การออกแบบและทดสอบกังหันลมใบอ่อนแกนดิ่งประสิทธิภาพสูง

สำหรับสูบน้ำเพื่อการเกษตร

นาย พงศ์ธร มนูพิพัฒน์พงศ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2531

ISBN 974-569-204-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

014312

I16584375

DESIGN AND TESTING OF HIGH EFFICIENCY VERTICAL AXIS SAILWING WIND TURBINE FOR AGRICULTURAL WATER PUMPING

MR. PONGTORN MANUPIPATPONG

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Mechanical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1988

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและทดสอบกังหันลมใบอ่อนแกนดิ่งประสิทธิภาพสูงสำหรับสูบน้ำเพื่อการเกษตร

โดย นาย พงศ์ธร มนูพิพัฒน์พงศ์

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.วริทธิ์ ฮึงภากรณ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดำรงศักดิ์ มลิลา)

.....กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.วริทธิ์ ฮึงภากรณ์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)

.....กรรมการ

(ดร.โอฬาร รัตนปราการ)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พงศ์ธร มนูพิพัฒน์พงศ์ : การออกแบบและทดสอบกังหันลมใบอ่อนแกนดิ่งประสิทธิภาพสูงสำหรับสูบน้ำเพื่อการเกษตร (DESIGH AND TESTING OF HIGH EFFICIENCY VERTICAL AXIS SAILWING WIND TURBINE FOR AGRICULTURAL WATER PUMPING) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร.วริทธิ์ อึ้งภากรณ์ อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์, 124 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ กล่าวถึงการปรับปรุงพัฒนากังหันลมแนวดิ่ง ที่เคยมีผู้ทดลองมาแล้วในประเทศไทยเป็นแบบใบแข็ง โดยได้เปลี่ยนมาเป็นใบอ่อน ซึ่งมีคุณลักษณะเฉพาะตัวคือ จะเริ่มหมุนที่ความเร็วลมต่ำ และหมุนได้ด้วยตัวเองโดยอาศัยแรงยก การทดสอบได้ทำการทดสอบกังหันลม 2 ชุด ซึ่งใช้วัสดุสร้างแขนกังหันต่างกันด้วยความเร็วลมธรรมชาติ ผลการทดสอบขณะไร้ภาระพบว่า กังหันลมชุดแรก ซึ่งมีแขนทำด้วยไม้หมุนด้วยอัตราความเร็วรอบ 6-17 รอบต่อนาที ที่ความเร็วลมเฉลี่ยระหว่าง 2.5-6.0 เมตรต่อวินาที ส่วนกังหันลมชุดที่สองซึ่งมีแขนเป็นอลูมิเนียมหมุนด้วยอัตราความเร็วรอบ 8-26 รอบต่อนาที แต่เมื่อนำมาทดสอบควบคู่กับปั๊มโรตารี่เพื่อใช้สูบน้ำ โดยมี suction lift ก็พบว่าไม่สามารถดูดน้ำขึ้นได้ เนื่องจากความเร็วรอบของกังหันลมขณะมีภาระนี้ จะลดลงเหลือประมาณ 12-15 รอบต่อนาที ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 5-6 เมตรต่อวินาที สาเหตุเนื่องมาจากแรงบิดของกังหันลมประเภทนี้จะน้อยแต่ความเร็วรอบจะสูง และปั๊มน้ำราคาถูกประเภทนี้มีความฝืดมาก ฉะนั้นถ้าความเร็วรอบที่มาหมุนขับปั๊มต่ำกว่า 20 รอบต่อนาที จะไม่สามารถสร้างแรงดูดได้เพียงพอ จากการทดลองใช้เมื่อให้ suction lift เป็นศูนย์พบว่าสามารถส่งน้ำได้ 180 ลิตรต่อชั่วโมง ระยะส่งสูง 0.5 เมตร ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 5-6 เมตรต่อวินาที ข้อมูลลมที่กรุงเทพฯ ที่มีความเร็วลม 4-8 เมตรต่อวินาที จะมีประมาณ 865 ชั่วโมงต่อปี เมื่อคิดอัตราผลตอบแทนที่สูบน้ำต่อการลงทุนที่อายุใช้งาน 2 ปี จะได้ 30.10 บาท/ลบ.ม. ซึ่งยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในกรณีนี้ เว้นแต่จะพัฒนาระบบให้ดีกว่านี้ และติดตั้งในพื้นที่ซึ่งมีลมแรง และจำนวนชั่วโมงลมที่พัดต่อปีมากกว่านี้

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 1990 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

PONGTORN MANUPIPATPONG : DESIGN AND TESTING OF HIGH EFFICIENCY VERTICAL AXIS SAILWING WIND TURBINE FOR AGRICULTURAL WATER PUMPING.
THESIS ADVISOR : PROF. VARIDDHI UNGBHAKORN, Ph.D.
THESIS CO-ADVISOR : ASST. PROF. SOMSAK CHAIYAPINUNT, Ph.D. 124 pp.

The purpose of this thesis is to develop a vertical axis wind turbine by converting the solid-blade design to the sailwing type which can self-start at low wind speed via lift force. Field tests were carried out for two sets of wind turbines with different arm meterials. The results show that, under no-load conditions, the first wind turbine with wooden arms rotates at 6-17 rpm at the wind speed of 2.5-6 m/s. and the second wind turbine with aluminum arms rotates at 8-26 rpm at wind speed of 2.0-6 m/s. However, when the wind turbines are coupled with slide-vane pumps for pumping water, the rotational speed reduces to 12-15 rpm. at wind speed of 5-6 m/s. This is because this type of wind turbine has characteristics of a high-speed and low-torque type, and the low-cost slide-vane pumps are the high friction type. Thus, when the rotation is less than 20 rpm. no suction lift can be created. However, when there is no suction lift the system can discharge 180 lites/hour at 0.5 meter discharge head at wind speed of 5-6 m/s. The monthly average wind power in Bangkok at wind speed 4-8 m/s. is about 865 hours per year which implies a rate of return for water pumping at 30.10 ฿ /cu.M. base on 2 year-life of turbines. This type of wind turbine system, therefore is no cost-effective for installation unless the design can be improved or a higher wind speed site can be chosen.

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2530 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความกรุณาจาก คำสตราจารย์ ดร.วริทธิ์ อึ้งภากรณ์ ผู้ควบคุมการวิจัย ซึ่งพยายามชี้แนะและตีกรอบวิธีดำเนินการวิจัยมิให้เกิดความสับสน โดยให้คำปรึกษา แนะนำ แก้ไขข้อบกพร่อง และพยายามสร้างวิทยานิพนธ์นี้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดแก่ประเทศชาติทางด้านเกษตรกรรม มิใช่เพียงอักขระที่บันทึกเก็บไว้ในห้องสมุดเท่านั้น

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ ที่ให้ความรู้ทางวิชาการด้านพลศาสตร์ของกังหันลมเพื่อใช้ประกอบการออกแบบและสร้าง

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดำรงศักดิ์ มลิลา ที่มอบหนังสือวิจัยการทดสอบเครื่องสูบน้ำแบบลูกสูบ เพื่อเป็นแนวทางการวิจัยศึกษาหาสมรรถนะเครื่องสูบน้ำลูกสูบและเครื่องสูบน้ำหมุนเหวี่ยงแบบใบพา ซึ่งนำมาทดสอบร่วมกับกังหันที่สร้างขึ้นมา

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.โอฬาร รัตนปราการ หัวหน้าฝ่ายศึกษาและค้นคว้าพลังงาน สำนักงานพลังงานแห่งชาติ ที่ได้สละเวลาในบางโอกาสให้คำปรึกษาด้านการหาอัตราผลตอบแทนการสูบน้ำต่อหน่วยพลังงานด้วยกังหันลม และเครื่องยนต์โดยเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์

ผู้วิจัยเองรู้สึกเป็นหนี้บุญคุณต่อ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต ฟุ้งธรรมสาร ที่สนับสนุนการวิจัยด้านพลังงานลมของผู้วิจัยมาตั้งแต่ ปี 2522 และยังคงสนับสนุนตลอดมา ซึ่งก่อประโยชน์แก่เกษตรกรและผู้สนใจมากมาย ซึ่งผู้วิจัยเองเชื่อว่าการพัฒนาด้านพลังงานลมต่อไปในอนาคตจะช่วยให้เกิดรูปแบบของกังหันลมที่มีสมรรถนะสูงราคาถูกและแข็งแรง เพื่อประโยชน์ของเกษตรกรไทยต่อไป และเนื่องจากทุนการวิจัยเรื่องนี้บางส่วนได้รับมาจากทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณต่อบัณฑิตวิทยาลัย มา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งได้ให้คติเตือนใจว่า "อุปสรรคและปัญหาที่เกิดขึ้นเราต้องเป็นผู้แก้ ผลสัมฤทธิ์ที่เกิดขึ้นเท่านั้นที่ผู้อื่นเฝ้าดูอยู่"

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ช

สารบัญรูป ..... ญ

รายการสัญญลักษณ์ ..... ฌ

บทที่

1. บทนำ 1
2. ทฤษฎีของกังหันลมและการออกแบบ 17
3. การเลือกเครื่องสูบน้ำ 36
4. การดำเนินการทดลอง 46
5. ผลการทดลองและอภิปราย 59
6. การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ 72
7. สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ 83

เอกสารอ้างอิง 87

ภาคผนวก

ก. ข้อมูลลมในประเทศไทย 89

ข. แบบกังหันลมและราคาวัสดุ 107

ค. ตัวอย่างข้อมูลลมจากผลการทดลอง 115

ประวัติการศึกษา 124

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2-1	คุณสมบัติของใบกังหันรูปลักษณะต่างๆ	25
2-2	รูปแบบกังหันลมชนิดต่างๆ และข้อแนะนำบางประการ	26
3-1	คุณลักษณะเฉพาะตัวของเครื่องสูบน้ำแบบต่างๆ	36
5-1	ผลการทดลอบกังหันลมชุดที่ 1 c = 0.3 m.	66
5-2	ผลการทดลอบกังหันลมชุดที่ 2 c = 0.3 m.	66
5-3	ผลการทดลอบกังหันลมชุดที่ 2 c = 0.5 m.	67
5-4	สัมประสิทธิ์กำลังของระบบกังหันชุดที่ 1 c = 0.3 m.	68
5-5	สัมประสิทธิ์กำลังของระบบกังหันชุดที่ 2 c = 0.3 m.	68
5-6	สัมประสิทธิ์กำลังของระบบกังหันชุดที่ 2 c = 0.5 m.	69
5-7	ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำที่ขับด้วยมอเตอร์	70
5-8	สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมชุดที่ 1 c = 0.3 m.	70
5-9	สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมชุดที่ 2 c = 0.5 m.	71
5-10	สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมชุดที่ 2 c = 0.5 m.	71
6-1	ข้อมูลทางเทคนิคประกอบการคำนวณต้นทุนการสูบน้ำ	74
6-2	ต้นทุนการสูบน้ำด้วยเครื่องยนต์ดีเซล	78
6-3	ต้นทุนการสูบน้ำด้วยเครื่องยนต์เบนซิน	79
6-4	ต้นทุนการสูบน้ำด้วยกังหันลมหลายใบ 12 PU 500	80
6-5	ต้นทุนการสูบน้ำด้วยกังหันลมหลายใบ NEA	80
6-6	ต้นทุนการสูบน้ำด้วยกังหันลมใบอ่อนแกนดิ่ง	81
6-7	เปรียบเทียบผลตอบแทนต่อต้นทุนการสูบน้ำระบบต่างๆ	82
ค-1	ตัวอย่างข้อมูลสภาพอากาศ วันที่ 24 มกราคม 2528 วัดด้วยเครื่อง WEATHER STATION	119

ตาราง หน้า

ค-1 ตัวอย่างข้อมูลสภาพอากาศ วันที่ 24 มกราคม 2528
วัดด้วยเครื่อง WEATHER STATION ---------- 119
ค-2 ตัวอย่างข้อมูลสภาพอากาศ วันที่ 28 กุมภาพันธ์ 2528
วัดด้วยเครื่อง WEATHER STATION ---------- 120
ค-3 ตัวอย่างข้อมูลสภาพอากาศ วันที่ 7 มีนาคม 2528
วัดด้วยเครื่อง WEATHER STATION ---------- 121
ค-4 ตัวอย่างข้อมูลสภาพอากาศ วันที่ 18 มีนาคม 2528
วัดด้วยเครื่อง WEATHER STATION ---------- 122
ค-5 ตัวอย่างข้อมูลสภาพอากาศ วันที่ 2 เมษายน 2529
วัดด้วยเครื่อง WEATHER STATION ---------- 123

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูป		หน้า
1-1	กังหันลมแบบใบพัดทำด้วยไม้ ความเร็วรอบสูงใช้กับระหัดวิดน้ำเข้านาข้าว	2
1-2	กังหันลมใบอ่อนทำด้วยเสื่อลำแพนหรือผ้าใช้กับระหัดวิดน้ำทะเลเข้านาเกลือ	3
1-3	กังหันลมแบบหลายใบของ Southern Cross ผลิตในประเทศออสเตรเลีย	3
1-4	แสดงทิศทางของลมในกรุงเทพฯ ช่วงเดือนมีนาคม เมษายน และพฤษภาคม	7
1-5	กังหันลมสูบน้ำแบบใบอ่อนกรีก	7
1-6	กังหันลมเสื่อลำแพนใช้ฉุดระหัดวิดน้ำ	7
1-7	กังหันลมสูบน้ำแบบดาวน์วินของสถาบันวิจัยและพัฒนาการเกษตรมาเลเซีย	8
1-8	กังหันลมใบอ่อนบนเสาหน้าแปดเหลี่ยมของ Brace-Institute-Windworks	8
1-9	กังหันลมแบบหลายใบพัด	8
1-10	กังหันลมใบโลหะแบบ 4 ใบพัด	8
1-11	กังหันลมใบโลหะ 4 ใบ ใช้สูบน้ำที่เมือง Ile de Noirmoutier ประเทศฝรั่งเศส	9
1-12	ลักษณะปีกใบอ่อนกังหันลมของมหาวิทยาลัยพรินซ์-ตัน	10
1-13	กังหันแกนแนวนอนใบไม้ชนิดความเร็วรอบสูงใช้สูบน้ำติดตั้งบนเสาไม้เอกลักษณ์กังหันลมไทย	10
1-14	กังหันแกนแนวดิ่งใบอ่อนสำเภาจีน	11
1-15	กังหันแกนแนวดิ่งบนเกาะ Turks และ CaiCos	11
1-16	กังหันแกนแนวดิ่งแบบ Thai jib	12
1-17	กังหันลมซาโวเนียสแบบใบพัด 3 ชั้น	12
1-18	กังหันลมแบบดาร์เรียส	12

รูป หน้า

1-19 กังหันลมแบบไจโร ---------- 12

1-20 เครื่องสูบน้ำแบบลูกสูบไม้ทรงสี่เหลี่ยม ---------- 13

1-21 เครื่องสูบน้ำแบบลูกสูบทำงานสองจังหวะ ---------- 13

1-22 เครื่องสูบน้ำระบบไดอะแฟรม ---------- 13

1-23 เครื่องสูบน้ำแบบไหลเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ---------- 14

1-24 เครื่องสูบน้ำแบบหมุนเหวี่ยงความเร็วรอบต่ำขนาดใหญ่ ---------- 14

1-25 กังหันลมแกนแนวนอนสูบน้ำชนิดเกลียวชื่อ "Tjasker"
ของเนเธอร์แลนด์ ---------- 14

1-26 เครื่องสูบน้ำแบบกระทุ้ง-ดันน้ำไหลภายในท่อ ---------- 15

1-27 เครื่องสูบน้ำแบบสายพานวิดน้ำทำด้วยไม้ ---------- 15

1-28 เครื่องสูบน้ำแบบโซ่-ดึงลูกสูบลิ่มน้ำแบบต่อเนื่อง ---------- 16

1-29 เครื่องสูบน้ำแบบไดอะแฟรมขับเคลื่อนด้วยพลังลมอัด ---------- 16

1-30 เครื่องสูบน้ำแบบโซ่-ลูกสูบหน้าตัดสี่เหลี่ยมทำด้วยไม้ ---------- 16

2-1 Stream tube ของกังหันลม ---------- 20

2-2 กราฟแสดงสัมประสิทธิกำลังและอัตราส่วนความเร็วปลายใบ ------- 22

2-3 ใบพัดกังหันพร้อมทั้งความเร็วและแรงที่เกี่ยวข้อง
a) ภาพด้านหน้า b) ภาพด้านตัดขวาง ---------- 23

2-4 แสดงถึงลำอากาศที่ไหลผ่านกังหันลมในแนวดิ่ง ---------- 27

2-5 เวคเตอร์ของความเร็วลมขณะผ่านกังหันลมแนวดิ่ง ---------- 28

2-6 ทิศทางของแรงบนใบกังหันแกนดิ่งขณะหมุนไปในตำแหน่งต่างๆ ------ 30

2-7 ภาพวาดแสดงระบบปรับมุมใบกังหันเพื่อเลี่ยงอาการเกิด
rotor stall ของกังหันลมแดเรียส์แบบใบตรง
โดยการปรับมุมใบให้ขยับรับลมในตำแหน่งต่างๆ ---------- 31

รูป หน้า

3-1 การแบ่งประเภท-ชนิดของเครื่องสูบน้ำ ---------- 38

3-2 เวคเตอร์ความเร็วของน้ำเมื่อผ่านใบพัดเครื่องสูบน้ำ ---------- 39

3-3 กราฟแสดงสมรรถนะการทำงานของเครื่องสูบน้ำแบบหมุนเหวี่ยง เส้นโค้งบนเป็นเส้น H-Q และเส้นโค้งล่าง เป็นเส้นประสิทธิภาพ --- 40

3-4 ลักษณะการต่อเครื่องสูบน้ำแบบลูกสูบเข้ากับกังหันลม ---------- 41

3-5 การดัดแปลงต่อก้านยับจากกังหันลมเข้ากับเครื่องสูบน้ำ แบบมือโยก ---------- 42

3-6 กราฟแสดงสมรรถนะการทำงานของเครื่องสูบน้ำแบบลูกสูบและ แบบโรตารี่ เส้นกราฟ H-Q จะอยู่ในแนวดิ่ง ซึ่งค่า Q จะมากขึ้น เมื่อ N มากขึ้น และค่า H จะมากขึ้นเมื่อกำลังยับมากขึ้น ------ 43

3-7 การเคลื่อนที่ของลูกสูบซึ่งสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของเพลาข้อเสือ ----- 43

4-1 ผังแสดงการติดตั้งเครื่องมือวัดการทดสอบ ---------- 49

4-2 อุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำ ---------- 53

4-3 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบหาค่าโมเมนต์แรงเฉื่อยของเพลากังหัน โดยวิธี Compound pendulum ---------- 54

4-4 ทดสอบการทำงานของกังหันลมชุดแรก แยนทำด้วยไม้อัดเคลือบด้วย โพลียูริเทน เพื่อทดสอบอายุการใช้งานในสภาพบรรยากาศจริง------ 55

4-5 เวลา 16.30 น. วันที่ 7 เมษายน 2529 เกิดพายุฤดูร้อนพัดกังหัน และเครื่องวัดลมพังหมด ---------- 56

4-6 การศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของกระแสลมเมื่อปะทะขอบอาคารสูง โดยการผูกพู่พลาสติกในแนวดิ่ง สูง 6 เมตร ---------- 56

4-7 ทดสอบการทำงานของกังหันลมชุดแรก และชุดที่สองซึ่งแยนทำด้วย อลูมิเนียมอัดขึ้นรูปเป็นแพนอากาศ NACA 0018 ---------- 57

4-8 แสดงส่วนหน้าของปีกใบพัดตั้งในแนวดิ่งระหว่างแยนกังหันล่างบน ----- 58

4-9 แสดงการติดตั้งกังหันแยนจะถูกยึดด้วยแผ่นเหล็กกลมประกบตั้งฉาก กับเพลากังหัน ---------- 58

รูป หน้า

5-1 การเกิด Seperation เนื่องจากการย่นไปมาของปีกใบอ่อน ---- 60

5-2 การใช้ลวดปรับดึงส่วนท้ายของปีกใบอ่อนให้เกิดเป็น Camber ตลอดเวลาทำงาน ---------- 60

5-3 ภาพวาดแสดงมุมปะทะของความเร็วลมกับขอบอาคารสูงเกิดเป็นมุม α ที่แขนกังหัน ---------- 61

5-4 สมรรถนะการทำงานของเครื่องสูบน้ำแบบลูกสูบที่ระยะชัก 115 มิลลิเมตร ---------- 62

5-5 อัตราการไหลของปั๊มโรตารี่ที่ความเร็วรอบต่างๆ ---------- 63

5-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและความเร็วรอบของกังหันลมขณะหมุนโดยไร้ภาระ ---------- 64

5-7 ความเร็วรอบกังหันชุดที่ 2 เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความยาวคอรัด ------ 65

ก-1 สถานีตรวจอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาที่กระจายอยู่ทั่วประเทศไทย ---------- 90

ก-2 ค่าความเร็วลมเฉลี่ยตลอดรอบปี ---------- 91

ก-3 ค่าความเร็วลมเฉลี่ยในเดือนที่ 1 ---------- 92

ก-4 ค่าความเร็วลมเฉลี่ยในเดือนที่ 2 ---------- 93

ก-5 ค่าความเร็วลมเฉลี่ยในเดือนที่ 3 ---------- 94

ก-6 ค่าความเร็วลมเฉลี่ยในเดือนที่ 4 ---------- 95

ก-7 ค่าความเร็วลมเฉลี่ยในเดือนที่ 5 ---------- 96

ก-8 ค่าความเร็วลมเฉลี่ยในเดือนที่ 6 ---------- 97

ก-9 ค่าความเร็วลมเฉลี่ยในเดือนที่ 7 ---------- 98

ก-10 ค่าความเร็วลมเฉลี่ยในเดือนที่ 8 ---------- 99

ก-11 ค่าความเร็วลมเฉลี่ยในเดือนที่ 9 ---------- 100

ก-12 ค่าความเร็วลมเฉลี่ยในเดือนที่ 10 ---------- 101

ก-13 ค่าความเร็วลมเฉลี่ยในเดือนที่ 11 ---------- 102

ก-14 ค่าความเร็วลมเฉลี่ยในเดือนที่ 12 ---------- 103

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูป หน้า

ก-15 ตัวอย่างข้อมูลจำนวนชั่วโมงที่ลมพัดต่อปี เพื่อนำไปคำนวณหา
อัตราผลตอบแทน ---------- 104

ก-16 แสดง Flow chart การใช้ข้อมูลความเร็วลมจากสถานีตรวจ
อากาศของกรมอุตุนิยมวิทยามาทำเป็นตารางและหาค่าเฉลี่ย ------ 103

ข-1 ภาคตัดแสดงขนาดปีกใบกังหันอลูมิเนียม (ชุดที่ 2) ---------- 109

ค-1 ตัวอย่างข้อมูลความเร็วลมและทิศทางของลมวัดด้วยเครื่อง
Skyvane wind sensors ---------- 116

ค-2 ตัวอย่างข้อมูลความเร็วลมและทิศทางของลมวัดด้วยเครื่อง
Skyvane wind sensors ---------- 117

ค-3 ตัวอย่างข้อมูลความเร็วลมและทิศทางของลมวัดด้วยเครื่อง
Skyvane wind sensors ---------- 118

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการสัญญลักษณ์

a	แฟคเตอร์ของลม V_b/V_a (axial interference factor)------ (-)
A	พื้นที่กวาดของใบกังหันลม (Swept area)----------(ตารางเมตร)
b	ความกว้างของใบพัดเครื่องสูบน้ำ ----------(เมตร)
B	จำนวนใบกังหันลม ----------(-)
c	ความยาวคอร์ดใบกังหันลม (chord)----------(เมตร)
C_d	สัมประสิทธิของแรงต้าน (Drag coefficient)----------(-)
C_l	สัมประสิทธิของแรงยก (Lift coefficient)----------(-)
C_q	สัมประสิทธิของแรงบิดเพลา (Torque coefficient)----------(-)
C_p	สัมประสิทธิกำลังของกังหันลม (Power coefficient)----------(-)
d	เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดเครื่องสูบน้ำ ----------(เมตร)
D	เส้นผ่านศูนย์กลางใบกังหันลม ----------(เมตร)
D	แรงต้าน ----------(นิวตัน)
E	อัตราส่วนแรงยก/แรงต้าน (L/D) ----------(-)
F	แรงกระทำ ----------(นิวตัน)
H	ความสูงของน้ำที่ออกจากเครื่องสูบน้ำ ----------(เมตร)
I_c	โมเมนต์แรงเฉื่อยรอบแกนหมุน ----------(กก.-ตร.ม.)
k	สัมประสิทธิความหนาของใบพัดเครื่องสูบน้ำ ----------(-)
K	สัมประสิทธิของโรเตอร์เครื่องสูบน้ำแบบโรตารี่ ----------(-)
L	ความยาวใบกังหันลม ----------(เมตร)
L	แรงยก ----------(นิวตัน)
M_c	แรงบิดเพลา----------(นิวตัน)
N	ความเร็วรอบ ----------(รอบ/นาที)
p	กำลังงาน ----------(วัตต์)
P_{tot}	กำลังงานทั้งหมด ----------(วัตต์)

Q อัตราการไหลของน้ำ ----------(ลบ.ม./วินาที)

r รัศมี ----------(เมตร)

R รัศมีภายนอกของใบกังหันลม ----------(เมตร)

T แรงบิด ----------(นิวตัน)

U ความเร็วขอบใบกังหันลม ----------(เมตร/วินาที)

V_∞ ความเร็วลม ----------(เมตร/วินาที)

$\bar{V}$ ความเร็วเฉลี่ยของลม ----------(เมตร/วินาที)

W ความเร็วสัมพัทธ์ของลมเทียบกับใบกังหัน ----------(เมตร/วินาที)

α อัตราเร่งเชิงมุม ----------(เรเดียน/วินาที^{2})

α มุมปะทะ (Angle of attack) ----------(-)

β มุมของใบกังหัน (bladeange = bladesetting) ----------(-)

γ น้ำหนักจำเพาะ ----------(นิวตัน/ลบ.ม.)

η ประสิทธิภาพ ----------(-)

λ อัตราส่วนความเร็วปลายใบต่อความเร็วลม (Tip speed ratio) ----------(-)

ν ความหนืดคีเตนิคของอากาศ ----------(-)

σ อัตราส่วนพื้นที่ใบต่อพื้นที่กวาดของใบกังหัน ----------(-)

ϕ มุมความเร็วสัมพัทธ์ของลม (Wind angle) ----------(-)

ω , Ω ความเร็วเชิงมุม ----------(เรเดียน/วินาที)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย