

กัณฑ์ลมแบบแกนคัง



สมัยศ      ชิคมวงกล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2530

ISBN 974-567-536-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

012399

i 10293280

Vertical Axis Wind Turbine

Mr. Somyot Chidmongkol

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Department of Physics

Graduate School

Chulalongkorn University

1987



หัวข้อวิทยานิพนธ์

กึ่งहनลมแบบแกนตั้ง

โดย

นายสมยศ ชิคมมงคล


ภาควิชา

ฟิสิกส์

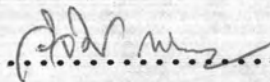
อาจารย์ที่ปรึกษา

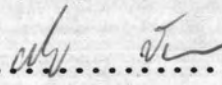
รองศาสตราจารย์ ดร. ภิโย บันยารชุน

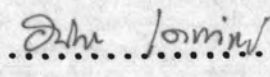
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

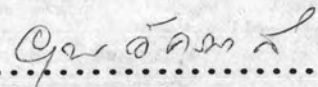
  
.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชรากัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร เสง์ทะพันธุ์)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภิโย บันยารชุน)

  
.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อนันตสิน เคชกะกำพุช)

  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ยุทธ อัครมาส)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



หัวข้อวิทยานิพนธ์

ชื่อนิสิต

อาจารย์ที่ปรึกษา

ภาควิชา

ปีการศึกษา

กังหันลมแบบแกนดิ่ง

นายสมยศ ชิคมงคล

รองศาสตราจารย์ ดร.ภิญโญ บันยารชุน

ฟิสิกส์

2529



บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ เป็นการศึกษา ออกแบบ สร้างและวัดสมรรถนะของกังหันลมแบบแกนดิ่งชนิดมีพื้นที่ภาคตัดขวางคล้ายปีกเฮลิคอปเตอร์ ซึ่งสร้างขึ้นจำนวน 3 ใบ โดยใช้วัสดุที่หาได้ง่ายในประเทศไทย จุดมุ่งหมายของการศึกษาต้องการพิจารณาลักษณะทางด้านเทคนิคของกังหันลมทั้งในเชิงทฤษฎี และการทดลองโดยการวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงแนวคิดเกี่ยวกับนวัตกรรมของกังหันลมแบบแกนดิ่ง ซึ่งในที่นี้สนใจเฉพาะตัวใบที่มีลักษณะเป็นแนวตรง ลักษณะขนาดของกังหันลมแบบแกนดิ่งที่สร้างขึ้นนี้มีคอร์ดยาว 22 เซนติเมตร ลำตัวใบยาว 120 เซนติเมตร มวลต่อความยาว 2.92 กิโลกรัม/เมตร หุ้มผิวตัวใบด้วยแผ่นสังกะสีขนาดเบอร์ 30 โดยมีรัศมีการหมุน 150 เซนติเมตร

ผลจากการวัดและทดสอบ พบว่ากังหันลมแบบแกนดิ่งที่สร้างขึ้นให้กำลังสูงสุด 29.4 วัตต์ ที่อัตราการหมุน 1.43 รอบ/วินาที ณ อัตราเร็วลมประมาณ 8.85 เมตร/วินาที โดยหมุนได้เองเมื่อได้รับลม

Thesis Title            Vertical Axis Wind Turbine  
Name                     Mr. Somyot Chidmongkol  
Thesis Advisor        Associate Professor Bhiyayo Panyarjun, Ph.D.  
Department            Physics  
Academic year        1986



#### ABSTRACT

This research was carried out to study, design, construct, and measure the capability of the vertical axis wind turbine whose blade has across-sectioned area similar to those of the helicopter. The constructed three blades used the materials easily available in Thailand. The purpose of the work is to study the technical feasibility of the device, both theoretically and experimentally. This report describes the research accomplished in evaluating an innovative concept for a vertical axis wind turbine whose blades are straight. The dimension of a vertical axis wind turbine is that it has a chord length of 22 cm., body-bladed length of 120 cm., mass per unit length of 2.92 kg/m, and the surface is covered with a No. 30 zinc plate and the radius of the rotational blade is 150 cm.

This section of the report gives information on the measurement and testing. The results of the testing of the constructed vertical axis wind turbine produce the maximum power of 29.4 watts at the rate of rotation of 1.43 round/second for the speed of wind approximately 8.85 m/s. The turbine is self-starting when it receives the wind.



### กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร.ภิญโญ บันยารชุน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการวิจัยมาด้วยดีตลอด และขอขอบคุณ พ.จ.อ. พูน ปาจรุ ที่ให้ความช่วยเหลือในบางกรณี ตลอดจนเจ้าหน้าที่ของโรงงานภาควิชาฟิสิกส์ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการขอใช้อุปกรณ์มา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ ผู้วิจัย ไคร่ชอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา





## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตารางประกอบ.....	ญ
สารบัญรูปประกอบ.....	ฎ
<b>บทที่</b>	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและเหตุผลในการศึกษากังหันลมแบบแกนตั้ง.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย.....	3
1.3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	4
2. การเกิดลมและประวัติเกี่ยวกับกังหันลม.....	5
2.1 แหล่งกำเนิดลม.....	5
2.2 ประวัติเกี่ยวกับกังหันลม.....	12
2.3 ชนิดของเครื่องกลที่ใช้เป็นตัวเก็บพลังงานจากลม.....	18
2.4 ลักษณะของลม.....	29
2.5 การเลือกทำเลที่จะติดตั้งเครื่องกลที่ต้องอาศัยลมในการทำงาน.....	37
2.6 กำลังที่สกัดได้จากกระแสลม.....	41
3. ความรู้เกี่ยวกับวิชาอากาศพลศาสตร์.....	48
3.1 คุณสมบัติของของไหล.....	49
3.2 แรงแอากาศพลศาสตร์และโมเมนต์.....	56
3.3 การกระจายความดันและความเค้นเฉือนที่ทำให้เกิดแรง อากาศพลศาสตร์และโมเมนต์.....	59

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.4	สัมประสิทธิ์ของแรงอากาศพลศาสตร์และโมเมนต์..... 63
3.5	ศูนย์กลางของความดัน..... 64
3.6	การกระจายความดันบนตัววัตถุที่อยู่ในของไหล..... 66
3.7	หลักพื้นฐานและสมการเกี่ยวกับของไหล..... 70
3.8	เส้นทางเคินและเส้นกระแสของของไหล..... 84
3.9	ความเร็วเชิงมุมและความวนเวียน..... 88
3.10	การไหลเวียน..... 91
3.11	ฟังก์ชันกระแส..... 93
3.12	ศักย์ความเร็ว..... 96
3.13	ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันกระแสและศักย์ความเร็ว..... 96
3.14	ชั้นขอบเขต..... 97
4	เครื่องมือและผลการทดลอง..... 99
4.1	ส่วนประกอบของระบบกัมมันตภาพ..... 99
4.2	การวัดการกระจายอัตราเร็วลมจากแหล่งกำเนิด..... 117
4.3	เครื่องวัดรอบ..... 136
4.4	การวัดกำลังที่ได้จากกังหัน..... 137
4.5	วิเคราะห์การทำงานของใบกังหันลมแบบแกนตั้ง ชนิดภาคตัดขวางคล้ายปีกเฮลิคอปเตอร์..... 145
5	บทสรุป..... 154
	เอกสารอ้างอิง..... 155
	ภาคผนวก ก. .... 156
	ภาคผนวก ข. .... 158
	ภาคผนวก ค. .... 160
	ภาคผนวก ง. .... 162



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก จ. ....	164
ภาคผนวก ฉ. ....	166
ภาคผนวก ช. ....	167
ประวัติผู้เขียน.....	171

สารบัญตารางประกอบ

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบความต้องการกำลังและขีดจำกัด ของกำลังที่สกัดมาได้จากธรรมชาติ.....	11
2.2 ตารางแสดงลักษณะทำเลที่เหมาะสม.....	40
2.3 สัมประสิทธิ์ของกำลังในอุคมคติสำหรับใบกังหันพื้นที่ต่าง ๆ.....	45
3.1 แสดงค่าความดันอุณหภูมิจและความหนาแน่นของอากาศ ณ ระดับความสูงจากน้ำทะเลต่าง ๆ กัน.....	53
4.1 แสดงการกระจายกระแสลมบนระนาบ $xz$ ที่ตำแหน่ง $y = 0$ ซม.....	126
4.2 แสดงการกระจายกระแสลมบนระนาบ $xz$ ที่ตำแหน่ง $y = 5$ ซม.....	127
4.3 แสดงการกระจายกระแสลมบนระนาบ $xz$ ที่ตำแหน่ง $y = 10$ ซม.....	128
4.4 แสดงการกระจายกระแสลมบนระนาบ $xz$ ที่ตำแหน่ง $y = 15$ ซม.....	129
4.5 แสดงการกระจายกระแสลมบนระนาบ $xz$ ที่ตำแหน่ง $y = 20$ ซม.....	130
4.6 แสดงการกระจายกระแสลมบนระนาบ $xz$ ที่ตำแหน่ง $y = 25$ ซม.....	131
4.7 แสดงการกระจายกระแสลมบนระนาบ $xz$ ที่ตำแหน่ง $y = 30$ ซม.....	132
4.8 แสดงการกระจายกระแสลมบนระนาบ $xz$ ที่ตำแหน่ง $y = 35$ ซม.....	133
4.9 แสดงการกระจายกระแสลมบนระนาบ $xz$ ที่ตำแหน่ง $y = 40$ ซม.....	134
4.10 แสดงกำลังของระบบกังหันที่อัตราการหมุนค่าต่าง ๆ.....	141
4.11 แสดงค่าของทอร์คที่อัตราการหมุนต่าง ๆ .....	143
4.12 แสดงค่ามุมโคจร $\theta$ และมุมปะทะ $\alpha$ .....	149
4.13 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแรงที่กระทำบนตัวใบตามแนวแกน $X$ และ $Y$ ที่ค่ามุมปะทะต่าง ๆ .....	152

สารบัญรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการเกิดและการพัดของลมทะเล.....	5
2.2 แสดงการเกิดและการพัดของลมบก.....	6
2.3 ลมระหว่างหุบเขาในเวลากลางวัน.....	6
2.4 ลมระหว่างหุบเขาในเวลากลางคืน.....	7
2.5 การเคลื่อนตัวของอากาศบนผิวโลกเมื่อพิจารณาตอนโลกไม่หมุน.....	8
2.6 การหมุนของโลกมีผลต่อทิศทางการเคลื่อนตัวของลม.....	9
2.7 ลักษณะการเคลื่อนตัวและการบิดตัวของลมในแต่ละฤดู.....	10
2.8 กังหันลมแกนตั้งแบบเปเปอร์ เขียนพร้อมกับหินโมโดยมองจาก ด้านข้างและด้านบน.....	12
2.9 กังหันลมแกนนอนแบบคั้งเดิมซึ่งทำด้วยไม้ใช้สำหรับโรงสีข้าว กังหันลมชนิดนี้ ปัจจุบันอยู่ที่เมืองมิโคโนส บนเกาะกรีก.....	13
2.10 กังหันลมที่ใช้กับโรงสีแบบแปคเหลี่ยม ซึ่งเป็นแบบของชาว ฮอลแลนด์ใต้ โดยมีกังล้อภายในพร้อมทั้งแสดงส่วนการทำงานของกังล้อ.....	14
2.11 รูปแสดงส่วนของการขับเคลื่อน โดยใช้หลักอากาศมีเคียนสกรูที่ใช้กับโรงระบายน้ำ..	15
2.12 แสดงชนิดของใบกังหันแบบสมัยแรก ๆ .....	16
2.13 แสดงตัวกังหันลมที่ได้ติดตั้งและพร้อมที่จะใช้งาน.....	16
2.14 กังหันลมที่ใช้ในการระบายน้ำเป็นแบบฮอลแลนด์เหนือ สร้างใน ค.ศ. 1761.	17
2.15 ตัวหมุนชนิดใบเดี่ยว.....	19
2.16 ตัวหมุนแกนนอนชนิดหลายใบ.....	20
2.17 ตัวหมุนแบบชาโวเนียส.....	22
2.18 การออกแบบลักษณะตัวหมุนแบบชาโวเนียส.....	22
2.19 ตัวหมุนแบบแคร้ เรียส.....	23
2.20 ตัวหมุนแกนตั้งแบบแคร้ เรียสสร้างโดยห้องปฏิบัติการ ชานเคียในนิวเมกซิกโก.....	24



## สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 การทดสอบแบบจำลองของตัวหมุนแบบ Madaras ที่เบอร์ลิงตัน รัฐนิวเจอร์ซีย์.....	25
2.22 ปรางค์การณั้แมกนั้ส.....	26
2.23 แนวคิดเกี่ยวกับตัวหมุนแบบ Madaras .....	26
2.24 การเปรียบเทียบความหนาแน่นของกำลังลมและกำลังจาก พลังงานแสงอาทิตย์.....	27
2.25 การเปรียบเทียบความหนาแน่นกำลังของลมและจากแสงอาทิตย์ในฤดูร้อน....	28
2.26 การเปรียบเทียบความหนาแน่นของกำลังลมและแสงอาทิตย์ในฤดูหนาว.....	28
2.27 ลำของกระแสลม.....	29
2.28 การเปลี่ยนความหนาแน่นกำลังเมื่อเทียบกับความเร็วลมและ ระยะความสูงเหนือระดับน้ำทะเล.....	30
2.29 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังจากกระแสลมกับพื้นที่หน้าตัด ของกระแสลมและความเร็วของลม.....	31
2.30 ลักษณะของความเร็วที่บันทึกได้จากพื้นที่แห่งหนึ่ง.....	32
2.31 แสดงการกระจายของลมที่พัดในแต่ละทิศจากจุด ๆ หนึ่ง.....	32
2.32 ตัวอย่างแสดงกราฟการเปลี่ยนอัตราเร็วลมอย่างกระตันทัน.....	33
2.33 ลักษณะการกระจายความหนาแน่นของพลังงานลมในรอบปี ที่อัตราเร็วลมต่าง ๆ .....	33
2.34 ลักษณะการกระจายของความหนาแน่นพลังงานลมที่ค่าอัตราเร็วสูง ๆ .....	34
2.35 การกระจายของอัตราเร็วลมเฉลี่ยในเชิงธรณีวิทยา ที่ระดับความสูง 20 เมตร จากพื้น.....	35
2.36 การกระจายของอัตราเร็วลมเฉลี่ยในเชิงธรณีวิทยา ที่ระดับความสูง 40 เมตร จากพื้น.....	35
2.37 การกระจายของความหนาแน่นของกำลังลมในเชิงธรณีวิทยา ที่ระดับความสูง 20 เมตร จากพื้น.....	36

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.38 การกระจายของความหนาแน่นของกำลังลมในเชิงธรณีวิทยา ที่ระดับความสูง 40 เมตร จากพื้น.....	36
2.39 แสดงการกระจายของอัตราเร็วลมตามแนวตั้งเทียบกับ ความหยาบของผิวพื้นบนผิวโลก.....	37
2.40 ผลจากการขวางทางลมของตัวกั้นที่ความสูงต่าง ๆ .....	38
2.41 การไหลของลมผ่านภูเขาจะมีอัตราเร็วสูงตรงส่วนบน.....	38
2.42 ภาพแสดงการไหลของลมระหว่างหุบเขา แสดงให้เห็นส่วนข้างและด้านบน.....	39
2.43 การเลือกจุดที่เหมาะสมในการติดตั้งเครื่องมือเกี่ยวกับลม.....	40
2.44 ความสัมพันธ์ของแรงที่กระทำบนกั้น.....	41
2.45 ภาพแสดงการไหลของลม อัตราเร็วและความดันของลม ขณะใบกั้นทำงาน.....	42
2.46 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของกำลังกับอัตราเร็ว ของการหมุนและพื้นที่ของใบกั้น.....	46
2.47 แสดงกราฟการทำงานของกั้นลมแบบต่าง ๆ .....	47
3.1 แสดงส่วนย่อยของของไหลรูปทรงมุมในสภาวะสมดุลสถิต.....	50
3.2 แผนภาพแสดงความดันที่เกิดขึ้น.....	51
3.3 การเคลื่อนที่ของแผ่นบางของของไหล 2 แผ่น ที่ติดกัน.....	54
3.4 ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหลที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....	55
3.5 ภาพแสดงความดันและความเค้นเฉือนบนผิววัตถุรูปปีกเสลิกอปเตอร์.....	56
3.6 ภาพแสดงแรงอากาศพลศาสตร์ลัพท์และโมเมนต์บนตัววัตถุ.....	56
3.7 แรงอากาศพลศาสตร์ลัพท์และแรงองค์ประกอบ.....	57
3.8 การเปลี่ยนแปลงความดันตามสมการของเบอร์นูลีทำให้เกิดแรงยก.....	58
3.9 วัตถุรูปสมมาตรแต่ว่าในตัวในแนวเอียง.....	58
3.10 ทิศทางการกระทำของความดันและความเค้นเฉือนที่กระจายตามผิววัตถุ.....	59
3.11 แรงอากาศพลศาสตร์บนส่วนย่อยเล็ก ๆ บนผิวดังไว้.....	60

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.12	แสดงสัญลักษณ์เครื่องหมายเนื่องจากโมเมนต์ของอากาศพลศาสตร์.....	62
3.13	แสดงพื้นที่ $S$ และความยาวลำตัว .....	64
3.14	ศูนย์กลางของความดันบนตัววัตถุ.....	65
3.15	แสดง 3 ลักษณะที่เป็นผลจากการกระทำของแรงและโมเมนต์บนวัตถุ รูปปีกเฮลิคอปเตอร์.....	66
3.16	แสดงการกระจายความดัน.....	67
3.17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $C_p$ และ $x/c$ .....	68
3.18	แสดงการกระจายความดันที่มุมปะทะบางค่า.....	69
3.19	ขึ้นของไหลในสนามของไหล.....	70
3.20	แสดงปริมาตรควบคุมและผิวควบคุมของของไหล.....	70
3.21	แสดงการไหลของมวลผ่านพื้นที่ $A$ .....	71
3.22	แสดงจุดบนผิวปริมาตรที่มีพื้นที่ $dS$ และความเร็ว $\vec{v}$ .....	72
3.23	แสดงการทำงานของแรง $\vec{F}$ บนวัตถุ.....	81
3.24	เส้นทางเดินของชั้นของไหลสองชั้น โดยผ่านจุดเดียวกันในสนามการไหล ที่ไม่สม่ำเสมอ.....	85
3.25	แสดงเส้นกระแส.....	86
3.26	แสดงเส้นกระแสและเส้นทางเดินสำหรับการไหลแบบสม่ำเสมอ.....	86
3.27	แสดงสมการของเส้นกระแสใน 2 มิติ.....	87
3.28	การเคลื่อนของชั้นของไหลตามเส้นกระแสแล้วมีการหมุนและเปลี่ยนรูปร่าง.....	88
3.29	แสดงการหมุนและบิดเบี้ยวของชั้นของไหล.....	88
3.30	อัตราเร็วเชิงมุมของชั้นของไหลใน 3 มิติ.....	90
3.31	แสดงนิยามของการไหลเวียน.....	92
3.32	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความวนเวียนและการไหลเวียน.....	93
3.33	แสดงเส้นกระแสที่มีฟังก์ชันกระแสต่างกัน.....	94



## สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.34	แสดงสนามการไหลของมวลระหว่างเส้นกระแส..... 94
3.35	แสดงเส้นกระแสและศักย์ความเร็ว..... 97
3.36	แสดงการแผ่กระจายความเร็วของของไหลผ่านแผ่นระนาบบาง..... 98
3.37	แสดงชั้นขอบเขตของของไหลและบริเวณลักษณะการไหล..... 98
4.1	ภาพแสดงท่อเหล็กที่ใช้ทำแกนปีกของใบกังหันและภาพแสดงพื้นที่หน้าตัด ของท่อเหล็กขนาดเท่าของจริง..... 100
4.2	ภาพแสดงแผ่นไม้กระดานอัดที่ถูกตัดให้มีรูปพื้นที่ภาคตัดขวางคล้ายปีก เฮลิคอปเตอร์โดยมองจากด้านข้างตรง และด้านข้างเฉียง..... 100
4.3	แสดงแผ่นไม้กระดานอัดพื้นที่ภาคตัดขวางคล้ายปีกเฮลิคอปเตอร์ ที่ถูกยึดติดกับแกนท่อเหล็ก 2 ท่อน..... 101
4.4	แสดงโครงร่างภายในทั้งหมดของใบกังหันแบบภาคตัดขวางรูปปีกเฮลิคอปเตอร์.. 101
4.5	แผนภาพแสดงส่วนพับของสังกะสีเป็นรอยตะเข็บและแผ่นสังกะสีปิดหัวท้าย ของตัวใบกังหัน..... 102
4.6	แผนภาพแสดงการหุ้มสังกะสีและรอยพับ..... 103
4.7	ภาพแสดงใบกังหันเมื่อสร้างเสร็จแล้ว..... 104
4.8	แสดงขนาดของส่วนยึดใบกังหันกับแกนรัศมี..... 105
4.9	แสดงส่วนยึดใบกังหันกับแกนรัศมีประกอบด้วย 2 ส่วนใช้ประกบกัน..... 105
4.10	ภาพแสดงส่วนยึดใบกังหันเชื่อมต่อกับแกนรัศมีที่ประกอบเสร็จแล้ว..... 106
4.11	แสดงแกนรัศมีและการเชื่อมต่อกับแกนกลางและตัวใบกังหัน..... 107
4.12	แสดงแกนแนวรัศมีจากเครื่องมือจริงที่สร้างขึ้น..... 108
4.13	แผนภาพแสดงชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเสาแกนกลางส่วนบน..... 109
4.14	แสดงส่วนประกอบของเสาแกนกลางส่วนบน..... 110
4.15	แสดงส่วนประกอบของเสาแกนกลางส่วนกลาง..... 110
4.16	โครงยึดใบกังหัน..... 112

## สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17	แสดงโครงสร้างฐานที่ใช้ติดตั้งใบกังหัน..... 114
4.18	แสดงแผงพัดลมและสวิทช์..... 115
4.19	แสดงแผงพัดลม (Blower) ที่ติดตั้งเสร็จแล้ว..... 116
4.20	แสดงลักษณะของมานอมิเตอร์แบบเอียง..... 117
4.21	แสดงขนาดของท่อปัดต-สแตติก..... 119
4.22	แสดงลักษณะของท่อวัดความดันสถิต..... 120
	(ก) เจาะรูเดียว                      (ข) เจาะสองรู
4.23	แสดงลักษณะของท่อวัดความดันรวม..... 120
4.24	แสดงท่อปัดต-สแตติกและมานอมิเตอร์แบบเอียง..... 121
4.25	แผนภาพแสดงตำแหน่งในการวัดกระแสลม..... 122
4.26	แสดงแผนผังขอบเขตการกระจายอัตราเร็วลมและการกวาด ของใบกังหัน..... 124
4.27	แสดงส่วนประกอบของเครื่องนับรวมแบบแสงเลเซอร์สะท้อน..... 137
4.28	แสดงลักษณะของไคนาโมมิเตอร์แบบโพรานีเบอร์ค..... 138
4.29	แสดงลักษณะโพรานีเบอร์คที่ใช้ในการวิจัย..... 139
4.30	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและอัตราการหมุน..... 142
4.31	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทอร์คกับอัตราการหมุน..... 144
4.32	แสดงรายละเอียดของแรงเชิงเรขาคณิตที่กระทำบนตัวใบกังหันโดย $\alpha_0 = 90^\circ$ ..... 146
4.33	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะกับมุมโคจร..... 150
4.34	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะกับสัมประสิทธิ์ของแรงที่กระทำบนตัวใบตา กระทำบนตัวใบตามแนวแกน X และ Y