



รายงานฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การศึกษาระบบและสร้างผังพื้นรวมต้นแบบที่มีประสิทธิภาพ
และเก็บข้อมูลทางด้านสมรรถนะ และโครงสร้างของกิ่งพันสม

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์

ทุนโครงการพัฒนาวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พ.ว.อ. ปี 2531)

กรุงเทพฯ 2538



รายงานฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การศึกษาและสร้างกัณฑ์มต้นแบบที่มีประสิทธิภาพ
และเก็บข้อมูลทางด้านสมรรถนะ และโครงสร้างของกัณฑ์ม

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์

ทุนโครงการพัฒนาวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (Unit Cell ปี 2531)

พฤษภาคม 2538

22 ก.ค. 2541

I1464166X

บทสรุป

ในรายงานนี้จะครอบคลุมถึงการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำนายรูปร่างใบ
ก้านที่มีประสิทธิภาพเชิงอากาศพลศาสตร์สูงสุด และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำนาย
สมรรถนะและค่าความเค้นของก้านลมแนวนอนชนิด 3 ใบ รวมทั้งทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และยัง
ครอบคลุมถึงการศึกษและสร้างก้านลมต้นแบบที่มีประสิทธิภาพและทำการทดลองเก็บ
ข้อมูลทางด้านสมรรถนะ และโครงสร้างของก้านลมที่ได้ออกแบบ และนำผลการทดลองมา
เปรียบเทียบกับผลเฉลยจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ก้านลมสองชุดถูกสร้างขึ้น และทำการทดลองกับอุโมงค์ลมและโดยติดตั้งบนรถที่
เคลื่อนที่ การทดลองหาค่าสมรรถนะและทดลองหาค่าความเค้น กระทำในเวลาที่แตกต่างกันมาก
พอควร และด้วยเครื่องมือที่แตกต่างกันด้วย ผลการทดลองถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลเฉลย
ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อยืนยันความแม่นยำของโปรแกรม

ค่าสมรรถนะในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้
พิจารณาผลของตัวเลขเรย์โนลด์ด้วยนั้น มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองกับอุโมงค์ลม และยัง
พบว่าความแม่นยำของผลเฉลยจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นกับความแม่นยำ และความ
สมบูรณ์ของข้อมูลอากาศพลศาสตร์ของรูปภาคตัดขวางใบก้านลมตลอดช่วงการทำงาน รวมทั้ง
ทั้งข้อมูลในช่วงสภาวะ Stall อย่างมาก

สำหรับค่าความเค้นของก้านลม พบว่ามีความแตกต่างระหว่างผลการทดลองกับผล
เฉลยจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาก โดยเฉพาะความเค้นจากโมเมนต์ดัดอันเนื่องมาจากแรง
อากาศพลศาสตร์ สาเหตุของความแตกต่างน่าจะมาจากความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง ที่
เกิดจากความคลาดเคลื่อนหลายประการของการวัด เครื่องมือวัด และตัวอุโมงค์ลมที่เกิดขึ้น
ระหว่างการทดลอง

สำหรับก้านลมต้นแบบที่ออกแบบให้มีรูปร่างที่ให้ประสิทธิภาพเชิงอากาศ
พลศาสตร์สูงนั้น พบว่าจะให้ค่ากำลังสูงตามทฤษฎีก็ต่อเมื่อถูกทำงานภายใต้ตัวเลขเรย์โนลด์
ที่สูงพอที่จะไม่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงหน่วงบนใบก้าน หรืออีกนัยหนึ่งต้องมีขนาดของก้าน
ลม(ความยาวใบและความกว้างใบ) ใหญ่และทำงานภายใต้ความเร็วลมที่สูงพอ

Summary

This report covers theory and the development of computer programs for predicting the shape of the optimized turbine blade, performance and stress of a three bladed horizontal axis wind turbine. Study, construct an optimized turbine and testings for turbines performance and stress are presented along with the comparison of predictions from computer program with test data.

Two wind turbines were constructed and tested with a wind tunnel and a moving truck. Testing for performance and for stress were conducted with different instrumentation and different occasions. Test results are compared to the predictions from computer program for verification.

Performance predictions in term of power coefficient corrected with Reynolds number effect from computer program show rather good agreement with test results obtained from the wind tunnel. The accuracy of the predictions is greatly relied on the available of aerodynamic data of the turbine blade cross section over the whole operating range including in the stall region.

Stress predictions for the turbines did not show good agreement with test results especially bending stress from aerodynamic load. The explanation of the difference can be traced to the doubt in test results validity due to problems of instrumentation and wind tunnel.

It was found that the performance of the optimized wind turbine will be high only when operating under certain Reynolds number which is high enough to avoid drag penalty (i.e. increasing chord and blade length and wind velocity).

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้เงินสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ มาจนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ บันเทิง สุวรรณตระกูล และคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ และอุโมงค์ลม และเครื่องมือวัดบางส่วนในการทดลองหาค่าสมรรถนะและค่าความเค้น และขอขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือการวิจัยนี้ซึ่งได้แก่ คุณปวีธา นุปมาชาติ คุณชมชาติ มังกรศักดิ์สิทธิ์ คุณศักดิ์ชัย ัญญาสุวรรณกุล



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปภาษาไทย	i
บทสรุปภาษาอังกฤษ	ii
กิตติกรรมประกาศ	iii
สารบัญตาราง	vii
สารบัญรูป	xi
รายการสัญลักษณ์	xvi
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	3
1.4 การปฏิบัติงาน	3
1.5 รายละเอียดของรายงาน	4
บทที่ 2 อากาศพลศาสตร์ของกังหันลม	
2.1 บทนำ	5
2.2 พลังงานที่สามารถดึงออกจากลม	5
2.3 ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกน	6
2.4 ผลสืบเนื่องจากลำอากาศหมุนหลัง rotor	9
2.5 ทฤษฎีลำอากาศหมุน	11
2.6 แรงและโมเมนต์บิดจากทฤษฎีโมเมนตัม	12
2.7 ทฤษฎีอีลิเมนต์ของใบ	13
2.8 ทฤษฎีสตริป	15
2.9 สภาวะที่ไม่สามารถใช้ทฤษฎีโมเมนตัม	17
2.10 การสูญเสียที่ปลายใบ	18
2.11 รูปร่างของใบกังหันลมที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในเชิงอากาศพลศาสตร์	22
2.12 ความเค้นของใบกังหันลมแนวนอน	23
2.13 สภาวะพายุ	30
บทที่ 3 โปรแกรมคอมพิวเตอร์และการออกแบบใบกังหันลม	
3.1 บทนำ	32

3.2	โปรแกรมคอมพิวเตอร์	32
3.3	ใบกึ่งहनลมที่มีประสิทธิภาพเชิงอากาศพลศาสตร์สูงสุด	43
3.4	ใบกึ่งहनลมที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดลอง	48
3.5	คุณลักษณะของรูปภาคตัดขวางแพนอากาศ NACA 4415	55
บทที่ 4	การทดลอง	
4.1	บทนำ	57
4.2	อุปกรณ์ในการทดลอง	57
4.3	สถานที่ทำการทดลอง	68
4.4	การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง	68
4.5	การทดลอง	71
บทที่ 5	ผลการทดลองและผลเฉลยจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์	
5.1	บทนำ	76
5.2	ผลการทดลองสมรรถนะของกึ่งहनลมแนวนอนที่ทดสอบกับอุโมงค์ลมและติดตั้งบนรถปิคอัพ	76
5.3	ผลเฉลยของสมรรถนะในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์	81
5.4	การเปรียบเทียบสมรรถนะในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังระหว่างผลการทดลอง และผลเฉลยจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์	83
5.5	ผลของเลขเรย์โนลด์ต่อสมรรถนะของกึ่งहनลม	84
5.6	การเปรียบเทียบสมรรถนะในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังของกึ่งहनลมแนวนอนจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พิจารณาผลของตัวเลขเรย์โนลด์กับผลการทดลอง	90
5.7	สัมประสิทธิ์แรงทริส	93
5.8	ความเครียดและความเค้นบนใบกึ่งहनลมจากการทดลอง	97
5.9	ความเค้นบนใบกึ่งहनลมจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	103
5.10	การเปรียบเทียบค่าความเค้นจากโมเมนต์ตัดของใบกึ่งहनลมของกึ่งहनลมแนวนอนจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับการทดลอง	111
5.11	การกระจายตัวของความเร็วลมจากอุโมงค์ลม	113
5.12	ความคลาดเคลื่อนของ slip ring	116
บทที่ 6	อภิปรายผลการทดลองและผลเฉลย	
6.1	บทนำ	119

6.2	สมรรถนะกึ่งหันลมจากการทดสอบกับอุโมงค์ลม และติดตั้งบนรถปีค็อพ	119
6.3	สัมประสิทธิ์กำลังจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลการทดลอง	121
6.4	ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองหาสมรรถนะของกึ่งหันลม	124
6.5	สัมประสิทธิ์แรงทอร์คจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	125
6.6	ความเค้นของใบกึ่งหันลมจากผลการทดลองและผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	126
6.7	ความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองเรื่องความเค้นของกึ่งหันลม	130
บทที่ 7	สรุปการอภิปราย	
7.1	บทนำ	133
7.2	สัมประสิทธิ์กำลัง	133
7.3	ความเค้น	134
เอกสารอ้างอิง		136
ภาคผนวก		
ภาคผนวก ก.	คุณลักษณะของใบกึ่งหันลมชุดแรกและชุดที่สอง	ก. 1
ภาคผนวก ข.	โปรแกรมคอมพิวเตอร์	
	โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำนายรูปร่างใบกึ่งหันลมที่มีประสิทธิภาพเชิงอากาศพลศาสตร์สูงสุด	ข. 1
	โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำนายค่าสมรรถนะและค่าความเค้นของกึ่งหันลมแนวนอน	ข. 2
	โปรแกรมคอมพิวเตอร์หาค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองของความสูญเสียที่ปลายใบ	ข. 6
ภาคผนวก ค.	ผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	ค. 1
ภาคผนวก ง.	ผลการทดลองของค่าสมรรถนะและความเค้น	ง. 1
ภาคผนวก จ.	Strain gage และการปรับแต่ง	จ. 1

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 ค่า cC_L/R , ϕ ที่ตำแหน่งต่างๆ ของใบกังหันที่มีประสิทธิภาพเชิงอากาศพลศาสตร์สูงสุด ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ = 6	44
3.2 ค่าความกว้างและมุมบิดของใบกังหันลมที่ให้ค่าประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์สูงสุดจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยกำหนดค่า $C_L = 1.04$ และ $\alpha = 8$ องศา	47
3.3 ค่าความกว้างของใบกังหันลมและมุมบิดที่ดัดแปลงให้แปรผันเป็นเส้นตรง	49
3.4 ค่าความกว้างของใบกังหันลมและมุมบิดที่ได้รับการดัดแปลงและส่งให้ช่างฝีมือเหล่า	51
3.5 คุณลักษณะที่เกี่ยวข้องของแพนอากาศ NACA 4415	56
5.1 ความสัมพันธ์ของตัวเลขเรย์โนลด์ของกังหันลมสองชุดที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบต่างๆ กัน กังหันลมชุดแรกทำงานภายใต้ความเร็วลม 7.2 เมตรต่อวินาที กังหันลมชุดที่สองทำงานภายใต้ความเร็วลม 6.6 เมตร ต่อวินาที	88
5.2 ความสัมพันธ์ของตัวเลขเรย์โนลด์ของกังหันลมชุดแรกที่ติดตั้งบนรถปิคอัพภายใต้ความเร็วลม 10 เมตรต่อวินาที	88
5.3 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ $C_{L_{max}}$ และ C_{D0} กับตัวเลขเรย์โนลด์	91
5.4 ผลการทดลองการถ่วงน้ำหนักกับใบกังหันลมชุดแรก เพื่อหาค่า Modulus of elasticity	99
5.5 ผลการทดลองการถ่วงน้ำหนักกับใบกังหันลมชุดที่สอง เพื่อหาค่า Modulus of elasticity	101
5.6 ค่าความเค้นสูงสุดที่ใบกังหันลมชุดแรกได้รับจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	108
5.7 ค่าความเค้นสูงสุดที่ใบกังหันลมชุดที่สองได้รับจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	108
5.8 สัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากตัว slip ring ที่มีความเร็วรอบต่างๆ กัน	118

ค.16	ผลเฉลี่ยของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดแรกที่ ความเร็วลม 5.87 เมตรต่อวินาที โดยพิจารณาตัวเลขเรย์โนลด์ด้วย	ค.6
ค.17	ผลเฉลี่ยของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดที่สองที่ ความเร็วลม 3.80 เมตรต่อวินาที โดยพิจารณาตัวเลขเรย์โนลด์ด้วย	ค.7
ค.18	ผลเฉลี่ยของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดที่สองที่ ความเร็วลม 4.85 เมตรต่อวินาที โดยพิจารณาตัวเลขเรย์โนลด์ด้วย	ค.7
ค.19	ผลเฉลี่ยของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดที่สองที่ ความเร็วลม 5.55 เมตรต่อวินาที โดยพิจารณาตัวเลขเรย์โนลด์ด้วย	ค.7
ค.20	ผลเฉลี่ยของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดที่สองที่ ความเร็วลม 5.75 เมตรต่อวินาที โดยพิจารณาตัวเลขเรย์โนลด์ด้วย	ค.8
ค.21	ผลเฉลี่ยของความเค้นสูงสุดของกังหันลมชุดที่สองที่ความเร็วลม 6.60 เมตรต่อวินาที	ค.8
ง.1	ผลการทดลองของกังหันลมชุดแรกโดยใช้อุโมงค์ลมที่ความเร็ว 5.03 เมตรต่อวินาที	ง.1
ง.2	ผลการทดลองของกังหันลมชุดแรกโดยใช้อุโมงค์ลมที่ความเร็ว 5.19 เมตรต่อวินาที	ง.1
ง.3	ผลการทดลองของกังหันลมชุดแรกโดยใช้อุโมงค์ลมที่ความเร็ว 5.68 เมตรต่อวินาที	ง.2
ง.4	ผลการทดลองของกังหันลมชุดแรกโดยใช้อุโมงค์ลมที่ความเร็ว 6.23 เมตรต่อวินาที	ง.2
ง.5	ผลการทดลองของกังหันลมชุดแรกโดยใช้อุโมงค์ลมที่ความเร็ว 6.60 เมตรต่อวินาที	ง.3
ง.6	ผลการทดลองของกังหันลมชุดแรกโดยใช้อุโมงค์ลมที่ความเร็ว 7.20 เมตรต่อวินาที	ง.3
ง.7	ผลการทดลองของกังหันลมชุดแรกโดยใช้ติดตั้งบนรถปิคอัพที่ ความเร็วลม 7.0 เมตรต่อวินาที	ง.4
ง.8	ผลการทดลองของกังหันลมชุดแรกโดยใช้ติดตั้งบนรถปิคอัพที่ ความเร็วลม 8.0 เมตรต่อวินาที	ง.4
ง.9	ผลการทดลองของกังหันลมชุดแรกโดยใช้ติดตั้งบนรถปิคอัพที่ ความเร็วลม 9.0 เมตรต่อวินาที	ง.5

- ง.25 ผลการทดลองวัดค่าความเครียดของใบกังหันลมชุดที่สอง
กับอุโมงค์ลมที่ความเร็วลม 4.85 เมตรต่อวินาที ๖.13
- ง.26 ผลการทดลองวัดค่าความเครียดของใบกังหันลมชุดที่สอง
กับอุโมงค์ลมที่ความเร็วลม 3.80 เมตรต่อวินาที ๖.13



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	Stream tube ของลำอากาศผ่าน rotor กังหันลมแนวนอน	7
2.2	แผนภาพการไหลของอากาศผ่าน rotor ของกังหันลม	9
2.3	ผลของอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่มีต่อ axial induction factor	10
2.4	การไหลของลำอากาศผ่านกังหันลมที่มีการหมุนอยู่ด้านหลัง rotor	12
2.5	Control volume ของอากาศรูปร่างวงแหวนที่เกิดจากส่วนของใบกังหันซึ่ง กวาดครบหนึ่งรอบการหมุน	13
2.6	ใบพัดกังหันพร้อมทั้งความเร็วและแรงที่เกี่ยวข้องจาก ก) ภาพทางด้านหน้า ข) ภาพตัดขวาง	14
2.7	ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์แรงตามแนวแกนกับค่า axial induction factor	18
2.8	แบบจำลองการไหลด้านหลัง rotor	20
2.9	การไหลของอากาศที่เกิดขึ้นที่ปลายใบกังหันลม	20
2.10	คิเนติกส์และแกนพิกัดของอากาศที่ไหลผ่านกังหันลม	24
2.11	แรงที่เกิดขึ้นบนส่วนของใบกังหันลม	25
2.12	ผังความเร็วของไหลที่ผู้สังเกตการณ์บนใบกังหันลมเห็น	26
2.13	ทิศทางการงอของใบกังหันลม ก) ลูตามลม ข) งอในระนาบของ rotor	28
2.14	แกนพิกัดของพื้นที่หน้าตัดของใบกังหันลม	29
3.1	สัมประสิทธิ์แรงยกที่แปรตามมุมปะทะ $0 - 180^\circ$	36
3.2	สัมประสิทธิ์แรงหน่วงที่แปรตามมุมปะทะ $0 - 180^\circ$	36
3.3	รูปภาคตัดขวางของใบกังหันลมพร้อมแกนหลัก มุมบิดและแกนพิกัดต่างๆ	43
3.4	รูปภาคตัดขวางของใบกังหันลม NACA 4415	45
3.5	สัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงของแพนอากาศ NACA 4415	46
3.6	ค่าความสัมพันธ์ของความกว้างของใบกังหันลมกับตำแหน่งบน ใบกังหันลมจากผลเฉลยโดยคอมพิวเตอร์กับค่าที่ดัดแปลงเพื่อสร้างจริง	52
3.7	ความสัมพันธ์ของมุมบิดของใบกังหันลมกับตำแหน่งบนใบกังหันลม จากผลเฉลยโดยคอมพิวเตอร์กับค่าที่ดัดแปลงเพื่อสร้างจริง	52
3.8	ใบกังหันลมที่สร้างขึ้นจริงชุดแรก	53

3.9	ใบกึ่งหันลมที่ประกอบเป็นกึ่งหันลมชนิดสามใบ	53
3.10	ใบกึ่งหันลมชุดที่สอง	54
3.11	ใบกึ่งหันลมชุดที่สองที่ประกอบเป็นกึ่งหันลม	55
3.12	แผนอากาศ NACA 4415 และแกนอ้างอิง	56
4.1	ชุดการติดตั้งกึ่งหันลมเพื่อทดสอบกับอุโมงค์ลม	58
4.2	ใบกึ่งหันลมที่ประกอบเป็นกึ่งหันลมบนชุดติดตั้งเพื่อทดสอบกับอุโมงค์ลม	59
4.3	อุโมงค์ลม	60
4.4	มาโนมิเตอร์น้ำ	61
4.5	ไมโครมาโนมิเตอร์น้ำ	61
4.6	การติดตั้งท่อปีโตสติกต์	62
4.7	การติดตั้ง Strain gage บนใบกึ่งหันลม	63
4.8	Slip ring	64
4.9	ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	65
4.10	Transistor inverter	66
4.11	Strain amplifier	67
4.12	การติดตั้งกึ่งหันลมบนรถปีค็อพ	68
4.13	แสดงตำแหน่งการวางท่อปีโตสติกต์ โดยวางที่ระยะ -1000, -540, -50, 470, 1000 ม.ม. ตามลำดับ	70
4.14	การต่อ gage แบบ 4 gage system	70
4.15	การทดลองหาความสัมพันธ์ของค่า Modulus of elasticity ของใบกึ่งหันลมกับภาวะ	75
5.1	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของกึ่งหันลมกับความเร็รรอบของ กึ่งหันลมชุดแรก โดยใช้อุโมงค์ลมที่มีความเร็วลมต่างๆ กัน	77
5.2	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของกึ่งหันลมกับความเร็รรอบของ กึ่งหันลมชุดที่สอง โดยใช้อุโมงค์ลมที่มีความเร็วลมต่างๆ กัน	77
5.3	ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิดกับความเร็รรอบของกึ่งหันลม ชุดแรก โดยใช้อุโมงค์ลมที่มีความเร็วลมต่างๆ กัน	78
5.4	ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิดกับความเร็รรอบของกึ่งหันลม ชุดที่สอง โดยใช้อุโมงค์ลมที่มีความเร็วลมต่างๆ กัน	78

- 5.5 ความสัมพันธ์ของกำลังกับความเร็วรอบของกังหันลมชุดแรกที่ถูกติดตั้งบนรถปิคอัพที่มีความเร็วลมต่างๆ กัน 79
- 5.6 ความสัมพันธ์ของโมเมนต์บิดกับความเร็วรอบของกังหันลมชุดแรกที่ถูกติดตั้งบนรถปิคอัพที่มีความเร็วลมต่างๆ กัน 79
- 5.7 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมชุดแรก 80
- 5.8 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมชุดที่สอง 81
- 5.9 สัมประสิทธิ์กำลังกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมชุดแรกที่ได้จากผลเฉลี่ยโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 82
- 5.10 สัมประสิทธิ์กำลังกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมชุดที่สองที่ได้จากผลเฉลี่ยโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 82
- 5.11 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์กำลังที่ได้จากการทดลอง และจากผลเฉลี่ยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกังหันลมชุดแรก 83
- 5.12 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์กำลังที่ได้จากการทดลอง และจากผลเฉลี่ยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกังหันลมชุดที่สอง 84
- 5.13 ก. ข้อมูลอากาศพลศาสตร์ของ NACA 4415 ที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่างๆ กัน [17] 86
- 5.13 ข. ผลกระทบของเลขเรย์โนลด์ต่อสัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุด 87
- 5.13 ค. ผลกระทบของเลขเรย์โนลด์ต่อสัมประสิทธิ์แรงหน่วงต่ำสุด 87
- 5.14 สัมประสิทธิ์กำลังกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมชุดแรก ที่ C_{D0} และ C_{Lmax} ต่างๆ กัน 89
- 5.15 สัมประสิทธิ์กำลังกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมชุดที่สองที่ C_{D0} และ C_{Lmax} ต่างๆ กัน 90
- 5.16 สัมประสิทธิ์จากผลเฉลี่ยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พิจารณาผลของเลขเรย์โนลด์ที่มีต่อสมรรถนะด้วย เปรียบเทียบกับผลการทดลองของกังหันลมชุดแรกที่ทดสอบกับอุโมงค์ลม 92
- 5.17 สัมประสิทธิ์กำลังจากผลเฉลี่ยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พิจารณาผลของเลขเรย์โนลด์ที่มีต่อสมรรถนะด้วย เปรียบเทียบกับผลการทดลองของกังหันลมชุดแรกบนรถปิคอัพ 92
- 5.18 สัมประสิทธิ์กำลังจากผลเฉลี่ยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พิจารณาผลของเลขเรย์โนลด์ที่มีต่อสมรรถนะด้วย เปรียบเทียบกับผลการทดลองของกังหันลมชุดที่สองกับอุโมงค์ลม 93

5.19	สัมประสิทธิ์แรงทริสของกัณฑ์ลมชุดแรกจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	94
5.20	สัมประสิทธิ์แรงทริสของกัณฑ์ลมชุดที่สองจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	95
5.21	สัมประสิทธิ์แรงทริสของกัณฑ์ลมชุดแรกที่น่าเอาผลของตัวเลขเรย์โนลด์พิจารณาด้วย จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	96
5.22	สัมประสิทธิ์แรงทริสของกัณฑ์ลมชุดที่สองที่น่าเอาผลของตัวเลขเรย์โนลด์พิจารณาด้วย จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	96
5.23	ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนใบกังหันลมชุดแรก ภายใต้ความเร็วลมต่างๆ กัน จากการทดลอง	102
5.24	ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนใบกังหันลมชุดที่สอง ภายใต้ความเร็วลมต่างๆ กัน จากการทดลอง	103
5.25	แสดงถึงแกนหลักและแกนอ้างอิงของรูปภาคตัดขวางของใบกังหันลม	105
5.26	ค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดของใบกังหันลมชุดแรกที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	106
5.27	ค่าความเค้นจากแรงดึงของใบกังหันลมชุดแรกที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	106
5.28	ค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดของใบกังหันลมชุดที่สองที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	107
5.29	ค่าความเค้นจากแรงดึงของใบกังหันลมชุดที่สองที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	107
5.30	ค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกัณฑ์ลมชุดแรก	109
5.31	ค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกัณฑ์ลมชุดที่สอง	110
5.32	ค่าความเค้นจากแรงดึงที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกัณฑ์ลมชุดแรก	110
5.33	ค่าความเค้นจากแรงดึงที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกัณฑ์ลมชุดที่สอง	111
5.34	ค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองของใบกังหันลมชุดแรก	112

- 5.35 ค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์
เปรียบเทียบกับผลการทดลองของใบกังหันลมชุดที่สอง 112
- 5.36 ค่าความเร็วลมที่มุมต่างๆ โดยวัดเทียบกับเส้นระดับที่ระยะห่าง
จากปากอุโมงค์ลม 1.5 เมตร และที่ความเร็วรอบของพัดลมของ
อุโมงค์ลมเท่ากับ 600 รอบต่อนาที 113
- 5.37 ตำแหน่งการวางท่อปีโตสติกต์ย์เพื่อวัดความเร็วลมของอุโมงค์ลม 115
- 5.38 ความเร็วลมในการทดลองหาค่าความเค้นของกังหันลมชุดแรก 115
- 5.39 ความเร็วลมในการทดลองหาค่าความเค้นของกังหันลมชุดที่สอง 116
- ก.1. รูปแผนอากาศ NACA 4415 และแกนอ้างอิง ก. 3



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการสัญลักษณ์

A	พื้นที่ของ rotor
a	ค่าแฟคเตอร์เหนี่ยวนำตามแกน
a'	ค่าแฟคเตอร์เหนี่ยวนำเชิงมุม
B	จำนวนใบกังหัน
c	ความกว้างของใบกังหันลม
C_L	สัมประสิทธิ์แรงยก
C_D	สัมประสิทธิ์แรงหน่วง
C_p	สัมประสิทธิ์กำลัง
C_T	สัมประสิทธิ์แรงทริส
C_n	สัมประสิทธิ์แรงในแนวตั้งฉากกับระนาบ rotor
C_t	สัมประสิทธิ์แรงในแนวขนานกับระนาบ rotor
$C_{L_{max}}$	สัมประสิทธิ์แรงยกที่มีค่าสูงสุด
$C_{L_{fl}}$	สัมประสิทธิ์แรงยกที่เป็นส่วนราบเรียบ
C_{D_0}	สัมประสิทธิ์แรงหน่วงที่มีค่าต่ำสุด
D	แรงหน่วง
F	ความสูญเสียปลายใบ
F_n	แรงในแนวที่ตั้งฉากกับระนาบ rotor
F_t	แรงในแนวที่ขนานกับระนาบ rotor
L	แรงยก
P	กำลัง
Q	โมเมนต์บิด
r	ตำแหน่งเฉพาะที่บนใบกังหันวัดจากจุดศูนย์กลาง rotor
R	รัศมีของใบกังหันลม
T	แรงทริส
U_1	ความเร็วลมตามแนวนอนที่ระนาบ rotor
U_2	ความเร็วลมตามแนวนอนในบริเวณ wake หลัง rotor
V_∞	ความเร็วลมต้นทาง
W	ความเร็วลมรวมที่ผู้สังเกตการณ์บนใบกังหันลมเห็น
x	อัตราส่วนความเร็วเฉพาะที่

X	อัตราส่วนความเร็วปลายใบ
Ω	ความเร็วเชิงมุมของใบกังหัน
ω	ความเร็วเชิงมุมของ wake หลัง rotor
ϕ	ผลรวมของมุมปะทะและมุมบิด
β	มุมบิดของใบกังหัน
α	มุมปะทะของความเร็วลมที่กระทำต่อใบกังหัน
λ	Blade solidity $Bc/2\pi r$
ρ	ความหนาแน่นของอากาศ
ρ_B	ความหนาแน่นของใบกังหัน
σ	ความเค้น
ϵ	ความเครียด
E	ค่า Modulus of Elasticity
ψ	มุมเอียงของใบกังหันลม
F_c	แรงหนีศูนย์กลางของส่วนใบกังหัน
m	มวลของใบกังหันลม
g	ความโน้มถ่วงของโลก
M_n	โมเมนต์ดัดในทิศทางตั้งฉากกับระนาบ rotor
M_t	โมเมนต์ดัดในทิศทางขนานกับระนาบ rotor กระทำบนใบกังหัน
I	โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดของใบกังหันลมรอบแกน t
d	ระยะจากผิวถึงจุดเซนทรอยด์ของรูปภาคตัดขวางใบกังหันลม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ



1.1 ความเป็นมาของปัญหา

พลังงานลมเป็นพลังงานอีกรูปหนึ่งของพลังงานที่มีอยู่ในโลก และเป็นพลังงานที่สะอาดปราศจากมลพิษ มนุษย์รู้จักใช้พลังงานลมมาตั้งแต่ในอดีตในรูปแบบต่างๆกัน อาทิเช่น การแล่นเรือใบ ซึ่งก็คือการนำเอาพลังงานลมมาเปลี่ยนรูปเป็นแรงขับเคลื่อนให้ตัวเรือเคลื่อนที่ การไม่แบ่งโดยใช้กังหันลมเป็นตัวมาเปลี่ยนพลังงานลมให้มาเป็นโมเมนตัมบิดเพื่อไปขับเคลื่อนขั้วไฟโต การใช้กังหันลมเพื่อการสูบน้ำ สำหรับในเรื่องการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลมนั้น ในอดีตอุปกรณ์ที่ใช้ในการดึงเอาพลังงานลมออกมาใช้มักเป็นกังหันลมแบบแนวนอน (Horizontal axis wind turbine) การใช้กังหันลมมักใช้ในบริเวณห่างไกลที่ไฟฟ้าและความเจริญยังไม่ถึง จนกระทั่งเมื่อเกิดวิกฤตการณ์ทางด้านพลังงานขึ้นในกลางทศวรรษ 1970 น้ำมันเชื้อเพลิงมีราคาสูงขึ้นมาก ประเทศต่างๆก็เริ่มหันมาสนใจในพลังงานรูปอื่นเพื่อนำมาทดแทนพลังงานที่ได้จากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเป็นต้นกำเนิด พลังงานทดแทนที่ได้รับความสนใจและมีการพัฒนาวิเคราะห์เพิ่มขึ้นอย่างมากก็คือ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนใต้พิภพ และพลังงานลม สำหรับเรื่องของพลังงานลมได้มีการวิจัยและพัฒนากังหันลมขึ้นอย่างมากในช่วงดังกล่าว การพัฒนามีทั้งทางด้านรูปร่าง สมรรถนะ โครงสร้างและการควบคุม มีการสร้างกังหันลมทั้งแบบแนวนอนและแนวแกนแนวตั้ง มีทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก ทั้งเพื่อการวิจัยและการพาณิชย์

ในประเทศไทยกังหันลมที่มีใช้ ส่วนใหญ่จะเป็นกังหันลมแบบแนวนอน ซึ่งจะเป็นกังหันลมนานาเกลียวและกังหันลมสูบน้ำเพื่อการเกษตร ซึ่งใช้ใบกังหันเป็นใบที่ทำจากไม้บ้าง ใบสังกะสี หรือใบเหล็กบ้าง สำหรับกังหันลมเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้านั้นมีการใช้กันอย่างค่อนข้างจำกัด และส่วนใหญ่จะเป็นกังหันลมที่ถูกผลิตจากต่างประเทศ ซึ่งไม่ค่อยเหมาะสำหรับการใช้ในประเทศไทย เนื่องจากความเร็วลมที่ใช้ในการออกแบบของกังหันลมจากต่างประเทศนั้นสูงกว่าความเร็วลมเฉลี่ยในประเทศไทยมาก เทคโนโลยีและความเข้าใจในกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศไทยยังมีจำกัด กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศไทยไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายนัก มีแต่หน่วยงานของรัฐ เช่น การไฟฟ้าฝ่ายผลิต [26] และสถาบันการศึกษา ที่ได้ทำการติดตั้งและเก็บข้อมูล สาเหตุหนึ่งอาจเป็นไปได้ว่า ความเร็วลมเฉลี่ยในประเทศไทยค่อนข้างต่ำ ดังนั้นพลังงานที่จะได้จากกังหันลมจึงต่ำมากไม่คุ้มกับการลงทุน ดังนั้นจึงไม่ค่อยมีผู้

คนสนใจในพลังงานลมนี้มากนัก การวิจัยและพัฒนากังหันลมในประเทศไทยจึงเป็นไปอย่างจำกัด กังหันลมแนวอนนี้ยังแบ่งออกเป็นกังหันลมชนิดหลายใบ (Multi blade type) และกังหันลมชนิดความเร็วรอบสูง ซึ่งจะมีใบประมาณ 2 - 4 ใบ กังหันลมที่เหมาะสมกับการผลิตกระแสไฟฟ้าจะเป็นแบบกังหันลมที่มีใบประมาณ 2 - 4 ใบ ปัญหาอีกประการที่ประสบสำหรับกังหันลมที่ผลิตขึ้นเองในประเทศไทยก็คือ ปัญหาทางด้านโครงสร้าง การฉีกขาด และหักของใบกังหัน ปัญหาสันการสะท้อนและการไร้เสถียรภาพของกังหันลมในลักษณะหนีลม (yaw) [14]

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

1.2.1 วัตถุประสงค์

โครงการนี้มุ่งหวังที่จะทำการศึกษาและวิจัย เพื่อออกแบบกังหันลมให้มีโครงสร้างแข็งแรงมีเสถียรภาพและมีประสิทธิภาพสูง โดยทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อออกแบบใบกังหันลม และเพื่อทำนายสมรรถนะและค่าความเค้นของกังหันลมแนวอน และสร้างกังหันลมขึ้นมาแล้วทำการทดสอบกังหันลมต้นแบบ ทั้งจากอุโมงค์ลมและบนรถที่เคลื่อนที่ เพื่อเก็บข้อมูลทางด้านสมรรถนะและโครงสร้างเปรียบเทียบกับค่าที่ออกแบบไว้ เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตกังหันลมเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

แบบจำลองของกังหันลมที่ใช้ในการวิจัยนี้ จะเป็นกังหันลมแนวอนชนิด 3 ใบ ซึ่งเป็นจำนวนใบที่น้อยที่สุดที่เหมาะสมกับการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งในทางทฤษฎีจะไม่ก่อให้เกิดภาวะทางพลวัต ในลักษณะ harmonic function บนใบกังหัน

1.2.2 ขอบเขตของการวิจัย

1.2.2.1 การศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกังหันลมแนวอน

1.2.2.2 เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับทำนายรูปร่างของใบกังหันลมต้นแบบที่มีประสิทธิภาพเชิงอากาศพลศาสตร์สูงสุด

1.2.2.3 หาผลเฉลยของรูปร่างใบกังหันลมจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และทำการสร้างใบกังหันลม

1.2.2.4 ทดสอบกังหันลมต้นแบบเพื่อหาค่าสมรรถนะ และค่าความแข็งแรงทางโครงสร้าง(ค่าความเค้น)

- 1.2.2.5 ทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับทำนายสมรรถนะ และค่าความเค้นของกังหันลมแนวนอน
- 1.2.2.6 หาผลเฉลยของสมรรถนะและค่าความเค้นของกังหันลมแนวนอน
- 1.2.2.7 เปรียบเทียบผลเฉลยและผลการทดสอบ เพื่อยืนยันความถูกต้องของข้อมูล ทั้งที่ได้จากผลการทดสอบและจากผลเฉลยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 1.2.2.8 ศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะของข้อมูลทางสมรรถนะ และทางโครงสร้างของกังหันลมแนวนอน เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตกังหันลมเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

ประโยชน์ที่จะได้รับการวิจัยก็คือ

- 1.3.1 เข้าใจถึงคุณลักษณะของสมรรถนะกังหันลมแนวนอนชนิด 3 ใบ ที่เหมาะสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าที่แปรตามเงื่อนไขการทำงาน และตัวเลขเรย์โนลด์
- 1.3.2 เข้าใจถึงคุณลักษณะของค่าความเค้นของกังหันลมแนวนอนที่แปรตามเงื่อนไขการทำงาน ทำให้สามารถเลือกใช้วัสดุและรูปแบบของใบกังหันลมที่เหมาะสมกับภาวะ
- 1.3.4 เข้าใจถึงรูปร่างของใบกังหันลมที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด และผลกระทบจากตัวเลขเรย์โนลด์ เนื่องจากเงื่อนไขการทำงาน
- 1.3.5 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับทำนายรูปร่างของใบกังหันลม ที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดเชิงอากาศพลศาสตร์ทางทฤษฎี
- 1.3.6 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับทำนายค่าสมรรถนะ และค่าความเค้นของกังหันลมแนวนอน

1.4 การปฏิบัติงาน

โครงการนี้ได้เริ่มต้นตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ 2531 เดิมตามแผนปฏิบัติงานจะใช้เวลา 18 เดือน ปรากฏว่าเนื่องจากเกิดอุปสรรคในเรื่องอุปกรณ์ เครื่องมือในการวัดค่าความเค้นในช่วงแรก ทำให้ได้ใช้เวลา 18 เดือน ไปในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อออกแบบใบกังหัน

ลมให้มีประสิทธิภาพสูงในเชิงอากาศพลศาสตร์ ดัดแปลงและสร้างกังหันลมต้นแบบจากผล
 เฉลยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และทำการทดลองเฉพาะในส่วนของสมรรถนะของกังหันลมต้น
 แบบจากอุโมงค์ลม และติดตั้งบนรถเคลื่อนที่ [27] จากนั้นได้มีการพัฒนาและศึกษาโปรแกรม
 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ทำนายสมรรถนะให้สามารถทำนายค่าในช่วง vortex ring state และให้
 สามารถทำนายค่าความเค้นด้วย ประกอบกับในช่วงนั้นผู้วิจัยได้เดินทางไปปฏิบัติราชการต่าง
 ประเทศถึง 2 ครั้ง ทำให้การวิจัยล่าช้าไป และได้เริ่มทำการทดลองเกี่ยวกับค่าความเค้นของ
 กังหันลมขึ้นอีกครั้งประมาณเดือนเมษายน 2536 จนกระทั่งแล้วเสร็จ

1.5 รายละเอียดของรายงาน

บทที่ 2 ในรายงานนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีสำหรับทำนายสมรรถนะของกังหันลมแนวนอน
 โดยใช้ทฤษฎีทางอากาศพลศาสตร์ และทำนายรูปร่างของใบกังหันที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดใน
 เชิงอากาศพลศาสตร์ และการพัฒนาสมการสำหรับหาค่าความเค้นบนใบกังหันลม ในบทที่ 3
 จะบรรยายถึงการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทำนายรูปร่างของกังหันลมที่มีประสิทธิ
 ภาพสูงสุดทางอากาศพลศาสตร์ และโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทำนายสมรรถนะและค่าความ
 เค้นของกังหันลมและคุณลักษณะและรูปร่างของใบกังหันที่ออกแบบและสร้างขึ้น ในบทที่ 4
 จะกล่าวถึงการทดลอง ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ประกอบที่ใช้ในการทดลอง อาทิเช่น อุโมงค์
 ลม อุปกรณ์วัดความเร็วลม อุปกรณ์วัดกำลัง วัดโมเมนต์บิด strain gage, strain amplifier
 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ ในบทที่ 5 จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากการทดลองกับอุโมงค์ลม
 รถปิคอัพ และผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในบทที่ 6
 จะกล่าวถึงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิต
 ศาสตร์ บทที่ 7 นั้นเป็นบทสรุปการอภิปราย ส่วนในภาคผนวกนั้นจะประกอบด้วยคุณลักษณะ
 ของใบกังหันลมชุดแรกและชุดที่สอง โปรแกรมคอมพิวเตอร์ของการออกแบบรูปร่างของใบ
 กังหันลมที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในเชิงอากาศพลศาสตร์ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้หาค่า
 สมรรถนะและค่าความเค้นของกังหันลม โปรแกรมคอมพิวเตอร์หาค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบ
 จำลองของความสูญเสียที่ปลายใบ ผลเฉลยจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และข้อมูลที่ได้จากการ
 ทดลองของกังหันลม

บทที่ 2

อากาศพลศาสตร์ของกังหันลม

2.1 บทนำ

ในการที่กังหันลมจะสามารถดึงเอาพลังงานออกจากกระแสลมที่ไหลพัดผ่านได้นั้น กังหันลมจะต้องถูกทำให้หมุนและทำให้เกิดโมเมนต์บิด (Torque) ขึ้น การที่กังหันลมจะหมุนได้เร็วหรือช้า ได้โมเมนต์บิดมากหรือน้อย ซึ่งจะส่งผลให้ได้กำลัง (Power) ออกมามากหรือน้อย ก็ขึ้นอยู่กับรูปร่างของใบกังหันและการจัดวางของใบกังหันกับแนวลมที่ปะทะ ซึ่งถ้าพิจารณาอย่างใกล้ชิดจะเห็นว่า แรง โมเมนต์บิดและกำลังที่เกิดขึ้น เกิดจากการที่จัดวางใบกังหันให้ลมไหลปะทะกับใบกังหันในลักษณะที่ทำให้เกิดการกระจายตัวของความดันและความเร็วตามที่ต้องการ ซึ่งในการจัดวางดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ทฤษฎีทางอากาศพลศาสตร์มาช่วยในการคำนวณ การใช้ทฤษฎีทางอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมจะทำให้สามารถคำนวณหาค่าแรง โมเมนต์บิด และกำลังที่เกิดขึ้นบนใบกังหันที่มีรูปร่างและการจัดวางแบบต่างๆกัน ในมุมนกลับกัน เราก็สามารถใช้หลักของอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมในการคำนวณหารูปร่างของใบกังหันลมที่ให้ประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์สูงสุดด้วย ดังนั้นในบทนี้จึงกล่าวถึง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกังหันลมและการคำนวณหาแรง โมเมนต์บิด และกำลังของกังหันลมแบบแนวนอน และรูปร่างของใบกังหันลมแบบแนวนอนที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด และการคำนวณหาโมเมนต์บิด และความเค้นที่เกิดขึ้นบนใบกังหัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลเกี่ยวกับความแข็งแรงทางโครงสร้างของกังหันลม

2.2 พลังงานที่สามารถดึงออกจากลม

พลังงานของลมนั้นแปรผันตามความเร็วของลมที่พัด ดังนั้นถ้าเขียนพลังงานของลมในรูปพลังงานจลน์ จะเขียนได้เป็น

$$E = \frac{1}{2} m V_{\infty}^2 \quad (1)$$

เมื่อ E เป็นพลังงานจลน์
m คือ มวลของลม
 V_{∞} คือ ความเร็วลม

กำลังของลมก็คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานต่อหน่วยเวลา ดังนั้น

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3 \quad (2)$$

ถ้าคิดมวลของลมที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดรูปวงกลมที่มีพื้นที่เท่ากับ A สมการ (2) จะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} (\rho A V_{\infty}) V_{\infty}^2 \\ P &= \frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3 \end{aligned} \quad (3)$$

เมื่อ P = กำลังของลม
 ρ = ความหนาแน่นของลม
 A = พื้นที่ภาคตัดขวางรูปวงกลม

ถ้าเราเอาเครื่องมือชนิดหนึ่งไปดึงเอาพลังงานที่มีอยู่ในลมที่มีความเร็วเท่ากับ V_{∞} แล้ว ในทางอุดมคติเครื่องมือนี้ (ประสิทธิภาพ 100% ไม่มีการสูญเสีย) จะสามารถดึงเอากำลังออกไปใช้งานได้สูงสุดแค่ 16/27 ของกำลังที่มีอยู่ในลมที่มีความเร็วลม V_{∞} ซึ่งจะเรียกว่าขอบเขตของ Betz (Betz limit) ซึ่งให้ชื่อตาม Albert Betz นักอากาศพลศาสตร์ชาวเยอรมัน แต่ในทางปฏิบัติแล้วเราจะดึงเอากำลังออกจากลมได้น้อยกว่านี้ อันสืบเนื่องมาจากการสูญเสียทางอากาศพลศาสตร์ การสูญเสียในเชิงประสิทธิภาพทางไฟฟ้า และประสิทธิภาพทางกลของระบบ ดังนั้นจะเห็นว่ากำลังที่จะได้มาจากกังหันลมจริงนั้นน้อยกว่าในทางอุดมคติมากพอควร และเห็นได้ว่ากำลังที่ได้จะขึ้นกับความเร็วมค่อนข้างมาก เนื่องจากกำลังนั้นแปรผันเป็นกำลังสามของความเร็วลม ดังนั้นการเลือกสถานที่ติดตั้งกังหันลมที่มีความเร็วลมสูงนับเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดในการนำพลังงานจากลมมาใช้ให้มากที่สุด เพราะไม่ว่าจะประดิษฐ์กังหันลมให้มีประสิทธิภาพสมบูรณ์เพียงใด แต่ถ้าลมที่พัดผ่านกังหันลมมีความเร็วต่ำ กำลังที่จะดึงออกจากลมก็จะมีค่าต่ำลงอย่างมาก (เป็นรากกำลังสาม)

2.3 ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกน (Axial momentum theory)

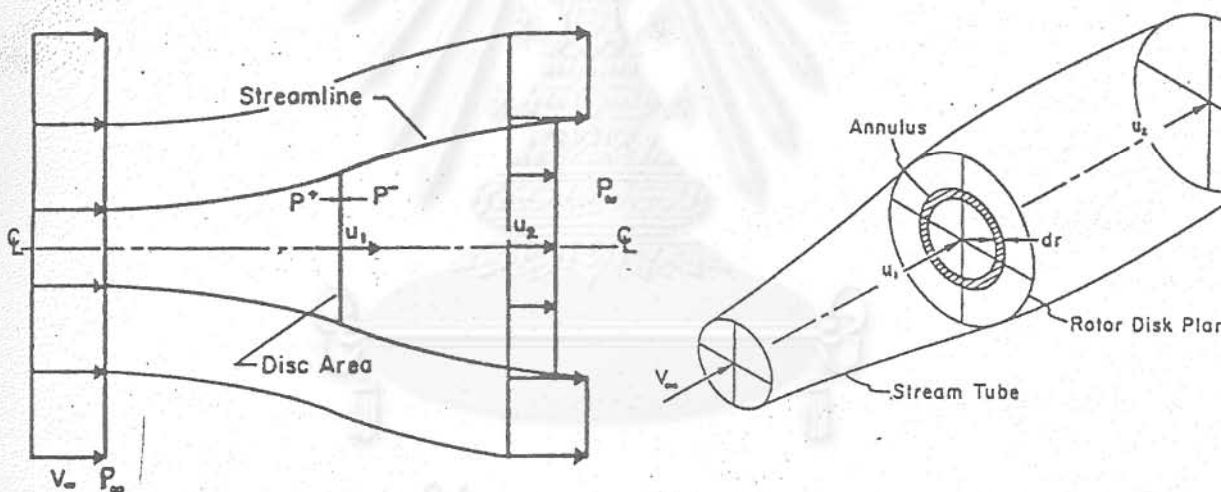
ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกนเป็นทฤษฎีเบื้องต้นที่สุดที่ใช้ในการคำนวณค่าแรงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมในแนวของการไหลของลมหออากาศที่พัดผ่านตัวกังหัน ทฤษฎี

นี้ได้ถูกพัฒนามาจากทฤษฎี Actuator disk ของเฮลิคอปเตอร์ ซึ่งถูกคิดค้นขึ้นโดย Rankine [1] และ Froude [2] และต่อมาได้ถูกพัฒนาเพิ่มเติมโดย Betz [3] ในช่วง ค.ศ. 1920

รูปที่ 2.1 แสดงถึงการไหลของลํ้าอากาศผ่านตัวกังหันลม ลมที่พัดเข้าหา Rotor ของกังหันลมจะถูกชลอให้ช้าลงจากความเร็วลมต้นทาง V_∞ ลงเป็นความเร็ว U_1 ที่ rotor และ U_2 ที่ปลายทาง ความดันด้านหน้า rotor เท่ากับ P^+ และด้านหลัง rotor เท่ากับ P^-

ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกนที่ใช้กับลํ้าอากาศจะอยู่ภายใต้สมมติฐานต่อไปนี้ คือ

1. ใบกังหันหมุนโดยไม่มีการสูญเสียจากแรงเสียดทาน (drag force)
2. ความดันในลํ้าอากาศที่ตำแหน่งที่มีความเร็ว U_2 เท่ากับความดันอากาศที่ต้นทาง P_∞
3. ไม่มีการหมุนของอากาศด้านหลัง rotor



รูปที่ 2.1 stream tube ของลํ้าอากาศผ่าน rotor กังหันลมแนวนอน

ค่าแรง thrust หรือแรงตามแนวแกน (axial force) สามารถหาได้จากสมการโมเมนตัม ดังนี้คือ

$$T = \rho A U_1 (V_\infty - U_2) \quad (4)$$

ค่าแรง thrust จากผลต่างความดันที่ rotor จะเป็น

$$T = A(P^+ - P^-) \quad (5)$$

จากสมการเบอร์นูลลีที่ใช้กับลำอากาศด้านหน้า rotor จะได้

$$1/2 \rho V_\infty^2 + P_\infty = 1/2 \rho U_1^2 + P^+ \quad (6)$$

จากสมการเบอร์นูลลีที่ใช้กับลำอากาศด้านหลัง rotor จะได้

$$1/2 \rho U_2^2 + P_\infty = 1/2 \rho U_1^2 + P^- \quad (7)$$

จากสมการที่ (4) และ (5)

$$(P^+ - P^-) A = \rho A U_1 (V_\infty - U_2) \quad (8)$$

จากสมการ (6) และ (7)

$$P^+ - P^- = 1/2 \rho V_\infty^2 - 1/2 \rho U_2^2 \quad (9)$$

จาก สมการ (8) และ (9)

$$\begin{aligned} \rho U_1 (V_\infty - U_2) &= 1/2 \rho (V_\infty - U_2) (V_\infty + U_2) \\ U_1 &= (V_\infty + U_2) / 2 \end{aligned} \quad (10)$$

ถ้ากำหนดให้ $U_1 = V_\infty - aV_\infty$ หรือ $V_\infty(1 - a)$ โดยให้ค่า a เป็นค่า axial induction factor

เมื่อนำ $U_1 = V_\infty(1 - a)$ ไปแทนค่าในสมการที่ (10) ความเร็วของลำอากาศด้านหลัง (wake) U_2 จะมีค่าเท่ากับ

$$U_2 = V_\infty(1 - 2a) \quad (11)$$

ค่ากำลังของกังหันลมที่ได้จากลมจะสามารถคำนวณได้จาก ผลคูณของแรง thrust และความเร็วลมที่ rotor U_1

$$P = \rho A U_1 (V_\infty - U_2) U_1$$

เมื่อแทนค่า U_1 และ U_2 จะได้

$$P = 1/2 \rho A V_\infty^3 \{4a(1-a)^2\} \quad (12)$$

ถ้าให้สัมประสิทธิ์ของกำลัง Power coefficient มีค่าเป็น

$$C_p = P / \frac{1}{2} \rho A V_\infty^3$$

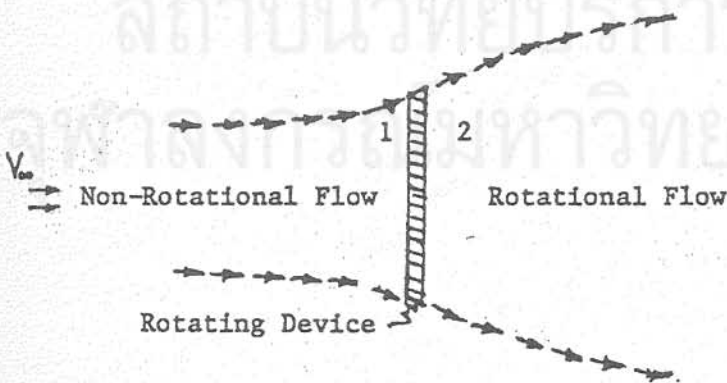
แทนค่าสมการที่ (12) จะได้

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (13)$$

จากสมการที่ (13) จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์กำลัง C_p สูงสุดได้โดยการหาอนุพันธ์ของสมการที่ (13) โดยเทียบกับ a แล้วจับให้มีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้ค่า a ที่ให้ค่า C_p สูงสุดเท่ากับ $1/3$ และค่า C_p สูงสุดจะมีค่าเท่ากับ $16/27$ หรือ 0.593 นั่นคือ ขอบเขตของ Betz ที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อ 2.2

2.4 ผลสืบเนื่องจากลำอากาศหมุนหลัง rotor (Effect of wake rotation)

ในหัวข้อ 2.3 ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกนนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของลำอากาศที่ไหลผ่านกังหันลมแนวอนถูกตั้งสมมุติฐานว่า ลำอากาศที่ไหลอยู่ด้านหลัง rotor กังหันลมที่หมุนอยู่นั้นไม่หมุน แต่ในความเป็นจริงแล้ว เมื่อลมพัดผ่าน rotor ของกังหันลมซึ่งกำลังหมุนอยู่ ลำอากาศด้านหลังก็จะหมุนสวนทิศทางการหมุนของใบกังหันด้วย เนื่องจากการถ่ายเทโมเมนตัมเชิงมุมจากกังหันลมสู่ลำอากาศด้านหลัง การหมุนของลำอากาศนี้จะทำให้กำลังที่จะได้จากกังหันลมน้อยลง เพราะต้องสูญเสียกำลังส่วนหนึ่งไปในรูปของ wake rotational energy



รูปที่ 2.2 แผนภาพการไหลของอากาศผ่าน rotor ของกังหันลม

Glauert [4] เป็นผู้ริเริ่มวิเคราะห์ทฤษฎี actuator disk ของเฮลิคอปเตอร์ โดยพิจารณา ล้ำอากาศหมุนทางด้านหลังเข้าไปด้วย ซึ่งผลของการวิเคราะห์นี้ถูกนำไปดัดแปลงพัฒนาให้ใช้ กับกังหันลม ดังที่ได้แสดงในเอกสารอ้างอิง [5 - 7] จากผลการวิเคราะห์พอสรุปได้ว่า ค่า axial induction factor ของกังหันลมสามารถแสดงในรูปของ

$$a = \frac{b/2 \{ 1 - (1 - a)b^2 / 4x^2(b - a) \}}{\quad} \quad (14)$$

เมื่อ b คือ wake axial induction factor

$$b = 1 - U_2/V_\infty \quad (15)$$

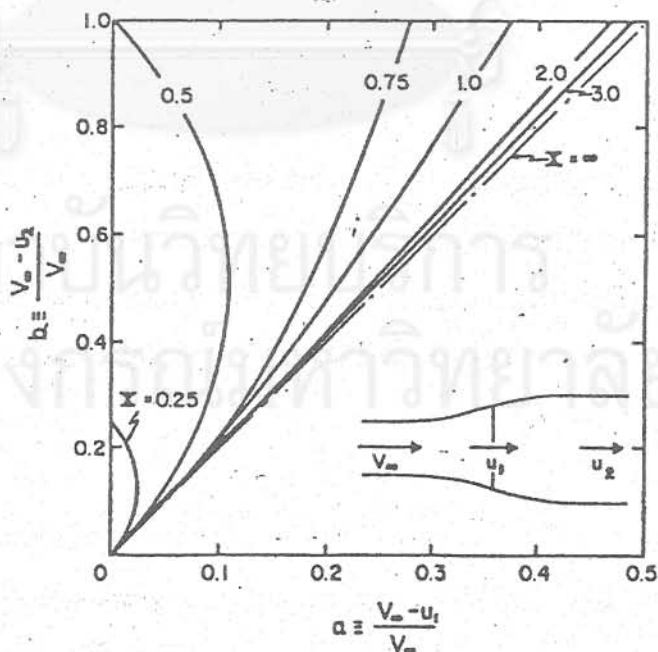
X คือ อัตราส่วนของความเร็วที่ปลายใบ (Tip speed ratio)

$$X = R\Omega/V_\infty$$

Ω คือ ความเร็วเชิงมุมของ rotor กังหันลม

R คือ รัศมีของ rotor

ค่า a ในสมการที่ (14) นี้ ถูกเขียนขึ้นภายใต้เงื่อนไขที่ว่าโมเมนต์เชิงมุมของล้ำอากาศ ด้านหลัง rotor มีค่าคงที่ (irrotational vortex, $\omega r^2 = \text{คงที่}$) และความดันของล้ำอากาศที่ ตำแหน่งที่มีความเร็วเท่ากับ U_2 จะมีค่าเท่ากับความดันที่ตำแหน่งต้นทาง P_∞ รูปที่ 2.3 จะแสดง ถึงความสัมพันธ์ของ a และ b



รูปที่ 2.3 ผลของอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่มีต่อ axial induction factor

ในสมการที่ (14) จะเห็นได้ว่า b จะมีค่าเท่ากับ $2a$ พอดีเมื่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบ $X = \infty$ ซึ่งค่า $X = \infty$ หมายความว่าถึงกังหันลมจะหมุนเร็วมากจน rotor ของกังหันลมจะมีลักษณะคล้ายกับแผ่น actuator disk ซึ่งผลที่ได้จะมีค่าเท่ากับผลที่ได้จากการใช้ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกน และเมื่อ X มีค่ามากกว่า 2 b จะมีค่าแตกต่างไปจาก $2a$ เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่เมื่อ X มีค่าน้อยกว่า 1 ค่า b จะแตกต่างกว่า $2a$ มาก

จึงพอสรุปได้ว่า ในกรณีที่กังหันลมหมุนด้วยอัตราส่วนความเร็วปลายใบมีค่ามากกว่า 2 ขึ้นไป จะสามารถใช้ค่า wake axial induction factor b เท่ากับ $2a$ ได้

2.5 ทฤษฎีล้าอากาศหมุน (wake rotation)

ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกน จะสามารถดัดแปลงให้สามารถวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมที่มีล้าอากาศหมุนได้ โดยการตั้งสมมติฐานให้ล้าอากาศด้านหลัง rotor นั้นหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω ซึ่งค่า ω จะมีค่าน้อย เมื่อเทียบกับความเร็วเชิงมุมของใบกังหัน Ω

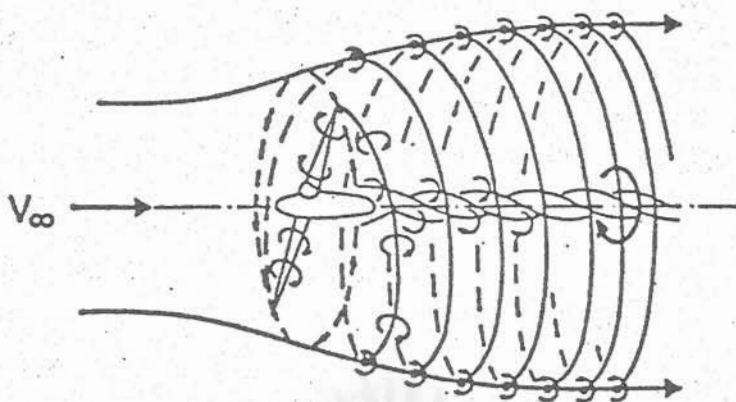
กำหนดให้ค่า angular induction factor a' ให้มีค่าเท่ากับ

$$a' = \frac{\text{ความเร็วเชิงมุมของอากาศด้านหลัง rotor}}{\text{สองเท่าของความเร็วเชิงมุมของ rotor}}$$

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (15)$$

ดังนั้น เมื่อพิจารณาจากล้าอากาศที่ไหลผ่านตัวกังหันลม จะเห็นว่าทางด้านหน้าของอากาศที่พัดเข้าสู่กังหันลม จะมีแต่ความเร็วลมตามแนวแกนเท่านั้น ไม่มีความเร็วตามทิศเชิงมุม แต่เมื่ออากาศไหลผ่านตัวกังหันลมทางด้านหลังของกังหันลม อากาศจะมีความเร็วทั้งความเร็วตามทิศแนวแกนและความเร็วเชิงมุม ซึ่งความเร็วเชิงมุมของอากาศเท่ากับ ω หรือ $2a'\Omega$

ถ้ากำหนดให้ความเร็วเชิงมุมของล้าอากาศที่ตรงตัว rotor เป็นค่าเฉลี่ยระหว่างความเร็วเชิงมุมของอากาศหน้ากังหันลม และความเร็วเชิงมุมหลังกังหันลม จะได้ค่าเท่ากับ $\omega/2$ ซึ่งจะเท่ากับ $a'\Omega$ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.4

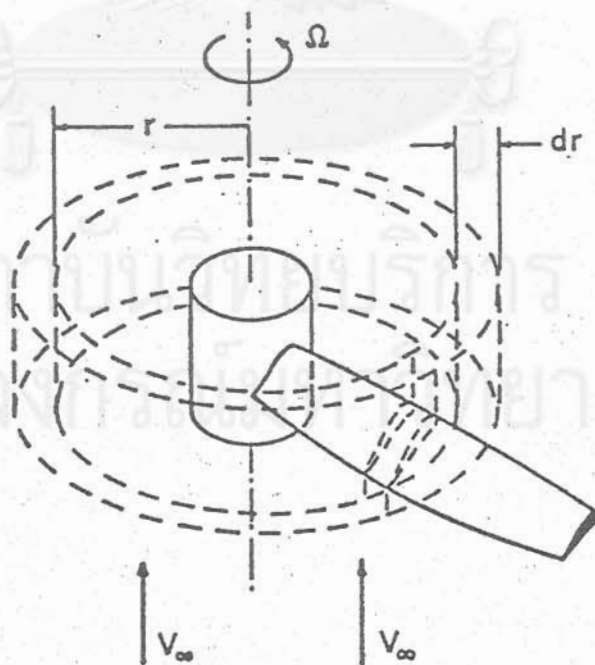


รูปที่ 2.4 การไหลของลำอากาศผ่านกังหันลมที่มีการหมุนอยู่ด้านหลัง rotor

2.6 แรงและโมเมนต์บิดจากทฤษฎีโมเมนต์

ในกรณีที่มีลมพัดผ่านกังหันลม เราสามารถหาค่าแรงและโมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นบนกังหันลม โดยใช้หลักการของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ของอากาศที่ไหลผ่านกังหันได้

ถ้าพิจารณาจากลำอากาศที่ไหลผ่าน rotor ของกังหันลมในลักษณะที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 control volume ของอากาศรูปวงแหวนที่เกิดจากส่วนของใบกังหัน ซึ่งกวาดครบหนึ่งรอบการหมุน

ความเร็วของอากาศทางด้านต้นทางจะเป็น V_∞ และความดันเป็น P_∞ ในขณะที่ความเร็วที่ rotor เท่ากับ $V_\infty(1 - a)$ และในกรณีนี้ rotor หมุนเร็ว ให้ความเร็วที่ปลายทางเป็น $V_\infty(1 - 2a)$ เมื่อพิจารณาลำอากาศไหลผ่านส่วนของ rotor ที่มีลักษณะเป็นวงแหวนที่ระยะ r ความกว้าง dr จะได้พื้นที่เท่ากับ

$$dA = 2\pi r dr$$

เมื่อนำไปแทนค่าในค่า thrust บนพื้นที่วงแหวนในสมการที่ (4) จะได้

$$dT = \rho(2\pi r dr) V_\infty (1 - a) (2aV_\infty) \quad (16)$$

ในการไหลจริงเมื่อลำอากาศไหลผ่าน rotor กังหันลม อากาศด้านหลังกังหันลมจะเกิดการหมุนสวนทางกับใบกังหัน ถ้าเราเขียน control volume รูปวงแหวนในลักษณะเดียวกับรูปที่ 2.5 จะสามารถเขียนสมการโมเมนตัมของโมเมนตัมของลำอากาศ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของโมเมนตัมกับอัตราการแตกต่างของโมเมนตัมเชิงมุมของลำอากาศหลัง rotor และลำอากาศหน้า rotor

$$\begin{aligned} dQ &= dm(V_r) \\ &= \rho U_1 (2\pi r dr) (\omega r^2) \\ &= 4\pi r^3 \rho V_\infty (1-a) a' \Omega dr \end{aligned} \quad (17)$$

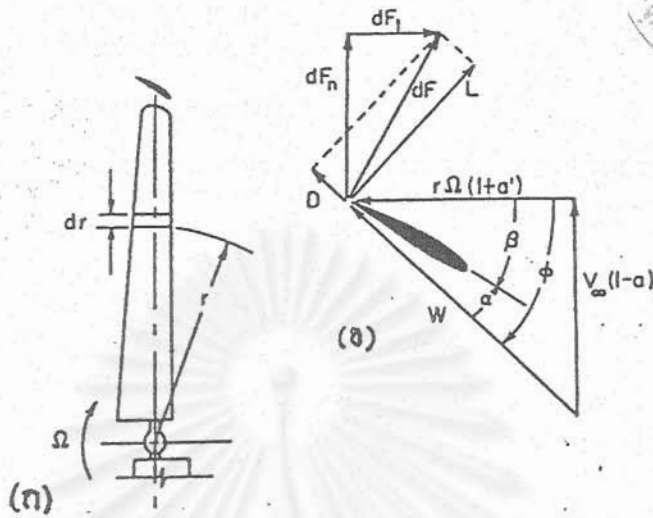
ω = ความเร็วเชิงมุมของลำอากาศหลัง rotor

Ω = ความเร็วเชิงมุมของ rotor กังหันลม

a' = $\omega/2\Omega$

2.7 ทฤษฎีอิลีเมนต์ของใบ (Blade element theory)

ทฤษฎีอิลีเมนต์ของใบก็คือ ทฤษฎีทางอากาศพลศาสตร์ที่ใช้คำนวณหาค่าแรงที่เกิดขึ้นบนส่วนเล็กๆของใบแต่ละส่วน (blade element section) โดยมีสมมติฐานที่ตั้งไว้ว่า แรงที่เกิดขึ้นบนแต่ละส่วนของใบจะมีแค่แรงยก และแรงหน่วงเท่านั้น และสิ่งเกิดขึ้นบนส่วนของใบแต่ละส่วน (หรือวงแหวนของลำอากาศบนส่วนของใบ) จะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งที่เกิดขึ้นบนส่วนของใบส่วนถัดไป ดังนั้น ถ้าเราสามารถหาแรงและโมเมนตัมที่เกิดขึ้นบนส่วนของใบเล็กๆ (differential element of the blade) ทั้งหมดได้ ก็จะหาแรงและโมเมนตัมทั้งหมดได้โดยการอินทิเกรตตลอดความยาวของใบกังหัน



รูปที่ 2.6 ใบพัดกังหันพร้อมทั้งความเร็วและแรงที่เกี่ยวข้องจาก
ก) ภาพทางด้านหน้า ข) ภาพภาคตัดขวาง

รูปที่ 2.6 แสดงถึงลักษณะของใบกังหันลม ที่มองจากด้านหน้าและจากภาคตัดขวาง เมื่อพิจารณาจากความเร็วลมที่เกี่ยวข้องบนภาพหน้าตัดขวางของใบกังหัน จะเห็นได้ว่า ความเร็วลมตามแนวแกนที่ใบจะถูกชะลอให้ช้าลงจากความเร็ว V_∞ ด้วยปริมาณ aV_∞ อันสืบเนื่องจากการดึงเอาพลังงานออกจากอากาศ ในขณะที่เดียวกันความเร็วเชิงมุมของอากาศเมื่อมองจากใบกังหันที่หมุนอยู่ จะมีค่าเท่ากับ $r\Omega(1+a')$ โดยมีมุม β เป็นมุมบิดของใบกังหันจากระนาบของ rotor มุม α เป็นมุมปะทะของความเร็วรวมของอากาศกับเส้น zero lift ของใบกังหัน และ $\phi = \beta + \alpha$

แรงที่เกิดขึ้นบนส่วนของใบกังหันสามารถเขียนเป็นแรงย่อยในแนวตั้งฉาก และแนวขนานกับระนาบของ rotor ได้ดังต่อไปนี้ คือ

$$dF_n = dL \cos\phi + dD \sin\phi \quad (18)$$

$$dF_t = dL \sin\phi - dD \cos\phi \quad (19)$$

dL คือ แรงยก

dD คือ แรงหน่วง

$$\text{โดยที่ } dL = \frac{1}{2} \rho W^2 C_L \text{ cdr} \quad (20)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho W^2 C_D \text{ cdr} \quad (21)$$

C_L = สัมประสิทธิ์แรงยก

C_D = สัมประสิทธิ์แรงหน่วง

W = ความเร็วรวมของอากาศที่ผู้สังเกตการณ์ที่อยู่บนใบกังหันเห็น

c = ความกว้างของใบกังหัน (chord)

$$\text{หากให้นิยาม } dF_n = \frac{1}{2} \rho W^2 C_n \text{ cdr} \quad (22)$$

$$dF_t = \frac{1}{2} \rho W^2 C_t \text{ cdr} \quad (23)$$

โดยที่ C_n = สัมประสิทธิ์ของแรงในแนวตั้งฉากกับระนาบของ rotor

C_t = สัมประสิทธิ์ของแรงในแนวขนานกับระนาบของ rotor

∴ แล้วนำสมการที่ (22) มาแทนค่าลงในสมการที่ (18) และสมการที่ (23) มาแทนค่าลงในสมการที่ (19) จะได้

$$C_n = C_L \cos \phi + C_D \sin \phi \quad (24)$$

$$C_t = C_L \sin \phi - C_D \cos \phi \quad (25)$$

ดังนั้นสำหรับกังหันลมที่มีจำนวนใบกังหันเท่ากับ B ใบ ค่าแรง thrust (แรงตามแนวแกน F_n) และ torque (โมเมนต์บิด) ที่ rotor ของกังหันจะมีค่าเท่ากับ

$$dT = B \frac{1}{2} \rho W^2 C_n \text{ cdr} \quad (26)$$

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho W^2 C_t \text{ c r dr} \quad (27)$$

T = แรง thrust

Q = torque หรือโมเมนต์บิด

2.8 ทฤษฎีสตริป (Strip theory)

ในการหาค่า induction factor ทั้งตามแนวแกนและแนวสัมผัส (tangential) นั้น จะสามารถกระทำได้โดยการนำค่าแรงตามแนวแกนบนใบกังหันมาเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ของลม (ซึ่งก็คือ แรงตามแนวแกนที่ได้ทฤษฎีโมเมนต์ตามแนวแกน) และนำเอาค่า

torque ที่เกิดขึ้นบนใบกังหันมาเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมเชิงมุม และในการหาค่า induction factor นี้จะให้ค่าแรงหมุน D เท่ากับศูนย์ เพื่อให้สอดคล้องกับสมมติฐานที่ใช้ในการหาค่าแรงและโมเมนตัมจากทฤษฎีโมเมนตัม

สมการที่ (16) = สมการที่ (26)

$$\rho(2\pi r dr) V_{\infty}(1-a)(2aV_{\infty}) = B/2\rho W^2 C_L \cos\phi \ c dr \quad (28)$$

สมการที่ (17) = สมการที่ (27)

$$4\pi r^3 \rho V_{\infty}(1-a) a' \Omega dr = B/2\rho W^2 C_L \sin\phi \ c \ r dr \quad (29)$$

จากสามเหลี่ยมของความเร็วในรูปที่ 2.6 จะได้

$$W \sin\phi = V_{\infty}(1-a) \quad (30)$$

สมการที่ (28) จะเป็น

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\lambda C_L \cos\phi}{4 \sin^2\phi} \quad (31)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{\lambda C_L}{4 \cos\phi} \quad (32)$$

$$\lambda = \frac{Bc}{2\pi r} = \text{Solidity}$$

จากสมการที่ (31) และ (32) ค่า a และ a' บนแต่ละตำแหน่งของใบสามารถหาได้โดยกระบวนการ iterate ต่อไปนี้คือ

1. สมมติค่า a และ a'
2. คำนวณค่า ϕ : $\phi = \tan^{-1} \frac{(1-a) V_{\infty}}{(1+a') r \Omega}$
3. คำนวณค่า α : $\alpha = \phi - \beta$
4. คำนวณค่า C_L, C_D จากข้อมูลทางอากาศพลศาสตร์ของ section ใบกังหัน
5. คำนวณค่า a และ a' จากสมการที่ (31) และ (32)
6. เปรียบเทียบค่า a และ a' ที่คำนวณได้ใหม่กับค่าเก่า ถ้าเท่ากันหรืออยู่ในขอบเขตที่กำหนดก็หยุด ถ้าไม่เท่าก็เริ่มต้นข้อ 2 ใหม่ จนกระทั่งได้ค่าเท่าที่ต้องการ

เมื่อได้ค่า a และ a' ตลอดความยาวของใบกังหันแล้ว ก็จะสามารถนำกลับไปแทนค่า เพื่อคำนวณหาค่าแรงและโมเมนต์และกำลังที่ได้จากกังหันลม โดยนำเอาค่าความหน่วงของใบกังหันไปคิดด้วย

$$T = \frac{1}{2} \frac{\rho V_\infty^2 \pi R^2}{X^2} \int_0^X \frac{Bc}{\pi R} (W/V_\infty)^2 C_n dx \quad (33)$$

$$Q = \frac{1}{2} \frac{\rho V_\infty^2 \pi R^3}{X^2} \int_0^X \frac{Bc}{\pi R} (W/V_\infty)^2 C_t x dx \quad (34)$$

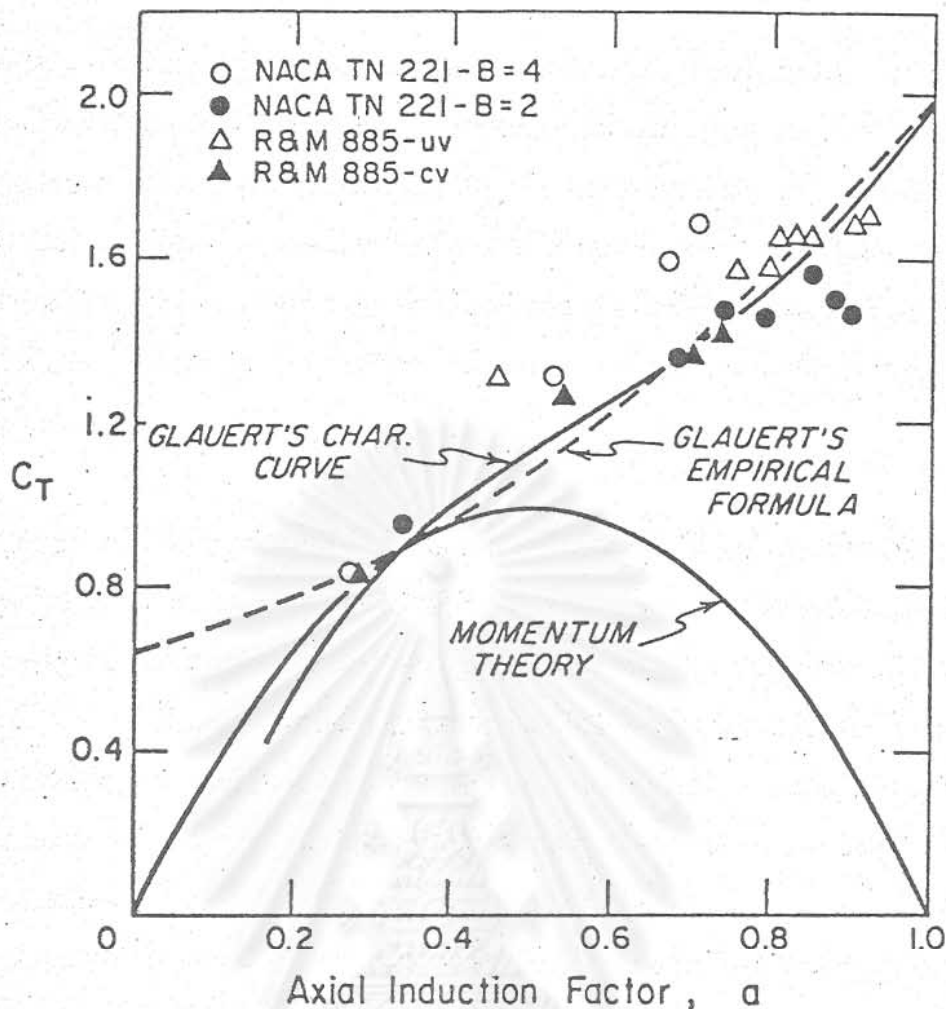
$$P = Q\Omega \quad (35)$$

โดยที่ X = อัตราส่วนความเร็วที่ปลายใบกังหัน $R\Omega/V_\infty$
 x = อัตราส่วนความเร็วเฉพาะที่บนใบกังหัน $r\Omega/V_\infty$

2.9 สภาวะที่ไม่สามารถใช้ทฤษฎีโมเมนต์

แบบจำลองคณิตศาสตร์ของการไหลที่ใช้ทฤษฎีสตรีปนั้นจะใช้ไม่ได้ เมื่อค่า $a > 0.5$ จะเห็นว่าค่าความเร็วล้าอากาศตามแนวแกนในส่วนด้านหลัง $U_2 = V_\infty(1-2a)$ จะมีค่าเป็นลบซึ่งหมายความว่า จะเกิดการไหลย้อนกลับทิศในล้าอากาศด้านหลังของ rotor กังหันลม ซึ่งค่าแรง thrust ที่คำนวณจากทฤษฎีโมเมนต์จะลดน้อยลงตามเส้นประในรูปที่ 2.7 แต่ในทางปฏิบัติปรากฏว่า เรายังสามารถเพิ่มค่าแรง thrust ขึ้นได้เรื่อย เมื่อ a มีค่ามากกว่า 0.5 (เส้น curve ที่ได้จากาทดลองของ Glauert [12] ในรูปที่ 2.7)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์แรงตามแนวแกนกับค่า axial induction factor

จึงเห็นได้ว่า ในทางปฏิบัติเมื่อกังหันลมหมุนให้เกิดค่า a มากกว่า 0.5 การใช้ทฤษฎีโมเมนตัมจะให้ค่าที่ผิดกับค่าที่ได้จากการทดลองมาก จึงต้องมีการใช้ดัดแปลงค่า C_T ที่ได้จากทฤษฎีโมเมนตัม เมื่อค่า a มีค่ามากกว่าค่า a_c (0.38 หรือ 0.4) โดยใช้ค่าที่ทำการ fit curve จากผลการทดลองของ Glauert

$$\begin{aligned}
 C_T &= 4a(1 - a) && \text{เมื่อ } a < a_c \\
 C_T &= 4a_c(1 - a_c) + (a - a_c) \frac{dC_T}{da} \Big|_{a=a_c} && \text{เมื่อ } a \geq a_c \quad (36)
 \end{aligned}$$

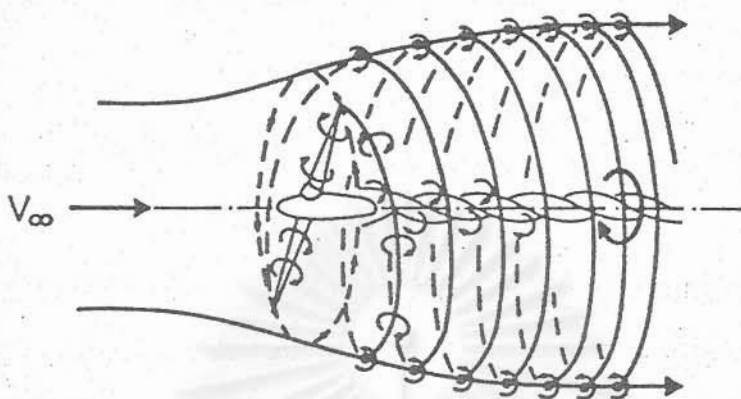
2.10 การสูญเสียที่ปลายใบ (Tip loss factor)

ค่าอัตราโมเมนตัมเชิงเส้นและอัตราโมเมนตัมเชิงมุมในสมการที่ (16) และ (17) ซึ่งคำนวณโดยทฤษฎีโมเมนตัมนั้นเป็นค่าทางอุดมคติ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัว

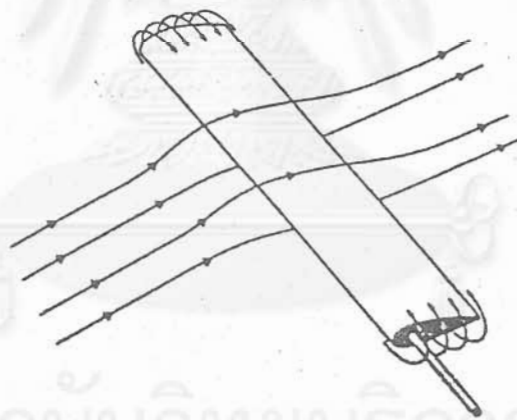
rotor กังหันลมที่ใช้ในทฤษฎีโมเมนตัมนั้นมีลักษณะเป็นแผ่นแอ็คชูเอเตอร์ (actuator disk) ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว rotor ของกังหันลมเวลาหมุนจะไม่ใช่เป็นแผ่นแอ็คชูเอเตอร์ตามที่สมมติ เนื่องจากมีช่องว่างใน rotor จากใบกังหันหนึ่งไปยังอีกใบหนึ่ง ดังนั้น ค่าอัตราโมเมนตัมเชิงเส้นและอัตราโมเมนตัมเชิงมุมที่คำนวณโดยทฤษฎีโมเมนตัมจึงสูงกว่าค่าที่เป็นจริง ในทางปฏิบัติต้องมีการแก้ไขสมการที่ (16) และ (17) เพื่อให้ได้ค่าสอดคล้องใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น การแก้ไขนี้อาจจะพิจารณาโดยใช้ทฤษฎีวอร์เท็กซ์ (vortex theory) วิเคราะห์ลำอากาศที่ไหลผ่านกังหันลม

ทฤษฎีวอร์เท็กซ์ที่ถูกนำมาใช้กับกังหันลมนี้ เป็นทฤษฎีที่ถูกพัฒนามาจากทฤษฎีวอร์เท็กซ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ใบพัดเฮลิคอปเตอร์และใบพัด propeller ของเครื่องบินและเรือ ลำอากาศไหลผ่านกังหันลมซึ่งเป็นลำอากาศหมุนด้านหลัง rotor นั้น จะถูกจำลองเป็นแผ่นวอร์เท็กซ์ (vortex sheet) ที่ขดเป็นเกลียวโดยจะเริ่มคลี่ออกจากใบกังหันแต่ละใบ และจะสามารถจำลองใบกังหันโดยใช้ทฤษฎีเส้นยก (lifting line theory) เป็นเส้นตามแกนใบกังหันที่มีกลุ่มของ bound vortex เกาะอยู่อันเป็นตัวก่อให้เกิดแรงยกขึ้น ในขณะที่ induced velocity ในลำอากาศจะเกิดจาก free vortex ซึ่งเกาะอยู่ตามแผ่นวอร์เท็กซ์ทางด้านหลัง rotor ดังนั้น ค่า induced velocity ทั้งตามแนวแกนและแนวเชิงมุมที่คำนวณได้โดยทฤษฎีโมเมนตัม จะเป็นค่าที่เกิดขึ้นบนแผ่นวอร์เท็กซ์เท่านั้น ในขณะที่ค่า induced velocity ของลำอากาศที่อยู่ระหว่างแผ่นวอร์เท็กซ์จะมีค่าน้อยกว่าที่อยู่บนแผ่นวอร์เท็กซ์

ดังนั้น ค่า induced velocity ของลำอากาศทั้งหมดซึ่งพิจารณาโดยใช้ทฤษฎีโมเมนตัมจึงจำเป็นต้องใช้ค่าเฉลี่ย ซึ่งค่าเฉลี่ยนี้สามารถคำนวณได้หลายวิธี ดังเอกสารอ้างอิง [8] และ [9] ในการวิจัยนี้จะใช้ค่าเฉลี่ยของ induced velocity ซึ่ง L. Prandtl [8] เป็นผู้พัฒนาขึ้น Prandtl หาค่าเฉลี่ยโดยใช้แฟคเตอร์ที่เขาพัฒนาขึ้นคูณกับค่า induced velocity ที่เกิดขึ้นบนแผ่นวอร์เท็กซ์ แฟคเตอร์นี้เรียกว่า แฟคเตอร์การสูญเสียที่ปลายใบ (Tip loss factor) F ซึ่งความหมายทางกายภาพอีกความหมายหนึ่งอาจสามารถมองเป็นการสูญเสียที่เกิดจากการไหลวนของอากาศตามแนวรัศมีของใบกังหัน ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 แบบจำลองการไหลด้านหลัง rotor



รูปที่ 2.9 การไหลของอากาศที่เกิดขึ้นที่ปลายใบกังหัน

Prandtl ได้ใช้ระนาบขนานที่เป็นชุดซึ่งแต่ละระนาบถูกจัดวางห่างกันเป็นระยะ l เท่ากัน มาแทนที่แผ่นวอร์เท็กซ์ที่เกิดจากหมุนของใบกังหัน ระยะ l นี้ เป็นระยะตั้งฉากระหว่างแผ่นวอร์เท็กซ์เกลียวที่อยู่ห่างกันที่ขอบของลำอากาศ (slipstream boundary)

$$l = 2\pi R/B (\sin\phi) \quad (37)$$

เมื่อ B เป็นจำนวนของใบกังหัน , ϕ_c เป็นมุมของผิวบิดเกลียวที่ขอบของลำอากาศ ดังนั้น การไหลรอบขอบของแผ่นวอร์เท็กซ์ จะสามารถประมาณการ เป็นการไหลรอบขอบของระบบของระนาบขนานได้

ค่าแฟคเตอร์การสูญเสียของ Prandtl จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ

$$F = 2/\pi \arccos e^{-f} \tag{38}$$

เมื่อ $f = B/2 (R - r) / (R \sin\phi_c)$

ค่า f ที่กำหนดโดย Prandtl นั้นขึ้นกับค่ามุมบิดของผิวบิดเกลียวที่ขอบใบ ในการคำนวณค่า f สามารถประมาณโดยแทนค่า $R \sin\phi_c$ ด้วย $r \sin\phi_c$ ได้ เนื่องจากการใช้ค่ามุมบิดเฉพาะที่ ϕ_c นั้นจะสะดวกกว่าในขบวนการในการคำนวณ ดังนั้น

ดังนั้น สมการที่ (16) และ (17) เมื่อพิจารณาถึงค่าความสูญเสียที่ปลายใบเข้าไปด้วยแล้ว จะมีค่าเท่ากับ

$$dT = 4\pi r \rho V_\infty^2 (1 - a) a F dr \tag{39}$$

$$dQ = 4\pi r^3 \rho V_\infty \Omega (1 - a) a' F dr \tag{40}$$

และเมื่อสมการที่ (39) และ (40) มาใช้ในทฤษฎีสตริป สมการที่ (31) และ (32) จะมีค่าเป็น

$$\frac{aF}{1 - a} = \frac{\lambda C_L \cos\phi}{4 \sin^2\phi} \tag{41}$$

$$\frac{a'F}{1 + a} = \frac{\lambda C_L}{4 \cos\phi} \tag{42}$$

และเมื่อรวมสมการที่ (41) และ (42) เข้าด้วยกันจะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$a(1 - a) = a' x^2 (1 + a') \tag{43}$$

$x =$ อัตราความเร็วเฉพาะที่บนใบกังหัน $= r\Omega/V_\infty$

ในณะเดียวกันค่ากำลังของกังหันลมจะสามารถหาได้โดยนำค่า torque ที่ได้จากสมการที่ (40) คูณกับความเร็วมุมของ rotor Ω

$$\begin{aligned} dP &= \Omega dQ \\ &= 4\pi r^3 \rho V_\infty \Omega^2 (1-a) a' F dr \end{aligned} \quad (44)$$

จัดรูปสมการที่ (44) ให้อยู่ในรูปของเทอมไร้มิติ โดยนิยามว่า $C_p = P/1/2 \rho V_\infty^3 A$ จะได้

$$dC_p = 8a(1-a)F x^3/X^2 dx \quad (45)$$

เมื่อ $x = r\Omega/V_\infty$, $X = R\Omega/V_\infty$

2.11 รูปร่างของใบกังหันลมที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในเชิงอากาศพลศาสตร์

หลักในการหารูปร่างของใบกังหันที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดนั้น คือ การพิจารณาส่วนเล็กๆ (element section) ของใบกังหันลมที่มีรูปร่างซึ่งสามารถให้ค่ากำลัง (Power) สูงสุดใน ส่วนนั้นๆ ที่มีความเร็วที่กำหนด (ออกแบบ) ไว้ การพิจารณาจะกระทำที่ตำแหน่งต่างๆ ของใบกังหันเรื่อยไปจนครบตลอดความยาวของใบกังหัน ก็จะได้รูปร่างของใบกังหันที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในทางทฤษฎีตามต้องการ

การหารูปร่างของใบกังหันลมแนวอนนี้สามารถกระทำโดย พิจารณาจากสมการหลักสองสมการ คือ สมการที่ (45) และ (43) ซึ่งสมการที่ (45) เป็นสมการของกำลังจากกังหันลมที่คำนวณโดยละเอียดแรงหน่วงบนใบกังหัน

$$\frac{dC_p}{dx^p} = \frac{8a'(1-a) F x^3}{X^2} \quad (45)$$

$$a(1-a) = a' x^2(1-a) \quad (43)$$

จากอัตราส่วนของความเร็วปลายใบที่กำหนด(ออกแบบไว้) ขบวนการจะเริ่มต้นที่สมการที่ (45) ที่ตำแหน่ง r ใดๆบนใบกังหัน ค่า dC_p/dx จะถูกคำนวณโดยเปลี่ยนค่า a , a' และ F จนกระทั่งได้ค่า dC_p/dx สูงสุดที่ตำแหน่ง r นั้นๆ โดยที่ค่า a , a' และ F จะต้องสอดคล้องกับสมการที่ (38) และ (43) ด้วย เมื่อได้ค่า a , a' และ F ที่ให้ค่า dC_p/dx สูงสุดตามต้องการแล้ว ก็ให้นำค่าเหล่านี้ไปแทนค่าในสมการที่ (41), (42) และ (46) เพื่อจะหาค่า cC_L และ ϕ ที่ตำแหน่ง r นั้นๆ

$$\frac{aF}{1-a} = \frac{\lambda C_L \cos \phi}{4 \sin^2 \phi} \quad (41)$$

$$\frac{a'F}{1+a'} = \frac{\lambda C_L}{4 \cos \phi} \quad (42)$$

$$\tan \phi = \frac{V_\infty (1-a)}{r\Omega(1+a')} \quad (46)$$

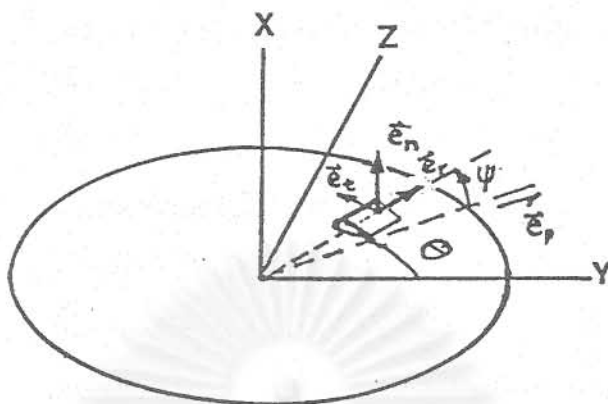
จากนั้นขบวนการการคำนวณก็จะตั้งต้นใหม่อีกครั้งที่ตำแหน่งถัดไปบนใบกังหัน ขบวนการเหล่านี้จะถูกกระทำซ้ำจนกระทั่งครบตลอดความยาวใบกังหัน โดยมีเงื่อนไขว่าความกว้างของใบกังหันและมุมบิดของใบกังหัน จะต้องมามีค่าต่อเนื่องกันตลอดความยาวของใบกังหัน

ค่า cC_L และ ϕ นั้น จะเป็นการบอกรูปร่างของส่วนใบกังหัน ในลักษณะที่เมื่อได้มีการกำหนดภาคตัดขวางของใบกังหันที่ส่วนนั้นว่า จะเป็นรูปแพนอากาศลักษณะใด (อาทิเช่น NACA 4415 เป็นต้น) ก็จะสามารถนำข้อมูลเรื่อง lift และ drag ของรูปแพนอากาศนั้นมาใช้เพื่อเลือก C_L ที่สูง และ α ที่เกี่ยวข้อง เมื่อกลับไปแทนค่าใน cC_L และ ϕ ก็จะได้ค่า c ซึ่งก็คือความกว้างของใบกังหัน chord และ β ซึ่งก็คือ มุมบิดของใบ ($\phi = \beta + \alpha$) นั่นก็คือ รูปร่างของใบกังหันในแต่ละส่วนนั่นเอง

2.12 ความเค้นของใบกังหันลมแนวนอน (Stress of a horizontal axis turbine blade)

2.12.1 คิเนแมติกส์ของกังหันลม

การวิเคราะห์ความเค้นบนใบกังหันลมแนวนอน เพื่อทำการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบโครงสร้างของกังหันลมแนวอนั้น เริ่มจากการพิจารณาสวนของใบกังหันลมที่หมุนอยู่ภายใต้ลมที่มีความเร็ว V_∞ ให้จุดตัดของแกนพิกัด XYZ ตั้งแน่นอยู่ที่จุดศูนย์กลางของ rotor แกน X เป็นแกนพิกัดที่มีทิศทางขนานกับแกนหมุนของกังหันลม ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.10 และให้เวกเตอร์หน่วย e_n, e_r, e_t เป็นเวกเตอร์ที่ตั้งแน่นอยู่บนส่วนของใบกังหัน โดยมีทิศทางอยู่ในแนวตั้งฉาก สัมผัส และขนานกับแนวแกนของใบกังหัน เวกเตอร์หน่วย e_p เป็นองค์ประกอบของเวกเตอร์ e_r ในแนวระนาบ rotor θ เป็นมุมกวาดของใบกังหัน วัดจากแกนพิกัด Y และมุม ψ เป็นมุมเอียงของใบกังหัน (coning angle)



รูปที่ 2.10 คิเนมติกส์และแกนพิกัดของอากาศที่ไหลผ่านกังหันลม

ความสัมพันธ์ของเวกเตอร์หน่วยบนส่วนของใบกังหันกับแกนพิกัด XYZ สามารถแสดงได้เป็น

$$e_n = i \cos \psi - j \cos \theta \sin \psi - k \sin \theta \sin \psi \quad (47)$$

$$e_t = k \cos \theta - j \sin \theta \quad (48)$$

$$e_r = i \sin \psi + j \sin \theta \cos \psi + k \sin \theta \cos \psi \quad (49)$$

$$e_p = j \cos \theta + k \sin \theta \quad (50)$$

2.12.2 ภาวะบนใบกังหัน

ในขณะที่กังหันลมทำงาน(หมุน)อยู่ ภาวะที่เกิดขึ้นบนตัวใบกังหันจะมาจากแรงอากาศพลศาสตร์ แรงหนีศูนย์กลางและแรงโน้มถ่วงของโลก แรงทั้งหมดที่กระทำต่อส่วนของใบกังหันที่อยู่ตำแหน่ง θ สามารถเขียนได้เป็น

$$dF = dF_n e_n + dF_t e_t + dF_c e_p - dN k \quad (51)$$

$$dF_n = 1/2 \rho W^2 C_{n, cdr} \quad (22)$$

$$dF_t = 1/2 \rho W^2 C_{t, cdr} \quad (23)$$

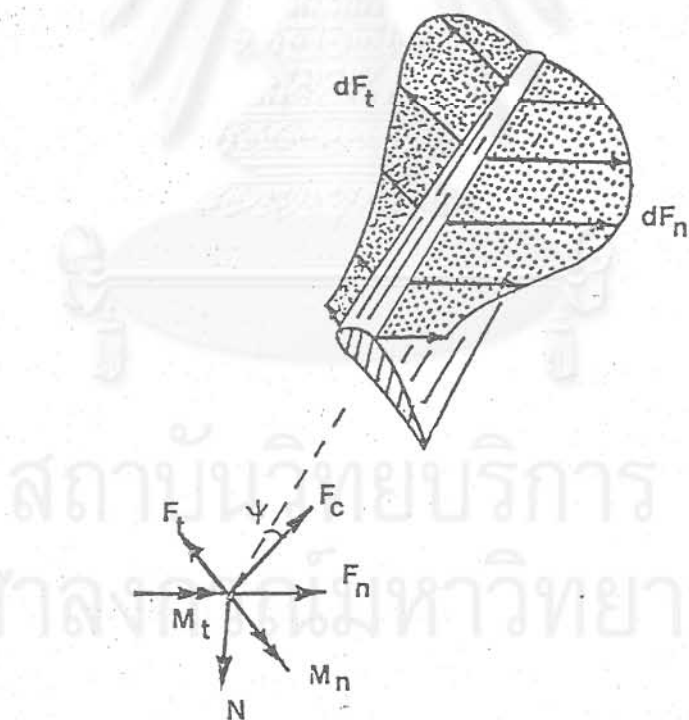
$$dF_c = r \Omega^2 dm \quad (52)$$

$$dm = \rho_B A dr \quad (53)$$

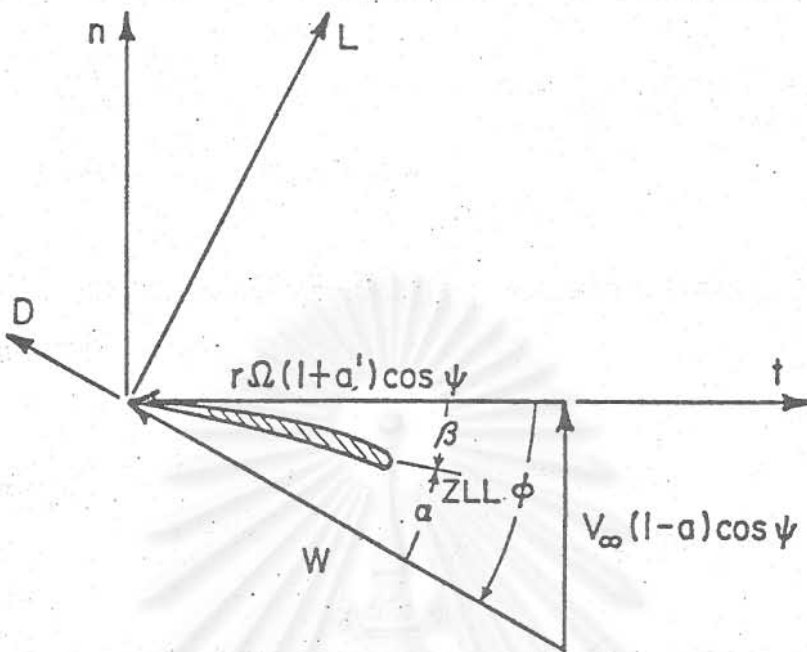
$$C_n = C_L \cos \phi + C_D \sin \phi \quad (24)$$

$$C_t = C_L \sin \phi - C_D \cos \phi \quad (25)$$

เมื่อ	dF_n	คือ	แรงจากอากาศพลศาสตร์ในแนวตั้งฉากกับใบกังหัน
	dF_t	คือ	แรงจากอากาศพลศาสตร์ในแนวขนานกับใบกังหัน
	dF_c	คือ	แรงหนีศูนย์กลางกลางของส่วนใบกังหัน
	dN	คือ	น้ำหนักของส่วนของใบกังหัน
	dm	คือ	มวลของส่วนของใบกังหันลมที่ถูกพิจารณา
	ρ_B	คือ	ความหนาแน่นของใบกังหัน
	A	คือ	พื้นที่ภาคตัดขวางของใบกังหันที่ตำแหน่ง r
	W	คือ	ความเร็วรวมของอากาศที่เห็นจากผู้สังเกตการณ์ซึ่งยืนอยู่บนใบกังหัน
	g	คือ	ความโน้มถ่วงของโลก
	r	คือ	ระยะจากจุดศูนย์กลางของ rotor ถึงส่วนของใบกังหันตามแนว e_r
	ϕ	คือ	มุมของความเร็วรวมที่กระทำต่อระนาบของ rotor



รูปที่ 2.11 แรงที่เกิดขึ้นบนส่วนของใบกังหันลม



รูปที่ 2.12 ผังความเร็วของไหลที่ผู้สังเกตการณ์บนใบกังหันเห็น

2.12.3 ความเค้นจากแรงหนีศูนย์กลาง

ความเค้นที่เกิดขึ้นจากภาระบนใบกังหันสามารถแบ่งได้เป็นสองส่วน ส่วนแรกคือ ความเค้นที่เกิดจากแรงหนีศูนย์กลางและน้ำหนักของใบกังหันกับส่วนที่สองก็คือความเค้นที่เกิดจากโมเมนต์ดัด เนื่องจากภาระบนใบกังหัน

องค์ประกอบของแรงในแนวแกนของใบกังหัน จะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} dF_R &= dF_c \cdot e_r \\ &= dF_c \cos\psi - dN \sin\theta \cos\psi \end{aligned}$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าแรง dF_c และ dN จะได้

$$F_R(r) = \int_r^R \rho_B (\Omega^2 r - g \sin\theta) A \cos\psi \, dr \quad (52)$$

จะเห็นได้ว่า แรงดึงสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ $\theta = 270^\circ$ (ใบกังหันอยู่ในตำแหน่งต่ำที่สุด) ความเค้นของใบกังหันที่ตำแหน่ง r จะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \sigma(r) &= F_R/A \\ \sigma &= \text{ความเค้น} \end{aligned} \quad (53)$$

2.12.4 ความเค้นจากโมเมนต์ดัด

โมเมนต์ดัด (Bending moment) ที่เกิดขึ้นจากภาระบนใบกังหันที่ตำแหน่ง r มีค่าเท่ากับ

$$M(r) = M_n e_n + M_t e_t \quad (54)$$

และโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง r_A ของใบกังหัน โดยพิจารณาจากปลายกังหันมาในทิศทางที่ตั้งฉากกับแกนใบกังหันจะมีค่า

$$\begin{aligned} M_n(r_A) &= -\int_R^{r_A} \{ (r - r_A) dF_t - (r - r_A) dN \cos\theta \} \\ &= -\int_R^{r_A} \{ (r - r_A) (1/2 \rho W^2 C_{t,c}) - (r - r_A) g \rho_B A \cos\theta \} dr \quad (55) \end{aligned}$$

และโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง r_A ของใบกังหัน โดยพิจารณาจากปลายใบกังหันในทิศทางที่ขนานกับแกนใบกังหันจะมีค่า

$$\begin{aligned} M_t(r_A) &= -\int_R^{r_A} \{ (r - r_A) dF_c \sin\psi - (r - r_A) dF_n - (r - r_A) dN \sin\psi \sin\theta \} \\ M_t(r_A) &= -\int_R^{r_A} \{ (r - r_A) \rho_B A \Omega^2 \sin\psi - (r - r_A) 1/2 \rho W^2 C_{n,c} - (r - r_A) \rho_B A g \sin\psi \sin\theta \} dr \quad (56) \end{aligned}$$

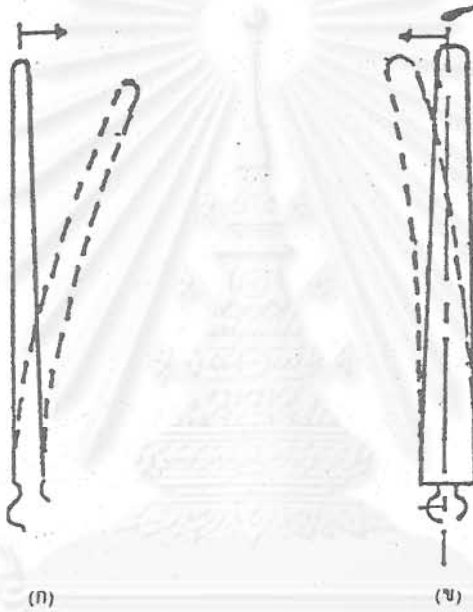
จะเห็นได้ว่า โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจากแรงโน้มถ่วงนี้ จะแปรตามตำแหน่งการหมุนของใบกังหัน ในขณะที่โมเมนต์ดัดจากแรงหนีศูนย์กลางซึ่งเกิดขึ้นจากการที่ใบกังหันมีมุมเอียง ψ นั้น จะต้านกับโมเมนต์ดัดที่เกิดจากแรงอากาศพลศาสตร์

จากลักษณะรูปร่างของพื้นที่หน้าตัดของใบกังหัน ซึ่งเป็นรูปของแพนอากาศ ใบกังหันภายใต้ภาระจะสามารถงอในระนาบที่ตั้งฉากกับเวกเตอร์ e_t (ลู่ตามลม) ได้ง่ายกว่าที่จะงอในระนาบที่ตั้งฉากกับเวกเตอร์ e_n (ระนาบของ rotor) ดังนั้นการหักของใบกังหันจึงมักเกิดขึ้นในทิศที่ลู่ตามลม อีกทั้งโมเมนต์ที่พยายามจะงอใบกังหันในทิศทางตามการหมุนของใบกังหัน (M_n) นั้น จะถูกถ่ายทอดสู่ระนาบผลัดกำลังในรูปของโมเมนต์บิด (torque) ดังนั้น เมื่อพิจารณาในแง่การออกแบบโครงสร้าง จึงสามารถพิจารณาเฉพาะโมเมนต์ดัดที่พยายามจะงอ

ไบกัณฑ์ในทิศทางของลมเป็นปัจจัยหลัก ในกรณีของไบกัณฑ์ภายใต้สภาวะ pure bending (ละเลยแรงเฉือน shearing force) ค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดจะเขียนได้เป็น

$$\sigma(r) = M_t d / I \quad (57)$$

- I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดของส่วนของไบกัณฑ์รอบแกน t
d คือ ระยะจากผิวถึงจุดเซนทรอยด์ที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งวัดตามแนวตั้งฉากกับเส้น neutral axis
 M_t คือ โมเมนต์ดัดจากสมการที่ (56)



รูปที่ 2.13 ทิศทางการงอของไบกัณฑ์

(ก) ลู่ตามลม (ข) งอในระนาบของ rotor

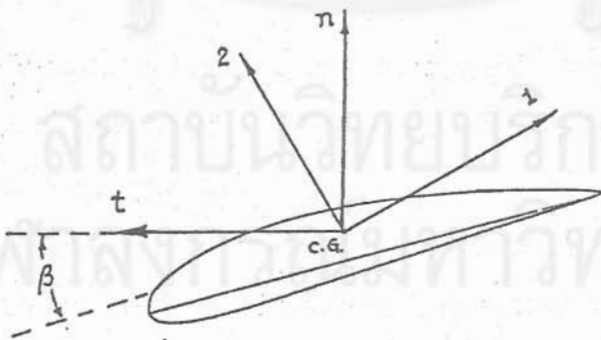
ค่าความเค้นซึ่งเกิดจากโมเมนต์ดัดที่พื้นที่หน้าตัดนั้นจะประกอบด้วย ความเค้นดึง (tensile stress) และความเค้นอัด (compressive stress)

สำหรับกรณีของการหาความเค้นจากโมเมนต์ดัดของไบกัณฑ์ที่มีมุมบิด ซึ่งแปรตามความยาวของไบกัณฑ์นั้น จะต้องแตกโมเมนต์ดัด M_t เข้าสู่แนวแกนหลัก (principal axes) 1 และ 2 ของพื้นที่หน้าตัดของไบกัณฑ์ แล้วจึงใช้สูตรความเค้นจากโมเมนต์ดัด [19 -21] คำนวณหา จะมีค่าเท่ากับ

$$\sigma(r) = \frac{M_1 d_1}{I_1} + \frac{M_2 d_2}{I_2} \quad (58)$$

เมื่อ M_1	คือ	องค์ประกอบของโมเมนต์ดัด M_t ในสมการ(56) รอบแกนหลัก 1
M_2	คือ	องค์ประกอบของโมเมนต์ดัด M_t ในสมการ(56) รอบแกนหลัก 2
I_1	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยหลักของพื้นที่หน้าตัดรอบแกนหลัก 1
I_2	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยหลักของพื้นที่หน้าตัดรอบแกนหลัก 2
d_1	คือ	ระยะจากผิวถึงจุดเซนทรอยด์ของพื้นที่หน้าตัดวัดในแนวตั้งฉากกับแกนหลัก 1
d_2	คือ	ระยะจากผิวถึงจุดเซนทรอยด์ของพื้นที่หน้าตัดวัดในแนวตั้งฉากกับแกนหลัก 2

สมการที่ (57) และ (58) เป็นสมการที่ใช้คำนวณหาความเค้นเมื่อไบกัณฑ์มีพื้นที่หน้าตัดตัน เนื่องจากในกรณีนี้ไบกัณฑ์มีพื้นที่ภาคตัดขวางต้นแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อความเค้นจากโมเมนต์ดัดน้อยจนสามารถละทิ้งได้ หากเป็นไบกัณฑ์ที่พื้นที่หน้าตัดเป็นช่องกลวงมีผนังบาง การคำนวณหาความเค้นจะต้องนำเอาผลของแรงเฉือนมาพิจารณาด้วย



รูปที่ 2.14 แกนพิกัดของพื้นที่หน้าตัดของไบกัณฑ์ลม

2.12.5 ความเค้นรวม

ความเค้นรวมที่ตำแหน่ง r จะเป็นผลบวกของความเค้นจากแรงหนีศูนย์กลาง (สมการที่ (53)) และความเค้นจากโมเมนต์ดัด (สมการที่ (57) , (58)) ซึ่งจะแปรตามตำแหน่งการหมุนของใบกังหันและตำแหน่งของจุดที่พิจารณาในพื้นที่หน้าตัด ในการพิจารณาแต่ละตำแหน่ง r ก็จะสามารถหาค่าความเค้นสูงสุดของใบกังหันตั้งแต่ปลายใบถึงโคนใบได้

$$\sigma(r)_{\max} = \frac{Er + M_d}{A I}$$

หรือ

$$\sigma(r)_{\max} = \frac{Er}{A} + \frac{M_1 d_1}{I_1} + \frac{M_2 d_2}{I_2}$$

จากข้อมูลความเค้นนี้ก็จะสามารถนำเอาไปเลือกวัสดุที่จะนำมาทำใบกังหันหรืออาจเป็นข้อมูลในการดัดแปลงรูปร่างของใบกังหันบางส่วน หรือดัดแปลงสภาวะการทำงาน (operating condition) ของกังหันลม เพื่อให้ใบกังหันลมมีโครงสร้างแข็งแรงพอ

2.13 สภาวะพายุ

นอกเหนือจากความเค้นของใบกังหันในขณะที่ทำงานภายใต้เงื่อนไขที่ออกแบบไว้ ใบกังหันจะต้องสามารถทนภาระที่เกิดขึ้นในสภาพลมแรง ลมกรรโชก (gust) หรือพายุได้ การคำนวณความเค้นของกังหันลมภายใต้สภาวะของพายุก็ยังคงใช้สมการที่ (59) เหมือนกับที่บรรยายไว้ข้างต้น เพียงแต่เพิ่มความเร็วลมและความเร็วรอบสูงขึ้น ซึ่งก็ส่งผลให้แรงจากอากาศพลศาสตร์และแรงหนีศูนย์กลางสูงตามไปด้วย

ส่วนกังหันลมที่มีระบบควบคุมที่เมื่อไว้สำหรับเวลาเกิดพายุ ซึ่งอาจเป็นการบิดมุมใบกังหันให้ลู่ตามลม (feather) หรือพับหางของกังหันลม เพื่อหมุนให้ระนาบของกังหันอยู่ในแนวของลม หรือแบบที่ใส่เบรคให้กังหันลมหยุดหมุน เพื่อไม่ให้ระบบผลิตกำลังเสียหาย เนื่องจากความเร็วรอบสูงกว่าที่ออกแบบไว้ จะพบว่าในระบบทั้ง 3 แบบนี้ ระบบที่รับภาระที่หนักที่สุดได้แก่ ระบบที่ใส่เบรคไว้เฉยๆ เพราะใบกังหันจะต้องรับภาระจากลมโดยตรง ค่าความเค้นจะเกิดขึ้นจากโมเมนต์ดัดจากแรงหน่วงเพียงอย่างเดียว

$$M(r) = \int_R^r \frac{1}{2} \rho v_\infty^2 C_d c(R-r) dr \quad (59)$$

$$\sigma = \frac{M_d}{I} \quad (60)$$

C_d คือ แรงหน่วงของใบกังหันซึ่งหันหน้า (ด้าน chord) ปะทะลม

สำหรับกังหันลมซึ่งมีระบบควบคุมเวลาเกิดพายุแบบบิดใบให้อยู่ในทิศทางตามลม หรือพับหางให้ rotor หนีตามลมนั้น ภาวะหลักบนใบกังหันจะเป็นแรงหน่วง ซึ่งจะพยายามอง ใบกังหันในทิศทางซึ่งอยากกว่า ความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยกว่าขณะหมุนปกติภายใต้ สภาวะความเร็วลมเท่ากัน ดังนั้น สำหรับกังหันแบบนี้ความเค้นสูงสุดที่ใช้จะคำนวณจาก สภาพการทำงานปกติภายใต้ลมแรงก่อนที่ระบบควบคุมเวลาเกิดพายุจะทำงาน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

โปรแกรมคอมพิวเตอร์และการออกแบบใบกังหันลม

3.1 บทนำ

จากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมที่ได้บรรยายไว้ในบทที่ 2 การที่จะหาผลเฉลยของแรงและโมเมนต์ และกำลังของกังหันลมแนวนอน เราจำเป็นต้องรู้รูปร่างของใบกังหัน จำนวนใบ และเงื่อนไขของการทำงาน เช่น ความเร็วลม และความแข็งแรงของใบกังหันและภาระบนตัวใบกังหันลม และภาระที่กังหันลมจะขับเคลื่อน แล้วนำข้อมูลเหล่านี้ไปหาผลเฉลยจากสมการที่เกี่ยวข้องที่ได้บรรยายไว้ในบทที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้สมการที่กล่าวถึงนั้นมักเป็นสมการที่มีตัวแปร explicit อยู่ในสมการ ดังนั้น จะไม่สามารถหาผลเฉลยโดยวิธีวิเคราะห์แบบ analytic จึงจำเป็นต้องใช้การอินทิเกรตด้วยวิธี Numerical โปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงถูกเขียนขึ้นเพื่อทำการหาผลเฉลยของสมการดังกล่าวในบทที่ 2 และทำการอินทิเกรตด้วยวิธี Numerical ในขณะเดียวกันโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก็จะถูกพัฒนาเพื่อให้หาผลเฉลยของรูปร่างใบกังหันที่ให้ประสิทธิภาพเชิงอากาศพลศาสตร์สูงสุดด้วย รูปร่างของใบกังหันที่มีประสิทธิภาพเชิงอากาศพลศาสตร์สูงสุดทางทฤษฎี จะถูกนำมาดัดแปลงเพื่อให้ตัวใบกังหันมีโครงสร้างที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

3.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ถูกเขียนขึ้นจะมี 3 โปรแกรม โปรแกรมทั้งสามโปรแกรมเขียนด้วยภาษา Fortran 77 โดยโปรแกรมแรกเขียนเพื่อทำนายรูปร่างใบกังหันลมที่ให้ประสิทธิภาพเชิงอากาศพลศาสตร์สูงสุด โปรแกรมที่สองเพื่อทำนายสมรรถนะและความเค้น โปรแกรมที่สามเพื่อทำนายพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองความสูญเสียที่ปลายใบ แต่เนื่องจากโปรแกรมที่สามเป็นโปรแกรมเล็กรายละเอียดจึงไม่ถูกนำมากล่าวในบทนี้ แต่จะแสดงไว้ในภาคผนวก ข.

3.2.1. โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหารูปร่างของใบกังหันลมที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดเชิงอากาศพลศาสตร์

โปรแกรมคอมพิวเตอร์โปรแกรมแรกจะเขียนเพื่อหาผลเฉลยของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดรูปร่างของไบกัณฑ์ในแต่ละตำแหน่งที่พิจารณาบนไบกัณฑ์ จนได้ค่าที่ต้องการตลอดความยาวของไบกัณฑ์

สมการที่ใช้หาค่ามี

$$dC_p/dx = 8a'(1-a)F x^3/X^2 \quad (45)$$

$$a(1-a) = a'x^2(1+a') \quad (43)$$

$$F = 2/\pi \arccos e^{-f} \quad (38)$$

$$f = B/2 (R-r)/(r \sin\phi)$$

$$\frac{aF}{1-a} = \frac{\lambda C_L \cos\phi}{4\sin^2\phi} \quad (41)$$

$$\frac{a'F}{1+a'} = \frac{\lambda C_L}{4\cos\phi} \quad (42)$$

$$\tan\phi = \frac{V_\infty(1-a)}{r\Omega(1+a')} \quad (46)$$

จากอัตราส่วนของความเร็วปลายใบที่กำหนด(ออกแบบไว้) ขบวนการหารหารูปร่างของไบกัณฑ์จะเริ่มต้นที่สมการ(45) โดยการเปลี่ยนค่า a , a' และ F จนได้ค่า dC_p/dx สูงสุดที่ตำแหน่ง r นั้นๆ โดยที่ค่า a , a' และ F จะต้องสอดคล้องกับสมการที่(43) และ (38) ด้วย เมื่อได้ค่า dC_p/dx สูงสุดตามต้องการแล้ว จึงนำค่าที่เกี่ยวข้องไปแทนค่าในสมการที่(41), (42) และ (46) เพื่อหาค่า cC_L และ ϕ ที่ตำแหน่ง r นั้นๆ

ผลเฉลยที่นำไปกำหนดรูปร่างของไบกัณฑ์คือ cC_L/R และ ϕ ที่ตำแหน่ง r โดยบนไบกัณฑ์

3.2.2. โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาสมรรถนะและค่าความเค้นของกัณฑ์ลมแนวนอน

โปรแกรมคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่สองถูกพัฒนาเพื่อช่วยในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของกำลัง สัมประสิทธิ์ของแรงทอร์ค รวมทั้งโมเมนต์ดัดและค่าความเค้นที่เกิดขึ้น

โปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ถูกพัฒนาจากโปรแกรมที่เขียนโดย WILSON และคณะ ซึ่งเขียนในภาษา FORTRAN 4 และใช้กับ computer mainframe โดยได้ทำการพัฒนาให้ใช้ได้กับ FORTRAN 77 และใช้กับ personal computer และได้ทำการพัฒนาเพิ่มเติมให้สามารถทำการคำนวณค่าสมรรถนะในช่วงที่สมการโมเมนต์ตามแนวแกนให้ค่าขัดแย้งกับค่าที่ได้จากการทดลอง โดยการพัฒนาสมการที่คำนวณหาค่า a ในช่วงดังกล่าวโดยใช้ค่า fit curve จาก Glauert และเขียนโปรแกรมเพิ่มเติมในส่วนที่ทำการคำนวณหาค่าโมเมนต์ตัด และความเค้นที่เกิดขึ้นที่ใบกังหันลมตามที่ได้บรรยายไว้ในท้ายบทที่ 2

การแก้สมการที่เขียนไว้ในบทที่ 2 จะเห็นได้ว่ามีค่า implicit อยู่เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะการหาค่า a (axial induction factor) และ a' (angular induction factor) จำเป็นต้องมีการ iterate จนกว่าได้ค่าที่ต้องการ ซึ่งขบวนการในการ iterate ในแต่ละค่าใช้เวลาคอมพิวเตอร์ในการคำนวณค่อนข้างมาก และขบวนการการคำนวณค่อนข้างยืดเยื้อ ดังนั้นจึงมีการพยายามลดขบวนการการ iterate และการคำนวณเหล่านั้นลง ด้วยการใช้การประมาณการและสมมติฐานบางอย่าง เพื่อให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมเรียบง่ายขึ้น โดยยังคงความแม่นยำของผลเฉลยอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ การลดการขบวนการ iterate ถูกกระทำโดยการสมมติให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกแปรผันกับมุมปะทะเป็นสมการเส้นตรงเป็นช่วงๆ และละเลยค่า angular induction factor a' ซึ่งจะทำให้ค่า a ในสมการสามารถจัดรูปให้เป็นเทอม explicit ซึ่งทำให้สามารถหาค่า a ออกโดยตรง โดยไม่ต้องทำการ iterate และได้มีการดัดแปลงสมการในการหาค่าความสูญเสียที่ปลายใบให้อยู่ในรูป explicit ด้วย

จากข้อมูลของลักษณะรูปทรงเรขาคณิตของใบกังหันลม และเงื่อนไขสภาพการทำงานในขบวนการคำนวณ สมการหลักอันแรกที่ต้องหาค่าผลเฉลยก็คือ สมการสัมประสิทธิ์ของแรงที่ได้จากทฤษฎีโมเมนต์ตามแนวแกน

$$C_{TL} = 4a(1-a)F \quad (61)$$

และจากแรงบนใบที่คำนวณจากทฤษฎี Blade element theory

$$C_{TL} = Bc / 2\pi r \times (W/V_\infty) C_L \quad (62)$$

สมการของแรงบนใบนี้ได้จากการพิจารณาบนพื้นที่วงแหวนที่ใบกังหันลมกวาดใน 1 รอบ $2\pi r dr$ และได้ใช้ความสัมพันธ์ $r\Omega = W \cos \phi$ แทนลงไปด้วย

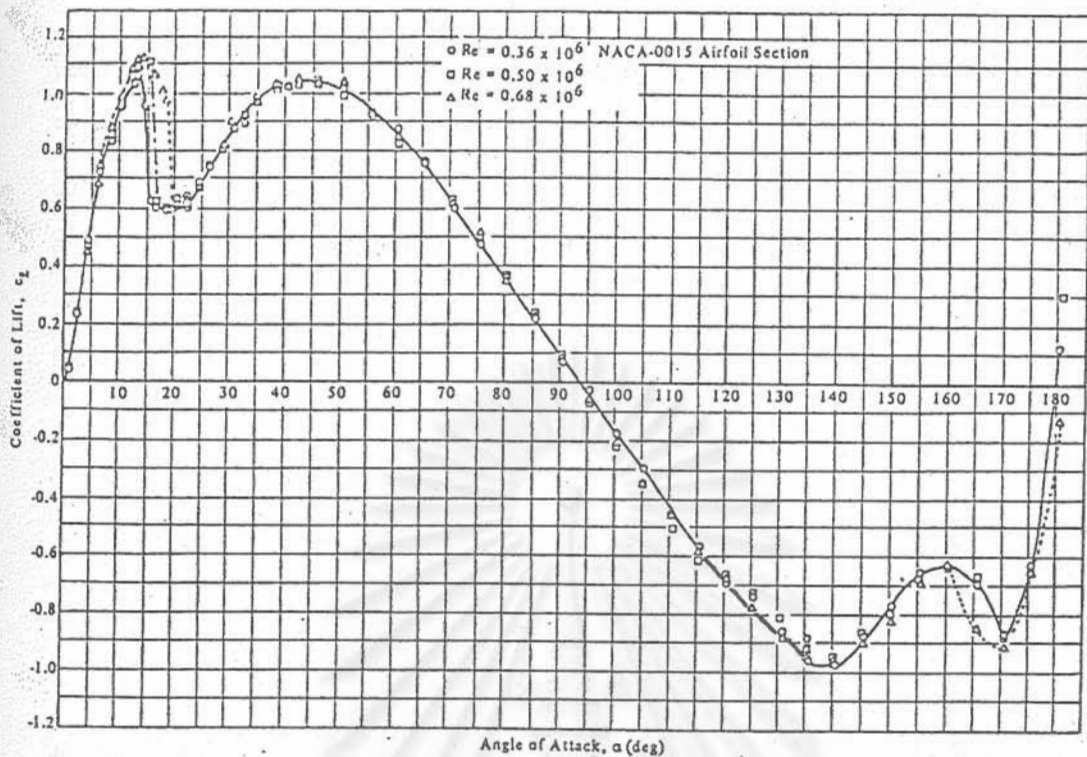
จะเห็นได้ว่า ค่า a นั้นขึ้นกับความสัมพันธ์ของ C_L กับมุมปะทะ α ที่ตัวใบ กังหันเห็น ซึ่งค่า C_L นั้นได้จากข้อมูลทางอากาศพลศาสตร์ของรูปแพนอากาศที่ใช้เป็นใบ กังหันลม ซึ่งค่า C_L นั้นมีค่าแปรเปลี่ยนตามพารามิเตอร์หลายตัว แต่พารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่เป็น ตัวแปรที่มีผลต่อแรงยกมากคือ Reynolds number

ในการวิจัยนี้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงยกจะถูกจำลองให้เป็นรูปแบบที่เรียบง่ายใน ลักษณะดังนี้คือ

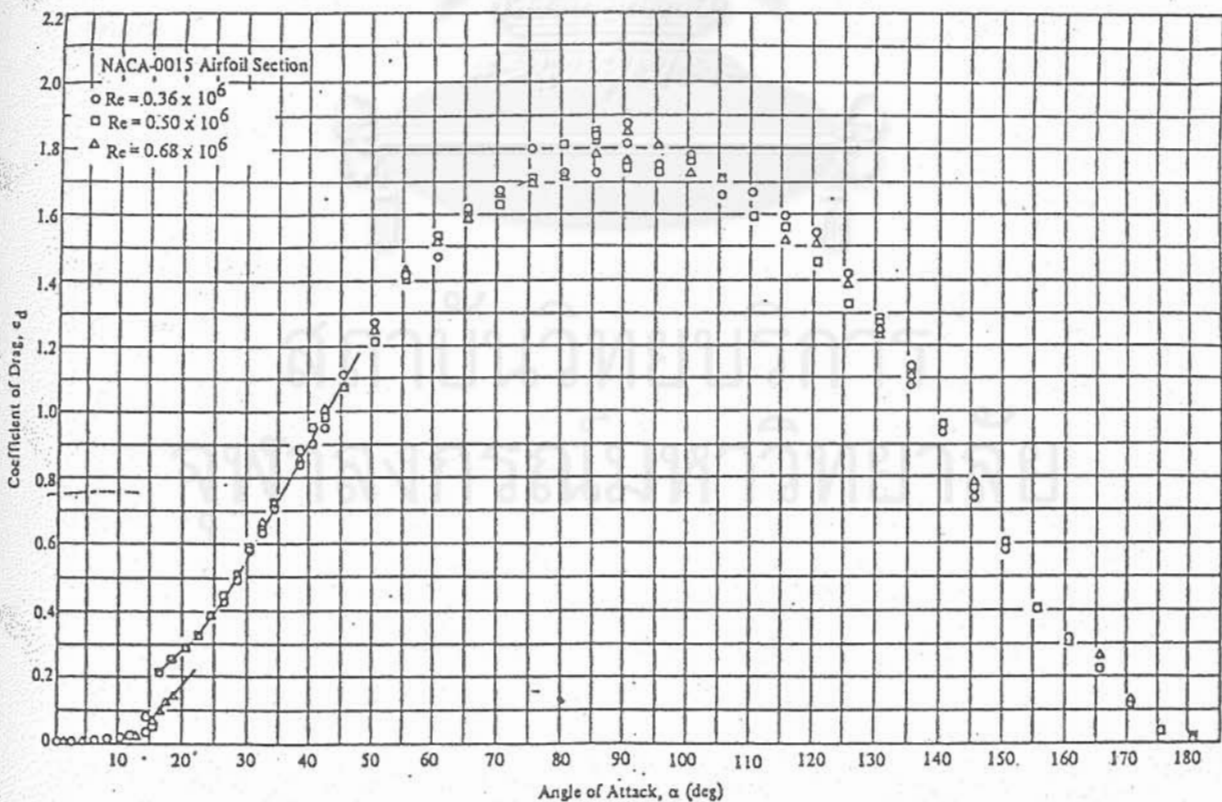
$$\begin{aligned}
 C_L &= 2\pi m \sin(\alpha + \alpha_0) & \alpha < \alpha_{\max} \\
 C_L &= C_{L_{\max}} & \alpha_{\max} < \alpha < \alpha_2 \\
 C_L &= C_{L_{fl}} & \alpha_2 < \alpha < \alpha_{st} \\
 C_L &= C_{L_{fl}} \frac{\sin(\pi/2 - \alpha)}{\sin(\pi/2 - \alpha_{st})} & \alpha > \alpha_{st}
 \end{aligned}$$

โดยที่	m	คือ	ความลาดชันของเส้นโค้งแรงยกที่หารด้วย 2π
	α_0	คือ	มุมที่เส้น zero lift line ทำกับเส้น chord
	$C_{L_{\max}}$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุด
	$C_{L_{fl}}$	คือ	สัมประสิทธิ์แรงยกที่เป็นส่วนราบเรียบ
	α_{st}	คือ	มุมปะทะที่ C_L เริ่มลดลงเนื่องจาก separation (stall)
	α_{\max}	คือ	มุมปะทะที่ C_L เริ่มมีค่าเท่ากับ $C_{L_{\max}}$
	α_2	คือ	มุมปะทะที่ C_L เริ่มมีค่าราบเรียบ

แบบจำลองของสัมประสิทธิ์แรงยกเป็นแบบที่พยายามปรับให้เส้นโค้งของ สัมประสิทธิ์แรงยกแยกเป็นส่วนที่เป็นเส้นตรงเป็นช่วงๆ โดยเลียนแบบจากรูปลักษณะของเส้น สัมประสิทธิ์แรงยกของแพนอากาศทั่วไปที่แปรตามมุมปะทะจาก 0 ถึง 180° ตามเอกสารอ้างอิง[18] ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งก็จะสามารถให้ผลเฉลยที่ค่อนข้างแม่นยำและทำให้การ คำนวณทำได้เป็น analytic มากขึ้น ยกเว้นช่วงของ stall ซึ่งมักไม่มีข้อมูลในช่วง Reynolds number ที่กังหันลมทำงาน รูปที่ 3.2 แสดงถึงสัมประสิทธิ์แรงยกของแพนอากาศทั่วไปที่แปร ตามมุมปะทะจาก 0 ถึง 180°



รูปที่ 3.1 สัมประสิทธิ์แรงยกที่แปรตามมุมปะทะ $0 - 180^\circ$



รูปที่ 3.2 สัมประสิทธิ์แรงหน่วงที่แปรตามมุมปะทะ $0 - 180^\circ$

การใช้แบบจำลองของสัมประสิทธิ์แรงยกเป็นช่วงๆ จะช่วยให้สามารถหาผลเฉลยของค่า axial induction factor, a โดยไม่ต้องทำการ iterate ทุกครั้ง (โปรแกรมคอมพิวเตอร์ PROP ซึ่งถูกพัฒนาโดย WILSON ได้ทำการคำนวณหาค่า a โดยการนำเอาข้อมูลสัมประสิทธิ์แรงยกที่ได้จริงใส่เข้าไปและทำการ iterate จนได้ค่า a ตามต้องการ แต่ต้องใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างมากและผลเฉลยของโปรแกรมที่ใช้แบบจำลองที่เรียบง่ายของสัมประสิทธิ์แรงยก และแรงหน่วงกับผลเฉลยโปรแกรม PROP มีค่าใกล้เคียงกันให้ผลค่อนข้างแม่นยำ [15])

$$\begin{aligned} \text{สำหรับค่าความสูญเสียที่ปลายใบ (tip loss factor) ที่เขียนได้เป็น} \\ F &= \frac{2 \arccos e^{-f}}{\pi} \quad (38) \\ f &= B/2 (R - r) / (r \sin \phi) \end{aligned}$$

เมื่อนำมาใช้กับการหาค่า a , axial induction factor นั้นจะต้องทำการ iterate เนื่องจากมุม ϕ นั้นเป็นผลรวมของมุมบิดของใบ β และมุมปะทะ α ซึ่งค่า α นั้นก็ขึ้นกับค่า a เทอม F จึงเป็นค่า implicit ในเทอมของ a อยู่ ดังนั้น เพื่อให้ขบวนการหาค่า a เรียบง่ายแต่ยังคงความแม่นยำอยู่ จึงได้มีการพัฒนาดัดแปลงการหาค่า F โดยใช้การผสมผสานระหว่างค่า effective radius และ Prandtl tip loss factor มา fit curve ที่ได้จากการทดสอบเพื่อให้ได้แบบจำลองของ tip loss factor อยู่ในรูป explicit [14]

แบบจำลองของการสูญเสียที่ปลายใบที่ถูกใช้โดย NASA และอุตสาหกรรมเฮลิคอปเตอร์ก็คือ การลดรัศมีของใบพัดลงเล็กน้อยเพื่อชดเชยการสูญเสียที่ปลายใบ ระยะที่วัดจากจุดกึ่งกลางของ rotor ถึงส่วนที่หดหายไปที่ส่วนปลายใบจะถูกเรียกเป็น Effective radius, R_e ดังนั้น ในการคำนวณส่วนที่อยู่จากปลายใบถึง Effective radius จะถูกกำหนดให้ค่า $C_L = 0$ และจากนั้นค่า C_L ก็จะถูกกำหนดให้มีค่าค่อยๆ แปรเปลี่ยนจากจุด $C_L = 0$ ถึงค่า C_L ที่กำหนด ตามระยะบนใบก้านที่กำหนดไว้

ค่า effective radius ที่ได้จากการ fit curve ของค่ากำลังที่ได้จากการทดลองของก้านลมนิยมเขียนในรูป

$$\frac{R_e}{R} = \left(\frac{B^{2/3} X}{B^{2/3} X + 1.32} \right)^{1/2} \quad (63)$$

และจากการผสมผสานระหว่างแบบจำลองของการสูญเสียที่ปลายใบในลักษณะของ effective radius และ Prandtl แบบจำลองใหม่จะอยู่ในรูปของ

$$F = \frac{2 \arccos(ef)}{\pi} \quad (64)$$

$$ef = \frac{(\cos Z\pi)^{1-r/R}}{2(1-Re/R)}$$

โดยที่ค่า Z นั้นอยู่ในช่วง 0.65 - 0.75



จะเห็นได้ว่า แบบจำลองนี้จะเป็นฟังก์ชันของระยะที่พิจารณาบนใบกังหันและค่า tip speed ratio ซึ่งอยู่ในสมการของ effective radius และค่าสัมประสิทธิ์ Z ซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณค่าการสูญเสียปลายใบได้ โดยไม่ต้องผ่านการ iterate

ได้มีการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบผลที่ได้จากสมการที่(64) กับ tip loss factor ที่ได้จาก Prandtl สมการที่(38) เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ Z เพื่อให้ผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างต่ำ รายละเอียดของโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ข.

เมื่อนำค่า C_L ในช่วงของมุมปะทะต่างๆ แทนค่าในสมการที่ (62) แล้วจับมาเท่ากับสมการที่ (61) จะได้ค่าผลเฉลยอยู่ในรูป quadratic ทำให้สามารถหาผลเฉลย a ได้โดยตรงโดยไม่ต้องทำการ iterate

จากสมการที่ (1) และ (2)

$$4a(1-a)F = \frac{Bc}{2\pi r} \left(\frac{W}{V_\infty}\right) C_L \quad (65)$$

$$4a^2 - 4a + \frac{Bc}{2\pi r F} \left(\frac{W}{V_\infty}\right) C_L = 0 \quad (66)$$

ในช่วงแรกถ้า $\alpha < \alpha_{max}$

$$C_L = 2\pi m \sin(\alpha + \alpha_0)$$

แทนค่า C_L ในสมการที่ (66) และ $\frac{W}{V_\infty} = \frac{(1-a)}{\sin\phi}$ และ $\phi = \beta + \alpha$

จะได้

$$a = \frac{B1 - \sqrt{(B1)^2 - 16 C1}}{8} \quad (67)$$

เมื่อ

$$(B1)^2 \geq 16 C1$$

และเมื่อ

$$B1 = 4 + \frac{Bcm X \cos(\beta - \alpha_0)}{RF}$$

$$C1 = \frac{Bcm X (\cos(\beta - \alpha_0) - x \sin(\beta - \alpha_0))}{RF}$$

ในกรณีนี้ ค่า a นั้นอยู่ในช่วงของ Glauert empirical กล่าวคือ $a > a_c$ สมการที่ได้จากทฤษฎีโมเมนต์ต้องเปลี่ยนเป็นสมการเส้นตรง ดังนั้นค่า a จะหาได้จากสมการ

$$a = \frac{B2}{C2} \quad (68)$$

เมื่อ

$$B2 = \frac{Bcm X (\cos(\beta - \alpha_0) - x \sin(\beta - \alpha_0))}{RF} - 4a_c (1 - a_c) + 4a_c (1 - 2a_c)$$

$$C2 = \frac{Bcm X \cos(\beta - \alpha_0) + 4(1 - 2a_c)}{RF}$$

สำหรับในช่วงที่สอง $\alpha_{max} < \alpha < \alpha_2$ นั้น $C_L = C_{Lmax}$

และ $\alpha_2 < \alpha < \alpha_{st}$ จะได้ $C_L = C_{Lfl}$

เมื่อแทนค่า C_L ในสมการที่ (66) จะได้

$$a^2 - a + \frac{Bcx X C_{Lc}}{8\pi R} \sqrt{1 + \frac{(1-a)^2}{x^2}} = 0$$

ในส่วนนี้ เนื่องจากมีค่าตัวแปร a อยู่ในรากที่ 2 สมการจึงไม่สามารถหาผลเฉลยได้ง่าย จำเป็นต้องทำการ iterate แต่เนื่องจากค่า a ในรากที่ 2 นั้นมีผลกระทบค่อนข้างน้อย (weak effect) โดยทั่วไปการ iterate ประมาณ 3 ครั้ง ผลเฉลยก็จะ converge ดังนั้นค่าของ a สามารถเขียนได้เป็น

$$a = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{Bcx X C_{Lc}}{2\pi R} \sqrt{1 + \frac{(1-a)^2}{x^2}}} \right) \quad (69)$$

ในกรณีที่

$$a > a_c$$

$$a = -B2 + \sqrt{B2^2 + C2} \quad (70)$$

$$D2 = \frac{Bc \times C_{Lc}}{RF \ 2\pi}$$

$$B2 = \frac{16 a_c (1 - a_c) (1 - 2a_c) - 16a_c (1 - 2a_c)^2 - D2^2}{16(1 - 2a_c)^2 - D2^2}$$

$$C2 = \frac{D2^2 (1 + x^2) - (4a_c (1 - a_c) - 4a_c (1 - 2a_c)^2)}{16(1 - 2a_c)^2 - D2^2}$$

$$C_{Lc} = C_{L_{max}} \quad \text{เมื่อ} \quad \alpha_{max} < \alpha < \alpha_2$$

$$C_{Lc} = C_{L_{fl}} \quad \text{เมื่อ} \quad \alpha_2 < \alpha < \alpha_{st}$$

ในช่วงสุดท้าย

$$C_L = \frac{C_{L_{fl}} \sin(\pi/2 - \alpha)}{\sin(\pi/2 - \alpha_{st})}$$

จะได้

$$a = \frac{1 - K/4 - \sqrt{(1 + K/4)^2 - M}}{2} \quad (71)$$

เมื่อ

$$K = \frac{Bc \times C_{L_{fl}} \cos(\pi/2 + \beta)}{2\pi RF \sin(\pi/2 - \alpha_{st})}$$

$$M = \frac{Bc \times C_{L_{fl}} (x \sin(\pi/2 + \beta) - \cos(\pi/2 + \beta))}{2\pi RF \sin(\pi/2 - \alpha_{st})}$$

และถ้า $a > a_c$

$$a = \frac{M - 4a_c (1 - a_c) + 4a_c (1 - 2a_c)}{4(1 - 2a_c) - K} \quad (72)$$

เมื่อสามารถหาค่า axial induction factor ที่ตำแหน่งต่างๆ บนใบกังหันแล้ว จึงนำค่า a มาแทนค่าเพื่อหาสัมประสิทธิ์กำลัง สัมประสิทธิ์ของแรงทอร์ค โมเมนต์ดัด และค่าความเค้นที่

คุมใบกังหัน ด้วยการใช้อินทิเกรตแบบ numerical โดยพิจารณาค่าแรงหน่วงบนใบกังหันเข้าไปด้วย

$$C_P = \frac{1}{\pi X} \int_{x_{hubR}}^x Bc \sqrt{1 + \frac{(1-a)^2}{x^2}} ((1-a) C_L - x C_D) x^2 dx \quad (73)$$

$$C_T = \frac{1}{\pi X} \int_{x_{hubR}}^x Bc \sqrt{1 + \frac{(1-a)^2}{x^2}} (x C_L + (1-a) C_D) x dx \quad (74)$$

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงหน่วงของใบกังหันจะถูกจำลองด้วยสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} C_D &= C_{D0} (1 + C_2 \alpha^2) & \alpha < \alpha_1 \\ C_D &= C_3 C_{D0} + \tan \alpha - \tan \alpha_1 & \alpha_1 < \alpha < \alpha_3 \\ C_D &= C_{D1} \tan \alpha & \alpha_3 < \alpha < \alpha_{st} \\ C_D &= C_{D2} \frac{\sin^2 \alpha}{1 + \sin \alpha} & \alpha > \alpha_{st} \end{aligned}$$

เมื่อ	C_{D0}	คือ	สัมประสิทธิ์แรงหน่วงที่มุมปะทะเท่ากับศูนย์
	C_3, C_{D2}, C_{D1}	คือ	ค่าคงที่ที่เกิดจาก fit curve จากข้อมูลสัมประสิทธิ์ของแรงหน่วง
	α_1, α_3	คือ	ค่ามุมปะทะ
	α_{st}	คือ	มุมปะทะที่เกิดการ stall

สำหรับค่าความเค้นที่เกิดขึ้นที่โคนใบของกังหันนั้นแบ่งออกเป็น ความเค้นที่เกิดจากแรงดึงและความเค้นที่เกิดจากโมเมนต์ดัด แรงตามแนวแกนของใบกังหันสามารถเขียนได้เป็น

$$F_R(r) = \int_r^R \rho_B (\Omega^2 r - g \sin \theta) A \cos \psi dr \quad (52)$$

ซึ่งในการวิจัยนี้ แบบจำลองของกังหันลมไม่มีมุมเอียง ($\psi = 0$) และแรงจะมีค่าสูงสุดเมื่อใบกังหันชี้ลงดิน ($\theta = 270^\circ$) ความเค้นจากแรงดึงของใบกังหันจะเขียนได้เป็น

$$\sigma = F_R/A$$

ส่วนโมเมนต์ดัดที่เกิดจากแรงเนื่องจากอากาศพลศาสตร์ในทิศที่ตั้งฉากกับระนาบ rotor จะเขียนได้เป็น

$$M_t(r_A) = \int_R^A \left\{ (r - r_A) (\rho_B A \Omega^2 \sin\psi) - (r - r_A) \frac{1}{2} \rho W^2 c_n c - (r - r_A) \rho_B A g \sin\psi \sin\theta \right\} dr$$

ดังนั้น ความเค้นจากโมเมนต์ดัดจะเป็น

$$\sigma(r) = \frac{M_t d}{I} \quad (57)$$

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดของส่วนของใบกังหัน รอบแกน t

d คือ ระยะจากผิวของใบกังหันลมตรงจุดที่พิจารณาถึงจุดเซนทรอยด์ที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งวัดตามแนวตั้งฉากกับเส้น neutral axis

เนื่องจากในการวิจัยนี้ ใบกังหันลมเป็นรูปแพนอากาศที่มีมุมบิดซึ่งมีค่าแปรตามความยาวของใบกังหัน และโมเมนต์ดัดกระทำในระนาบที่พื้นที่ภาคตัดขวางไม่สมมาตร ดังนั้น จึงจำเป็นต้องแตกโมเมนต์ดัดที่มีทั้งในทิศทาง t และทิศทาง n เข้าสู่แกนหลัก principal axes 1, 2 รูปที่ 3.3 เป็นรูปแสดงภาคตัดขวางของใบกังหันรูปแพนอากาศ NACA 4415 พร้อมแกนพิกัดและแกนหลัก 1, 2 ความเค้นบนใบกังหันจากโมเมนต์ดัดจึงสามารถเขียนได้เป็น

$$\sigma(r) = \frac{M_1 d_1}{I_1} + \frac{M_2 d_2}{I_2} \quad (58)$$

ซึ่ง $M_1 = M_t \cos(\beta + \beta_p) + M_n \sin(\beta + \beta_p)$

$M_2 = -M_t \sin(\beta + \beta_p) + M_n \cos(\beta + \beta_p)$

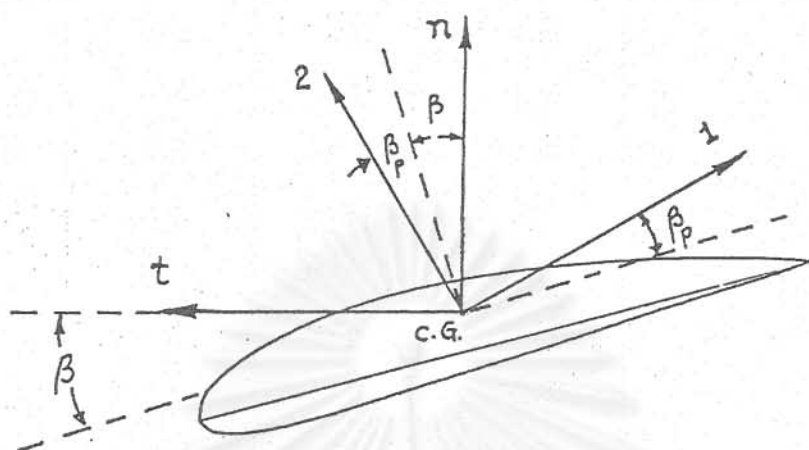
I_1 คือ โมเมนต์ความเฉื่อยหลักของพื้นที่ภาคตัดขวางรอบแกนหลัก 1

I_2 คือ โมเมนต์ความเฉื่อยหลักของพื้นที่ภาคตัดขวางรอบแกนหลัก 2

d_1 คือ ระยะจากจุดที่พิจารณานบนผิวถึงจุดเซนทรอยด์ของพื้นที่หน้าตัด วัดในแนวตั้งฉากกับแกนหลัก 1

d_2 คือ ระยะจากจุดที่พิจารณานบนผิวถึงจุดเซนทรอยด์ของพื้นที่หน้าตัด วัดในแนวตั้งฉากกับแกนหลัก 2

$$M_n = - \int_R^A \left\{ (r - r_A) \left(\frac{1}{2} \rho W^2 c_t c \right) - (r - r_A) g \rho_B A \cos\theta \right\} dr \quad (55)$$



รูปที่ 3.3 รูปภาคตัดขวางของใบกังหันพร้อมกับแกนหลักมุมบิด และแกนพิกัดต่างๆ

รายละเอียดตรรกของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทั้งสองโปรแกรม รวมทั้งรายละเอียดการป้อนข้อมูล (input) และผลเฉลย (output) จะถูกแสดงไว้ในภาคผนวก

3.3 ใบกังหันลมที่มีประสิทธิภาพเชิงอากาศพลศาสตร์สูงสุด

เนื่องจากกังหันลมแนวนอนชนิด 3 ใบ จะมีคุณลักษณะที่ให้สัมประสิทธิ์ของกำลังสูงสุด ในย่านของค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบค่อนข้างสูง ในการวิจัยนี้จึงเลือกเอาค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ใช้ในการออกแบบเท่ากับ 6 แล้วจึงหาผลเฉลยของพารามิเตอร์ที่กำหนดรูปร่างของใบกังหัน ($c_{L/R}$, ϕ) ในแต่ละตำแหน่งที่พิจารณาบนใบกังหันได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ค่าดังกล่าวได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

r/R	cC_L/R	ϕ (องศา)
0.95	0.0387	6.14
0.90	0.0496	6.66
0.85	0.0564	7.16
0.80	0.0614	7.69
0.75	0.0661	8.25
0.70	0.0708	8.87
0.65	0.0760	9.55
0.60	0.0819	10.32
0.55	0.0885	11.22
0.05	0.0961	12.28
0.45	0.1049	13.55
0.40	0.1154	15.07
0.35	0.1277	16.98
0.30	0.1423	19.36
0.25	0.1589	22.46
0.20	0.1765	26.54
0.15	0.1910	32.00
0.10	0.1900	39.36
0.05	0.1433	48.87

ตารางที่ 3.1 ค่า cC_L/R , ϕ ที่ตำแหน่งต่างๆ ของใบกังหันที่มีประสิทธิภาพเชิงอากาศพลศาสตร์สูงสุด ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ = 6

เมื่อได้ค่า cC_L/R และ ϕ ในแต่ละตำแหน่งที่พิจารณานใบกังหันจนครบตลอดความยาวใบแล้ว จึงกำหนดรูปภาคตัดขวาง เป็นรูปแพนอากาศลักษณะใดลักษณะหนึ่งขึ้น เพื่อจะได้ไปใช้หาข้อมูลของสัมประสิทธิ์แรงยก และมุมปะทะ เพื่อนำมากำหนดค่าความกว้างของใบ chord และค่ามุมบิดของใบต่อไป

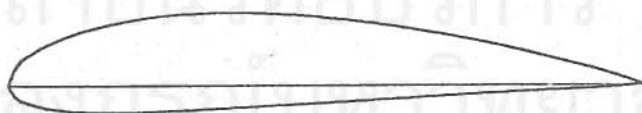
ในการวิจัยนี้ได้เลือกใบกังหันให้มีรูปภาคตัดขวางเป็นแพนอากาศชนิด NACA 4415 รูปร่างและข้อมูลเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงของแพนอากาศชนิดนี้ (จากเอกสาร

อ้างอิง[16]) ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 และ 3.5 เนื่องจากกัณฑ์ลมนี้ถูกออกแบบเพื่อใช้ทดลองในอุโมงค์ลมที่มีความเร็วลมค่อนข้างจำกัด ดังนั้น จึงเลือกค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงที่ค่าตัวเลขเรโนลด์ (Reynold number) ที่ต่ำ กล่าวคือ มีค่าเท่ากับ $4.2 \times 10^4 - 1.6 \times 10^5$ และเลือกค่าสัมประสิทธิ์แรงยกเท่ากับ 1.04 และมุมปะทะ (α) เท่ากับ 8 องศา ซึ่งเป็นค่าที่ให้อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงสูงสุด (C_L/C_{Dmax})

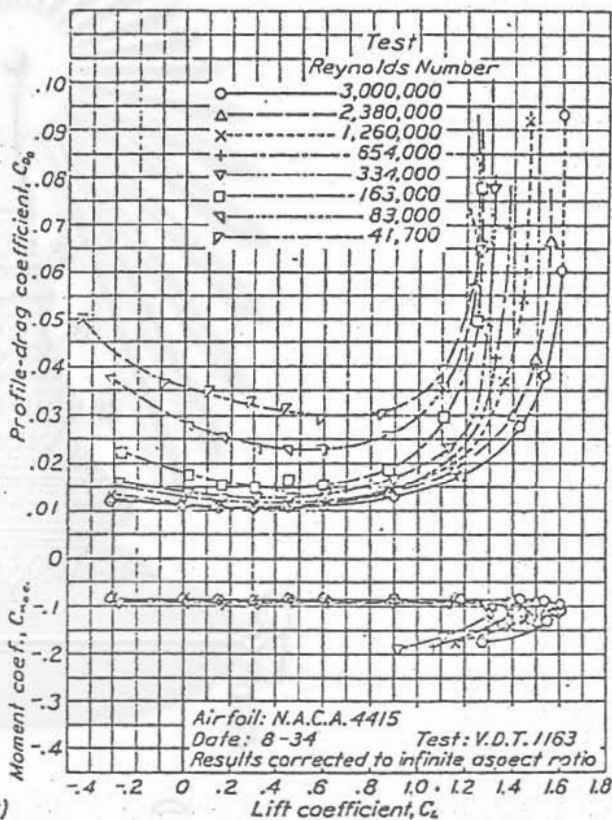
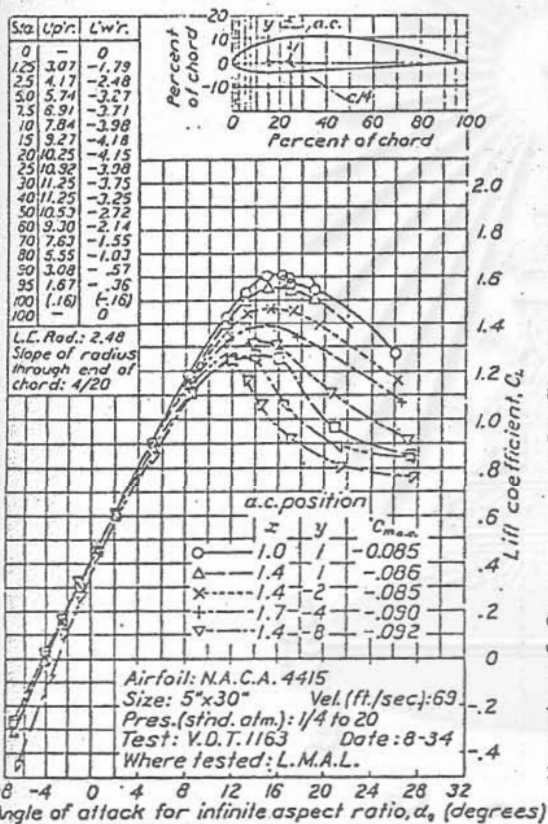
เมื่อได้กำหนดค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและมุมปะทะแล้ว ก็จะสามารถหาค่าอัตราส่วนความกว้างของใบ c/R และมุมบิดของใบกัณฑ์ได้ ($\beta = \phi - \alpha$) และได้กำหนดค่าความยาวของใบกัณฑ์ R เท่ากับ 60 เซนติเมตร โดยวัดจากศูนย์กลางถึงปลายใบ โดยความยาวที่กำหนดจะสอดคล้องกับอุโมงค์ลมที่ใช้ทดสอบ จากค่าดังกล่าวจะสามารถกำหนดค่าความกว้างของใบกัณฑ์ ค่าที่กล่าวมานี้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

NACA 4415		X, Y Coordinates	
X(upper)	Y(upper)	X(lower)	Y(lower)
.00000	.00000	.00000	.00000
.01250	.03070	.01250	-.01790
.02500	.04170	.02500	-.02480
.05000	.05740	.05000	-.03270
.07500	.06910	.07500	-.03710
.10000	.07840	.10000	-.03980
.15000	.09270	.15000	-.04180
.20000	.10250	.20000	-.04150
.25000	.10920	.25000	-.03980
.30000	.11250	.30000	-.03750
.40000	.11250	.40000	-.03250
.50000	.10530	.50000	-.02720
.60000	.09300	.60000	-.02140
.70000	.07630	.70000	-.01550
.80000	.05550	.80000	-.01030
.90000	.03080	.90000	-.00570
.95000	.01670	.95000	-.00360
1.00000	.00000	1.00000	.00000

Leading edge radius = 2.48
slope of radius = 0.20



รูปที่ 3.4 รูปภาคตัดขวางของใบกัณฑ์ NACA 4415



รูปที่ 3.5 สัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงของแพนอากาศ NACA 4415

r/R	c/R	β (องศา)	c (เซ็นติเมตร)
0.95	0.0372	-1.86	2.23
0.90	0.0477	-1.34	2.86
0.85	0.0542	-0.84	3.25
0.80	0.0590	-0.31	3.54
0.75	0.0636	0.25	3.81
0.70	0.0681	0.87	4.08
0.65	0.0731	1.55	4.38
0.60	0.0787	2.32	4.73
0.55	0.0851	3.22	5.11
0.50	0.0924	4.28	5.54
0.45	0.1009	5.55	6.05
0.40	0.1110	7.07	6.66
0.35	0.1228	8.98	7.37
0.30	0.1368	11.36	8.21
0.25	0.1528	14.46	9.17
0.20	0.1697	18.54	10.19
0.15	0.1837	24.00	11.02
0.10	0.1827	31.36	10.96
0.05	0.1378	40.87	8.27

ตารางที่ 3.2 ค่าความกว้างและมุมบิดของใบกังหันลมที่ให้ค่าประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์สูงสุดจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยกำหนดค่า $C_L = 1.04$ และ $\alpha = 8$ องศา

3.4 ไบกังหันลมที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดลอง

3.4.1. ไบกังหันลมชุดแรก

รูปร่างของไบกังหันและมุมบิดของไบกังหันที่ได้จากผลเฉลยจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะเป็นรูปร่างของไบกังหันลมในเชิงอุดมคติ โดยพิจารณาจากแง่ของอากาศพลศาสตร์อย่างเดียว แต่ในทางปฏิบัติแล้วไบกังหันที่ได้จากการวิเคราะห์นี้อาจไม่มีโครงสร้างที่แข็งแรงพอ คือ ทางโคนใบอาจเรียวกเล็กจนไม่สามารถทนแรงหรือภาระที่เกิดขึ้นบนไบกังหันได้ (ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.2) ดังนั้น ในทางปฏิบัติจริงๆ แล้วอาจจะต้องยอมสูญเสียประสิทธิภาพในบางส่วน เพื่อให้ไบกังหันมีโครงสร้างที่แข็งแรงเพียงพอ และในบางครั้งการที่จะสร้างไบกังหันให้ได้รูปร่างตามทฤษฎีซึ่งมีมุมบิดสูงตามที่ได้คำนวณนั้น อาจจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงจนไม่คุ้มกับประสิทธิภาพที่ได้เพิ่มขึ้น จึงได้ใช้วิธีประมาณโดยเส้นตรงมาประมาณค่าความกว้างใบของกังหัน และมุมบิดให้แปรผันเป็นเส้นตรง โดยแปรจากค่าจากตำแหน่งกึ่งกลางใบไปสู่ค่าที่ตำแหน่ง 90 % ของความยาวของไบกังหัน

$$\text{ที่ } r = 0.5r \quad c = 5.54 \text{ ซม.}$$

$$\text{ที่ } r = 0.9r \quad c = 2.86 \text{ ซม.}$$

จากค่าที่กำหนดนี้ จะได้ค่าความกว้างของไบกังหัน พังชันความยาวของไบกังหันวัดจากดุมกลางดังนี้ คือ

$$c = -0.11 r + 0.088 \quad \text{เมตร}$$

มุมบิดของไบกังหันนั้นจากค่าผลเฉลยของคอมพิวเตอร์ จะแปรจากค่าน้อยที่ปลายใบถึงค่าค่อนข้างมากที่โคนใบ ซึ่งในการสร้างจะทำได้ให้แม่นยำค่อนข้างยาก จึงได้ประมาณการค่ามุมบิดให้แปรเป็นสมการเส้นตรง

$$\beta = -16.820 r/R + 13.798^\circ$$

ดังนั้น รูปร่างของไบกังหันที่ได้รับการดัดแปลง โดยให้ความกว้างของไบกังหันและมุมบิดเป็นเชิงเส้นตรง จะมีลักษณะตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.3

r/R	c (เซ็นติเมตร)	β (องศา)
1.00	2.20	-3.02
0.95	2.53	-2.18
0.90	2.86	-1.34
0.85	3.19	-0.50
0.80	3.52	0.34
0.75	3.85	1.18
0.70	4.18	2.02
0.65	4.51	2.87
0.60	4.84	3.71
0.55	5.17	4.55
0.50	5.50	5.39
0.45	5.82	6.23
0.40	6.16	7.07
0.35	6.49	7.91
0.30	6.82	8.75
0.25	7.15	9.59
0.20	7.48	10.43
0.15	7.81	11.28
0.10	8.14	12.12
0.05	8.47	12.96

ตารางที่ 3.3 ค่าความกว้างของใบกังหันและมุมบิดที่ดัดแปลงให้แปรผันเป็นเส้นตรง

เมื่อได้ขนาดความกว้างของใบกังหัน มุมบิดของใบกังหันที่ตำแหน่งต่างๆ บนใบกังหันจนครบตลอดความยาวของใบ และขนาดความยาวใบกังหันแล้ว จึงให้ผู้ชำนาญการทางด้านสร้างใบพัดของเครื่องบิน เป็นผู้สร้างใบกังหันตามแบบที่กำหนด โดยปกติแล้วกรรมวิธีในการสร้างใบกังหันที่มีมุมบิด และมีรูปร่างภาคตัดขวางเช่นนี้ จะต้องใช้วิธีตัดเนื้อไม้เป็นแผ่นๆ แล้วนำมาอัดด้วยกาว เพื่อเหลาขึ้นรูปตามแบบซึ่งจะให้ค่าที่ถูกต้องและแม่นยำ แต่ค่า

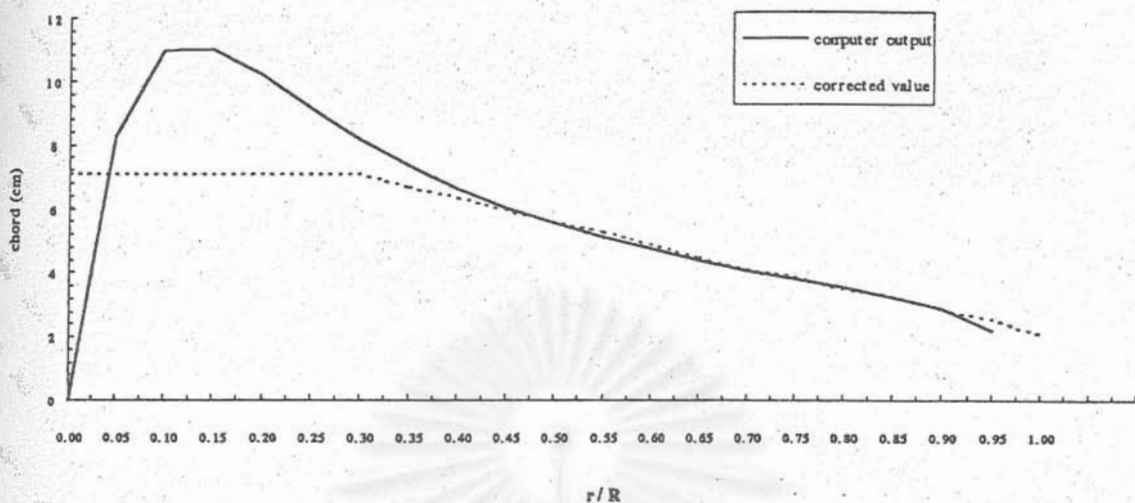
ใช้ง่ายก็จะสูงด้วย ในการวิจัยนี้เนื่องจากใบกังหันเป็นแบบจำลองที่ใช้ในการทดลอง จึงเหลาตามวิธีทั่วไปคือ นำไม้ตะเคียนทองซึ่งผ่านการใช้งานมาเป็นเวลาประมาณไม่น้อยกว่า 10 ปี ซึ่งถือว่าแห้งดีแล้วมาวาดรูปภาคตัดขวางของส่วนโคนใบ และส่วนปลายใบลงบนปลายไม้ทั้งสองด้าน แล้วจึงเหลาตามนั้น และเนื่องจากการเหลานั้น เป็นการเหลาด้วยมือไม่ได้ใช้เครื่องจักร โดยเฉพาะส่วนของมุมบิดเนื่องจากที่ปลายใบมีมุมบิดเป็นมุมลบ การเหลาด้วยมือนี้ การจะเริ่มต้นตั้งแนวแกนอ้างอิงให้เป็นมุมลบที่ปลายใบนั้นทำได้ยาก จึงให้เริ่มต้นมุมบิดของที่ปลายใบเป็นศูนย์ ทำให้มุมบิดมีค่าเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 3 องศา ตารางที่ 3.4 เป็นตารางที่ได้มีการตัดแปลงค่าความกว้างและมุมบิดมอบให้ช่างฝีมือเหลาใบกังหัน

เนื่องจากใบกังหันชุดนี้ที่ส่วนของโคนใบจะมีส่วนที่ยาวประมาณ 2 ซม. ที่เป็นแท่งสี่เหลี่ยมที่มีความกว้าง 7.1 ซม. และหนาประมาณ 3 ซม. ซึ่งเป็นส่วนที่ยึดติดกับดุมกลางของ rotor จากช่วงนี้ไปจึงมีรูปตัดขวางเป็นรูปแพนอากาศ NACA 4415 ดังนั้น การเขียนรูปแพนอากาศที่ปลายไม้ทางด้านโคนใบ แล้วเหลาในส่วนที่ห่างไปถึง 2 ซม. จึงทำให้ได้ผลแม่นยำค่อนข้างยาก ผลที่ได้คือ ใบกังหันลมทั้ง 3 ใบ มีค่าความกว้างของใบกังหันแปรเป็นเส้นตรงมีขนาดใกล้เคียงกับค่าที่กำหนด ส่วนรูปภาคตัดขวางส่วนใหญ่มีรูปร่างใกล้เคียงกับรูปแพนอากาศ NACA 4415 ตามที่กำหนด แต่มุมบิดนั้นทำการวัดตรวจสอบได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากทรงโคนใบมีส่วนที่เป็นแท่งสี่เหลี่ยมอยู่ จากการตรวจสอบพบว่าค่ามุมบิดจากการวัดที่โคนใบมีค่าใกล้เคียงกับ 18 องศา ทั้งสามใบ และมีมุมบิดแปรจากโคนใบมีค่าศูนย์องศาที่ปลายใบ ซึ่งอาจจะเกิดจากการกำหนดคลาดเคลื่อนในแบบเริ่มต้นในการเหลาและการเหลากระทำด้วยมือ แต่จากการตรวจสอบพบว่า ใบกังหันทั้งสามใบมีรูปร่างใกล้เคียงกันมากในทั้งค่าความกว้างและมุมบิด จากนั้นจึงนำใบกังหันทั้งสามใบทำการขัดและลงแล็กเกอร์ เพื่อให้ได้ผิวที่เรียบ

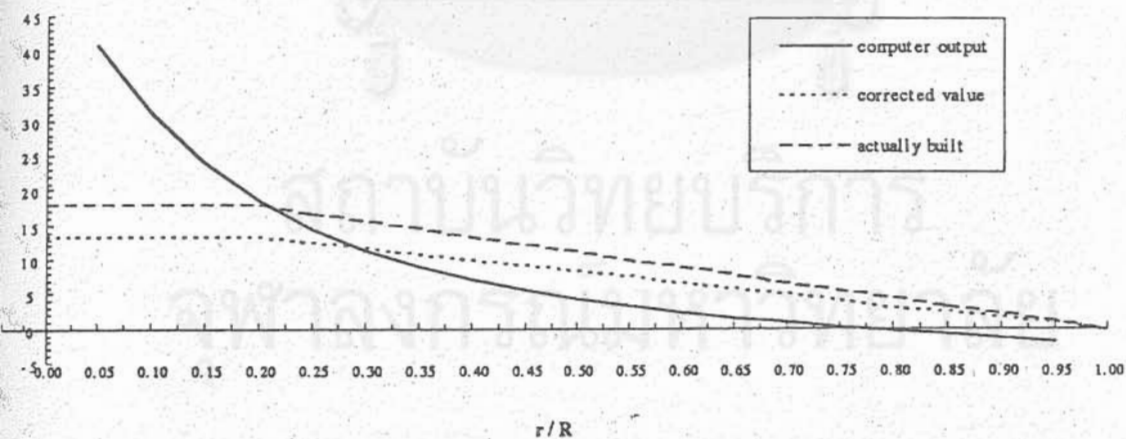
รูปที่ 3.6 และ 3.7 จะแสดงถึงการเปรียบเทียบผลของรูปร่างของใบกังหันลมจากการวิเคราะห์และจากการเหลาจริง รูปที่ 3.8 เป็นรูปของใบกังหันลมที่ได้จากการเหลาจริง

r/R	c (เซ็นติเมตร)	β (องศา)
1.00	2.1	0.00
0.95	2.6	0.84
0.90	2.9	1.68
0.85	3.3	2.52
0.80	3.5	3.06
0.75	3.9	4.20
0.70	4.1	5.04
0.65	4.5	5.89
0.60	4.9	6.73
0.55	5.3	7.57
0.50	5.6	8.41
0.45	6.0	9.25
0.40	6.4	10.09
0.35	6.7	10.93
0.30	7.1	11.77
0.25	7.1	12.62
0.20	7.1	13.45
0.15	7.1	13.45
0.10	7.1	13.45

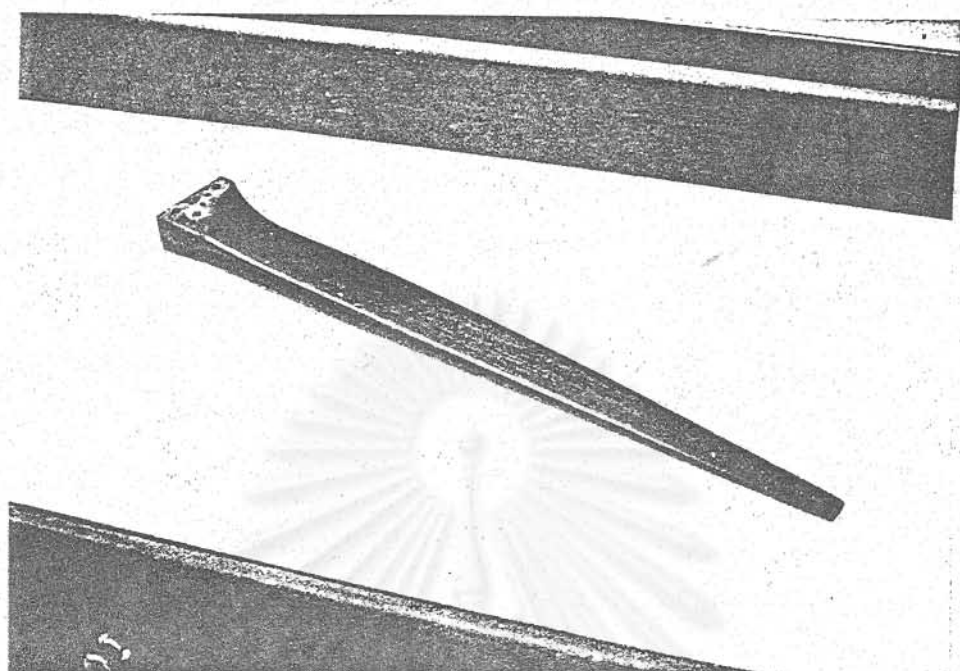
ตารางที่ 3.4 ค่าความกว้างของใบกังหันลมและมุมบิดที่ได้รับการดัดแปลงและส่งให้ช่างฝีมือเหล่า



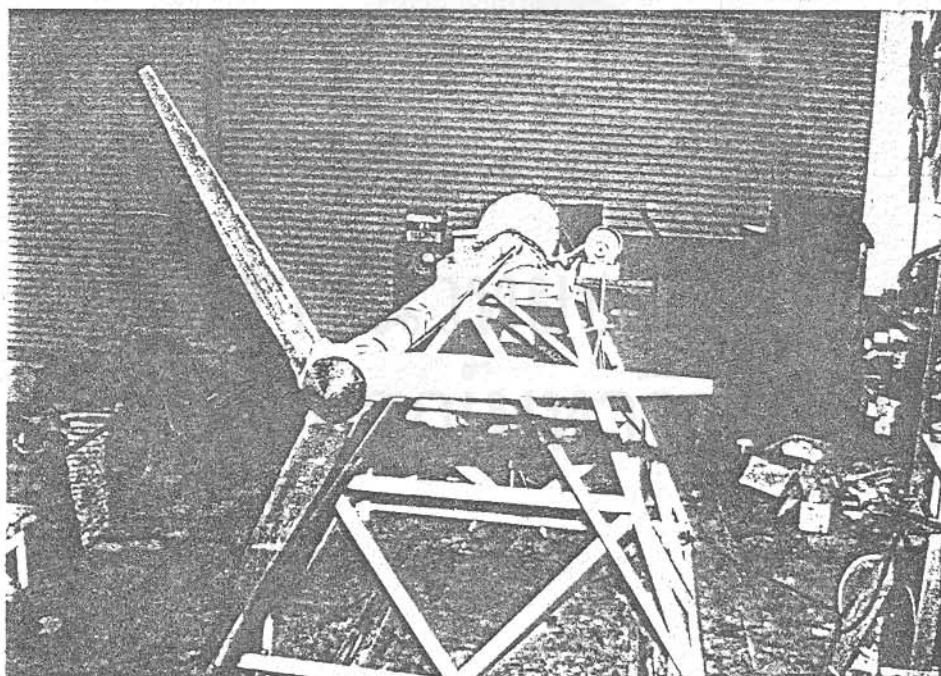
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ของความกว้างของใบกังหันลมกับตำแหน่งบนใบกังหันลม จากผล
 เผลยโดยคอมพิวเตอร์กับค่าที่ดัดแปลงเพื่อสร้างจริง



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ของมุมบิดของใบกังหันลมกับตำแหน่งบนใบกังหันลม จากผล
 เผลยโดยคอมพิวเตอร์กับค่าที่ดัดแปลงเพื่อสร้างจริง



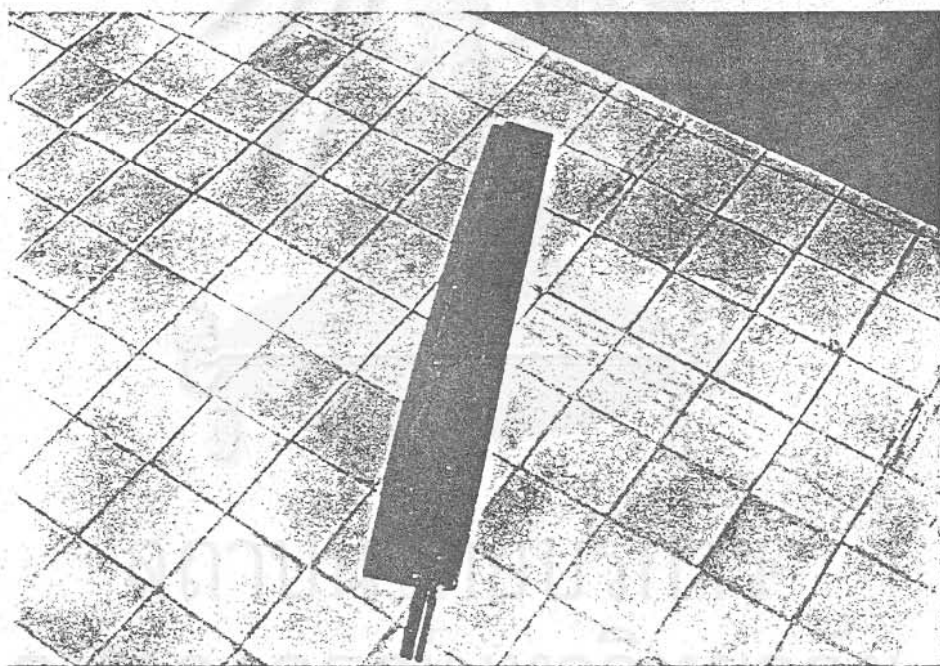
รูปที่ 3.8 ใบกังหันลมที่สร้างขึ้นจริงชุดแรก



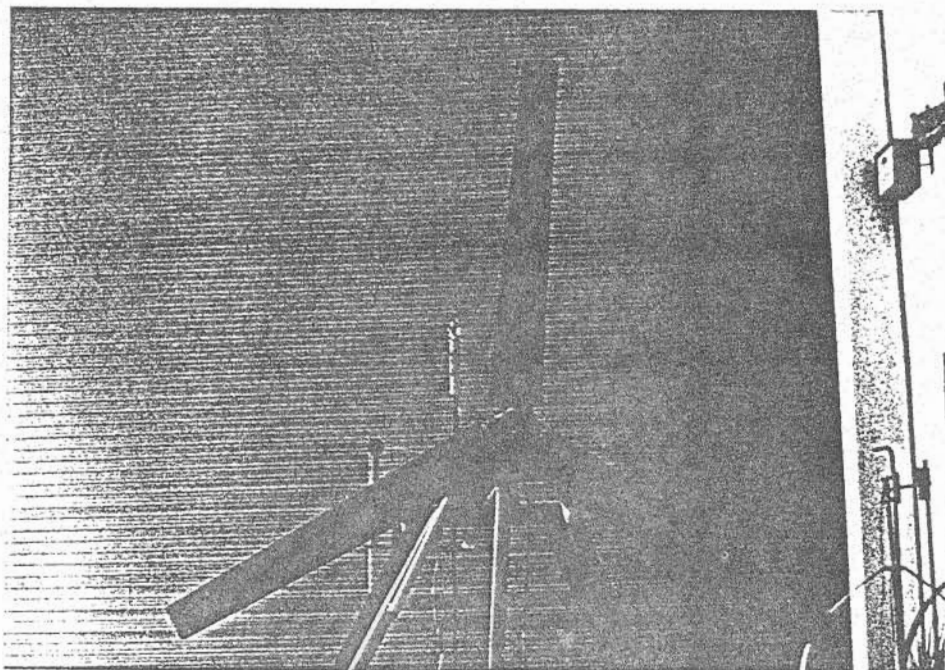
รูปที่ 3.9 ใบกังหันลมที่ประกอบเป็นกังหันลมชนิดสามใบ

3.4.2 ไบกังหันลมชุดที่สอง

ได้มีการสร้างไบกังหันลมอีกชุดเพื่อทำการทดลองเปรียบเทียบ ไบกังหันลมชุดที่ 2 เป็นใบเหลาด้วยมือโดยมีรูปภาคตัดขวางเป็น NACA 4415 มีมุมบิดเล็กน้อย และมีความกว้างของไบกังหันแปรจากส่วนปลายไปถึงโคนใบ ไบกังหันลมชุดนี้ทำจากไม้ตะเคียนทองเหมือนกับไบกังหันลมชุดแรก ไบกังหันชุดนี้จะมีส่วนโคนใบต่อด้วยก้านเหล็ก ส่วนของไบกังหันลมที่เป็นไม้มีความยาว 62 ซม. ความยาวของไบกังหันลมเมื่อเสียบต่อดุมวัดจากจุดกึ่งกลางดุมถึงปลายไบกังหันลมยาว 69 ซม. ความกว้างไบกังหันลมแปรจาก 6.2 ซม. ที่ปลายใบด้วยความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงจนมีค่าเท่ากับ 9.2 ซม. ที่โคนใบ มุมบิดของไบกังหันลมแปรจากศูนย์องศาที่ปลายใบถึง 14 องศา ที่โคนใบ ไบกังหันลมถูกขัดเรียบและทาด้วยแล็กเกอร์มันเพื่อให้ผิวเรียบ รูปที่ 3.10 และ 3.11 แสดงถึงรูปของไบกังหันลมชุดที่สองใบเดียวและที่ประกอบกันเป็นชุด 3 ใบ พร้อมดุม



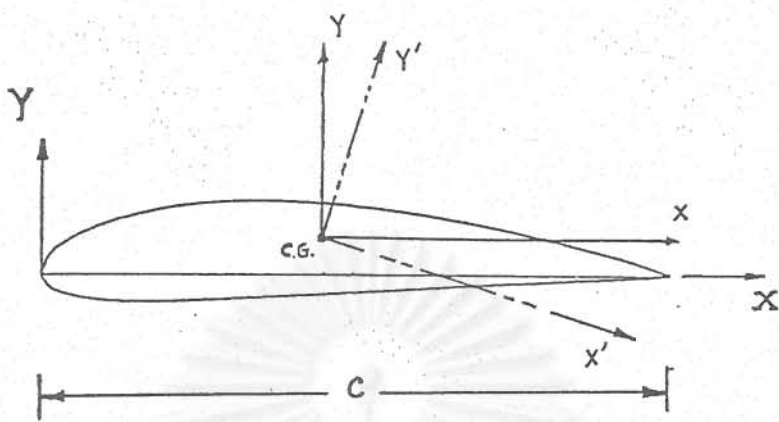
รูปที่ 3.10 ไบกังหันลมชุดที่สอง



รูปที่ 3.11 ใบกังหันลมชุดที่สองที่ประกอบเป็นกังหันลม

3.5 คุณลักษณะของรูปภาคตัดขวางแพนอากาศ NACA 4415

คุณลักษณะของรูปภาคตัดขวางแพนอากาศ NACA 4415 ได้จากการป้อนรูป profile เข้าใน software สำเร็จรูปของ program medusa เพื่อหาค่าพื้นที่ จุดเซนทรอยด์ ปริมาตร มวล และค่าโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน X Y Z และผลคูณของโมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับระนาบ XY, XZ, YZ และ direction cosine ของแกนหลัก รูปที่ 3.12 แสดงรูปภาคตัดขวาง NACA 4415 และแกนอ้างอิง ตารางที่ 3.5 แสดงถึงค่าคุณลักษณะต่างๆ ของภาคตัดขวางรูปแพนอากาศ NACA 4415



รูปที่ 3.12 แพนอากาศ NACA 4415 และแกนอ้างอิง

พื้นที่ = $.06309 c^2$

	X	Y	Z
ตำแหน่งของจุดกึ่งกลางมวล	$0.45139 c$	$0.06183 c$	0
โมเมนต์ความเฉื่อยที่จุดกึ่งกลางมวลรอบแกน XYZ	$I_x = 0.00524 c^4$	$I_y = 0.00871 c^4$	$I_z = 0.00343 c^4$
Product of inertia ที่จุดกึ่งกลางมวล			
สำหรับระนาบ XY, XZ, YZ	$I_{xy} = -0.00019 c^4$	$I_{xz} = 0$	$I_{yz} = 0$
โมเมนต์ความเฉื่อยหลักที่จุดกึ่งกลางมวลรอบแกนหลัก X', Y', Z'	$I_{x'} = 0.00523 c^4$	$I_{y'} = 0.00872 c^4$	$I_{z'} = 0.00343 c^4$
direction cosine สำหรับแกนหลัก X', Y', Z'			
(แกน X')	0.998533	-0.054140	0
(แกน Y')	0.054140	0.998533	0
(แกน Z')	0	0	1

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับแพนอากาศ NACA 4415

บทที่ 4 การทดลอง

4.1 บทนำ

การทดลองในการวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อหาสมรรถนะของกังหันลมแนวนอนชนิด 3 ใบ และในขณะเดียวกันก็หาค่าความเค้นของใบกังหันลมในขณะทำงานด้วย กังหันลมที่ใช้ในการทดลองจะประกอบด้วยใบกังหัน 2 ชุด ชุดแรก คือ ใบกังหันที่ถูกเหลาให้มีรูปร่างที่ให้ประสิทธิภาพเชิงอากาศพลศาสตร์สูงสุด ดังที่ได้บรรยายไว้ในบทที่ 3 ใบกังหันชุดที่สองเป็นใบกังหันลมที่มีความกว้างของตัวใบกังหันใหญ่กว่า การทดลองถูกกระทำโดยใช้อุโมงค์ลมที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และใช้การติดตั้งบนรถปิคอัพวิ่งบนถนน

การทดลองถูกกระทำขึ้นสองครั้ง ซึ่งช่วงเวลาห่างกันค่อนข้างมาก ในช่วงแรกเป็นการทดลองสมรรถนะของกังหันลมทั้งสองชุดเพียงอย่างเดียว หลังจากนั้นก็ได้เริ่มทดลองอีกครั้งโดยมุ่งเน้นที่ความเค้นของใบกังหันลม

4.2 อุปกรณ์ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

4.2.1 ชุดของใบกังหันลมแนวนอน

ใบกังหันลมชุดแรกเป็นกังหันลมแนวนอนชนิดสามใบที่ประกอบด้วย ใบกังหันลมที่มีการเหลาให้มีรูปร่างที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในเชิงอากาศพลศาสตร์ ตามที่บรรยายไว้ในบทที่ 3 ซึ่งมีคุณลักษณะดังต่อไปนี้

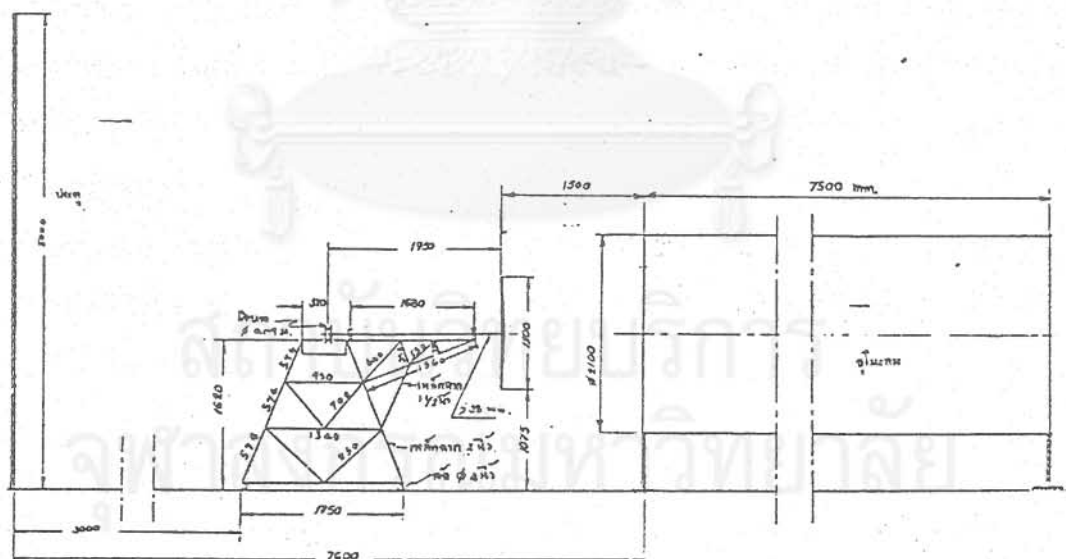
เส้นผ่านศูนย์กลางของ rotor	1.2 เมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางดุม rotor	12 ซม.
รูปภาคตัดขวางของใบกังหันลม	NACA 4415
วัสดุที่ทำใบกังหันลม	ไม้ตะเคียนทอง
ความกว้างใบกังหันลม	2.2 - 7.1 ซม.
มุมบิดของใบกังหันลม	0 - 18°

ความหนาแน่นของใบกังหัน 760 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

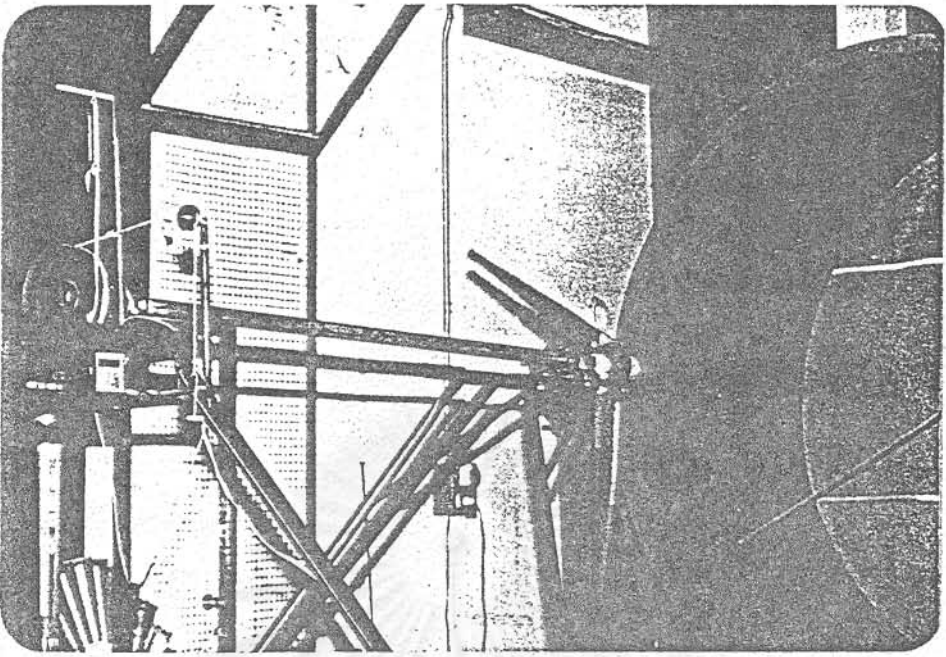
กังหันลมชุดที่สองเป็นกังหันลมแนวอนชนิตสามใบที่ประกอบด้วย ใบกังหันลมที่มีคุณลักษณะดังต่อไปนี้

เส้นผ่านศูนย์กลางของ rotor	1.38 เมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางของดุม rotor	14 ซม.
รูปภาคตัดขวางของใบกังหันลม	NACA 4415
วัสดุที่ทำใบกังหันลม	ไม้ตะเคียนทอง
ความกว้างของใบกังหันลม	6.2 - 9.2 ซม.
มุมบิดของใบกังหันลม	0 - 14°
ความหนาแน่นของใบกังหัน	760 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ชุดที่ใช้ติดตั้งของกังหันลมเพื่อการทดสอบในอุโมงค์ลม



รูปที่ 4.1 ชุดการติดตั้งกังหันลมเพื่อการทดสอบกับอุโมงค์ลม



รูปที่ 4.2 ใบกังหันลมที่ประกอบเป็นกังหันลมบนชุดติดตั้งเพื่อทดสอบกับอุโมงค์ลม

4.2.2 อุโมงค์ลม

อุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดลอง เป็นชนิดวงจรเปิด มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.1 เมตร ความยาว 7.5 เมตร ใบพัดของพัดลมในตัวอุโมงค์ลมทำด้วยไม้ นำมาอัดด้วยกาวและเหลาตามแบบ และรับกำลังขับเคลื่อนจากมอเตอร์ชนิดปรับความเร็วรอบได้ ซึ่งมีขนาด 30 กิโลวัตต์ ส่งกำลังด้วยสายพานเพื่อให้ได้ความเร็วรอบสูงสุดของใบพัดเท่ากับ 1350 รอบต่อนาที สามารถให้ความเร็วสูงสุดประมาณ 7.2 เมตรต่อวินาที ภายในอุโมงค์ลมมีตะแกรงรังผึ้ง ทำด้วยเส้นลวดให้มีรูปร่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1 ตารางเซนติเมตร นอกจากนี้ยังมีการวางชุดท่อพีวีซีขนาดสั้นเรียงกันเป็นรังผึ้งเต็มตลอดพื้นที่ภาคตัดขวางของอุโมงค์ลมให้ภายในอีก 2 ชั้น เพื่อลด turbulence ของลมที่ไหลผ่าน

อุโมงค์ลมมีข้อมูลจำเพาะ ดังนี้

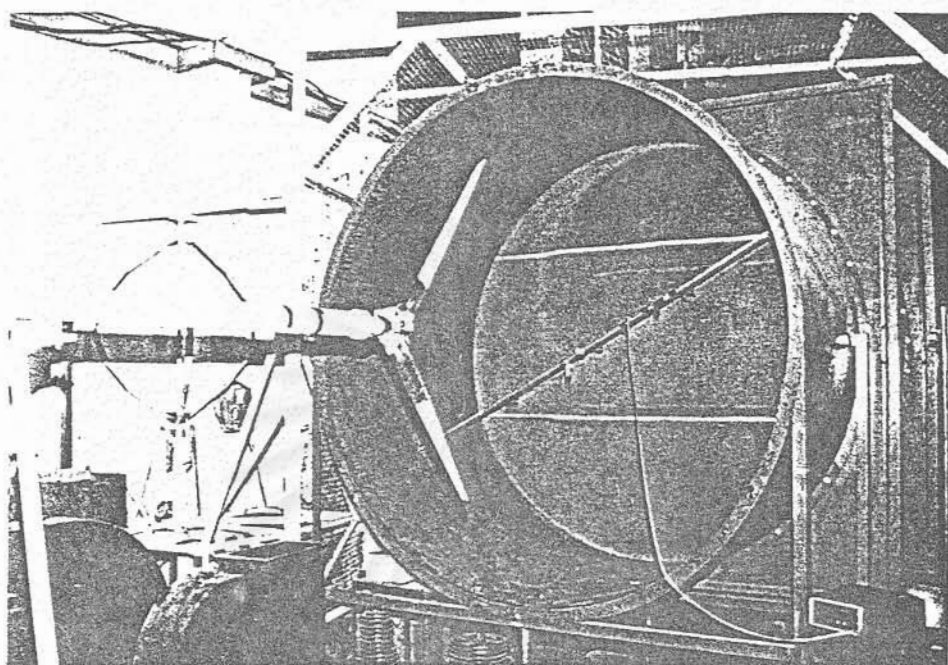
4.2.2.1 เส้นผ่าศูนย์กลาง	2.1 เมตร
4.2.2.2 ความยาว	7.5 เมตร
4.2.2.3 เส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด	2.0 เมตร
4.2.2.4 วัสดุที่ใช้ทำใบพัด	ไม้ตราเสือ
4.2.2.5 ความเร็วสูงสุดที่สร้างได้	7.2 เมตรต่อวินาที
4.2.2.6 กำลังงานของมอเตอร์	30 กิโลวัตต์

4.2.2.7 ความเร็วรอบของใบพัด

0 - 1350 รอบต่อนาที

4.2.2.8 ชุดส่งกำลัง

สายพานวี จำนวน 3 เส้น

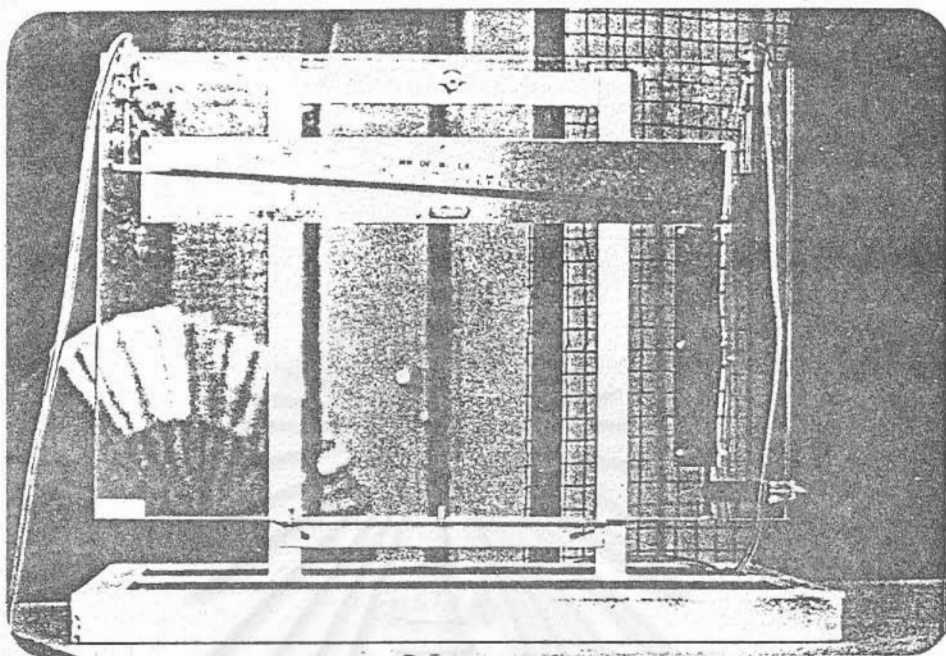


รูปที่ 4.3 อุโมงค์ลม

4.2.3 อุปกรณ์วัดความเร็วลม

อุปกรณ์ชุดแรกประกอบด้วย ท่อปีโตสติกติว (Pitot static tube) โดยมีท่อพลาสติกต่อเข้าสู่มาโนมิเตอร์ ที่ผลิตโดยบริษัท DWYER INSTRUMENT INC. จากสหรัฐอเมริกา หมายเลขเครื่อง P424 สามารถวัดความแตกต่างของความดันมาเป็นมิลลิเมตรน้ำ แสดงผลด้วยระดับของน้ำในท่อตั้งแต่ 0 - 250 มิลลิเมตรน้ำ โดยอ่านได้ละเอียด 2 มิลลิเมตรน้ำ

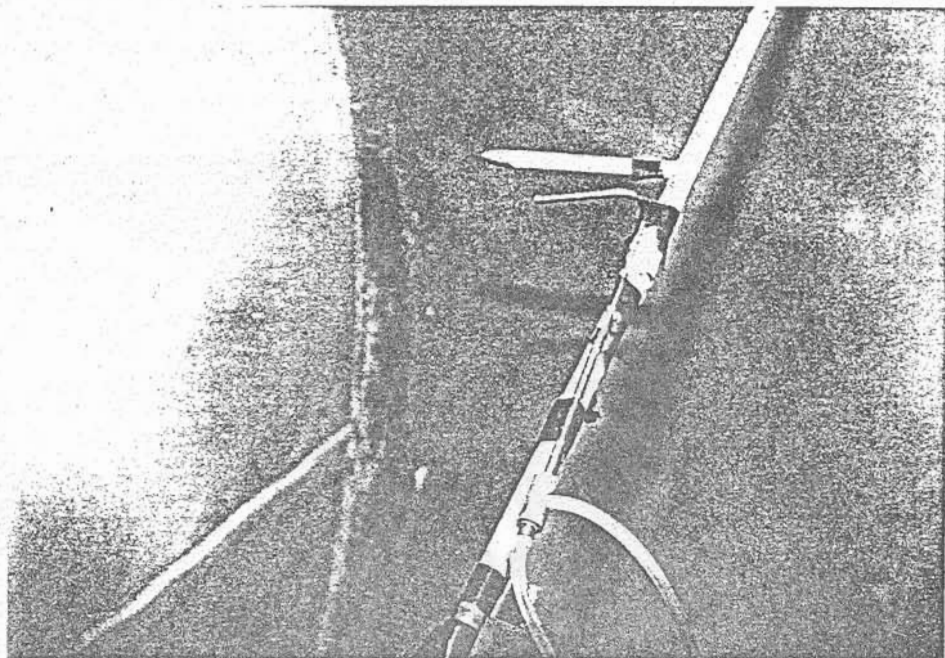
อุปกรณ์ชุดที่สองประกอบด้วย ท่อปีโตสติกติวต่อในตำแหน่งดังรูปที่ 4.6 แล้วใช้สายยางต่อจากท่อความดันสถิตมายังเครื่องวัดความเร็วลม MICROMANOMETER รุ่น FC012 ผลิตโดยบริษัท Furness Controls Limited ซึ่งจะอ่านค่าออกมาเป็นความเร็วของลมที่จุดวัดเป็นเมตรต่อวินาทีหรือมิลลิเมตรของน้ำ ค่าความละเอียดของความเร็วลมที่อ่านได้ในหน่วยเมตรต่อวินาที คือ ± 0.01 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.4 ไมโครมิเตอร์น้ำ



รูปที่ 4.5 ไมโครมาโนมิเตอร์น้ำ



รูปที่ 4.6 การติดตั้งท่อปีโตสติกต์

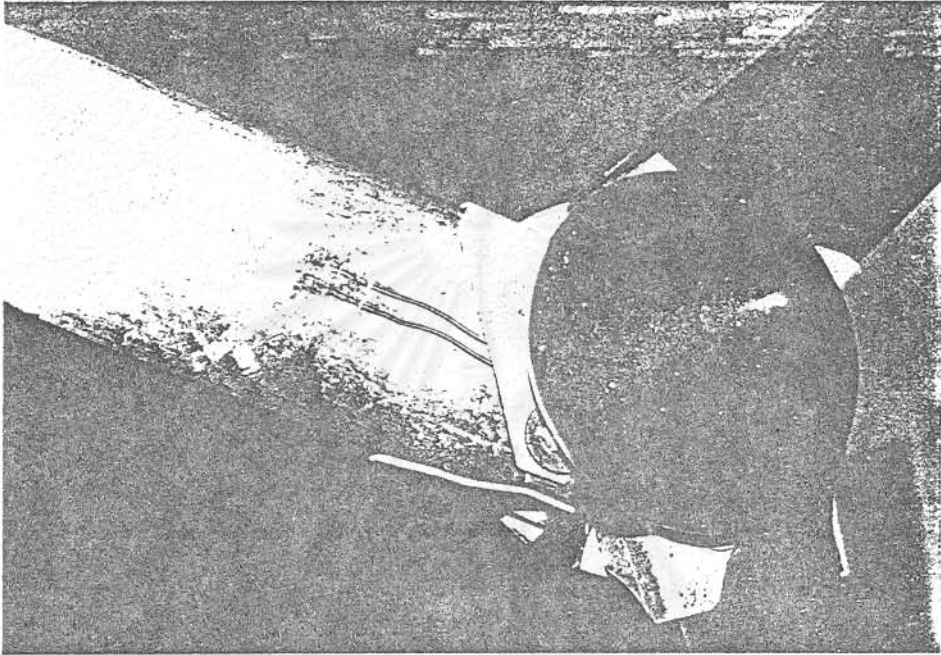
4.2.4 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ

อุปกรณ์วัดความเร็วรอบชุดแรก เป็นเครื่องวัดรอบอิเล็กทรอนิกส์ยี่ห้อ ลูทรอน ดิจิตอล (Lutron Digital) แสดงผลเป็นตัวเลข โดยได้รับสัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ติดตั้งกับเพลากังหัน สามารถวัดความเร็วได้ตั้งแต่ 0 - 9999 รอบต่อนาที ความละเอียด ± 1 รอบต่อนาที

อุปกรณ์วัดความเร็วรอบชุดที่สอง เป็นเครื่องวัดรอบอิเล็กทรอนิกส์แบบใช้แสง (pocket tachometer) รุ่น 3631 ผลิตโดยบริษัท YOKOGAWA HOKUSHIN ELECTRIC ซึ่งแสดงผลเป็นตัวเลข โดยได้ติดตั้งสะท้อนแสงไว้ที่เพลากังหัน อุปกรณ์นี้สามารถปรับช่วงความเร็วรอบที่ใช้สำหรับวัดได้ 2 ระดับ คือ 60 - 2000 รอบต่อนาที มีความละเอียด ± 0.1 รอบต่อนาที และ 60 - 20000 รอบต่อนาที มีความละเอียด ± 1 รอบต่อนาที

4.2.5 Strain gage

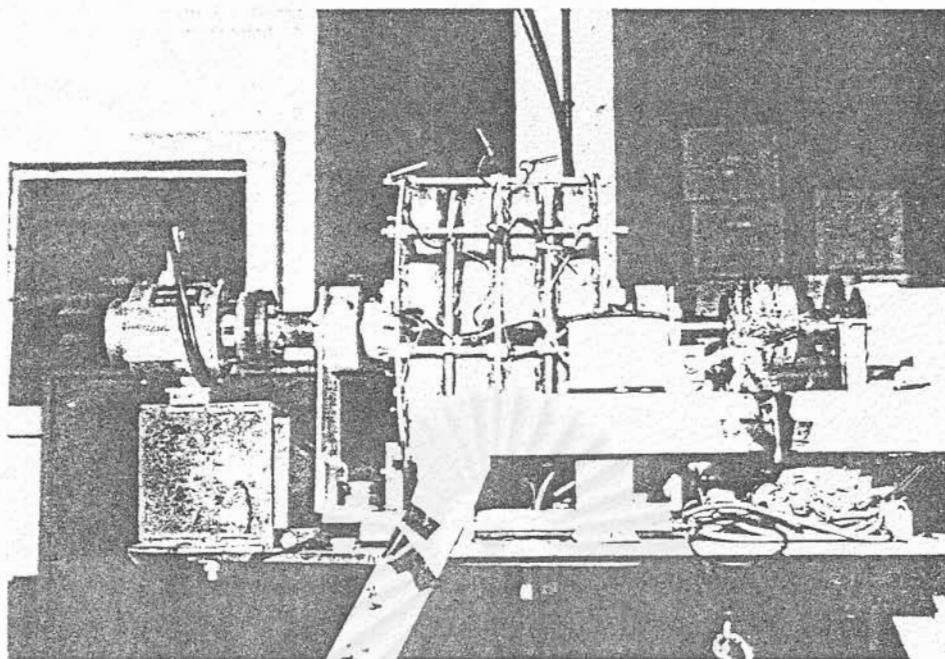
อุปกรณ์วัดความเครียดที่ใช้ติดตั้งบนโคนของใบกังหันลมเพื่อวัดความเครียดที่เกิดขึ้นขณะที่ใบกังหันรับภาระ Strain gage เป็นแบบ B-FAE-5-12 T11P15 $2.04 \pm 1\%$ มี gage range 5 ค่า $K = -0.3\%$ ความต้านทาน $\Omega = 120 \pm 0.3$ โอห์ม



รูปที่ 4.7 การติดตั้ง Strain gage บนใบกังหันลม

4.2.6 Slip ring

Slip ring เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายทอดสัญญาณระหว่างสายที่ติดอยู่บนวัตถุหมุนไปสู่เครื่องมือวัด ซึ่งในการวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์ Slip ring เพื่อรับและถ่ายทอดสัญญาณระหว่าง Strain gage ที่ถูกแปะติดบนใบกังหันลมที่หมุนไปสู่ Strain amplifier Slip ring ที่ใช้ เป็น type RBE-4A แบบสัญญาณเข้าสัญญาณชุดเดียว ชนิด Connection 1 socket และมีขั้วรับ 4 element ผลิตโดยบริษัท KYOWA Electronic Instrument Co., Ltd. สายสัญญาณที่ใช้ เป็นสาย shield แบบ 4 เส้น ร้อยผ่านเพลลา Coupling และผ่านรูตรงกลางของ slip ring ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร มาต่อที่ terminal board ด้านหลัง slip ring

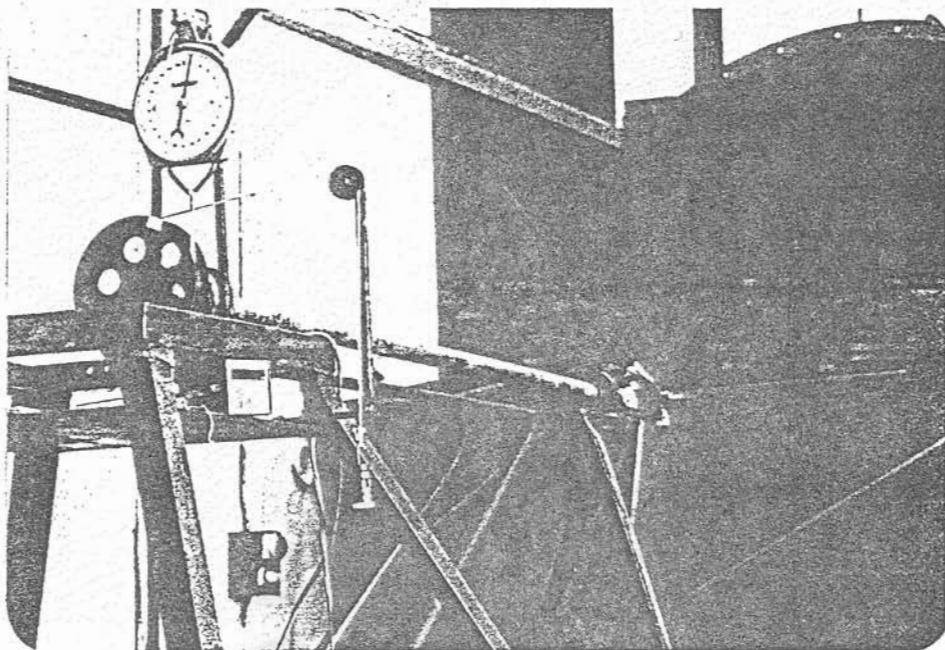


รูปที่ 4.8 Slip ring

4.2.7 อุปกรณ์วัด Torque

อุปกรณ์วัดสมรรถนะของกังหันลมใช้เป็นดรัมเบรกต่ออยู่ที่ปลายเพลลาของกังหันลม และใช้เชือกพันรอบดรัมเบรก จากนั้นนำน้ำหนักถ่วงมาเพิ่มภาระแก่กังหันลมทำให้กังหันลมหมุนช้าลง และอ่านค่าน้ำหนักถ่วง เพื่อไปคำนวณหาค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 ชุดดรัมเบรกที่ใช้ในการทดลอง

4.2.8 Bridge Box

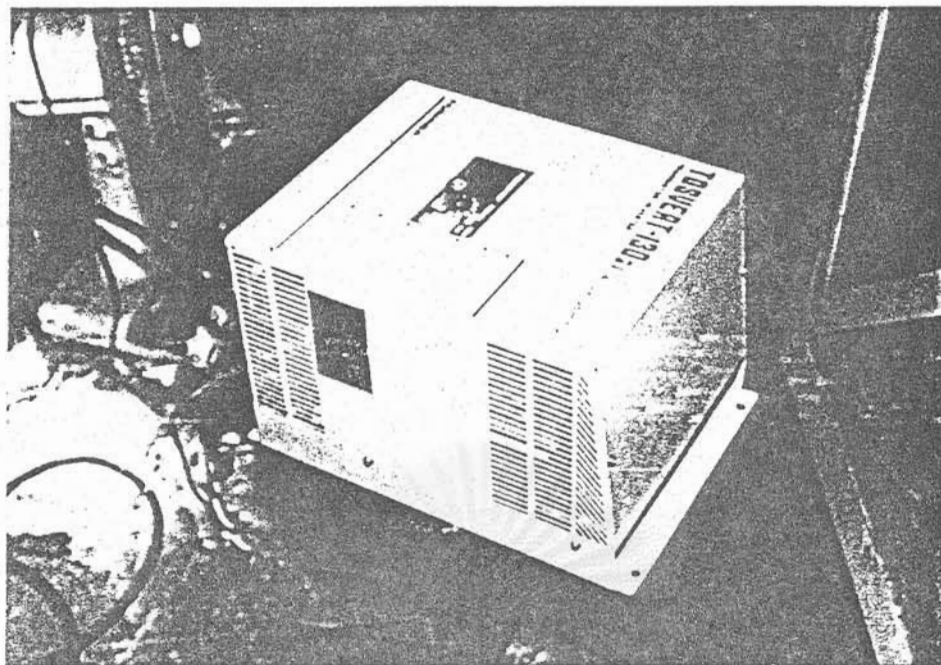
เป็นกล่องที่ทำให้เกิดการต่อทางไฟฟ้าในลักษณะเป็น Bridge ตัว Bridge Box เป็นกล่องรุ่น SB120B ผลิตโดยบริษัท TOKYO SOKKI KENKYUJO CO., LTD. มีความต้านทานภายใน 120 โอห์ม โดยจะใช้ bridge box กับการต่อ strain gage แบบ 1 gage (ใช้แทน dummy gage)

4.2.9 มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส

ในการทดลองนี้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังขับเคลื่อนเพลากังหันลม เมื่อต้องการถ่วงสมดุลใบกังหันลม และการทำการทดสอบค่า resistance ของ slip ring มอเตอร์ที่ใช้เป็นมอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 0.5 แรงม้า ผลิตโดยบริษัท มิตซูบิชิ จำกัด การส่งกำลังไปยังเพลากังหันลม ทำโดยใช้สายพานแบนหน้ากว้าง 1 นิ้ว

4.2.10 Transistor inverter

Transistor inverter เป็นอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้า ที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นรุ่น VT 130G1-4015B0 ขนาด 0.5 แรงม้า ผลิตโดยบริษัท โตชิบา จำกัด ใช้ในการปรับสมดุลของใบกังหันลม และทดสอบค่า resistance ของ slip ring

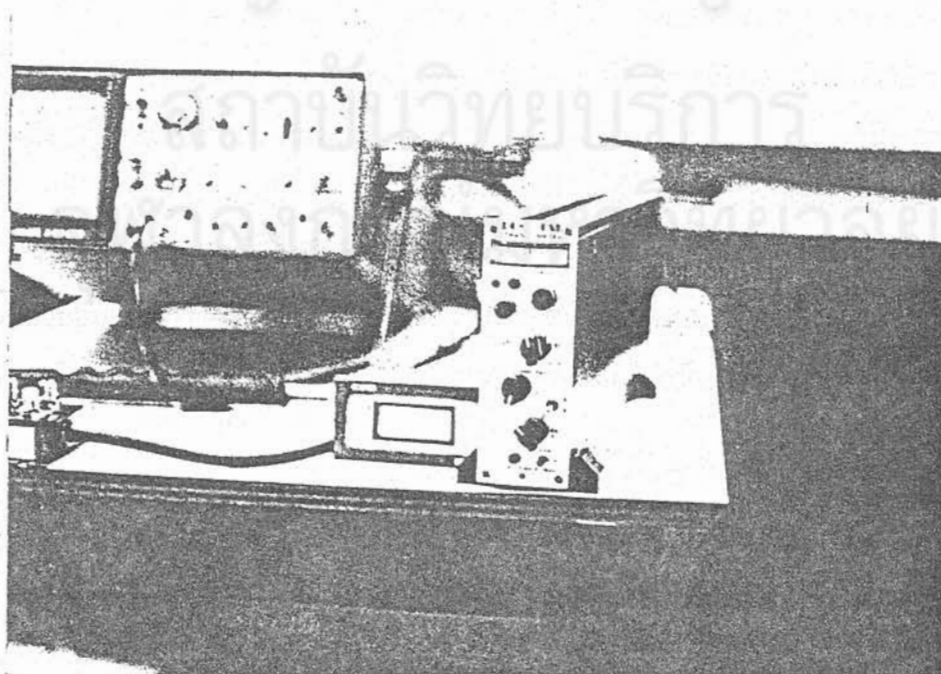


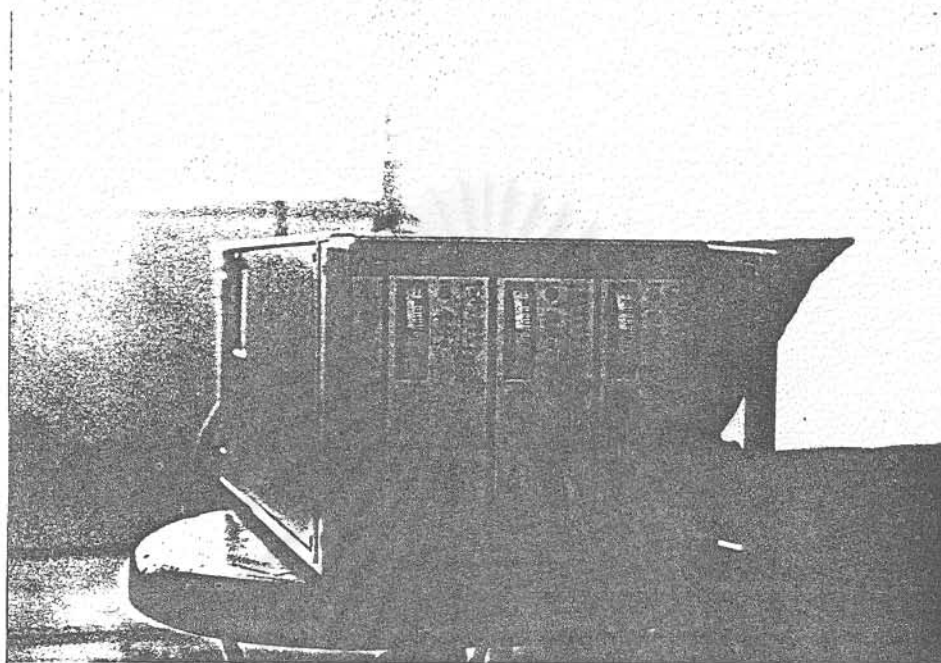
รูปที่ 4.10 Transistor inverter

4.2.11 Dynamic Strain Amplifier

Dynamic Strain Amplifier หรือ Strain meter รุ่น DPM-613A ผลิตโดยบริษัท KYOWA เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจร strain gage bridge และนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปอันเกิดจากการยืดหรือหดตัวของ strain gage บนใบก้านไปคำนวณหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นได้ ตัว strain meter นี้ใช้กับการทดลองก้านกลมกับอุโมงค์ลม

Strain meter อีกตัวเป็นรุ่น DC1AF ของบริษัท Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. ถูกใช้ในการทดลองเพื่อหาค่า Modulus of elasticity ของใบก้านกลมทั้งสองชุด

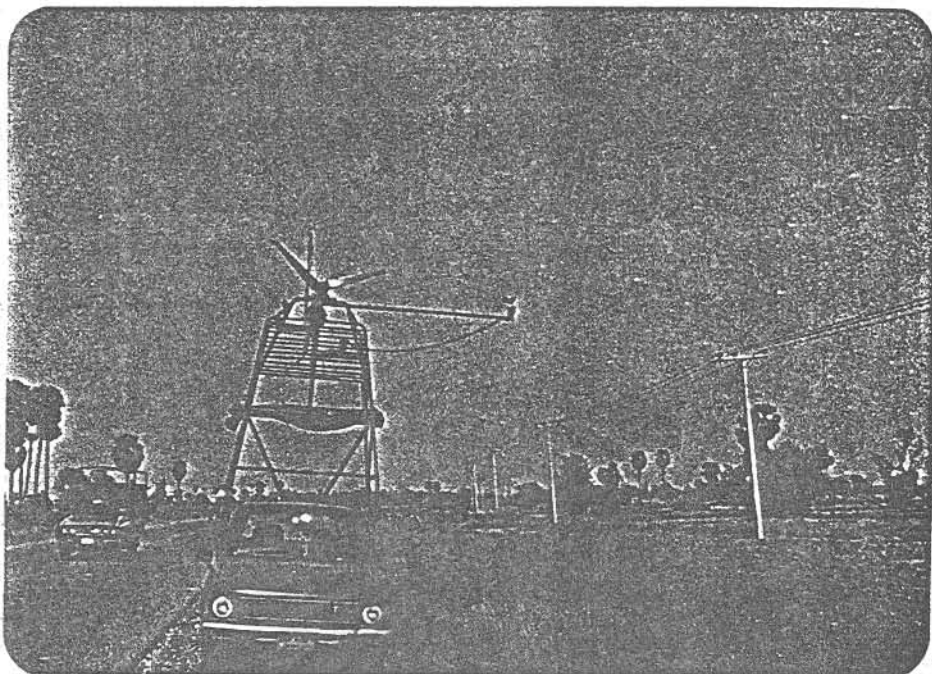




รูปที่ 4.11 Strain amplifier

4.2.12 รถปิคอัพ

รถปิคอัพจะถูกใช้ติดตั้งกังหันลมเพื่อจะจำลองลักษณะการทดสอบกังหันลมในสนามจริงโดยใช้หลักการของ translating frame ซึ่งใช้การเคลื่อนตัวกังหันลมเข้าหาลมที่หยุดนิ่ง เพื่อจะได้สภาพของลมที่พัดเข้าหากังหันลมบน translating frame รถปิคอัพเป็นรถยี่ห้อ TOYOTA รุ่น HILUX ชนิดไม่มีหลังคาบนกระบะหลัง และทำการติดตั้งกังหันลมพร้อมอุปกรณ์การทดลองบนรถ ซึ่งมีชุดดรัมเบรกสำหรับต่อวงนำหนัก และใช้อุปกรณ์วัดความเร็วลมแบบถ้วยหมุน การทดลองทำการวิ่งด้วยความเร็วที่ทำให้เกิดความเร็วม 7,8,9 และ 10 เมตรต่อวินาที โดยใช้ระยะทางประมาณ 50 กิโลเมตร วิ่งรถกลับไปกลับมา



รูปที่ 4.12 การติดตั้งกังหันลมบนรถปิคอัพ



4.3 สถานที่ทำการทดลอง

4.3.1 สถานที่ซึ่งใช้ในการทดลองสมรรถนะและภาระบนกังหันลมแนวอนชนิต 3 ใบ โดยใช้อุโมงค์ลมนั้น คือ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และได้รับความอนุเคราะห์ให้ใช้อุปกรณ์การทดลองบางส่วนและให้ใช้อุโมงค์ลมด้วย

4.3.2 สถานที่ซึ่งใช้ในการทดลองสมรรถนะของกังหันลมแนวอนชนิต 3 ใบ ด้วยการติดตั้งบนรถปิคอัพ โดยใช้หลักการ Translating frame เพื่อจำลองการทำงานในสนามจริงนั้น กระทำบนถนนสายพิษณุโลก-อุตรดิตถ์ โดยแล่นกลับไปกลับมาด้วยระยะทางประมาณ 50 กิโลเมตร ทั้งนี้เนื่องจากเป็นเส้นทางที่การจราจรไม่หนาแน่น และถนนเรียบ

4.4 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

เนื่องจากการทดลองถูกกระทำขึ้น 2 ช่วง ซึ่งแต่ละช่วงห่างกันมาก ดังนั้น อุปกรณ์ที่ทำการวัดในแต่ละช่วงจึงอาจแตกต่างกัน การทดลองถูกกระทำที่สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี โดยใช้อุโมงค์ลม และการทดลองซึ่งติดตั้งกังหันลมและอุปกรณ์การทดลองบนรถปิคอัพนั้นถูกกระทำโดยทำการทดลองด้วยการแล่นรถบนถนนหลวง

4.4.1 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อใช้กับการทดลองหาสมรรถนะของกังหันลม โดยอุโมงค์ลม

แท่นติดตั้งกังหันลมจะเป็นแท่นโครงเหล็ก โดยมีชุดของดรัมเบรกติดอยู่บนแท่น ส่วนตัวกังหันลมจะถูกติดอยู่บนเพลลาที่มีตุ้กดตาแบร์ริงรับอยู่ 2 ตัว ตัว rotor กังหันลมจะถูกจัดวางห่างจากปากอุโมงค์ลม 1.5 เมตร ระยะห่างจากตัว rotor กังหันลมถึงตัวดรัมเบรกที่ใช้ในการปรับภาระกังหันลมจะมีค่าเท่ากับ 1.95 เมตร ตัวของ rotor กังหันลมจะห่างจากประตูเหล็กม้วนหลังอาคารประมาณ 6.5 เมตร ดังที่แสดงในรูปที่ 4.1

4.4.2 การติดตั้งกังหันลมและอุปกรณ์การทดลอง โดยใช้รถปิดอัฟวิงทดลองบนถนน

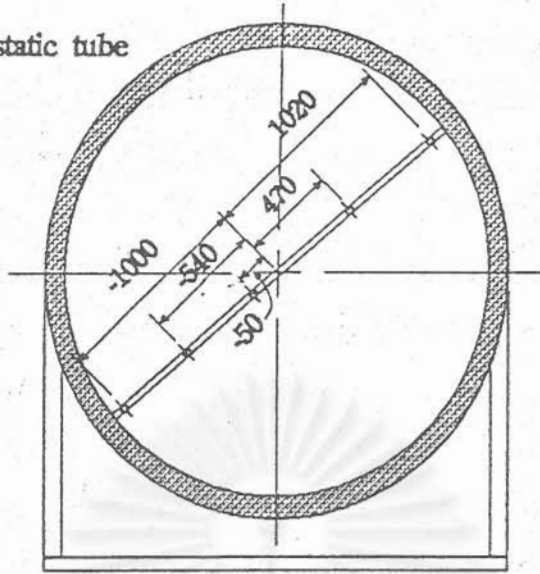
กังหันลมแนวอนชนิต 3 ใบ ชุดแรกจะถูกติดตั้งบนแท่นที่กระบะด้านหลังของรถ โดยที่ตำแหน่งคุมกังหันลมอยู่สูงกว่าหลังคาเก๋งประมาณ 1.94 เมตร และติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร็วลม อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ และดรัมเบรก ดังที่แสดงในรูปที่ 4.12

4.4.3 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อใช้กับการทดลองหาความเค้นของกังหันลมโดยอุโมงค์ลม

กังหันลมจะถูกติดตั้งอยู่บนแท่นชุดเดิมเหมือนในหัวข้อ 4.4.1 แต่ส่วนของดรัมเบรคนั้นแตกต่างกันไป พร้อมทั้งได้เลื่อนตัว rotor กังหันลมให้อยู่ห่างจากอุโมงค์ลมประมาณ 90 เซนติเมตร มีการติด strain gage บนใบกังหัน และร้อยสายสัญญาณผ่านรูในเพลลาไปต่อกับชุด slip ring ซึ่งติดอยู่บนแท่นหลังชุดเบรคแบบ Eddy current (ไม่ได้ใช้ในการทดลองนี้) ส่วนชุดท่อ pitot tube ถูกติดไว้ที่ตำแหน่งในอุโมงค์ลมก่อนถึงปากทางออกของอุโมงค์ลมเป็นระยะ 56 เซนติเมตร แล้วต่อท่อสายจากท่อ pitot tube เข้ากับเครื่อง micro manometer และติดตั้งชุดเบรกเชือก ดังแสดงในรูปที่ 4.13

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

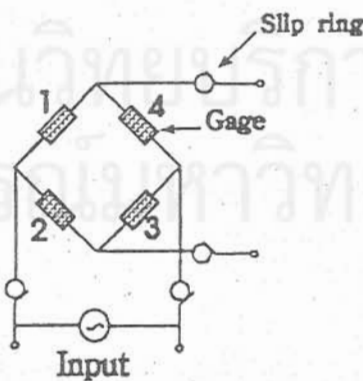
๑ Pitot static tube



รูปที่ 4.13 แสดงตำแหน่งการวางท่อพิโตสถิตย โดยวางที่ระยะ -1000, -540, -50, 470, 100 มม. ตามลำดับ

การติดตั้ง strain gage บนใบกังหันนั้น กระทำโดยเลือกใบกังหันชั้นหนึ่งใบนำ strain gage 4 ตัว ติดด้านหน้าของใบกังหัน 2 gage และด้านหลังของใบกังหันอีก 2 gage ที่ตำแหน่ง 10 เซนติเมตร จากจุดศูนย์กลางของเพลากังหัน แล้วต่อสาย strain gage ทั้ง 4 ชุดเป็นวงจร full bridge system ตามรูปที่ 4.14 แล้วต่อสายสัญญาณจากวงจร bridge มาเชื่อมที่ terminal board ที่ด้านหลังของ slip ring

full-bridge system.



รูปที่ 4.14 การต่อ gage แบบ 4 gage system

แล้วต่อสายเคเบิลจาก connecter ที่ด้านบนของ slip ring มาเข้าที่ signal input ของเครื่อง strain amplifier แล้วจึงนำสัญญาณ voltage output จาก strain amplifier มาเข้า digital oscilloscope อ่านค่าที่วัดได้

4.4.4 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อใช้หาความคลาดเคลื่อนของ slip ring

จะเหมือนกับหัวข้อ 4.4.3 ยกเว้นว่าใช้เป็นความต้านทานแบบ metal film 120 โอห์ม ทั้งหมด 4 ตัว ไปติดแทนที่ strain gage

4.4.5 การติดตั้งเพื่อทดสอบหาค่า Modulus of elasticity ของใบกังหันลม

นำใบกังหันที่ติด strain gage ของแต่ละชุดนำมายึดติดกับแท่นบนโต๊ะและต่อสายจาก strain gage ผ่าน bridge box เข้าสู่ตัว strain gage และต่อสาย output ไปยัง digital oscilloscope เพื่อแสดงผล และที่ปลายของใบกังหันลมจะทำการยึดตัวรับน้ำหนักถ่วง จากนั้นก็จะเพิ่มกอนน้ำหนักและทำการวัดสัญญาณความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นจาก strain gage ภายใต้ภาระที่เปลี่ยนไป

4.5 การทดลอง

นำใบกังหันลมทั้ง 2 ชุด ชุดที่เป็นใบกังหันที่เหลาให้มีรูปร่างที่ให้ประสิทธิภาพเชิงอากาศพลศาสตร์สูงสุด และชุดที่สองติดตั้งและทดลอง

4.5.1 การทดลองสมรรถนะกังหันลมแนวนอนชนิด 3 ใบ โดยใช้อุโมงค์ลม

ขั้นตอนต่างๆ ในการทดลอง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ คือ

1. ติดตั้งกังหันลมแนวนอนชนิด 3 ใบ วางแทนให้ตัว rotor อยู่ห่างจากปากอุโมงค์ลมตามที่ต้องการ (ในกรณีนี้ 1.5 เมตร)
2. ปรับรอบมอเตอร์ของอุโมงค์ลม เพื่อให้ความเร็วลมตามที่ต้องการ
3. เมื่อกังหันลมหมุนจนได้ความเร็วรอบคงที่แล้ว อ่านค่าความเร็วรอบ ซึ่งจะ เป็นความเร็วรอบสูงสุด ณ ความเร็วลมนั้นๆ
4. ใส่ น้ำหนักถ่วงดรัมเบรก อ่านค่าแรงที่ตาชั่งสปริงและน้ำหนักถ่วง
5. หลังจากอ่านค่าในข้อ 4 แล้วให้เพิ่มน้ำหนักถ่วงแล้วกลับไปทำในขั้นตอนที่ 3 อีก ขั้นตอนี่ 3 ถึง 5 นั้นจะกระทำโดยเพิ่มน้ำหนักถ่วงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเมื่อกังหันลมหยุดหมุน

6. นำน้ำหนักถ่วงออก เริ่มต้นใหม่โดยปรับให้ความเร็วลมเปลี่ยนเป็นค่าใหม่ แล้วจึงเริ่มต้นที่ขั้นตอนที่ 2 อีกครั้ง จนได้ถึงความเร็วลมสุดท้ายที่ต้องการ

7. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าสมรรถนะของกังหันลม

4.5.2 การทดลองสมรรถนะกังหันลมแนวอนชนิต 3 ใบ โดยติดตั้งบนรถปิคอัพที่แล่น

ขั้นตอนต่างๆ ในการทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ติดตั้งอุปกรณ์ ชุดใบกังหัน ชุดดรัมเบรก เครื่องวัดความเร็วรอบ และเครื่องวัดความเร็วลม บนแท่นกังหันลมท้ายรถปิคอัพที่ปราศจากหลังคา

2. เริ่มให้รถแล่นด้วยความเร็วที่สามารถทำให้ได้ความเร็วลมตามต้องการ โดยอ่านความเร็วลมจากเครื่องวัดลมที่ติดตั้งอยู่บนรถ และให้รถแล่นบนถนนสายพิษณุโลก-อุตรดิตถ์ ซึ่งเป็นถนนลาดยางที่มีลักษณะค่อนข้างเรียบ ปราศจากผิวขรุขระ

3. กังหันลมจะเริ่มหมุนจนได้ความเร็วรอบคงที่ โดยปราศจากการใส่ภาระภายนอกเข้าถ่วงที่ดรัมเบรก อ่านค่าความเร็วรอบ

4. เพิ่มภาระที่ดรัมเบรก อ่านค่าแรงที่ตราขั้วสปริงตัวบน และภาระที่ตราขั้วสปริงตัวล่างที่ใช้แรงดึง จดค่าไว้

5. เพิ่มภาระที่ดรัมเบรกมากขึ้น โดยการเพิ่มแรงดึงแล้วกลับไปทำที่ขั้นตอนที่ 3 ใหม่จนกว่ากังหันลมจะหยุดหมุน

6. ปลอยแรงดึงจากตราขั้วสปริงตัวล่าง

7. เปลี่ยนความเร็วลมใหม่ แล้วกลับไปทำขั้นตอนที่ 2

8. นำผลไปวิเคราะห์หาสมรรถนะของกังหันลม

4.5.3 การทดลองหาสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมแนวอนชนิต โดยใช้อุโมงค์ลม

ในขบวนการหาความเค้นจะมีอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องมากกว่าการทดลองหาสมรรถนะของกังหันลมอย่างเดียว ซึ่งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องเหล่านี้เวลาติดตั้งจะต้องการปรับเทียบ และเตรียมการมากพอควร ขบวนการเหล่านี้จะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ คือ

4.5.3.1 การทดลองเพื่อหาสมรรถนะและความเค้นของใบกังหันลม

1. การติดตั้งใบกังหันลมโดยมีมุมที่ทำกับระนาบกังหันตามที่กำหนด ให้ห่างจากปากอุโมงค์ลมประมาณ 90 เซนติเมตร

2. ต่อชุด Strain gage ที่ถูกติดอยู่บนใบกังหันผ่านตัว slip ring เข้าสู่ strain amplifier แล้วปรับสมดุลของวงจร bridge โดยการกดปุ่ม check balance บน strain amplifier 2 ครั้ง

3. ปรับมอเตอร์ของพัดลมอุโมงค์ลม เพื่อให้ได้ความเร็วลมตามที่กำหนด

4. เมื่อกังหันลมหมุนจนได้ความเร็วรอบคงที่แล้ว อ่านค่าความเร็วรอบ บันทึกค่า voltage และคาบของสัญญาณที่อ่านได้จาก digital oscilloscope สำหรับการทดลองที่ความเร็วลมที่ค่าประมาณ 6.0 เมตรต่อวินาที จะไม่มีการอ่านผลการทดลองขณะ no load เนื่องจากผลการสั่นสะเทือนของเพลามีมากเกินไป

5. เพิ่มน้ำหนักถ่วงดรัมเบรก อ่านค่าความเร็วรอบ

6. ถ้ากังหันลมยังไม่หยุดหมุนให้เพิ่มน้ำหนักถ่วง แล้วกลับไปยังขั้นตอนที่ 4

7. เมื่อกังหันลมหยุดหมุนให้นำน้ำหนักถ่วงออก แล้วกลับไปทำขั้นตอนที่ 3 โดยใช้ความเร็วลมใหม่

8. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาความเครียด และคำนวณหาค่าความเค้นที่โคนใบกังหันลมแนวขนานต่อ

4.5.3.2 การทดลองเพื่อหาขอบเขตความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่เกิดจากตัว slip ring

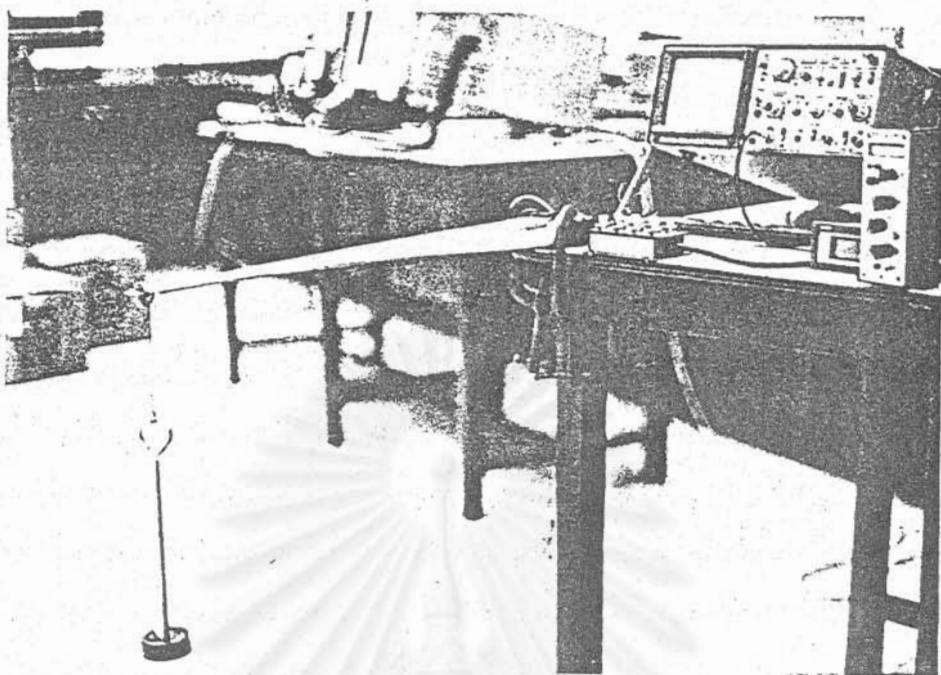
เนื่องจาก slip ring เป็นอุปกรณ์ส่งผ่านสัญญาณจาก sensor ที่ถูกติดบนวัตถุที่หมุนผ่านสู่เครื่องวัดโดยใช้ตัวแปรถ่วงและวงแหวนโลหะ เวลาเพลาลมจะเกิดการสัมผัสกันระหว่างแปรถ่วงกับวงแหวนโลหะ และจะก่อให้เกิดความต้านทานในตัวมันเอง ซึ่งแปรตามความเร็วรอบ ถ้าหากสัญญาณที่ถูกส่งผ่านมีค่าที่สูงกว่าค่าสัญญาณที่เกิดจากความต้านทานที่แปรเปลี่ยนของตัว slip ring เองมาก เราก็จะสามารถละทิ้งค่าความคลาดเคลื่อนนี้ได้ แต่สำหรับค่าสัญญาณที่เกิดจากการยึดและหดบนใบกังหันในการวิจัยนี้มีค่าน้อยมาก ดังนั้น จึงได้พยายามที่จะหาค่าสัญญาณมิลลิโวลต์ที่เกิดขึ้นจากการหมุนของตัว slip ring อย่างเดียว เพื่อนำไปหักออกจากสัญญาณที่วัดได้เพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำขึ้น แต่หลังจากการทดลอง โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าและ Transistor inverter ขับตัว slip ring ที่ความเร็วรอบต่างๆกัน พบว่าค่าความต้านทานของตัว slip ring ที่หมุนนั้นเกิดขึ้นในลักษณะเป็นแบบสุ่ม (random) ดังนั้นถึงแม้ว่า จะจัดการทดลองแบบเดียวกันด้วยอุปกรณ์ชุดเดียวกัน แต่โอกาสที่ผลการทดลอง จะเหมือนกันหรือซ้ำกันจึงมีน้อยมาก

การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อหาค่าผลของความต้านทานเนื่องจากการหมุนของ slip ring เมื่อใช้งานกับชุดกังหันลมนั้น ใช้ความต้านทานแบบ metal film 120 โอห์ม ทั้งหมด 4 ตัว ต่อเป็นวงจร full bridge แทนตัว strain gage แล้วต่อสายสัญญาณจากวงจร bridge มาเชื่อมที่ terminal board ด้านหลังของ slip ring แล้วต่อสายเคเบิลจาก connector ที่ด้านบนของ slip ring มาเข้าที่ signal input ของเครื่อง strain amplifier แล้วจึงนำสัญญาณ voltage output จาก strain amplifier มาเข้า digital oscilloscope การทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เลือกชุดใบกังหันที่จะใช้ในการทดลอง แล้วนำไปติดตั้งให้ครบ
2. กดปุ่ม check balance บน strain amplifier 2 ครั้ง เพื่อทำการปรับสมดุลของวงจร bridge
3. ปรับความเร็วลมให้มีค่าตามที่ต้องการ
4. เมื่อกังหันลมหมุนจนได้ความเร็วรอบคงที่แล้ว อ่านค่าความเร็วรอบบันทึกค่า Voltage และคาบของสัญญาณที่อ่านได้จาก digital oscilloscope
5. เพิ่มน้ำหนักถ่วงดรัมเบรก เพื่อให้ความเร็วรอบลดลง กลับไปที่ขั้นตอนที่ 4 ถ้ากังหันยังไม่หยุดหมุน

4.5.3.3 การทดลองเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of elasticity ของใบกังหันลมกับค่าความเครียดที่อ่านได้จาก strain amplifier

1. นำใบกังหันมายึดบนแท่นหรือโต๊ะให้แน่น โดยให้ระนาบของใบกังหันอยู่ในแนวระดับ
2. วัดระยะจากจุด support มาถึงจุดที่ทำการวัด deflection และจุดถ่วงน้ำหนัก
3. ถ่วงน้ำหนักและบันทึกระยะที่ใบกังหันโก่งลงจากแนวระนาบ และบันทึกค่า voltage จาก strain amplifier
4. เพิ่มน้ำหนักและบันทึกค่า



รูปที่ 4.15 การทดลองหาความสัมพันธ์ของค่า Modulus of elasticity ของไบกัณฑ์นมกับภาวะ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการทดลองและผลเฉลยจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

5.1 บทนำ

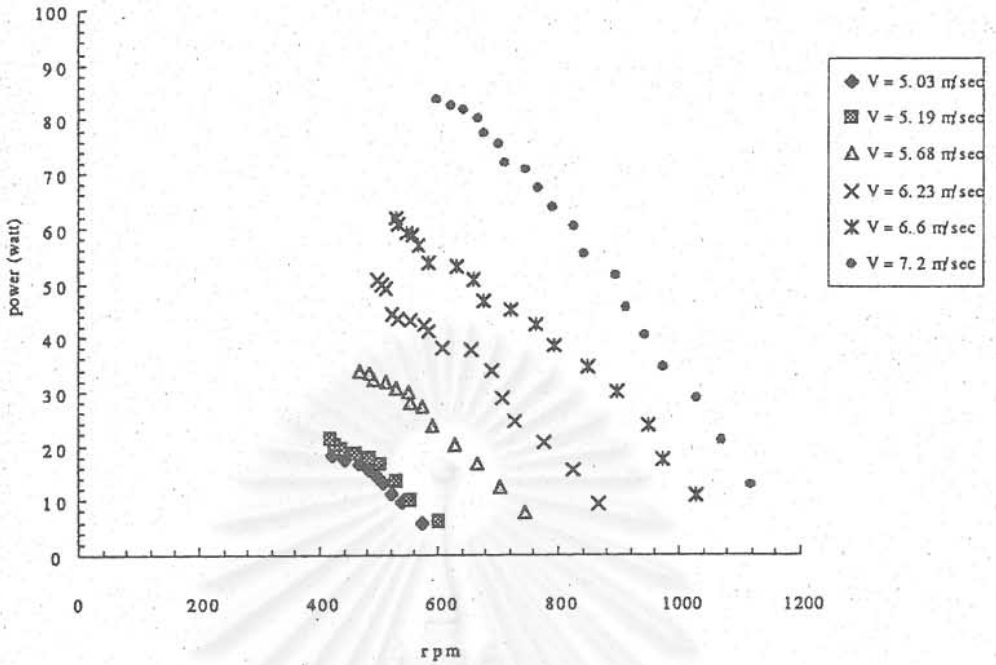
ผลการทดลองเกี่ยวกับสมรรถนะของกังหันลมแนวนอน 2 ชุด ที่ถูกติดตั้งบนแท่นและทดสอบกับอุโมงค์ลม และติดตั้งบนรถปิคอัพถูกนำเสนอในบทนี้ ผลเฉลยของสมรรถนะของกังหันลมแนวนอนทั้ง 2 ชุด ที่ทำงานภายใต้สภาวะเดียวกับการทดลองในอุโมงค์ลม และติดตั้งบนรถปิคอัพจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ถูกนำเสนอเพื่อเปรียบเทียบกับผลทดลอง ผลของ Reynolds number ที่มีต่อสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงบนใบกังหันลม ได้ถูกวิเคราะห์เพื่ออธิบายค่าสมรรถนะที่เปลี่ยนแปลงไป ผลการทดลองของค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่โคนของใบกังหันลมที่วัดได้จาก strain gage ก็ถูกนำมาแสดงและคำนวณเป็นค่าความเค้น เพื่อเปรียบเทียบกับค่าความเค้นที่ได้จากผลเฉลยจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วย

5.2 ผลการทดลองสมรรถนะของกังหันลมแนวนอนที่ทดสอบกับอุโมงค์ลมและติดตั้งบนรถปิคอัพ

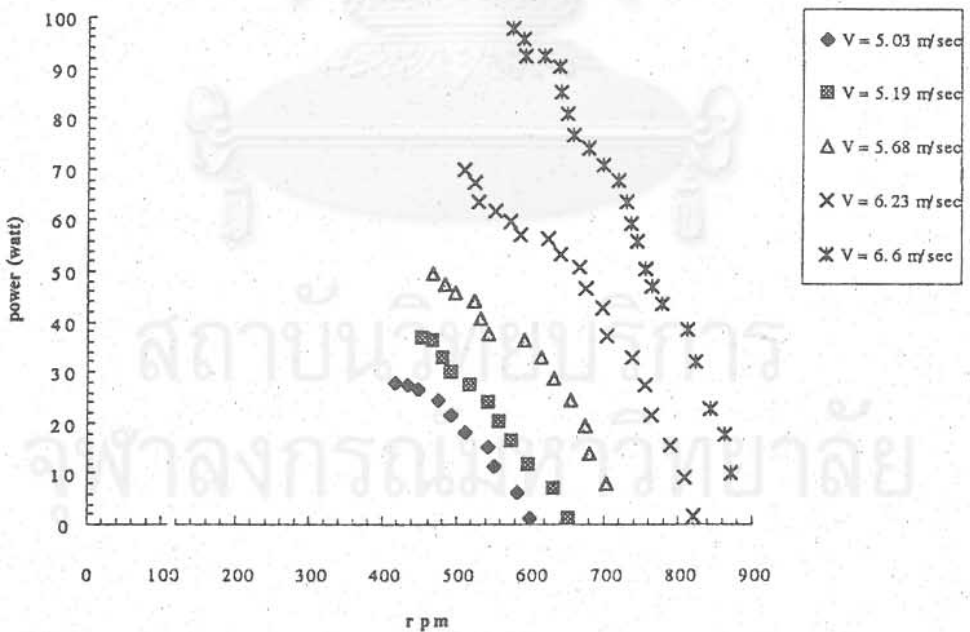
5.2.1. กำลังและโมเมนต์บิดที่แปรตามความเร็วรอบ

ผลการทดลองของค่ากำลังและโมเมนต์บิดที่ได้จากการใช้อุโมงค์ลมของกังหันลมทั้ง 2 ชุด ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5.1 5.2 5.3 5.4 ภายใต้ความเร็วลมที่แตกต่างกันไป และรูปที่ 5.5 และ 5.6 จะแสดงถึงผลการทดลองของกำลังและโมเมนต์บิดของกังหันลมชุดแรก ที่ติดตั้งบนรถปิคอัพ รายละเอียดของข้อมูลผลการทดลองถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ง.

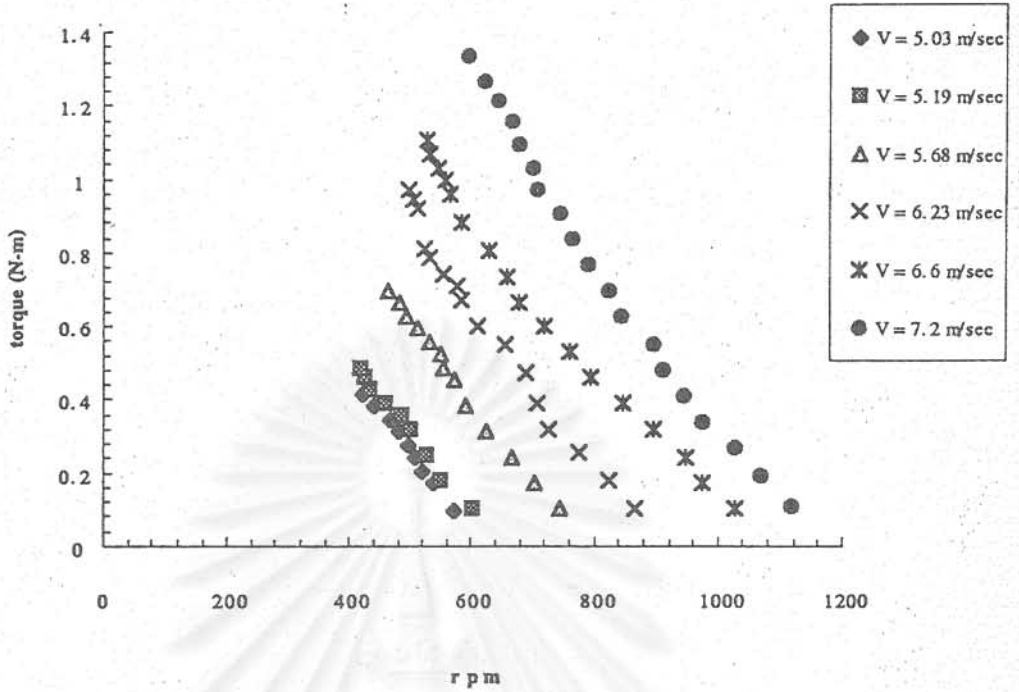
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



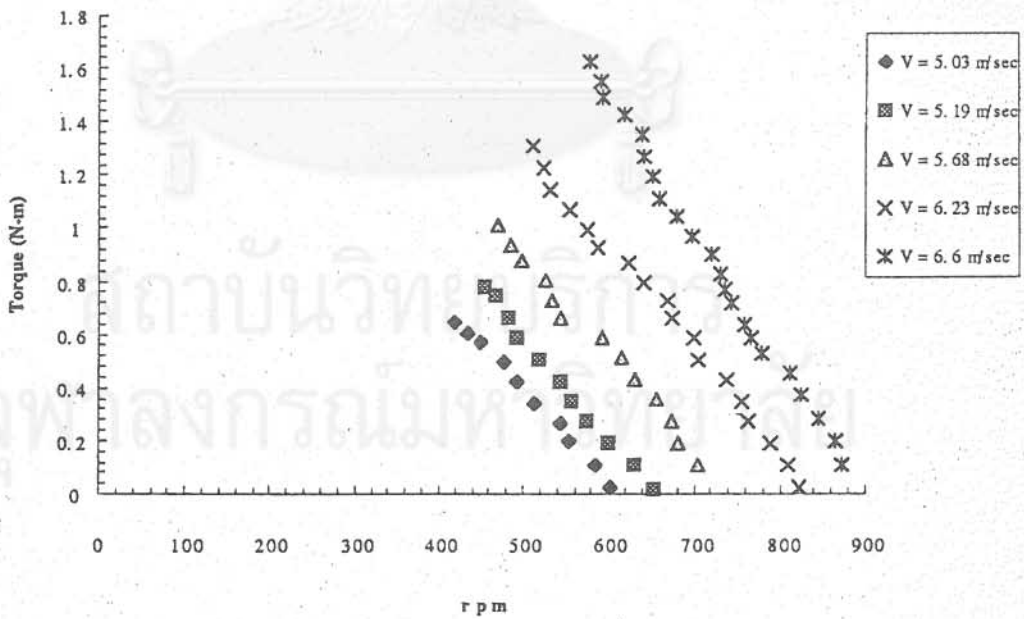
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของกังหันลมกับความเร็วรอบของกังหันลมชุดแรก โดยใช้อุโมงค์ลมที่ความเร็วลมต่างๆ กัน



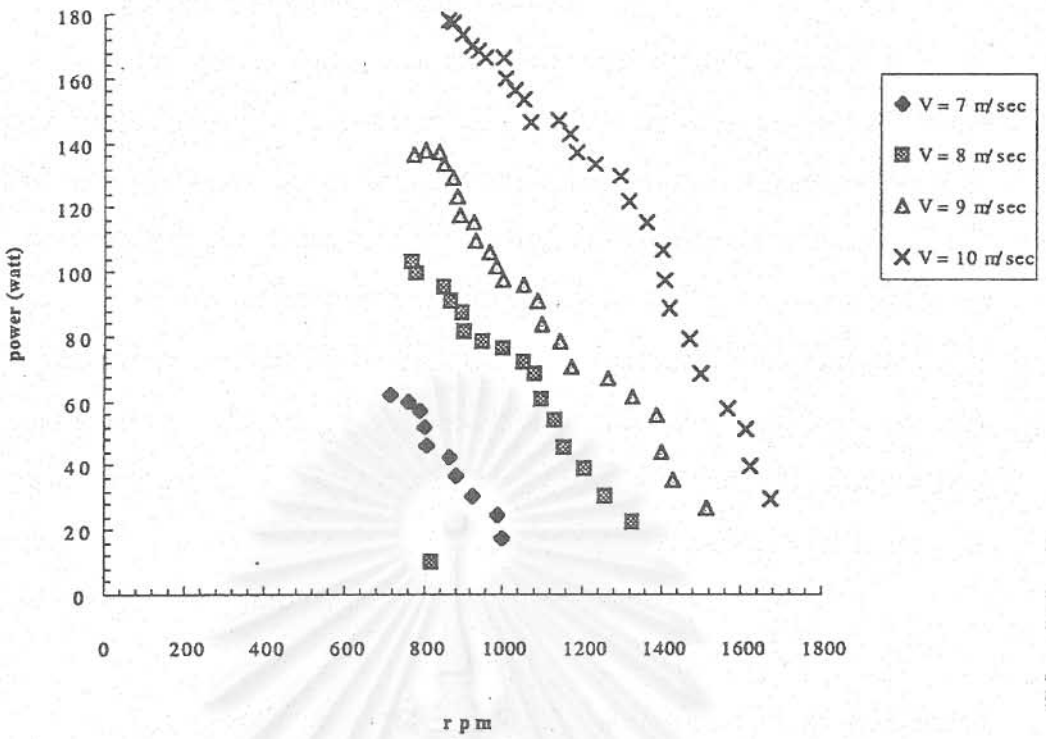
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของกังหันลมกับความเร็วรอบของกังหันลมชุดที่สอง โดยใช้อุโมงค์ลมที่ความเร็วลมต่างๆ กัน



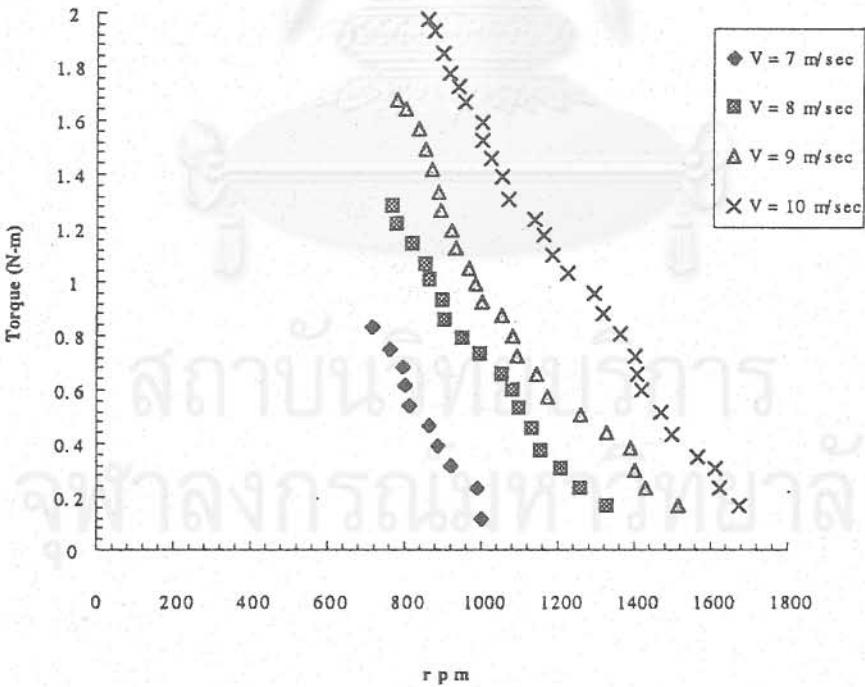
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ปิดกับความเร็วยรอบของกังหันลมชุดแรก
โดยใช้อุโมงค์ลมที่มีความเร็วลมต่างๆ กัน



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์เปิดกับความเร็วยรอบของกังหันลมชุดที่สอง
โดยใช้อุโมงค์ลมที่มีความเร็วลมต่างๆ กัน



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ของกำลังกับความเร็วยรอบของกังหันลมชุดแรก
ที่ถูกติดตั้งบนรถปิคอัพ ที่ความเร็วลมต่างๆ กัน

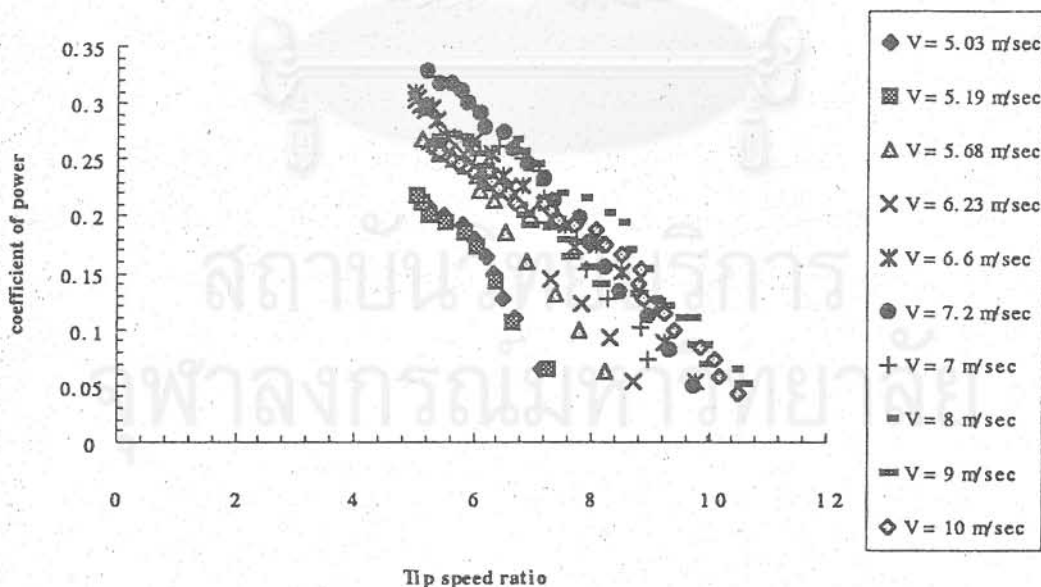


รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ของโมเมนต์บิดกับความเร็วยรอบของกังหันลมชุดแรก
ที่ถูกติดตั้งบนรถปิคอัพที่ความเร็วลมต่างๆ กัน

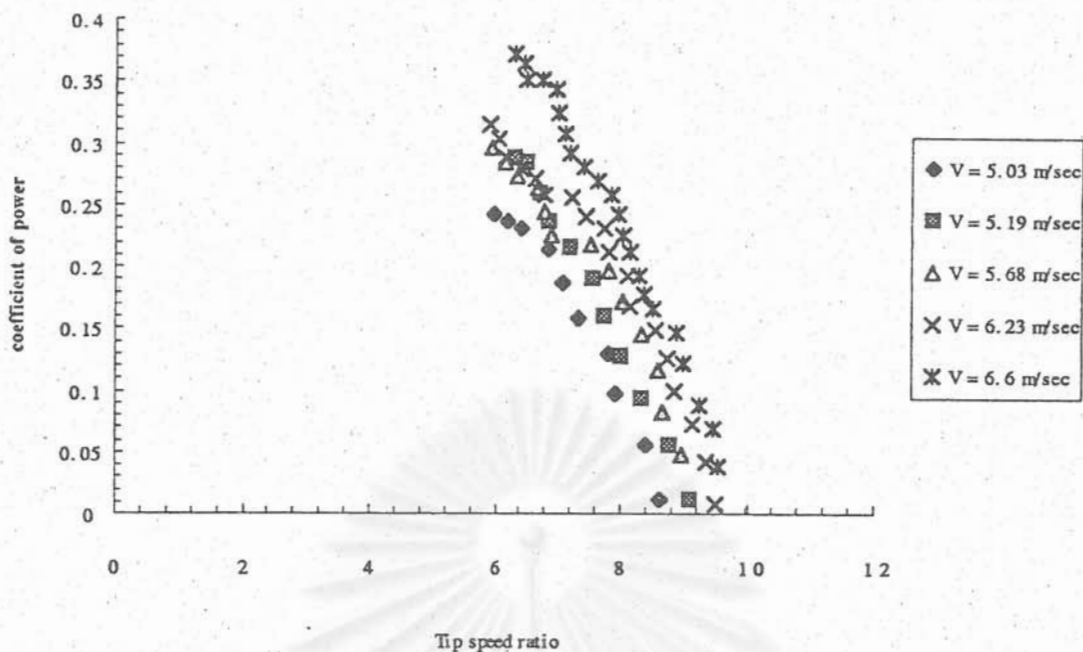
5.2.2. สัมประสิทธิ์ของกำลังจากการทดลอง

ในหัวข้อ 5.2.1. สมรรถนะถูกแสดงในรูปของกำลังและโมเมนต์บิด ซึ่งค่าเหล่านี้จะแปรตามขนาดของกังหันลมและความเร็วลม เมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของกังหันลมหรือเงื่อนไขการทำงาน ค่าสมรรถนะจะเปลี่ยนไป การเปรียบเทียบเพื่อหาผลกระทบของขนาดหรือเงื่อนไขการทำงานที่มีต่อสมรรถนะ จะแสดงการเปรียบเทียบได้ค่อนข้างลำบาก เพราะตัวแปรมีจำนวนมาก วิธีหนึ่งที่นิยมก็คือ การทำให้เป็นเทอมไร้มิติ (dimensionless term) ดังนั้น การนำเสนอสมรรถนะของกังหันลมในรูปแบบที่นิยม จะนำเสนอเป็นค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (coefficient of power ($P/(1/2\rho AV_\infty^3)$) กับค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบ (tip speed ratio ($R\Omega/V_\infty$)) ในกรณีที่ความเร็วลมคงที่ ความเร็วรอบแปรตามภาวะ หรือนำเสนอสมรรถนะในรูปของสัมประสิทธิ์กำลัง ($P/(1/2\rho AR^3\Omega^3)$) กับส่วนกลับของอัตราส่วนความเร็วปลายใบ ($V_\infty/R\Omega$) ในกรณีที่กังหันลมถูกให้ทำงานที่ความเร็วรอบคงที่ แล้วแปรเปลี่ยนความเร็วลม

ในการวิจัยนี้จะเสนอผลทดลองอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังและอัตราส่วนความเร็วปลายใบ รูปที่ 5.7 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์กำลังกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมชุดแรกที่ได้จากการทดลองกับอุโมงค์ลม และติดตั้งบนรถปีกอัฟที่ความเร็วลมต่างๆ กัน รูปที่ 5.8 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์กำลังกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมชุดที่สองที่ได้จากการทดสอบกับอุโมงค์ลมที่ความเร็วลมต่างๆ กัน



รูปที่ 5.7 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมชุดแรก

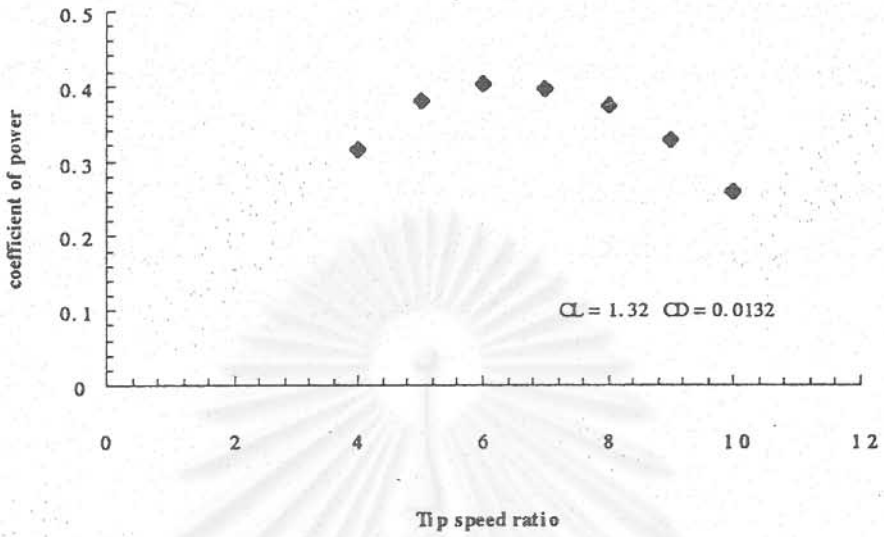


รูปที่ 5.8 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมชุดที่สอง

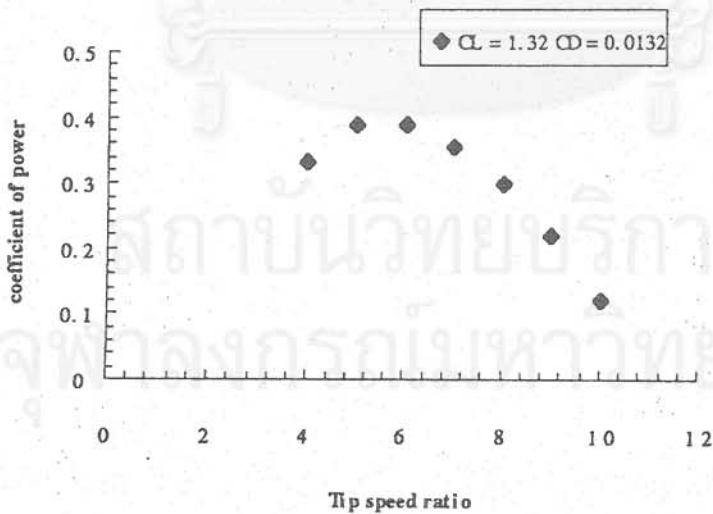
5.3 ผลเฉลยของสมรรถนะในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จะเห็นได้จากหัวข้อใน 5.2.2. สมรรถนะของกังหันลมแนวอนทั้ง 2 ชุด ที่อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังนั้น ที่ค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบค่าหนึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังหลายค่า ขึ้นกับค่าความเร็วลมที่กังหันลมเห็น แต่ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ผลเฉลยจะได้ค่าสมรรถนะเพียงชุดเดียวไม่ขึ้นกับความเร็วลม รูปที่ 5.9 และ 5.10 แสดงถึงสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมทั้ง 2 ชุด โดยใช้ข้อมูลของสัมประสิทธิ์แรงยกแรงหน่วงที่มีค่า $C_{L_{max}} = 1.32$, $C_{D0} = 0.0132$ รายละเอียดของข้อมูลขาเข้าและผลเฉลยของสัมประสิทธิ์กำลังถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ค.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



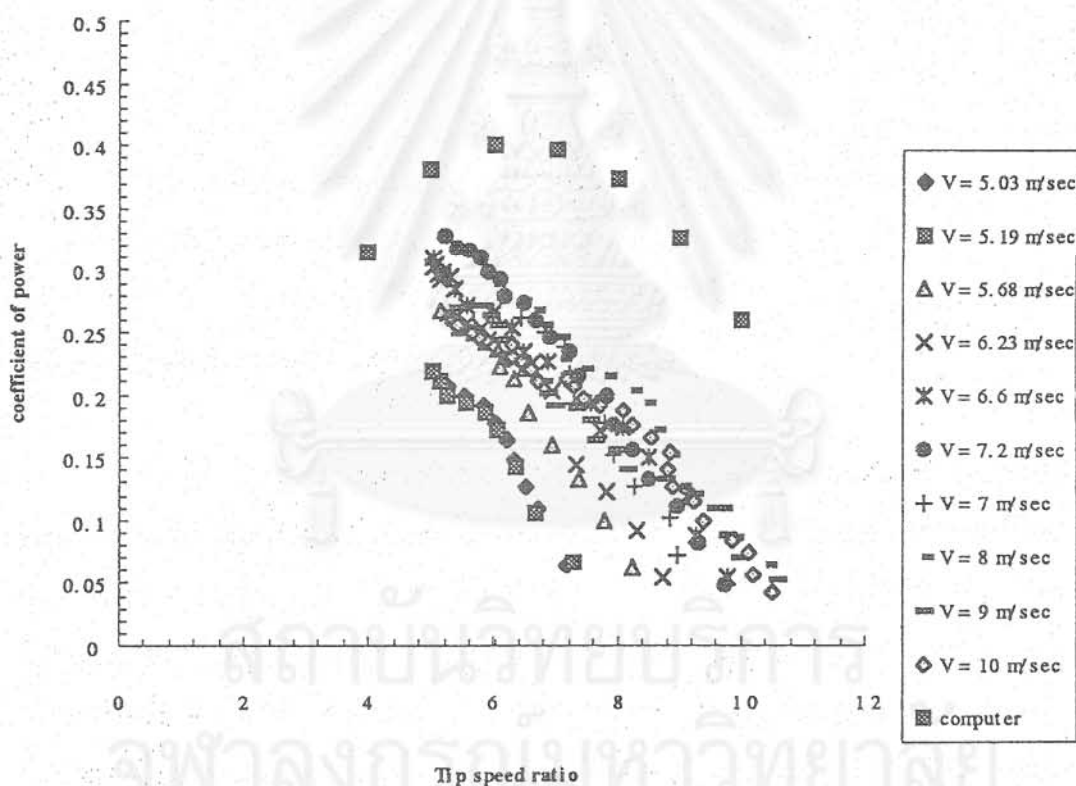
รูปที่ 5.9 สัมประสิทธิ์กำลังกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมชุดแรก
ที่ได้จากผลเฉลยโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



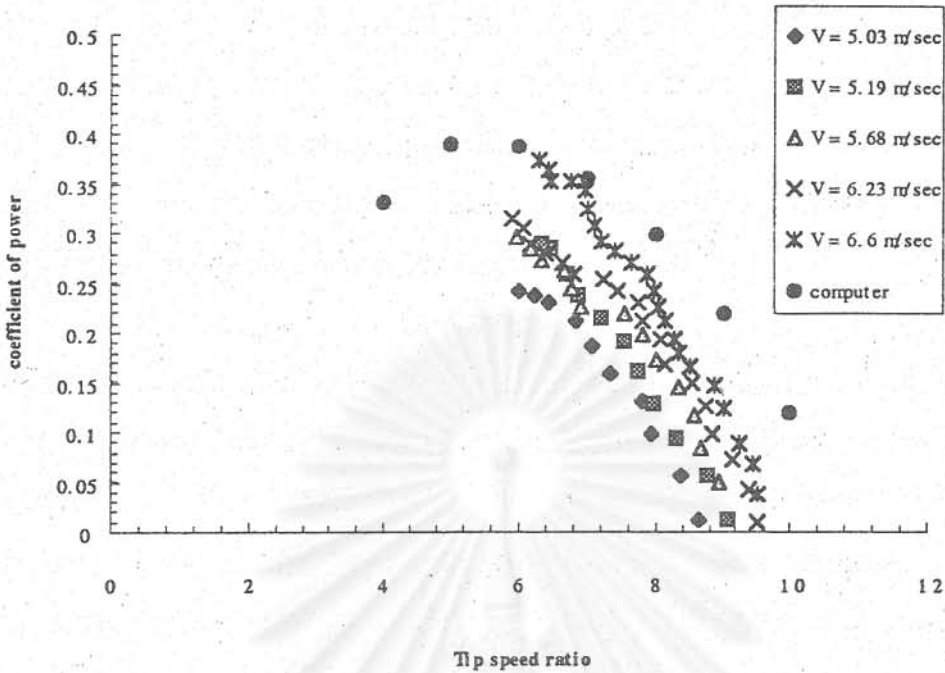
รูปที่ 5.10 สัมประสิทธิ์กำลังกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมชุดที่สอง
ที่ได้จากผลเฉลยโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

5.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมระหว่าง ผลการทดลองและผลเฉลยจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ค่าสมรรถนะของกังหันลมชุดแรกในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกังหันลมชุดแรกในรูปที่ 5.9 ถูกนำมาพล็อตลงร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมชุดแรกที่ได้จากการทดลองในรูปที่ 5.7 เป็นค่าเปรียบเทียบในรูปที่ 5.11 และในทำนองเดียวกันค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกังหันลมชุดที่สองในรูปที่ 5.10 ถูกนำมาพล็อตลงร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมชุดที่สองที่ได้จากการทดลองในรูปที่ 5.8 เป็นค่าเปรียบเทียบในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.11 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์กำลังที่ได้จากการทดลองและจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกังหันลมชุดแรก



รูปที่ 5.12 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์กำลังที่ได้จากการทดลองและจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกังหันลมชุดที่สอง

5.5 ผลของเลขเรย์โนลด์ต่อสมรรถนะของกังหันลม

จากรูปที่ 5.11 จะเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าแตกต่างกับค่าที่ได้จากการทดลองค่อนข้างมาก โดยเฉพาะในช่วงที่มีค่าอัตราส่วนปลายใบสูง (6 - 10) ในขณะที่ในรูปที่ 5.12 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากกว่า จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ได้จากผลเฉลยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกังหันลมชุดแรกมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของกังหันลมชุดที่สอง ตลอดย่านของค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบซึ่งสอดคล้องกับทางทฤษฎี เนื่องจากกังหันลมชุดแรกมีใบกังหันลมที่ได้รับการออกแบบให้มีประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์สูงสุด ในขณะที่กังหันลมชุดที่สองไม่ได้มีการออกแบบในลักษณะดังกล่าว แต่อย่างไรก็ดีจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า สัมประสิทธิ์กำลังนั้นมีค่าแปรตามความเร็วลม (เส้นโค้งหลายชุด) และค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมชุดแรกกลับมีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลังกังหันลมชุดที่สอง

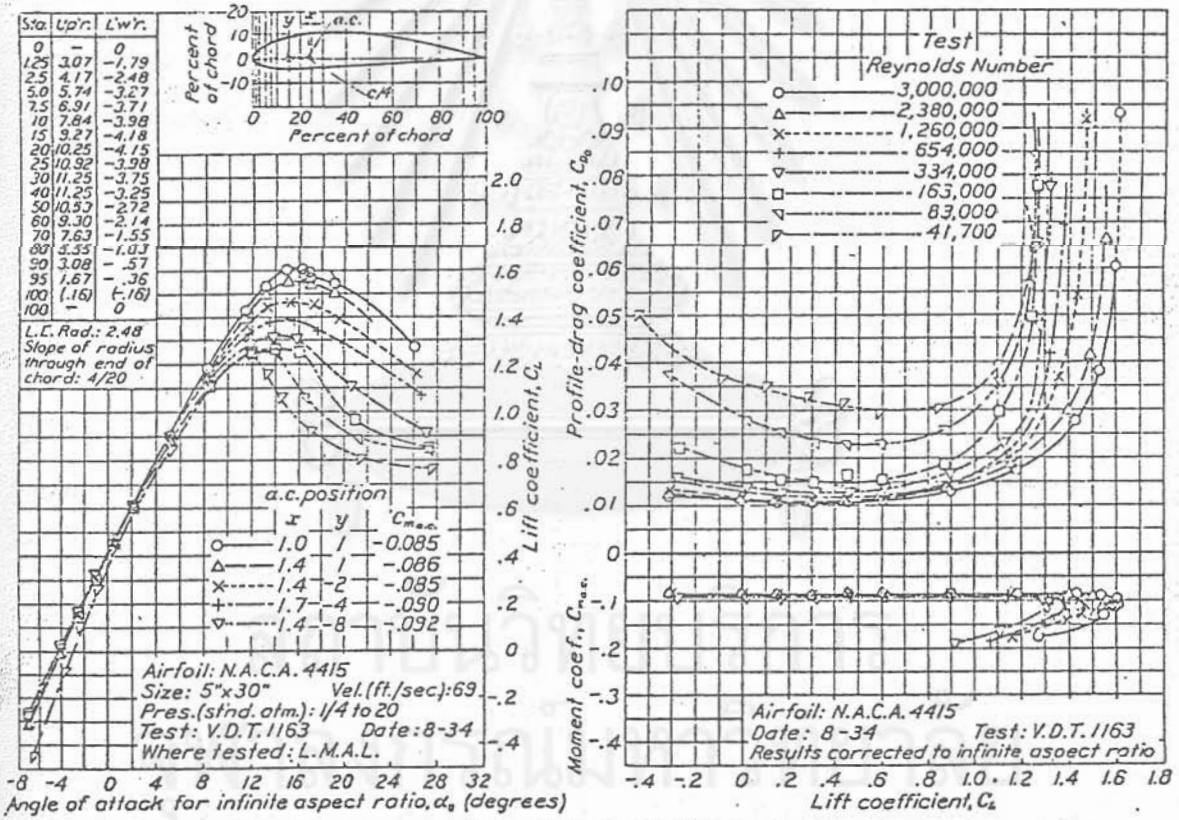
เหตุผลของการที่สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมที่ถูกออกแบบไว้เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์สูงกลับมีค่าน้อยกว่าก็เพราะผลของตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ที่มีต่อสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงของใบกังหันลม ตัวเลขเรย์โนลด์ของอากาศที่ไหลผ่านใบกังหันลมก็คือ ผลคูณของความเร็วที่ผู้สังเกตการณ์บนใบกังหันเห็นกับความกว้างของใบกังหันหารด้วยความหนืดคิเนมาติกส์ (kinematic viscosity) Wc/ν ซึ่งสำหรับอากาศที่เงื่อนไขอยู่ที่ระดับน้ำทะเลทั่วไป สามารถเขียนตัวเลขเรย์โนลด์ได้เป็น

$$\text{Rey} = 69,000 Wc \quad (75)$$

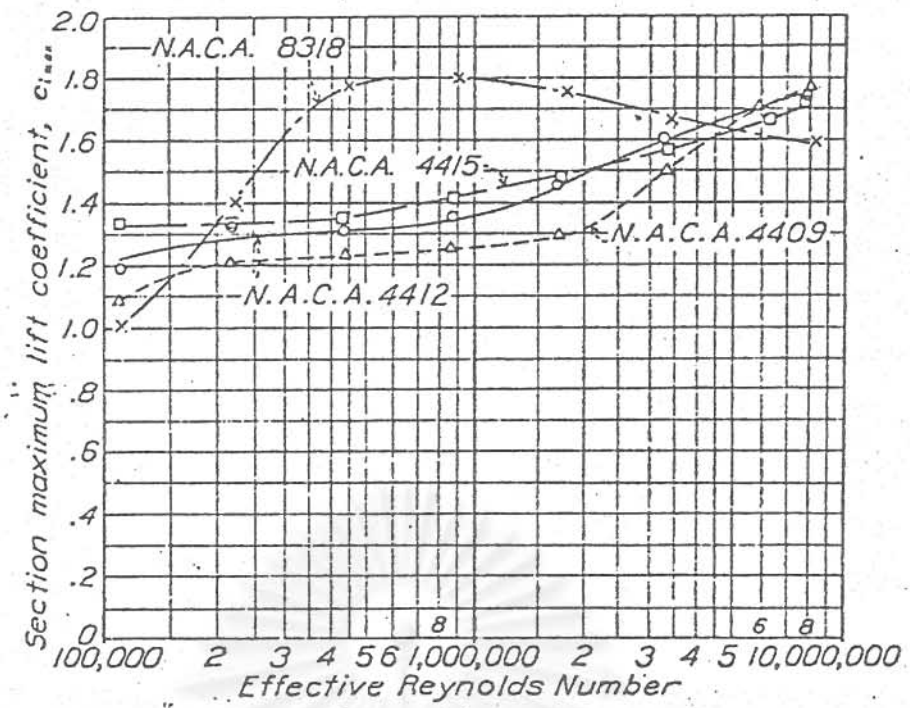
ซึ่งตัวเลขเรย์โนลด์เหล่านี้จะมีผลโดยตรงต่อแรงยกและแรงหน่วงที่เกิดขึ้นบนใบกังหันลม จากทฤษฎีอากาศพลศาสตร์จะเห็นได้ว่า ในกรณีที่มีการไหลเป็นการไหล 2 มิติ การที่อากาศไหลผ่านภาคตัดขวางของใบกังหันลมที่มีรูปร่างเป็นแพนอากาศ (airfoil) จะทำให้เกิดความดันแตกต่างกันระหว่างผิวด้านบนและด้านล่างของแพนอากาศ ซึ่งสภาวะการกระจายตัวของความดันนี้ขึ้นกับรูปร่างของแพนอากาศและมุมปะทะซึ่งจะทำให้เกิดแรงยกขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็จะเกิด Boundary layer ขึ้นที่ผิวของแพนอากาศทั้งสองข้าง ซึ่งเป็นตัวก่อให้เกิดแรงเสียดทานผิว (skin friction drag) บวกกับแรงหน่วงจาก normal stress ซึ่งเรียกว่า pressure drag และถ้ามุมปะทะมีค่าสูงมากจนทำให้เกิด adverse pressure gradient สูงพอก็จะเกิด separation ซึ่งก็จะทำให้แรงหน่วงมีค่าสูงขึ้นมากและแรงยกลดน้อยลง ซึ่งจะเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า Stall ปรากฏการณ์ที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นขึ้นกับแฟคเตอร์หลายตัว อาทิเช่น รูปร่างของภาคตัดขวางใบกังหันลม ความเรียบของผิวแพนอากาศ ตัวเลขเรย์โนลด์ มุมปะทะ ความปั่นป่วนของอากาศ (turbulence) เป็นต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่า แรงยกและแรงหน่วงจะขึ้นกับตัวเลขเรย์โนลด์และความเรียบของผิวค่อนข้างมาก ในขณะที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลม ซึ่งใช้ทฤษฎีสตรีปในการหาค่าคิเนมาติกส์นั้น (รายละเอียดดูในบทที่ 2) จะต้องรู้ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วง (C_L และ C_D) และในความเป็นจริง C_L และ C_D นั้นจะแปรค่าตามค่าตัวเลขเรย์โนลด์ตลอดเวลา ดังนั้น ในการที่จะให้ได้ผลเฉลยที่แม่นยำจะต้องรู้ค่า C_L และ C_D ของแพนอากาศที่ทำงานอยู่ภายใต้อากาศที่ไหลด้วยค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่างๆ กันทุกค่า

ซึ่งในความเป็นจริงกระทำได้ยาก เนื่องจากข้อมูล C_L และ C_D ของแพนอากาศมีค่อนข้างจำกัด ในอุตสาหกรรมเครื่องบินปัญหาของผลกระทบของตัวเลขเรย์โนลด์ต่อสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงจะมีไม่มากนัก เนื่องจากเมื่อแพนอากาศถูกทำงานภายใต้อากาศไหลที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่สูงพอ สัมประสิทธิ์ของแรงยกและแรงหน่วงจะไม่แปรเปลี่ยนมากนัก เพราะว่า flow ทั้งหมดอยู่ในสภาวะ turbulence ข้อมูลของสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงที่ตัวเลขเรย์โนลด์สูงสำหรับใช้ในวิทยาการเกี่ยวกับเครื่องบินนั้นมีค่อนข้างมากและสมบูรณ์ แต่

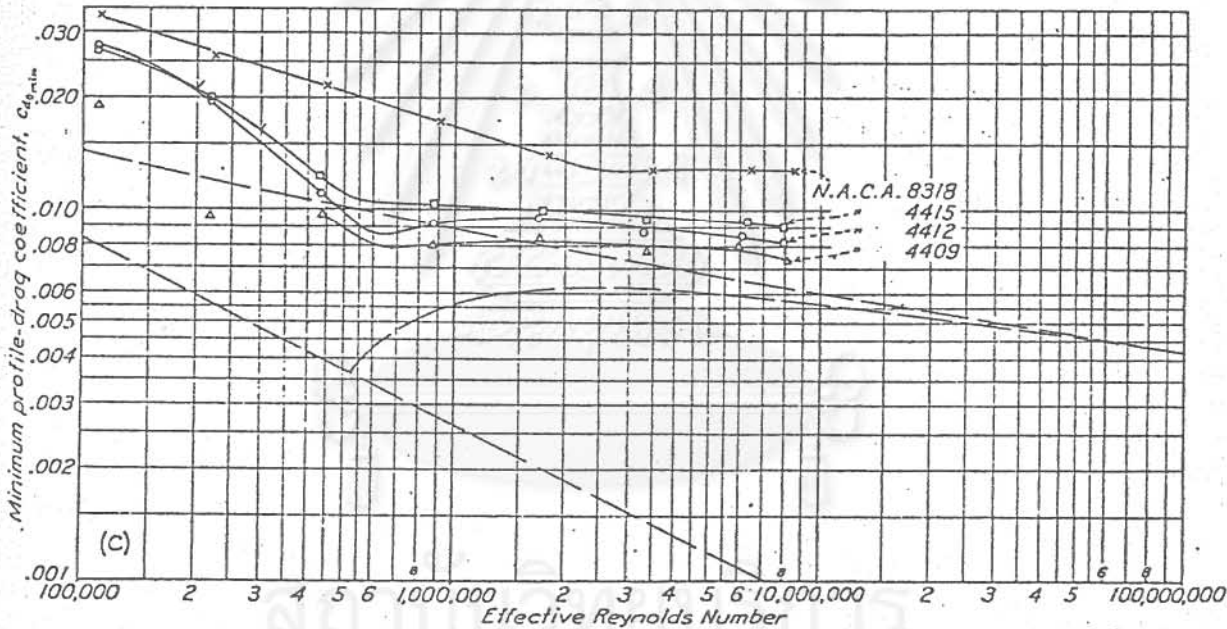
ทางตรงกันข้ามในวิทยาการเกี่ยวกับกังหันลม ใบกังหันลมนั้นทำงานภายใต้อากาศที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่ค่อนข้างต่ำ ข้อมูลอากาศพลศาสตร์ทั่วไปที่มีใช้ในวิทยาการเกี่ยวกับเครื่องบินนั้นมักไม่สามารถนำมาใช้กับกังหันลมได้ ข้อมูลอากาศพลศาสตร์ที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำในช่วงการทำงานของกังหันลมนั้นมีน้อยมากและไม่สมบูรณ์ จนกระทั่งเมื่อมีการวิจัยพัฒนากังหันลมอย่างจริงจังขึ้นในทศวรรษที่ 70 จึงเริ่มมีการศึกษาและรวบรวมข้อมูลเหล่านี้อย่างจริงจังดังที่มีไว้ในเอกสาร [16, 17] อย่างไรก็ตาม จะเห็นว่าข้อมูลอากาศพลศาสตร์นั้นเปลี่ยนแปลงมากในช่วงของ laminar boundary layer กับ turbulent boundary layer และข้อมูลที่มีอยู่สำหรับ NACA 4415 ในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำนั้นมีจำกัด



รูปที่ 5.13 ก. ข้อมูลอากาศพลศาสตร์ของ NACA 4415 ที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่างๆ กัน [17]



รูปที่ 5.13 ข. ผลกระทบของเลขเรย์โนลด์ที่มีต่อสัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุด



รูปที่ 5.13 ค. ผลกระทบของเลขเรย์โนลด์ที่มีต่อสัมประสิทธิ์แรงหน่วงต่ำสุด

สำหรับการทดลองกับอุโมงค์ลมจะเห็นได้ว่า ความเร็วลมสูงสุดที่ใช้กับกังหันลมชุดแรกเท่ากับ 7.2 เมตรต่อวินาที และ 6.6 เมตรต่อวินาทีสำหรับกังหันลมชุดที่สอง ซึ่งถ้าพิจารณาตัวเลขเรย์โนลด์ที่กังหันลมทั้ง 2 ชุดทำงาน จะเห็นว่าเนื่องจากกังหันลมชุดแรกมีค่าความกว้างใบกังหันเล็กกว่าใบกังหันลมชุดที่สองมากพอควร ทำให้กังหันลมชุดแรกทำงานภายใต้อากาศไหลที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่น้อยกว่ามาก

X	กังหันชุดแรก		กังหันชุดที่สอง	
	$r/R = 0.90 - 0.70$	$r/R = 0.70 - 0.40$	$r/R = 0.90 - 0.75$	$r/R = 0.75 - 0.40$
	Rey	Rey	Rey	Rey
5	$6.4 - 7.5 \times 10^4$	$6 - 7.5 \times 10^4$	$1.1 - 1.4 \times 10^5$	$0.75 - 1.1 \times 10^5$
6	$7.8 - 8.8 \times 10^4$	$6 - 9.2 \times 10^4$	$1.4 - 1.7 \times 10^5$	$1 - 1.4 \times 10^5$
7	$\sim 1 \times 10^5$	$0.9 - 1 \times 10^5$	$1.6 - 1.9 \times 10^5$	$1 - 1.6 \times 10^5$
8	$\sim 1.1 \times 10^5$	$\sim 1.2 \times 10^5$	$1.6 - 1.9 \times 10^5$	$1 - 1.7 \times 10^5$
9	$1.1 - 1.3 \times 10^5$	$1 - 1.35 \times 10^5$	$2 - 2.5 \times 10^5$	$1.37 - 2.2 \times 10^5$
10	$1 - 1.45 \times 10^5$	$1 - 1.5 \times 10^5$	$2.5 - 2.8 \times 10^5$	$1.5 - 2.3 \times 10^5$

ตารางที่ 5.1 ความสัมพันธ์ของตัวเลขเรย์โนลด์ของกังหันลมสองชุดที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบต่างๆ กัน กังหันลมชุดแรกทำงานภายใต้ความเร็วลม 7.2 เมตร/วินาที กังหันลมชุดที่สองทำงานภายใต้ความเร็วลม 6.6 เมตร/วินาที

X	กังหันชุดแรก	
	$r/R = 0.90 - 0.70$	$r/R = 0.70 - 0.40$
	Rey	Rey
6	$\sim 1.1 \times 10^5$	$1 - 1.2 \times 10^5$
7	$1.2 - 1.4 \times 10^5$	$1.2 - 1.5 \times 10^5$
8	$1.3 - 1.6 \times 10^5$	$1.3 - 1.7 \times 10^5$
9	$1.5 - 1.8 \times 10^5$	$1.6 - 1.9 \times 10^5$
10	$1.8 - 2 \times 10^5$	$1.8 - 2 \times 10^5$

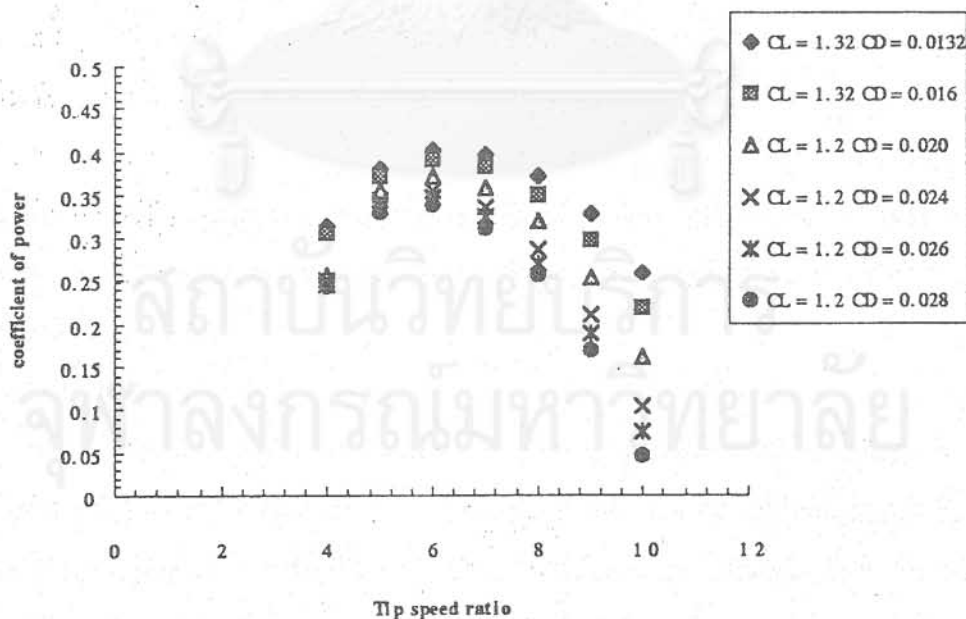
ตารางที่ 5.2 ความสัมพันธ์ของตัวเลขเรย์โนลด์ของกังหันลมชุดแรกที่ติดตั้งบนรถปิดอัทภายใต้ความเร็วลม 10 เมตร/วินาที

หมายเหตุ: ตัวเลขเรย์โนลด์ที่แสดงในตาราง 5.1 และ 5.2 เป็นค่าประมาณการโดยสมมติให้ความเร็วที่คำนวณ $W \cong \omega r$ (เนื่องจากพบว่าเมื่อนำค่าแฟคเตอร์เหนี่ยวนำตามแกน a จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาคิดในการหาค่าความเร็วลม W จะมีค่าใกล้เคียงกับค่า ωr มาก)

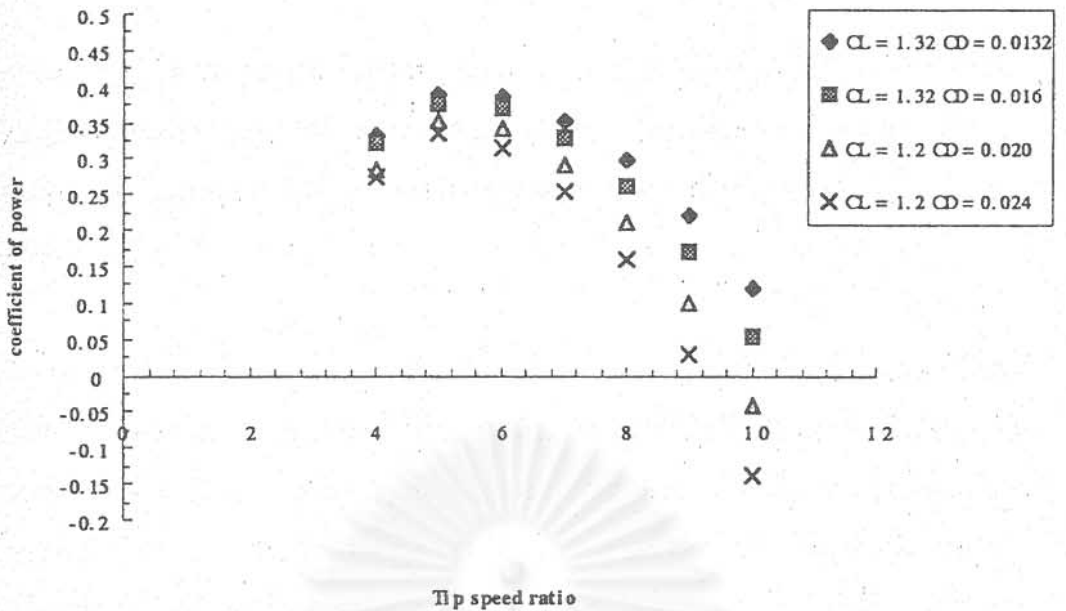
จากตัวเลขในตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ชัดว่า กังหันลมชุดแรกทำงานอยู่ภายใต้ตัวเลขเรย์โนลด์ที่ต่ำกว่ากังหันลมชุดที่สอง ซึ่งจากรูปที่ 5.13 จะเห็นได้ชัดเจนสมรรถนะของกังหันลมที่ทำงานอยู่ใต้ตัวเลขเรย์โนลด์ที่ต่ำจะให้ค่าน้อยกว่าที่ทำงานอยู่ใต้ตัวเลขเรย์โนลด์ที่สูง เนื่องจากแรงยกจะลดลงแต่แรงหน่วงจะเพิ่มขึ้น

สำหรับในตารางที่ 5.2 แสดงถึงกังหันลมชุดแรกที่ทำงานภายใต้อากาศไหลที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่สูงกว่า (ทำงานภายใต้ความเร็วลม 10 เมตร/วินาที)

จะเห็นได้ว่า กังหันลมชุดแรกทำงานภายใต้อากาศไหลที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่ค่อนข้างต่ำ ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบต่ำและเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราความเร็วปลายใบสูงขึ้น และในแต่ละตำแหน่งบนใบกังหันก็ทำงานภายใต้อากาศที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่แตกต่างกัน ดังนั้น เพื่อทำการปรับปรุงแบบจำลองคณิตศาสตร์ของกังหันลม โดยที่จะนำเอาผลของตัวเลขเรย์โนลด์เข้าไปคิดด้วย ข้อมูลของสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงซึ่งถูกดัดแปลงเพื่อให้เข้ากับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ตามที่ได้บรรยายไว้ในบทที่ 3 นั้น จะถูกปรับปรุงโดยการเปลี่ยนค่า C_{D0} และ C_{Lmax} เพื่อให้สอดคล้องกับผลของค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่เปลี่ยนไป รูปที่ 5.14 เป็นผลเฉลยของสมรรถนะจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกังหันลมชุดแรกที่ค่า C_{D0} และ C_{Lmax} ที่ต่างกัน รูปที่ 5.15 เป็นผลเฉลยของสมรรถนะจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกังหันลมชุดที่สอง



รูปที่ 5.14 สัมประสิทธิ์กำลังกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมชุดแรกที่ C_{D0} และ C_{Lmax} ต่างๆ กัน



รูปที่ 5.15 สัมประสิทธิ์กำลังกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมชุดที่สองที่ C_{D0} และ C_{Lmax} ต่างๆ กัน

จากรูปที่ 5.14 จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์ของแรงหน่วง C_{D0} หรือ C_L/C_{Dmax} นั้นมีผลต่อสัมประสิทธิ์กำลังในช่วงของอัตราส่วนความเร็วปลายใบสูง เนื่องจากในช่วงนั้นใบกังหันลมเกือบทั้งใบทำงานอยู่ในช่วงที่ยังไม่ถึงปรากฏการณ์ Stall แต่ในช่วงของอัตราส่วนความเร็วปลายใบต่ำ 4 - 6 ใบกังหันลมเริ่มจะทำงานที่มุมปะทะที่สูงมากขึ้น ใบส่วนใหญ่จะทำงานภายใต้สภาวะ Stall ซึ่งทำให้สัมประสิทธิ์กำลังลดลง เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์ separation ซึ่งส่งผลให้แรงยกลดลง ในขณะที่แรงหน่วงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

5.6 การเปรียบเทียบสมรรถนะในรูปสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมแนวนอน จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พิจารณาผลของตัวเลขเรย์โนลด์ กับผลการทดลอง

จากรูปที่ 5.13 ข้อมูลสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงจะเห็นว่า สัมประสิทธิ์แรงหน่วงนั้นแปรตามค่าตัวเลขเรย์โนลด์ค่อนข้างมาก และมีข้อมูลค่อนข้างจำกัดและมีข้อมูลแค่ถึงก่อนการเกิด Stall ข้อมูลของสัมประสิทธิ์ที่แรงยกและแรงหน่วงในช่วง Stall นั้นไม่มี ดังนั้น ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ของสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงที่ใส่ไว้ตามที่บรรยายไว้ในบทที่ 3 และในภาคผนวก จึงเป็นการคาดเดาเปรียบเทียบจากลักษณะความสัมพันธ์จากแผนอากาศรูปอื่นที่มีข้อมูลของมุมปะทะตั้งแต่ 0° ถึง 180° ดังนั้น ผลเฉลยในช่วงกังหันลมทำงานใน

สภาวะ Stall (อัตราส่วนความเร็วปลายใบน้อยกว่า 5) นั้น จึงขึ้นอยู่กับความแม่นยำในการเลือกใช้ข้อมูลอากาศพลศาสตร์ในช่วง Stall มาก ดังจะเห็นจากผลเฉลยจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เมื่อเทียบกับผลการทดลองในช่วงอัตราส่วนความเร็วปลายใบน้อยกว่า 5 ยังมีข้อขัดแย้งอยู่บ้าง

เนื่องจากข้อมูลของสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงถูกทดสอบที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เป็นค่าๆ (41700, 83000, 163000, 334000 เป็นต้น) ดังแสดงในรูปที่ 5.13(ก) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการ test โดยใช้ variable density wind tunnel และ Jacobs [17] ได้ทำการทดลอง เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุด $C_{L_{max}}$ และสัมประสิทธิ์แรงหน่วงต่ำสุด C_{D_0} ที่แปรเปลี่ยนไปตามผลของตัวเลขเรย์โนลด์ ผลของการทดลองถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5.13(ข) และ (ค) ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลกระทบของการเปลี่ยนค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่อ $C_{L_{max}}$ นั้นมีไม่มากนักในช่วง $1 \times 10^5 - 4.5 \times 10^5$ (เป็นค่าเกือบคงที่) ในขณะที่ผลกระทบของตัวเลขเรย์โนลด์ต่อค่า C_{D_0} มีค่อนข้างมาก อันสืบเนื่องจากผลของการเพิ่ม skin friction เนื่องจากผิวไม่เรียบในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ [10,11] ค่าที่แสดงในรูปที่ 5.13(ข) และ (ค) ถูกพล็อตอยู่บนกราฟสเกลล็อกตั้งต้นตั้งแต่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1×10^5 ดังนั้น จากการผสมผสานค่าที่ได้จากการทดลองในรูปที่ 5.13(ก) (ข) (ค) จะสามารถกำหนดค่า $C_{L_{max}}$ และ C_{D_0} ของแพนอากาศ NACA 4415 เพื่อนำไปใช้กับกังหันลมชุดแรกและชุดที่สอง รายละเอียดของค่า $C_{L_{max}}$, C_{D_0} กับ Reynolds number ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 5.3

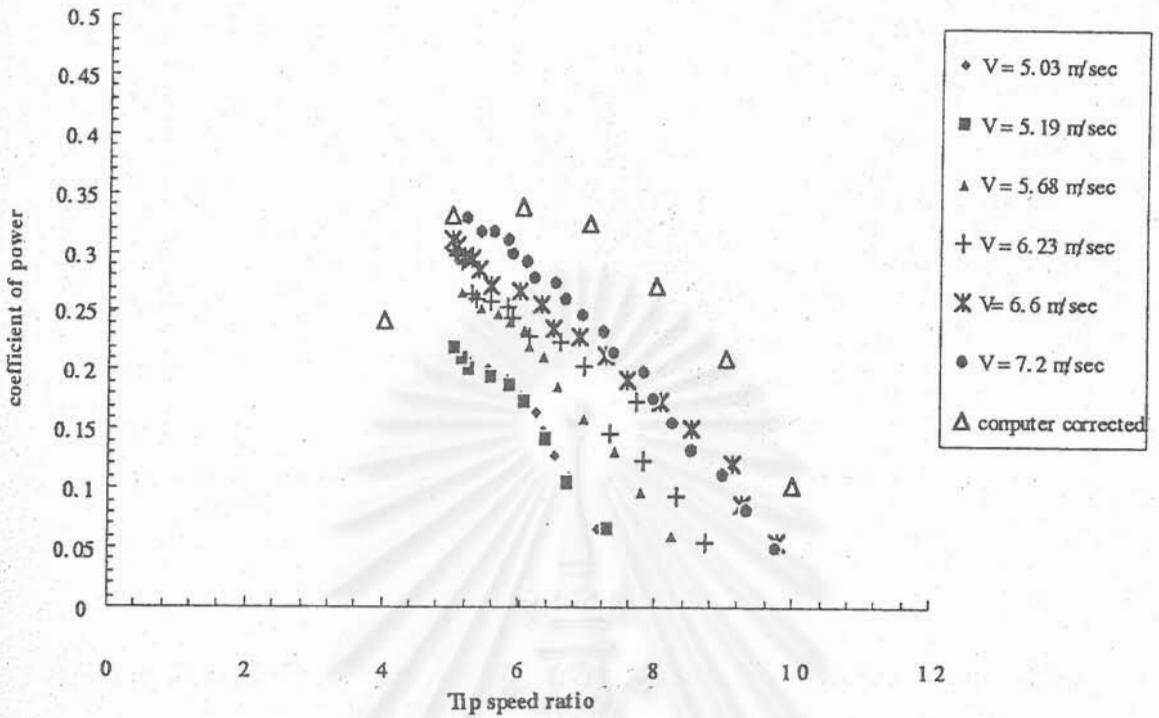
Rey	6×10^4 และต่ำกว่า	$C_{D_0} = 0.030$	$C_{L_{max}} = 1.2$
Rey	$6 \times 10^4 - 1 \times 10^5$	$C_{D_0} = 0.028$	$C_{L_{max}} = 1.2$
Rey	$1 \times 10^5 - 1.2 \times 10^5$	$C_{D_0} = 0.026$	$C_{L_{max}} = 1.2$
Rey	$1 \times 10^5 - 1.4 \times 10^5$	$C_{D_0} = 0.024$	$C_{L_{max}} = 1.2$
Rey	$1.4 \times 10^5 - 2 \times 10^5$	$C_{D_0} = 0.020$	$C_{L_{max}} = 1.2$
Rey	$2 \times 10^5 - 3 \times 10^5$	$C_{D_0} = 0.016$	$C_{L_{max}} = 1.32$

ตารางที่ 5.3 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ $C_{L_{max}}$ และ C_{D_0} กับตัวเลขเรย์โนลด์

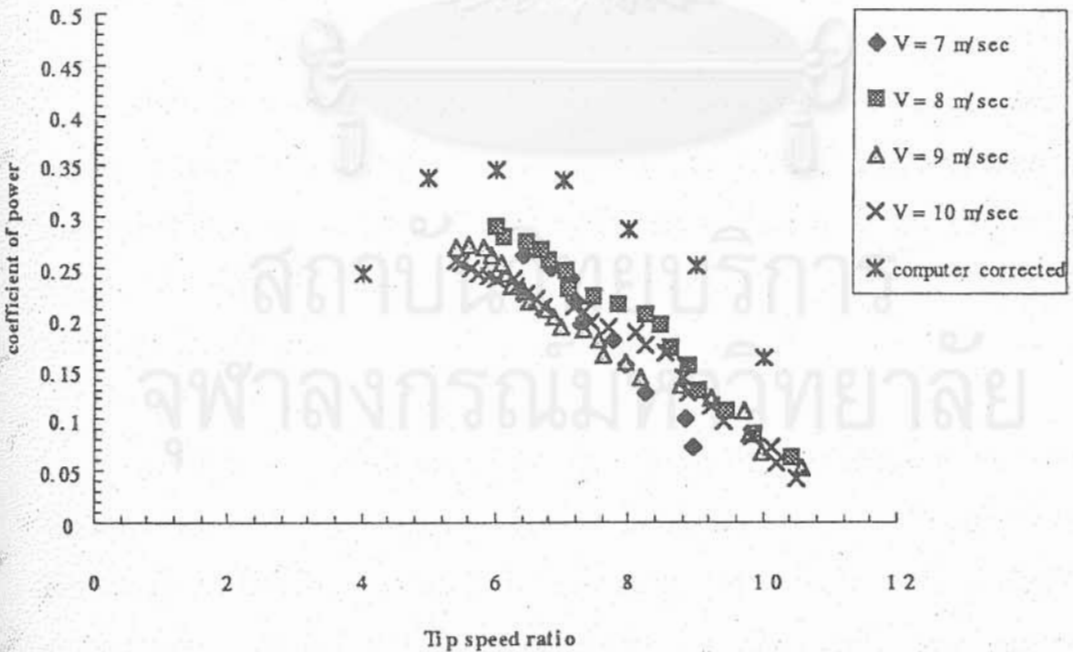
ดังนั้นสมรรถนะของกังหันลมชุดแรกและชุดที่สองจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ถูกนำเสนอใหม่ โดยที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงต่างๆ กันที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ต่างกัน โดยนำค่าจากตารางที่ 5.3 เทียบกับตารางที่ 5.1, 5.2 เพื่อดัดแปลง

ค่าพารามิเตอร์ทางอากาศพลศาสตร์
ทดลองในรูปที่ 5.16, 5.17 และ 5.18

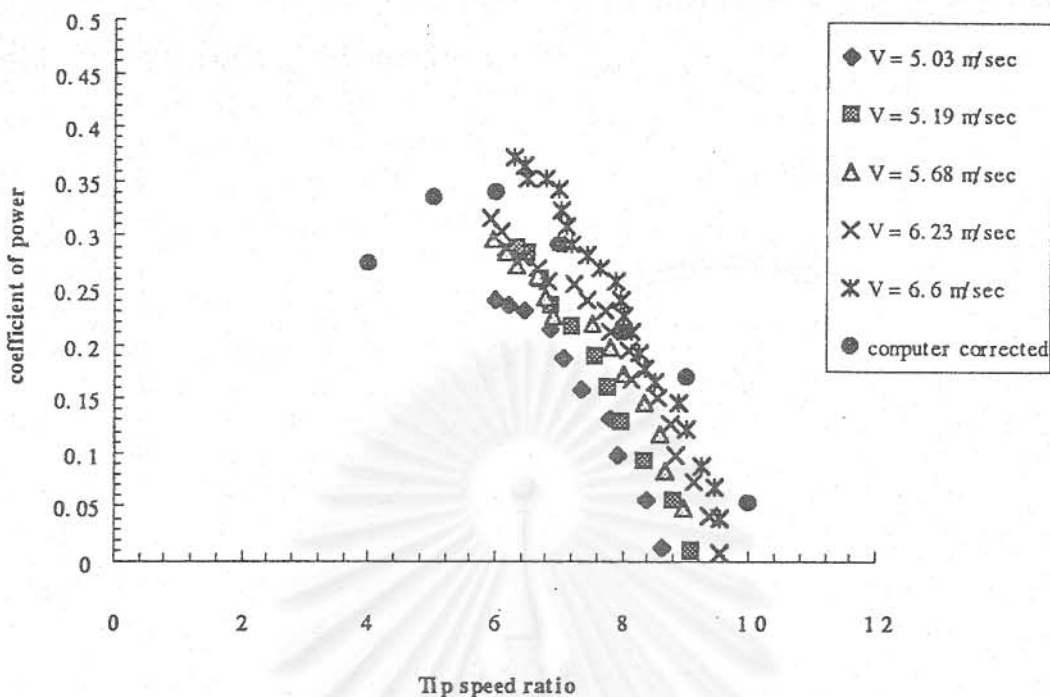
สมรรถนะดังกล่าวถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการ



รูปที่ 5.16 สัมประสิทธิ์กำลังจากผลเฉลยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พิจารณผลของเลขเรย์โนลด์
ที่มีต่อสมรรถนะด้วยเปรียบเทียบกับผลการทดลองของกังหันลมชุดแรกที่ทดสอบกับอุโมงค์ลม



รูปที่ 5.17 สัมประสิทธิ์กำลังจากผลเฉลยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พิจารณผลของเลขเรย์โนลด์
ที่มีต่อสมรรถนะด้วยเปรียบเทียบกับผลการทดลองของกังหันลมชุดแรกที่ทดสอบบนรถปิคอัพ



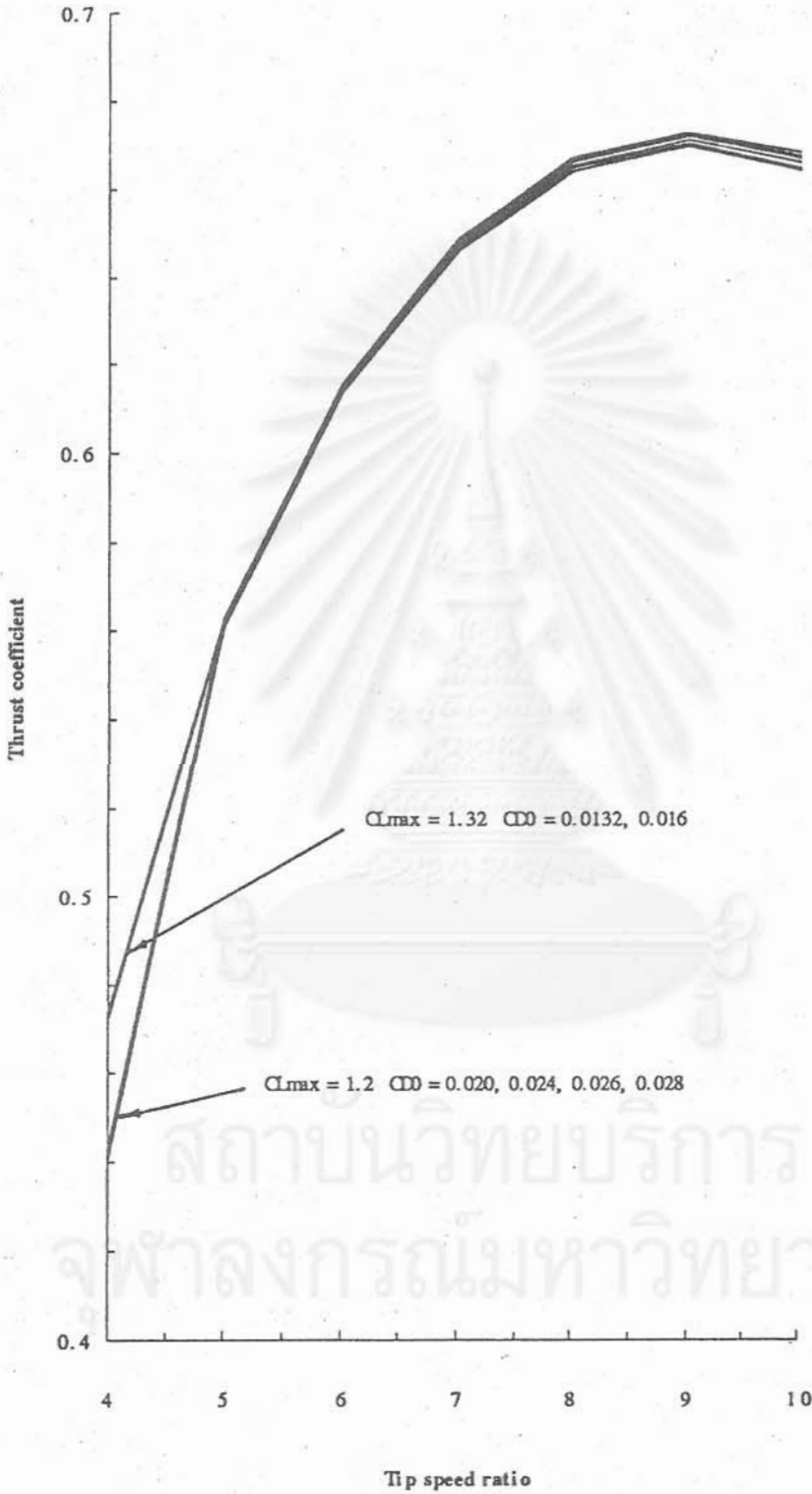
รูปที่ 5.18 สัมประสิทธิ์กำลังจากผลเฉลยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พิจารณาผลของเลขเรย์โนลด์ที่มีต่อสมรรถนะด้วย เปรียบเทียบกับผลการทดลองของกังหันลมชุดที่สองที่ทดสอบกับอุโมงค์ลม

5.7 สัมประสิทธิ์แรงทรัส

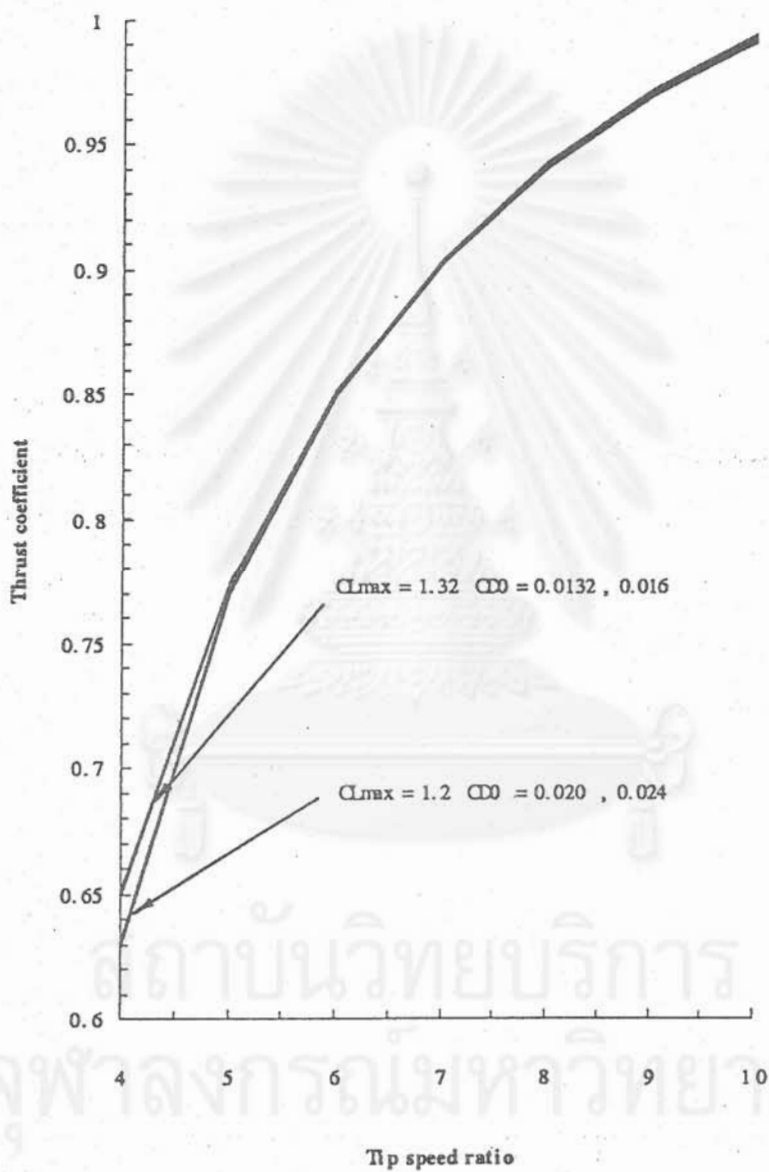
แรงที่เกิดจากอากาศไหลผ่านใบกังหันนั้น สามารถแตกออกเป็นแรงในทิศทางที่ขนานและตั้งฉากกับระนาบ rotor แรงที่ขนานกับระนาบ rotor จะทำให้เกิดเป็นโมเมนต์บิดและกำลัง ส่วนแรงที่อยู่ในแนวตั้งฉากกับระนาบ rotor จะเป็นแรงที่ดันใบไปทางด้านหลัง (ตามทิศทางของลม) และก่อให้เกิดโมเมนต์ดัด แรงในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบ rotor บนใบกังหันนี้มักจะถูกเรียกว่า แรงทรัส (thrust)

รูปที่ 5.19 แสดงถึงผลเฉลยของสัมประสิทธิ์แรงทรัสของกังหันลมชุดแรก จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่างกัน สัมประสิทธิ์แรงทรัสที่ได้จากผลเฉลยเป็นสัมประสิทธิ์แรงรวมของใบกังหัน 3 ใบ ในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบ rotor รูปที่ 5.20 แสดงถึงผลเฉลยของสัมประสิทธิ์แรงทรัสของกังหันลมชุดที่สองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่างๆ

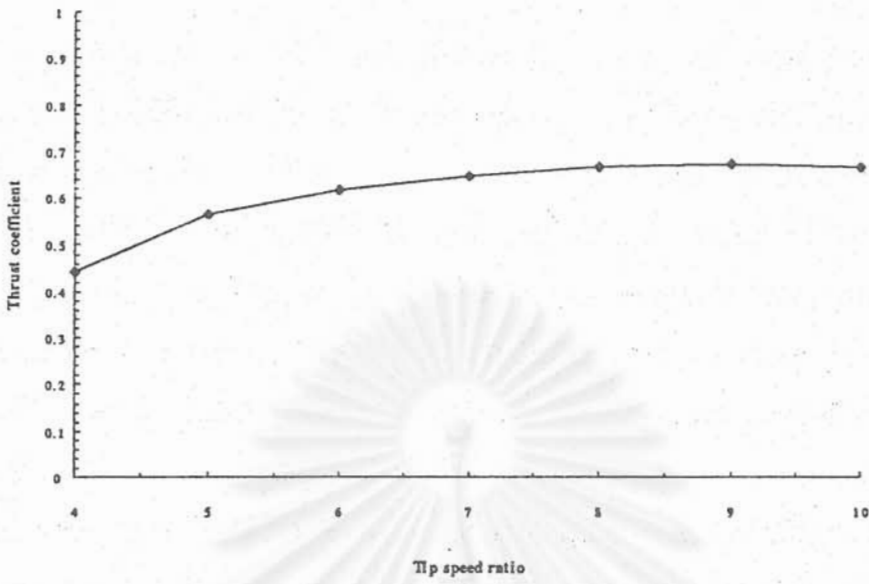
กัน รูปที่ 5.21 และ 5.22 แสดงถึงสัมประสิทธิ์ของแรงทรัสของกังหันลมชุดแรกและชุดที่สอง ซึ่งมีการนำผลของตัวเลขเรย์โนลด์มาพิจารณาด้วย



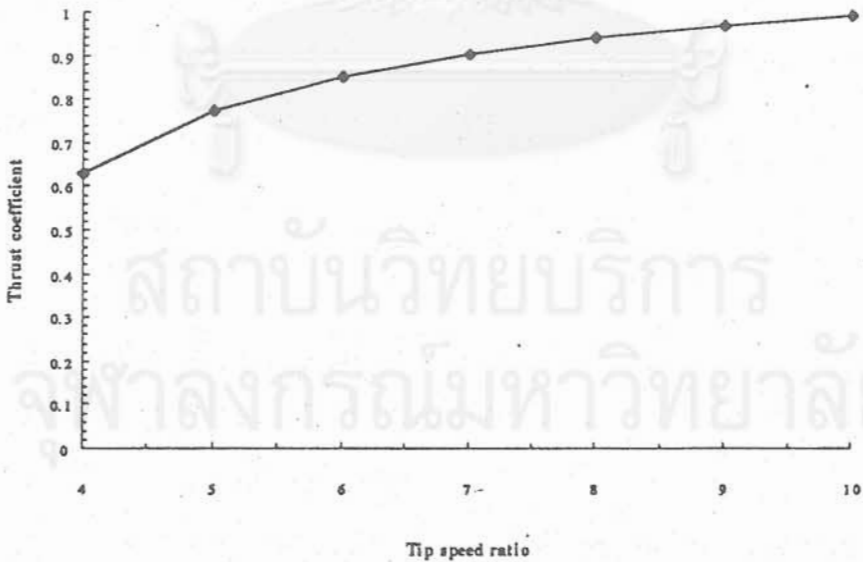
รูปที่ 5.19 สัมประสิทธิ์แรงทรัสของกังหันลมชุดแรกจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ 5.20 สัมประสิทธิ์แรงทอร์สของกังหันลมชุดที่สอง จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ 5.21 สัมประสิทธิ์แรงทอร์คของกังหันลมชุดแรก ที่นำเอาผลของตัวเลขเรย์โนลด์์พิจารณา
ด้วย จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ 5.22 สัมประสิทธิ์แรงทอร์คของกังหันลมชุดที่สอง ที่นำเอาผลของตัวเลขเรย์โนลด์์พิจารณา
ด้วย จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

5.8 ความเครียดและความเค้นบนใบกังหันลมจากผลการทดลอง

การทดสอบหาค่าความเค้นบนใบกังหันลมนั้น หาได้จากการคำนวณค่ามาจาก ความเครียดที่วัดได้ที่โคนของใบกังหันลม strain gage 4 ตัว ถูกติดตั้งบนใบกังหันลมแต่ละชุด เพื่อวัดหาค่าความเครียด จากลักษณะการติดตั้งที่แปะ strain gage 2 ตัวบนผิวบนและ 2 ตัว บนผิวล่างของใบกังหันลม จะทำให้ค่าความเครียดที่วัดได้เป็นความเครียดที่เกิดจากโมเมนต์ ดัดอย่างเดียว [22 - 23] สัญญาณที่วัดได้จาก strain gage จะออกมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าผ่าน ตัว strain amplifier ออกมาอยู่ในรูปความต่างศักย์ไฟฟ้าหน่วยเป็น millivolt ซึ่งก็จะสามารถ แปลงเป็นค่าความเครียดออกมาได้ แต่เนื่องจากการวัดกังหันลมแต่ละชุดมีการตั้งค่าการ ขยายบน strain meter ต่างกันและตัวใบกังหันในตำแหน่งที่ติดตั้ง strain gage ซึ่งมีรูปภาคตัด ขว้างเป็นแพนอากาศนั้น เป็นรูปร่างที่ไม่สมมาตรและแนวของโมเมนต์ดัดที่กระทำไม่ได้อยู่ใน แกนหลัก (principal axis) ของรูปภาคตัดขว้าง อีกทั้งตัวใบกังหันทำจากไม้ ซึ่งไม่ใช่ isotropic material กล่าวคือ คุณสมบัติของใบกังหันลมไม่จะขึ้นกับทิศทางของสายเส้นไม้ จึงทำให้ต้อง มีการทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติของใบกังหันบางตัวในลักษณะใช้งานจริงเพิ่มเติม

5.8.1 การทดสอบเพื่อหาค่า Modulus of elasticity ของใบกังหันลม

การทดสอบกระทำโดย นำใบกังหันลมมาถ่วงด้วยก้อนน้ำหนักเพื่อหาค่า ความเครียดที่เปลี่ยนไป การติดตั้งนั้นได้บรรยายไว้ในบทที่ 4 และจากความสัมพันธ์ของความ เค้นต่อโมเมนต์ดัด (ในกรณีที่มีโมเมนต์ดัดกระทำเพียงอย่างเดียว) ในทิศทางที่ตั้งฉากกับ ระนาบของ rotor ซึ่งได้บรรยายไว้ในบทที่ 2 และ 3 อาจเขียนได้เป็น

$$\sigma = \frac{M_t \cos(\beta + \beta_p)}{I_x} d_1 \quad (76)$$

โดยที่	σ	=	ค่าความเค้น
	M_t	=	โมเมนต์ดัดที่มีทิศทางอยู่ในแนว t (แนวบนใบกังหันในระนาบ rotor)
	β	=	มุมบิดของใบ
	β_p	=	มุมที่แกนหลักทำกับแกนอ้างอิงที่จุดศูนย์กลางมวลของภาคตัดขวาง ของใบกังหัน
	d_1	=	ระยะจากจุดศูนย์กลางมวลถึงผิวที่วัดค่าความเครียด
	I_x	=	โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนหลัก x'

ในกรณีนี้ M_t ก็คือ โมเมนต์ที่เกิดจากผลคูณของน้ำหนักที่ถ่วงที่ปลายไปกับระยะแขนโมเมนต์ และจากเครื่อง strain meter ของบริษัท Tokyo Sokki Kenkyujo รุ่น DC-1AF ซึ่งปรับตั้งให้ค่า strain 200×10^{-6} มีค่าเท่ากับสัญญาณออก 1 Volt จะทำให้สามารถเปลี่ยนค่าสัญญาณไฟฟ้าที่อ่านไปเป็นค่าความเครียดได้

จากนั้นจะสามารถคำนวณหาค่า Modulus of elasticity ได้โดยนำเอาค่าความเครียดที่หาได้มาหารกับค่าความเค้นที่ได้จากสูตรของโมเมนต์ดัด

$$E = \sigma / \epsilon$$

ในกรณีของก้านหลุมชุดแรก ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าดังต่อไปนี้

$$\text{แขนโมเมนต์} = 0.55 \text{ เมตร}$$

$$M_t = \frac{0.55 \times 9.81(W)}{1000} = 0.0053955(W) \text{ N - m}$$

$$W = \text{ก้อนน้ำหนักหน่วยเป็นกรัม}$$

$$\sigma = M_t \cos(\beta + \beta_p) \frac{d_1}{I_x}$$

$$= \frac{0.005395 W \cos(18 - 3.1) 0.005}{1.329 \times 10^{-7}} = 196.1656 W \text{ N/m}^2$$

$$\epsilon = (\text{สัญญาณไฟฟ้าที่อ่านได้เป็น mV}) / 4 \times 200 \times 10^{-6} \times 10^{-3}$$

$$= 5 \times 10^{-8} (\text{สัญญาณที่อ่านได้เป็น mV})$$

ในกรณีของก้านหลุมชุดที่สอง ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าดังต่อไปนี้

$$\text{แขนโมเมนต์} = 0.615 \text{ เมตร}$$

$$M_t = \frac{0.615 \times 9.81(W)}{1000} = 0.00603(W) \text{ N - m}$$

$$\sigma = M_t \cos(\beta + \beta_p) \frac{d_1}{I_x}$$

$$= \frac{0.00603W \cos(14 - 3.1) (0.008)}{3.7467 \times 10^{-7}} = 126.4953 W \text{ N/m}^2$$

ตารางที่ 5.4 และ 5.5 จะแสดงถึงค่าที่ได้จากการทดลองดัดงอหน้าเหล็กและจากการคำนวณ
หาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการของใบกังหันชุดแรก และชุดที่สอง

น้ำหนักดัด กรัม	สัญญาณที่อ่านได้ mV	ความเครียด ϵ	ความเค้น $\sigma(N/m^2)$	E (N/m^2)
116.8	384	1.920×10^{-5}	22,912	1.1933×10^9
126.8	415	2.075×10^{-5}	24,874	1.1987×10^9
136.8	456	2.280×10^{-5}	26,835	1.1769×10^9
146.8	496	2.480×10^{-5}	28,797	1.1612×10^9
156.8	536	2.680×10^{-5}	30,759	1.1477×10^9
166.8	568	2.840×10^{-5}	32,720	1.1521×10^9
176.8	592	2.960×10^{-5}	34,682	1.1717×10^9
186.8	624	3.120×10^{-5}	36,644	1.1745×10^9
196.8	656	3.280×10^{-5}	38,605	1.1769×10^9
206.8	704	3.520×10^{-5}	40,567	1.1525×10^9
216.8	728	3.640×10^{-5}	42,529	1.1684×10^9
226.8	768	3.840×10^{-5}	44,490	1.1586×10^9
236.8	800	4.000×10^{-5}	46,452	1.1613×10^9
246.8	824	4.120×10^{-5}	48,414	1.1750×10^9
256.8	848	4.360×10^{-5}	50,375	1.1554×10^9
266.8	896	4.480×10^{-5}	52,337	1.1682×10^9
276.8	928	4.680×10^{-5}	54,299	1.1602×10^9
286.8	960	4.800×10^{-5}	56,260	1.1721×10^9

ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองการดัดงอหน้าเหล็กกับใบกังหันลมชุดแรก เพื่อหาค่า Modulus of
elasticity

น้ำหนักถ่วง กรัม	สัญญาณที่อ่านได้ mV	ความเครียด	ความเค้น $\sigma(N/m^2)$	E (N/m^2)
116.8	264	1.320×10^{-5}	14,775	1.1193×10^9
126.8	288	1.440×10^{-5}	16,039	1.1138×10^9
136.8	312	1.560×10^{-5}	17,305	1.1092×10^9
146.8	352	1.760×10^{-5}	18,569	1.0551×10^9
156.8	376	1.880×10^{-5}	19,834	1.0550×10^9
166.8	424	2.120×10^{-5}	21,099	0.9952×10^9
176.8	448	2.240×10^{-5}	22,364	0.9984×10^9
186.8	464	2.320×10^{-5}	23,629	1.0185×10^9
196.8	472	2.360×10^{-5}	24,894	1.0548×10^9
206.8	504	$2,520 \times 10^{-5}$	26,159	1.0380×10^9
216.8	536	$2,680 \times 10^{-5}$	27,424	1.0233×10^9
226.8	584	2.920×10^{-5}	28,689	0.9825×10^9
236.8	624	3.120×10^{-5}	29,954	0.9606×10^9
246.8	656	3.280×10^{-5}	31,219	0.9518×10^9
256.8	688	3.440×10^{-5}	32,484	0.9443×10^9
266.8	704	3.520×10^{-5}	33,744	0.9588×10^9
276.8	720	3.600×10^{-5}	35,014	0.9726×10^9
286.8	736	3.680×10^{-5}	36,279	0.9858×10^9
296.8	764	3.820×10^{-5}	37,544	0.9828×10^9
306.8	792	3.960×10^{-5}	38,809	0.9800×10^9
316.8	816	4.080×10^{-5}	40,074	0.9822×10^9
336.8	856	4.280×10^{-5}	42,604	0.9954×10^9
356.8	912	4.560×10^{-5}	45,134	0.9898×10^9
376.8	968	4.840×10^{-5}	47,663	0.9848×10^9
396.8	1024	5.120×10^{-5}	50,193	0.9803×10^9
596.8	1456	7.280×10^{-5}	75,492	1.0369×10^9
616.8	1496	7.480×10^{-5}	78,022	1.0430×10^9
666.8	1816	9.080×10^{-5}	84,347	0.9289×10^9

น้ำหนักถ่วง กรัม	สัญญาณที่อ่านได้ mV	ความเครียด	ความเค้น $\sigma(N/m^2)$	E (N/m^2)
686.8	1864	9.320×10^{-5}	86,877	0.9321×10^9
796.8	2096	1.048×10^{-5}	100,032	0.9545×10^9

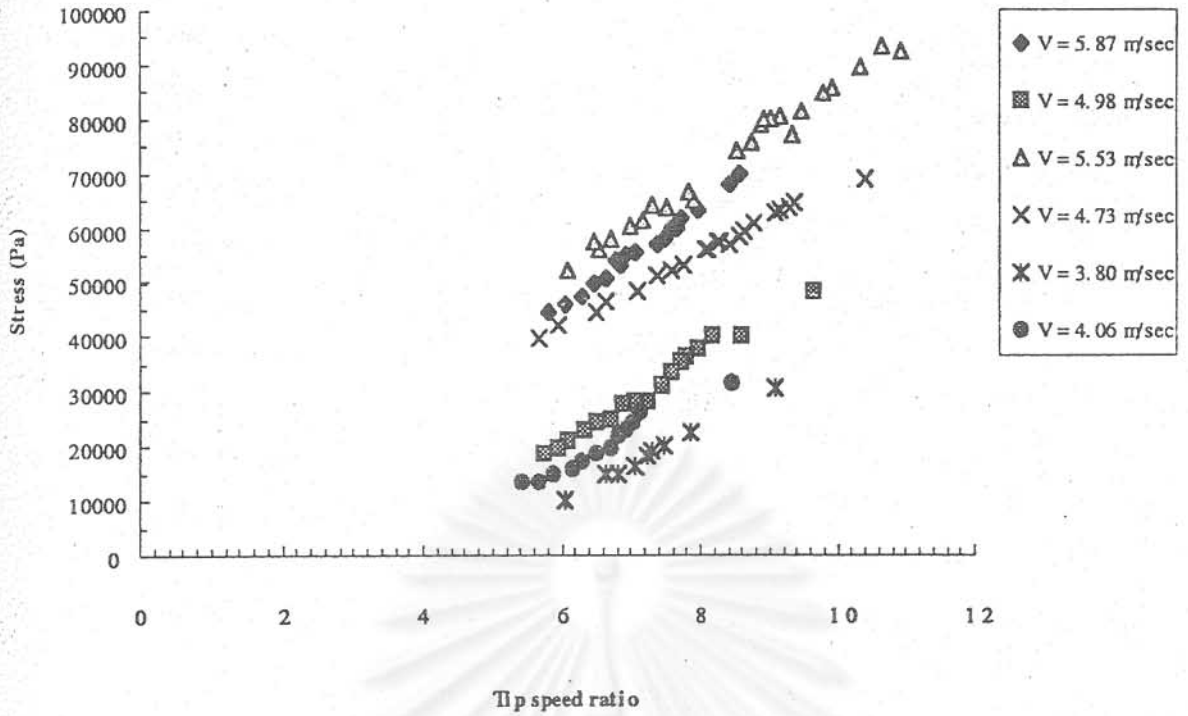
ตารางที่ 5.5 ผลการทดลองการถ่วงน้ำหนักกับใบกึ่งหันลมชุดที่สอง เพื่อหาค่า Modulus of elasticity

จากผลการทดสอบทำให้ ทำการเลือกใช้ค่า Modulus of elasticity E เป็น 1.16×10^9 N/m^2 สำหรับใบกึ่งหันลมชุดแรก และ 1.0×10^9 N/m^2 สำหรับใบกึ่งหันลมชุดที่สอง ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองแตกต่างกว่าค่าที่ได้จากหนังสือ Strength of Material ทั่วไปสำหรับไม้ค่อนข้างมาก (โดยเฉพาะในเอกสาร [24] ค่า Modulus of elasticity ของไม้ตะเคียนทองจะมีค่าเท่ากับ 10.287×10^9 N/m^2) ซึ่งอาจเป็นสาเหตุจากทิศทางของเส้นใยไม้กับแนวของแรงที่กระทำ และความชื้นของตัวไม้

5.8.2 การทดลองหาค่าความเค้นของใบกึ่งหันลมชุดแรก

การทดลองนั้นกระทำขึ้นสองครั้ง โดยครั้งแรกนั้นกระทำที่ความเร็วลม 3.80, 4.73, 5.53 เมตร/วินาที และการทดลองครั้งที่สองกระทำที่ความเร็วลม 4.06, 4.98, 5.87 เมตร/วินาที สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จาก strain gage ในการทดลองถูกแปลงเป็นค่าความเครียดและทำการคำนวณออกมาเป็นค่าความเค้น รายละเอียดถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ง. และ จ.

รูปที่ 5.23 แสดงถึงค่าความเค้นที่ได้จากการทดลองของใบกึ่งหันลมชุดแรกที่ทำงานภายใต้ความเร็วลมต่างๆ กัน โดยแสดงผลเทียบกับค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบ



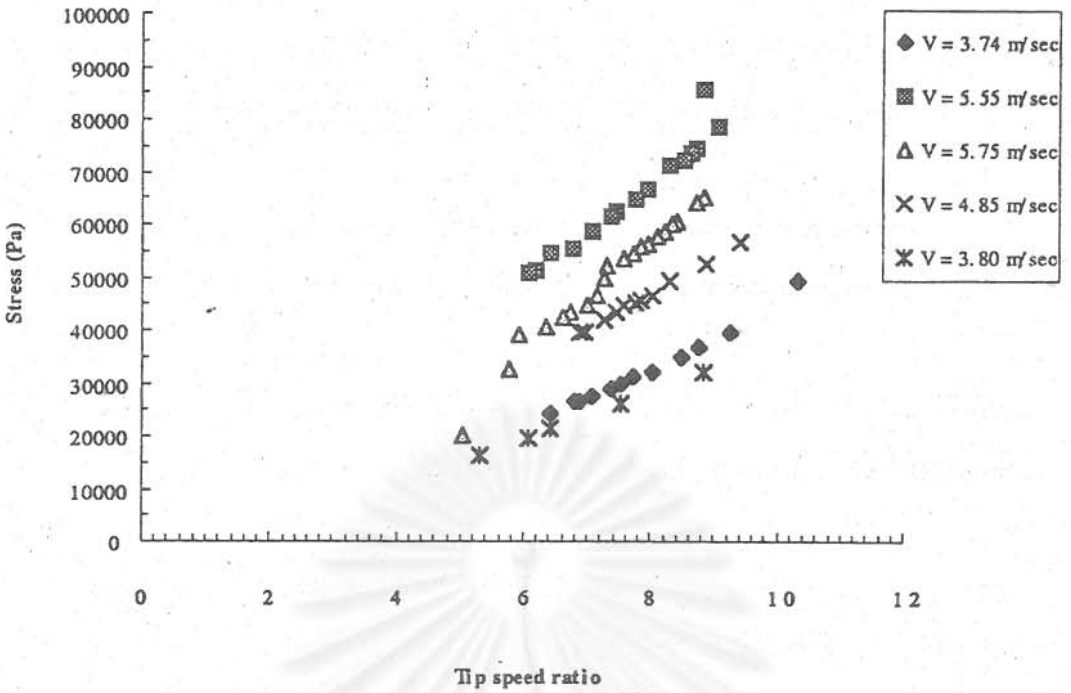
รูปที่ 5.23 ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนใบกังหันลมชุดแรกภายใต้ความเร็วลมต่างๆ กันจากการทดลอง

5.8.3 การทดลองหาค่าความเค้นของใบกังหันลมชุดที่สอง

การทดลองนั้นกระทำขึ้นสองครั้งเช่นเดียวกัน โดยครั้งแรกกระทำที่ความเร็วลม 3.74, 5.55 เมตร/วินาที และการทดลองครั้งที่สองกระทำที่ความเร็วลม 3.80, 4.85, 5.75 เมตร/วินาที สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จาก strain gage ในการทดลองถูกแปลงเป็นค่าความเครียด และทำการคำนวณออกมาเป็นค่าความเค้น รายละเอียดถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ง. และ จ.

รูปที่ 5.24 แสดงถึงค่าความเค้นที่ได้จากการทดลองของใบกังหันชุดที่สอง ที่ทำงานภายใต้ความเร็วลมต่างๆ กัน โดยแสดงผลเทียบกับค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.24 ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนใบกังหันลมชุดที่สอง ภายใต้ความเร็วลมต่างๆ กันจากการทดลอง

5.9 ความเค้นบนใบกังหันลมจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ความเค้นที่เกิดขึ้นใบใบกังหันลมที่หมุนภายใต้ภาะนั้นจะประกอบด้วย ความเค้น 2 ส่วน ส่วนแรกคือ ความเค้นจากแรงดึงอันได้แก่ แรงเนื่องจากแรงหนีศูนย์กลางและแรงโน้มถ่วงโลก และแรงจากอากาศพลศาสตร์ ซึ่งค่าความเค้นนี้ในส่วนของแรงโน้มถ่วงของโลกจะแปรตามตำแหน่งของใบกังหัน จะมีค่าสูงสุดเมื่อใบกังหันอยู่ในตำแหน่งล่างสุด (6 นาฬิกา) และมีค่าน้อยสุดเมื่อใบกังหันอยู่ตำแหน่งบนสุด (12 นาฬิกา) ค่าความเค้นอีกส่วนจะได้แก่ ค่าความเค้นที่เกิดจากโมเมนต์ดัดอันเนื่องมาจาก แรงจากอากาศพลศาสตร์ในแนวขนานและตั้งฉากกับใบ จะเห็นได้ว่าในกรณีนี้ กังหันลมที่ถูกพิจารณาทั้งสองชุดนั้น ตัวใบกังหันถูกติดตั้งโดยไม่มีมุมเอียง (coning angle, ψ) ค่าความเค้นจากแรงดึงจึงมาจากแรงหนีศูนย์กลางและแรงโน้มถ่วงโลกเท่านั้น ซึ่งจะมีค่าแปรโดยตรงกับความเร็วรอบของกังหันลม ค่าความเค้นสูงสุดของใบกังหันลมในการทำงานแต่ละค่าความเร็วและความเร็วรอบจะเป็น ผลรวมของความเค้นจากแรงดึงและความเค้นจากโมเมนต์ดัด

ค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดซึ่งเกิดจากแรงอากาศพลศาสตร์ในแนวขนาน และตั้งฉากกับระนาบกังหันลมจะเขียนได้เป็น

$$\sigma = \begin{aligned} & (-|M_t| \cos(\beta + \beta_p) d_1) / I_x - (|M_n| \sin(\beta + \beta_p) d_1) / I_x \\ & + (|M_t| \sin(\beta + \beta_p) c_1) / I_y - (|M_n| \cos(\beta + \beta_p) c_1) / I_y \end{aligned} \quad (77)$$

เมื่อ M_t = โมเมนต์ดัดที่เกิดจากภาระของแรงจากอากาศพลศาสตร์ในแนว
ระนาบของ rotor ซึ่งไปยังทิศทางการหมุนของใบกังหัน (แนว
สัมผัส t)

M_n = โมเมนต์ดัดที่เกิดจากภาระของแรงจากอากาศพลศาสตร์ในแนวที่ตั้งฉาก
กับระนาบของ rotor ซึ่งสวนทิศทางกับทิศทางของลมที่พัด
เข้าหา rotor (ทิศทาง $-n$)

β = มุมบิดของใบกังหัน

β_p = มุมของแกนหลัก principal axis ที่ทำกับแกนอ้างอิง $x - y$ ที่จุดศูนย์กลาง
กลางมวล

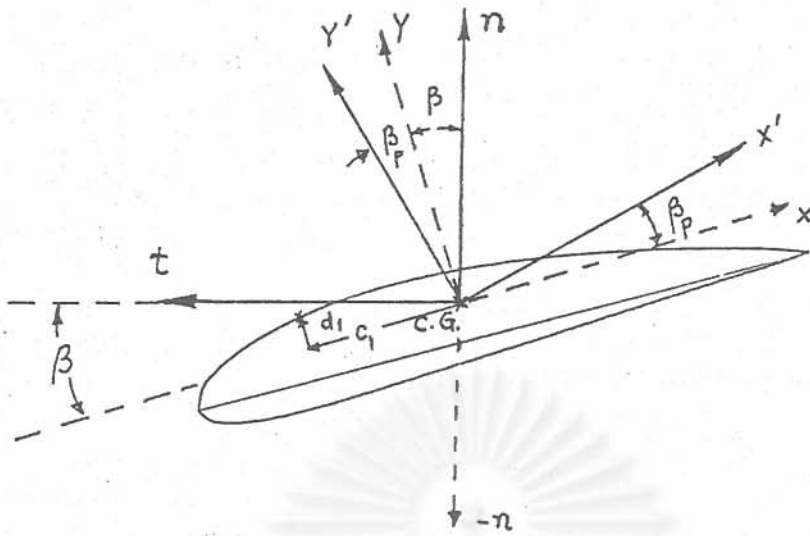
I_x = โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนหลัก x'

I_y = โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนหลัก y'

d_1 = ระยะห่างจากจุดอ้างอิง(จุดศูนย์กลางมวล) ถึงผิวที่ต้องการวัดความ
เค้นในแนวแกนหลัก y'

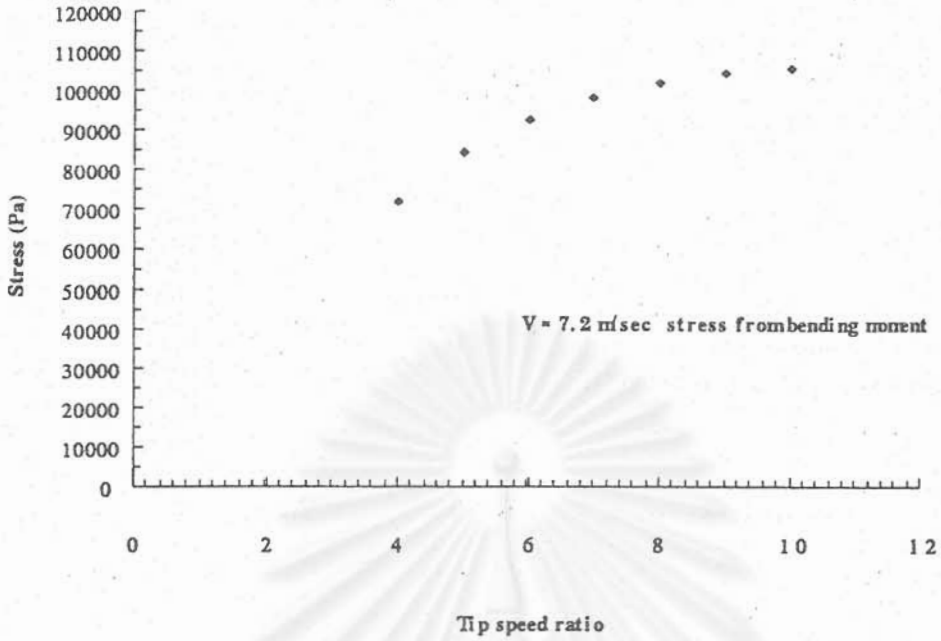
c_1 = ระยะห่างจากจุดอ้างอิง(จุดศูนย์กลางมวล) ถึงผิวที่ต้องการวัดความ
เค้นในแนวแกนหลัก x'

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

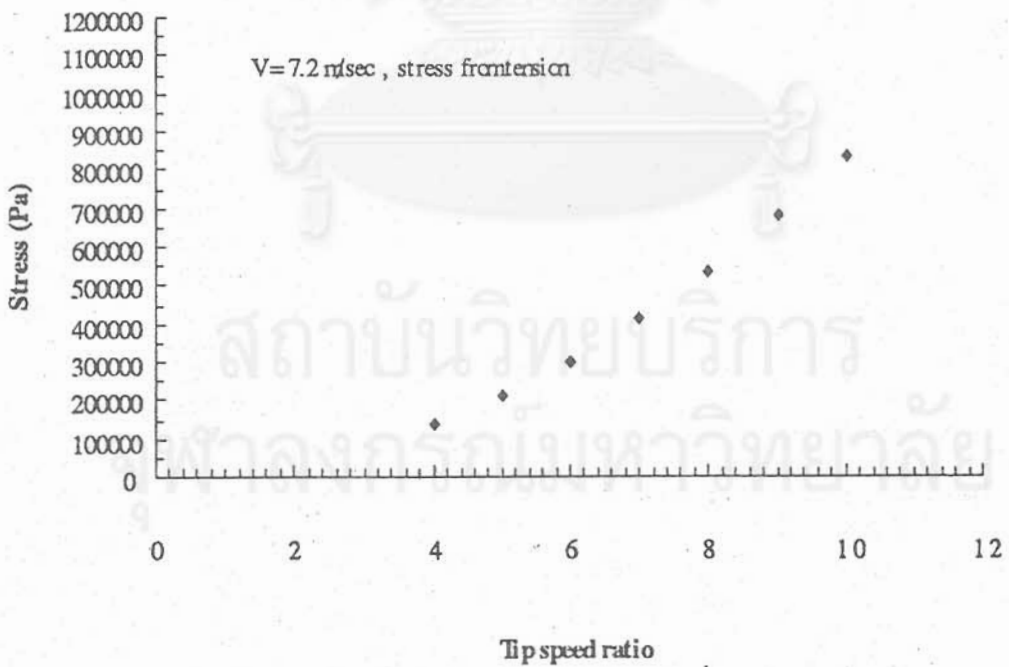


รูปที่ 5.25 แสดงถึงแกนหลักและแกนอ้างอิงของรูปภาคตัดขวางไบกัณฑ์ลม

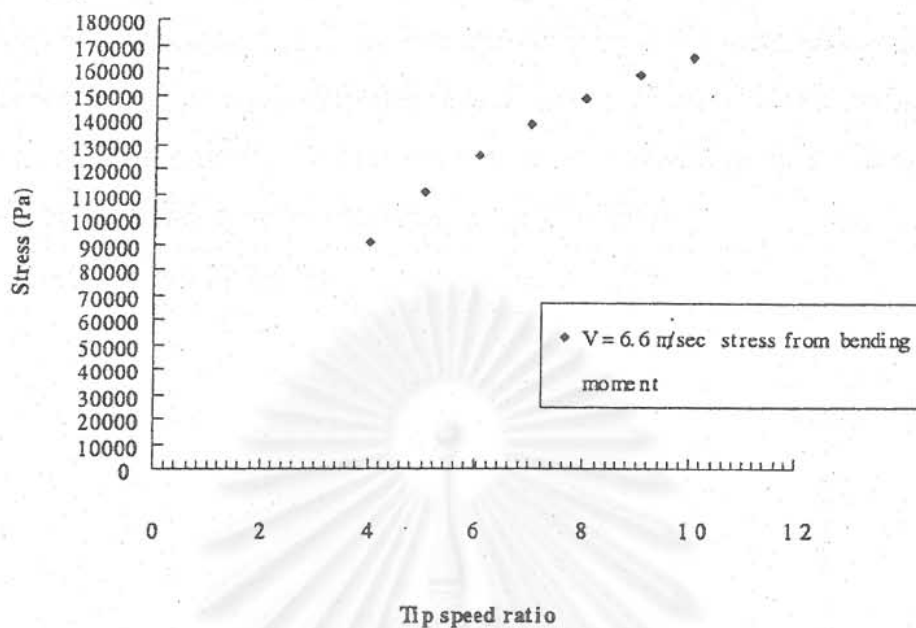
ในกรณีของไบกัณฑ์ลมชุดแรก จุดที่พิจารณาค่าความเค้น(จุดที่ติด strain gage) นั้น ค่า $d_1 = 0.005$ เมตร ค่า $c_1 = 0$ เมตร ส่วนไบกัณฑ์ลมชุดที่สอง ค่า $d_1 = 0.008$ เมตร และค่า $c_1 = 0.0215$ เมตร ซึ่งในกรณีนี้ค่าความเค้นที่เกิดจากองค์ประกอบของค่า c_1 จะเป็นความเค้นทางด้าน compression ซึ่งจะไปเสริมให้ค่าความเค้นทางด้านผิวไบกัณฑ์ด้านที่อยู่ใต้ลมให้มีค่าสูงสุด และในขณะเดียวกันก็จะไปลดค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนไบกัณฑ์รูปแพนอากาศที่หันหน้าเข้าหาลม (camber side) ซึ่งเป็นค่าความเค้นดึงอยู่ ดังนั้นค่าความเค้นของกัณฑ์ลมชุดที่สองจะเป็นค่าความเค้นสูงสุดอยู่ทางด้านที่ความเค้นเป็น compression ค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดเฉลี่ย(ซึ่งละทิ้งความเค้นจากน้ำหนักที่ส่งผลต่อโมเมนต์ดัดและค่าความเค้นที่เกิดจากองค์ประกอบของค่า c_1 ในกรณีของกัณฑ์ลมชุดที่สอง) กับค่าความเค้นจากแรงดึงของไบกัณฑ์ลมชุดแรกและชุดที่สอง ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5.26, 5.27, 5.28, 5.29 ซึ่งกัณฑ์ลมชุดแรกทำงานภายใต้ความเร็วลม 7.2 เมตรต่อวินาที และกัณฑ์ลมชุดที่สองทำงานภายใต้ความเร็วลม 6.6 เมตรต่อวินาที



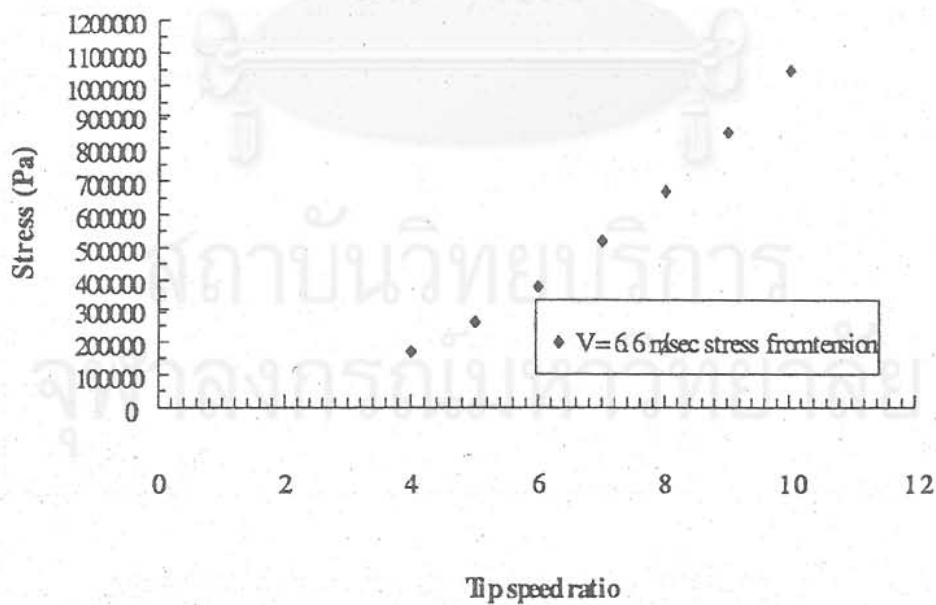
รูปที่ 5.26 ค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดของใบกังหันลมชุดแรก
ที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ 5.27 ค่าความเค้นจากแรงดึงของใบกังหันลมชุดแรก
ที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ 5.28 ค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดของใบกังหันลมชุดที่สอง
ที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ 5.29 ค่าความเค้นจากแรงดึงของใบกังหันลมชุดที่สอง
ที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 5.6 และ 5.7 เป็นตารางที่แสดงถึงค่าความเค้นสูงสุดที่ใบกังหันลมชุดแรกและชุดที่สองได้รับซึ่งจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่ำสุด(6 นาฬิกา ละทิ้งความเค้นจากโมเมนต์ตัดอันเนื่องจากน้ำหนักซึ่งจะเกิดขึ้นที่ 3 นาฬิกา และ 9 นาฬิกา และจะมีค่าความเค้นจากโมเมนต์ตัดอันเกิดจากองค์ประกอบของค่า c_1 สำหรับกังหันลมชุดที่สองด้วย (ตารางที่ ค.21 ในภาคผนวก ค.)ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบต่างๆ กัน โดยกังหันลมชุดแรกทำงานที่ความเร็วลม 7.2 เมตรต่อวินาที และกังหันลมชุดที่สองทำงานที่ความเร็วลม 6.6 เมตรต่อวินาที

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ	ความเค้น (Pa)
4	206,310
5	294,200
6	394,106
7	508,667
8	638,286
9	783,196
10	943,594

ตารางที่ 5.6 ค่าความเค้นสูงสุดที่ใบกังหันลมชุดแรกได้รับ
จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

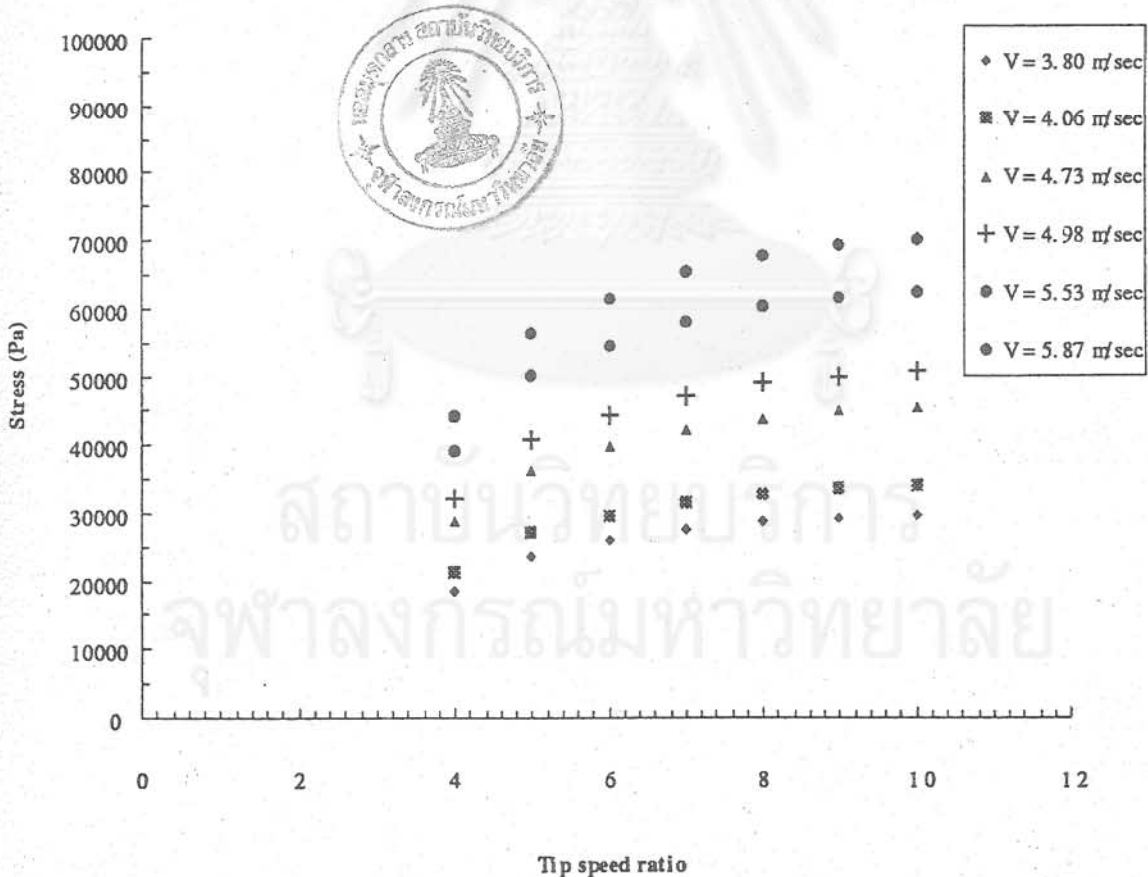
อัตราส่วนความเร็วปลายใบ	ความเค้น (Pa)
4	258,826
5	373,563
6	504,412
7	653,511
8	821,736
9	1,009,612
10	1,217,486

ตารางที่ 5.7 ค่าความเค้นสูงสุดที่ใบกังหันลมชุดที่สองได้รับ
จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

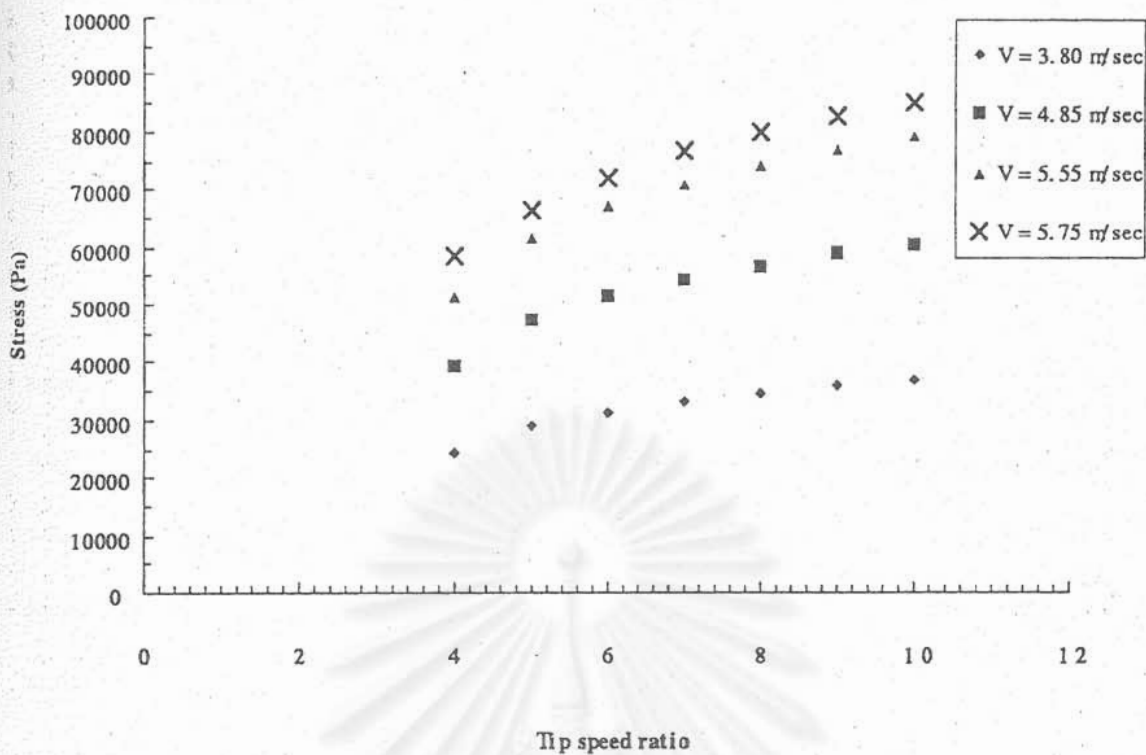
ในส่วนของการยืนยันผลความแม่นยำของค่าความเค้นที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น ผลเฉลยในรูปของความเค้นถูกคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์อีกครั้ง ใน

เงื่อนไขของความเร็วลมที่ได้ทำการทดลองในอุโมงค์ลม จากลักษณะการติด strain gage บน ใบกังหันลม ผลการทดลองจะสามารถอ่านได้เฉพาะค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดอย่างเดียว และจะไม่สามารถวัดค่าความเค้นซึ่งมีทิศทางเดียวกันทั้งผิวบนและผิวล่างได้ ดังนั้น เพื่อจุดมุ่งหมายการเปรียบเทียบปริมาณความเค้นเดียวกัน จึงจะเลยค่าความเค้นที่เกิดจากโมเมนต์ดัดคู่กับค่า c_1 ใบกังหันลมชุดที่สอง และเนื่องจากความเร็วลมที่ใช้ในการทดลองค่อนข้างต่ำ ส่งผลให้อากาศที่ไหลผ่านใบกังหันลมมีตัวเลขเรย์โนลด์ที่ต่ำไปด้วย ซึ่งจะส่งผลให้ค่า coefficient ของแรงหน่วงเพิ่มขึ้นในแต่ละความเร็วรอบ (ดูตารางที่ 5.3) ดังนั้น ค่าความเค้นจากผลเฉลยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จึงได้มีการนำเอาผลของตัวเลขเรย์โนลด์ที่มีต่อสัมประสิทธิ์แรงหน่วงมาพิจารณาด้วย

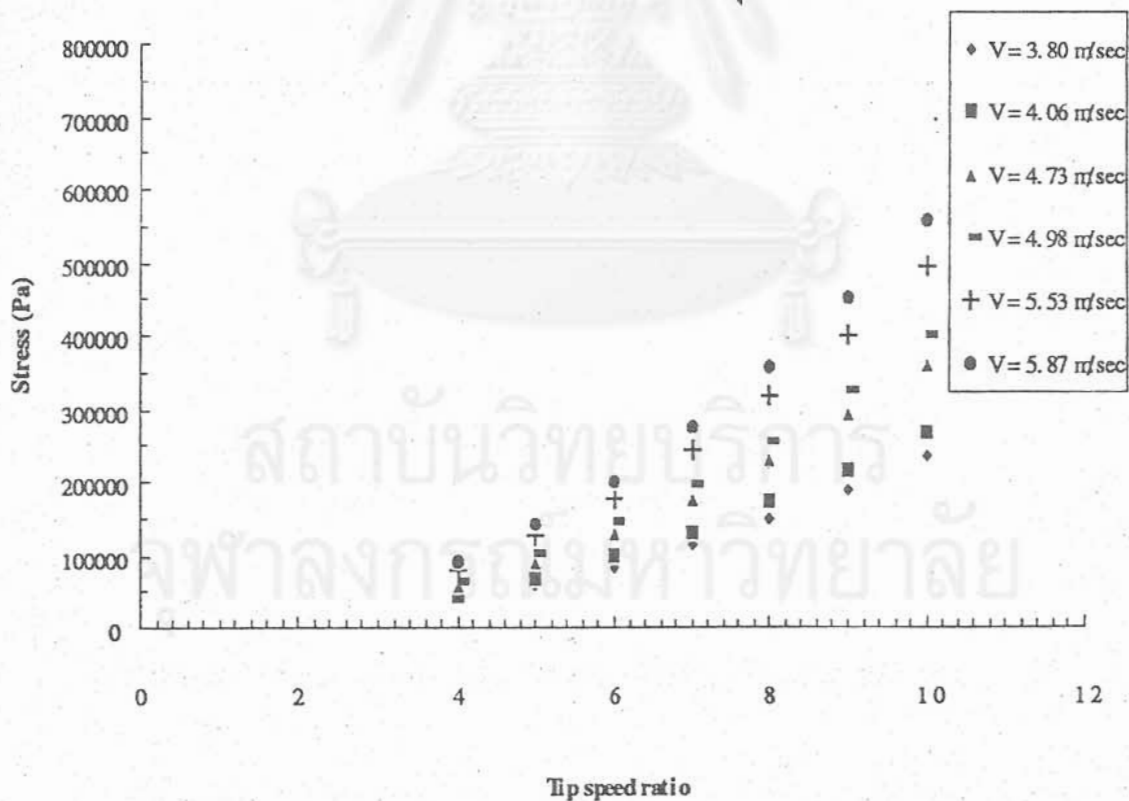
รูปที่ 5.30 และ 5.31 แสดงถึงค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัด ที่คำนวณได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกังหันลมชุดแรกและชุดที่สอง รูปที่ 5.32 และ 5.33 แสดงถึงค่าความเค้นจากแรงดึง ที่คำนวณได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกังหันลมชุดแรกและชุดที่สอง



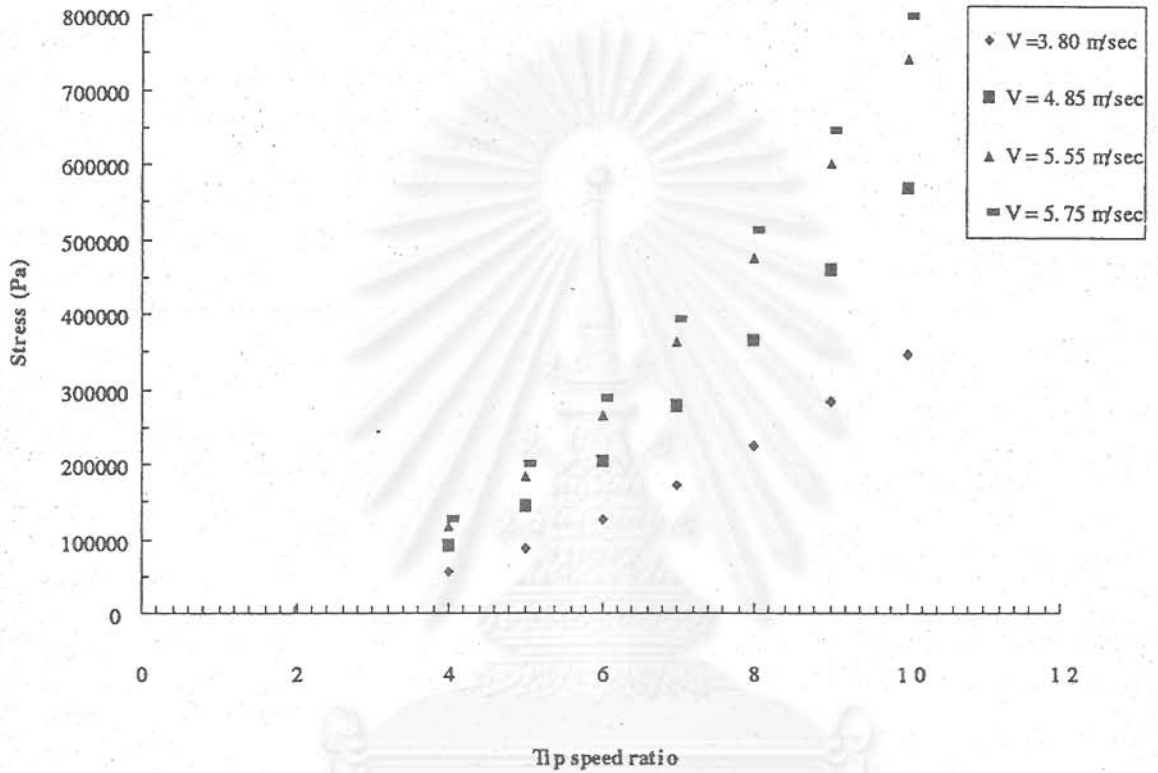
รูปที่ 5.30 ค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกังหันลมชุดแรก



รูปที่ 5.31 ค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกังหันลมชุดที่สอง



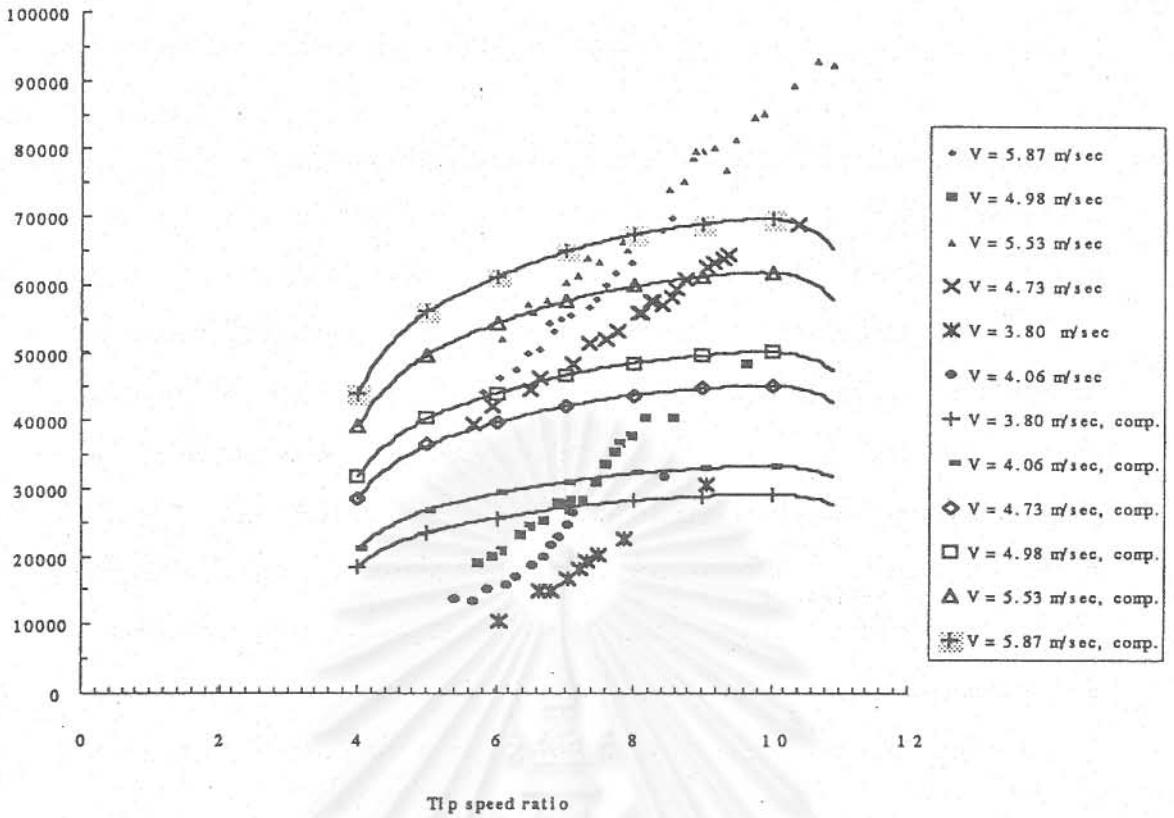
รูปที่ 5.32 ค่าความเค้นจากแรงดิ่งที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกังหันลมชุดแรก



รูปที่ 5.33 ค่าความเค้นจากแรงดึงที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกังหันลมชุดที่สอง

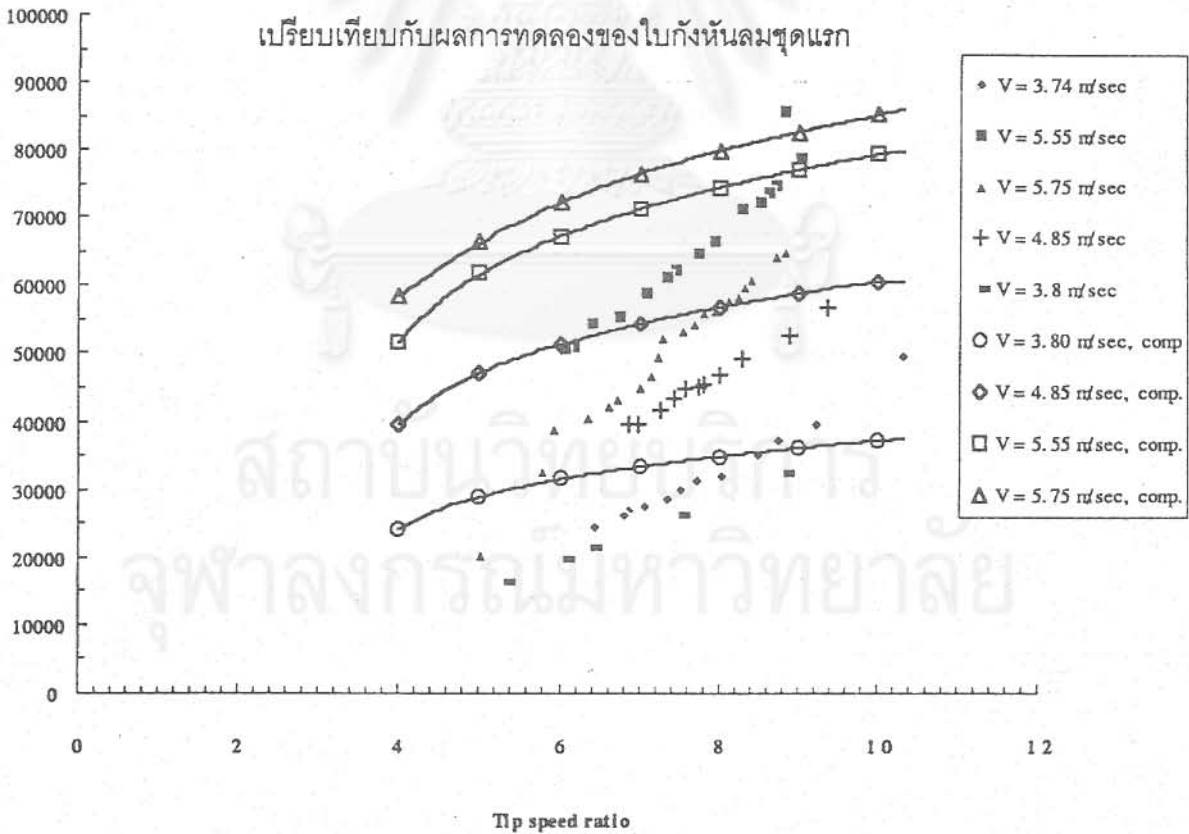
5.10 การเปรียบเทียบค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดของใบกังหันลม ของกังหันลม แนวนอนจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับผลการทดลอง

รูปที่ 5.34 และ 5.35 แสดงค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับผลการทดลองของกังหันลมชุดแรก และกังหันลมชุดที่สอง ที่ความเร็วลมต่างๆ กันและที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบต่างๆ กันด้วย



รูปที่ 5.34 ค่าความเค้นจากโมเมนต์ตัดจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เปรียบเทียบกับผลการทดลองของใบกังหันลมชุดแรก



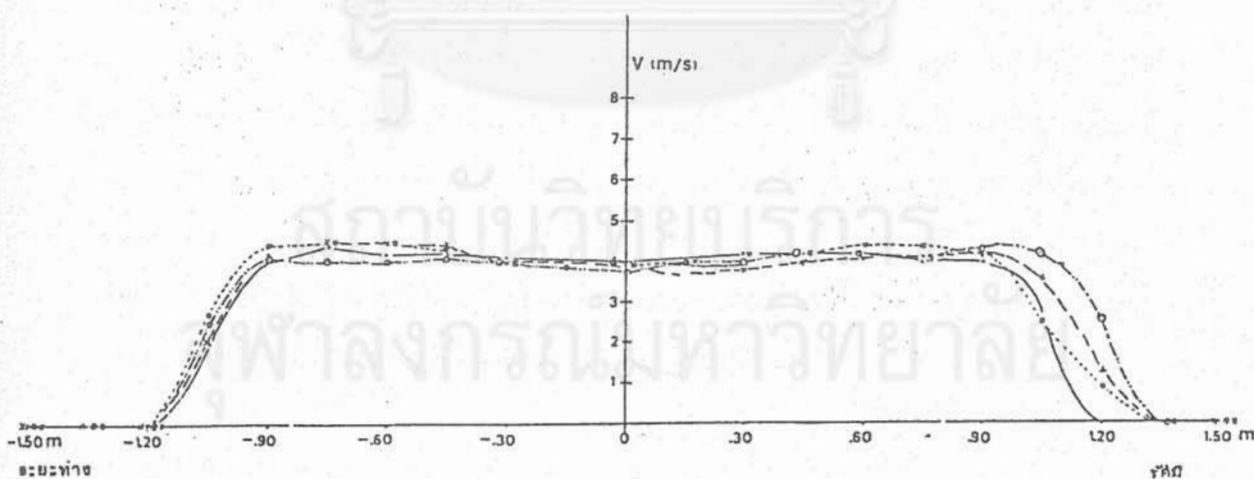
รูปที่ 5.35 ค่าความเค้นจากโมเมนต์ตัดจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เปรียบเทียบกับผลการทดลองของใบกังหันลมชุดที่สอง

5.11 การกระจายตัวของความเร็วลมจากอุโมงค์ลม

5.11.1 ความเร็วลมจากอุโมงค์ลมในการทดลองหาสมรรถนะของกังหันลม

ในการทดลองหาค่าสมรรถนะของกังหันลมทั้งสองชุด ซึ่งเป็นการทดลองในช่วงแรก ซึ่งในช่วงนั้นตัวอุโมงค์ลมอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ ในตัวอุโมงค์ลมมีทั้งตะแกรงรังผึ้งและชุดท่อพีวีซีเรียงเต็มตลอดพื้นที่ภาคตัดขวางของอุโมงค์ลมอยู่ในถึงสองชั้น เพื่อทำหน้าที่บังคับให้ลมที่เป่าออกจากตัวพัดลมของอุโมงค์ลมที่มีกระแสลมที่หมุนเวียนกลายเป็นลมที่มีการไหลเป็นมิติเดียว(ไม่มีองค์ประกอบของลมในทิศทางเชิงมุม) และมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ จากผลการสอบเทียบอุโมงค์ลมที่ได้ทำไว้ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี [23] ซึ่งกระทำไว้ที่ความเร็วรอบของพัดลมของอุโมงค์ลมมีค่าเท่ากับ 600 รอบต่อนาที และทำการวัดที่มุมต่างๆ จาก 0, 45, 90 และ 135 องศา และที่ระยะต่างๆ ขวางตัวอุโมงค์ลม เพื่อนำผลที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับแนวศูนย์กลาง โดยที่วัดที่ระยะห่างจากอุโมงค์ลมออกมา 1.5 เมตร การกระจายตัวของความเร็วลมจะมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.36



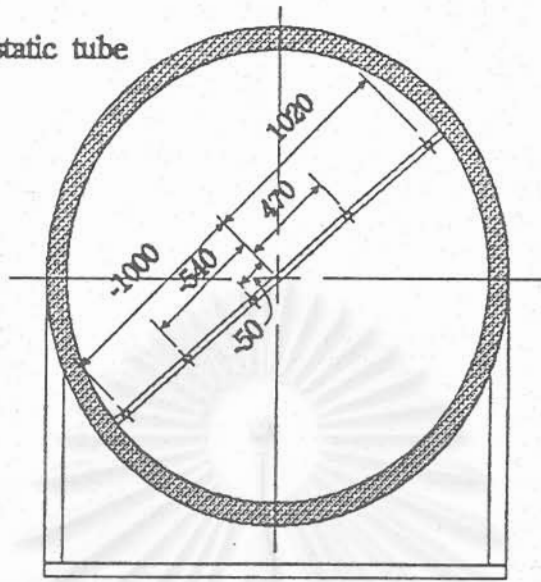
รูปที่ 5.36 ค่าความเร็วลมที่มุมต่างๆ โดยวัดเทียบกับเส้นระดับที่ระยะห่างจากปากอุโมงค์ลม

1.5 เมตร และที่ความเร็วรอบของพัดลมของอุโมงค์ลมเท่ากับ 600 รอบต่อนาที

5.11.2 ความเร็วลมจากอุโมงค์ลม ในการทดลองหาค่าความเค้นของกังหันลม

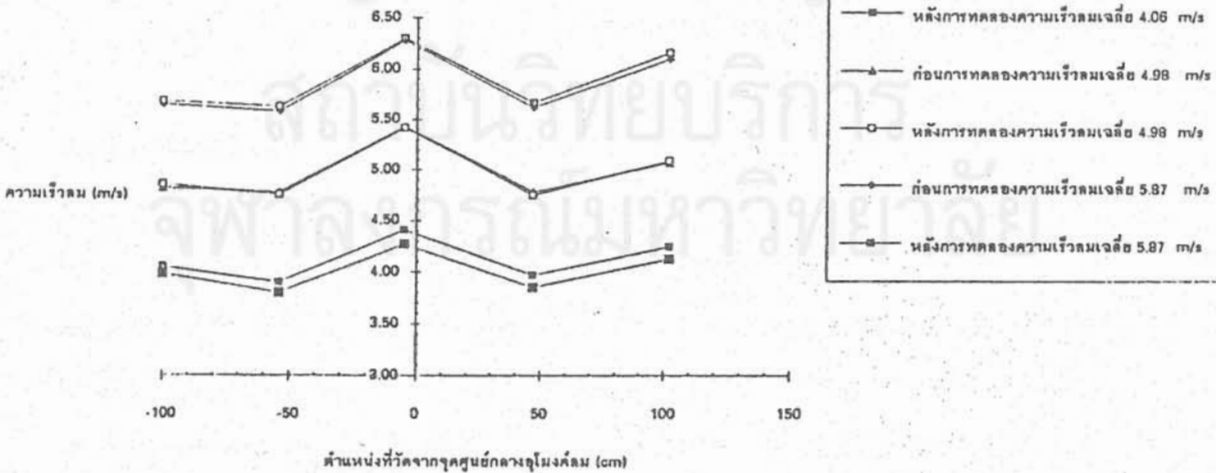
การทดลองหาค่าความเค้นของกังหันลมทั้งสองชุดถูกกระทำหลังจากที่ได้ทำการทดลองหาค่าสมรรถนะของกังหันลมทั้งสองชุดเสร็จสิ้นเป็นเวลานานมาก ในการทดลองครั้งที่สองเพื่อหาค่าความเค้นนั้น ตัวอุโมงค์ลมไม่ได้อยู่ในสภาพสมบูรณ์เหมือนการทดลองครั้งแรก มีปัญหาของการทำความเร็วลมสูงสุดได้ต่ำกว่าในตอนที่ยังอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์มาก(ในการทดลองครั้งแรกตัวอุโมงค์ลมสามารถทำความเร็วลมสูงสุดได้ 7.2 เมตรต่อวินาที) จึงได้มีการถอดชุดท่อพีวีซีที่ทำหน้าที่บังคับให้ลมไหลออกมาเป็นการไหลมิติเดียวออกไปหนึ่งชั้น เพื่อลดความเสียดทานภายในตัวอุโมงค์ลมลง ทำให้ได้ความเร็วลมสูงขึ้น ซึ่งก็สามารถให้ความเร็วลมได้ถึงประมาณ 5.85 เมตรต่อวินาที แต่ในการถอดชุดท่อพีวีซีออกชั้นหนึ่งก็มีผลกระทบตามมาคือ ลมที่ไหลออกมายังมีองค์ประกอบของความเร็วในทิศทางเชิงมุมจากการไหลผ่านตัวพัดลมออกมาสู่ตัวกังหันลมที่ทำการทดลองด้วย ซึ่งในการทดลองหาค่าความเค้นนี้ได้มีการติดตั้งตัวกังหันลมห่างจากอุโมงค์ลมเป็นระยะ 90 เซนติเมตร ในขณะที่ในการทดลองหาค่าสมรรถนะตัวกังหันจะติดตั้งอยู่ห่างจากอุโมงค์ลมเป็นระยะถึง 1.5 เมตร ซึ่งเป็นระยะที่ได้มีการสอบเทียบความเร็วลมจากอุโมงค์ลมเมื่ออุโมงค์ลมยังอยู่ในสภาพสมบูรณ์ว่าเป็นระยะที่ให้ความเร็วลมสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ ซึ่งกว่าจะเป็นวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.80 เมตร ดังนั้น ในการทดลองหาค่าความเค้น ความเร็วลมที่ใบกังหันจะไม่สม่ำเสมอและมีองค์ประกอบของความเร็วเชิงมุมปนอยู่ด้วย การทดลองหาค่าความเค้นของกังหันลมเองก็ถูกกระทำขึ้นสองครั้ง ครั้งแรกในการทดลองหาค่าความเค้นได้มีการวัดความเร็วลมเพียงจุดเดียว แต่ในการทดลองครั้งที่สองได้มีการวัดความเร็วถึงห้าจุดขวางผ่านตัวอุโมงค์ลม โดยติดตั้งท่อปีโตสติกส์เพื่อวัดความเร็วลมที่ระยะห่างจากปากอุโมงค์ลมเท่ากับ 56 เซนติเมตร รูปที่ 5.37 แสดงถึงตำแหน่งการวางท่อปีโตสติกส์ เพื่อวัดความเร็วลมของอุโมงค์ลม รูปที่ 5.38 และ 5.39 เป็นรูปที่แสดงถึงความเร็วลมที่วัดที่ตำแหน่งต่างๆ ทั้งก่อนการทดลองและหลังการทดลอง ซึ่งจะเห็นได้ว่า เนื่องจากสภาพของอุโมงค์ลมที่ไม่สมบูรณ์และการติดตั้งกังหันลมค่อนข้างใกล้ ทำให้การกระจายตัวของความเร็วลมไม่สม่ำเสมอ มีความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางอุโมงค์ลมค่อนข้างสูงและลดน้อยลงที่ขอบด้านข้าง

๑ Pitot static tube



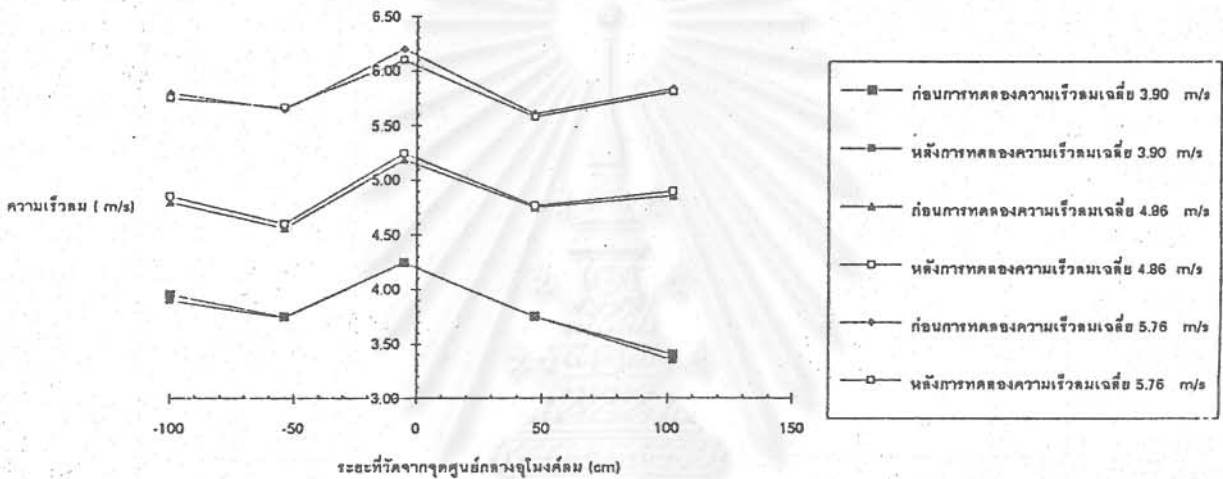
รูปที่ 5.37 ตำแหน่งการวางท่อพิโตสถิตย์ เพื่อวัดความเร็วลมของอุโมงค์ลม

ลักษณะการกระจายความเร็วลมภายในอุโมงค์ลม : กังหันลมใบเหला



รูปที่ 5.38 ความเร็วลมในการทดลองหาค่าความเค้นของกังหันลมชุดแรก

ลักษณะการกระจายความเร็วลมภายในอุโมงค์ลม : กังหันลมใบตรงมุมใบ 0 องศา



รูปที่ 5.39 ความเร็วลมในการทดลองหาค่าความเค้นของกังหันลมชุดที่สอง

5.12 ความคลาดเคลื่อนของ slip ring

จากผลการทดลองเพื่อทดสอบหาค่าขอบเขตความคลาดเคลื่อนของ slip ring โดยใช้ความต้านทานแบบฟิล์ม 120 โอห์ม สี่ตัวติดแทน strain gage นั้น จะพบว่าถึงแม้จะเป็นการทดลองในวันเดียวกัน และช่วงเวลาที่ใช้ในการทดลองจะแตกต่างกันไม่ถึงสองชั่วโมงครึ่ง แต่ผลการทดลองทั้งสามชุดยังมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก ตารางที่ 5.8 แสดงถึงค่าสัญญาณไฟฟ้าที่อ่านได้จาก slip ring ซึ่งแปรไปตามความเร็วรอบในลักษณะลุ่ม

การทดลองโดยใช้ความต้านทาน 120 โอห์ม แทน strain gage

การทดลองครั้งที่ 1							
No.	rpm	voltage (mV)			frequency		
		max	min	mean	peak	peak	rpm
1	0	-5	-5	-5	0	0	0
2	764	-116	-116	-116	0	0	0
3	749	-128	-128	-128	0	0	0
4	737	-142	-142	-142	0	0	0
5	724	-152	-152	-152	0	0	0
6	706	-175	-175	-175	0	0	0
7	697	-172	-172	-172	0	0	0
8	681	-177	-177	-177	0	0	0
9	665	-190	-190	-190	0	0	0
10	650	-196	-196	-196	0	0	0
11	632	-200	-200	-200	0	0	0
12	610	-190	-190	-190	0	0	0
13	595	-200	-200	-200	0	0	0
14	574	-182	-182	-182	0	0	0
15	561	-186	-186	-186	0	0	0
16	554	-182	-182	-182	0	0	0
17	536	-193	-193	-193	0	0	0
18	515	-196	-196	-196	0	0	0
19	0	-144	-144	-144	0	0	0
การทดลองครั้งที่ 2							
No.	rpm	voltage (mV)			frequency		
		max	min	mean	peak	peak	rpm
1	0	-8.0	-8.0	-8.0	0	0	0
2	750	-60.9	-66.7	-63.8	0.856	0.78	789
3	733	-63.0	-70.0	-66.5	0.401	0.319	732
4	698	-63.4	-71.4	-67.4	0.378	0.285	645
5	681	-71.4	-74.2	-72.8	0.307	0.218	674
6	670	-64.8	-73.5	-69.15	0.347	0.263	714
7	645	-45.5	-56.0	-50.75	0.337	0.24	619
8	621	-45.5	-54.3	-49.9	0.364	0.259	571
9	613	-47.3	-57.8	-52.55	0.341	0.244	619
10	603	-50.8	-57.8	-54.3	0.318	0.28	1579
11	567	-40.3	-54.3	-47.3	0.706	0.604	588
12	553	-52.5	-71.8	-62.15	0.35	0.25	600
13	537	-56.0	-70.0	-63.0	0.58	0.486	638
14	516	-66.5	-66.5	-66.5	----	----	----
15	502	-59.5	-75.3	-67.4	0.458	0.347	541
16	0	-19.3	-19.3	-19.3	----	----	----

การทดลองครั้งที่ 3							
No.	rpm	voltage (mV)			frequency		
		max	min	mean	peak	peak	rpm
1	0	-9.0	-9.0	-9.0	0	0	0
2	708	-35.0	-42.0	-38.5	0.347	0.263	714
3	682	-20.3	-25.2	-22.75	0.275	0.191	714
4	640	-11.2	-16.8	-14.0	0.331	0.331	-----
5	630	-5.6	-16.1	-10.85	0.32	0.222	612
6	615	-23.1	-31.5	-27.3	0.541	0.436	571
7	601	-10.5	-17.5	-14.0	0.536	0.435	594
8	582	-14.0	-21.7	-17.85	0.443	0.342	594
9	562	-2.8	-13.3	-8.05	0.426	0.32	566
10	531	-6.3	-15.4	-10.85	0.413	0.298	522
11	518	-15.4	-26.6	-21.0	1.146	1.034	536
12	454	-4.2	-24.5	-14.35	1.134	0.884	240
13	435	-4.9	-15.4	-10.15	1.102	0.828	219
14	0	-6.2	-6.2	-6.2	0	0	0

ตารางที่ 5.8 สัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากตัว slip ring ที่ความเร็วรอบต่างๆ กัน

ซึ่งโดยทางทฤษฎีแล้วหากค่าความต้านทานของ slip ring มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความเร็วรอบ เมื่อใช้แผ่นความต้านทาน 120 โอห์มแทน strain gage และเมื่อกังหันลมรับภาระซึ่งทำให้ความเร็วรอบเปลี่ยนไป แต่ความต้านทานก็ยังคงมีค่าดั้งเดิม ดังนั้น สัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ผ่านตัว slip ring จะมีค่าคงที่ หรือหากความต้านทานของ slip ring (แปรตามกับขดลวด) แปรตามความเร็วรอบในลักษณะที่สามารถทำนายได้(เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความเร็วรอบ) สัญญาณที่วัดได้ก็ต้องแปรตามความเร็วรอบในลักษณะที่ทำนายได้ แต่จากการทดลองซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 5.8 จะเห็นได้ว่า ความต้านทานของ slip ring แปรตามความเร็วรอบของกังหันลมในลักษณะสุ่ม (random)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

อภิปรายผลการทดลองและผลเฉลย

6.1 บทนำ

ผลการทดลองและผลเฉลยจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมทั้งสองชุด ที่ถูกแสดงไว้ในบทที่ 5 ถูกนำมาอภิปรายเปรียบเทียบและบรรยายถึงสาเหตุและเหตุผลของความใกล้เคียง และความแตกต่างของผลการทดลองและผลเฉลย

6.2 สมรรถนะกังหันลมจากการทดสอบกับอุโมงค์ลมและติดตั้งบนรถปิคอัพ

6.2.1 กำลังและโมเมนต์บิดที่แปรตามความเร็วรอบ

รูปที่ 5.1 และ 5.5 เป็นรูปของกำลังของกังหันลมชุดแรกที่มีความเร็วลมต่างๆ กันโดยทดลองกับอุโมงค์ลมและรถปิคอัพ ซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังที่ได้จากกังหันลมชุดแรกทดสอบกับอุโมงค์ลมนั้น มีค่าแปรตามความเร็วลมและความเร็วรอบ ที่ความเร็วต่ำ $V_{\infty} = 5.03$ เมตรต่อวินาที จะได้กำลังสูงสุดเท่ากับ 18.34 วัตต์ที่ความเร็วรอบ 420 รอบต่อนาที จากนั้นกำลังก็จะลดลงเมื่อความเร็วรอบเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเพิ่มความเร็วลมมากขึ้น กำลังก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยลักษณะความแปรเปลี่ยนของเส้นโค้งของความสัมพันธ์ของกำลังและความเร็วรอบจะเป็นลักษณะเดียวกัน แต่ค่ากำลังจะเพิ่มมากขึ้นตามความเร็วลม สำหรับในรูปที่ 5.5 ซึ่งเป็นการทดลองโดยติดตั้งกังหันลมชุดแรกไว้บนรถปิคอัพแล้วการทดลอง จะเห็นได้ว่ากำลังยังคงเพิ่มขึ้นตามความเร็วลม และแปรตามความเร็วรอบ เมื่อนำผลการทดลองของกำลังที่ความเร็วลม 7.2 เมตรต่อวินาที ที่ทดสอบกับอุโมงค์ลมมาเปรียบเทียบกับกำลังที่ได้จากกังหันลมที่ติดตั้งบนรถปิคอัพที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที จะพบว่ากำลังจากกังหันลมที่ทดลองกับอุโมงค์ลมจะให้ค่ามากกว่า(จากการคาดคะเนโดย extrapolate กำลังของกังหันลมที่ถูกติดตั้งบนรถปิคอัพให้มีค่าความเร็วลม 7.2 เมตรต่อวินาที โดยที่คิดจากทฤษฎีที่กำลังแปรตามความเร็วลมเป็นกำลังสาม) เหตุผลส่วนหนึ่งคงอธิบายได้จากความแม่นยำของการติดตั้งเครื่องมือวัดในการทดลองกับอุโมงค์ลม ซึ่งทำได้ดีกว่าการติดตั้งบนรถปิคอัพ อีกทั้งการควบคุมความเร็วลมจากอุโมงค์ลมทำได้ดีกว่าบนรถปิคอัพ สำหรับการวัดแรงบนรถปิคอัพนั้น เนื่องจากกังหันลมทั้งสองชุดถูกติดตั้งบนรถเคลื่อนที่ อีกทั้งอุปกรณ์ในการวัดแรงเพื่อนำไปคำนวณเป็นโมเมนต์บิดนั้นค่อนข้างหยาบ และเมื่อรถสั่น การวัดย่อมคลาดเคลื่อนได้ง่ายกว่า ดังนั้น จากเหตุผลดังกล่าว ผลการทดลองจากอุโมงค์ลมจึงน่าจะมีความแม่นยำกว่าทดลองบนรถปิคอัพ

แต่อย่างไรก็ดีการทดลองบนรถปีค้อพสามารถทำให้ได้ผลการทดลองในความเร็วลมที่สูงกว่าที่อุโมงค์ลมทำได้ จะเห็นได้ว่ากำลังจากกังหันลมนั้นมีค่าสูงเพิ่มขึ้นมากเมื่อเพิ่มความเร็วสูงขึ้น ซึ่งก็เป็นการยืนยันในตัวอย่างที่ว่าการกำลังจากลมนั้นแปรตามความเร็วลมยกกำลังสาม ดังนั้น หากสามารถใช้อุปกรณ์การวัดที่เหมาะสม และสามารถติดตั้งกังหันลมในสภาพที่ดีกว่าที่ทำการทดลองในครั้งนี้ การทดลองในสภาวะดังกล่าวก็จะสามารถกำจัดข้อจำกัดของเรื่องความเร็วลมของอุโมงค์ลมลงได้(ในประเทศสหรัฐอเมริกาจะมีศูนย์ทดสอบอยู่ที่ Department of Transportation Test Center ที่ Pueblo, Colorado ที่ระดับ 1311 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล มีการวางรางรถไฟยาว 4 กิโลเมตร และใช้หัวรถจักรดันรถบรรทุกตู้สินค้า flatcar สองคันให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้า โดย flatcar คันแรกที่วิ่งนำหน้าจะติดตั้งตัวกังหันลมที่จะทดสอบ และ flatcar คันที่สองก็จะติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดและทดสอบกังหันลมด้วย [15])

สำหรับในรูปที่ 5.3 เป็นการทดลองในการหา กำลังจากกังหันลมชุดที่สองกับอุโมงค์ลม จะเห็นได้ว่า ลักษณะเส้นโค้งของกำลังที่แปรตามความเร็วรอบและความเร็วลมมีลักษณะแบบเดียวกับกังหันลมชุดแรก แต่ที่ความเร็วลมเดียวกันจะให้กำลังสูงกว่าของกังหันลมชุดแรก ซึ่งเหตุผลนี้มาจากขนาดของใบกังหัน(ความยาวและความกว้างของใบกังหัน) ของกังหันลมชุดที่สองนั้นใหญ่กว่ากังหันลมชุดแรก

รูปที่ 5.2, 5.4 และ 5.6 เป็นผลการทดลองของค่าโมเมนต์บิดที่ได้จากการทดลองกับอุโมงค์ลม และติดตั้งบนรถปีค้อพ ซึ่งก็จะให้ผลในลักษณะเดียวกันกล่าวคือ โมเมนต์บิดแปรตามความเร็วรอบและความเร็วลม โมเมนต์บิดของกังหันลมชุดที่สองจะมีค่าสูงกว่าโมเมนต์บิดของกังหันลมชุดแรกที่ความเร็วเดียวกัน และโมเมนต์บิดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามความเร็วลม

6.2.2 สัมประสิทธิ์กำลัง

รูปที่ 5.7 และ 5.8 นั้นแสดงถึงสมรรถนะในรูปของเทอมไร้มิติ อันได้แก่ สัมประสิทธิ์กำลังและอัตราส่วนความเร็วปลายใบ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์กำลังนั้นแปรตามอัตราส่วนความเร็วปลายใบ โดยมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบประมาณ 5 และ 6 แล้วค่อยลดลงเมื่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ได้จากการทดลองนั้นมีค่าต่างๆ กันแปรตามความเร็วลม โดยที่ความเร็วลมสูงนั้นค่าสัมประสิทธิ์กำลังจะสูงกว่าที่ความเร็วลมต่ำ ยกเว้นในกรณีของค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ได้จากการทดลอง โดยติดตั้ง

อยู่บนรถปิคอัพ ในย่านของอัตราส่วนความเร็วปลายใบต่ำค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ความเร็วลมสูง 10 เมตรต่อวินาทีที่กลับให้ค่าต่ำกว่าความเร็วลมต่ำ 7 - 8 เมตรต่อวินาที ในย่านของอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่สูงค่าสัมประสิทธิ์กำลังกลับมาเกาะกลุ่มกันเรียงจากความเร็วลมต่ำสู่ความเร็วลมสูง และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากอุโมงค์ลมจะเห็นได้ว่า สำหรับอุโมงค์ลมนั้นค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ความเร็วลม 7.2 เมตรต่อวินาทีนั้นให้ค่าสูงกว่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ได้จากการทดลองที่ติดตั้งบนรถปิคอัพในย่านอัตราส่วนความเร็วปลายใบต่ำ (5 - 8) จากการเปรียบเทียบการทดลองนี้ และจากลักษณะการติดตั้งและการควบคุม พอสรุปได้ว่า ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองที่ติดตั้งบนรถปิคอัพนั้นมีค่าค่อนข้างสูง ผลการทดลองกักกันลมในอุโมงค์ลมในโครงการนี้จึงน่ามีความเชื่อถือได้สูงกว่า

6.3 สัมประสิทธิ์กำลังจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลการทดลอง

รูปที่ 5.9 และ 5.10 เป็นรูปของสัมประสิทธิ์กำลังที่แปรตามอัตราส่วนความเร็วปลายใบ ที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วง $C_{L_{max}} = 1.32$, $C_{D_0} = 0.0132$ (ดูรายละเอียดภาคผนวก ค.) จะเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์กำลังแปรตามอัตราส่วนความเร็วปลายใบ โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบเท่ากับ 6 สำหรับกักกันลมชุดแรก และมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบเท่ากับ 5 สำหรับกักกันลมชุดที่สอง ค่าที่แสดงในรูปที่ 5.9 และ 5.10 นี้เป็นค่าสัมประสิทธิ์กำลังจากค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบจาก 4 ถึง 10 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองตามที่แสดงในรูปที่ 5.11 และ 5.12 จะเห็นได้ชัดเจนโดยเฉพาะในรูปที่ 5.11 ว่า ผลเฉลยมีค่าแตกต่างจากการทดลองมาก และผลเฉลยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังเพียงค่าเดียว ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ได้จากการทดลองนั้นมีหลายค่าแปรตามความเร็วลม ซึ่งเหตุผลของความแตกต่างระหว่างผลเฉลยกับผลการทดลองก็คือ ผลกระทบของตัวเลขเรย์โนลด์ของอากาศที่ไหลผ่านใบกังหันลม ดังที่บรรยายไว้ในบทที่ 5 ซึ่งในรูปที่ 5.14 และ 5.15 จะแสดงถึงผลของสมรรถนะที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงต่างกัน(อันเกิดจากผลของตัวเลขเรย์โนลด์) จะเห็นได้ว่า ถ้าหากกังหันลมได้ทำงานโดยที่ใบกังหันลมทั้งหมด(ตลอดความยาวของใบกังหันลม) เห็นอากาศที่มีเลขเรย์โนลด์มีค่าในช่วง $3 \times 10^5 - 6 \times 10^5$ ($C_{L_{max}} = 1.32$, $C_{D_0} = 0.0132$) สัมประสิทธิ์กำลังจะมีค่าค่อนข้างสูง โดยมีจุดสูงสุดเท่ากับ 0.40123 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบเท่ากับ 6 (ตามที่ออกแบบไว้โดยโปรแกรมทำนายรูปร่างใบกังหันที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบเท่ากับ 6) สำหรับกักกันลมชุดแรก สำหรับกักกันลมชุดที่สองนั้น ภายใต้ตัวเลขเรย์โนลด์เดียวกันจะให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดเท่ากับ 0.38833 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบเท่ากับ 5 ซึ่งก็

เป็นการยืนยันว่าใบกังหันลมที่ได้รับการออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุดนั้น ตามทฤษฎีแล้ว ถ้าหากเลือกให้ทำงานภายใต้ตัวเลขเรย์โนลด์ที่สูงพอ ก็จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดตามต้องการ

รูปที่ 5.14 และ 5.15 จะแสดงถึงผลกระทบของสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วง(อันเนื่องมาจากตัวเลขเรย์โนลด์ที่ต่างกัน) ต่อสัมประสิทธิ์กำลัง ซึ่งจะเห็นได้ว่าจากย่านอัตราส่วนความเร็วปลายใบสูง(7 - 10) ใบกังหันจะหมุนด้วยความเร็วรอบที่สูง ใบกังหันจะทำงานอยู่ภายใต้สภาวะที่ยังไม่เกิด Stall สัมประสิทธิ์กำลังในย่านนี้จะแปรตามสัมประสิทธิ์แรงยกหรืออัตราส่วนสัมประสิทธิ์แรงยกต่อแรงหน่วงมาก(C_{D0} หรือ C_L/C_D) การเพิ่มสัมประสิทธิ์แรงหน่วงส่งผลให้สัมประสิทธิ์กำลังลดลงอย่างมาก ในช่วงของย่านอัตราส่วนความเร็วปลายใบต่ำ(3 - 4 - 5) ใบกังหันลมจะทำงานอยู่ในสภาพ Stall เป็นส่วนใหญ่(มุมปะทะจะมีค่าสูง) ซึ่งในสภาวะ Stall สัมประสิทธิ์ของแรงยกจะตกลง ในขณะที่เดียวกันสัมประสิทธิ์ของแรงหน่วงจะเพิ่มขึ้นอย่างมากและรวดเร็ว ซึ่งจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์กำลังลดลงอย่างรวดเร็วด้วย ดังจะเห็นได้ว่า เส้นโค้งของสัมประสิทธิ์กำลังลด เมื่อค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบลดลง

รูปที่ 5.16, 5.17 และ 5.18 เป็นรูปที่นำสัมประสิทธิ์กำลังจากผลเฉลยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเลือกค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงของแต่ละอัตราส่วนความเร็วปลายใบให้สอดคล้องกับตัวเลขเรย์โนลด์ของอากาศที่ไหลผ่านใบกังหันลม ตามที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1, 5.2 และ 5.3 นำมาพล็อตเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์กำลังจากผลการทดลองในรูปที่ 5.7 และ 5.8

รูปที่ 5.16 จะเห็นได้ว่า สำหรับกังหันลมชุดแรกนั้น ค่าสัมประสิทธิ์กำลังจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้พิจารณาผลของตัวเลขเรย์โนลด์เข้าไปด้วย จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์กำลังจากผลการทดลองที่ความเร็วลม 7.2 เมตรต่อวินาทีมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์กำลังจากผลเฉลยและผลการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 6 ถึง 10 มีลักษณะคล้ายกันขนานกัน ต่างกันด้วยค่าค่อนข้างคงที่ค่าหนึ่ง ส่วนค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบเท่ากับ 4 และ 5 ค่าผลเฉลยจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะลดลงเนื่องจากปรากฏการณ์ Stall บนใบกังหันลม ซึ่งความแม่นยำของสัมประสิทธิ์กำลังจากผลเฉลยในย่านนี้ขึ้นกับความแม่นยำของข้อมูลสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงของแพนอากาศ ในช่วง Stall ซึ่งข้อมูลของสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงของใบกังหันลม(แพนอากาศ NACA 4415) ในช่วง Stall ที่ใช้สำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในโครงการนี้ เป็นการสร้างโมเดลโดย

การเปรียบเทียบกับแผนอากาศรูปอื่น ไม่มีข้อมูลที่แท้จริงสนับสนุน และเนื่องจากกังหันลมที่ทำการทดลองในโครงการนี้ไม่สามารถทำงานเลยไปในช่วงที่ Stall ได้ จึงไม่มีข้อมูลของสมรรถนะจากการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลเฉลย

ส่วนในรูปที่ 5.17 เป็นการเปรียบเทียบผลเฉลยที่มีการปรับค่าโดยพิจารณาเอาผลของตัวเลขเรย์โนลด์ในสองกรณี กรณีแรกคือ ค่าผลเฉลยที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที ในขณะที่อีกกรณีคือ ค่าผลเฉลยที่ความเร็วลม 10 เมตรต่อวินาที ซึ่งผลต่างก็คือ ในกรณีแรก ใบกังหันเห็นอากาศที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำกว่าในกรณีที่สอง ดังนั้น ในกรณีแรก ใบกังหันหมุนอยู่ในสภาพที่มีสัมประสิทธิ์แรงหน่วงสูงกว่ากรณีที่สอง ซึ่งส่งผลให้สัมประสิทธิ์กำลังลดน้อยกว่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า

ในรูปที่ 5.18 สัมประสิทธิ์กำลังจากผลเฉลยที่มีการพิจารณาผลของตัวเลขเรย์โนลด์ (เปลี่ยนค่า C_{D0} , C_{Lmax} ที่แต่ละอัตราส่วนความเร็วปลายใบ ตามตารางที่ 5.3) ถูกนำมาพล็อตเปรียบเทียบกับผลการทดลองจะเห็นว่า อัตราส่วนความเร็วปลายใบมีค่าเท่ากับ 9 และ 10 ผลเฉลยทำนายค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงกว่าผลการทดลอง แต่ในส่วนของค่าสัมประสิทธิ์กำลังจากผลเฉลยที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบตั้งแต่ 8 ลงมา จะมีค่าต่ำกว่าค่าผลการทดลองที่ความเร็วลม 6.6 เมตรต่อวินาที เล็กน้อย แต่เข้าใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ความเร็วลมที่ 6.23 เมตรต่อวินาที ซึ่งในความคลาดเคลื่อนในส่วนนี้อาจพิจารณาได้ 2 แนวทาง ส่วนแรกคือ การที่ผลเฉลยให้ค่าต่ำไปเนื่องจาก ใช้ค่า C_{D0} ในโปรแกรมสูงไป และส่วนที่สองก็คือ ความไม่สมบูรณ์ของรูปร่างใบกังหันและการวัดค่าแรงในกังหันชุดที่สอง ทำให้ผลการทดลองนี้คลาดเคลื่อนไป

จะเห็นได้ว่า จากการพิจารณาผลของตัวเลขเรย์โนลด์และการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เรียบง่ายจำลองข้อมูลทางอากาศพลศาสตร์ของใบกังหันลม ที่ทำให้การหาผลเฉลยจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์เรียบง่ายขึ้นนั้น ให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังใกล้เคียงกับผลการทดลองค่อนข้างมาก ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นมาจากทั้งสองสาเหตุ สาเหตุของความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และความคลาดเคลื่อนจากการทำการทดลองกังหันลมจากอุโมงค์ลม และเครื่องมือวัด

6.4 ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองหาสมรรถนะของกังหันลม

จากในหัวข้อที่ 6.3 ได้มีการอภิปรายถึงสาเหตุของความแตกต่างระหว่างสมรรถนะที่ได้จากการทดลอง และจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยที่พิจารณาที่ผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นหลัก แต่ค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ได้จากการทดลองเองก็มีความคลาดเคลื่อนที่สามารถจำแนกได้ดังต่อไปนี้

6.4.1 ความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดลม

ในการทดลองหาค่าสมรรถนะกับอุโมงค์ลม การวัดความเร็วลมทำได้ด้วยการใช้มาโนมิเตอร์ที่ใช้น้ำมันแดงเป็นของไหลในมาโนมิเตอร์ และมาตราส่วนบนมาโนมิเตอร์ที่เล็กที่สุดคือ 0.2 มิลลิเมตรน้ำ ซึ่งเท่ากับความเร็ว 0.4 เมตรต่อวินาที ดังนั้น ความคลาดเคลื่อนของการอ่านความเร็วลมจึงอยู่ในช่วง ± 0.2 เมตรต่อวินาที สำหรับการทดลองบนรถปีกอ้อพ ความเร็วลมถูกวัดด้วยเครื่องวัดลมชนิดลูกถ้วย 3 ใบ ซึ่งมาตราของเครื่องมือวัดค่อนข้างหยาบและความเร็วลมที่วัดก็ขึ้นกับความเร็วของรถปีกอ้อพ ดังนั้นการรักษาความเร็วรถให้คงที่เพื่อจะได้รับการรักษาความเร็วลมที่อ่านบนรถให้คงที่ในขณะที่เปลี่ยนภาระบนชุดดรัมเบรกจะทำได้ค่อนข้างยาก ทำให้มีความคลาดเคลื่อนในความเร็วลมและค่าสมรรถนะมากกว่าชุดที่ใช้ทดลองกับอุโมงค์ลม

6.4.2 ความคลาดเคลื่อนของการกระจายตัวของลมที่พัดเข้าหากังหันลม

ในกรณีของอุโมงค์ลม การกระจายตัวของลมค่อนข้างสม่ำเสมอ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.36 แต่ในกรณีของรถปีกอ้อพ การติดตั้งตัวกังหันลมอยู่เหนือหลังคารถนั้นกระทำด้วยความสูงที่จำกัด เพราะมิฉะนั้นรถอาจพลิกคว่ำได้ง่าย ดังนั้น ลมที่พัดเข้าหาตัวกังหันจะมีผลกระทบจากการไหลเวียนของลมที่พัดผ่านตัวหลังคารถ ส่งผลให้ลมที่พัดเข้าหากังหันลมนั้นไม่สม่ำเสมอ นั่นเป็นเหตุผลหนึ่งของการที่ความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองจากรถปีกอ้อพ มีสูงกว่าของอุโมงค์ลมค่อนข้างมาก ผลกระทบอีกประการของเรื่องลมที่พัดเข้าหากังหันลมในกรณีการทดลองกับอุโมงค์ลมก็คือ การที่ประตูเหล็กที่อยู่ด้านหลังแท่นติดตั้งกังหันลมและอุโมงค์ลมเสียไม่สามารถเปิดได้ ประตูนี้จะอยู่ด้านหลังตัวกังหันลมประมาณ 6.1 เมตร ซึ่งอาจมีผลของการที่ลม wake จะกระแทกประตูไหลย้อนมาด้านกับ wake ที่มาใหม่ ซึ่งอาจมีผลกระทบทำให้สมรรถนะต่ำลงได้

6.4.3 ความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดแรง

สมรรถนะของกังหันลมในรูปของสัมประสิทธิ์กำลัง จะได้จากการวัดโมเมนต์บิดโดยเป็นผลคูณระหว่างผลแตกต่างของแรงจากน้ำหนักที่ถ่วงและแรงจากตาชั่งสปริงกับรัศมีของดุมดรัมเบรก ดังนั้น ความแม่นยำของกำลังก็ขึ้นกับความแม่นยำของการอ่านค่าความเร็รรอบกับแรงที่ทำให้เกิดโมเมนต์บิด ตาชั่งสปริงที่ใช้มี 2 ตัว ตัวแรกซึ่งใช้กับการทดลองกับอุโมงค์ลมจะมีหน่วยเป็นนิวตัน โดยมี resolution 0.1 นิวตัน และตาชั่งสปริงตัวที่สองมีหน่วยเป็นกรัม โดยมี resolution 10 กรัม ซึ่งใช้บนรถปิดอัทพ์ ซึ่งจะเห็นว่าการเพิ่มก่อนน้ำหนักถ่วงกังหัน(เพิ่มภาระ) เพื่อให้หมุนช้าลงเพิ่มขึ้นประมาณครึ่งละ 100 กรัม แต่แรงต้านจากตาชั่งสปริงสามารถอ่านได้น้อยที่สุดที่ละ 0.1 นิวตัน ซึ่งก็คือประมาณ 10.2 กรัม ดังนั้น ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นได้จึงมาจากแรงต้านอยู่ในช่วงของ 0 - 10 กรัม และเมื่อวัดแรงบนรถปิดอัทพ์ตัวแทนยึดกังหันลมและตัวตาชั่งสปริงนั้นจะสั้นค่อนข้างมาก ทำให้ทำการวัดได้ลำบาก โดยเฉพาะสเกลบนตาชั่งสปริงจะแกว่งไปมาไม่หยุดนิ่งทำให้การอ่านที่แม่นยำทำได้ลำบาก

6.5 สัมประสิทธิ์แรงทริสจากผลเฉลยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

แรงจากอากาศพลศาสตร์นั้น นอกเหนือจากทำให้เกิดโมเมนต์บิด(torque) เพื่อไปหมุนใบกังหันลมก่อเกิดเป็นพลังงานกลแล้ว แรงจากอากาศพลศาสตร์อีกส่วนหนึ่งจะดันตัวใบกังหันให้ออกไปทางด้านหลัง แรงในแนวดังกล่าวนี้เป็นแรงในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบ rotor ซึ่งเราเรียกว่า แรงทริส ในการทดลองนี้ไม่มีการวัดค่าแรงทริสโดยตรง แต่เป็นการวัดความเครียดที่เกิดจากแรงทริสซึ่งก่อให้เกิดเป็นความเค้นบนใบกังหันลม ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทำนายสมรรถนะนี้ นอกเหนือจากการให้ผลเฉลยในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังแล้ว ก็ยังให้ผลเฉลยในรูปของสัมประสิทธิ์แรงทริสด้วย

รูปที่ 5.19 และ 5.20 เป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงทริสที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่างกัน(ที่ค่า C_{D0} และ C_{Lmax} ต่างกัน) ค่าสัมประสิทธิ์แรงทริสจะมีค่าน้อย เมื่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบต่ำ และมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบเพิ่มขึ้น และลดน้อยด้วยอัตราที่ค่อนข้างน้อยอีกครั้ง เมื่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงมาก(ตั้งแต่ 10 ขึ้นไป) เหตุผลก็คือ แรงทริสซึ่งเป็นแรงในแนวตั้งฉากกับระนาบ rotor นั้น จะเป็นผลรวมขององค์ประกอบของแรงยกและแรงหน่วงในทิศทางดังกล่าว ในสภาวะ Stall มุมปะทะจะสูงแรงยกจะลด และแรงหน่วงจะเพิ่ม แต่แรงหน่วงที่เพิ่มมีค่าน้อยกว่าแรงยก ดังนั้น เมื่อรวมแรงในแนวดังกล่าวก็จะมีค่าน้อยกว่าในช่วงที่ไม่ Stall และที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงมากขึ้น

มุมปะทะจะลดลงอย่างมากจนถึงช่วงที่ทำให้แรงยกลดน้อยลง นั่นก็คือเหตุผลของค่าสัมประสิทธิ์แรงทรสลดลง เมื่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงขึ้นมาก(มากกว่า 9)

สำหรับผลของตัวเลขเรย์โนลด์ที่มีต่อสัมประสิทธิ์แรงทรสนั้นจะมีค่อนข้างน้อย ในช่วงของอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่มีค่าเท่ากับ 6 ถึง 10 นั้น ผลของ $C_{L_{max}}$ และ C_{D_0} ที่มีต่อสัมประสิทธิ์แรงทรสนั้นน้อยเป็นค่าแตกต่างในหลักทศนิยมที่สาม ซึ่งในรูปที่ 5.19 และ 5.20 นั้นเส้นกราฟจะทับกันจนแยกไม่ออก ในขณะที่เมื่อค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบอยู่ที่ 4 และ 5 ผลของ $C_{L_{max}}$ กับ C_{D_0} ที่มีต่อสัมประสิทธิ์แรงทรสเริ่มมีผลเห็นชัด ซึ่งในช่วงนี้คือช่วงที่ใบกังหันลมทำงานอยู่ในสภาวะ Stall สำหรับรูปที่ 5.21 และ 5.22 นั้น ได้นำผลของตัวเลขเรย์โนลด์มาพิจารณาประกอบ เพื่อปรับค่าสัมประสิทธิ์แรงทรสให้สอดคล้องกับค่า $C_{L_{max}}$ และ C_{D_0} ภายใต้เงื่อนไขที่กังหันลมทำงานจริง

6.6 ความเค้นของใบกังหันลมจากผลการทดลองและผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากการทดลองหาค่า modulus of elasticity ของใบกังหันลมทั้งสองชุดจะได้ค่าเป็น 1.16×10^9 นิวตันต่อตารางเมตร และ 1.0×10^9 นิวตันต่อตารางเมตร ค่าความเค้นที่ได้จากการทดลองของกังหันลมชุดแรกถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5.23 ความเค้นที่ถูกแสดงจะเป็นความเค้นจากโมเมนต์ดัดอย่างเดียว ซึ่งมีค่าแปรตามความเร็วลมและอัตราส่วนความเร็วปลายใบ ที่ความเร็วลมค่าหนึ่งความเค้นโมเมนต์ดัดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบเพิ่มขึ้นในลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง และเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นค่าความเค้นก็จะเพิ่มสูงขึ้นตามความเร็วลม แต่เนื่องจากการทดลองหาค่าความเค้นกระทำขึ้นสองครั้งในเวลาต่างกัน จะเห็นว่าในการทดลองครั้งแรกกระทำที่ความเร็วลม 3.80, 4.73 และ 5.58 เมตรต่อวินาที ส่วนในครั้งที่สองการทดลองกระทำที่ความเร็วลม 4.06, 4.98 และ 5.87 เมตรต่อวินาที ลักษณะของการกระจายตัวของผลการทดลองมีลักษณะเหมือนกับการทดลองครั้งแรกคือ ค่าความเค้นแปรตามอัตราส่วนความเร็วปลายใบเป็นเชิงเส้นตรง และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งสองครั้งเข้าด้วยกัน จะเกิดข้อขัดแย้งขึ้นว่า ค่าความเค้นที่ได้จากการทดลองครั้งที่สองต่ำกว่าค่าความเค้นจากการทดลองครั้งแรก กล่าวคือจากแนวโน้มของความสัมพันธ์ของความเค้นต่อความเร็วลม ค่าความเค้นจากผลการทดลองครั้งที่สองที่ความเร็วลม 4.98 และ 5.87 เมตรต่อวินาที ควรจะมีค่าสูงกว่าค่าความเค้นที่ความเร็วลม 4.76 และ 5.53 เมตรต่อวินาที แต่ผลกลับตรงข้ามค่าความเค้นที่ความเร็วลม

5.53 เมตรต่อวินาที กลับมีค่าสูงกว่าค่าความเค้นที่ความเร็วลม 5.87 เมตรต่อวินาที โดยเฉพาะค่าความเค้นที่ความเร็วลม 4.73 เมตรต่อวินาที กลับมีค่าสูงกว่าค่าความเค้นที่ความเร็วลมที่ 4.98 เมตรต่อวินาทีค่อนข้างมาก

จากการพิจารณาการกระจายตัวของผลการทดลองที่ความเร็วลมต่างๆ กัน พอจะอนุมานได้ว่า ผลการทดลองที่ความเร็วลมเท่ากับ 4.98 เมตรต่อวินาทีนั้นต่ำไปค่อนข้างมาก และเนื่องจากการวัดค่าความเร็วลมของอุโมงค์ลมครั้งแรกวัดเพียงจุดเดียว ในขณะที่การวัดในครั้งที่สองใช้วัด 5 จุด แล้วหาค่าเฉลี่ยจึงอาจเป็นไปได้ว่า เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดความเร็วลมที่กระทำขึ้นในการทดลองครั้งแรก โดยที่ค่าที่วัดได้อาจเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยมาก หรืออีกนัยหนึ่งเกิดปัญหาในการควบคุมความสม่ำเสมอ และขนาดความเร็วลมที่พัดเข้าหากังหันลมซึ่งเกิดจากอุโมงค์ลม

ค่าความเค้นที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.24 จะเป็นค่าที่ได้จาก การแปลงค่าความเครียดที่วัดได้ของกังหันลมชุดที่สอง การทดลองจะกระทำขึ้นสองครั้งเหมือนกับการทดลองกังหันลมชุดแรก โดยที่การทดลองครั้งแรกกระทำที่ความเร็วลม 3.74 และ 5.55 เมตรต่อวินาที และการทดลองครั้งที่สองกระทำที่ ความเร็วลม 3.80, 4.85 และ 5.75 เมตรต่อวินาที ความสัมพันธ์ของความเค้นต่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบจะแปรเป็นเส้นตรง และเพิ่มขึ้นตามความเร็วลมเหมือนกับกังหันลมชุดแรก และสิ่งที่เกิดขึ้นลักษณะเดียวกับกังหันลมชุดแรกก็คือ ค่าความเค้นจากการทดลองครั้งที่สองที่ความเร็วลม 3.80 เมตรต่อวินาที กลับต่ำกว่าที่ความเร็วลม 3.74 เมตรต่อวินาที โดยเฉพาะค่าความเค้นของการทดลองครั้งที่สองที่ความเร็วลม 5.55 เมตรต่อวินาที กลับมีค่าสูงกว่าค่าความเค้นของการทดลองครั้งแรกที่ความเร็วลม 5.75 เมตรต่อวินาที ซึ่งน่าจะคลาดเคลื่อนในลักษณะเดียวกับกังหันลมชุดแรก เนื่องจากในการทำการทดลองครั้งแรกและครั้งที่สองการวัดความเครียดกับกังหันลมชุดแรกและชุดสองทำด้วยเครื่องมือวัด และการจัดเตรียมในลักษณะเดียวกัน ซึ่งในการทดลองครั้งแรกนั้นการวัดความเร็วลมจากอุโมงค์ลมวัดเพียงจุดเดียวไม่ได้วัด 5 จุด ขวางตัวอุโมงค์ลมเหมือนการทดลองครั้งที่สอง และเนื่องจากในการทดลองในการหาค่าความเค้นของกังหันลมนั้น กระทำหลังจากการทดลองหาสมรรถนะเป็นช่วงเวลานานมาก ในครั้งที่หาค่าความเค้นได้มีการถอดชุดท่อพีวีซีที่ถูกเรียงในอุโมงค์ลมเป็นลักษณะรังผึ้งซึ่งมีอยู่ 2 ชุด เพื่อให้ลมจากอุโมงค์ลมนั้นสม่ำเสมอและไหลเป็นมิติเดียวออกเสียหนึ่งชุด ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าเนื่องจากลมที่ออกจากอุโมงค์ลมมีการไหลหมุนเวียนปนออกมาและไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นความเร็วที่วัดได้อาจไม่เป็นความเร็วลมเฉลี่ยที่กังหันลมเห็น ในการทดลองหาค่าความเค้นครั้งแรก ทำการวัดความเร็วลมเพียงจุดเดียว แต่ในการ

ทดลองครั้งที่สองได้มีการวัดความเร็วลมผ่านตัวอุโมงค์ลม 5 จุด ซึ่งเห็นได้ชัดว่าไม่มีชุดท่อพีวีซี ทำให้ความเร็วลมจากอุโมงค์ลมไม่สม่ำเสมอ

รูปที่ 5.26 เป็นค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกังหันลมชุดแรก ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกับผลเฉลยของสัมประสิทธิ์แรงทอร์ส โดยที่ค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนความเร็วปลายใบ โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของความเค้นลดลงเมื่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบเพิ่มขึ้น ในรูปที่ 5.26 ยังแสดงผลของตัวเลขเรย์โนลด์ที่มีต่อค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดด้วย ผลของตัวเลขเรย์โนลด์ที่มีต่อค่าความเค้นนี้มีน้อยมาก ผลที่เห็นได้ชัดจะเกิดที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ 4 และ 5 ซึ่งเป็นสภาวะ Stall ส่วนในรูปที่ 5.27 แสดงถึงความเค้นซึ่งเกิดจากแรงดึงของกังหันลมชุดแรก ค่าความเค้นจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนความเร็วปลายใบ ซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นจะค่อนข้างชัน และแปรเป็นลักษณะเกือบเป็นเส้นตรง และไม่ขึ้นกับแรงจากอากาศพลศาสตร์ ความเค้นจากแรงดึงจะมีค่ามากกว่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดมาก รูปที่ 5.28 เป็นค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกังหันลมชุดที่สอง และรูปที่ 5.29 เป็นค่าความเค้นจากแรงดึงของกังหันลมชุดที่สอง ลักษณะของความสัมพันธ์ของความเค้นกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบ จะคล้ายคลึงกับของกังหันลมชุดแรก จะแตกต่างกันเพียงแต่ค่าความเค้นของกังหันลมชุดที่สองมีค่าสูงกว่ากังหันลมชุดแรก

รูปที่ 5.30 และ 5.31 เป็นค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดของกังหันลมชุดแรก และชุดที่สองจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่ความเร็วลมเดียวกับที่ได้ทำการทดลอง และรูปที่ 5.32 และ 5.33 เป็นค่าความเค้นจากแรงดึงของกังหันลมชุดแรก และชุดที่สองจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

รูปที่ 5.34 และ 5.35 เป็นรูปที่แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดจากการทดลอง และจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกังหันลมทั้งสองชุด จะเห็นได้ว่ามีข้อแตกต่างกันระหว่างผลการทดลองและผลเฉลยค่อนข้างมาก ถ้าเริ่มพิจารณาจากรูปที่ 5.34 ค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดของกังหันลมชุดแรก ความคลาดเคลื่อนนั้นน่าจะมีผลมาจากการกระจายตัวของความเร็วลมจากอุโมงค์ลมนั้นไม่สม่ำเสมอ และข้อมูลจากการทดลองครั้งแรกมีจุดความเร็วลมเพียงจุดเดียว ซึ่งน่าจะไม่ใช่ค่าความเร็วลมเฉลี่ย ในขณะที่การทดลองครั้งที่สองมีข้อมูลของการกระจายตัวของความเร็วลมมากกว่า ข้อมูลที่น่าจะมีความเชื่อถือได้สูงกว่าข้อมูลของการทดลองครั้งแรก ดังนั้น จึงทำการเปรียบเทียบผลการทดลองครั้งที่

สองกับผลเฉลย เริ่มต้นที่ความเร็วลมเฉลี่ยเท่ากับ 4.06 เมตรต่อวินาที ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 7 และ 8 ค่าความเค้นจากการทดลองและผลเฉลยมีค่าใกล้เคียงกัน โดยผลเฉลยทำนายค่าความเค้นสูงกว่าที่ได้จากการทดลอง แต่ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบต่ำ ความแตกต่างของผลการทดลองและผลเฉลยจะมีมาก สำหรับที่ความเร็วลมเฉลี่ยเท่ากับ 4.98 เมตรต่อวินาที ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบเท่ากับ 9 และ 10 ค่าความเค้นที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ความแตกต่างจะเกิดขึ้นอย่างมากเมื่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบลดลง และที่ความเร็วลมเฉลี่ยเท่ากับ 5.87 เมตรต่อวินาที ค่าจากผลการทดลองและจากผลเฉลยจะอยู่ใกล้เคียงกันในช่วงอัตราส่วนความเร็วปลายใบเท่ากับ 8 และ 9 และความแตกต่างจะเกิดขึ้นอย่างมาก เมื่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบลดลง สำหรับการทดลองครั้งแรกที่ความเร็วลม 3.80, 4.73 และ 5.87 เมตรต่อวินาที ค่าจากผลการทดลองและผลเฉลยยังมีค่าแตกต่างค่อนข้างมาก ดังนั้นจากเหตุผลของการวัดการกระจายตัวของความเร็วลมจากอุโมงค์ลม และการที่ค่าความเค้นแปรตามความเร็วลมน่าจะเป็นไปได้ว่าความเร็วลมเฉลี่ยที่กังหันลมเห็นจริงในการทดลองครั้งแรกน่าจะเป็นความเร็วลมที่สูงกว่าจุดที่วัด ดังนั้น ถ้ามีการเปลี่ยนค่าความเร็วลมในการคำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผลเฉลยน่าจะให้ค่าความเค้นสูงขึ้น เข้าใกล้กับผลการทดลองเหมือนกับการทดลองครั้งที่สอง

สำหรับรูปที่ 5.35 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าความเค้นจากโมเมนต์ตัดของผลการทดลอง และผลเฉลยจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของกังหันลมชุดที่สองนั้น ก็มีลักษณะคล้ายคลึงกับผลในรูปที่ 5.34 ของกังหันลมชุดแรก เริ่มพิจารณาจากกังหันลมชุดที่สอง จากการทดลองครั้งที่สองที่ความเร็วลมเท่ากับ 3.80 เมตรต่อวินาที ค่าความเค้นจากการทดลองและผลเฉลยมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่สูง(8, 9, 10) ในขณะที่ความแตกต่างของผลเฉลยกับผลการทดลองก็จะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบลดลง และที่ความเร็วลมเฉลี่ยเท่ากับ 4.85 เมตรต่อวินาที ก็จะเป็นลักษณะเดียวกัน ค่าผลการทดลองกับผลเฉลยมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงอัตราส่วนความเร็วปลายใบสูง(9, 10) แต่ค่าแตกต่างจะเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วงอัตราส่วนความเร็วปลายใบต่ำกว่านั้น สำหรับที่ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 5.75 เมตรต่อวินาที ความแตกต่างเกิดขึ้นค่อนข้างมาก โดยเฉพาะที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบที่มีค่าค่อนข้างต่ำ

สำหรับผลการทดลองครั้งแรก ที่ความเร็วลมเท่ากับ 3.74 และ 5.55 เมตรต่อวินาที ก็ยังเป็นลักษณะเดียวกับของกังหันลมชุดแรก ยังมีข้อสงสัยของความแม่นยำของความเร็วลมที่วัดเพียงจุดเดียวของอุโมงค์ลม

โดยสรุปจะเห็นว่าค่าความเค้นจากโมเมนต์ตัดจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนความเร็วปลายใบและความเร็วลม โดยอัตราการเพิ่มขึ้นจะลดลงเมื่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบมีค่าสูงขึ้น แต่ในการทดลองค่าความเค้นจากโมเมนต์ตัดจะเพิ่มขึ้น เป็นลักษณะเกือบเป็นเส้นตรง ความแตกต่างจึงเกิดขึ้น

6.7 ความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองเรื่องความเค้นของกังหันลม

ผลการทดลองในการหาค่าความเค้นของกังหันลมมีความคลาดเคลื่อนไปจากแนวโน้มที่ควรจะเป็น เนื่องจากมีความผิดพลาดทั้งทางด้านเครื่องมือ การติดตั้งอุปกรณ์ การอ่านผลการทดลอง ฯลฯ โดยความผิดพลาดเหล่านี้สามารถสรุปได้เป็นข้อๆ ดังต่อไปนี้

1. การวัดความเร็วลม ความคลาดเคลื่อนจากการอ่านค่าความเร็วลม นอกจากจะเกิดจากความเร็วลมจากอุโมงค์ลมที่มีค่าไม่คงที่แล้ว การวัดความเร็วลมที่จุดหนึ่งๆ จะใช้เวลาประมาณ 60 วินาที และเมื่อรวมกับเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนตำแหน่งท่อปีโตสติกติย์ใหม่ จะใช้เวลาทั้งหมด 3 นาทีต่อการวัด 1 ตำแหน่ง ในการวัด 5 ตำแหน่งจะใช้เวลาประมาณ 15 นาที ซึ่งในช่วงเวลานี้ความเร็วลมจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้น ความเร็วลมที่วัดที่ตำแหน่งแรกกับความเร็วลมที่วัดได้ในตำแหน่งถัดๆ ไป ย่อมไม่ใช่ความเร็วลมในขณะเดียวกันแล้ว

2. อุโมงค์ลม เนื่องจากมีการถอดชุดท่อพีวีซีชั้นที่สองที่ใช้ในการกรองอากาศให้เป็นการไหลมิติเดียวออกเพื่อให้ความเร็วลมมีค่าสูงขึ้น จึงทำให้กระแสลมที่ได้จากอุโมงค์ลมมีความปั่นป่วนมากกว่าปกติ มีองค์ประกอบของลมในแนวเชิงมุมอยู่และทำให้ความเร็วลมที่ออกมาไม่มีความสม่ำเสมอ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.38 และ 5.39 ดังนั้นในการกวาดครบ 1 รอบการหมุนของกังหันลม ใบกังหันลมจะเห็นความเร็วลมในแต่ละตำแหน่งบนใบกังหันลมไม่เท่ากัน ดังนั้นค่าความเค้นที่อ่านได้จึงเกิดจากความเร็วหลายค่า ค่าความเครียดที่อ่านได้จึงเป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งไม่สอดคล้องกับความเร็วลมที่อ่านได้

3. การอ่านค่าความเร็วรอบ เนื่องจากเบรกที่ใช้ได้ตัดแปลงมาจากข้อต่อส่วนที่เป็นหลักของ flexible coupling ที่เชื่อมต่อระหว่างเพลากังหันกับเบรกไฟฟ้า(ซึ่งในขณะที่ทดลองเบรกใช้งานไม่ได้) กับเชือกมะนิลา ซึ่งทำให้ไม่สามารถคงความเร็วรอบของเพลาให้คงที่ได้ เหมือนกับการใช้ดรัมเบรก ดังนั้น ค่าความเร็วรอบที่อ่านได้จึงเป็นค่าประมาณจากความเร็วรอบเฉลี่ยที่ค่าน้ำหนักถ่วงหนึ่งๆ ซึ่งค่าผิดพลาดนี้อยู่ในช่วง ± 10 รอบต่อนาที

4. slip ring เป็นอุปกรณ์อีกส่วนหนึ่งที่เป็นต้นกำเนิดของสัญญาณรบกวน เนื่องจากขณะที่ slip ring หมุนนั้น ความต้านทานของผิวสัมผัสระหว่างแปรงถ่านกับ slip ring จะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา โดยมีค่าระหว่าง 0 ถึง 10 มิลลิโอม ซึ่งทำให้สัญญาณที่อ่านได้คลาดเคลื่อน เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนจากตัว slip ring (ดังที่ได้อภิปรายไว้ในหัวข้อ 5.12) และเนื่องจากใบก้านไม่สมดุล ดังนั้นขณะที่เพลาก้านหมุน จะทำให้แท่นและตัว slip ring มีการสั่นทั้งในแนวแกนเพลลาและในแนวตั้งฉากกับแกนเพลลา ซึ่งอาจเพิ่มสัญญาณรบกวนบางส่วน เนื่องจากหน้าสัมผัสของ slip ring สั่นด้วย ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากตัว slip ring มีลักษณะสุ่ม ก่อเกิดเป็นสัญญาณความต่างศักย์มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง -200 มิลลิโวลต์ เมื่อนำไปต่อกับ strain gage 4 ตัว ค่าสัญญาณรบกวนจะกลายเป็น 0 ถึง -50 มิลลิโวลต์ ซึ่งสามารถแปรเป็นค่าความเค้นได้ 0 ถึง -14500 นิวตันต่อตารางเมตร สำหรับก้านลมชุดแรก และเป็นค่า 0 ถึง -5000 นิวตันต่อตารางเมตร สำหรับก้านลมชุดที่สอง ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้ ทำให้ค่าความเค้นที่วัดได้อาจมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงจากค่าที่ควรเป็นได้ในลักษณะสุ่ม

5. การต่อสายสัญญาณ ความไว (sensitivity) ของสายสัญญาณที่มีต่อสภาพการขยับหรืออนั่นค่อนข้างสูง ถ้าสายสัญญาณระหว่าง strain gage กับ terminal board มีการขยับหรือขยับเล็กน้อย ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้จาก digital oscilloscope ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก และค่าสัญญาณอาจค้างอยู่ที่ค่าใดค่าหนึ่งแทนที่จะตกกลับมาที่ค่าเริ่มต้นที่ได้จากการปรับ zero balance และเมื่อทำการวัด สายสัญญาณที่ต่อจาก strain gage ก่อนถึง slip ring จะถูกร้อยผ่านตัวเพลากลางจาก rotor ไปสู่ตัว slip ring สายสัญญาณส่วนที่ร้อยอยู่ในเพลลาจะยาวประมาณเกือบ 2 เมตร ซึ่งสายสัญญาณในส่วนนี้ไม่สามารถยึดติดได้ เวลาใบก้านลมหมุนสายสัญญาณในส่วนนี้มีโอกาสที่จะขยับตีกันก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนได้ และเนื่องจากในการทดลองครั้งนี้ ใบก้านลมซึ่งเป็นไม้ถูกเก็บจากการทดลองครั้งแรกมาก่อนช้านาน จึงมีการหดตัวบิดงอไปบ้าง เมื่อนำมาติดตั้งทดลองจึงมีปัญหาเรื่องการสั่นสะเทือนมากพอควร การสั่นสะเทือนจะส่งผลกระทบต่อ หรือจุดสัมผัสของสายสัญญาณต่างๆ ถ้าไม่มีการเชื่อมต่อแน่นหนาพอ ก็จะก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนตามไปด้วย

6. จากสถานที่ทำการทดลอง เนื่องจากไม่ได้เปิดประตูด้านหลังของสถานที่ทดลอง ซึ่งประตูนี้อยู่ห่างจากด้านหลังของตัวก้านที่ทดลองประมาณ 7 เมตร ผลของส่วนนี้จะทำให้เกิดลมไหลย้อนกลับเข้าสู่ wake ของก้านลม ซึ่งจะทำให้ภาระบนใบก้านลมเปลี่ยนไปได้

7. ข้อผิดพลาดในการใช้เครื่อง strain amplifier ที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลองมีดังต่อไปนี้

มี

- ไม่สามารถทำการ balance bridge ให้สมดุลได้(ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้จาก digital oscilloscope จะเท่ากับศูนย์ ถ้า bridge สมดุล) โดยจะมีความผิดพลาดระหว่าง -20 ถึง -40 มิลลิโวลต์

- ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้ในช่วงก่อนที่ไบกิ้งหันจะเริ่มหมุน กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้ หลังจากที่ไบกิ้งหันลมหยุดหมุนมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งอาจเกิดจากความต้านทานของสายสัญญาณที่ร้อยอยู่ภายในเพลลาของก้งหันลมหมีการเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการบิดตัวของสายสัญญาณขณะเพลลาหมุน และเนื่องจากค่าความต้านทานภายใน slip ring ในแต่ละขณะจะไม่เท่ากัน เพราะความต้านทานของ slip ring จะเป็นแบบสุ่ม

- ค่าสัญญาณของความต่างศักย์ไฟฟ้า เมื่อทำการ balance ในแต่ละครั้งจะไม่เท่ากัน โดยจะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 20 - 40 มิลลิโวลต์

8. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ strain gage เนื่องจากไบกิ้งหันลมหที่ทดลองทำจากไม้ ตัว strain gage จะร้อนขึ้นได้ง่าย เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนสู่ไม้ได้น้อยกว่าพวกโลหะ ดังนั้น ถ้าหากทำการทดลองนาน ผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความต้านทาน strain gage เปลี่ยนไป ดังนั้น สัญญาณที่อ่านได้จะมีค่ามากกว่าที่ควรจะเป็น

9. ผลของรูปร่างของไบกิ้งหันลมหที่คลาดเคลื่อนจากรูปแพนอากาศ เนื่องจากในการทดลองหาความเค้นนั้น ไบกิ้งหันทั้งสองชุดที่นำมาติดตั้งนั้นถูกเก็บไว้นาน จึงมีการหดตัวและบิดงอ เมื่อนำมาติดตั้งจึงเกิดการไม่สมดุลย์เมื่อหมุน ผลของความไม่สมดุลย์นี้ทำให้ก้งหันลมหพร้อมแท่นและเครื่องวัดสั้นสะเทือนมาก จึงจำเป็นต้องมีการถ่วงให้เกิดสมดุลย์ เพื่อลดการสั้นสะเทือนลงโดยใช้ดินน้ำมันปะไปตามไบกิ้งหันที่ไม่สมดุลย์ ซึ่งการปะดินน้ำมันนี้ทำให้รูปร่างภาคตัดขวางของไบกิ้งหันเปลี่ยนแปลงไป ทำให้แรงจากอากาศพลศาสตร์แตกต่างไปจากแบบจำลองที่ใช้กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผลการทดลองจึงมีความคลาดเคลื่อนจากผลเฉลย

บทที่ 7 สรุปการอภิปราย

7.1 บทนำ

การอภิปรายผลเปรียบเทียบค่าสมรรถนะของกังหันลมทั้งสองชุด ที่ได้จากการทดลองกับอุโมงค์ลมและจากการติดตั้งบนรถปิดอัมที่เคลื่อนที่กับผลเฉลยจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และการเปรียบเทียบค่าความเค้นจากผลทดลองและผลเฉลยจะถูกนำมาสรุปในบทนี้

7.2 สัมประสิทธิ์กำลัง

จากการเปรียบเทียบในบทที่ 5 พบว่า ผลการทดลองของกังหันลมที่ทดสอบกับอุโมงค์ลม นั้น มีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าผลการทดลองที่ติดตั้งบนรถปิดอัมค่อนข้างมาก โดยค่าสัมประสิทธิ์กำลังจะแปรตามอัตราส่วนความเร็วปลายใบ และมีค่าสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบตามทีออกแบบ และจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์กำลังในส่วนนี้จะขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์แรงทวนค่อนข้างมาก และเมื่อลดค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบจากจุดที่สัมประสิทธิ์กำลังมีค่าสูงสุดค่าสัมประสิทธิ์กำลังจะลดลงเนื่องจากกังหันลมจะทำงานในสภาวะ Stall จากผลการทดลองพบว่า นอกจากสัมประสิทธิ์กำลังจะแปรตามอัตราส่วนความเร็วปลายใบแล้ว ยังแปรตามความเร็วลมด้วย ซึ่งก็เป็นผลเนื่องมาจาก อากาศที่พัดผ่านใบกังหันลมมีตัวเลขเรย์โนลด์ที่แตกต่างกัน และยังพบว่ากังหันลมชุดแรกที่ได้รับการออกแบบให้มีประสิทธิภาพเชิงอากาศพลศาสตร์สูงนั้น เมื่อทำการทดลองกลับให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังต่ำกว่ากังหันลมชุดที่สอง ซึ่งสาเหตุเนื่องมาจากใบกังหันลมชุดแรกทำงานภายใต้อากาศไหลที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำกว่ากังหันลมชุดที่สอง ทั้งที่กังหันลมชุดที่สองทำงานภายใต้ความเร็วลมที่ต่ำกว่า ผลของตัวเลขเรย์โนลด์นี้จะส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงยกและแรงทวนบนใบกังหันลมเปลี่ยนไป ซึ่งก็จะทำให้สมรรถนะของกังหันลมชุดแรกมีค่าต่ำลงมาก ดังนั้นหากสามารถทำให้กังหันลมทั้งสองชุด ทำงานภายใต้อากาศไหลที่มีตัวเลขเรย์โนลด์ใกล้เคียงกัน(อาจเพิ่มความเร็วลมหรือเพิ่มขนาดของกังหันลม) จะพบว่ากังหันลมชุดแรกที่ได้รับการออกแบบให้มีประสิทธิภาพเชิงอากาศพลศาสตร์สูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงกว่ากังหันลมชุดที่สองเป็นไปตามทฤษฎี ความคลาดเคลื่อนของการทดลองหาค่าสมรรถนะนี้ ปัญหาหลักจะมาจากความแม่นยำในการวัดค่าโมเมนต์บิด

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ถูกดัดแปลงและพัฒนาขึ้นนั้น สามารถนำไปใช้กับกังหันลม แนวนอนที่มีจำนวนใบกังหันเท่ากับ B ใบ (B ไม่ควรเกิน 5 - 6 ใบ) และทำงานภายใต้ความเร็วลมและอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่กำหนด และสามารถทำนายค่าสมรรถนะในรูปของสัมประสิทธิ์กำลัง สัมประสิทธิ์แรงทอร์ค และค่าความเค้นของกังหันลม จากการเปรียบเทียบผลการทดลองพบว่า ความแม่นยำของผลเฉลยนั้นขึ้นกับความแม่นยำของข้อมูลทางอากาศพลศาสตร์ของใบกังหันในรูปของสัมประสิทธิ์แรงยก และแรงหน่วงที่มุมปะทะต่างๆ กัน รวมทั้งข้อมูลในสถานะ Stall ที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่างๆ กันด้วย จากการนำเอาผลของตัวเลขเรย์โนลด์ของอากาศมาปรับค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงบนใบกังหันให้สอดคล้องกับสถานะการทำงานจริงของกังหันลมมากขึ้นนั้น จะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมชุดแรก และชุดที่สองใกล้เคียงกับผลการทดลองมากขึ้น ส่วนค่าสัมประสิทธิ์แรงทอร์คจากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น พบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนความเร็วปลายใบ และผลกระทบของตัวเลขเรย์โนลด์ที่มีต่อสัมประสิทธิ์แรงทอร์คมีน้อยมาก

7.3 ความเค้น

สำหรับความเค้นที่ได้จากผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น จะประกอบด้วย ความเค้นจากโมเมนต์ดัดและจากแรงดึง จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นจากแรงดึงซึ่งเกิดจากแรงหนีศูนย์กลางและน้ำหนักของใบกังหันจะมีค่าสูงกว่าค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดที่เกิดจากแรงอากาศพลศาสตร์ค่อนข้างมาก โดยเฉพาะที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงๆ ค่าความเค้นนี้จะแปรในลักษณะเพิ่มขึ้นกับความเร็วลมและอัตราส่วนความเร็วปลายใบ ผลของตัวเลขเรย์โนลด์ของอากาศที่ไหลผ่านใบกังหันลมนั้น มีผลต่อค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดหรือสัมประสิทธิ์แรงทอร์คมีน้อยมาก

การทดลองหาค่าความเค้นจะกระทำโดยแปลงค่าความเครียดที่วัดได้จาก strain gage มาเป็นความเค้น ซึ่งจากลักษณะการติด strain gage บนใบกังหันลมนั้น ทำให้สามารถวัดค่าความเค้นได้เฉพาะความเค้นจากโมเมนต์ดัด ค่าที่วัดได้จากการทดลองแตกต่างจากผลเฉลยค่อนข้างมาก อันเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนของการทดลองหลายประการประกอบกัน อันได้แก่ ความเร็วลมที่ได้จากอุโมงค์ลมกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและไม่คงที่อันเนื่องจากอุโมงค์ลมไม่อยู่ในสภาพที่สมบูรณ์นัก ค่าความเครียดที่วัดได้จะมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ slip ring ต่อความเร็วรอบของกังหันลมซึ่งมีลักษณะสุม ค่าสัญญาณคลาดเคลื่อนเนื่องจากการขยับตัวของสายสัญญาณอันอาจมีสาเหตุจากใบกังหันลมหมุน การสั่นสะเทือนของกังหันลมและแท่นยึดเนื่องจากการไม่สมดุลย์ของกังหันลม ผลของ

อุณหภูมิที่มีต่อสัญญาณออกของ strain gage อีกทั้งมีการถ่วงสมดุลย์ของใบกังหันด้วยดินน้ำมัน ทำให้รูปร่างภาคตัดขวางของใบกังหันลมในแต่ละ section ไม่เป็นไปตามรูปร่างใบกังหันลมที่ใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์(NACA 4415) ซึ่งก็จะส่งผลให้แรงจากอากาศพลศาสตร์แตกต่างไปจากแบบจำลองที่ใช้กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้การแปลงสัญญาณของความเครียดเป็นความเค้นยังขึ้นกับคุณลักษณะของใบกังหันลมที่เป็นไม้ ซึ่งไม่ใช่ isotropic material ค่าคุณลักษณะของไม้ดังกล่าวจะขึ้นกับทิศทางที่กระทำต่อรอยเสี้ยนในเนื้อไม้ ความแม่นยำของค่าความเค้นจึงยังขึ้นกับค่า modulus of elasticity ที่ได้จากการทดลองอีกด้วย ดังนั้นจะเห็นว่าในการทดลองหาค่าความเค้นนั้น มีสาเหตุความคลาดเคลื่อนหลายประการประกอบกัน ทำให้ผลการทดลองนั้นคลาดเคลื่อนจากผลเฉลยค่อนข้างมาก ไม่เหมือนกับการทดลองหาสมรรถนะ

ดังนั้น การยืนยันความแม่นยำของผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงทำได้ยาก แต่ในเรื่องของสมรรถนะจะเห็นได้ว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้ผลเฉลยที่เชื่อถือได้ มีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

1. Rankine, W.J.M., Transactions, Institute of Naval Architects, Vol.6, p.13, 1865.
2. Froude, R.E., Transactions, Institute of Naval Architects, Vol.30, p.390, 1889
3. Betz,A., Zeitschur.f. Flugtechnik u.Motorl. 11, 105, 1920.
4. Glauert, H., Durand, W.F., (Ed.), "Airplane Propellers," Vol.IV, Division I, Chapter VII, Section 4, pp.169 - 360, Julius Springer, Berline, 1935.
5. Wilson, R.E. and Lissaman, P.B.S. "Applied Aerodynamics of Wind Power Machines, " Oregon State University, May 1974.
6. Wilson, R.E., Lissaman, P.B.S. and Walker, S.N., "Aerodynamic Performance of Wind Turbines," Oregon State University, June 1976.
7. Rohrbach, C., "Experimental and Analytical Research on the Aerodynamics of Wind Turbines, "Mid Term Tech. Rep., June 1 - Dec 31, 1975, C00-2615-76-T-1.
8. Prandtl, L., Gottinger Nachr. p.193 Appendix, 1919.
9. Goldstein, S., "On the Vortex Theory of the Air Screw," Proc. Royal Soc. A123, 440, 1929.
10. Abott, I.A. and Von Doenhoff, A.E., "Theory of Wing Sections," Dover Publications, Inc., N.Y., 1959.
11. Hoerner, S.F., "Fluid Dynamic Drag," Hoerner Fluid Dynamics, Bricklorn, 1965.

12. Glauert, H., "The Analysis of Experimental Results in the Windmill Brake and Vortex Ring States of an Air Screw," Reports and Memoranda no. 1026 AE.222, February 1926.
13. Wilson, R.E. and Patton, E.M., "Design Analysis of Performance and Aerodynamic Loading of Non-flexible Horizontal Axis Wind Turbines," Oregon State University, Report under DOE contract no. EY-76-S-06-2227, prepared for the United States Department of Energy, Division of Solar Technology, Federal Wind Energy Program, August 1978.
14. Wilson, R.E. and Chaiyapinunt, S., "Analysis of Wind Turbine in Yaw," Oregon State University, Report under contract ASC 51298PB, prepared for Rockwell International Corporation, Energy Systems Group, 1983.
15. Wilson, R.E. and Patton, E.M., "Performance Prediction and Comparison with test Results for Horizontal Axis Wind Turbines," Oregon State University, Report under subcontract no. PFN-13318W, prepared for Rockwell International Corporation, Energy Systems Group, February 1982.
16. Miley, S.J., "A Catalog of Low Reynolds Number Airfoil Data for Wind Turbine Applications," Texas A&M University, Report under subcontract no. PFY 12781-W, prepared for Rockwell International Corporation, Energy Systems Group, February 1982.
17. Jacobs, E.N. and Sherman, A., "Airfoil Section Characteristics as Affected by Variations of Reynolds Number", NACA TR586, 1936.
18. Sheldahl, R.E. and Klimas, P.C., "Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Section through 180-Degree Angle of Attack for use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines," Sandia National Laboratories, Report under contract DE-AC04-76DP00789, prepared for United States Department of Energy, March 1981.

19. Timoshenko, S.P. and Young, D.H., "Elements of Strength of Materials," D.Van Nostrand Company, Inc., 5th edition, 1968.
20. Beer, F.P. and Johnston Jr., E.R., "Mechanics of Materials", McGraw-Hill, Inc., SI Metric edition, 1987.
21. Juvinall, R.C., "Stress, Strain, and Strength," McGraw-Hill, Inc., 1967.
22. Holman. J.P., "Experimental Methods for Engineers," McGraw-Hill, Inc., 3rd edition, 1966.
23. Beckwith, T.G. and Buck, N.L., "Mechanical Measurements," Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1965.
24. สนั่น เจริญเผ่า วินิต ไซวิเชียร, "Timber & Steel Design," โรงพิมพ์รวมมิตรไทย, พิมพ์ครั้งที่ 2, 2519
25. คณิต ติรวณิชย์, "การทดสอบหุ่นจำลองกังหันลมในประเทศไทย." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2529
26. สมาน เสนงาม และคณะ, "โครงการวิจัยและพัฒนาการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม", คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, รายงานฉบับสมบูรณ์ เสนอการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, สิงหาคม 2528
27. ปรีชา บุปผาชาติ, "การออกแบบและทดสอบสมรรถนะกังหันลมแนวนอนชนิด 3 ใบ สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า," วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2532



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

คุณลักษณะของใบกึ่งหันลมชุดแรกและชุดที่สอง

ใบกึ่งหันลมชุดแรก

คุณลักษณะ

ความยาว	0.6 เมตร
รูปภาคตัดขวาง	NACA 4415
วัสดุที่ทำใบกึ่งหันลม	ไม้ตะเคียนทอง
ความกว้างของใบกึ่งหันลม	ปลายใบกว้าง 2.2 ซม. กว้าง 7.1 ซม. ที่ตำแหน่ง 70% ของความยาวใบวัดจาก ปลายใบ ความกว้างจากปลายใบถึง 70% แปรเป็นสมการเส้นตรงและจาก 70% ถึง 100% มีค่าคงที่
มุมบิดของใบกึ่งหันลม	0° ที่ปลายใบ 18° ที่ 80% ของความยาวใบวัดจาก ปลายใบ มุมบิดของใบจาก 0 - 18° แปร เป็นสมการเส้นตรง
ความหนาแน่นของใบกึ่งหันลม	760 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ค่า Modulus of elasticity	1.16×10^9 ปาสกาล(จากการทดลองใน หัวข้อ 5.8.1)
โมเมนต์ความเฉื่อยที่จุดกึ่งกลาง	$0.00524 \text{ c}^4 \quad \text{m}^4$
มวลรอบแกน x	
โมเมนต์ความเฉื่อยที่จุดกึ่งกลาง	$0.00871 \text{ c}^4 \quad \text{m}^4$
มวลรอบแกน y	
Product of inertia, ที่จุดกึ่งกลาง	$-0.00019 \text{ c}^4 \quad \text{m}^4$
มวลของแกน x y	
โมเมนต์ความเฉื่อยหลักที่จุด กึ่งกลางมวลรอบแกนหลัก x'	$0.00523 \text{ c}^4 \quad \text{m}^4$
โมเมนต์ความเฉื่อยหลักที่จุด กึ่งกลางมวลรอบแกนหลัก y'	$0.00872 \text{ c}^4 \quad \text{m}^4$

มุมที่แกนหลักทำกับแกนอ้างอิง

แกน x' ทำกับแกน x	3.1°	
แกน x' ทำกับแกน y	93.1°	
แกน y' ทำกับแกน x	86.9°	
แกน y' ทำกับแกน y	3.1°	
พื้นที่ของแพนอากาศ	0.06309 c^2	m^2
ตำแหน่งจุดกึ่งกลางมวล (x,y)	0.45139 c	0.06183 c m

หมายเหตุ c = ความกว้างของไบกัณฑ์ (chord)

ไบกัณฑ์ลมชุดที่สอง

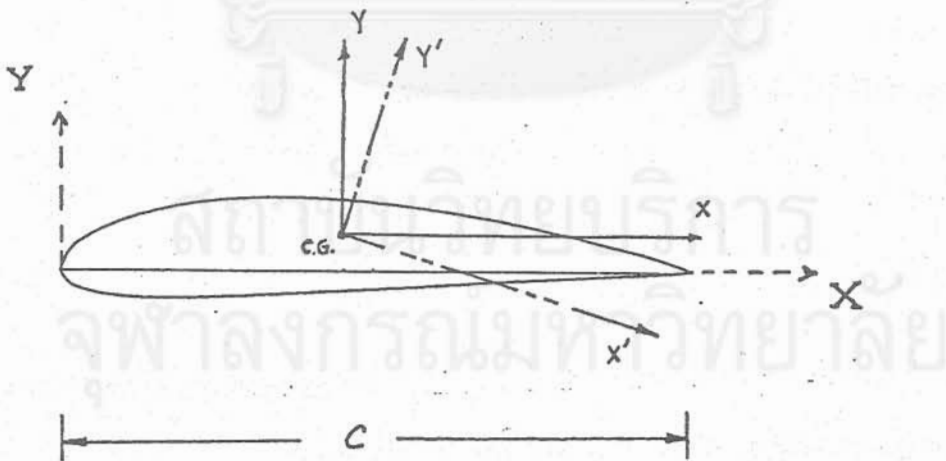
คุณลักษณะ

ความยาว	0.69 เมตร
รูปภาคตัดขวาง	NACA 4415
วัสดุที่ทำไบกัณฑ์ลม	ไม้ตะเคียนทอง
ความกว้างของไบกัณฑ์ลม	ปลายไบกว้าง 6.2 ซม. กว้าง 9.2 ซม. ที่โคนไบกัณฑ์ลม (7 ซม. วัดจากโคน)
มุมบิดของไบกัณฑ์ลม	ความกว้างแปรเป็นสมการเส้นตรง 0° ที่ปลายไบ 14° ที่โคนไบกัณฑ์ลม
ความหนาแน่นของไบกัณฑ์ลม	มุมบิดแปรเป็นสมการเส้นตรง 760 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ค่า Modulus of elasticity	1 x 10 ⁹ ปาสกาล (จากการทดลองในหัวข้อ 5.8.1)
โมเมนต์ความเฉื่อยที่จุดกึ่งกลาง	0.00524 c^4 m^4
มวลรอบแกน x	
โมเมนต์ความเฉื่อยที่จุดกึ่งกลาง	0.00871 c^4 m^4
รอบแกน y	
Product of inertia, ที่จุดกึ่งกลาง	- 0.00019 c^4 m^4

ของแกน $x y$

โมเมนต์ความเฉื่อยหลักที่จุดกึ่งกลางมวลรอบแกนหลัก x'	$0.00523 c^4$	m^4
โมเมนต์ความเฉื่อยหลักที่จุดกึ่งกลางมวลรอบแกนหลัก y'	$0.00872 c^4$	m^4
มุมที่แกนหลักทำกับแกนอ้างอิง		
แกน x' ทำกับแกน x	3.1°	
แกน x' ทำกับแกน y	93.1°	
แกน y' ทำกับแกน x	86.9°	
แกน y' ทำกับแกน y	3.1°	
พื้นที่ของแพนอากาศ	$0.06309 c^2$	m^2
ตำแหน่งจุดกึ่งกลางมวล(x,y)	$0.45139 c$	$0.06183 c$ m

หมายเหตุ c = ความกว้างของใบกังหัน (chord)



รูปก.1. รูปแพนอากาศ NACA 4415 และแกนอ้างอิง

ภาคผนวก ข. โปรแกรมคอมพิวเตอร์

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ถูกเขียนขึ้นด้วยภาษา FORTRAN 77 ให้สามารถทำงานอยู่บน Personal computer โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เกี่ยวข้องจะมีอยู่ 3 โปรแกรม ได้แก่ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำนายรูปร่างใบกังหันลมที่มีประสิทธิภาพเชิงอากาศพลศาสตร์สูงสุด โปรแกรมคอมพิวเตอร์หาค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองของความสูญเสียที่ปลายใบ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำนายค่าสมรรถนะและค่าความเค้นของกังหันลมแนวนอน ในภาคผนวกจะแสดงถึงข้อมูลขาเข้าของแต่ละโปรแกรม ตัวโปรแกรมและตัวอย่างข้อมูลขาออกของโปรแกรม

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำนายรูปร่างใบกังหันลมที่มีประสิทธิภาพเชิงอากาศพลศาสตร์สูงสุด

โปรแกรม WIND นี้จะคำนวณค่ารูปร่างของใบกังหันที่ให้ประสิทธิภาพเชิงอากาศพลศาสตร์สูงสุด(โดยละเว้นแรงหน่วง) โดยจะมีข้อมูลขาเข้าพิมพ์จากจอภาพของ Monitor และผลที่ออกมาจะถูกเก็บไว้ใน file ชื่อ SOLUT

ข้อมูลขาเข้าจะถูกแสดงบนจอภาพเพื่อรอการใส่ข้อมูลขาเข้า สัญญลักษณ์ของข้อมูลขาเข้ามีดังนี้

X	อัตราส่วนความเร็วปลายใบที่พิจารณา
DRR	ขนาดการเพิ่มของความยาวของใบกังหันลมต่อรัศมีที่ใช้ในการอินทิเกรตแบบ numerical, dr/R
DA	ขนาดการเพิ่มของค่าแฟคเตอร์เหนี่ยวนำตามแกน
AINIT	ค่าแฟคเตอร์เหนี่ยวนำตามแกนค่าเริ่มต้น

ข้อมูลขาออกจะมีสัญญลักษณ์ต่อไปนี้

RL	ตำแหน่งบนใบกังหันที่พิจารณาโดยเป็นอัตราส่วนต่อความยาวของใบกังหัน, r/R
A	ค่าแฟคเตอร์เหนี่ยวนำตามแกน
AA	ค่าแฟคเตอร์เหนี่ยวนำเชิงมุม
F	ค่าความสูญเสียปลายใบ

DCP	ค่าสัมประสิทธิ์กำลังเฉพาะที่จากการอินทิเกรต
PHI	ผลรวมของมุมบิดกับมุมปะทะ - หน่วยเป็นองศา
CCLR	พารามิเตอร์กำหนดรูปร่างของใบ - ผลคูณของอัตราส่วนความกว้างของใบกึ่งหันต่อรัศมี และสัมประสิทธิ์แรงยก, $c_{CL/R}$

รายละเอียดโปรแกรม

```

PROGRAM WIND
OPEN (1,FILE='SOLUT')
PI = 3.1415926
PRINT 2
READ*, X,DRR,DA,AINIT
B = 3.
RL = 1.
XL = RL*X
WRITE(1,400) X
WRITE(1,410)
10 AI = 0.
AAI = 0.
FI = 0.
DCPXI = 0.
PHII = 0.
A = AINIT
20 ROOT = SQRT(1.+(4.*A*(1.-A))/(XL**2.))
AA = (-1 + ROOT)/2.
PHI = ATAN((1.-A)/((1.+AA)*XL))
G = ((1.-RL)/(RL*SIN(PHI)))*B/2.
FF = EXP(-G)
F = 2.*ACOS(FF)/PI
IF (RL.EQ.1.) THEN
DCPX = 8.*AA*(1.-A)*XL*(RL**2.)
ELSE
DCPX = 8.*AA*(1.-A)*F*XL*(RL**2.)
ENDIF
*** CHECK TO SEE WHETHER POINT OF MAXIMUM
DIFF = DCPX - DCPXI
IF (DIFF .GT.0.) THEN
AI = A
AAI = AA
FI = F
PHII = PHI
DCPXI = DCPX
A = A+DA
IF (A.GT.0.7) THEN
WRITE (1,520)
GO TO 30
ELSE
ENDIF
GO TO 20
ELSE
GO TO 23
ENDIF
23 CCLR = 8./3.*PI*SIN(PHII)*AI*FI/(X*(1.+AAI))
PHIA = PHII*180./PI
WRITE(1,500) RL,AI,AAI,FI,DCPXI,PHIA,CCLR
30 RL=RL-DRR
XL = RL*X
IF(RL.GE.0.04) GO TO 10

```



```
2      FORMAT('      X DRR DA  A INITIAL  '/')
400    FORMAT ( 3X,'      X = ',F7.4)
410    FORMAT(3X,'RL',6X,'A',8X,'AA',8X,'F',8X,'DCP',8X,'PHI',4X,'CCLR')
500    FORMAT (2X,F5.3,2X,F7.4,3X,F7.4,3X,F7.4,2X,F7.4,2X,F7.3,2X,F7.4)
520    FORMAT (2X,' A EXCEEDING VALUE OF 0.7')
      STOP
      END
```

ตัวอย่างรายละเอียดข้อมูลเข้า

```
 X DRR DA  A INITIAL
6.  .05 .001  .1
```

ผลเฉลยโปรแกรม

X = 6.0000						
RL	A	AA	F	DCP	PHI	CCLR
1.000	0.3330	0.0061	0.0000	0.1963	6.305	0.0000
0.950	0.3829	0.0072	0.6829	0.1252	6.135	0.0387
0.900	0.3651	0.0079	0.8475	0.1485	6.654	0.0497
0.850	0.3539	0.0087	0.9237	0.1533	7.158	0.0564
0.800	0.3448	0.0097	0.9612	0.1503	7.699	0.0614
0.750	0.3399	0.0110	0.9804	0.1436	8.256	0.0661
0.700	0.3368	0.0125	0.9902	0.1352	8.864	0.0709
0.650	0.3343	0.0144	0.9951	0.1259	9.551	0.0760
0.600	0.3334	0.0169	0.9976	0.1163	10.320	0.0818
0.550	0.3324	0.0200	0.9988	0.1064	11.219	0.0884
0.500	0.3315	0.0240	0.9995	0.0964	12.276	0.0961
0.450	0.3304	0.0295	0.9997	0.0863	13.544	0.1049
0.400	0.3298	0.0370	0.9999	0.0762	15.071	0.1155
0.350	0.3284	0.0477	1.0000	0.0660	16.974	0.1278
0.300	0.3270	0.0638	1.0000	0.0557	19.364	0.1423
0.250	0.3245	0.0894	1.0000	0.0453	22.459	0.1589
0.200	0.3209	0.1335	1.0000	0.0348	26.531	0.1766
0.150	0.3145	0.2184	1.0000	0.0243	32.010	0.1910
0.100	0.3036	0.4150	1.0000	0.0139	39.360	0.1900
0.050	0.2841	1.0843	1.0000	0.0047	48.865	0.1433

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำนายค่าสมรรถนะและค่าความเค้นของกังหันลมแนวนอน

โปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้จะคำนวณค่าสัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงทอร์คสำหรับกังหันลมแนวนอน รวมทั้งค่าแรงดึง ค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัด ค่าความเค้นจากแรงดึง ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบต่างๆ กัน

ข้อมูลขาเข้าจะถูกแสดงบนจอภาพเพื่อรอการใส่ข้อมูลขาเข้าตามลำดับ สัญลักษณ์ของข้อมูลขาเข้ามีดังนี้

B	จำนวนใบกังหันลม	
BCRR	อัตราส่วนของความกว้างใบต่อรัศมีโคนใบคูณด้วยจำนวนใบของกังหันลม (Bc/R)	
EM	ความลาดชันของเส้นโค้งแรงยกที่หารด้วย 2π	
DRR	ขนาดการเพิ่มของความยาวของใบกังหันต่อรัศมีที่ใช้ในการอินทิเกรตแบบ numerical, dr/R	
XMIN	อัตราส่วนความเร็วปลายใบค่าแรกที่ทำการคำนวณ	
XMAX	อัตราส่วนความเร็วปลายใบค่าสุดท้ายที่ทำการคำนวณ	
DBX	ขนาดการเพิ่มของอัตราส่วนความเร็วปลายใบจากค่าแรกที่ทำการคำนวณ เพื่อคำนวณสมรรถนะของกังหันลมที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบค่าต่อไป	
CD ZERO	สัมประสิทธิ์แรงหน่วงที่มุมปะทะเท่ากับศูนย์	
CL MAX	สัมประสิทธิ์แรงยกที่มีค่าสูงสุด	
CL FLAT	สัมประสิทธิ์แรงยกที่เป็นส่วนราบเรียบ	
ALPHA BREAK	มุมปะทะที่สัมประสิทธิ์แรงยกเปลี่ยนจากค่าสูงสุดมาเป็นค่าที่เป็นส่วนราบเรียบ	- หน่วยเป็นองศา
ALO	มุมที่เส้น zero lift line ทำกับเส้น chord หรือมุมปะทะ(เมื่อใส่เป็นเครื่องหมาย $-\alpha_{L0}$) ที่ให้ค่าแรงยกเป็นศูนย์	- หน่วยเป็นองศา

AST	มุมปะทะที่สัมประสิทธิ์แรงยกเริ่มมีค่าลดลง เนื่องจากสภาวะ Stall	- หน่วยเป็นองศา
SI	มุมเอียงของใบกังหัน	- หน่วยเป็นองศา
PITCH	มุมบิดของใบกังหันเนื่องจากการติดตั้ง	- หน่วยเป็นองศา
BETA ROOT	มุมบิดของใบกังหันที่โคนใบ	- หน่วยเป็นองศา
DBETA	ค่าแตกต่างของมุมบิดของใบกังหันจากโคนถึงปลายใบกังหัน	- หน่วยเป็นองศา
RT	ตำแหน่งของใบกังหันวัดจากจุดศูนย์กลาง rotor ถึงจุดสุดท้ายที่มีการแปรเปลี่ยนของมุมบิดของใบกังหันลม	- หน่วยเป็นเมตร
DCND	อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของใบกังหันลมต่อรัศมี, $\Delta c/R$	
RC	ตำแหน่งของใบกังหันวัดจากจุดศูนย์กลาง rotor ถึงจุดสุดท้ายที่มีการแปรเปลี่ยนของค่าความกว้างของใบกังหันลม	- หน่วยเป็นเมตร
RH	รัศมีของคุมกังหันลม	- หน่วยเป็นเมตร
AREA	พื้นที่ของภาคตัดขวางของใบกังหันที่โคนใบกังหันลม	- หน่วยเป็นตารางเมตร
BLADE DENSITY	ความหนาแน่นของใบกังหันลม	- หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
PRINCIPAL ANGLE	มุมที่แกนหลักทำกับแกนอ้างอิง	- หน่วยเป็นองศา
FACTOR FOR TIP LOSS MODEL	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดค่า	
VELOCITY	ความเร็วลม	- หน่วยเป็นเมตรต่อวินาที
DENSITY	ความหนาแน่นของอากาศ	- หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
R	ความยาวของใบกังหันลม	- หน่วยเป็นเมตร
HALF THICKNESS	ระยะจากจุดกึ่งกลางมวลถึงผิวของใบกังหันลม	- หน่วยเป็นเมตร

M OF INERTIA

โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน - หน่วยเป็นเมตร⁴
 หลัก 'x' ของภาคตัดขวาง
 ของใบกังหันลมที่โคนใบ
 กังหันลม

ส่วนผลออกของโปรแกรมจะถูกส่งไปเก็บไว้ใน file ชื่อ STRESS บน file นี้ Program จะเขียนผลออกทั้งเงื่อนไขการทำงานของกังหันลม (Program operation conditions) และผลเฉลยโดยมีสัญลักษณ์ดังต่อไปนี้

B, BCRR, DCND, RT, RC, RH, AST, ALO, XMIN, XMAX, DRR, SI มีความหมายเหมือนของข้อมูลขาเข้า

BRT = BETAROOT
 DCT = DBETA
 CLM = CL MAX
 CLF = CL FLAT
 M = EM
 ABR = ALPHA BREAK

ในส่วนของผลเฉลย

PCR ตำแหน่งบนใบกังหันลมที่พิจารณาต่อความยาว
 ของใบกังหัน , r/R
 A ค่าแฟคเตอร์เหนี่ยวนำตามแกน axial induction factor
 PHI ผลรวมของมุมบิดกับมุมปะทะ - หน่วยเป็นองศา
 BETA มุมบิดของใบกังหันลม - หน่วยเป็นองศา
 ALPHA มุมปะทะของใบกังหันลม - หน่วยเป็นองศา
 CL สัมประสิทธิ์แรงยก
 CD สัมประสิทธิ์แรงหน่วง
 BCR อัตราส่วนความกว้างของใบกังหันเฉพาะ
 ที่ต่อรัศมีคูณด้วยจำนวนใบของกังหันลม
 CPB ค่าสัมประสิทธิ์กำลังเฉพาะที่จากการอินทิเกรต
 CTB ค่าสัมประสิทธิ์แรงทorsiเฉพาะที่จากการอินทิเกรต
 F ค่าความสูญเสียปลายใบ

STTEN	ค่าความเค้นจากแรงดึงเฉพาะที่จากการ อินทิเกรต - ปาสกาล	
STBEN	ค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดเฉพาะที่จากการ อินทิเกรต - ปาสกาล	
N	จำนวนครั้งของขั้นตอนที่ถูกแบ่งเพื่อใช้ในการ อินทิเกรตแบบ numerical	
CP	สัมประสิทธิ์กำลัง	
CT	สัมประสิทธิ์แรงทริส	
FAVE	แรงดึงเฉลี่ย	- หน่วยเป็นนิวตัน
FAMAX	แรงดึงสูงสุด	- หน่วยเป็นนิวตัน
FAMIN	แรงดึงต่ำสุด	- หน่วยเป็นนิวตัน
STTEN	ค่าความเค้นจากแรงดึงที่ใช้ค่าแรงดึง เฉลี่ยที่โคนใบกังหันลม	- หน่วยเป็นปาสกาล
STBEN	ค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดที่เกิดจาก สัมประสิทธิ์แรงทริสที่โคนใบกังหันลม	- หน่วยเป็นปาสกาล
STBEN2	ค่าความเค้นจากโมเมนต์ดัดที่เกิดจาก องค์ประกอบของโมเมนต์ดัดที่โคนของ ใบกังหันลม	- หน่วยเป็นปาสกาล
STBEN3	ค่าความเค้นจากองค์ประกอบของน้ำหนัก ที่ให้ค่าความเค้นในแนวเดียวกัน	- หน่วยเป็นปาสกาล
DTOE3	โมเมนต์ดัดที่เกิดจากองค์ประกอบของ โมเมนต์บิดที่โคนใบของใบกังหันลม	- หน่วยเป็นนิวตัน -เมตร
DTWE3	โมเมนต์ดัดที่เกิดจากองค์ประกอบของ น้ำหนักที่โคนของใบกังหันลม	- หน่วยเป็นนิวตัน -เมตร

รายละเอียดโปรแกรม

```

PROGRAM TURBINE
DIMENSION DTFA(200), DMBA(200), DTFB(200), DTOR(200), DWG(200),
&DTW(200)
CHARACTER*1 SUPP,DANSR

```

```

C*****
C
C*****
PI = 3.1415926356
C*****
C INDEPENDENT VARIABLE INPUT SECTION
C*****
OPEN (1,FILE ='STRESS')
PRINT 11
PRINT 2
READ*,B,BCRR,EM,DRR,XMIN,XMAX,DBX
PRINT 3
READ*,CDO,CLM,CLFL,ABR
PRINT 65
READ*,AL0,AST,SI,PTCH,BRT,DBTA
PRINT 66
READ*,RT,DCND,RC,RH
PRINT 67
67 FORMAT(' INPUT AREA ,BLADE DENSITY,PRINCIPAL ANGLE'/' FACTOR
& FOR TIP LOSS MODEL (0.65-0.7) '/')
READ*,AREA,RHOB,APOL,ZFF
PRINT 51
51 FORMAT(' INPUT VELOCITY,DENSITY,R,HALF THICKNESS, M OF INERTIA'//)
READ*,V,RHO,R,DIS,AI
PRINT 68
68 FORMAT(' SUPPRESS IN TERMED OUTPUT? (Y)')
READ 5,SUPP
C*****
C HEADINGS AND CALCULATION OF CONSTANTS
C*****
WRITE(1,60)
WRITE(1,19) B,BCRR,DCND,RT,RC,RH,BRT,DBTA
WRITE(1,8) CLM,CLFL,EM,AST,ABR,AL0,CDO
WRITE(1,9) XMIN,XMAX,DRR,SI
CONVT =PI/180.
AC = .38
FAT = 1.
SI = SI*CONVT
CSI = COS(SI)
SSI = SIN(SI)
DBTA = DBTA*CONVT
ABR = ABR*CONVT
AL0 = AL0*CONVT
AST = AST*CONVT
APOL = APOL*CONVT
TAMAX = PI/2.
ZLDT = 1.
CD1 = CLFL/ZLDT
CD2 = 1.*(1.+ SIN(AST))/(.5*SIN(2.*AST))
ROSE = ATAN((.41/CLFL)**.87)
EM1 = CLFL/(SIN(TAMAX-AST))
200 WRITE(1,21) PTCH
X = XMIN
ANG= BRT*CONVT
RTR = RT/R
RCR = RC/R
RHR = RH/R
27 CONTINUE

```

```

WRITE(1,7) X
KK = 0
OM = X*V/R
DX = DRR*X
DR = DRR*R
TNUM = (R-RH)/DR
NUM = TNUM
N = NUM
IF (NUM.NE.TNUM) N = NUM + 1
XL = X

```

```

C*****
C  INITIALIZED
C*****

```

```

G=9.81
GR=G/R
CT = 0.
CP = 0.
AT = 0.
AP = 0.
ATB = 0.
FAVE = 0.
FAMAX = 0.
FAMIN = 0.
DFAVE1 = 0.
DFMAX1 = 0.
DFMIN1 = 0.
DMBE = 0.
DMBB = 0.
DTOE3 = 0.
DTWE3 = 0.
APB = -X**3.*CD0*(BCRR-B*DCND)
ZF = ZFF
Z9 = COS(PI/2.*ZF)
RE = SQRT((X*B**.6666)/(X*B**.6666+1.32))
IF (X.LT.3.) RE = SQRT(B**.6666/(B**.6666+.44))
GLUART = 4.*(1.-2.*AC)
NN = N + 1
I = 1
J = 1

```

```

C*****
C  CHECK TO SEE IF NUMBER OF INTERVAL IS EVEN ,
C  EVEN ---1/3 RULE  ODD ---3/8 RULE ON THE FIRST THREE INTERVALS
C*****

```

```

IM = 1
KHALF = N/2
IF ((N-2*KHALF).EQ.0) IM = 0
553 IF (SUPP.EQ.'Y') GO TO 555
WRITE(1,15)
555 NHALF = I/2
NTEST = I - 2*NHALF
RLR = XL/X
RLR2 = RLR*RLR
RLR3 = RLR2*RLR
RLR4 = RLR3*RLR

```

```

C*****
C  CALCULATION OF LOCAL TWIST ANGLE AND LOCAL CHORD TO
C  RADIUS RATIO
C*****

```

```

PCR = XL/X
EA = (1.-PCR)/(1.-RE)
EFSML = Z9**EA
FBIG = 2./PI*ACOS(EFSML)
BCR = BCRR
CC = BCRR*R/B

```

```

CONST = AREA/(CC*CC)
CONST2 = AI/(CC**4.)
IF (RLR.GE.RCR) BCR = BCRR-B*DCND*(RLR-RCR)/(1.-RCR)
IF (FBIG.NE.0.) BCRF = BCR/FBIG
CR = BCR/B
CV = CR*R/V
BETA = ANG
IF (RLR.GE.RTR) BETA = ANG-DBTA*(RLR-RTR)/(1.-RTR)
BETA = BETA+PTCH*CONVT
IF (FBIG.NE.0.) EM2 = EM1*BCRF*X*CSI/(2.*PI)
STEL = BCR/B*(XL/X)
AM = ASIN(CLM/(2.*PI*EM))-ALO
C*****
C  CALCULATION OF AXIAL INDUCTION FACTOR
C*****
IF (RLR.EQ.1.) THEN
  CL = 0.
  ALPHA = 0.
  PHI = BETA
  A = 1.
ELSE
  G = 4.*(1.-2.*AC)
  H = 4.*AC*(1.-AC)-G*AC
  AB = BCRF*X*EM*CSI*(COS(BETA-ALO)-XL*SIN(BETA-ALO))-H
  A = AB/(BCRF*X*EM*CSI*COS(BETA-ALO)+G)
  PHI=ATAN((1.-A)/XL)
  ALPHA = PHI-BETA
  IF (A.GT.AC) GO TO 30
  B1 = 4.+BCRF*EM*X*CSI*COS(BETA-ALO)
  C1 = BCRF*EM*X*CSI*(COS(BETA-ALO)-XL*SIN(BETA-ALO))
  A = (B1-SQRT(B1**2-16.*C1))/8.
  PHI = ATAN((1.-A)/XL)
  ALPHA = PHI-BETA
30  CL = 2.*PI*EM*SIN(ALPHA+ALO)
  IF (ABS(CL).LT.CLM) GO TO 500
  CL = (ABS(ALPHA)/ALPHA)*CLM
  IF (ABS(ALPHA).GT.ABR) CL = (ALPHA/ABS(ALPHA))*CLFL
  EN = BCRF*X*CL*CSI/(2.*PI)
  B2 = (G*H+EN**2)/(G**2-EN**2)
  C2 = (EN**2*(1.+XL**2)-H**2)/(G**2-EN**2)
  BOOM = B2**2+C2
  IF (BOOM.LT..0) A = 0.
  IF (BOOM.LT..0) GO TO 32
  A = -B2+SQRT(B2**2+C2)
32  CONTINUE
  PHI = ATAN((1.-A)/XL)
  ALPHA = PHI-BETA
  IF (ABS(ALPHA).LE.ABR) CL = (ABS(ALPHA)/ALPHA)*CLM
  IF (ABS(ALPHA).GT.ABR) CL = (ALPHA/ABS(ALPHA))*CLFL
  IF (A.GT.AC) GO TO 35
  DO 31 K = 1,5
  B3 = BCRF*XL*X*CL*CSI*SQRT(1.+((1.-A)/XL)**2)/(2.*PI)
  A = (1.-SQRT(1.-B3))/2.
  PHI = ATAN((1.-A)/XL)
  ALPHA = PHI-BETA
  IF (ABS(ALPHA).GT.ABR) CL = (ALPHA/ABS(ALPHA))*CLFL
  IF (ABS(ALPHA).LE.ABR) CL = (ALPHA/ABS(ALPHA))*CLM
31  CONTINUE
35  CONTINUE
  IF (ALPHA.LT.AST) GO TO 500
  ETA = BETA + TAMAX
  CETA = COS(ETA)
  SETA = SIN(ETA)
  A = (EM2*(XL*SETA-CETA)-H)/(G-EM2*CETA)

```

```

ALPHA = PHI-BETA
CL = EM1*SIN(TAMAX-ALPHA)
IF(A.GT.AC.AND.CL.LT.CLFL) GO TO 500
B4 = 4. - EM2*COS(ETA)
C4 = EM2*(XL*SIN(ETA)-COS(ETA))
A = (B4-SQRT(B4**2-16.*C4))/8.
PHI = ATAN((1.-A)/XL)
ALPHA = PHI - BETA
CL = EM1*SIN(TAMAX-ALPHA)
500 ALPHA = PHI-BETA
ENDIF

C*****
C  CALCULATION OF DRAG COEFFICIENT
C*****
ABSAL = ABS(ALPHA)
SA=SIN(ABSAL)
COA = COS(ABSAL)
SA2 = SA*SA
BOB = ASIN(CLM/(2.*PI*EM)) - AL0
BOB2 = ABR
CDBOB = CD0*(1.+53.81*(BOB**2))
IF(ABSAL.LT.BOB) CD = CD0*(1.+53.81*(ABSAL**2))
IF(ABSAL.GE.BOB) CD = CDBOB -TAN(BOB)+TAN(ABSAL)
IF(ABSAL.GE.BOB2) CD = 1.*TAN(ABSAL)
IF(ABSAL.GE.AST) CD = CD2*SA2/(1.+SA)
CSP = COS(PHI)
SNP = SIN(PHI)
CAS = COS(ALPHA)
SAS = SIN(ALPHA)
CN = CL*CAS+CD*SAS
CQ = CL*SAS-CD*CAS
DPHI = PHI/CONVT
DAL = ALPHA/CONVT
DBET = BETA/CONVT
IF (RLR.EQ.1) THEN
AP =0.
AT = 0.
ELSE
AP = ((1.-A)*CL-XL*CD)*XL**2*SQRT(1.+((1.-A)/XL)**2)*BCR
AT = ((1.-A)*CD+XL*CL)*XL*SQRT(1.+((1.-A)/XL)**2)*BCR
ENDIF
CPB = CSI**3*(AP+APB)*DX/(2.*PI*X)
CTB = CSI**3*(AT+ATB)*DX/(2.*PI*X)
CT = CT+CTB
CP = CP + CPB
ATB = AT
APB = AP

C*****
C  CALCULATE TIP LOSS FACTOR
C*****
IF(RLR.EQ.1.) THEN
FTIP = 0.
ELSE
SMA = B/2.*(1.-RLR)/(RLR*SIN(PHI))
FFI = EXP(-SMA)
FTIP = 2.*ACOS(FFI)/PI
ENDIF

C*****
C  PROPERTIES OF THE BLADE
C  CALCULATE LOCAL AREA AND LOCAL MASS
C*****
QVEL =0.5*RHO*V*V
DYNA = QVEL*PI*R*R

```

```

IF (RLR.GE.RCR) THEN
CC1 = BCR*R/B
TAREA = CONST*CC1*CC1
TAI = CONST2*(CC1**4.)
ELSE
TAREA = AREA
TAI = AI
ENDIF
AMASS = RHOB*TAREA*DR
DFC = R*RLR*OM*OM*AMASS
DNG = AMASS*G

```

```

C*****
C FIND TENSION ON BLADE DUE TO CENTRIFUGAL FORCE
C*****

```

```

DFAVE = DFC*CSI
DFAMAX = DFAVE + DNG*CSI
DFAMIN = DFAVE - DNG*CSI

```

```

C*****
C FIND BENDING MOMENT
C*****

```

```

DFTT = DYNA*V*CSI**3.*AP*DX/(PI*X*OM*RLR*R*B)
IF (RLR.EQ.1.) THEN

```

```

DFN = 0.
ELSE
DFN = DYNA*CSI**3.*AT*DX/(PI*X*B)
ENDIF

```

```

DFCG = (DFC-DNG)*SSI
DTF = (DFCG-DFN)
DTFA(J) = DTF
DMB = R*RLR*DTF
DMBA(J) = DMB
DTFB(J) = DFTT
DWG(J) = DNG
DTON = R*RLR*DFTT
DTOR(J) = DTON
DMW = R*RLR*DNG
DTW(J) = DMW

```

```

RAR = RLR
DMBB = 0.
DMBE = 0.
DTWE0 = 0.
DTON0 = 0.
DTON3 = 0.
DTWE3 = 0.

```

```

DO 33 I = 1,J
DMBC = (DMBA(I)-R*RAR*DTFA(I))
DMBD = (DMBB + DMBC)*0.5
DMBB = DMBC
DMBE = DMBE + DMBD
DTON1 = (DTOR(I) - R*RAR*DTFB(I))
DTON2 = (DTON0 + DTON1)*0.5
DTON0 = DTON1
DTON3 = DTON3 + DTON2
DTWE1 = (DTW(I) - R*RAR*DWG(I))
DTWE2 = (DTWE0 + DTWE1)*0.5
DTWE0 = DTWE1
DTWE3 = DTWE3 + DTWE2

```

```

33 CONTINUE
J = J+1
FEB = 0.5

```

```

C*****
C START INTEGRATION
C*****

```

```

DFAVE2 = DFAVE1 + DFAVE
DFMAX2 = DFMAX1 + DFAMAX
DFMIN2 = DFMIN1 + DFAMIN
DFAVE1 = DFAVE
DFMAX1 = DFAMAX
DFMIN1 = DFAMIN
FAVE = FAVE + FEB*DFAVE2
FAMAX = FAMAX + FEB*DFMAX2
FAMIN = FAMIN + FEB*DFMIN2
    
```

C*****

C CALCULATE STRESS

C*****

```

STTEN = FAMAX/TAREA
APOL1 = APOL + BETA
STBEN = -DMBE*COS (APOL1) *DIS/TAI
STBEN2 = DTOE3*SIN (APOL1) *DIS/TAI
STBEN3 = DTWE3*SIN (APOL1) *DIS/TAI
    
```

```

IF (SUPP.EQ.'Y') GO TO 43
IF (RLR.EQ.RHR) GO TO 554
IF (KK.LT.5) GO TO 43
    
```

554 WRITE (1,16) RLR, A, DPHI, DBET, DAL, CL, CD, BCR, CPB, CTB, FTIP, STTEN, STBEN
KK=0

43 CONTINUE

```

KK=KK+1
XL=XL-DX
RLR=XL/X
I=I+1
IF (RLR.LT.RHR) THEN
RLR=RHR
XL=RHR*X
DRR=(TNUM-NUM)*DRR
ELSE
ENDIF
IF (I.LE.NN) GO TO 555
    
```

C*****

C

C*****

```

WRITE (1,402) N
WRITE (1,509) CP,CT
WRITE (1,519) FAVE, FAMAX, FAMIN
WRITE (1,520) STTEN, STBEN
WRITE (1,521) STBEN2, STBEN3
WRITE (1,522) DTOE3, DTWE3
DRR=DX/X
X=X+DBX
IF (X.GT.XMAX) GO TO 40
GO TO 27
    
```

40 CONTINUE

```

PRINT 4
READ5, DANSR
IF (DANSR.NE.'Y') GO TO 300
PRINT 6
READ*, PTCH
GO TO 200
    
```

C*****

C FORMAT STATEMENTS

C*****

```

11 FORMAT (' FORCES INPUT SEQUENCE' /)
2 FORMAT (' WRITE B, BCRR, EM, DRR, XMIN, XMAX, DBX' /)
65 FORMAT (' WRITE ALO, AST, SI, PITCH, BETAROOT, DBETA' /)
66 FORMAT (' WRITE RT, DCND, RC, RH' /)
3 FORMAT (' WRITE CD ZERO, CL MAX, CL FLAT, ALPHA BREAK' /)
    
```

```

4   FORMAT(' DO YOU WANT ANOTHER PITCH ANGLE? (Y) '/')
5   FORMAT(A1)
6   FORMAT(' INPUT PITCH ANGLE'//)
7   FORMAT(//,' TIP SPEED RATIO = ',F7.3)
8   FORMAT(8X,'AERODYNAMIC DATA'//,7X,'CLM',6X,'CLF',8X,'M',8X,'AST'
&,7X,'ABR',7X,'ALO',7X,'CDO'/7F10.3/)
9   FORMAT(8X,'OPERATIONAL VARIABLES'//,7X,'XMIN',6X,'XMAX',7X,'DRR',
&8X,'SI'/4F10.3/)
19  FORMAT(8X,'PHYSICAL AIRFOIL DATA'//,7X,'B',7X,'BCRR',6X,'DCND'
&,7X,'RT',8X,'RC',8X,'RH',8X,'BRT',6X,'DBETA'/8F10.3/)
60  FORMAT(////17X,'PROGRAM OPERATING CONDITIONS'//)
21  FORMAT(////17X,'PROGRAM FORCES OUTPUT AT PITCH = ',F7.3,' DEGREES')
15  FORMAT(//,2X,'PCR',6X,'A',6X,'PHI',5X,'BETA',3X,'ALPHA',5X,'CL',
&5X,'CD',7X,'BCR',7X,'CPB',7X,'CTB',7X,' F ',7X,'STEN',5X,'STBEN')
16  FORMAT(2F7.4,6F8.3,4X,F9.5,2X,F9.5,2X,F7.4,2X,G13.5,2X,G13.5)
402 FORMAT(4X,' N= ',I3)
509 FORMAT(/,3X,'CP = ',F10.5,8X,' CT = ',F10.5)
519 FORMAT(/,4X,' FAVE = ',G12.6,' FAMAX = ',G12.6,' FAMIN = ',G12.6)
520 FORMAT(/,4X,'STTEN = ',G12.6,' STBEN = ',G12.6)
521 FORMAT (/,4X,'STBEN2 = ',G12.6,' STBEN3 = ',G12.6)
522 FORMAT (/,4X,'DTEO3 = ',G12.6,' DTWE3 = ',G12.6)
300 CONTINUE
STOP
END

```

ตัวอย่างรายละเอียดข้อมูลขาเข้าของกังหันลมชุดแรก

FORCES INPUT SEQUENCE

```
WRITE B,BCRR,EM,DRR,XMIN,XMAX,DBX
3. .355 .94 .01 6. 6. 1.
```

```
WRITE CD ZERO, CL MAX, CL FLAT, ALPHA BREAK
.0132 1.32 1.0 17.
```

```
WRITE ALO,AST,SI,PITCH,BETAROOT,DBETA
3. 45. 0. 0. 18. 18.
```

```
WRITE RT,DCND,RC,RH
.12 .083 .18 .06
```

```
INPUT AREA ,BLADE DENSITY,PRINCIPAL ANGLE
FACTOR FOR TIP LOSS MODEL (0.65-0.7)
.000318 760. -3.1 .65
```

```
INPUT VELOCITY,DENSITY,R,HALF THICKNESS, M OF INERTIA
7.2 1.225 0.6 .005 1.329E-7
```

```
SUPPRESS IN TERMED OUTPUT? (Y)
```

N

ตัวอย่างผลเฉลยโปรแกรม

PROGRAM OPERATING CONDITIONS

PHYSICAL AIRFOIL DATA

B	BCRR	DCND	RY	RC	RH	BRT	DSTA
3.000	0.355	0.083	0.120	0.180	0.060	18.000	18.000

AERODYNAMIC DATA

CLM	CLP	H	AST	ABR	ALO	CDO
1.320	1.000	0.940	45.000	17.000	3.000	0.013

OPERATIONAL VARIABLES

XMIN	XMAX	DRR	SI
6.000	6.000	0.010	0.000

PROGRAM FORCES OUTPUT AT PITCH = 0.000 DEGREES

TIP SPEED RATIO = 6.000

PCR	A	PHI	BETA	ALPHA	CL	CD	BCR	CPB	CTB	F	STBX	STBY
0.9500	0.3419	6.586	1.125	5.461	0.869	0.020	0.124	0.00562	0.01104	0.6649	64860.	16467.
0.9000	0.2640	7.761	2.250	5.511	0.874	0.020	0.142	0.00706	0.01164	0.8120	0.10724E+06	48326.
0.8500	0.2355	8.525	3.375	5.150	0.837	0.019	0.159	0.00726	0.01127	0.8927	0.13998E+06	73461.
0.8000	0.2194	9.237	4.500	4.737	0.795	0.018	0.177	0.00706	0.01058	0.9383	0.16607E+06	88669.
0.7500	0.2079	9.983	5.625	4.358	0.756	0.017	0.195	0.00669	0.00977	0.9644	0.18722E+06	95876.
0.7000	0.1988	10.800	6.750	4.050	0.725	0.017	0.213	0.00625	0.00894	0.9794	0.20443E+06	97575.
0.6500	0.1917	11.708	7.875	3.834	0.703	0.016	0.230	0.00579	0.00813	0.9881	0.21834E+06	95773.
0.6000	0.1868	12.729	9.000	3.729	0.692	0.016	0.248	0.00534	0.00738	0.9932	0.22938E+06	91887.
0.5500	0.1843	13.884	10.125	3.759	0.695	0.016	0.266	0.00492	0.00671	0.9962	0.23783E+06	86866.
0.5000	0.1849	15.201	11.250	3.951	0.715	0.017	0.284	0.00453	0.00612	0.9979	0.24389E+06	81326.
0.4500	0.1890	16.718	12.375	4.343	0.755	0.017	0.302	0.00417	0.00560	0.9989	0.24770E+06	75654.
0.4000	0.1974	18.490	13.500	4.990	0.821	0.019	0.319	0.00383	0.00515	0.9995	0.24937E+06	70084.
0.3500	0.2108	20.597	14.625	5.972	0.921	0.021	0.337	0.00349	0.00474	0.9998	0.24896E+06	64752.
0.3000	0.2300	23.161	15.750	7.411	1.067	0.025	0.355	0.00313	0.00433	0.9999	0.24654E+06	59731.
0.2500	0.2469	26.660	16.875	9.785	1.307	0.034	0.355	0.00270	0.00382	1.0000	0.26606E+06	66936.
0.2000	0.1462	35.432	18.000	17.432	1.000	0.314	0.355	0.00143	0.00269	1.0000	0.28204E+06	74284.
0.1500	0.1213	44.313	18.000	26.313	1.000	0.495	0.355	0.00059	0.00194	1.0000	0.29448E+06	82139.

M = 90

CP = 0.40123 CT = 0.61376

FAX = 95.9215 FAXAX = 95.9942 FAXIN = 95.8488

STBX = 301869. STBY = 88513.7

STBXZ = 3723.45 STBYZ = 132.042

DTORZ = 0.384896 DTYRZ = 0.136493E-01

ตัวอย่างรายละเอียดข้อมูลขาเข้าของกังหันลมชุดที่สอง

FORCES INPUT SEQUENCE

WRITE B, BCRR, EM, DRR, XMIN, XMAX, DBX

3. .4 .94 .01 6. 6. 1.

WRITE CD ZERO, CL MAX, CL FLAT, ALPHA BREAK

0.0132 1.32 1.0 17.

WRITE ALO, AST, SI, PITCH, BETAROOT, DBETA

3. 45. 0. 0. 14. 14.

WRITE RT, DCND, RC, RH

.07 .04348 .07 .07

INPUT AREA , BLADE DENSITY, PRINCIPAL ANGLE

FACTOR FOR TIP LOSS MODEL (0.65-0.7)

.000534 760. -3.1 0.65

INPUT VELOCITY, DENSITY, R, HALF THICKNESS, M OF INERTIA

6.6 1.225 .69 .008 3.7467E-7

SUPPRESS IN TERMED OUTPUT? (Y)

N

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างผลเฉลยโปรแกรม

PROGRAM OPERATING CONDITIONS

PHYSICAL AIRFOIL DATA

B BCCR DCND RT RC RH BRT DBTA
 3.000 0.400 0.043 0.070 0.070 0.070 14.000 14.000

AERODYNAMIC DATA

CLX CLF N AST ABR ALO CDO
 1.320 1.000 0.940 45.000 17.000 3.000 0.013

OPERATIONAL VARIABLES

XMIN XMAX DRR SI
 6.000 6.000 0.010 0.000

PROGRAM FORCES OUTPUT AT PITCH = 0.000 DEGREES

TIP SPEED RATIO = 6.000

PCR	A	PHI	BETA	ALPHA	CL	CD	BCR	CPB	CTB	F	STPH	STBH
0.9500	0.6975	3.038	0.779	2.259	0.541	0.014	0.277	0.00192	0.01520	0.8552	62298.	1005.5
0.9000	0.5594	4.665	1.558	3.107	0.628	0.015	0.284	0.00494	0.01664	0.9178	0.11289E+06	4705.3
0.8500	0.4816	5.804	2.337	3.467	0.665	0.016	0.291	0.00632	0.01625	0.9535	0.15820E+06	10569.
0.8000	0.4292	6.782	3.116	3.666	0.686	0.016	0.299	0.00689	0.01527	0.9734	0.19859E+06	17846.
0.7500	0.3904	7.715	3.895	3.820	0.701	0.016	0.306	0.00704	0.01412	0.9846	0.23438E+06	25890.
0.7000	0.3609	8.653	4.674	3.978	0.718	0.017	0.313	0.00694	0.01293	0.9911	0.26587E+06	34202.
0.6500	0.3393	9.616	5.453	4.162	0.736	0.017	0.320	0.00665	0.01175	0.9949	0.29329E+06	42416.
0.6000	0.3236	10.641	6.232	4.409	0.762	0.017	0.328	0.00626	0.01063	0.9972	0.31687E+06	50275.
0.5500	0.3129	11.762	7.011	4.750	0.796	0.018	0.335	0.00583	0.00959	0.9985	0.33683E+06	57609.
0.5000	0.3067	13.013	7.790	5.223	0.845	0.019	0.342	0.00536	0.00863	0.9992	0.35333E+06	64315.
0.4500	0.3048	14.439	8.569	5.870	0.911	0.021	0.349	0.00488	0.00775	0.9996	0.36653E+06	70335.
0.4000	0.3072	16.101	9.348	6.753	1.000	0.023	0.357	0.00439	0.00693	0.9998	0.37659E+06	75650.
0.3500	0.3142	18.085	10.127	7.957	1.123	0.027	0.364	0.00388	0.00616	0.9999	0.38364E+06	80264.
0.3000	0.3261	20.525	10.906	9.619	1.290	0.033	0.371	0.00336	0.00540	1.0000	0.38779E+06	84195.
0.2500	0.2736	25.838	11.685	14.153	1.320	0.112	0.378	0.00248	0.00426	1.0000	0.38914E+06	87467.
0.2000	0.1607	34.971	12.465	22.507	1.000	0.414	0.386	0.00077	0.00285	1.0000	0.38781E+06	90092.
0.1500	0.1354	43.850	13.244	30.607	1.000	0.592	0.393	0.00049	0.00225	1.0000	0.38386E+06	92086.

N = 90

CP = 0.38704 CT = 0.85068

FAVH = 200.892 FAVH2 = 201.073 FAVH3 = 200.711

STPH = 378889. STBH = 93266.2

STPH2 = 1908.60 STBH2 = 212.379

DTOR3 = 0.472576 DTOR3 = 0.525857E-01

โปรแกรมคอมพิวเตอร์หาค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองของความสูญเสียที่ปลายใบ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ TIPLOSS นี้จะทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์เพื่อนำไปใช้กับแบบจำลองของการสูญเสียที่ปลายใบ ที่สามารถคำนวณแบบ explicit โดยใช้การผสมผสานระหว่างการสูญเสียที่ปลายใบของ Prandtl กับหลักการ effective radius เพื่อนำผลไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการของ Prandtl

ข้อมูลขาเข้าที่ถูกอ่านเข้าทางจอภาพของ monitor คือ

X อัตราส่วนความเร็วปลายใบเริ่มต้น

ZF ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการสูญเสียปลายใบ

ผลออกของโปรแกรมจะถูกแสดงในรูปของตัวเลข 2 แถว โดยตัวแรกแถวแรก RLR จะเป็นตำแหน่งบนใบกังหันลมที่พิจารณาต่อความยาวใบกังหัน r/R และแถวที่สองเป็นค่าความสูญเสียปลายใบตามแบบจำลองที่ได้ดัดแปลง เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าความสูญเสียปลายใบที่คำนวณโดยใช้สูตรของ Prandtl

รายละเอียดโปรแกรม

```

PROGRAM TIPLOS
OPEN (1,FILE='COMP')
PI = 3.1415926
PRINT 2
10 READ *, X, ZF
WRITE (1,100) X
RLR = .95
DRR = 0.05
Z9 = COS(PI/2.*ZF)
RE = SQRT ((X*3.**0.6666)/( X*3.**0.6666+1.32))
20 EA = (1.-RLR)/(1.-RE)
EFSML = Z9**EA
FBIG = 2./PI*ACOS(EFSML)
WRITE (1,200) RLR,FBIG
RLR = RLR-DRR
IF (RLR.GT.0.04) GO TO 20
X = X+1.
IF (X.LE.10.) GO TO 10
2 FORMAT ( ' X      ZF '/')
100 FORMAT ( ' TIP SPEED RATIO  =',F5.2)
200 FORMAT ( 2X,F7.4,3X,F7.4)
STOP
END

```

ตัวอย่างผลเฉลย

TIP SPEED RATIO = 4.00		0.7500	0.9813	0.5000	1.0000
0.9500	0.5449	0.7000	0.9908	0.4500	1.0000
0.9000	0.7172	0.6500	0.9955	0.4000	1.0000
0.8500	0.8182	0.6000	0.9978	0.3500	1.0000
0.8000	0.8818	0.5500	0.9989	0.3000	1.0000
0.7500	0.9228	0.5000	0.9995	0.2500	1.0000
0.7000	0.9494	0.4500	0.9997	0.2000	1.0000
0.6500	0.9669	0.4000	0.9999	0.1500	1.0000
0.6000	0.9783	0.3500	0.9999	0.1000	1.0000
0.5500	0.9858	0.3000	1.0000	0.0500	1.0000
0.5000	0.9907	0.2500	1.0000		
0.4500	0.9939	0.2000	1.0000		
0.4000	0.9960	0.1500	1.0000		
0.3500	0.9974	0.1000	1.0000		
0.3000	0.9983	0.0500	1.0000		
0.2500	0.9989	TIP SPEED RATIO = 8.00			
0.2000	0.9993	0.9500	0.7035		
0.1500	0.9995	0.9000	0.8707		
0.1000	0.9997	0.8500	0.9423		
0.0500	0.9998	0.8000	0.9741		
TIP SPEED RATIO = 5.00		0.7500	0.9884		
0.9500	0.5932	0.7000	0.9948		
0.9000	0.7685	0.6500	0.9977		
0.8500	0.8640	0.6000	0.9989		
0.8000	0.9193	0.5500	0.9995		
0.7500	0.9519	0.5000	0.9998		
0.7000	0.9714	0.4500	0.9999		
0.6500	0.9829	0.4000	1.0000		
0.6000	0.9898	0.3500	1.0000		
0.5500	0.9939	0.3000	1.0000		
0.5000	0.9964	0.2500	1.0000		
0.4500	0.9978	0.2000	1.0000		
0.4000	0.9987	0.1500	1.0000		
0.3500	0.9992	0.1000	1.0000		
0.3000	0.9995	0.0500	1.0000		
0.2500	0.9997	TIP SPEED RATIO = 9.00			
0.2000	0.9998	0.9500	0.7320		
0.1500	0.9999	0.9000	0.8932		
0.1000	0.9999	0.8500	0.9565		
0.0500	1.0000	0.8000	0.9823		
TIP SPEED RATIO = 6.00		0.7500	0.9928		
0.9500	0.6349	0.7000	0.9970		
0.9000	0.8098	0.6500	0.9988		
0.8500	0.8979	0.6000	0.9995		
0.8000	0.9448	0.5500	0.9998		
0.7500	0.9701	0.5000	0.9999		
0.7000	0.9838	0.4500	1.0000		
0.6500	0.9912	0.4000	1.0000		
0.6000	0.9952	0.3500	1.0000		
0.5500	0.9974	0.3000	1.0000		
0.5000	0.9986	0.2500	1.0000		
0.4500	0.9992	0.2000	1.0000		
0.4000	0.9996	0.1500	1.0000		
0.3500	0.9998	0.1000	1.0000		
0.3000	0.9999	0.0500	1.0000		
0.2500	0.9999	TIP SPEED RATIO = 10.00			
0.2000	1.0000	0.9500	0.7575		
0.1500	1.0000	0.9000	0.9117		
0.1000	1.0000	0.8500	0.9673		
0.0500	1.0000	0.8000	0.9878		
TIP SPEED RATIO = 7.00		0.7500	0.9955		
0.9500	0.6714	0.7000	0.9983		
0.9000	0.8433	0.6500	0.9994		
0.8500	0.9233	0.6000	0.9998		
0.8000	0.9622	0.5500	0.9999		

ภาคผนวก ค.
ผลเฉลยของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

อัตราส่วน ความเร็ว ปลายใบ	สัมประสิทธิ์ กำลัง	สัมประสิทธิ์ แรงทอร์ค	ความเค้น จากแรงดึง	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก แรงทอร์ค	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก โมเมนต์บิด	ความเค้น เนื่องจาก น้ำหนัก	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด รวม	ความเค้นรวม โดยไม่คิด ความเค้นจาก น้ำหนัก
			Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
4	0.31383	0.47265	134291	67551	4467.9	132.042	72018.9	206309.9
5	0.38064	0.56219	209701	80222.5	4276.83	132.042	84499.33	294200.33
6	0.40123	0.61376	301869	88513.7	3723.45	132.042	92237.15	394106.15
7	0.39745	0.64624	410794	94732.3	3140.36	132.042	97872.66	508666.66
8	0.37257	0.6641	536477	99250.3	2558.75	132.042	101809.05	638286.05
9	0.32672	0.66954	678918	102299	1979.55	132.042	104278.55	783196.55
10	0.25914	0.66415	838117	104078	1399.51	132.042	105477.51	943594.51

ตารางที่ ค.1 ผลเฉลยในรูปของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดแรกที่ความเร็วลม 7.2 เมตรต่อวินาที
CLmax = 1.32 CD0 = 0.0132

อัตราส่วน ความเร็ว ปลายใบ	สัมประสิทธิ์ กำลัง	สัมประสิทธิ์ แรงทอร์ค	ความเค้น จากแรงดึง	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก แรงทอร์ค	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก โมเมนต์บิด	ความเค้น เนื่องจาก น้ำหนัก	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด รวม	ความเค้นรวม โดยไม่คิด ความเค้นจาก น้ำหนัก
			Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
4	0.30733	0.47336	134291	67652.6	4372.82	132.04	72025.42	206316.42
5	0.37167	0.56288	209701	80310.4	4172.95	132.04	84483.35	294184.35
6	0.38939	0.6144	301869	88591.5	3609.73	132.04	92201.23	394070.23
7	0.38148	0.64687	410794	94807	3008.98	132.04	97815.98	508609.98
8	0.35071	0.66476	536477	99326.9	2401.55	132.04	101728.45	638205.45
9	0.29684	0.67026	678918	102381	1788.64	132.04	104169.64	783087.64
10	0.21875	0.66493	838117	104167	1167.28	132.04	105334.28	943451.28

ตารางที่ ค.2 ผลเฉลยในรูปของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดแรกที่ความเร็วลม 7.2 เมตรต่อวินาที
CLmax = 1.32 CD0 = 0.016

อัตราส่วน ความเร็ว ปลายใบ	สัมประสิทธิ์ กำลัง	สัมประสิทธิ์ แรงทอร์ค	ความเค้น จากแรงดึง	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก แรงทอร์ค	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก โมเมนต์บิด	ความเค้น เนื่องจาก น้ำหนัก	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด รวม	ความเค้นรวม โดยไมคิด ความเค้นจาก น้ำหนัก
			Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
4	0.25809	0.44119	134291	62606	3656.74	132.04	66262.74	200553.74
5	0.3564	0.56117	209701	80286	4001.72	132.04	84287.72	293988.72
6	0.37122	0.61408	301869	88663	3439.53	132.04	92102.53	393971.53
7	0.35799	0.64711	410794	94901	2818.6	132.04	97719.6	508513.6
8	0.31858	0.66511	536477	99430	2175.04	132.04	101605.04	638082.04
9	0.2535	0.67089	678918	102496	1515.35	132.04	104011.35	782929.35
10	0.16098	0.66596	838117	104294	855.504	132.04	105149.504	943266.504

ตารางที่ ก.3 ผลเฉลยในรูปของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดแรกที่ความเร็วลม 7.2 เมตรต่อวินาที

CLmax = 1.2 CD0 = 0.020

อัตราส่วน ความเร็ว ปลายใบ	สัมประสิทธิ์ กำลัง	สัมประสิทธิ์ แรงทอร์ค	ความเค้น จากแรงดึง	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก แรงทอร์ค	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก โมเมนต์บิด	ความเค้น เนื่องจาก น้ำหนัก	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด รวม	ความเค้นรวม โดยไมคิด ความเค้นจาก น้ำหนัก
			Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
4	0.25002	0.44208	134291	62734.4	3538.78	132.04	66273.18	200564.18
5	0.34362	0.56214	209701	80411.3	3853.7	132.04	84265	293966
6	0.35434	0.61499	301869	88773.8	3277.23	132.04	92051.03	393920.03
7	0.33519	0.64801	410794	95007.6	2630.96	132.04	97638.56	508432.56
8	0.28738	0.66604	536477	99539.3	1950.52	132.04	101489.82	637966.82
9	0.21084	0.6719	678918	102612	1242.63	132.04	103854.63	782772.63
10	0.10328	0.66706	838117	104421	503.747	132.04	104924.747	943041.747

ตารางที่ ก.4 ผลเฉลยในรูปของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดแรกที่ความเร็วลม 7.2 เมตรต่อวินาที

CLmax = 1.2 CD0 = 0.024

อัตราส่วน ความเร็ว ปลายใบ	สัมประสิทธิ์ กำลัง	สัมประสิทธิ์ แรงทอร์ค	ความเค้น จากแรงดึง	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก แรงทอร์ค	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก โมเมนต์บิด	ความเค้น เนื่องจาก น้ำหนัก	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด รวม	ความเค้นรวม โดยไมคิด ความเค้นจาก น้ำหนัก
			Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
4	0.24598	0.44252	134291	62798.7	3479.8	132.04	66278.5	200569.5
5	0.33723	0.56262	209701	80473.9	3779.69	132.04	84253.59	293954.59
6	0.34591	0.61544	301869	88829.3	3196.08	132.04	92025.38	393894.38
7	0.32379	0.64846	410794	95061	2537.14	132.04	97598.14	508392.14
8	0.27178	0.6665	536477	99593.9	1838.26	132.04	101432.16	637909.16
9	0.1895	0.6724	678918	102671	1106.27	132.04	103777.27	782695.27
10	0.07444	0.66762	838117	104484	337.87	132.04	104821.87	942938.87

ตารางที่ ก.5 ผลเฉลยในรูปของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดแรกที่ความเร็วลม 7.2 เมตรต่อวินาที

CLmax = 1.2 CD0 = 0.026

อัตราส่วน ความเร็ว ปลายใบ	สัมประสิทธิ์ กำลัง	สัมประสิทธิ์ แรงทอร์ค	ความเค้น จากแรงดึง	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก แรงทอร์ค	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก โมเมนต์บิด	ความเค้น เนื่องจาก น้ำหนัก	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด รวม	ความเค้นรวม โดยไม่คิด ความเค้นจาก น้ำหนัก
			Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
4	0.24195	0.44296	134291	62862.9	3420.82	132.04	66283.72	200574.72
5	0.33084	0.56311	209701	80536.5	3705.68	132.04	84242.18	293943.18
6	0.33747	0.61589	301869	88884.7	3114.93	132.04	91999.63	393868.63
7	0.31239	0.64891	410794	95114.3	2443.32	132.04	97557.62	508351.62
8	0.25618	0.66697	536477	99648.6	1726	132.04	101374.6	637851.6
9	0.16817	0.6729	678918	102729	969.91	132.04	103698.91	782616.91
10	0.04559	0.66817	838117	104548	171.99	132.04	104719.99	942836.99

ตารางที่ ก.6 ผลเฉลี่ยในรูปของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดแรกที่ความเร็วลม 7.2 เมตรต่อวินาที

CLmax = 1.2 CD0 = 0.028

อัตราส่วน ความเร็ว ปลายใบ	สัมประสิทธิ์ กำลัง	สัมประสิทธิ์ แรงทอร์ค	ความเค้น จากแรงดึง	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก แรงทอร์ค	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก โมเมนต์บิด	ความเค้น เนื่องจาก น้ำหนัก	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด รวม	ความเค้นรวม โดยไม่คิด ความเค้นจาก น้ำหนัก
			Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
4	0.3312	0.65001	168584	72838.5	2547.59	212.38	75386.09	243970.09
5	0.38833	0.77443	263221	85256.1	2341.85	212.38	87597.95	350818.95
6	0.36704	0.65066	376669	93266.2	1906.6	212.38	95174.6	474063.6
7	0.35312	0.90273	515585	99369.4	1465	212.38	100834.4	616419.4
8	0.29682	0.94093	673315	104339	1050	212.38	105389	778704
9	0.2194	0.96971	852071	108502	657.77	212.38	109159.77	961230.77
10	0.11949	0.99148	1051860	112039	278.94	212.38	112317.94	1164177.94

ตารางที่ ก.7 ผลเฉลี่ยในรูปของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดที่สองที่ความเร็วลม 6.6 เมตรต่อวินาที

CLmax = 1.32 CD0 = 0.0132

อัตราส่วน ความเร็ว ปลายใบ	สัมประสิทธิ์ กำลัง	สัมประสิทธิ์ แรงทอร์ค	ความเค้น จากแรงดึง	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก แรงทอร์ค	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก โมเมนต์บิด	ความเค้น เนื่องจาก น้ำหนัก	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด รวม	ความเค้นรวม โดยไม่คิด ความเค้นจาก น้ำหนัก
			Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
4	0.32247	0.6507	168584	72917.9	2479.13	212.38	75397.03	243981.03
5	0.37557	0.77513	263221	85326	2262.87	212.38	87588.87	350809.87
6	0.36924	0.85135	378889	93327.5	1817.26	212.38	95144.76	474033.76
7	0.32807	0.90338	515585	99426.2	1354.81	212.38	100781.01	616366.01
8	0.26149	0.94158	673315	104395	913.99	212.38	105308.99	778623.99
9	0.17024	0.97038	852071	108558	489.36	212.38	109047.36	961118.36
10	0.05244	0.99217	1051860	112097	71.96	212.38	112168.96	1164028.96

ตารางที่ ก.8 ผลเฉลี่ยในรูปของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดที่สองที่ความเร็วลม 6.6 เมตรต่อวินาที

CLmax = 1.32 CD0 = 0.016

อัตราส่วน ความเร็ว ปลายใบ	สัมประสิทธิ์ กำลัง	สัมประสิทธิ์ แรงทอร์ค	ความเค้น จากแรงดึง	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก แรงทอร์ค	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก โมเมนต์บิด	ความเค้น เนื่องจาก น้ำหนัก	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด รวม	ความเค้นรวม โดยไม่คิด ความเค้นจาก น้ำหนัก
			Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
4	0.28568	0.62957	168584	70750.6	2197.34	212.38	72947.94	241531.94
5	0.35205	0.77096	263221	85144.1	2122.03	212.38	87266.13	350487.13
6	0.34072	0.84971	378889	93333	1675.66	212.38	95008.66	473897.66
7	0.29059	0.90302	515585	99483	1193.4	212.38	100676.4	616261.4
8	0.21001	0.94183	673315	104467	718.31	212.38	105185.31	778500.31
9	0.09931	0.97096	852071	108637	248.45	212.38	108885.45	960956.45
10	-0.04342	0.99307	1051860	112180	-223.75	212.38	111956.25	1163816.25

ตารางที่ ก.9 ผลเฉลี่ยในรูปของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดที่สองที่ความเร็วลม 6.6 เมตรต่อวินาที

CLmax = 1.2 CD0 = 0.020

อัตราส่วน ความเร็ว ปลายใบ	สัมประสิทธิ์ กำลัง	สัมประสิทธิ์ แรงทอร์ค	ความเค้น จากแรงดึง	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก แรงทอร์ค	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก โมเมนต์บิด	ความเค้น เนื่องจาก น้ำหนัก	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด รวม	ความเค้นรวม โดยไม่คิด ความเค้นจาก น้ำหนัก
			Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
4	0.27415	0.63049	168584	70857.6	2105.27	212.38	72962.87	241546.87
5	0.33396	0.77194	263221	85243	2009.94	212.38	87252.94	350473.94
6	0.31538	0.85065	378889	93420	1545.5	212.38	94965.5	473854.5
7	0.25485	0.90393	515585	99563.9	1036.13	212.38	100600.03	616185.03
8	0.15958	0.94275	673315	104547	524.06	212.38	105071.06	778386.06
9	0.02912	0.97191	852071	108718	7.87	212.38	108725.87	960796.87
10	-0.13921	0.99407	1051860	112263	-519.45	212.38	111743.55	1163603.55

ตารางที่ ก.10 ผลเฉลี่ยในรูปของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดที่สองที่ความเร็วลม 6.6 เมตรต่อวินาที

CLmax = 1.2 CD0 = 0.024

อัตราส่วน ความเร็ว ปลายใบ	CDO	สัมประสิทธิ์ กำลัง	สัมประสิทธิ์ แรงทอร์ค	ความเค้น จากแรงดึง	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก แรงทอร์ค	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก โมเมนต์บิด	ความเค้น เนื่องจาก น้ำหนัก	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด รวม	ความเค้นรวม โดยไม่คิด ความเค้นจาก น้ำหนัก
				Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
4	0.03	0.23791	0.44341	37571.7	17528.3	936.44	132.042	18464.74	56036.44
5	0.03	0.32445	0.56359	58577.1	22450.8	1011.6	132.042	23462.4	82039.5
6	0.03	0.32903	0.61634	84250.3	24774.2	845.06	132.042	25619.26	109869.56
7	0.03	0.30098	0.64935	114591	26508.9	654.45	132.042	27163.35	141754.35
8	0.03	0.24058	0.66743	149600	27772.3	449.51	132.042	28221.81	177821.81
9	0.03	0.14684	0.6734	189277	28631.4	232.19	132.042	28863.59	218140.59
10	0.028	0.04559	0.66817	233622	29121.8	47.91	132.042	29169.71	262791.71

ตารางที่ ค.11 ผลเฉลยในรูปของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดแรกที่ความเร็วลม 3.80 เมตรต่อวินาที
โดยพิจารณาผลของตัวเลขเรย์โนลด์ด้วย

อัตราส่วน ความเร็ว ปลายใบ	CDO	สัมประสิทธิ์ กำลัง	สัมประสิทธิ์ แรงทอร์ค	ความเค้น จากแรงดึง	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก แรงทอร์ค	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก โมเมนต์บิด	ความเค้น เนื่องจาก น้ำหนัก	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด รวม	ความเค้นรวม โดยไม่คิด ความเค้นจาก น้ำหนัก
				Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
4	0.03	0.23791	0.44341	42856.6	20009	1068.97	132.042	21077.97	63934.57
5	0.03	0.32445	0.56359	66834.7	25628.2	1154.77	132.042	26782.97	93617.67
6	0.03	0.32903	0.61634	96141.4	28280.4	964.65	132.042	29245.05	125386.45
7	0.03	0.30098	0.64935	130776	30260.5	747.07	132.042	31007.57	161783.57
8	0.03	0.24058	0.66743	170740	31702.7	513.12	132.042	32215.82	202955.82
9	0.03	0.14684	0.6734	216032	32683.4	265.05	132.042	32948.45	248980.45
10	0.028	0.04559	0.66817	266653	33243.2	54.69	132.042	33297.89	299950.89

ตารางที่ ค.12 ผลเฉลยในรูปของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดแรกที่ความเร็วลม 4.06 เมตรต่อวินาที
โดยพิจารณาผลของตัวเลขเรย์โนลด์ด้วย

อัตราส่วน ความเร็ว ปลายใบ	CDO	สัมประสิทธิ์ กำลัง	สัมประสิทธิ์ แรงทอร์ค	ความเค้น จากแรงดึง	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก แรงทอร์ค	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก โมเมนต์บิด	ความเค้น เนื่องจาก น้ำหนัก	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด รวม	ความเค้นรวม โดยไม่คิด ความเค้นจาก น้ำหนัก
				Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
4	0.03	0.23791	0.44341	58086.8	27157.8	1450.89	132.042	28608.69	86695.49
5	0.03	0.32445	0.56359	90631.9	34784.7	1567.34	132.042	36352.04	126983.94
6	0.028	0.33747	0.61589	130409	38360.5	1344.33	132.042	39704.83	170113.83
7	0.028	0.31239	0.64891	177419	41049.1	1054.48	132.042	42103.58	219522.58
8	0.028	0.25618	0.66697	231661	43006	744.9	132.042	43750.9	275411.9
9	0.028	0.16817	0.6729	293135	44335.4	418.59	132.042	44753.99	337888.99
10	0.028	0.04559	0.66817	361841	45120.4	74.23	132.042	45194.63	407035.63

ตารางที่ ค.13 ผลเฉลยในรูปของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดแรกที่ความเร็วลม 4.73 เมตรต่อวินาที
โดยพิจารณาผลของตัวเลขเรย์โนลด์ด้วย

อัตราส่วน ความเร็ว ปลายใบ	CDO	สัมประสิทธิ์ กำลัง	สัมประสิทธิ์ แรงทอร์	ความเค้น จากแรงดึง	ความเค้นจาก โมเมนต์ตัด เนื่องจาก แรงทอร์	ความเค้นจาก โมเมนต์ตัด เนื่องจาก โมเมนต์บิด	ความเค้น เนื่องจาก น้ำหนัก	ความเค้นจาก โมเมนต์ตัด รวม	ความเค้นรวม โดยไม่คิด ความเค้นจาก น้ำหนัก
				Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
4	0.03	0.23791	0.44341	64364.4	30104.5	1608.31	132.042	31712.81	96077.21
5	0.03	0.32445	0.56359	100441	38558.9	1737.4	132.042	40296.3	140737.3
6	0.028	0.33747	0.61589	144534	42522.7	1490.19	132.042	44012.89	188546.89
7	0.028	0.31239	0.64891	196644	45503	1168.89	132.042	46671.89	243315.89
8	0.028	0.25618	0.66697	256772	47672.2	825.73	132.042	48497.93	305269.93
9	0.028	0.16817	0.6729	324916	49145.9	464.01	132.042	49609.91	374525.91
10	0.028	0.04559	0.66817	401077	50016.1	82.28	132.042	50098.38	451175.38

ตารางที่ ค.14 ผลเฉลยในรูปของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดแรกที่มีความเร็วลม 4.98 เมตรต่อวินาที
โดยพิจารณาผลของตัวเลขเรย์โนลด์ด้วย

อัตราส่วน ความเร็ว ปลายใบ	CDO	สัมประสิทธิ์ กำลัง	สัมประสิทธิ์ แรงทอร์	ความเค้น จากแรงดึง	ความเค้นจาก โมเมนต์ตัด เนื่องจาก แรงทอร์	ความเค้นจาก โมเมนต์ตัด เนื่องจาก โมเมนต์บิด	ความเค้น เนื่องจาก น้ำหนัก	ความเค้นจาก โมเมนต์ตัด รวม	ความเค้นรวม โดยไม่คิด ความเค้นจาก น้ำหนัก
				Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
4	0.028	0.24195	0.44296	79313.3	37083.4	2017.97	132.042	39101.37	118414.67
5	0.028	0.33084	0.56311	123798	47509.3	2186.02	132.042	49695.32	173493.32
6	0.028	0.33747	0.61589	178169	52433.9	1837.53	132.042	54271.43	232440.43
7	0.028	0.31239	0.64891	242425	56108.8	1441.34	132.042	57550.14	299975.14
8	0.028	0.25618	0.66697	316567	58783.6	1018.19	132.042	59801.79	376368.79
9	0.026	0.1895	0.6724	400594	60566.5	652.6	132.042	61219.1	461813.1
10	0.026	0.07444	0.66762	494507	61636.3	199.31	132.042	61835.61	556342.61

ตารางที่ ค.15 ผลเฉลยในรูปของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดแรกที่มีความเร็วลม 5.53 เมตรต่อวินาที
โดยพิจารณาผลของตัวเลขเรย์โนลด์ด้วย

อัตราส่วน ความเร็ว ปลายใบ	CDO	สัมประสิทธิ์ กำลัง	สัมประสิทธิ์ แรงทอร์	ความเค้น จากแรงดึง	ความเค้นจาก โมเมนต์ตัด เนื่องจาก แรงทอร์	ความเค้นจาก โมเมนต์ตัด เนื่องจาก โมเมนต์บิด	ความเค้น เนื่องจาก น้ำหนัก	ความเค้นจาก โมเมนต์ตัด รวม	ความเค้นรวม โดยไม่คิด ความเค้นจาก น้ำหนัก
				Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
4	0.028	0.24195	0.44296	89336.9	41783.6	2273.74	132.042	44057.34	133394.24
5	0.028	0.33084	0.56311	139460	53530.8	2463.09	132.042	55993.89	195453.89
6	0.028	0.33747	0.61589	200722	59079.7	2070.42	132.042	61150.12	261872.12
7	0.028	0.31239	0.64891	273122	63220.4	1624.02	132.042	64844.42	337966.42
8	0.028	0.25618	0.66697	356661	66234.2	1147.24	132.042	67381.44	424042.44
9	0.026	0.1895	0.6724	451338	68243	735.315	132.042	68978.315	520316.32
10	0.026	0.07444	0.66762	557155	69448.5	224.574	132.042	69673.074	626828.07

ตารางที่ ค.16 ผลเฉลยในรูปของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดแรกที่มีความเร็วลม 5.87 เมตรต่อวินาที
โดยพิจารณาผลของตัวเลขเรย์โนลด์ด้วย

อัตราส่วน ความเร็ว ปลายใบ	CD0	สัมประสิทธิ์ กำลัง	สัมประสิทธิ์ แรงทอร์ค	ความเค้น จากแรงดึง	ความเค้นจาก โมเมนต์คัต เนื่องจาก แรงทอร์ค	ความเค้นจาก โมเมนต์คัต เนื่องจาก โมเมนต์บิด	ความเค้น เนื่องจาก น้ำหนัก	ความเค้นจาก โมเมนต์คัต รวม	ความเค้นรวม โดยไม่คิด ความเค้นจาก น้ำหนัก
				Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
4	0.028	0.26242	0.63141	56113.1	23524.5	667.37	212.38	24191.87	80304.97
5	0.028	0.31587	0.77292	87484.8	28290.5	629.13	212.38	28919.63	116404.43
6	0.028	0.29004	0.85158	125828	30997.3	469.18	212.38	31466.48	157294.48
7	0.028	0.2191	0.90483	171143	33031.9	291.34	212.38	33323.24	204466.24
8	0.026	0.13437	0.94321	223430	34670.1	141.53	212.38	34811.63	258241.63
9	0.024	0.02912	0.97191	282687	36039.5	2.61	212.38	36042.11	318729.11
10	0.02	-0.04342	0.99307	348917	37187.2	-74.173	212.38	37113.027	386030.03

ตารางที่ ค.17 ผลเฉลี่ยในรูปของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดที่สองที่ความเร็วลม 3.80 เมตรต่อวินาที
โดยพิจารณาผลของตัวเลขเรย์โนลด์ด้วย

อัตราส่วน ความเร็ว ปลายใบ	CD0	สัมประสิทธิ์ กำลัง	สัมประสิทธิ์ แรงทอร์ค	ความเค้น จากแรงดึง	ความเค้นจาก โมเมนต์คัต เนื่องจาก แรงทอร์ค	ความเค้นจาก โมเมนต์คัต เนื่องจาก โมเมนต์บิด	ความเค้น เนื่องจาก น้ำหนัก	ความเค้นจาก โมเมนต์คัต รวม	ความเค้นรวม โดยไม่คิด ความเค้นจาก น้ำหนัก
				Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
4	0.028	0.26242	0.63141	91192.8	38321	1087.13	212.38	39408.13	130600.93
5	0.028	0.31587	0.77292	142297	46084.8	1024.85	212.38	47109.65	189406.65
6	0.026	0.30271	0.85112	204758	50470.5	799.43	212.38	51269.93	256027.93
7	0.024	0.25485	0.90393	278574	53764.7	559.51	212.38	54324.21	332898.21
8	0.024	0.15958	0.94275	363748	56455.5	282.99	212.38	56738.49	420486.49
9	0.02	0.09931	0.97096	460277	58664.2	134.16	212.38	58798.36	519075.36
10	0.02	-0.04342	0.99307	568164	60577.4	-120.83	212.38	60456.57	628620.57

ตารางที่ ค.18 ผลเฉลี่ยในรูปของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดที่สองที่ความเร็วลม 4.85 เมตรต่อวินาที
โดยพิจารณาผลของตัวเลขเรย์โนลด์ด้วย

อัตราส่วน ความเร็ว ปลายใบ	CD0	สัมประสิทธิ์ กำลัง	สัมประสิทธิ์ แรงทอร์ค	ความเค้น จากแรงดึง	ความเค้นจาก โมเมนต์คัต เนื่องจาก แรงทอร์ค	ความเค้นจาก โมเมนต์คัต เนื่องจาก โมเมนต์บิด	ความเค้น เนื่องจาก น้ำหนัก	ความเค้นจาก โมเมนต์คัต รวม	ความเค้นรวม โดยไม่คิด ความเค้นจาก น้ำหนัก
				Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
4	0.026	0.26828	0.63095	119311	50143.2	1456.14	212.38	51599.34	170910.34
5	0.026	0.32491	0.77243	186231	60312.7	1381.66	212.38	61694.36	247925.36
6	0.024	0.31538	0.85065	268023	66059.9	1092.87	212.38	67152.77	335175.77
7	0.02	0.29059	0.90302	364685	70347.2	843.88	212.38	71191.08	435876.08
8	0.02	0.21001	0.94183	476220	73871.8	507.93	212.38	74379.73	550599.73
9	0.02	0.09931	0.97096	602624	76820.3	175.68	212.38	76995.98	679619.98
10	0.016	0.05244	0.99217	743900	79266.9	50.88	212.38	79317.78	823217.78

ตารางที่ ค.19 ผลเฉลี่ยในรูปของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดที่สองที่ความเร็วลม 5.55 เมตรต่อวินาที
โดยพิจารณาผลของตัวเลขเรย์โนลด์ด้วย

อัตราส่วน ความเร็ว ปลายใบ	CDO	สัมประสิทธิ์ กำลัง	สัมประสิทธิ์ แรงทริส	ความเค้น จากแรงดึง Pa	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก แรงทริส Pa	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก โมเมนต์บิด Pa	ความเค้น เนื่องจาก น้ำหนัก Pa	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด รวม Pa	ความเค้นรวม โดยไม่ได้ คิดความเค้นจาก น้ำหนัก Pa
4	0.026	0.26828	0.63095	128039	56822.2	1562.98	212.38	58385.18	186424.18
5	0.026	0.32491	0.77243	199870	64737.8	1483.03	212.38	66220.83	266090.83
6	0.024	0.31538	0.85065	287663	70906.8	1173.05	212.38	72079.85	359742.85
7	0.02	0.29059	0.90302	391417	75508.6	905.8	212.38	76414.4	467831.4
8	0.02	0.21001	0.94183	511135	79291.8	545.2	212.38	79837	590972
9	0.02	0.09931	0.97096	646813	82456.6	188.57	212.38	82645.17	729458.17
10	0.016	0.05244	0.99217	798456	85082.7	54.62	212.38	85137.32	883593.32

ตารางที่ ค.20 ผลเฉลยในรูปของสมรรถนะและความเค้นของกังหันลมชุดที่สองที่ความเร็วลม 5.75 เมตรต่อวินาที
โดยพิจารณาผลของตัวเลขเรย์โนลด์ด้วย

อัตราส่วน ความเร็ว ปลายใบ	CDO	ความเค้น จากแรงดึง Pa	ความเค้น จาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก แรงทริส Pa	ความเค้น จาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก โมเมนต์บิด Pa	ความเค้นจาก โมเมนต์ดัด เนื่องจาก องค์ประกอบ cl Pa	ความเค้น เนื่องจาก โมเมนต์ดัด รวม Pa	ความเค้น รวม Pa
4	0.0132	168584	72838	2547.6	14856.3	90241.9	258825.9
5	0.0132	263221	85256	2341.8	22744.6	110342.4	373563.4
6	0.0132	378889	93266	1908.6	30348.3	125522.9	504411.9
7	0.0132	515585	99369	1465	37091	137925	653510
8	0.0132	673315	104339	1050	43032	148421	821736
9	0.0132	852071	108502	657.8	48381	157540.8	1009612
10	0.0132	1051860	112039	278.9	53308	165625.9	1217486

ตารางที่ ค.21 ผลเฉลยในรูปของความเค้นสูงสุดของกังหันลมชุดที่สองที่ความเร็วลม 6.60 เมตรต่อวินาที



ภาคผนวก ง.

ผลการทดลองของค่าสมรรถนะและค่าความเค้น

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)	แรงสปริง (นิวตัน)	ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	โมเมนต์บิด (N-m)	กำลัง (Watt)	สัมประสิทธิ์กำลัง
1	0	0	630	7.87	0	0	0
2	124	0.15	573	7.158	0.096	5.76	0.0653
3	224	0.3	538	6.72	0.171	9.634	0.1093
4	274	0.4	521	6.508	0.206	11.239	0.1275
5	324	0.45	507	6.333	0.246	13.061	0.1481
6	374	0.6	498	6.221	0.276	14.394	0.1633
7	424	0.7	483	6.033	0.311	15.73	0.1784
8	474	0.8	465	5.809	0.347	16.897	0.1917
9	524	0.9	441	5.509	0.382	17.642	0.2
10	574	1	420	5.246	0.417	18.341	0.208

ตารางที่ ง.1 ผลการทดลองของกังหันลมชุดแรก โดยใช้ข้อมูลลมที่ความเร็วลม 5.03 เมตรต่อวินาที

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)	แรงสปริง (นิวตัน)	ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	โมเมนต์บิด (N-m)	กำลัง (Watt)	สัมประสิทธิ์กำลัง
1	0	0	655	7.93	0	0	0
2	124	0.1	601	7.276	0.101	6.357	0.0656
3	224	0.25	551	6.67	0.176	10.155	0.1048
4	324	0.4	527	6.38	0.25	13.797	0.1425
5	424	0.6	499	6.041	0.32	16.722	0.1727
6	474	0.7	484	5.859	0.356	18.044	0.1863
7	524	0.8	458	5.545	0.391	18.753	0.1936
8	574	0.9	434	5.254	0.426	19.361	0.1999
9	624	1.1	424	5.133	0.46	20.425	0.2109
10	674	1.2	416	5.036	0.487	21.215	0.219

ตารางที่ ง.2 ผลการทดลองของกังหันลมชุดแรก โดยใช้ข้อมูลลมที่ความเร็วลม 5.19 เมตรต่อวินาที

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)	แรงสปริง (นิวตัน)	ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	โมเมนต์บิด (N-m)	กำลัง (Watt)	สัมประสิทธิ์กำลัง
1	0	0	801	8.861	0	0	0
2	124	0.1	744	8.23	0.101	7.869	0.0619
3	224	0.3	704	7.788	0.171	12.607	0.0993
4	324	0.5	667	7.378	0.241	16.833	0.1326
5	424	0.7	626	6.925	0.311	20.388	0.1606
6	524	0.9	591	6.538	0.382	23.642	0.1862
7	624	1.1	572	6.327	0.452	27.075	0.2133
8	674	1.2	552	6.106	0.487	28.151	0.2218
9	724	1.3	548	6.062	0.522	29.956	0.236

10	774	1.4	529	5.852	0.557	30.856	0.2431
11	824	1.5	512	5.664	0.592	31.741	0.25
12	874	1.6	491	5.431	0.627	32.239	0.2539
13	924	1.7	483	5.343	0.662	33.484	0.2638
14	974	1.8	464	5.133	0.698	33.916	0.2674

ตารางที่ ง.3 ผลการทดลองของกังหันลมชุดแรก โดยใช้ข้อมูลโมเมนต์ที่ความเร็วลม 5.68 เมตรต่อวินาที

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)	แรงสปริง (นิวตัน)	ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	โมเมนต์บิด (N-m)	กำลัง (Watt)	สัมประสิทธิ์กำลัง
1	0	0	934	9.42	0	0	0
2	124	0.1	867	8.744	0.101	9.17	0.055
3	224	0.2	824	8.31	0.18	15.532	0.0927
4	324	0.35	776	7.826	0.255	20.722	0.1237
5	424	0.6	727	7.332	0.32	24.362	0.1454
6	524	0.8	706	7.707	0.391	28.907	0.1726
7	624	0.9	688	6.939	0.47	33.862	0.2022
8	724	1	654	6.596	0.549	37.599	0.2245
9	824	1.4	608	6.132	0.601	38.265	0.228
10	924	1.6	584	5.89	0.672	41.097	0.245
11	974	1.7	575	5.799	0.707	42.571	0.2541
12	1024	1.8	553	5.577	0.743	43.027	0.257
13	1074	1.9	531	5.355	0.787	43.762	0.261
14	1124	2	522	5.265	0.813	44.442	0.265
15	1274	2.3	511	5.154	0.918	49.124	0.293
16	1324	2.5	504	5.083	0.944	49.823	0.2974
17	1374	2.7	498	5.022	0.97	50.586	0.302

ตารางที่ ง.4 ผลการทดลองของกังหันลมชุดแรก โดยใช้ข้อมูลโมเมนต์ที่ความเร็วลม 6.23 เมตรต่อวินาที

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)	แรงสปริง (นิวตัน)	ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	โมเมนต์บิด (N-m)	กำลัง (Watt)	สัมประสิทธิ์กำลัง
1	0	0	1077	10.253	0	0	0
2	124	0.1	1026	9.767	0.101	10.852	0.0545
3	224	0.3	973	9.263	0.171	17.443	0.0876
4	324	0.5	947	9.12	0.241	23.9	0.12
5	424	0.6	896	8.53	0.32	30.025	0.1508
6	524	0.8	848	8.073	0.391	34.722	0.1743
7	624	1	794	7.559	0.461	38.331	0.1925
8	724	1.2	761	7.245	0.531	42.316	0.2125
9	824	1.4	719	6.845	0.601	45.252	0.2272
10	924	1.7	676	6.485	0.662	46.864	0.2353
11	1024	1.9	660	6.283	0.734	50.73	0.2547
12	1124	2.1	630	5.998	0.804	53.043	0.2663

13	1224	2.2	563	5.55	0.883	53.889	0.2706
14	1324	2.3	565	5.379	0.962	56.919	0.2858
15	1374	2.4	556	5.293	0.997	58.791	0.2952
16	1474	2.5	544	5.179	1.032	59.332	0.2979
17	1474	2.6	531	5.055	1.067	60.757	0.3051
18	1524	2.7	526	5.007	1.103	61.693	0.3098

ตารางที่ จ.5 ผลการทดลองของกังหันลมชุดแรก โดยใช้โมเดลลมที่มีความเร็วลม 6.60 เมตรต่อวินาที

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)	แรงสปริง (นิวตัน)	ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	โมเมนต์บิด (N-m)	กำลัง (Watt)	สัมประสิทธิ์กำลัง
1	0	0	1150	10.036	0	0	0
2	124	0	1117	9.748	0.109	12.806	0.0495
3	224	0.1	1069	9.329	0.189	21.158	0.0818
4	324	0.2	1027	8.962	0.268	28.823	0.1115
5	424	0.4	974	8.5	0.338	34.475	0.1333
6	524	0.6	943	8.229	0.409	40.389	0.1562
7	624	0.8	910	7.941	0.479	45.646	0.1765
8	724	1	894	7.802	0.549	51.397	0.1988
9	824	1.1	843	7.357	0.628	55.437	0.2144
10	924	1.3	825	7.2	0.699	60.389	0.2336
11	1024	1.5	791	6.903	0.769	63.669	0.2462
12	1124	1.7	764	6.667	0.839	67.125	0.2596
13	1224	1.9	744	6.493	0.909	70.822	0.2739
14	1324	2.2	709	6.187	0.971	72.093	0.2788
15	1424	2.5	699	6.1	1.032	75.542	0.2922
16	1524	2.8	676	5.889	1.094	77.445	0.2995
17	1624	3.1	664	5.794	1.155	80.312	0.3107
18	1724	3.4	643	5.611	1.216	81.879	0.3167
19	1824	3.8	620	5.41	1.268	82.327	0.3184
20	1924	4	596	5.201	1.339	83.751	0.3289

ตารางที่ จ.6 ผลการทดลองของกังหันลมชุดแรก โดยใช้โมเดลลมที่มีความเร็วลม 7.20 เมตรต่อวินาที

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)	แรงสปริง (กรัม)	ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	โมเมนต์บิด (N-m)	กำลัง (Watt)	สัมประสิทธิ์กำลัง
1	0	0	1021	9.164	0	0	0
2	200	12	998	8.958	0.116	17.345	0.073
3	300	35	986	8.85	0.234	24.157	0.1017
4	400	45	921	8.267	0.313	30.182	0.127
5	500	55	884	7.935	0.393	36.374	0.1531
6	600	70	865	7.764	0.468	42.385	0.1784
7	700	85	811	7.279	0.543	46.107	0.1941
8	800	105	802	7.199	0.614	51.557	0.217

9	900	125	793	7.118	0.684	56.791	0.239
10	1000	155	761	6.831	0.746	59.439	0.2502
11	1100	160	716	6.427	0.83	62.221	0.2619

ตารางที่ จ.7 ผลการทดลองของกังหันลมชุดแรก โดยติดตั้งบนรถปิคอัพที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)	แรงสปริง (กรัม)	ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	โมเมนต์บิด (N-m)	กำลัง (Watt)	สัมประสิทธิ์กำลัง
1	0	0	1358	10.666	0	0	0
2	200	15	1326	10.414	0.163	22.63	0.0638
3	300	40	1258	9.88	0.23	30.294	0.0854
4	400	50	1204	9.456	0.309	38.952	0.1098
5	500	75	1153	9.056	0.375	45.27	0.1276
6	600	80	1130	8.875	0.459	54.305	0.1531
7	700	100	1096	8.608	0.53	60.818	0.1715
8	800	120	1078	8.467	0.604	68.712	0.1937
9	900	155	1050	8.247	0.658	72.337	0.2039
10	1000	170	996	7.823	0.733	76.438	0.2155
11	1100	205	948	7.446	0.79	78.412	0.2211
12	1200	225	901	7.076	0.861	81.222	0.229
13	1300	245	897	7.045	0.931	87.436	0.2465
14	1400	260	864	6.786	1.006	91.004	0.2566
15	1500	290	850	6.676	1.068	95.047	0.268
16	1600	305	819	6.432	1.143	9.8011	0.2763
17	1700	325	779	6.118	1.214	99.034	0.2792
18	1800	350	766	6.016	1.28	102.676	0.2895

ตารางที่ จ.8 ผลการทดลองของกังหันลมชุดแรก โดยติดตั้งบนรถปิคอัพที่ความเร็วลม 8 เมตรต่อวินาที

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)	แรงสปริง (กรัม)	ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	โมเมนต์บิด (N-m)	กำลัง (Watt)	สัมประสิทธิ์กำลัง
1	0	0	1540	10.751	0	0	0
2	200	10	1515	10.577	0.168	26.648	0.0528
3	300	35	1430	9.983	0.234	35.035	0.0694
4	400	60	1400	9.774	0.3	43.974	0.0871
5	500	70	1390	9.704	0.38	55.303	0.1095
6	600	100	1324	9.243	0.441	61.133	0.121
7	700	125	1259	8.789	0.508	66.963	0.1326
8	800	145	1170	8.168	0.578	70.804	0.1402
9	900	155	1140	7.959	0.658	78.538	0.1555
10	1000	175	1093	7.631	0.728	83.31	0.1649
11	1100	195	1082	7.554	0.799	90.515	0.1792
12	1200	210	1050	7.33	0.874	96.083	0.1903
13	1300	250	998	6.967	0.927	96.863	0.1918

14	1400	280	982	6.856	0.989	101.684	0.2014
15	1500	310	965	6.767	1.051	106.189	0.2103
16	1600	325	931	6.499	1.126	109.758	0.2173
17	1700	350	921	6.43	1.192	114.941	0.2276
18	1800	370	890	6.213	1.263	117.69	0.233
19	1900	390	883	6.164	1.333	123.236	0.244
20	2000	400	870	6.074	1.413	128.709	0.2549
21	2100	410	851	5.941	1.492	132.937	0.2632
22	2200	430	835	5.829	1.563	136.645	0.2706
23	2300	445	802	5.599	1.638	137.541	0.2724
24	2400	500	775	5.41	1.678	136.158	0.2696

ตารางที่ ง.9 ผลการทดลองของกังหันลมชุดแรก โดยติดตั้งบนรถปิคอัพที่ความเร็วลม 9 เมตรต่อวินาที

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)	แรงสปริง (กรัม)	ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	โมเมนต์บิด (N-m)	กำลัง (Watt)	สัมประสิทธิ์กำลัง
1	0	0	1686	10.606	0	0	0
2	200	10	1674	10.518	0.168	29.445	0.0425
3	300	35	1622	10.191	0.234	39.739	0.0574
4	400	55	1609	10.11	0.305	51.381	0.0741
5	500	100	1566	9.839	0.353	57.878	0.0835
6	600	105	1498	9.412	0.437	68.54	0.0989
7	700	115	1470	9.236	0.516	79.417	0.1146
8	800	125	1416	8.897	0.596	88.36	0.1275
9	900	150	1403	8.815	0.662	97.244	0.1404
10	1000	175	1398	8.839	0.728	106.558	0.1538
11	1100	185	1358	8.532	0.808	114.884	0.1658
12	1200	200	1314	8.256	0.883	121.48	0.1754
13	1300	210	1289	8.099	0.962	129.83	0.1874
14	1400	225	1225	7.697	1.037	133.004	0.192
15	1500	250	1182	7.427	1.104	136.626	0.1972
16	1600	270	1162	7.301	1.174	142.83	0.2062
17	1700	300	1137	7.179	1.236	147.138	0.2124
18	1800	315	1066	6.698	1.311	146.321	0.2112
19	1900	325	1051	6.602	1.391	153.066	0.2209
20	2000	350	1025	6.44	1.457	156.362	0.2257
21	2100	370	1002	6.296	1.527	160.196	0.2312
22	2200	395	998	6.27	1.594	166.559	0.2404
23	2300	410	953	5.988	1.669	166.531	0.2404
24	2400	450	935	5.875	1.722	168.575	0.2433
25	2500	490	915	5.749	1.775	170.047	0.2455
26	2600	500	895	5.623	1.854	173.733	0.2508
27	2700	510	873	5.485	1.934	176.773	0.2552
28	2800	560	859	5.397	1.978	177.895	0.2568

ตารางที่ ง.10 ผลการทดลองของกังหันลมชุดแรก โดยติดตั้งบนรถปิคอัพที่ความเร็วลม 10 เมตรต่อวินาที

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)	แรงสปริง (กรัม)	ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	โมเมนต์บิด (N-m)	กำลัง (Watt)	สัมประสิทธิ์กำลัง
1	0	0	613	8.804	0	0	0
2	24	0	601	8.632	0.021	1.321	0.01133
3	124	4	584	8.388	0.106	6.478	0.0556
4	224	10	553	7.942	0.197	11.4	0.0978
5	324	22	544	7.813	0.267	15.187	0.1303
6	424	36	512	7.353	0.343	18.364	0.1575
7	524	48	493	7.081	0.42	21.693	0.1861
8	624	62	477	6.851	0.496	24.781	0.2126
9	724	76	448	6.434	0.573	26.836	0.2302
10	774	86	433	6.219	0.607	27.538	0.2362
11	824	94	417	5.989	0.645	28.14	0.2414

ตารางที่ จ.11 ผลการทดลองของกังหันลมชุดที่สองโดยใช้โมเมนต์ที่ความเร็วลม 5.03 เมตรต่อวินาที

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)	แรงสปริง (กรัม)	ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	โมเมนต์บิด (N-m)	กำลัง (Watt)	สัมประสิทธิ์กำลัง
1	0	0	664	9.243	0	0	0
2	24	1	653	9.089	0.02	1.388	0.0108
3	124	4	631	8.783	0.106	7.05	0.055
4	224	8	598	8.324	0.191	11.94	0.0932
5	324	14	574	7.989	0.274	16.449	0.1284
6	424	26	557	7.753	0.351	20.493	0.16
7	524	40	543	7.558	0.427	24.294	0.1897
8	624	48	517	7.196	0.509	27.552	0.2151
9	724	60	493	6.862	0.586	30.26	0.2363
10	824	74	482	6.709	0.662	33.147	0.2588
11	924	82	466	6.486	0.743	36.271	0.2832
12	969	89	454	6.319	0.777	36.917	0.2882

ตารางที่ จ.12 ผลการทดลองของกังหันลมชุดที่สองโดยใช้โมเมนต์ที่ความเร็วลม 5.19 เมตรต่อวินาที

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)	แรงสปริง (กรัม)	ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	โมเมนต์บิด (N-m)	กำลัง (Watt)	สัมประสิทธิ์กำลัง
1	0	0	734	9.332	0	0	0
2	124	0	704	8.954	0.109	8.07	0.0481
3	224	4	682	8.674	0.194	13.87	0.0826
4	324	12	674	8.573	0.275	19.439	0.1158
5	424	22	656	8.343	0.355	24.377	0.1452
6	524	31	631	8.026	0.435	28.757	0.1713
7	624	42	614	7.809	0.514	33.043	0.1968
8	724	56	592	7.529	0.59	36.556	0.2177
9	824	71	543	6.906	0.665	37.797	0.2251

10	913	84	533	6.779	0.732	40.859	0.2434
11	1003	92	524	6.665	0.804	44.106	0.2627
12	1092	99	498	6.334	0.877	45.706	0.2722
13	1181	116	484	6.156	0.94	47.654	0.2838
14	1270	122	468	5.952	1.014	49.682	0.2959

ตารางที่ จ.13 ผลการทดลองของกังหันลมชุดที่สองโดยใช้โมเมนต์ความเฉื่อย 5.68 เมตรต่อวินาที

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)	แรงสปริง (กรัม)	ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	โมเมนต์บิด (N-m)	กำลัง (Watt)	สัมประสิทธิ์กำลัง
1	0	0	838	9.717	0	0	0
2	24	0	821	9.52	0.021	1.821	0.0082
3	124	0	808	9.369	0.109	9.262	0.0418
4	224	6	788	9.138	0.192	15.88	0.0717
5	324	16	763	8.848	0.272	21.724	0.0981
6	424	26	754	8.743	0.351	27.74	0.1252
7	524	38	737	8.546	0.429	33.11	0.1495
8	624	52	703	8.152	0.505	37.171	0.1678
9	724	61	698	8.094	0.585	42.779	0.1931
10	824	74	674	7.816	0.662	46.728	0.2109
11	913	87	667	7.734	0.73	50.946	0.2299
12	1003	102	641	7.433	0.795	53.362	0.2409
13	1092	110	623	7.224	0.867	56.362	0.2544
14	1181	128	587	6.807	0.93	57.145	0.2579
15	1270	139	573	6.644	0.999	59.928	0.2705
16	1360	152	553	6.412	1.066	61.735	0.2787
17	1460	161	531	6.157	1.147	63.747	0.2878
18	1560	169	523	6.065	1.228	67.234	0.3035
19	1660	176	509	5.902	1.31	69.809	0.3151

ตารางที่ จ.14 ผลการทดลองของกังหันลมชุดที่สองโดยใช้โมเมนต์ความเฉื่อย 6.23 เมตรต่อวินาที

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)	แรงสปริง (กรัม)	ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	โมเมนต์บิด (N-m)	กำลัง (Watt)	สัมประสิทธิ์กำลัง
1	0	0	904	9.895	0	0	0
2	124	0	871	9.534	0.109	9.984	0.0379
3	224	0	864	9.457	0.198	17.89	0.0679
4	324	0	844	9.24	0.286	22.99	0.0873
5	424	0	823	9.008	0.374	32.257	0.1225
6	524	10	811	8.877	0.454	38.534	0.1463
7	624	20	778	8.516	0.533	43.439	0.1649
8	724	60	764	8.363	0.586	46.894	0.178
9	824	100	756	8.277	0.639	50.588	0.1921
10	924	110	743	8.133	0.719	55.908	0.2123

11	1013	140	734	8.034	0.771	59.234	0.2249
12	1103	160	729	7.979	0.832	63.517	0.2411
13	1192	170	719	7.87	0.902	67.915	0.2579
14	1281	180	697	7.629	0.972	70.946	0.2694
15	1370	190	678	7.421	1.042	73.981	0.2809
16	1460	200	657	7.191	1.112	76.504	0.2905
17	1560	210	649	7.104	1.192	80.971	0.3074
18	1660	220	641	7.016	1.271	85.307	0.3239
19	1760	230	637	6.973	1.351	90.104	0.3421
20	1860	240	618	6.765	1.43	92.529	0.3513
21	1960	270	592	6.479	1.492	92.466	0.3511
22	2060	300	589	6.447	1.554	95.809	0.3638
23	2160	320	576	6.307	1.624	97.954	0.3719

ตารางที่ จ.15 ผลการทดลองของกังหันลมชุดที่สองโดยใช้โมเดลที่มีความเร็วลม 6.60 เมตรต่อวินาที

ครั้งที่	ความเร็วรอบ rpm	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	ความเครียด	ความเค้น (Pa)
1	800	8.563	6.01E-05	69685
2	787	8.424	5.86E-05	68008
3	743	7.953	5.44E-05	63118
4	723	7.739	5.32E-05	61696
5	716	7.664	5.16E-05	59848
6	710	7.599	5.16E-05	59848
7	697	7.461	5.00E-05	57971
8	688	7.364	4.89E-05	56712
9	660	7.064	4.78E-05	55497
10	647	6.925	4.73E-05	54868
11	639	6.839	4.57E-05	53024
12	633	6.776	4.67E-05	54218
13	620	6.636	4.36E-05	50518
14	603	6.454	4.30E-05	49892
15	588	6.294	4.09E-05	47398
16	564	6.037	3.98E-05	46168
17	543	5.812	3.82E-05	44266

ตารางที่ จ.16 ผลการทดลองวัดค่าความเครียดของใบกังหันลมชุดแรกกับอุโมงค์ลมที่มีความเร็วลม 5.87 เมตรต่อวินาที

ครั้งที่	ความเร็วรอบ rpm	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	ความเครียด	ความเค้น (Pa)
1	765	9.652	4.17E-05	48360
2	680	8.579	3.47E-05	40264
3	647	8.163	3.47E-05	40264
4	631	7.961	3.26E-05	37758

5	618	7.797	3.15E-05	36528
6	613	7.734	3.05E-05	35392
7	601	7.583	2.88E-05	33431
8	590	7.444	2.67E-05	30937
9	574	7.242	2.44E-05	28327
10	560	7.065	2.42E-05	28060
11	546	6.889	2.40E-05	27805
12	531	6.699	2.16E-05	25079
13	516	6.51	2.10E-05	24337
14	503	6.346	1.99E-05	23084
15	482	6.081	1.80E-05	20845
16	472	5.955	1.71E-05	19848
17	455	5.741	1.63E-05	18850

ตารางที่ ง.17 ผลการทดลองวัดค่าความเครียดของใบกึ่งหันลม ชุดแรกกับอุโมงค์ลมที่ความเร็วลม 4.98 เมตรต่อวินาที

ครั้งที่	ความเร็วรอบ rpm	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	ความเครียด	ความเค้น (Pa)
1	960	10.907	7.98E-05	92545
2	938	10.657	8.04E-05	93252
3	909	10.328	7.72E-05	89598
4	871	9.896	7.37E-05	85434
5	859	9.759	7.30E-05	84726
6	833	9.465	7.03E-05	81513
7	820	9.317	6.66E-05	77244
8	805	9.146	6.94E-05	80458
9	792	8.999	6.88E-05	79750
10	780	8.862	6.81E-05	79042
11	783	8.896	6.87E-05	79738
12	768	8.726	6.51E-05	75481
13	750	8.521	6.39E-05	74066
14	696	7.908	5.62E-05	65169
15	690	7.839	5.74E-05	66526
16	660	7.499	5.47E-05	63406
17	644	7.317	5.53E-05	64113
18	631	7.169	5.30E-05	61445
19	616	6.999	5.21E-05	60471
20	592	6.726	4.98E-05	57803
21	576	6.544	4.82E-05	55947
22	570	6.476	4.93E-05	57199
23	535	6.079	4.50E-05	52223

ตารางที่ ง.18 ผลการทดลองวัดค่าความเครียดของใบกึ่งหันลม ชุดแรกกับอุโมงค์ลมที่ความเร็วลม 5.53 เมตรต่อวินาที

ครั้งที่	ความเร็วรอบ rpm	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	ความเครียด	ความเค้น (Pa)
1	783	10.401	5.94E-05	68858
2	705	9.365	5.55E-05	64426
3	700	9.298	5.50E-05	63823
4	689	9.1524	5.44E-05	63116
5	683	9.073	5.39E-05	62466
6	660	8.767	5.24E-05	60726
7	649	8.621	5.13E-05	59450
8	644	8.555	5.02E-05	58220
9	634	8.422	4.91E-05	56944
10	623	8.276	4.97E-05	57606
11	620	8.236	4.97E-05	57606
12	611	8.116	4.81E-05	55749
13	607	8.063	4.81E-05	55749
14	585	7.771	4.59E-05	53256
15	572	7.598	4.48E-05	51968
16	554	7.359	4.43E-05	51376
17	535	7.107	4.16E-05	48279
18	500	6.642	4.00E-05	46388
19	489	6.496	3.84E-05	44556
20	449	5.964	3.62E-05	42015
21	427	5.672	3.41E-05	39579
ตารางที่ ง.19 ผลการทดลองวัดค่าความเครียดของใบกังหันลม ชุดแรกกับอุโมงค์ลมที่ความเร็วลม 4.73 เมตรต่อวินาที				

ครั้งที่	ความเร็วรอบ rpm	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	ความเครียด	ความเค้น (Pa)
1	548	9.061	2.65E-05	30682
2	475	7.854	1.94E-05	22458
3	453	7.49	1.74E-05	20219
4	442	7.308	1.66E-05	19221
5	437	7.226	1.57E-05	18224
6	426	7.044	1.42E-05	16495
7	412	6.812	1.27E-05	14755
8	401	6.63	1.27E-05	14755
9	367	6.068	8.85E-05	10264
ตารางที่ ง.20 ผลการทดลองวัดค่าความเครียดของใบกังหันลม ชุดแรกกับอุโมงค์ลมที่ความเร็วลม 3.80 เมตรต่อวินาที				

ครั้งที่	ความเร็วรอบ rpm	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	ความเครียด	ความเค้น (Pa)
1	546	8.45	2.74E-05	31726
2	460	7.119	2.29E-05	26529
3	454	7.026	2.12E-05	24534
4	447	6.917	1.96E-05	22771
5	440	6.809	1.88E-05	21773
6	433	6.701	1.71E-05	19789
7	421	6.515	1.60E-05	18560
8	407	6.299	1.47E-05	17052
9	398	6.159	1.34E-05	15579
10	380	5.881	1.30E-05	15068
11	367	5.679	1.15E-05	13328
12	350	5.417	1.17E-05	13595

ตารางที่ จ.21 ผลการทดลองวัดค่าความเครียดของใบกังหันลม
ชุดแรกกับอุโมงค์ลมที่ความเร็วลม 4.06 เมตรต่อวินาที

ครั้งที่	ความเร็วรอบ rpm	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	ความเครียด	ความเค้น (Pa)
1	543	10.317	4.93E-05	49323
2	478	9.235	3.97E-05	39650
3	453	8.752	3.70E-05	36951
4	439	8.481	3.50E-05	34990
5	416	8.037	3.21E-05	32049
6	400	7.728	3.13E-05	31314
7	389	7.515	2.98E-05	29843
8	381	7.361	2.86E-05	28618
9	366	7.071	2.76E-05	27637
10	356	6.878	2.67E-05	26657
11	353	6.819	2.63E-05	26284
12	333	6.433	2.44E-05	24372

ตารางที่ จ.22 ผลการทดลองวัดค่าความเครียดของใบกังหันลม
ชุดที่สองกับอุโมงค์ลมที่ความเร็วลม 3.74 เมตรต่อวินาที

ครั้งที่	ความเร็วรอบ rpm	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	ความเครียด	ความเค้น (Pa)
1	680	8.845	8.57E-05	85666
2	670	8.715	7.46E-05	74559
3	663	8.624	7.37E-05	73657
4	655	8.519	7.23E-05	72304
5	638	8.299	7.11E-05	71078
6	611	7.948	6.63E-05	66304

7	597	7.765	6.46E-05	64588
8	574	7.466	6.21E-05	62137
9	566	7.362	6.13E-05	61274
10	545	7.089	5.87E-05	58706
11	520	6.764	5.53E-05	55274
12	494	6.426	5.44E-05	54412
13	475	6.178	5.10E-05	50980
14	467	6.074	5.05E-05	50490

ตารางที่ จ.23 ผลการทดลองวัดค่าความเครียดของใบกังหันลม
ชุดที่สองกับอุโมงค์ลมที่ความเร็วลม 5.55 เมตรต่อวินาที

ครั้งที่	ความเร็วรอบ rpm	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	ความเครียด	ความเค้น (Pa)
1	702	8.822	6.50E-05	64951
2	693	8.708	6.42E-05	64215
3	670	8.419	6.07E-05	60666
4	663	8.331	5.99E-05	59931
5	655	8.231	5.86E-05	58578
6	646	8.118	5.77E-05	57725
7	633	7.954	5.65E-05	56499
8	622	7.816	5.60E-05	56010
9	613	7.703	5.43E-05	54294
10	601	7.552	5.34E-05	53431
11	580	7.288	5.21E-05	52088
12	577	7.251	4.96E-05	49637
13	570	7.163	4.66E-05	46568
14	557	6.999	4.49E-05	44853
15	535	6.723	4.31E-05	43137
16	527	6.622	4.23E-05	42284
17	505	6.346	4.06E-05	40569
18	471	5.919	3.89E-05	38853
19	460	5.781	3.26E-05	32598
20	400	5.027	2.02E-05	20196

ตารางที่ จ.24 ผลการทดลองวัดค่าความเครียดของใบกังหันลม
ชุดที่สองกับอุโมงค์ลมที่ความเร็วลม 5.75 เมตรต่อวินาที

ครั้งที่	ความเร็วรอบ rpm	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	ความเครียด	ความเค้น (Pa)
1	630	9.386	5.66E-05	56588
2	596	8.879	5.27E-05	52666
3	557	8.298	4.92E-05	49235
4	538	8.015	4.67E-05	46666

5	525	7.822	4.54E-05	45441
6	519	7.754	4.50E-05	44951
7	508	7.568	4.46E-05	44578
8	499	7.434	4.34E-05	43353
9	487	7.255	4.16E-05	41637
10	468	6.972	3.94E-05	39431
11	462	6.883	3.94E-05	39431

ตารางที่ จ.25 ผลการทดลองวัดค่าความเคียดของใบกึ่งหันลม
ชุดที่สองกับอุโมงค์ลมที่ความเร็วลม 4.85 เมตรต่อวินาที

ครั้งที่	ความเร็วรอบ rpm	อัตราส่วนความเร็ว ปลายใบ	ความเคียด	ความดัน (Pa)
1	464	8.823	3.23E-05	32323
2	396	7.529	2.62E-05	26196
3	337	6.408	2.15E-05	21451
4	320	6.085	1.97E-05	19735
5	280	5.324	1.63E-05	16304

ตารางที่ จ.26 ผลการทดลองวัดค่าความเคียดของใบกึ่งหันลม
ชุดที่สองกับอุโมงค์ลมที่ความเร็วลม 3.80 เมตรต่อวินาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ.

Strain gage และการปรับแต่ง

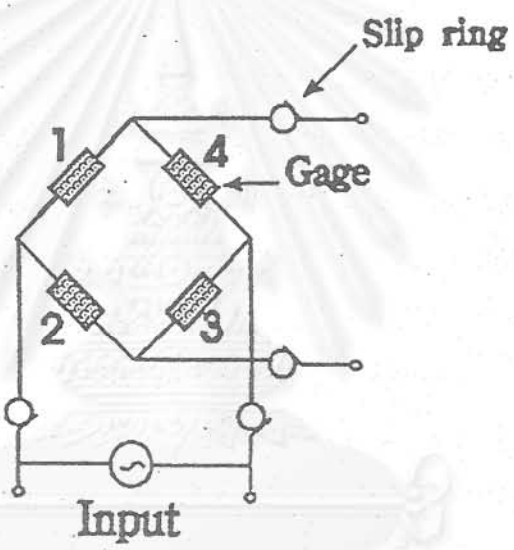
ในภาคนี้ผนวกนี้จะกล่าวถึงการติด strain gage ในลักษณะต่างๆ และวงจร bridge ที่ใช้ติดกับ strain gage และ slip ring และการแปลงค่าสัญญาณความต่างศักย์เป็นค่าความเครียด และความเค้นที่ใช้ในการทดลอง

strain gage ที่จะกล่าวถึงในที่นี้จะเป็น electrical resistance strain gage ชนิด foil ซึ่งใช้ติดกับผิววัสดุที่จะวัด strain อย่างแน่นหนา เมื่อเกิดการยืดหดของผิววัสดุเนื่องจากแรงกระทำ จะทำให้ขดลวดบนแผ่น film ของ strain gage ยืดหรือหดตาม ซึ่งก็จะส่งผลให้ความต้านทานเปลี่ยนไป เมื่อมีการต่อวงจรบ่อนกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านตัว strain gage ก็จะทำให้มีสัญญาณความต่างศักย์เกิดขึ้น เมื่อความต้านทานของ strain gage เปลี่ยน สัญญาณความต่างศักย์ก็จะเปลี่ยนตาม เราจะแปลงความแตกต่างของความต่างศักย์ทางไฟฟ้าออกมาเป็นปริมาณ strain ได้

ทิศทางการติด strain จะมีผลต่อทิศทางของ strain ที่จะวัด โดยทั่วไปการติด strain gage จะติดให้ทิศทางของเส้นลวดบนแผ่น film วางขนานไปในแนวเดียวกับแนวที่จะวัด strain ที่ผิววัสดุ ถ้าหากจัดวาง strain gage 2 ตัวให้ติดในทิศทางที่ตั้งฉากกันบนผิววัสดุก็จะสามารถวัดปริมาณ strain ในแนวแกนที่ขนานกับตัว strain ทั้ง 2 แกนได้ ถ้าหากติด strain gage ตัวที่ 3 ลงไป โดยทำมุมกับ strain gage 2 ตัวแรก strain gage ตัวที่ 3 จะสามารถวัด strain เนื่องจาก shear stress ได้ ปริมาณ strain 2 ค่าแรกซึ่งอยู่ในแนวตั้งฉากกันจะเป็นค่า normal strain อีกตัวจะเป็น shear strain ซึ่งทำให้สามารถหาค่า principal strain และ principal axis ได้ รายละเอียดการหาค่า principal strain และ principal axis สามารถดูรายละเอียดได้จากเอกสาร [19 - 21]

นอกจากนั้นการติด strain gage ยังสามารถติดในลักษณะที่มีตัวแก้ไขผลของอุณหภูมิ (temperature compensation) [22 - 23] และเนื่องจากปริมาณ strain ที่เกิดขึ้นบนผิววัสดุส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยมาก มักวัดเป็น micro strain (10^{-6}) ดังนั้น จึงมักต้องมีการขยายสัญญาณค่าความต่างศักย์ให้สูงขึ้น โดยการต่อวงจร Bridge ไปสู่ strain amplifier หรืออาจต่อเพิ่มจำนวน gage มากขึ้นเพื่อให้สัญญาณขยายมากขึ้น

ในการวิจัยนี้ใช้การต่อ strain gage 4 ตัว โดย 2 ตัว ต่อที่ผิวด้านบนของไบกิ้งหัน โดยวางขนานกันไปในทิศทางเดียวกันที่มีวัดด้านล่างของไบกิ้งหันก็ติดอีก 2 ตัว หันไปในทิศทางเดียวกับ strain gage 2 ตัว ที่มีบน แล้วนำสายสัญญาณจาก strain gage ไปต่อผ่าน slip ring ไปผ่าน bridge box และเข้าสู่ strain amplifier การต่อวงจร bridge ต้องต่อให้ถูกต้อง เมื่อมีการต่ออย่างถูกต้องก็จะสามารถอ่านค่า strain ได้เป็น 4 เท่าของ strain ที่เกิดขึ้นจริง แต่การต่อในลักษณะดังกล่าว(4-gage) ในการวิจัยนี้ค่า strain ที่อ่านได้จะเป็น strain ที่เกิดจากโมเมนต์ดัดอย่างเดียว ไม่สามารถอ่านค่า strain จากแรงดึงได้ การต่อ strain gage เข้ากับ slip ring สามารถต่อได้ 4 แบบ อันได้แก่ แบบ 1-gage, 2-gage หรือ 4-gage ซึ่งในการวิจัยนี้ใช้ strain gage 4 ตัว ดังนั้น จึงทำการต่อ strain gage กับ slip ring ในลักษณะของ 4-gage system ซึ่งเป็น full bridge system



วงจรนี้เป็นวงจรที่ใช้ strain gage 4 ตัว ต่อเป็นวงจร bridge ซึ่งวงจรนี้จะเป็นวงจรที่ดีที่สุด เนื่องจากค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณรบกวนต่อสัญญาณจาก strain gage จะมีค่าต่ำสุด เนื่องจากเหตุผลดังต่อไปนี้

- วงจรนี้จะขยายสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก strain gage เพิ่มเป็น 4 เท่า เมื่อเทียบกับวงจร 1-gage system
- สัญญาณรบกวนน้อย เนื่องจากความต้านทานของ slip ring ต่ออยู่นอกวงจร bridge
- วงจรนี้เป็นวงจรที่เมื่อ balance bridge แล้วค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงศูนย์มากที่สุด และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีความคงตัวมากที่สุดด้วย

การวัดค่าความเครียดจาก strain amplifier

สำหรับค่าความเครียดที่วัดจากเครื่อง strain meter รุ่น DC 1AF ตัวเครื่องจะทำการวัดค่าต่างศักย์และแปลงเป็นค่าความเครียดจากค่าแฟคเตอร์ที่ได้จากการ balance bridge ของ strain meter ในการทดลองหาค่า modulus of elasticity ได้ set ค่าให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้ 1 โวลท์ มีค่าเท่ากับ strain 200×10^{-6}

ส่วนค่าความเครียดที่วัดในการทดลองหาค่าความเค้นของก้านกลมที่ทดสอบกับอุโมงค์ลมนั้นใช้ strain meter รุ่น DPM 613A ซึ่งการทำงานของเครื่องจะแตกต่างจาก strain meter รุ่น DC 1AF โดยสิ้นเชิง ค่าแฟคเตอร์ที่ใช้ในการแปลงค่าความต่างศักย์ที่วัดได้เป็นค่าความเครียดจะขึ้นกับค่า bridge exciting volt และค่าที่ปรับตรงด้านหน้าของเครื่อง strain meter และค่า gage factor สำหรับก้านกลมชุดแรกจะมีการปรับตัวเครื่อง strain meter ให้เมื่ออ่านค่าสัญญาณ y มิลลิโวลท์ จะสามารถแปลงเป็นความเครียดได้เท่ากับ $250y \times 10^{-9}$ แต่เนื่องจาก gage factor ของ strain gage เท่ากับ 2.04 และ gage factor ของ strain meter เท่ากับ 2 ดังนั้น จึงต้องมีการปรับค่าที่อ่านได้เป็น $(2/2.04) 250y \times 10^{-9}$ ดังนั้น เมื่ออ่านสัญญาณจาก oscilloscope ได้ y มิลลิโวลท์ จะแปลงเป็นความเครียดได้เป็น $2.45098y \times 10^{-7}$ สำหรับก้านกลมชุดแรก สำหรับก้านกลมชุดที่สองมีการปรับค่าบนเครื่อง strain meter ต่างไป ทำให้ค่าแฟคเตอร์ในการแปลงสัญญาณต่างไป เมื่อสัญญาณอ่านได้ y มิลลิโวลท์ จะแปลงเป็นความเครียดได้เท่ากับ $(2/2.04) \times 100y \times 10^{-9}$ ซึ่งเท่ากับ $0.980y \times 10^{-7}$ สำหรับการแปลงค่าความเครียดเป็นความเค้นนั้นกระทำโดย นำค่าความเครียดไปคูณกับค่า modulus of elasticity ของก้านกลมแต่ละชุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย