การออกแบบและทดสอบสมรรถนะกังหันลมแกนนอนชนิด 3 ใบ สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า

นายปรีชา บุบผาชาติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2532

ISBN 974-576-193-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

016086
I 10304782

DESIGN AND PERFORMANCE TEST OF A 3 BLADE HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE FOR ELECTRICITY GENERATION

PREECHA BUBPHACHART

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT

FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

GRADUATE SCHOOL

CHULALONGKORN UNIVERSITY

1989

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและทดสอบสมรรถนะกังหันลม แกนนอนชนิด 3 ใบ สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า
โดย	นายปรีชา บุบผาชาติ
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สถาพร สุปรีชากร

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดำรงศักดิ์ มะลิลา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สถาพร สุปรีชากร)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปรีชา บุบผาชาติ: การออกแบบและทดสอบสมรรถนะกังหันลมแกนนอนชนิด 3 ใบ สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า (DESIGN AND PERFORMANCE TEST OF A 3 BLADE HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE FOR ELECTRICITY GENERATION) อ. ที่ปรึกษา: ผศ.ดร. สมศักดิ์ ชัยะภินันท์, อ. ที่ปรึกษาร่วม: ผศ. สถาพร สุปรีชากร 152 หน้า.

ในการวิจัยนี้ ได้มีการศึกษาและออกแบบกังหันลมแกนนอนชนิด 3 ใบ สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า ให้มีรูปร่างที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในเชิงอากาศกลศาสตร์แล้วจึงดัดแปลงสร้างใบกังหันที่ได้ออกแบบไว้ โดยมีความยาวเท่ากับ 60 เซนติเมตร และได้ทำการทดสอบสมรรถนะโดยใช้อุโมงลม และใช้ติดตั้งบนรถปิคอัพ พบว่าค่าสมรรถนะในเทอมไร้มิติ (สัมประสิทธิ์กำลังงานและสัมประสิทธิ์แรงบิด) ที่วัดได้มีค่า แปรตามความเร็วลม ที่ทำการทดลองอันเนื่องมาจากผลของเรโนลด์นัมเบอร์ ที่มีต่อค่าแรงยกและแรงหน่วงบนใบกังหัน เมื่อทำการทดลองโดยใช้อุโมงลม พบว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.33 ที่ความเร็วลม 7.2 เมตร /วินาที และเมื่อทำการทดลองโดยรถปิคอัพแล่นบนถนนพบว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.296 ที่ความเร็วลม 8 เมตร/วินาที เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลม ที่ได้ออกแบบสร้างไว้ พบว่าเส้นกราฟของผลเฉลยของแบบจำลอง และของผลการทดลองมีลักษณะคล้ายคลึงและใกล้เคียงกัน ความแตกต่างระหว่างผลทั้งสองนั้นมีสาเหตุจาก ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด และข้อมูลสมรรถนะของแพนอากาศที่จะใช้แทนรูปภาคตัดขวางของใบกังหัน และจากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันที่มีขนาดเดียวกันแต่มีลักษณะใบต่างกัน ยืนยันว่ากังหันที่ได้สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพเชิงอากาศกลศาสตร์สูงสุด.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2531 .....

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREECHA BUBPHACHART: DESIGN AND PERFORMANCE TEST OF A 3-BLADE HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE FOR ELECTRICITY GENERATION: THESIS ADVISOR: ASSIST.PROF.SOMSAK CHAIYAPINUNT, Ph.D. CO.ADVISOR: ASSIST. PROF. SATHAPORN SUPRICHAKORN, MS. 152 PP.

In this research a study and design of an optimum performance 3 - blade horizontal axis wind turbine for electricity generation has been made. Then the turbine was built with 60 cm. blade length and was tested by using wind tunnel and by installing on a moving pick-up truck. The tested results on performance (power and torque coefficients) were found to be varied with the tested wind speed. The variation was mainly due to the effect of Reynolds number on the lift and drag coefficient of the turbine blade. The maximum power coefficient was found to be 0.33 at wind speed of 7.2 m/s for the wind tunnel test while the power coefficient from the pick-up test was found to be maximum at wind speed of 8 m/s with value equal to 0.296. The performance predicted by using mathematical model was found to have the values and trend of the curves close to the tested result. Some discrepancies between mathematical solutions and tested results were resulted from instrumental error and lack of exact data of lift and drag on turbine blade cross section. The turbine was also verified for its optimum performance by comparing mathematical solutions for different turbine blade.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2531 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งพยายามชี้แนะและตีกรอบวิธีดำเนินการวิจัยมิให้เกิดความสับสน โดยให้คำปรึกษา แนะนำ แก้ไขข้อบกพร่อง และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการวิจัยมาด้วยดีตลอด จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สถาพร สุปรีชากร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการทดลองหาสมรรถนะและคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดำรงศักดิ์ มะลิลา ที่ได้ให้คำแนะนำผู้สร้างใบกังหันจากกรมช่างอากาศ และคำแนะนำในการทดลองหาสมรรถนะและคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ ที่ได้ให้คำแนะนำวิธีดำเนินการทดลองหาสมรรถนะของกังหันลมโดยรถปิคอัพ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บันเทิง สุวรรณตระกูล ที่ให้คำแนะนำการทดลองหาสมรรถนะของกังหันลมโดยอุโมงลม

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ใช้สถานที่และอุโมงลม และขอขอบคุณ กรมช่างอากาศที่ได้สร้างใบกังหันลม ขอขอบคุณ คุณสมพงษ์ ฉันทวรภาพ ผู้อำนวยการกองค้นคว้าและพัฒนาพลังงาน และคุณปราการ บุญช่วยดี หัวหน้าฝ่ายต้นแบบและทดสอบ สำนักงานพลังงานแห่งชาติ

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา และขอขอบคุณ คุณใสศรี บุบผาชาติ ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญรูป ..... ต

รายการสัญลักษณ์ ..... น

บทที่

1. บทนำ 1
2. ทฤษฎีอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมแนวนอน และ การหารูปร่างใบกังหันของกังหันลมแนวนอน ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในเชิงอากาศพลศาสตร์ 5
3. การออกแบบใบกังหัน 25
4. การทดลอง 36
5. ผลการทดลอง 45
6. อภิปรายผลการทดลอง 61
7. สรุปผล 70

เอกสารอ้างอิง 72

ภาคผนวก

ก. โปรแกรมคอมพิวเตอร์หารูปร่างของใบกังหัน 74

ข. โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำนายสมรรถนะของกังหันลม 84

ค. ข้อมูลและผลจากการทดลองของกังหันลม 107

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

ง. การทดลองหาสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 128
จ. การสอบเทียบอุโมงลม 143
ฉ. กังหันลมแกนนอนสำหรับผลิตไฟฟ้า 146
ประวัติการศึกษา 152

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

3-1 ค่า cC_L/R, ϕ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของใบกังหัน ที่มีประสิทธิภาพเชิงอากาศพลศาสตร์สูงสุด ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบเท่ากับ 6 และสัมประสิทธิ์กำลังงานเท่ากับ Ø.512 26

3-2 ค่า c/R, β และค่า c ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของใบกังหัน ที่มีประสิทธิภาพเชิงอากาศพลศาสตร์สูงสุด ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบเท่ากับ 6 และสัมประสิทธิ์กำลังงานเท่ากับ Ø.512 29

3-3 ค่าความกว้างของใบกังหัน และมุมบิดที่ดัดแปลงให้แปรผันเป็นเส้นตรง 32

3-4 ค่าความกว้างของใบกังหัน และมุมบิดที่ได้จากการสร้างและใช้ในการทดลอง 33

4-1 ข้อมูลจำเพาะของอุโมงลม 37

4-2 ข้อมูลจำเพาะของใบกังหันที่มีรูปร่างตามที่ออกแบบไว้ 38

ข-4.1 ผลเฉลยที่ให้ค่าสมรรถนะของใบกังหันที่ออกแบบไว้ 1Ø2

ข-4.2 ผลเฉลยที่ให้ค่าสมรรถนะของใบกังหันที่มีค่าความกว้างของใบกังหันเหมือนที่ออกแบบไว้แต่มีค่ามุมบิดเท่ากับ 11.5 องศาคงที่ตลอดความยาวของใบกังหัน 1Ø3

ข-4.3 ผลเฉลยที่ให้ค่าสมรรถนะของใบกังหันที่มีค่าความกว้างของใบกังหันมีค่าเท่ากับ 7.1 เซนติเมตร และมุมบิดเท่ากับ 11.5 องศา ตลอดความยาวของใบกังหัน ... 1Ø4

ตาราง หน้า

ข-4.4 ผลเฉลยที่ให้ค่าสมรรถนะของใบกังหันที่มีค่าความกว้างของใบกังหันเหมือนที่ออกแบบไว้ แต่มีค่ามุมบิดเท่ากับศูนย์องศาตลอดความยาวของใบกังหัน 105

ข-4.5 ผลเฉลยที่ให้ค่าสมรรถนะของใบกังหันที่มีค่าความกว้างของใบกังหันมีค่าเท่ากับ 7.1 เซนติเมตร และมุมบิดเท่ากับศูนย์องศา ตลอดความยาวของใบกังหัน 106

ค-1 ข้อมูลการทดลองกังหันที่ออกแบบ โดยใช้อุโมงลมที่ความเร็วลม 5.03 เมตร/วินาที 108

ค-2 ข้อมูลการทดลองกังหันที่ออกแบบ โดยใช้อุโมงลมที่ความเร็วลม 5.19 เมตร/วินาที 109

ค-3 ข้อมูลการทดลองกังหันที่ออกแบบ โดยใช้อุโมงลมที่ความเร็วลม 5.68 เมตร/วินาที 110

ค-4 ข้อมูลการทดลองกังหันที่ออกแบบ โดยใช้อุโมงลมที่ความเร็วลม 6.23 เมตร/วินาที 111

ค-5 ข้อมูลการทดลองกังหันที่ออกแบบ โดยใช้อุโมงลมที่ความเร็วลม 6.60 เมตร/วินาที 112

ค-6 ข้อมูลการทดลองกังหันที่ออกแบบ โดยใช้อุโมงลมที่ความเร็วลม 7.20 เมตร/วินาที 113

ค-7 ข้อมูลการทดลองกังหันที่ออกแบบ โดยใช้รถปิคอัพวิ่งทดลองที่ความเร็วลม 7 เมตร/วินาที 114

ค-8 ข้อมูลการทดลองกังหันที่ออกแบบ โดยใช้รถปิคอัพวิ่งทดลองที่ความเร็วลม 8 เมตร/วินาที 115

ค-9 ข้อมูลการทดลองกังหันที่ออกแบบ โดยใช้รถปิคอัพวิ่งทดลองที่ความเร็วลม 9 เมตร/วินาที 116

ค-10 ข้อมูลการทดลองกังหันที่ออกแบบ โดยใช้รถปิคอัพวิ่งทดลองที่ความเร็วลม 10 เมตร/วินาที 117

ตาราง หน้า

ค-11 ผลการทดลองกังหันลมที่ออกแบบ โดยใช้อุโมงลม
ที่ความเร็วลม 5.Ø3 เมตร/วินาที 118

ค-12 ผลการทดลองกังหันลมที่ออกแบบ โดยใช้อุโมงลม
ที่ความเร็วลม 5.19 เมตร/วินาที 119

ค-13 ผลการทดลองกังหันลมที่ออกแบบ โดยใช้อุโมงลม
ที่ความเร็วลม 5.68 เมตร/วินาที 12Ø

ค-14 ผลการทดลองกังหันลมที่ออกแบบ โดยใช้อุโมงลม
ที่ความเร็วลม 6.23 เมตร/วินาที 121

ค-15 ผลการทดลองกังหันลมที่ออกแบบ โดยใช้อุโมงลม
ที่ความเร็วลม 6.6 เมตร/วินาที 122

ค-16 ผลการทดลองกังหันลมที่ออกแบบ โดยใช้อุโมงลม
ที่ความเร็วลม 7.2 เมตร/วินาที 123

ค-17 ผลการทดลองกังหันลมที่ออกแบบ โดยใช้รถปิคอัพวิ่งทดลอง
ที่ความเร็วลม 7 เมตร/วินาที 124

ค-18 ผลการทดลองกังหันลมที่ออกแบบ โดยใช้รถปิคอัพวิ่งทดลอง
ที่ความเร็วลม 8 เมตร/วินาที 125

ค-19 ผลการทดลองกังหันลมที่ออกแบบ โดยใช้รถปิคอัพวิ่งทดลอง
ที่ความเร็วลม 9 เมตร/วินาที 126

ค-2Ø ผลการทดลองกังหันลมที่ออกแบบ โดยใช้รถปิคอัพวิ่งทดลอง
ที่ความเร็วลม 1Ø เมตร/วินาที 127

ง-1 ข้อมูลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ
ที่ความเร็วรอบ 19ØØ รอบ/นาที 133

ง-2 ข้อมูลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ
ที่ความเร็วรอบ 2ØØØ รอบ/นาที 134

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง หน้า

ง-3 ผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ
ที่ความเร็วรอบ 1900 รอบ/นาที 135
ง-4 ผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ
ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที 136

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูป		หน้า
2.1	ลำอากาศของกังหันลม	7
2.2	ผลของอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่มีต่อแฟคเตอร์เหนี่ยวนำ	11
2.3	ไดอะแกรมการไหลของกังหันลมที่มีอากาศหมุนด้านหลัง	12
2.4	อีลีเมนต์ของใบกังหัน	13
2.5	ใบพัดกังหันพร้อมทั้งความเร็วและแรงที่เกี่ยวข้อง ก. ภาพด้านหน้า ข. ภาพตัดขวาง	14
2.6	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของลำอากาศด้านหลัง Rotor	19
2.7	การไหลวนของอากาศที่ปลายและโคนใบ	20
3.1	รูปภาคตัดขวางของใบกังหัน NACA 4415	28
3.2	สัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงหน่วงที่มุมปะทะต่าง ๆ สำหรับผิวของแผนอากาศเรียบ	28
3.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีของใบกังหันกับมุมของใบกังหัน	34
3.4	แสดงรูปร่างของใบกังหันลมที่ออกแบบ	35
4.1	ใบกังหันที่มีรูปร่างตามที่ออกแบบไว้	39
4.2	การติดตั้งอุปกรณ์และทดลองกังหันลม โดยใช้อุโมงลม	40
4.3	การติดตั้งอุปกรณ์และทดลองกังหันลม โดยใช้รถปิคอัพวิ่งบนถนน	42
5.1.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเร็วปลายใบกับสัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันลมที่ออกแบบ โดยใช้อุโมงลม ณ ที่ความเร็วลมต่าง ๆ	46

รูป หน้า

5.1.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเร็วปลายใบ
กับสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลมที่ออกแบบ
โดยใช้อุโมงลม ณ ที่ความเร็วลมต่าง ๆ 48
5.1.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกำลังงาน
ของกังหันลมที่ออกแบบโดยใช้อุโมงลม ณ ที่ความเร็วลมต่าง ๆ.. 49
5.1.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ
กับแรงบิดของกังหันลมที่ออกแบบโดยใช้อุโมงลม
ณ ที่ความเร็วลมต่าง ๆ 50
5.2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วปลายใบ
กับสัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันลมที่ออกแบบ
โดยใช้อุโมงลม ณ ที่ความเร็วลมต่าง ๆ 52
5.2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วปลายใบ
กับสัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันลมที่ออกแบบ
โดยใช้รถปิคอัพ ณ ที่ความเร็วลมต่าง ๆ 53
5.2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ
กับกำลังงานของกังหันลมที่ออกแบบ
โดยใช้รถปิคอัพ ณ ที่ความเร็วลมต่าง ๆ 54
5.2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ
กับแรงบิดของกังหันลมที่ออกแบบโดยใช้รถปิคอัพ
ณ ที่ความเร็วลมต่าง ๆ 56
5.3.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันลม
ที่ออกแบบกับแบบที่ใบกังหันลมมีรูปร่างเปลี่ยนไป
โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 59

รูป หน้า

5.3.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม ที่ออกแบบกับแบบที่ใบกังหันลมมีรูปร่างเปลี่ยนไป โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 60

6.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันลม ที่ทดลองโดยอุโมงลมและรถปิคอัพ กับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 63

6.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม ที่ทดลองโดยอุโมงลมและรถปิคอัพ กับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 64

6.3 แสดงประตูด้านหลังตัวกังหันที่ทดลองโดยอุโมงลม 65

6.4 แสดงการเกิด Separation 66

6.5 สัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงหน่วง ที่มุมปะทะต่าง ๆ สำหรับผิวของแผนอากาศไม่เรียบที่เรโนลด์นัมเบอร์ต่างๆ 68

6.6 สัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงหน่วง ที่มุมปะทะต่าง ๆ สำหรับผิวของแผนอากาศเรียบ ที่เรโนลด์นัมเบอร์ต่าง ๆ 68

ง-1 การติดตั้งอุปกรณ์และทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 128

ง-2 วงจรทางไฟฟ้าของการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ชนิดกระแสสลับ 129

ง-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานขาเข้า กับกำลังงานที่ได้ที่มีความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เท่ากับ 1900 รอบ/นาที 137

ง-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานขาเข้า กับกำลังงานที่ได้ที่มีความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เท่ากับ 2000 รอบ/นาที 138

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูป		หน้า
ง-5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่ใช้ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กับกำลังงานที่ได้ที่ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เท่ากับ 1900 รอบ/นาที	139
ง-6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่ใช้ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กับกำลังงานที่ได้ที่ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เท่ากับ 2000 รอบ/นาที	140
ง-7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานที่ได้กับประสิทธิภาพ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็วรอบ 1900 รอบ/นาที	141
ง-8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานที่ได้กับประสิทธิภาพ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที	142
จ-1	กราฟแสดงค่าความเร็วลมที่มุมต่างๆ โดยวัดเทียบกับเส้นระดับ เมื่อห่างจากปากอุโมงลม 1.5 เมตร ที่ความเร็วรอบของใบพัด เท่ากับ 600 รอบต่อนาที	144
ฉ-1	กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า NASA รุ่น Mod-2	147
ฉ-2	กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า Tving	148
ฉ-3	กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า Aero Power รุ่น SL 1500	149
ฉ-4	กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าของสถาบันเทคโนยีพระจอมเกล้าธนบุรี.	150
ฉ-5	กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าของ ม.สงขลานครินทร์	151

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์

A	:	พื้นที่ใบกังหัน	ตารางเมตร
a	:	แฟคเตอร์เหนี่ยวนำตามแกน	
a'	:	แฟคเตอร์เหนี่ยวนำเชิงมุม	
B	:	จำนวนใบกังหัน	
c	:	ความกว้างของใบกังหัน	เมตร
C_L	:	สัมประสิทธิแรงยก	
C_D	:	สัมประสิทธิแรงหน่วง	
C_P	:	สัมประสิทธิกำลังงาน	
C_T	:	สัมประสิทธิแรงธรัสท์	
C_Q	:	สัมประสิทธิแรงบิด	
C_n	:	สัมประสิทธิของแรงในแนวตั้งฉาก	
C_t	:	สัมประสิทธิของแรงในแนวสัมผัส	
D	:	แรงหน่วง	นิวตัน
I_a	:	กระแสไฟฟ้าจากอาเมเจอร์	แอมแปร์
I_f	:	กระแสไฟฟ้าเลี้ยงฟิลคอยล์	แอมแปร์
L	:	แรงยก	นิวตัน
N_S	:	ความเร็วรอบของกังหันลม	รอบต่อนาที
P	:	กำลังงาน	วัตต์
Q	:	แรงบิด	นิวตัน-เมตร
$Q_{G\ Start}$	:	แรงบิดเริ่มต้นหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	นิวตัน-เมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

R	:	รัศมีของใบกังหัน	เมตร
T	:	แรงธรัสท์	นิวตัน
U_1	:	ความเร็วลมบริเวณใบกังหัน	เมตร/วินาที
V_a	:	แรงดันไฟฟ้า	โวลท์
V_f	:	แรงดันไฟฟ้าเลี้ยงฟิลคอยล์	โวลท์
V	:	ความเร็วลมที่ต้นทาง	เมตร/วินาที
W	:	ความเร็วรวมของอากาศที่ส่วนของใบกังหัน	เมตร/วินาที
X	:	อัตราส่วนของความเร็วปลายใบ	
x	:	อัตราส่วนของความเร็วปลายใบของตำแหน่งที่พิจารณา	
ϕ	:	มุมรวมของอากาศที่ส่วนของใบกังหัน	เรเดียน
β	:	มุมบิดของใบกังหัน	เรเดียน
α	:	มุมปะทะ	เรเดียน
σ_L	:	ความทึบใบของใบกังหันในตำแหน่งที่พิจารณา	
Ω	:	ความเร็วเชิงมุมของใบกังหันลม	เรเดียน/วินาที
ω	:	ความเร็วเชิงมุมของกระแสลมบริเวณด้านหลังใบกังหัน	เรเดียน/วินาที
ρ	:	ความหนาแน่นของอากาศ	กิโลกรัม/เมตร^3
η_G	:	ประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	เปอร์เซ็นต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย