	126
4.3	แสดงผลการทดลองเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 เมื่อลดจำนวนหัวฉีดเหลือ 2 ร	
	ก. เมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร .....	144
	ข. เมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร .....	145
	ค. แสดงสมรรถนะในการผลิตกำลังงานของเครื่องกังหันเครื่องที่ 2	145
4.4	ก. แสดงผลการทดลองเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 เมื่อใช้ใบหมุนเพียงหนึ่งแถว .....	154
	ข. แสดงสมรรถนะในการผลิตกำลังงานของเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 เมื่อใช้ใบหมุนหนึ่งแถวและสองแถว .....	154
4.5	แสดงผลการทดลองเครื่องกังหันชนิด 1 ขึ้นความเร็ว เมื่อเครื่องกังหันให้กำลังงานสูงสุด .....	162

รายการตารางประกอบ

ตารางที่		หน้า
4.6	แสดงผลการทดลอง เครื่องกังหันแบบไหลตามแนวรัศมี เมื่อเครื่องกังหัน ให้กำลังงานสูงสุด.....	167



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการรูปประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	ลักษณะของใบกังหันแบบแรงผลักดัน.....	5
1.2	แผนภาพของหัวฉีด ใบกังหัน และความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว กับความดันของกาซหรือไอของ เครื่องกังหันชนิดแรงผลักดัน และชนิดรวมความเร็ว .....	7
1.3	แผนภาพของหัวฉีดกับใบกังหัน และความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับ ความเร็วของกาซหรือไอของ เครื่องกังหันแบบแรงผลักดันชนิด 4 ชั้น ความดัน .....	9
1.4	แผนภาพของ เครื่องกังหันแบบแรงดันกลับ 3 ชั้น และความสัมพันธ์ ระหว่างความดันกับความเร็วของกาซหรือไอที่ไหลผ่านใบกังหัน	
1.5	แผนภาพของ เครื่องกังหันแบบ Ljungström .....	12
2.1	แสดงการไหลของของไหลผ่านช่องทางผ่านใบ ๓ ในล้อหมุน.....	16
2.2	แสดงการไหลผ่านใบกังหันแบบแรงผลักดัน.....	20
2.3	แสดงลักษณะการไหลของไอ เข้าและออกจากใบกังหัน .....	21
2.4	ไดอะแกรมความเร็วของ เครื่องกังหันแบบแรงผลักดันชนิดธรรมดา	22
2.5	แสดงช่องผ่านระหว่างใบกังหันที่ให้อิไหลผ่าน.....	25
2.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับอัตราเร็วของใบกังหัน .....	25
2.7	ไดอะแกรมความเร็วสำหรับ เครื่องกังหันชนิด 2 ชั้นความเร็ว	27
2.8	แสดงการแปรผันของค่าประสิทธิภาพไดอะแกรมกับอัตราส่วนความเร็ว	30
2.9	ผลของลำไอที่เข้าสู่ใบกังหันด้วยความเร็วแตกต่างกัน .....	31
2.10	แสดงรูปร่างใบกังหันแบบแรงผลักดัน .....	33
2.11	แสดงโครงสร้างของใบกังหันแบบแรงผลักดันที่มีรูปร่างสมมาตร...	34
2.12	แสดงใบกังหันที่มีขอบตรงที่ทางออก .....	34
2.13	แสดงโครงสร้าง เรขาคณิตของใบกังหันแบบแรงผลักดันสมมาตร และไม่สมมาตร .....	38
2.14	ไดอะแกรมความเร็วของ เครื่องกังหันชนิด 2 ชั้นความเร็ว .....	41

รายการรูปประกอบ

รูปที่		หน้า
2.15	แสดงหัวฉีดชนิดเรียวบาน .....	45
2.16	แสดงหัวฉีดชนิดเรียว .....	45
2.17	แสดงระนาบ 1 และ 2 ใด ๆ ในหัวฉีด .....	46
3.1	ล๊อกกังหันที่ติดใบกังหันแล้วและเพลากังหันของเครื่องกังหันเครื่องที่ 2	66
3.2	รูปร่างใบกังหันที่สร้างขึ้นและแบบเหล็กที่ใช้ตัดใบกังหัน .....	67
3.3	แสดงการตัดโค้งใบกังหันและใบกังหันที่แต่งขอบแล้ว .....	68
3.4	ภาพด้านข้างของหัวฉีดที่ใช้ในเครื่องกังหันเครื่องที่ 1 และเครื่องที่ 2	69
3.5	วงหัวฉีดที่ใช้ในเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 .....	70
3.6	ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 .....	71
3.7	เครื่องกังหันเครื่องที่ 2 เมื่อประกอบเสร็จแล้ว .....	72
3.8	แสดงวงล้อใบกังหันที่ประกอบเข้ากับเพลาทัง 3 วง .....	73
3.9	แสดงฝาด้านหน้าที่ประกอบล๊อกกังหันแล้วและฝาด้านหลังที่ติดวงหัวฉีดแล้ว	74
3.10	แสดงไดนาโมมิเตอร์วิธีเบรคเชิงกล .....	76
3.11	แสดงลักษณะไดนาโมมิเตอร์ไฟฟ้าแบบไดนาโม .....	78
3.12	ไดนาโมกระแสตรงที่ใช้ในการวัดแรงบิด .....	80
3.13	แสดงการใช้ไดนาโมมิเตอร์ไฟฟ้าในการวัดแรงบิด .....	81
3.14	เครื่องวัดรอบชนิดใช้แสงสะท้อน .....	82
3.15	แสดงมาตรวัดการไหลแบบคอคอด 3 ชนิด .....	83
3.16	แสดงการไหลของของไหลผ่านท่อที่มีส่วนคอด .....	84
3.17	แสดงสัดส่วนของท่อ เวนทูรีตามแบบมาตรฐานของอังกฤษ .....	87
3.18	แสดงวิธีวัดความเร็วของกจรูไหลด้วยท่อปิดตอต .....	89
3.19	แสดงลักษณะการแจกแจงความเร็วของการไหลภายในท่อ .....	90
3.20	แมนอมิเตอร์แบบหลอดเอียง .....	90
3.21	แสดงท่อ เวนทูรีที่ใช้วัดความเร็วของการไหลอันที่ 1 และอันที่ 2	93

## รายการรูปประกอบ

รูปที่		หน้า
3.22	แสดงการใช้ท่อเวนทูรีในการวัดอัตราไหล.....	94
3.23	แสดงการใช้ท่อปิดต่อกับท่อเวนทูรีในการวัดอัตราไหล.....	95
4.1	กราฟระหว่างอัตราหมุนกับความดันอากาศอัด ขณะไม่มีภาระของ เครื่องกังหันเครื่องที่ 1.....	99
4.2	กราฟระหว่างอัตราหมุนกับความดันอากาศอัด ขณะไม่มีภาระของ เครื่องกังหันเครื่องที่ 2 .....	99
4.3	กราฟระหว่างอัตราหมุนกับความดันของอากาศอัด ขณะไม่มีภาระ เมื่อลดจำนวนหัวฉีดเหลือ 2 หัว ของเครื่องกังหันเครื่องที่ 2.....	100
4.4	กราฟระหว่างอัตราไหลของมวลของอากาศกับความดันอากาศอัด ของเครื่องกังหันเครื่องที่ 1 .....	103
4.5	กราฟระหว่างอัตราไหลของมวลของอากาศกับความดันอากาศอัดของ เครื่องกังหันเครื่องที่ 2 .....	104
4.6	กราฟระหว่างอัตราไหลของมวลของอากาศกับความดันอากาศอัด เมื่อ ใช้หัวฉีดจำนวน 2 หัว ของเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 .....	104
4.7	กราฟระหว่างแรงปิดกับอัตราหมุนเมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.59 มิลลิเมตร .....	108
4.8	กราฟระหว่างแรงปิดกับอัตราหมุนเมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร .....	109
4.9	กราฟระหว่างแรงปิดกับอัตราหมุนเมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.38 มิลลิเมตร .....	110
4.10	กราฟระหว่างกำลังงานที่เพลากับอัตราหมุนเมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่า ศูนย์กลาง 1.59 มิลลิเมตร .....	111
4.11	กราฟระหว่างกำลังงานที่เพลากับอัตราหมุนเมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้น ผ่าศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร .....	111



## รายการรูปประกอบ

รูปที่		หน้า
4.12	กราฟระหว่างกำลังงานที่เพลากับอัตราหมุน เมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.38 มิลลิเมตร .....	112
4.13	กราฟระหว่างแรงบิดกับอัตราหมุน เมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร .....	117
4.14	กราฟระหว่างแรงบิดกับอัตราหมุนเมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร .....	118
4.15	กราฟระหว่างแรงบิดกับอัตราหมุนเมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร .....	119
4.16	กราฟระหว่างกำลังงานที่เพลากับอัตราหมุนเมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร .....	121
4.17	กราฟระหว่างกำลังงานที่เพลากับอัตราหมุนเมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร .....	122
4.18	กราฟระหว่างกำลังงานที่เพลากับอัตราหมุนเมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร .....	123
4.19	กราฟระหว่างกำลังงานสูงสุดกับอัตราไหลของมวลของอากาศ สำหรับหัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5, 2.0 และ 3.0 มิลลิเมตร.....	127
4.20	กราฟระหว่างแรงบิดกับอัตราหมุน ที่ความดันอากาศอัด 2.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของเครื่องกังหันเครื่องที่ 1 .....	129
4.21	กราฟระหว่างแรงบิดกับอัตราหมุน ที่ความดันอากาศอัด 1.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 .....	130
4.22	กราฟระหว่างแรงบิดกับอัตราหมุน ที่ความดันอากาศอัด 1.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 .....	131
4.23	กราฟระหว่างแรงบิดกับอัตราหมุน ที่ความดันอากาศอัด 2.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 .....	132



## รายการรูปประกอบ

รูปที่		หน้า
4.24	กราฟระหว่างกำลังงานที่เพลากับอัตราหมุน ที่ความดันอากาศอัด 2.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของเครื่องกังหันเครื่องที่ 1	133
4.25	กราฟระหว่างกำลังงานที่เพลากับอัตราหมุน ที่ความดันอากาศอัด 1.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของเครื่องกังหันเครื่องที่ 2	134
4.26	กราฟระหว่างกำลังงานที่เพลากับอัตราหมุน ที่ความดันอากาศอัด 1.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของเครื่องกังหันเครื่องที่ 2	135
4.27	กราฟระหว่างกำลังงานที่เพลากับอัตราหมุน ที่ความดันอากาศอัด 2.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของเครื่องกังหันเครื่องที่ 2	136
4.28	กราฟระหว่างแรงปิดกับอัตราไหลของมวลของอากาศ ที่ความดัน อากาศอัดคงที่ และอัตราหมุนเท่ากัน สำหรับหัวฉีดขนาดเส้นผ่า ศูนย์กลาง 1.5, 2.0 และ 2.5 มิลลิเมตร.....	138
4.29	กราฟระหว่างแรงปิดกับอัตราหมุน เมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร จำนวน 2 รู .....	140
4.30	กราฟระหว่างแรงปิดกับอัตราหมุน เมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร จำนวน 2 รู.....	141
4.31	กราฟเปรียบเทียบแรงปิดของเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 เมื่อใช้หัวฉีด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร จำนวน 2 รู.....	142
4.32	กราฟระหว่างกำลังงานที่เพลากับอัตราหมุน เมื่อใช้หัวฉีดขนาดเส้น ผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร จำนวน 2 รู .....	143
4.33	กราฟเปรียบเทียบแรงปิดของเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 เมื่อใช้หัวฉีดจำนวน 4 รู และ 2 รู สำหรับหัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร	147
4.34	กราฟเปรียบเทียบแรงปิดของเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 เมื่อใช้หัวฉีด จำนวน 4 รู และ 2 รู สำหรับหัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร .....	148

## รายการรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
4.35	กราฟเปรียบเทียบกำลังงานของเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 เมื่อใช้หัวฉีดจำนวน 4 รู และ 2 รู สำหรับหัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร 149
4.36	กราฟเปรียบเทียบกำลังงานของเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 เมื่อใช้หัวฉีดจำนวน 4 รู และ 2 รู สำหรับหัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร..... 150
4.37	กราฟระหว่างแรงบิดกับอัตราหมุน เมื่อใช้ใบหมุนเพียง 1 แถว..... 152
4.38	กราฟระหว่างกำลังงานที่เพลากับอัตราหมุน เมื่อใช้ใบหมุนเพียง 1 แถว 153
4.39	กราฟเปรียบเทียบแรงบิดของเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 ระหว่างการใช้ใบหมุน 1 แถว และ 2 แถว..... 156
4.40	กราฟเปรียบเทียบกำลังงานของเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 ระหว่างการใช้ใบหมุน 1 แถว และ 2 แถว..... 157
4.41	กราฟระหว่างแรงบิดกับอัตราหมุนของเครื่องกังหันชนิด 1 ชั้นความเร็ว 160
4.42	กราฟระหว่างกำลังงานกับอัตราหมุนของเครื่องกังหันชนิด 1 ชั้นความเร็ว 161
4.43	กราฟระหว่างแรงบิดกับอัตราหมุนของเครื่องกังหันแบบไหลตามแนวรัศมี 165
4.44	กราฟระหว่างกำลังงานกับอัตราหมุนของเครื่องกังหันแบบไหลตามแนวรัศมี 166