

การออกแบบกังหันลม

A DESIGN OF WIND TURBINE



นายกฤษดา จันทร์แดง
นายกวีวุฒิ ตั้งพิบูลธรรม
นายอภิชาติ กฤตยกุลเจริญ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

๕/๗
ก ๕๕๗
๕๕๗

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน...50177...

วัน,เดือน,ปี...2 1 เม.ย. 2547

b.....
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบกังหันลม
A DESIGN OF WIND TURBINE



โดย
นายกฤษดา จันทร์แดง
นายกวีวุฒิ ตั้งพิบูลธรรม
นายอภิชาติ กฤตยกุลเจริญ

อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2545

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบกังหันลม

A DESIGN OF WIND TURBINE

ผู้จัดทำ

1. นายกฤษดา จันทร์แดง รหัสประจำตัว 43015404
2. นายกวีวุฒิ ตั้งพิบูลธรรม รหัสประจำตัว 43015406
3. นายอภิชาติ กฤตยกุลเจริญ รหัสประจำตัว 43015447



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบกังหันลม

นายกฤษดา	จันทร์แดง	43015404
นายกวีวุฒิ	ตั้งพิบูลธรรม	43015406
นายอภิชาติ	กฤตยกุลเจริญ	43015447
ผศ.ดร. จารุวัตร	เจริญสุข	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2545

บทคัดย่อ

โครงการนี้เกี่ยวข้องกับการศึกษาแนวทางการออกแบบและพัฒนากังหันลม โดยการค้นคว้าหา ทฤษฎีการออกแบบต่างๆมาใช้ นอกจากนี้ยังได้คิดค้นขึ้นเอง โดยการประยุกต์ทฤษฎีเบื้องต้นทางกล ศาสตร์ของไหล เพื่อที่จะศึกษาว่าควรใช้ทฤษฎีใดในการออกแบบใบพัด เพื่อให้ได้กังหันลมที่สามารถ ผลิตพลังงานเปล่าได้ตามที่ต้องการ โดยในเบื้องต้นนี้ได้กำหนดพลังงานที่ต้องการ เนื่องจากมีขีดจำกัด ทางด้านขนาดของโครงสร้าง จากนั้นจึงใช้ทฤษฎีการคำนวณที่มีอยู่คำนวณหาขนาดความยาวของใบพัด และขนาดสัดส่วนต่างๆตลอดจนชุดอุปกรณ์ป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับใบพัด ออกแบบการหมุนเข้า หาทิศทางลมได้เอง รวมถึงการออกแบบโครงสร้างที่ให้ประสิทธิภาพสูง ต่อมาจึงเริ่มทำการผลิตแล้วทำ การทดลองเก็บค่าพลังงานที่ได้ แล้วจึงนำค่าไปเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากทางทฤษฎี เพื่อที่จะ ตรวจสอบความแม่นยำของแต่ละทฤษฎี นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาการใช้งานโปรแกรมทางด้าน CFD มา วิเคราะห์เพื่อช่วยในการออกแบบในงานบางส่วนด้วย

A DESIGN OF WIND TURBINE

Kitsada chundang 43015404

Kaweewut tungpibultum 43015406

Apichart kitayakulchareurn 43015447

Assist.Prof.Dr.Jaruwat Churnsook Advisor

2002

ABSTRACT

This project concerns with a design and development of wind turbine by theories from literatures and basic knowledge on fluid mechanics. The objective of this study is to investigate the design solution of wind turbine in order to produce the required shaft power. Due to limitations on structure scale. Then the size of wind turbine and safety devices are designed. The design of tower structure was compromised between weight and strength. Finally, experimental data were collected and compared with those from calculations. Moreover, CAE were also used in order to assist the design of blade shape.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจสำเร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และความร่วมมือจาก หลายๆฝ่ายด้วยกัน ได้แก่ อาจารย์จ้าววัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำ เอาใจ ใส ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือเสมอมา ขอขอบคุณที่นิวัฒน์ นาคะโยธินสกุล และที่นิวัฒน์ ภู เจริญ นามธนา เทียมเมือง สำหรับคำปรึกษา ข้อคิดเห็นและคำแนะนำต่างๆ รวมถึงเพื่อนๆทุกคนที่มี ส่วนช่วยเหลือในการทำโครงการนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่ เคารพรักยิ่ง เป็นผู้ที่ทำให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ข้าพเจ้าขอ ระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายกฤษดา จันทร์แดง
 นายกวีวุฒิ ตั้งพิบูลธรรม
 นายอภิชาติ กฤษณกุลเจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	2
บทที่ 2 กังหันลม	3
2.1 รูปแบบของกังหัน	3
2.1.1 กังหันลมแบบแกนหมุนในแนวตั้ง	3
2.1.1.1 แบบซาโวนีเยส หรือ เอส. โรเตอร์	3
2.1.1.2 แบบคาเรียส	3
2.1.2 กังหันลมแบบแกนหมุนในแนวนอน	4
2.2 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกังหัน	6
2.3 พลังงานที่ต้องการจากกังหัน	6
2.4 การนำเอาพลังงานไปใช้ในการสูบน้ำ	7
บทที่ 3 ลม	9
3.1 ความเร็วลมเฉลี่ย	9
3.2 การเลือกตำแหน่งที่ตั้งกังหันลม	10
3.2.1 แรงเฉือนของลม	10
3.2.2 ระดับความปั่นป่วนของลม	11
3.2.3 ระดับความเร่ง	12
บทที่ 4 การออกแบบตามหลักอากาศพลศาสตร์	13
4.1 ลักษณะของใบพัด	13
4.2 อากาศพลศาสตร์ของใบพัด	13
4.3 มุมต่างๆของใบพัด	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1 บทนำ	18
5.2 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบมุมของใบพัด	18
5.2.1 ข้อมูลการทดลองของ jack park	18
5.2.1.1 การออกแบบกึ่งหั่นลมสำหรับปั๊มน้ำ	19
5.2.1.2 การออกแบบกึ่งหั่นลมเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า	19
5.2.1.3 การกำหนดขนาดพื้นที่ของใบพัด	21
5.2.1.4 ตัวอย่างการคำนวณโดยอาศัยข้อมูลการทดลองของ jack park	22
5.2.2 ทฤษฎีของ SWD	23
5.2.2.1 ทฤษฎีโมเมนต์ในแนวแกน	24
5.2.2.2 ทฤษฎีเอลิเมนต์ของใบพัด	30
5.2.2.3 การรวมเอาทฤษฎีโมเมนต์และเอลิเมนต์เข้าด้วยกัน	31
5.2.3 ทฤษฎีของ VECTOR	33
5.2.4 ทฤษฎีของ Betz	35
5.2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์ทางพลังงาน	37
5.3 การคำนวณพลังงานที่ได้จากใบพัด	39
5.3.1 ขั้นตอนในการคำนวณค่าต่างๆของใบพัด	42
5.4 การศึกษาแนวทางการใช้งานโปรแกรมทางด้าน CFD	45
บทที่ 6 โครงสร้าง	51
6.1 บทนำ	51
6.2 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง	51
6.2.1 เสา	51
6.2.2 หลักการวิเคราะห์ทางสถิตศาสตร์ (static)	55
6.2.3 หลักการทางด้าน Finite element	58
6.3 ผลการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง	61
บทที่ 7 อุปกรณ์ป้องกันความเสียหาย	63
7.1 บทนำ	63
7.2 ขั้นตอนในการออกแบบ	63
7.2.1 พิจารณาเลือกขอบเขตในการออกแบบ	63
7.2.2 ออกแบบกลไกการทำงานของระบบ safety	63
7.2.2.1 แบบที่ 1	64
7.2.2.2 แบบที่ 2	65

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7.2.2.3 แบบที่ 3	66
7.2.2.4 แบบที่ 4	67
7.2.4 การคำนวณและออกแบบ	68
7.2.4.1 แรงโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากลมที่ปะทะกับใบพัด	68
7.2.4.2 แรงโมเมนต์ที่เกิดจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของใบพัด	69
7.2.4.3 แรงโมเมนต์ด้านการพับของใบพัด หรือแรงจากชุด safety	69
บทที่ 8 การผลิตและทดสอบ	74
8.1 วัตถุประสงค์	74
8.2 การทดสอบเก็บข้อมูลแรงยกและแรงต้านของใบพัด	74
8.3 ขั้นตอนการผลิตใบพัด	76
8.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและเก็บข้อมูลพลังงานแรงบิดและความเร็วรอบ	78
8.4.1 ชุดเบรก	78
8.4.1.1 เบรกชนิดแรก	78
8.4.1.2 เบรกชนิดที่สอง	78
8.4.1.3 เบรกชนิดที่สาม	79
8.4.2 เครื่องมือวัดความเร็วลม	79
8.5 ขั้นตอนการทดสอบเก็บข้อมูลพลังงานแรงบิดและความเร็วรอบ	80
8.6 ผลการทดลองการเก็บข้อมูลพลังงานแรงบิดและความเร็วรอบใบพัด	82
8.7 ผลการทดลองระบบ Safety	90
บทที่ 9 สรุป	92
9.1 สรุปผล	94
9.2 ปัญหาที่พบ	95
9.3 แนวทางแก้ไขและพัฒนา	95
ภาคผนวก ก.	97
ภาคผนวก ข.	102
บรรณานุกรม	106

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4-1 แสดงความสัมพันธ์ของ a , a' , λ ,	28
4-2 แสดงความสัมพันธ์ของ λ และ $C_{p_{\max}}$	28
4-3 ค่าต่างๆที่ต้องคำนวณเพื่อหาแรงบิดและโมเมนต์ที่ได้จากใบพัดแต่ละใบ	39
4-4 แสดงค่าต่างๆที่คำนวณได้ ของใบพัดแบบ VECTOR	42
4-5 แสดงค่าต่างๆที่คำนวณได้ ของใบพัดแบบ SWD	43
7-1 แสดงค่ามุมบิดของใบพัดที่ได้จากการคำนวณ	75
7-2 แสดงค่ามุมบิดของใบพัดที่สร้างได้จริง	75



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2-1 แสดงรูปร่างแบบแกนหมุนในแนวตั้ง	3
2-2 รูปแบบของกังหันลมแบบแกนหมุนในแนวตั้งชนิดต่างๆ	4
2-3 กังหันลมแบบไฮบริด	4
2-4 กังหันลมแบบแกนหมุนในแนวนอน	5
2-5 การสูบน้ำโดยใช้กังหันลม	6
2-6 กราฟแสดงกำลังงานที่ต้องการในการสูบน้ำ	7
2-7 แสดงตัวอย่างการปั้มน้ำโดยใช้เชือกผูกติดกับต้นไม้โดยอาศัยแรงลม	7
2-8 ประสิทธิภาพของกังหันลมในแต่ละแบบที่อัตราส่วน U/V ต่างๆ	8
3-1 แสดงตัวอย่างการเก็บสถิติข้อมูลความเร็วลม	10
3-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนลมที่ระดับความสูงเหนือพื้นดินต่างๆ	11
3-3 แสดงพื้นที่ซึ่งเกิดความปั่นป่วนของลม	11
3-4 แสดงความเร่งของลมซึ่งมักเกิดขึ้นที่บริเวณยอดของเนินสูง	12
4-1 แสดงลักษณะของใบพัด	13
4-2 แสดงลักษณะของแรงยกในแต่ละมุมปะทะของ airfoil	13
4-3 แสดงลักษณะการลากเส้น chord line	14
4-4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงยกในแต่ละมุมปะทะของ airfoil	14
4-5 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของใบพัด	15
4-6 แสดงทิศทางของลมปกติ	15
4-7 แสดงทิศทางของความเร็วสัมพัทธ์	15
4-8 แสดงทิศทางและมุมต่างๆของความเร็วที่เกิดขึ้นบนใบพัด	16
4-9 แสดงมุมบิดของใบพัดที่อัตราส่วน U/V ต่างๆ	17
5-1 แสดงกราฟกำลังงานในการสูบน้ำ	19
5-2 แสดงค่า power factor	19
5-3 แสดงค่า E ในแต่ละอัตราส่วนความเร็วของใบพัดต่อความเร็วลม	20
5-4 แสดงการหาพื้นที่ของใบพัด	20
5-5 แสดงกราฟใช้ในการหาค่า solidity ในแต่ละอัตราส่วน U/V	21
5-6 แสดงตำแหน่งของมุมติดตั้งและขนาด chord แบบสัมประสิทธิ์แรงยกคงที่	23
5-7 แสดงตำแหน่งของมุมติดตั้งและขนาด chord แบบ chord คงที่	23
5-8 แสดงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีโมเมนตัมในแนวแกน	24

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
5-9 แสดงการหมุนวนที่ด้านหลังใบ	27
5-10 แสดงความเร็วลมและแรงที่กระทำบนเอลิเมนต์ของใบพัด	31
5-11 ไดอะแกรมความเร็วของเอลิเมนต์ของกังหันลมแกนหมุนในแนวนอน	32
5-12 แสดงทิศทางของความเร็วและแรงในแนวแกนต่างๆ	34
5-13 ขนาดรูปร่าง และมุมบิดของใบพัด	35
5-14 แสดงเอลิเมนต์ของใบพัด	35
5-15 แสดงมุมต่างๆ	36
5-16 แสดงแรงที่เกิดขึ้นบนใบพัด	36
5-17 แสดงทิศทาง มุม และพื้นที่เล็กๆบนใบพัด	36
5-18 ลมไหลเข้าปะทะและไหลออกจากโรเตอร์	37
5-19 การเกิดการหมุนวนทางด้านหลังของโรเตอร์	38
5-20 แสดงลมไหลออกที่ปลายใบ	38
5-21 แสดงค่าสัมประสิทธิ์พลังงาน	38
5-22 แนะนำการเลือกใช้ tip speed ratio	39
5-23 แสดงทิศทางของแรงต่างๆ	39
5-24 แสดงการแบ่งพื้นที่บนใบพัด	40
5-25 แสดงทิศทางของแรงบิดและพื้นที่บนใบพัด	40
5-26 แสดงลักษณะรูปร่างของโปรแกรม FLUENT	45
5-27 แสดงการสร้าง mesh ของปีก naca 0012	46
5-28 แสดง pressure contour ของ naca 0012	46
5-29 แสดง velocity contour ของ naca 0012	47
5-30 แสดง pressure contour ของ naca 2415	47
5-31 แสดง velocity contour ของ naca 2415	47
5-32 เปรียบเทียบข้อมูลสัมประสิทธิ์แรงยกระหว่างผลการทดลองกับ simulate ของ naca 0012	48
5-33 เปรียบเทียบข้อมูลสัมประสิทธิ์แรงยกระหว่างผลการทดลองกับ simulate ของ naca 2415	48
5-34 แสดงลักษณะการจำลองแบบ periodic	48
5-35 แสดง pressure contour ของใบพัด	49
5-36 แสดง relative velocity ของใบพัด	49
5-37 เปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากการทดลองกับพลังงานที่ได้จากการ simulate ของใบพัด VECTOR	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
5-38 เปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากการทดลองกับพลังงานที่ได้จากการ simulate ของไบพัด SWD	50
6-1 แสดงรูปแบบของโครงสร้างทั้ง 5 แบบ	51
6-2 แสดงการยึดที่ปลายเสาแบบต่างๆ	53
6-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับอัตราส่วนความเพีย	54
6-4 แสดงลักษณะของโครงสร้างแบบต่างๆ	55
6-5 แสดงตัวอย่างของจำนวนจุดยึดต่อ	56
6-6 แสดงทิศทางของแรงกดและแรงดึง	57
6-7 แสดงจุดยึดต่อที่ประกอบด้วยหลายชิ้นส่วน	58
6-8 ตัวอย่างปัญหาทางโครงสร้างอย่างง่าย	59
6-9 ลักษณะเอลิเมนต์สำหรับ โครงสร้าง	59
6-10 สปริงเอลิเมนต์	60
6-11 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างแต่ละแบบ	62
6-12 แสดงการเปรียบเทียบปริมาตรที่ใช้ใน โครงสร้างแต่ละแบบ	62
6-13 แสดงรูปโครงสร้างในแบบที่ 4 หลังจากการผลิตและขนาดต่างๆ	62
7-1 แสดงกลไกการทำงาน	64
7-2 แสดงลักษณะการพับของไบ	64
7-3 แสดงการพับ	65
7-4 แสดงกลไกการทำงาน	65
7-5 แสดงลักษณะการพับของไบ	65
7-6 แสดงกลไกการทำงาน	66
7-7 แสดงลักษณะการพับของไบ	66
7-8 แสดงกลไกการทำงาน	67
7-9 แสดงลักษณะการพับของไบ	67
7-10 แสดงลักษณะของแรงที่ก่อให้เกิดโมเมนต์ในการพับของไบ	68
7-11 แสดงลักษณะของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของไบพัด	69
7-12 แสดงลักษณะของแรงลมที่กระทำที่จุดศูนย์กลางความดันบนไบพัด	70
7-13 แสดงกราฟของโมเมนต์รวมที่แต่ละองศาการพับ	71
7-14 แสดงผลรวมของกราฟโมเมนต์เนื่องจากแรงลมและแรงสปริง	71
7-15 แสดงความเร็วในแต่ละองศาการพับ	72
7-16 แสดงการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นระหว่างมีอุปกรณ์ safety และไม่มีอุปกรณ์ใช้ประโยชน์ด้านการค้า	72

เอกสารนี้เป็นของ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
8-1 แสดงลักษณะ curve ของใบพัด	74
8-2 แสดงลักษณะของใบพัดทั้ง 5 แบบ	74
8-3 แสดง model ของใบพัด	74
8-4 แสดงลักษณะเครื่องมือที่ใช้ในการวัดแรงยกและแรงต้าน	75
8-5 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้านของ curve แต่ละแบบ	75
8-6 แสดงสัมประสิทธิ์แรงยกแต่ละแบบ	75
8-7 แสดงรูปแบบของใบพัดที่ผลิต	76
8-8 แสดงโครงและขนาดของใบพัด	76
8-9 แสดงการคำนวณเพื่อหาระยะเพื่อติดตั้งมุมบิดของใบ	77
8-10 เบรกก้านปู	78
8-11 ครัมเบรก	78
8-12 ดิสก์เบรก	79
8-13 เครื่องมือวัดความเร็วลม	79
8-14 การประกอบโครงสร้างส่วนบนและล่างเข้าด้วยกัน	80
8-15 การประกอบชุดใบพัดเข้ากับแกนหมุน	80
8-16 การติดตั้งกึ่งหุ่นบนรถยนต์เพื่อเก็บข้อมูล	81
8-17 ข้อมูลการทดสอบความเร็วรอบของใบพัดแบบ VECTOR	82
8-18 ข้อมูลการทดสอบความเร็วรอบของใบพัดแบบ SWD	82
8-19 ข้อมูล Tip speed ratio ของใบพัดแบบ VECTOR	83
8-20 ข้อมูล Tip speed ratio ของใบพัดแบบ SWD	83
8-21 ข้อมูลการทดสอบพลังงานของใบพัดแบบ VECTOR	84
8-22 ข้อมูลการทดสอบพลังงานของใบพัดแบบ SWD	84
8-23 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานของใบพัดทั้งสองแบบ	85
8-24 แสดงการเปรียบเทียบแรงบิดของใบพัดทั้งสองแบบ	85
8-25 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากการทดสอบกับพลังงานที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้ทฤษฎีคำนวณพลังงาน VECTOR คำนวณใบพัดมุมบิดแบบ VECTOR	86
8-26 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากการทดสอบกับพลังงานที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้ทฤษฎีคำนวณพลังงาน SWD คำนวณพลังงานใบพัดมุมบิดแบบ SWD	86
8-27 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากการทดสอบกับพลังงานที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้ทฤษฎีคำนวณพลังงานทั้งหมด คำนวณพลังงานใบพัดมุมบิดแบบ VECTOR	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
8-28 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากการทดสอบกับพลังงานที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้ทฤษฎีคำนวณพลังงานทั้งหมด คำนวณพลังงานใบพัดมุมบิดแบบ SWD	88
8-29 แสดงประสิทธิภาพที่ได้จากกังหันที่ออกแบบใบพัดด้วยทฤษฎี VECTOR	88
8-30 แสดงประสิทธิภาพที่ได้จากกังหันที่ออกแบบใบพัดด้วยทฤษฎี SWD	89
8-31 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของใบพัดแบบ VECTOR ระหว่างใบพัดที่มีมุมบิดจริง กับมุมบิดที่คำนวณจากทางทฤษฎี	89
8-32 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของใบพัดแบบ SWD ระหว่างใบพัดที่มีมุมบิดจริง กับมุมบิดที่คำนวณจากทางทฤษฎี	90
8-33 แสดงลักษณะการพับของใบพัดที่ความเร็วลมต่างๆ	91
9-1 แสดงถึงอุปกรณ์ต่างๆที่ติดตั้งเพื่อการนำเอาพลังงานไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า	92
9-2 แสดงชุดเฟืองทดเพื่อเพิ่มความเร็วรอบของแกนหมุน	93
9-3 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดเข้ากับชุดกังหัน	93
9-4 แสดงฝาครอบเพื่อป้องกันน้ำเข้าสู่ชุดอุปกรณ์	94

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันมนุษย์ได้มีการประดิษฐ์คิดค้นสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ มากมาย โดยสิ่งประดิษฐ์ที่คิดค้นขึ้นนี้จำเป็นที่จะต้องซัพพลายงานในการขับเคลื่อนเพื่อให้สามารถทำงานได้ ดังนั้นพลังงานจึงมีความจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างยิ่ง ซึ่งพลังงานที่ใช้อยู่มีอยู่ในรูปของน้ำมันเชื้อเพลิงและก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น โดยพลังงานเหล่านี้เมื่อถูกนำมาใช้เป็นจำนวนมากก็สามารถที่จะหมดสิ้นไปได้ ดังนั้นจึงได้มีการพยายามคิดที่จะหาแหล่งพลังงานใหม่เพื่อนำมาทดแทนในส่วนที่จะหมดสิ้นไป นั่นคือการนำเอาพลังงานจากธรรมชาติที่ไม่มีวันหมด เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ หรือพลังงานความร้อนใต้พิภพ เป็นต้น

แหล่งพลังงานลมก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ได้ถูกนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน ซึ่งอาจจะนำมาใช้กับงานทางด้านเกษตรกรรม และการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยมีกังหันลมเป็นเครื่องมือในการเปลี่ยนรูปของพลังงานจากพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือพลังงานที่ใช้ในการปั้มน้ำ โดยไม่ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายไม่มากนัก เพียงแต่คำนึงถึงความเหมาะสมระหว่างความเร็วของลมในบริเวณที่จะทำการติดตั้งกังหันลมและขนาดของกังหันลม เท่านั้นเราก็สามารถนำเอาพลังงานลมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบกังหันลมเพื่อให้ผลิตกำลังงานได้ตามที่ต้องการ
2. เพื่อพัฒนากังหันลมให้สามารถหมุนรับลมได้ตลอดเวลาและติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับใบพัดในขณะที่ความเร็วลมสูง
3. เพื่อศึกษาแนวทางในการนำเอาโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้าน Finite element และ CFD มาช่วยในการวิเคราะห์ออกแบบกังหันลม

1.3 ขอบเขตของโครงการ

ขอบเขตของโครงการนี้จะครอบคลุมในส่วนของการออกแบบชุดกังหันลมซึ่งประกอบด้วย การออกแบบใบพัด โดยทำการศึกษาแนวทางในการคำนวณหาพลังงานที่ได้จากใบพัด การออกแบบมุดติดตั้งใบพัด ขนาดสัดส่วนต่างๆ รวมถึงการเลือกใช้รูปแบบใบพัดที่สามารถทำได้ง่ายและราคาถูก และการออกแบบระบบความปลอดภัยเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับใบพัดเมื่อความเร็วลมสูงเกินกว่าที่กำหนด โดยให้ใบพัดสามารถพับหลบได้เมื่อถึงความเร็วที่กำหนด และการออกแบบให้ใบพัดสามารถหมุนเข้าหาทิศทางการลมเองได้ และสามารถหมุนได้อย่างต่อเนื่องเมื่อลมเกิดการเปลี่ยนทิศทาง ทั้งนี้รวมถึงการออกแบบโครงสร้างที่ต้องการให้มีความแข็งแรงและสิ้นเปลืองวัสดุน้อย และง่ายต่อการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. สามารถออกแบบกังหันให้ผลิตกำลังออกมาตามที่ต้องการได้
2. สามารถให้กังหันลมสามารถที่จะหมุนรับลมเองได้อย่างต่อเนื่อง
3. ใบพัดของกังหันลมสามารถพับหลบลมได้เองเมื่อลมมีความเร็วสูงมากเพื่อป้องกันความเสียหาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

กังหันลม

2.1 รูปแบบของกังหันลม

ในการนำพลังงานลมมาใช้ให้เกิดประโยชน์นั้น เราไม่สามารถนำพลังงานลมออกมาใช้ได้โดยตรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์แปลงพลังงานลมให้เป็นพลังงานในรูปแบบอื่นที่สามารถนำไปใช้งานได้ ซึ่งได้แก่ กังหันลมนั่นเอง โดยในทางทฤษฎีพลังงานที่ได้จากลมโดยผ่านทางกังหันลมจะมีประสิทธิภาพสูงที่สุดประมาณ 59.3 % ของพลังงานลมทั้งหมด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของกังหัน รวมไปถึงขนาดและการออกแบบ

เราสามารถแบ่งชนิดของกังหัน ได้ออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ ด้วยกัน คือ

- กังหันลมแบบแกนหมุนในแนวตั้ง (vertical axle windmill)
- กังหันลมแบบแกนหมุนแนวนอน (horizontal axle windmill)

2.1.1 กังหันลมแบบแกนหมุนในแนวตั้ง (vertical axle windmill)

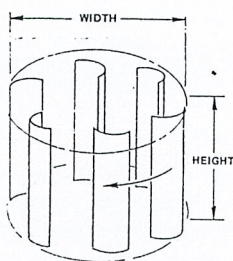
กังหันลมแบบนี้แกนหมุนของใบพัดจะตั้งฉากกับพื้นดิน หรือแนวตั้ง กังหันลมแบบนี้มีคุณสมบัติคือ สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง น้ำหนักของใบจะทิ้งลงในลักษณะสมมาตร และไม่มีผลต่อความกว้างของใบเมื่อแขนหมุน (moment arm) ไม่มีปัญหาต่อการติดตั้งฐาน เพราะการหมุนของใบจะอยู่ในระนาบเดียวกับทิศทางลม ดังนั้นแรงลมที่ปะทะจะเป็นแรงที่ทำให้เกิดการหมุนโดยตรง ซึ่งทำให้เกิดการประโยชน์จากแรงปะทะได้มากขึ้น ส่วนข้อเสียคือไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้จากทุกใบในเวลาเดียวกัน เนื่องจากมีส่วนของใบที่บังลมในอันอยู่ และยังมีใบที่โดนแรงลมที่ทำให้เกิดแรงต้านการหมุนอีกด้วย

2.1.1.1 แบบซาโวเนียส หรือ เอส.โรเตอร์ (Savonius or S.rotor)

เป็นกังหันลมชนิด 2 ใบ การหมุนเกิดจากการที่ลมปะทะทางด้านเว้าแล้วทำให้ใบหมุนรอบแกน กังหันแบบนี้ให้แรงบิดสูง พลังงานค่อนข้างคงที่ แต่ความเร็วรอบต่ำ ส่วนมากนำไปใช้ทางด้านกล เช่น สูบน้ำ

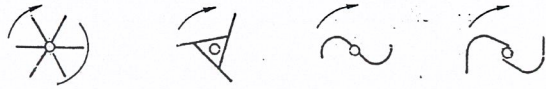
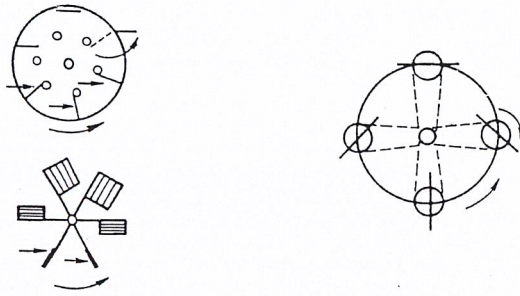
2.1.1.2 แบบดาเรียส (Darius)

กังหันแบบนี้ให้ความเร็วรอบสูง แต่จะมีแรงบิดเริ่มต้นต่ำ ทำให้จะต้องมีตัวช่วยเสริมการหมุนในขณะที่ไม่มีลม หรือลมแรงไม่พอ



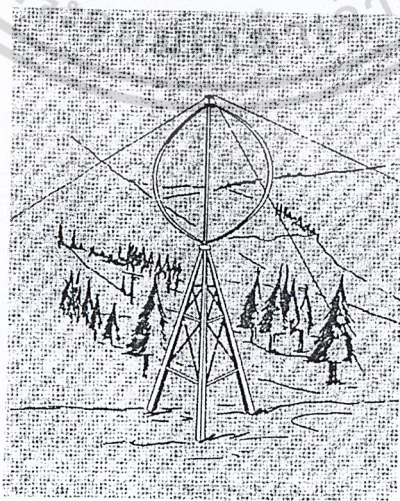
รูปที่ 2-1 แสดงรูปร่างแบบแกนหมุนในแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-2 รูปแบบของกัณฑ์ลมแบบแกนหมุนอยู่ในแนวตั้งชนิดต่างๆ

สำหรับกัณฑ์ลมในแนวตั้งที่มีความซับซ้อนขึ้นและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น นั่นก็คือ กัณฑ์ลมแบบไฮบริด (hybrid machine) ซึ่งได้ใช้หลักการทางด้านอากาศพลศาสตร์ของกัณฑ์ลมแบบแกนหมุนในแนวนอน โดยงานที่ได้จากกัณฑ์ลมนั้นจะทำงานที่อัตราส่วน ความเร็วของใบพัดต่อความเร็วลมที่มากกว่า 1 สำหรับตัวอย่างของกัณฑ์ลมแบบไฮบริดจะเห็นจากรูปที่ 2-3 ซึ่งเป็นกัณฑ์ที่ได้จากการออกแบบจากประเทศแคนาดา ในปี 1920



รูปที่ 2-3 กัณฑ์ลมแบบไฮบริด

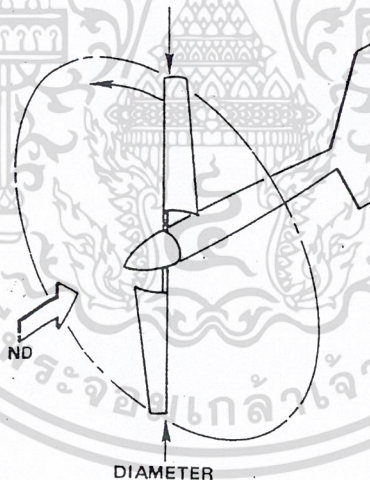
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 กังหันลมแบบแกนหมุนอยู่ในแนวนอน

กังหันลมแบบแกนหมุนอยู่ในแนวนอนนั้นจะมีความซับซ้อนมากกว่าแกนหมุนในแนวตั้ง และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างพลังงานที่ได้จากกังหันที่แกนหมุนอยู่ในแนวนอนกับแนวตั้งเมื่อมีพื้นที่ปะทะลมเท่ากันนั้น จะพบว่ากังหันลมแบบแกนหมุนอยู่ในแนวนอนจะให้พลังงานที่มากกว่าด้วย สำหรับกังหันลมแบบแกนหมุนในแนวนอนขนาดใหญ่ จะมีผลของแรงเนื่องจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal force) ที่เกิดขึ้นกับใบพัดสูง และเนื่องจากค่าความเร็วลมที่ใช้กับใบพัดขนาดใหญ่นี้จะต้องสูงตามด้วยแล้ว ทำให้เกิดโมเมนต์ดัด (bending loads) ซึ่งจะเป็นตัวก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นกับใบพัด และความเสียหายที่เกิดขึ้นอีกแบบ คือ ในขณะที่เกิดการเปลี่ยนทิศทางของลมอย่างกะทันหันในขณะที่ใบพัดกำลังหมุนอยู่นั้น จะทำให้เกิดผลของไจโรสโคปิก (gyroscopic) ขึ้นอีกด้วย

กังหันลมแบบนี้จะมีแกนหมุนของใบพัดขนานกับพื้นดิน คุณสมบัติของกังหันชนิดนี้ คือ ใบของกังหันสามารถรับลมได้เต็มที่ และจะให้กำลังงานมากกว่าแบบแรกเมื่อเทียบขนาดเท่าๆกัน เพราะแบบนี้มีส่วนพื้นที่หน้าตัดรับลมมากกว่าเมื่อเทียบกับใบหมุนในแนวตั้ง กังหันแบบนี้มีความซับซ้อนมากกว่า ติดตั้งลำบากต้องหันกังหันเข้าหาทิศทางที่ลมผ่าน ใบพัดจะมีตั้งแต่ 1 ใบ ขึ้นไป

เนื่องจากแบบแกนหมุนอยู่ในแนวนอนสามารถรับลมได้ในทิศทางเดียว ทำให้ต้องมีอุปกรณ์ทำให้ตัวกังหันหันเข้าหาทิศทางลม หรืออาจติดตั้งในทิศทางที่มีลมพัดมาประจำ



รูปที่ 2-4 กังหันที่มีแกนหมุนในแนวนอน

แบบที่มีจำนวนใบไม่มาก ในแบบนี้มีจำนวนใบตั้งแต่ 2-4 ใบ และมีความเร็วรอบสูง แต่มีแรงบิดเริ่มต้นต่ำ ดังนั้นกังหันลมแบบนี้จึงควรใช้ในพื้นที่บริเวณที่มีลมแรง และนิยมใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า

แบบที่มีจำนวนใบมาก กังหันแบบนี้จะให้แรงบิดสูง แต่ความเร็วรอบค่อนข้างต่ำ และไม่เหมาะที่จะใช้ในบริเวณลมแรงมาก เพราะมีพื้นที่ในการรับแรงลมมากจึงมีแรงผลักสูง อาจทำให้เสียหายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของกังหันทั้ง 2 แบบ

ข้อดี

กังหันลมแนวตั้ง	กังหันลมแนวนอน
- รับลมได้รอบด้าน	- พื้นที่รับลมมากกว่า เมื่อน้ำหนักเท่ากัน
- น้ำหนักตกลงบนฐานทำให้สมดุลกว่า	- มีประสิทธิภาพสูง
- การออกแบบผลิตทำได้ง่าย	- แรงบิดรอบแกนสูง
- เพิ่มแขนการหมุนได้ไม่จำกัด	- ความเร็วรอบต่อความเร็วลมสูง
	- รอบหมุนคงที่กว่า

ข้อเสีย

กังหันลมแนวตั้ง	กังหันลมแนวนอน
- ไม่สามารถรับลมได้ทุกใบ	- รับลมในทิศทางเข้าไปพัดเท่านั้น
- มีแรงต้านการหมุน	- มีปัญหาในการประกอบใบพัดเข้ากับฐาน

2.3 พลังงานที่ต้องการ

ก่อนที่จะทำการออกแบบกังหัน เราจะต้องทำการคำนวณพลังงานที่เราต้องการจะใช้เสียก่อน ซึ่งวิธีที่เราจะสามารถนำเอาพลังงานลมมาใช้นั้นจะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การนำเอาพลังงานลมไปใช้ในการสูบน้ำ และการนำเอาพลังงานลมไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

สิ่งที่สำคัญที่จะต้องคำนึงถึงเสมอ คือ การกำหนดพลังงานที่ต้องการ แต่ถ้าไม่สามารถกำหนดได้อาจจะออกแบบโดยยึดจาก พลังงานไฟฟ้าที่ใช้โดยอาจดูจากค่าไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งพลังงานลมนั้นมีอยู่มิใช้อย่างมากมาย และง่ายต่อการนำไปใช้ประโยชน์ โดยในการออกแบบควรออกแบบให้พลังงานที่ต้องการมากกว่าพลังงานที่คำนวณได้ทางทฤษฎี

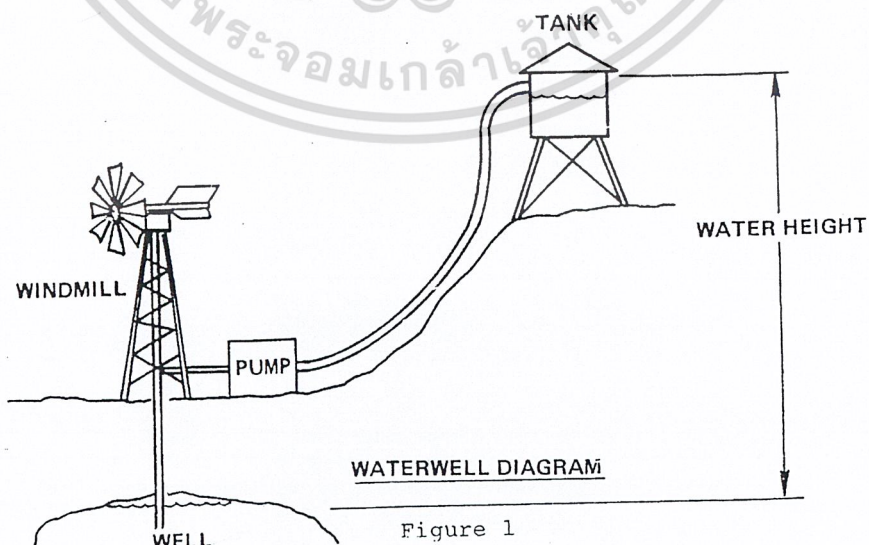


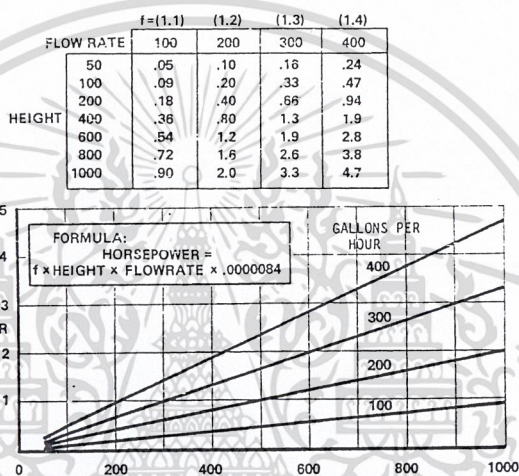
Figure 1

รูปที่ 2-5 การสูบน้ำโดยการใช้กังหันลม

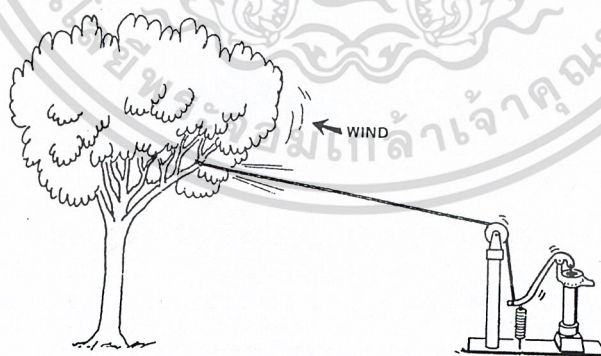
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การนำเอาพลังงานไปใช้ในการสูบน้ำ

การประมาณค่าพลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำ เราจะต้องทราบระดับความสูงที่จะสูบน้ำขึ้นไป และความเร็วที่ใช้ในการสูบน้ำ ดูจากรูปที่ 2-5 ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นกำลังงานที่ต้องการ ซึ่งจะต่างจากพลังงานที่ได้จากลม ความแตกต่างนี้จะเป็นประสิทธิภาพของอุปกรณ์ หรือความด้อยประสิทธิภาพ ถ้ากั้นหั่นลมที่ทำการทดลองเป็นกั้นหั่นลมในอุดมคติ (frictionless , perfectly balance) พลังงานจากลมที่ได้จะเท่ากับพลังงานลมที่มีอยู่ การประมาณค่าพลังงานที่ใช้สูบน้ำดูได้จากรูปที่ 2-6 จากข้อมูล ค่าพลังงานที่ได้จะเป็นค่าประมาณ การออกแบบอย่างปลอดภัยต้องเพิ่มค่าพลังงานที่ต้องการ โดยการประมาณค่า safety factor 1 อาจจะ เป็น 2 เท่า หรืออาจจะประมาณเผื่อไว้



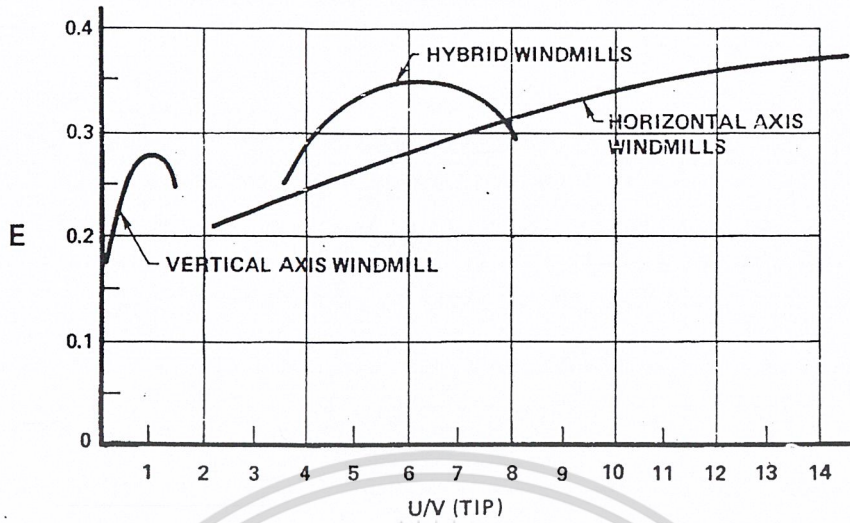
รูปที่ 2-6 กราฟแสดงกำลังงานที่ต้องการสูบน้ำ



รูปที่ 2-7 แสดงตัวอย่างการปั้มน้ำโดยใช้เชือกผูกติดเข้ากับต้นไม้โดยอาศัยแรงลม

สำหรับประสิทธิภาพ (E) ที่ระดับอัตราส่วน w/v หรืออัตราส่วนระหว่างความเร็วที่ปลายของใบพัด ต่อความเร็วลมที่เข้าปะทะ ต่างๆ นั้นเมื่อเปรียบเทียบกันทั้ง 3 แบบสามารถดูได้จากรูปที่ 2-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-8 ประสิทธิภาพของกังหันลมในแต่ละแบบที่อัตราส่วน u/v ต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ลม

ลม หมายถึง มวลของอากาศที่มีการเคลื่อนไหว ลมจัดว่าเป็นพลังงานแบบหนึ่ง โดยการเคลื่อนที่ของมวลอากาศจากบริเวณที่มีความกดดันสูง ไปสู่บริเวณที่มีความกดดันต่ำ ซึ่งในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงอากาศจะลอยตัวสูงขึ้นทำให้ความหนาแน่นลดลง บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะมีความกดดันสูงกว่าอากาศจะไหลเข้าไปชดเชยเพื่อทำให้ความหนาแน่นเท่ากันทำให้มีลมเกิดขึ้น การที่ดวงอาทิตย์ส่องถูกโลกเพียงด้านเดียวเสมอ เป็นผลให้อุณหภูมิของผิวโลกในแต่ละภูมิภาคแตกต่างกัน ไม่เท่ากัน จึงทำให้มีลมเกิดขึ้นตลอดเวลา ซึ่งระดับของความเร็วลมจะแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้รวมไปถึงระดับความสูงเหนือพื้นดินก็จะมีความเร็วลมที่ต่างกันด้วย

3.1 ความเร็วลมเฉลี่ย

การที่เราสามารถจะกำหนดพลังงานลมให้แน่นอนนั้นไม่สามารถทำได้ เพราะว่ามีลมมีความเร็วไม่คงที่ ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบระดับความเร็วลมตลอดเวลา และในการนำไปใช้งานจริงๆ เราจะหาความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่งๆ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า คุณสมบัติของลม (Wind characteristic) ส่วนมากนั้นสามารถกำหนดรูปแบบได้ในกรณีที่ลมมีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นแบบเดียว ซึ่งเราเรียกว่า Prevalent wind ถ้ามีลักษณะการเคลื่อนที่มากกว่าหนึ่งแบบเราจะเรียกว่า Energy wind แบบแรกจะเกิดในช่วงเวลานานกว่าแบบที่สอง ส่วนในแบบที่สองนั้นจะให้พลังงานมากที่สุดในช่วงเวลาที่ต่างหาก

Prevalent wind นั้นจะเกิดประมาณ 5 วันต่อสัปดาห์ และมีความเร็วลมประมาณ 8–24 km/hr ส่วนในแบบ Energy wind นั้นจะเกิดขึ้นประมาณ 2 วันต่อสัปดาห์ และมีระดับความเร็วลมประมาณ 16–40 km/hr ซึ่งกล่าวได้ว่า ลมที่พัดในช่วงเวลา 30 % จะมีกำลังมากกว่าลมที่พัดในช่วงเวลา 70 % ต่อสัปดาห์

วิธีง่ายๆ ในการกำหนดความเร็วลมเฉลี่ย คือ การนำเอาข้อมูลจากสถานีวัดลมหรือบุคคลที่เคยวัดมาก่อน นำมาพิจารณาซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วลมเช่น Anemometer หรือ Hot wire โดยจะทำการเก็บข้อมูลด้วยการนับว่าในแต่ละช่วงความเร็วลมหนึ่งๆ เช่น ช่วงระหว่างความเร็วลม 1-2 m/s นี้มีระยะเวลาประมาณกี่ชั่วโมง เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 3-1

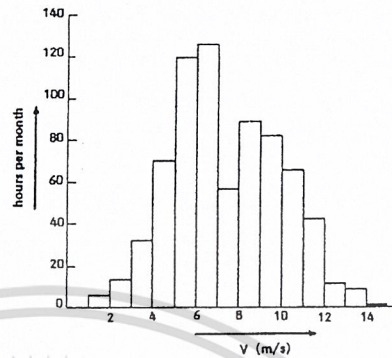
หลังจากเก็บข้อมูลได้ประมาณ 1 ปีแล้วเราสามารถหาค่าความเร็วลมเฉลี่ยได้จากสมการ

$$\bar{V} = \frac{t_1 V_1 + t_2 V_2 + \dots + t_i V_i + \dots + t_n V_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (3.1)$$

ขณะที่ t_i = จำนวนชั่วโมงในช่วงระยะเวลา i
 V_i = ค่ากึ่งกลางของช่วงความเร็วลมในช่วงระยะเวลา i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับระดับความเร็วลมเฉลี่ยศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Interval (m/s)	hours/month
0-1	0
1-2	6
2-3	13
3-4	32
4-5	70
5-6	120
6-7	126
7-8	56
8-9	89
9-10	81
10-11	64
11-12	42
12-13	11
13-14	9
14-15	1
Total	720



รูปที่ 3-1 แสดงตัวอย่างการเก็บสถิติข้อมูลความเร็วลม

3.2 การเลือกตำแหน่งที่ตั้ง

ระดับของความเร็วลม ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งชุดกังหันลมจะมีส่วนอย่างมาก ในการเลือกพื้นที่ควรมั่นใจว่า บริเวณนั้นมีความเร็วลมสูงที่สุด ซึ่งเราสามารถเลือกได้ง่ายถ้าเป็นพื้นที่บริเวณพื้นโล่งเรียบ แต่จะมีความซับซ้อนมากขึ้นถ้าเป็นพื้นที่บริเวณเนินสูง ภูเขา

จำนวนผลกระทบที่มีต่อความเร็วลม สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1. แรงเฉือนของลม (wind shear) ความเร็วลมจะมีค่าลดลงในบริเวณที่ใกล้กับพื้นดิน
2. ความปั่นป่วน (turbulence) บริเวณใกล้สิ่งก่อสร้าง, ต้นไม้, สันเขา เป็นต้น
3. ระดับความเร่ง (acceleration) (หรือการหน่วง) บนยอดเขา, ตามเนินเขาสูง

3.2.1. แรงเฉือนของลม (wind shear)

ประเภทจำพวกพืชต่างๆ, สิ่งก่อสร้าง และพื้นดิน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ลมเคลื่อนที่ช้าลงเมื่ออยู่ใกล้พื้นดิน และในทางกลับกันความเร็วของลมจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออยู่เหนือพื้นดินออกไป ซึ่งนอกจากอัตราการเพิ่มขึ้นของระดับความสูงแล้วยังขึ้นอยู่กับความขรุขระของพื้นดินด้วย ซึ่งสามารถหาความสูงของพื้นผิวขรุขระ (roughness height) ได้จาก

พื้นที่ราบเรียบ (flat)	: หาดทราย, หิมะ, พื้นแข็ง	$Z_0 = 0.005$	m
พื้นที่โล่ง (open)	: สนามหญ้า, สนามบิน, พ.ท.เพาะปลูกที่ว่าง	$Z_0 = 0.03$	m
	: พ.ท.เพาะปลูกที่พืชไม่สูงนัก	$Z_0 = 0.1$	m
พื้นที่ขรุขระ (rough)	: พ.ท.เพาะปลูกพืชค่อนข้างสูง, ต้นไม้	$Z_0 = 0.25$	m
พื้นที่ขรุขระมาก	: ป่า, สวนแปลงผลไม้	$Z_0 = 0.5$	m
พื้นที่แน่นหนา (closed)	: สิ่งก่อสร้างสูง, ชานเมือง	$Z_0 = 0.1$	m

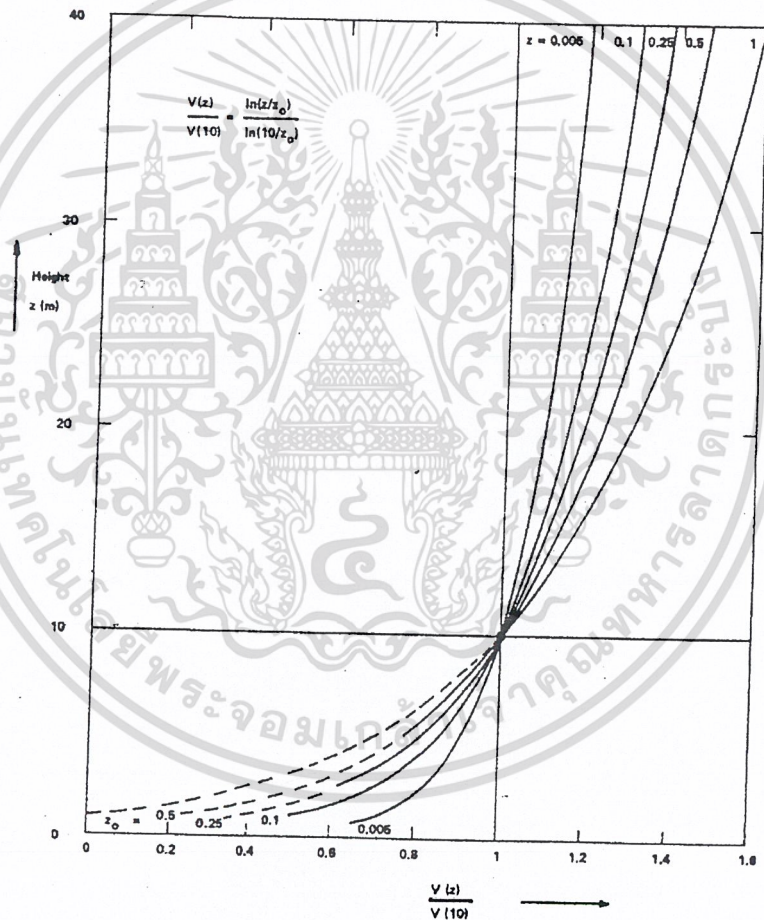
เอกสารนี้, เมือง (town) วนไว้สำหรับศูนย์กลางเมือง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับถือ $Z_0 > 2$ m ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพวกนี้สามารถที่จะนำมาใช้ในสูตรทั่วไปในรูปของ logarithmic ซึ่งลักษณะรูปร่าง (profile) ของแรงเฉือนของลม ได้เท่ากับ

$$\frac{V_z}{V_{z_r}} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad (3.2)$$

โดยความสูงอ้างอิงของ $z_r = 10$ m ซึ่งสูตรนี้สามารถหาได้จากรูปที่ 3-3 ซึ่งจะแตกต่างกันตามระดับความสูงของพื้นผิวขรุขระ (z_0) โดยรูปที่ 3-3 นี้สามารถใช้ได้กับพื้นที่บริเวณภูเขาที่ไม่ใหญ่มากนัก หรือสิ่งกีดขวางขนาดใหญ่ภายในช่วง 1-2 km จากกึ่งหันลม

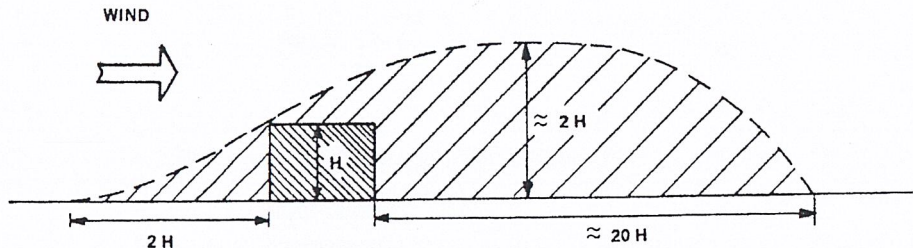


รูปที่ 3-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนลมที่ระดับความสูงเหนือพื้นดินต่างๆ

3.2.2. ระดับความปั่นป่วนของลม (turbulence)

การไหลของลมรอบๆ สิ่งก่อสร้าง หรือพื้นที่ ที่มีความขรุขระมากจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของความเร็ว, ทิศทาง เรียกว่า turbulence ซึ่งจะลดกำลังงานที่ได้ (output) ของกังหันลม และจะทำให้เกิดการสั่นของอุปกรณ์ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

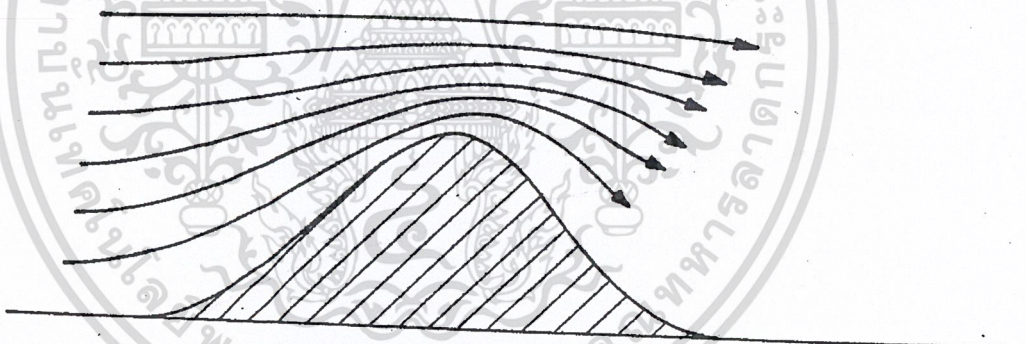


รูปที่ 3-3 แสดงพื้นที่ซึ่งเกิดความปั่นป่วนของลม

ความปั่นป่วนที่เกิดในตำแหน่งใต้ทิศทางลมจะมีช่วงอย่างน้อยประมาณ 10-15 เท่าของความสูงของต้นไม้, พื้นที่ของความปั่นป่วนอาจจะขยายออกตามความเร็วลมประมาณ 5 เท่าของความสูงของสิ่งก่อสร้าง

3.2.3. ระดับความแรง

ระดับความแรงของลมบริเวณเนินสูงนั้น บริเวณผิวหน้าของส่วนบนของเนิน จากการทดสอบความเร็วลมระหว่างผลกระทบของแรงเฉือนของลม (wind shear) ที่บริเวณเนินนี้เราสามารถแบ่งแยกระดับความเข้มข้นของอากาศได้ โดยกรณีของอากาศที่เกิดความแรงบริเวณใกล้ส่วนบนดังรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-4 แสดงความแรงของลมซึ่งมักเกิดขึ้นที่บริเวณยอดของเนินสูง

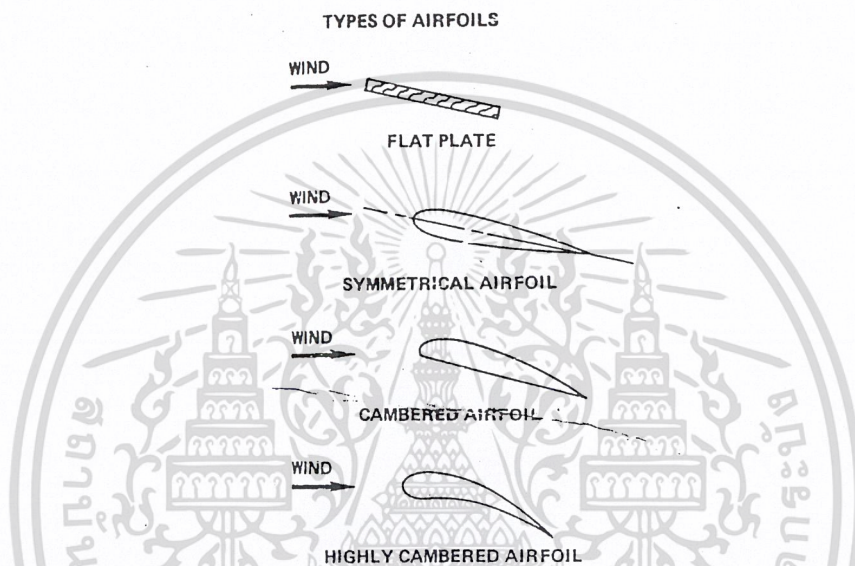
โดยทั่วไปสามารถกล่าวได้ว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นนี้จะมีความรุนแรงที่บริเวณสันนูนที่ค่อนข้างเรียบและไม่สูงชันเกินไปนักและไม่เตี้ยเกินไปนัก โดยมุมในทางจินตนาการ (ideal) จะใช้ที่ 16° ซึ่งไม่ควรจะมีมุมมากกว่า 27° โดยรูปร่างของสันแบบสามเหลี่ยมจะดีกว่าเนินโค้งมน

บทที่ 4

การออกแบบตามหลักอากาศพลศาสตร์

4.1 ลักษณะของใบพัด (air foil)

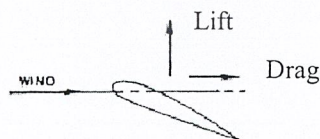
ก่อนที่จะพูดถึงการออกแบบตามหลักการทางด้านอากาศพลศาสตร์ของของใบพัดกังหันลม ขอพูดถึงองค์ประกอบซึ่งมีผลกระทบบกัสมรรถนะของใบพัด ดังนี้



รูปที่ 4-1 แสดงลักษณะของใบพัด

4.2 อากาศพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นกับใบพัด (Airfoil Aerodynamic)

รูปร่างพื้นผิวของใบพัดจะเป็นส่วนที่อากาศไหลผ่านอันจะก่อให้เกิดแรงที่กระทำกับกังหันใน 2 ทิศทาง ซึ่งได้แก่ แรงยก (lift) และแรงต้าน (drag) โดยแรงยกจะมีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหลของอากาศ ไม่ใช่ตั้งฉากกับใบพัด ส่วนแรงต้านจะมีทิศทางขนานกับทิศทางการไหลของอากาศดังรูป

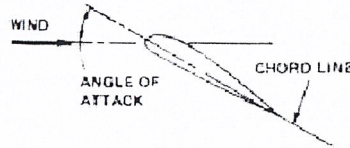


รูปที่ 4-2 แสดงลักษณะของแรงยกและแรงต้านบนใบพัด

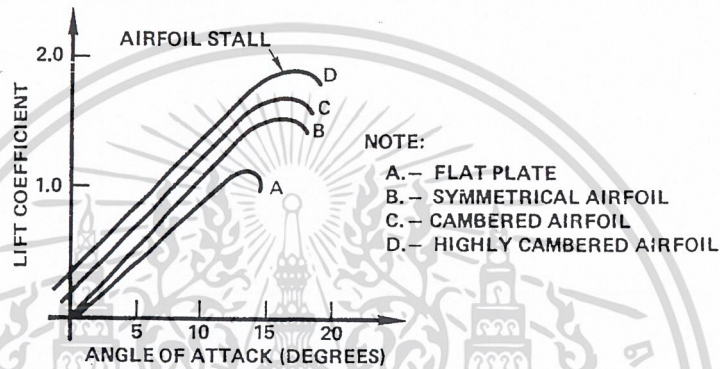
โดย ใบพัดนั้นจะต้องติดตั้งกระทำมุมกับทิศทางการไหลเพื่อให้เกิดแรงยก ซึ่งในการวัดขนาดของมุม นั้นจะทำการวัดระหว่างเส้นที่ลากจากส่วนหัวของใบพัด (leading edge) ไปจนถึงส่วนท้ายของใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(trailing edge) ซึ่งเราเรียกเส้นนี้ว่า เส้นคอร์ด (chord line) กระทำมุมกับทิศทางลม โดยเราจะเรียกมุมนี้ว่า มุมปะทะ (angle attack) ดังรูป



รูปที่ 4-3 แสดงลักษณะการลากเส้น chord line



รูปที่ 4-4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงยกในแต่ละมุมปะทะของ air foil

สำหรับในรูปที่ 4-4 นั้นจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะที่ก่อให้เกิดแรงยกที่มุมต่างๆ ของใบพัด 4 แบบด้วยกัน ซึ่งได้แทนค่าแรงยกให้อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์แรงยก (coefficient lift) ใช้สัญลักษณ์ C_L ซึ่งจากรูปเราจะเห็นได้ว่า ขนาดของแรงยกจะเพิ่มขึ้นตามมุมปะทะจนถึงที่มุมปะทะมุมหนึ่งค่าแรงยกจะหยุดเพิ่มซึ่งเราเรียกจุดนี้ว่า จุดหยุดนิ่งของใบพัด (point of airfoil stall) ซึ่งหลังจากมุมนี้ลักษณะการไหลของอากาศจะเกิดการแยกตัวเกิดขึ้น ทำให้ค่าแรงยกที่เกิดมีค่าลดลงเรื่อยๆ สำหรับสูตรด้านล่างนี้จะแสดงถึงการคำนวณหาค่า สปส.แรงยกเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบกังหันในขั้นต่อไป

$$\text{lift coefficient} = \frac{\text{lift}}{\text{air pressure} \times \text{blade area}} \quad (4.1)$$

4.3 มุมต่างๆของใบพัด (windmill blade angle)

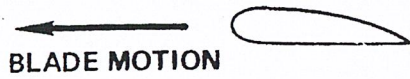
ในการเลือกใช้รูปร่างของใบพัดนั้น จะเลือกใช้ใบพัดที่ให้ค่าแรงยกที่สูงที่สุดมาทำการออกแบบ และให้ค่าแรงต้านต่ำสุด ซึ่งเราจะต้องเลือกใช้มุมปะทะที่ให้ค่าแรงยกสูงแต่จะต้องระวังไม่ให้ขนาดมุมเกินจุด stall

สำหรับขั้นตอนต่อไปซึ่งจะพัฒนาไปสู่การหาค่ามุมปะทะจริงๆ ที่เกิดขึ้นกับใบพัดในขณะที่ใบ

พัดกำลังหมุนอยู่นั้น จะเป็นมุมสัมพันธ์ระหว่างทิศทางลมที่เข้าปะทะกับทิศทางการหมุนของใบพัด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี คือ
 แบบแรก การเคลื่อนที่ของใบพัดในทิศทางด้านซ้ายของหน้ากระดาษ ซึ่งการเคลื่อนที่ในลักษณะนี้ได้จากการเคลื่อนที่ของใบพัดไปทางด้านซ้าย จะทำให้ใบพัดเห็นความเร็วสัมพัทธ์ของลมเคลื่อนที่ไปทางด้านขวา



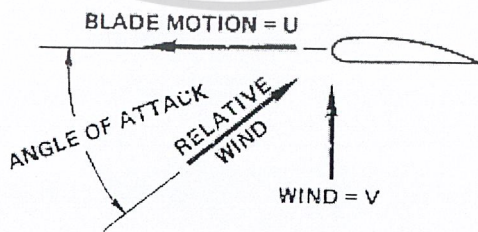
รูปที่ 4-5 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของใบพัด

แบบที่สอง จากการเคลื่อนที่ของใบพัดไปทางด้านซ้ายมือในขณะที่ลมเคลื่อนที่เข้ามาเป็นเส้นตรงกับหน้ากระดาษ ในกรณีนี้ใบพัดจะเห็นว่า ความเร็วสัมพัทธ์ของลมเคลื่อนที่กระทำมุมตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของใบ



รูปที่ 4-6 แสดงทิศทางของลมปกติ

จากการรวมกันทั้งสองกรณี จะทำให้เราได้ลักษณะการเคลื่อนที่พื้นฐานของใบพัดของกังหันลม ตัวอย่างเช่น ใบพัดเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้ายด้วยความเร็ว 10 mph ($u = 10$ mph in the u/v ratio) และลมไหลเข้าในมุมทางด้านขวาด้วยความเร็ว 10 mph ($v = 10$ mph) โดยอัตราส่วน u/v นี้เราจะนำไปใช้ในการหาสมรรถนะของกังหันลม ซึ่งในที่นี้ได้เท่ากับ 1 ($u = 10 = v$) จากนั้นเราต้องทำการหาความเร็วสัมพัทธ์ ซึ่งจะเป็นความเร็วที่เกิดจากการรวมเอาความเร็วทั้งสองค่าเข้าด้วยกัน



รูปที่ 4-7 แสดงทิศทางของความเร็วสัมพัทธ์

จากตัวอย่างความเร็วของใบพัดมีค่าเท่ากับความเร็วของลมและมีทิศทางตั้งฉากกัน ทำให้เราได้มุมของความเร็วสัมพัทธ์เท่ากับ 45 องศา ซึ่งกระทำมุมระหว่างเส้น chord กับแนวการเคลื่อนที่ของใบพัด จากนั้นสมมุติว่าค่ามุมปะทะของใบพัดที่ก่อให้เกิดแรงยกสูงที่สุดเท่ากับ 15 องศา ซึ่งจากค่ามุมของไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วสัมพัทธ์เท่ากับ 45 องศาเป็นมุมที่เลขจุด stall ไปแล้วเป็นผลทำให้ไม่เกิดแรงยกบนใบพัด ดังนั้นเราจึงต้องทำการปรับค่ามุมการติดตั้งใบพัดเพื่อให้สัมพันธ์กับทิศทางของความเร็วสัมพัทธ์นี้ โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Blade angle} = \text{Wind angle} - \text{angle attack} + \text{airfoil zero angle} \quad (4.2)$$

ในขณะที่

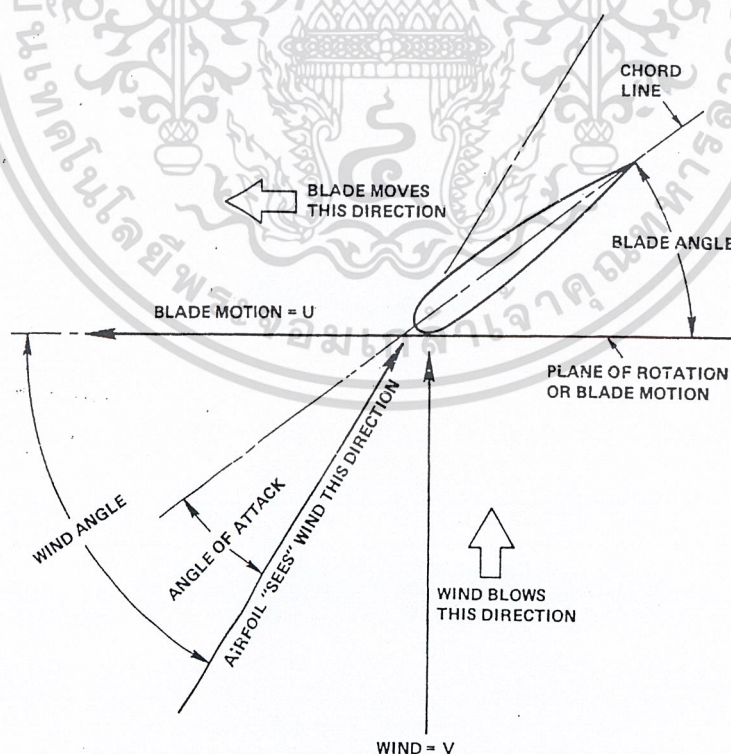
wind angle หมายถึง มุมของความเร็วลมสัมพัทธ์

Angle attack หมายถึง มุมเข้าปะทะของลม

airfoil zero angle หมายถึง มีค่าเท่ากับ

- 0 สำหรับใบพัดที่มีความสมมาตร
- 2 สำหรับใบพัดที่มีความโค้งนูนเล็กน้อย
- 4 to 6 สำหรับใบพัดที่มีความโค้งนูนมาก

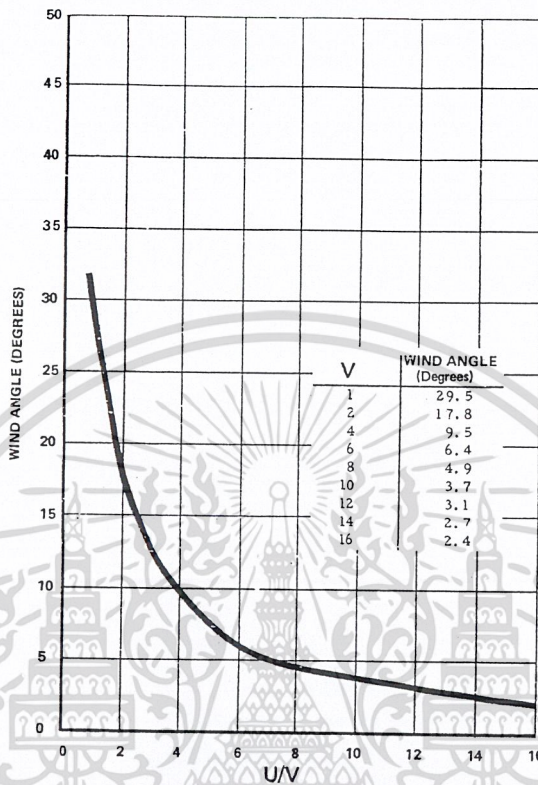
เพื่อให้เกิดความเข้าใจง่ายขึ้น ให้พิจารณาจากรูปที่ 3-9 จะแสดงให้เห็นถึง ความสัมพันธ์ของ มุมระหว่างเส้น chord กับ ทิศทางของความเร็วสัมพัทธ์ ซึ่งค่าผลต่างของมุมทั้งสองก็คือ มุมปะทะนั่นเอง และสำหรับ Airfoil zero angle ก็คือมุมที่เกิดแรงยกเท่ากับศูนย์นั่นเอง



รูปที่ 4-8 แสดงทิศทางและมุมต่างๆของความเร็วที่เกิดขึ้นบนใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบกังหันซึ่งต้องการออกแบบมุมของใบพัด เราสามารถหาได้จากค่าการคำนวณหรือสามารถหาได้จากรูปที่ 4-9



รูปที่ 4-9 แสดงมุมบิดของใบพัดที่อัตราส่วน u/v ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ใบพัด

5.1 บทนำ

การออกแบบใบพัดนี้ประกอบด้วยการออกแบบมุมบิดของใบพัด การคำนวณหาขนาดความยาวของใบพัด ขนาดความกว้างของใบพัด และจำนวนของใบพัด เพื่อต้องการออกแบบให้กังหันลมสามารถผลิตกำลังงานออกมาได้ตามที่เราต้องการ ซึ่งรูปแบบของใบพัดในแต่ละทฤษฎีจะมีลักษณะแตกต่างกันออกไป เช่น มุมบิดของใบพัด ความกว้างของใบพัด เป็นต้น ทั้งนี้เราต้องการที่ศึกษาว่าทฤษฎีจึงจะเหมาะสมกับการออกแบบมากที่สุด หรือสามารถที่จะให้พลังงานออกมาใกล้เคียงกันมากที่สุดระหว่างพลังงานที่คำนวณได้จากทางทฤษฎีกับพลังงานที่ได้จากการทดลองนั่นเอง

5.2 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบมุมของใบพัด

ทฤษฎีต่างๆในการออกแบบใบพัดนี้ประกอบไปด้วย

- 1). ข้อมูลการทดลองของ Jack Park
- 2). ทฤษฎีของ SWD
- 3). ทฤษฎีเวคเตอร์
- 4). ทฤษฎีของ Betz

5.2.1 ข้อมูลการทดลองของ Jack Park

สำหรับกระบวนการขั้นตอนในการออกแบบของ jack park นี้ สามารถบ่งออกได้เป็นวิธีพื้นฐานดังต่อไปนี้

1. กำหนดพลังงานที่ต้องการ
2. กำหนดระดับความเร็วลมที่จะนำมาใช้ประโยชน์
3. กำหนดลักษณะรูปร่างต่างๆของกังหันที่ต้องการ จากพลังงานที่จะนำไปใช้
4. ทำการออกแบบส่วนประกอบต่างๆของกังหันลม ให้ถูกต้องตามหลักการทางด้านอากาศพลศาสตร์ และออกแบบโครงสร้างต่างๆ

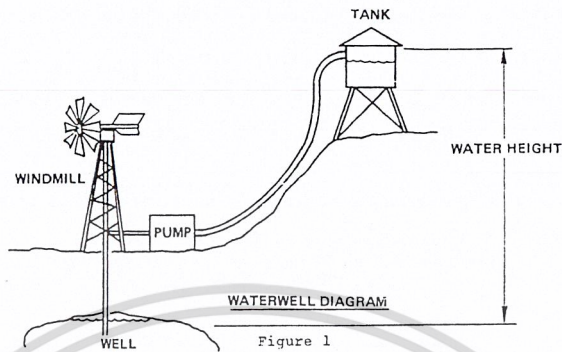
โดยเราสามารถออกแบบได้โดยใช้วิธีหนึ่ง ดังนี้

1. เลือกรูปแบบของกังหันลมและขนาดที่ต้องการ
2. กำหนดค่าระดับความเร็วลมเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบในขั้นต่อไป
3. ออกแบบส่วนประกอบต่างๆของกังหันลมให้ถูกต้องตามหลักการทางด้านอากาศพลศาสตร์ รวมถึงออกแบบโครงสร้างต่างๆ

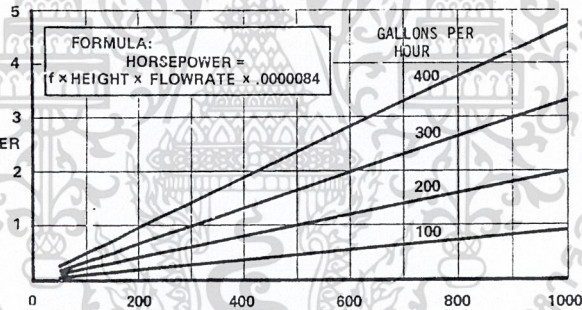
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1.1 การออกแบบกังหันลมสำหรับปั้มน้ำ

กำหนดพลังงานที่ต้องการใช้ปั้มน้ำ โดยจะต้องรู้ว่าควรปั้มน้ำขึ้นที่สูงเท่าใด จากนั้นจึงทำการคำนวณหาพลังงานแรงม้าที่ต้องการ โดยในการหาพลังงานที่ต้องการในการปั้มน้ำจากการใช้ รูปที่ 5-1



	f=(1.1)	(1.2)	(1.3)	(1.4)	
FLOW RATE	100	200	300	400	
50	.05	.10	.16	.24	
100	.09	.20	.33	.47	
200	.18	.40	.66	.94	
HEIGHT	400	.36	.80	1.3	1.9
600	.54	1.2	1.9	2.8	
800	.72	1.6	2.6	3.8	
1000	.90	2.0	3.3	4.7	



รูปที่ 5-1 แสดงกราฟกำลังงานในการสูบน้ำ

5.2.1.2 การออกแบบกังหันลมเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

สำหรับการออกแบบนี้สามารถเลือกได้ว่าจะใช้ไฟฟ้าแบบ AC หรือ DC ถ้านำไปใช้กับงานทางด้านรถยนต์จะใช้กระแส DC ในขณะที่ถ้าต้องการนำไปใช้ภายในบ้านจะใช้กระแส AC ซึ่งเราสามารถคำนวณพลังงานได้จากสมการดังนี้

$$hp = PAE \tag{5.1}$$

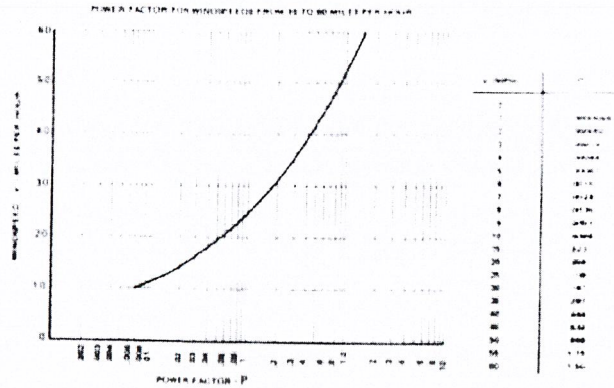
ในขณะที่

P = Power Factor (จากรูปที่ 5-2)

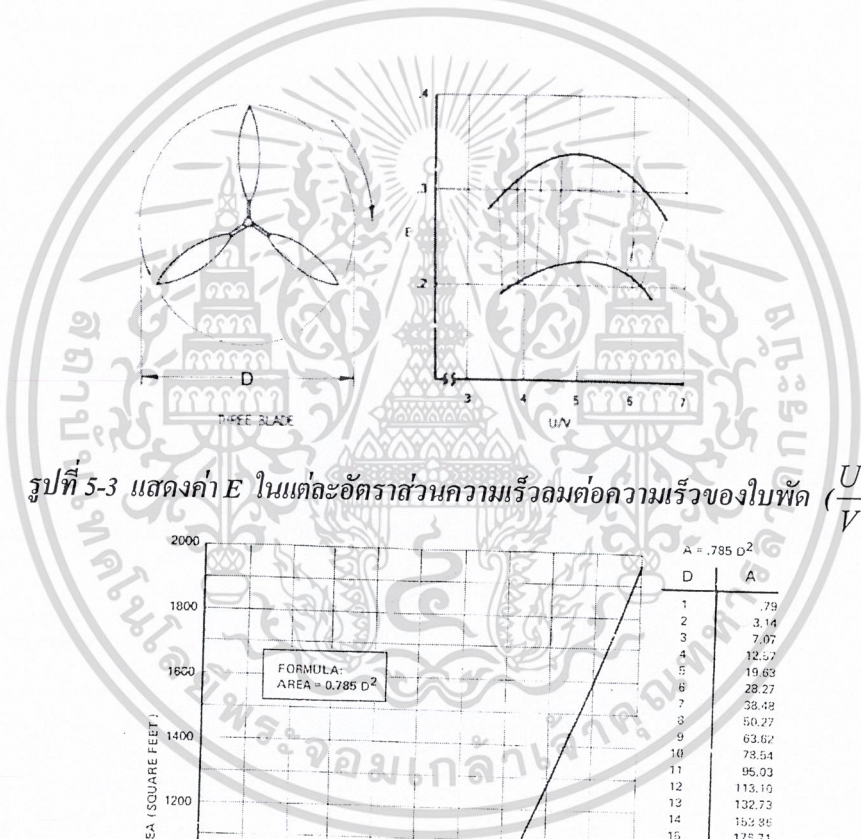
A = Frontal Area (ft²)

E = Efficiency (จากรูปที่ 5-3)

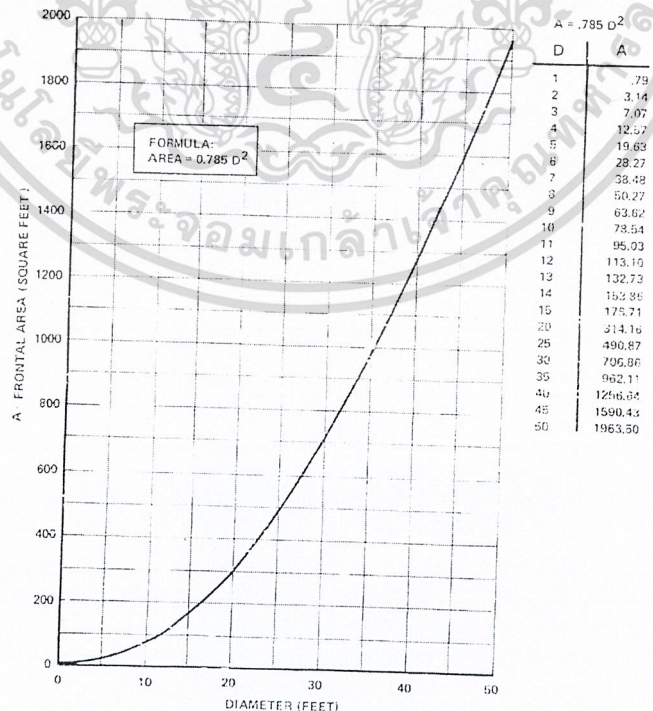
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-2 แสดงค่า Power Factor



รูปที่ 5-3 แสดงค่า E ในแต่ละอัตราส่วนความเร็วต่อความเร็วของใบพัด $(\frac{U}{V})$



รูปที่ 5-4 แสดงการหาพื้นที่ของใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาอัตราส่วนความเร็วของใบพัดกับความเร็วลม

$$\frac{U}{V} = \frac{0.105 \times N \times r}{k \times V} \tag{5.2}$$

ในขณะที่	N	=	ความเร็วรอบ	(RPM)
	R	=	ขนาดรัศมีของใบพัด	(ft)
	V	=	ความเร็วลม	
	K	=	ค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับ V โดยถ้า	V(mph) ใช้ k = 1.47
				V(fps) ใช้ k = 1.0

5.2.1.3 การกำหนดขนาดพื้นที่ของใบพัด

สิ่งหนึ่งที่ต้องพิจารณา คือ ในการออกแบบกังหันลม จะมีพื้นที่ซึ่งใช้ในการออกแบบที่มีลักษณะต่างกัน ดังนี้

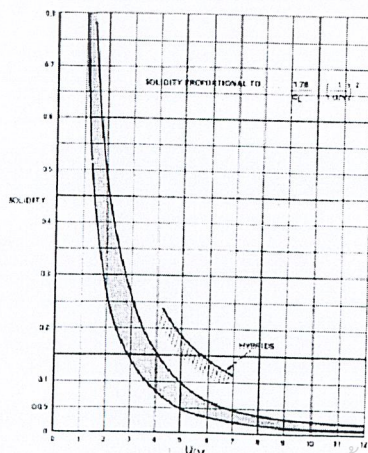
พื้นที่บริเวณพื้นผิวของใบพัด (Blade surface area) หมายถึง พื้นผิวทั้งหมดบนใบพัด

พื้นที่ซึ่งอยู่ด้านหน้าของใบพัด (Frontal area) หมายถึง พื้นที่ด้านหน้าทั้งหมด ที่นำไปใช้

ในการคำนวณพลังงานที่ได้จากกังหัน

$$SOLIDITY = \frac{BLADE AREA}{FRONTAL AREA} \tag{5.3}$$

ถ้าเรานำเอา frontal area มาหาร blade area ก็จะได้อัตราส่วนหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนความแน่นหนา (solidity) หรือคิดในอีกทางหนึ่งคือ ในขณะที่ลมพุ่งชนใบพัดของกังหันนั้นเราไม่สามารถที่จะระบุได้อย่างชัดเจนว่า มีการพุ่งชนที่จุดใดบ้าง และแต่ละความเร็วลมนั้นเราควรจะให้กี่จำนวนใบพัดเท่าใดจึงจะเหมาะสม ดังนั้นจึงได้มีการทดลองและเก็บข้อมูลเหล่านั้นมา ซึ่งสามารถนำมาพล็อตรูปได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 5-5 แสดงกราฟใช้ในการหาค่า solidity ในแต่ละ U/V ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1.4 ตัวอย่างการคำนวณโดยอาศัยข้อมูลการทดลองของ jack park

ต้องการพลังงานเท่ากับ 10,000 watt-hours ต่อวัน ดังนั้นในระยะเวลา 1 เดือน จะต้องใช้พลังงานทั้งหมดเท่ากับ 300 กิโลวัตต์ ซึ่งความเร็วลมที่นำมาใช้เท่ากับ 12 ไมล์ต่อชั่วโมง โดยใน 1 วันจะมีความเร็วลมในระดับเป็นระยะเวลาประมาณ 5 ชั่วโมงต่อวัน

สิ่งที่ต้องการ คือ

ให้ออกแบบกังหันลมที่สามารถผลิตกำลังงานได้ตามที่ต้องการ โดยจะนำเอาพลังงานไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเลือกกังหันแบบ eggbeater (กังหันแบบแกนหมุนในแนวตั้ง) เราสามารถออกแบบกังหันได้ดังนี้

1. $300 \text{ kilowatt-hours} / 5 \text{ hours} = 60 \text{ kilowatts}$ (พลังงานนี้เป็นพลังงานที่กังหันลมจะต้องสร้างขึ้น เท่ากับ 60 kilowatt ในช่วงที่ความเร็วลม 12 ไมล์ต่อชั่วโมง)
2. พลังงานแรงม้า เท่ากับ $P \times A \times E$ และ $\text{watt} = \text{horsepower} \times 746$
ดังนั้น $\text{watt} = 746 \times P \times A \times E$
ซึ่งจากรูปที่ 5-2 ที่ความเร็วลม 12 ไมล์ต่อชั่วโมง ค่า P เท่ากับ 0.012
ดังนั้น $\text{watt} = 746 \times 0.012 \times A \times E$
3. ถ้าเลือกออกแบบกังหันที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งสามารถเลือกได้จาก ภาคผนวก ทำให้เราสามารถรู้ประสิทธิภาพได้ ในที่นี้ได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 0.25 (25%) ที่ $U/V = 6$
4. ดังนั้น $\text{watt} = 8.95 \times A \times 0.25 = 2.24 \times A$
เนื่องจากพลังงานที่ต้องการเท่ากับ 60,000 แล้ว
 $60,000 = 2.24 \times A$ ทำการแก้สมการได้ A เท่ากับ 26,875 ตารางฟุต ซึ่งเป็นกังหันที่มีขนาดใหญ่
5. จากนั้นเราสามารถหาค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัดได้จากรูปที่ 5-4 หรือจากสูตรพื้นที่ เท่ากับ $0.785 \times D^2$
ทำการหาค่าได้ $D = 185$ ฟุต
6. ในขั้นต่อมาพิจารณาที่ chart D ที่ $U/V = 6$ ทำให้เราได้ค่า Solidity = 0.1
ดังนั้น $\text{Blade area} = 0.1 \times 26,875 = 2679$ ตารางฟุต
7. เนื่องจากเลือกออกแบบกังหันแบบ eggbeater ซึ่งมีรูปร่างโค้งมนและมีจำนวน 2 ใบ โดยเราสามารถหาขนาดความยาวของ chord ได้ จาก $\text{blade area} = \text{blade length} \times \text{blade chord}$ โดย blade length เราสามารถได้ประมาณเท่ากับความยาวส่วนโค้งของวงกลม จากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง เท่ากับ 185 ฟุต ดังนั้นเส้นรอบวงเท่ากับ $3.14 \times 185 = 581$ ฟุต
8. เนื่องจากเป็นกังหันแบบแกนหมุนในแนวตั้ง ดังนั้นจึงไม่มีการบิดของใบพัด และใบพัดต้องทำงานในหลายทิศทาง และมีแรงยกเกิดขึ้นทั้ง 2 ด้านของใบพัด ดังนั้นจึงควรใช้แบบใบพัดที่มีความสมมาตรจึงจะดีที่สุด เช่น แบบ naca 0012 หรือ naca 0015 เป็นต้น

5.2.2 ทฤษฎีของ SWD

ในการคำนวณพลังงานของ SWD มีสมการดังนี้

$$E = 0.1\pi R^2 V^3 \quad (5.4)$$

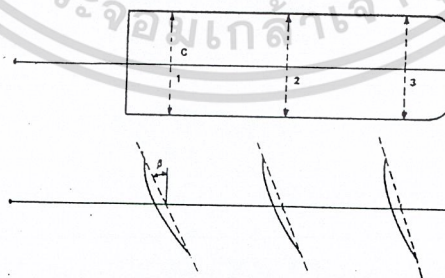
ขณะที่	E : พลังงานไฟฟ้า	(Watt)
	R : รัศมีของใบพัด	(m)
	V : ขนาดความเร็วลม	(m/s)

ตามมาตรฐานของ SWD สามารถคำนวณขนาดสัดส่วนต่างๆของใบพัดได้ 2 แบบ ดังนี้

- 1). สัมประสิทธิ์แรงยกของที่ตลอดความยาวของใบพัด
- 2). ขนาด chord ของใบพัดคงที่ตลอดความยาวของใบพัด

โดยการคำนวณจากสมการของ SWD นี้จะเป็นการหามุมติดตั้งในแต่ละระยะตามแนวความยาวของใบพัด ดังรูปที่ 5-6

รูปที่ 5-6 แสดงตำแหน่งของมุมติดตั้งและขนาด chord แบบ ส.ป.ส.แรงยกคงที่



รูปที่ 5-7 แสดงตำแหน่งของมุมติดตั้งและขนาด chord แบบ chord คงที่

$$\text{CHORD} = \frac{8\pi R}{BC_L} (1 - \cos \phi) \quad (5.5)$$

$$\text{Blade Setting Angle} = \phi - \alpha \quad (5.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{V_w}{V_b} \quad (5.7)$$

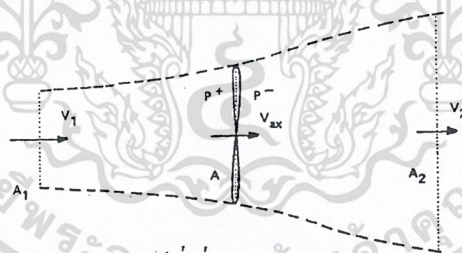
$$C_L = \frac{8\pi R}{BC} (1 - \cos \phi) \quad (5.8)$$

ขณะที่	R	:	ขนาดความยาวรัศมีของใบพัด	(m)
	B	:	จำนวนใบพัด	
	Chord , C	:	ขนาดความกว้างของใบพัด	(m)
	V_w	:	ความเร็วลม	(m/s)
	V_b	:	ความเร็วของใบพัด	(m/s)

ซึ่งที่มาของสมการ (5.5) , (5.7) และ (5.8) เราสามารถพิสูจน์ได้ดังนี้

5.2.2.1 ทฤษฎีโมเมนตัมในแนวแกน (Axial momentum theory)

ผู้ที่คิดค้นทฤษฎีโมเมนตัมในแนวแกนคนแรกคือ Rankine ในปี 1865 และต่อมาได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Froude ซึ่งทฤษฎีนี้ประกอบด้วยความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำ (force acting) บนโรเตอร์และผลที่เกิดจากความเร็วของของไหล และการทำนายหาประสิทธิภาพทางจินตภาพ (ideal) ของโรเตอร์ ซึ่งต่อมา Betz ได้พัฒนาทฤษฎีนี้ต่อ ซึ่งได้รวมผลกระทบของการหมุนวน (rotation wake effect) เข้าไปในทฤษฎีนี้ด้วย และในปัจจุบัน Wilson , Lissaman และ Walker ได้พัฒนาต่อโดยเพิ่มในส่วนของการวิเคราะห์ผลประสิทธิภาพทางด้าน aerodynamic ของกังหันลมด้วย



รูปที่ 5-8 แสดงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีโมเมนตัมในแนวแกน

การสมมุติฐานภายใต้ทฤษฎีโมเมนตัมในแนวแกนนี้ ประกอบด้วย

- incompressible flow
- no friction drag
- infinite number of blade
- homogeneous flow
- uniform thrust over the rotor area
- non-rotating wake
- ความดันที่เกิดขึ้นบริเวณห่างจากด้านหน้าและด้านหลังของโรเตอร์เป็นความดันสถิตย์

ซึ่งมีค่าเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาจากกฎทรงมวล

$$\rho A_1 V_1 = \rho A V_{ax} = \rho A_2 V_2 \quad (5.9)$$

แรงผลักดัน (thrust force) ที่กระทำกับโรเตอร์นี้สามารถหาได้จากการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมของการไหลซึ่งเปรียบเทียบระหว่างก่อนเข้ามากระทบและหลังจากกระทบ

$$T = \rho A_1 V_1^2 - \rho A_2 V_2^2 \quad (5.10)$$

จากสมการ (4.28) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$T = \rho A V_{ax} (V_1 - V_2) \quad (5.11)$$

ซึ่งเราสามารถที่จะแสดงให้อยู่ในรูปของความแตกต่างเนื่องจากความดันระหว่างพื้นที่ของโรเตอร์ได้ดังนี้

$$T = (p^+ - p^-) A \quad (5.12)$$

และผลของความแตกต่างของความดันนี้เราสามารถหาได้จากสมการของเบอร์นูลลีได้

ก่อนเข้าโรเตอร์
$$p + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = p^+ + \frac{1}{2} \rho V_{ax}^2 \quad (5.13)$$

หลังออกจากโรเตอร์
$$p^- + \frac{1}{2} \rho V_{ax}^2 = p + \frac{1}{2} \rho V_2^2 \quad (5.14)$$

จัดรูปใหม่ได้
$$p^+ - p^- = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_2^2) \quad (5.15)$$

และแรงผลักดันเท่ากับ

$$T = \frac{1}{2} \rho A (V_1^2 - V_2^2) \quad (5.16)$$

จากสมการ (5.10) กับ (5.11) เราสามารถสร้างความสัมพันธ์ใหม่ได้

$$V_{ax} = \frac{1}{2} (V_1 + V_2) \quad (5.17)$$

กำหนดให้ a เท่ากับค่าตัวประกอบเหนี่ยวนำในแนวแกน (axial induction factor) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{ax} = V_1(1-a) \quad (5.18)$$

นำไปแทนค่าในสมการ (5.35) จะสามารถหาความเร็วที่ทางออกได้

$$V_2 = V_1(1-2a) \quad (5.19)$$

พลังงานที่โรเตอร์ได้รับมีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงานจลน์โดยมวลขณะที่ไหลผ่านใบพัด

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} \rho A V_{ax} (V_1^2 - V_2^2) \\ P &= \frac{1}{2} \rho A V_1 (1-a) (V_1^2 - V_1^2 (1-2a)^2) \\ P &= \frac{1}{2} \rho A V_1^3 (1-a) (4a) \end{aligned} \quad (5.20)$$

สามารถหาค่าสูงสุดได้จาก $\frac{dP}{da} = 0$ สุดท้ายเราจะได้

$$a = \frac{1}{3} \quad (5.21)$$

แทนค่าลงในสมการ (5.20) แล้วจัดรูปใหม่เราจะได้

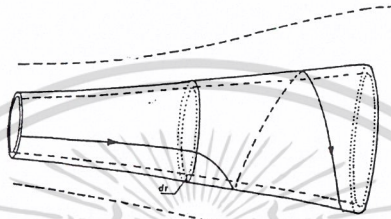
$$P = \frac{16}{27} \times \frac{1}{2} \rho A V_1^3$$

ซึ่งค่า $\frac{16}{27}$ นี้เราเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของ Betz (Betz-coefficient) ซึ่งคิดค้นได้ในปี 1926 โดยค่าแฟกเตอร์นี้เป็นค่าสูงสุดซึ่งได้จากโรเตอร์ในจินตภาพภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด สำหรับค่าเศษส่วนนี้มีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ได้จากการไม่คิดการกระจายของการไหลตลอดพื้นที่หน้าตัด (A) ในขณะที่ความเป็นจริงแล้วการไม่กระจายของการไหลจะเกิดขึ้นถึงบริเวณ $(A_1) = A(1-a)$ จนถึงโรเตอร์ และค่าเฉลี่ยนี้มีความสัมพันธ์กับค่าประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ $\frac{16}{27} \times \frac{3}{2} = \frac{8}{9}$

สำหรับแบบจำลองที่สมบูรณ์ของการไหลในแนวแกนทั้งก่อนและหลังโรเตอร์นี้ได้ถูกปรับปรุงมาจากการหมุนที่เกิดขึ้นจริงของโรเตอร์ซึ่งเข้าใจว่าเกิดจากโมเมนต์เชิงมุม (torque) หมายความว่าค่าปฏิกิริยาของแรงบิดนั้นถูกส่งผ่านมาจากการไหลผ่านโรเตอร์ และของไหลจะไหลในทิศทางตรงข้ามกับโรเตอร์เมื่อไหลผ่านไป แล้วสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์นี้แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียของพลังงานจลน์สำหรับโรเตอร์กังหันลม ละการสูญเสียนี้จะค่าสูงขึ้นเมื่อค่าแรงบิดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการไหลอย่างช้าๆ ของลมเมื่อไหลผ่านโรเตอร์ (ซึ่งมีค่า tip speed ratio ต่ำ และมีแรงบิดที่สูง) นี้จะเกิดการสูญเสียอันเนื่องจากการหมุนวนนี้สูงกว่ากังหันที่มีค่า tip speed ratio สูง ซึ่งจะได้แรงบิดต่ำ และการสูญเสียนี้จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของใบ โดยเฉพาะรูปร่างส่วนโค้งที่ปลายด้วย

สำหรับในกาวิเคราะห์นี้เราได้ใช้แบบจำลองซึ่งมีลักษณะของสายธารการไหลเป็นแบบวงแหวน โดยสามารถรวมเข้ากับตัวแปรของค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องตามใบพัดได้



รูปที่ 5-9 แสดงการหมุนวนที่ด้านหลังใบ

ในขณะที่รัศมีของวงแหวน (r) และความหนา (dr) และพื้นที่หน้าตัดของวงแหวนเท่ากับ $2\pi r dr$ ซึ่งจะเข้าได้ถ้าเราจินตนาการว่าตัวเรากำลังเคลื่อนที่ไปตามใบพัด

เมื่อเราใช้สมการเบอร์นูลลีไปพิสูจน์ความสัมพันธ์ของความแตกต่างความดันของใบพัด จะได้ค่าความเร็วเชิงมุมสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นจาก Ω เป็น $\Omega + \omega$ ในขณะที่ส่วนประกอบของความเร็วในแนวแกนยังคงที่

$$p^+ - p^- = \frac{1}{2} \rho (\Omega + \omega)^2 r^2 - \frac{1}{2} \rho \Omega^2 r^2 \quad (5.22)$$

หรือ

$$p^+ - p^- = \frac{1}{2} \rho \left(\Omega + \frac{1}{2} \omega \right) \omega r^2 \quad (5.23)$$

แรงผลึกที่เกิดกับพื้นที่ของวงแหวนส่วนเล็กๆ นี้เท่ากับ

$$dT = \rho \left(\Omega + \frac{1}{2} \omega \right) \omega r^2 2\pi r dr \quad (5.24)$$

กำหนดให้ a' เท่ากับ ค่าตัวประกอบการเหนี่ยวนำในแนวสัมผัส (tangential induction factor)

$$a' = \frac{1/2 \omega}{\Omega} \quad (5.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำความสัมพันธ์นี้ไปแทนค่าของแรงผลักรเราจะได้

$$dT = 4a'(1+a')\frac{1}{2}\rho\Omega^2 r^2 2\pi r dr \quad (5.26)$$

เราสามารถนำความสัมพันธ์นี้ไปแสดงเหมือนกับสมการ (5.20) ได้จากการพิสูจน์ด้วยทฤษฎีโมเมนตัมในแนวแกน จากการใช้ค่าการเหนี่ยวนำในแนวแกน (a) ไปแทนและมองที่ส่วนตัดของพื้นที่วงแหวนเท่านั้น ($A + 2\pi r dr$ and $V_1 \rightarrow V$) ดังนี้

$$dT = 4a(1-a)\frac{1}{2}\rho V^2 2\pi r dr \quad (5.27)$$

ได้

$$\frac{a(1-a)}{a'(1+a')} = \left(\frac{\Omega r}{V}\right)^2 = \lambda_r^2 \quad (5.28)$$

ซึ่งเราจะนำความสัมพันธ์นี้ไปใช้ในภายหลัง

เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ของแรงผลักรที่เกิดกับเตอร์ได้อีกแบบจากการพิสูจน์จากความสัมพันธ์ของแรงบิดที่ส่งผ่านมายังโรเตอร์ ซึ่งเป็นผลมาจากกฎทรงโมเมนตัมเชิงมุม หรือหมายความว่าแรงบิดที่ส่งผ่านมานั้นจะเท่ากับโมเมนตัมเชิงมุมของการหมุนวน

$$dQ = \rho V_{ax} 2\pi r dr \times \omega r \times r \quad (5.29)$$

ถ้าหาค่าตัวประกอบการเหนี่ยวนำในแนวแกนและแนวสัมผัสนั้น สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของแรงบิดบนพื้นที่วงแหวนเล็กๆบนโรเตอร์ได้เท่ากับ

$$dQ = 4a'(1-a)\frac{1}{2}\rho V\Omega r^2 2\pi r dr \quad (5.30)$$

ซึ่งจะได้พลังงานเท่ากับ $dP = \Omega dQ$ ดังนั้นพลังงานรวมเท่ากับ

$$P = \int_0^R \Omega dQ \quad (5.31)$$

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อให้คำอธิบายที่ละเอียดและถูกต้องเกี่ยวกับความเร็วเฉพาะ (local speed ratio, λ_r) เท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลนี้ไปใช้ประกอบการตัดสินใจใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{V} \quad (5.32)$$

แทนค่าลงในสมการพลังงาน จะได้เท่ากับ

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \times \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda a'(1-a) \lambda_r^3 d\lambda_r \quad (5.33)$$

และค่าสัมประสิทธิ์ของพลังงาน C_p เท่ากับ

$$P = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda a'(1-a) \lambda_r^3 d\lambda_r \quad (5.34)$$

โดยค่าสูงสุดของ $a'(1-a)$ สามารถหาได้จากการใช้ความสัมพันธ์ของสมการ (5.47) ไปแทนค่าใน a' และ a

$$a' = \frac{-1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{4}{\lambda_r^2} a(1-a)} \quad (5.35)$$

แทนค่าความสัมพันธ์นี้ลงใน $a'(1-a)$ และทำการดิฟจากนั้นจึงให้เท่ากับศูนย์ และจัดรูปใหม่จนในที่สุดเราจะได้

$$\lambda_r^2 = \frac{(1-a)(4a-1)^2}{1-3a} \quad (5.36)$$

และเราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a' และ a ได้ดังนี้

$$a' = \frac{(1-3a)}{4a-1} \quad (5.37)$$

สามารถแสดงค่าความสัมพันธ์ของทั้งสองได้ดังตาราง

a	a'	λ_r
0.25	-	0
0.26	5.5	0.073

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.27	2.375	0.157
0.28	1.333	0.255
0.29	0.812	0.374
0.30	0.500	0.529
0.31	0.292	0.754
0.32	0.143	1.154
0.33	0.031	2.619
0.333	0.003	8.574
0.3333	0.0003	27.206
1/3	0	∞

ตารางที่ 5-1 แสดงความสัมพันธ์ของ a , a' , λ_r

โดยการใช้วิธีทางวิเคราะห์ผลรวมเชิงตัวเลขทำให้เราสามารถที่จะหาค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ของพลังงาน C_p ในรูปของ λ ซึ่งแสดงผลในตารางข้างล่างดังนี้

λ	$C_{p_{max}}$
0	0
0.5	0.288
1.0	0.416
1.5	0.481
2.0	0.516
2.5	0.533
5.0	0.571
7.5	0.582
10.0	0.585
∞	16 / 27

ตารางที่ 5-2 แสดงความสัมพันธ์ของ λ และ $C_{p_{max}}$

5.2.2.2 ทฤษฎีเอลิเมนต์ของใบพัด (blade element theory)

จากการใช้ทฤษฎีของโมเมนต์เพื่อออกแบบใบพัดของกังหันลมนั้นไม่เพียงพอ ดังนั้นจึงได้ใช้ทฤษฎีเอลิเมนต์ของใบพัดรวมเข้ากับทฤษฎีของโมเมนต์

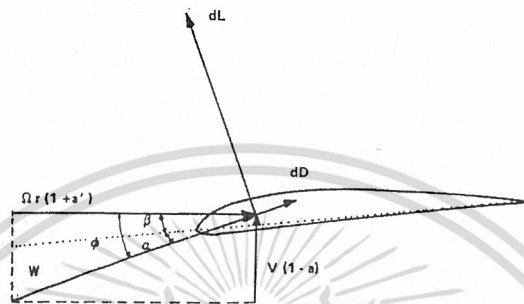
สมมติฐานภายใต้ทฤษฎีเอลิเมนต์ของใบพัด ประกอบด้วย

- แต่ละเอลิเมนต์บนใบพัดไม่ยึดติดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แรงที่เกิดขึ้นบนเอลิเมนต์ประกอบด้วยแรงยกและแรงต้าน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างเฉพาะของแต่ละเอลิเมนต์บนใบพัด

ขั้นตอนในการคำนวณแรงที่เกิดในแต่ละเอลิเมนต์นั้น ได้จากการหาผลรวมตลอดความยาวของใบพัด (และคูณด้วยจำนวนของใบพัด) ซึ่งในการแสดงค่าแรงบิดและแรงผลักรวม เราได้กำหนดให้ใช้สัญลักษณ์ในรูป 5-10 ภายใต้สมมติฐานว่าในแต่ละเอลิเมนต์บนใบพัดนี้เคลื่อนที่ไปในทิศทางระนาบเดียวกัน



รูปที่ 5-10 แสดงความเร็วลมและแรงที่กระทำบนเอลิเมนต์ของใบพัด

สามารถหาแรงยกและแรงต้านได้โดย

$$dL = C_L \frac{1}{2} \rho W^2 cdr \quad (5.38)$$

$$dD = C_D \frac{1}{2} \rho W^2 cdr \quad (5.39)$$

แรงผลักรวมและแรงบิดที่เกิดบนเอลิเมนต์เท่ากับ

$$dT = dL \cos \phi + dD \sin \phi \quad (5.40)$$

$$dQ = (dL \sin \phi - dD \cos \phi) \times r \quad (5.41)$$

จากสมการ (5.37) และจากสมมติฐานว่าโรเตอร์มีใบพัดจำนวน B ใบ เราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบใหม่ได้ ดังนี้

$$dT = B \frac{1}{2} \rho W^2 (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) cdr \quad (5.42)$$

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho W^2 (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) crdr \quad (5.43)$$

5.2.2.3 การรวมเอาทฤษฎีโมเมนตัมและเอลิเมนต์เข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเพื่อความสะดวกในการอ่านเราจึงขอสรุปบททวนสมการจากทั้งสองทฤษฎี ดังนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีโมเมนต์

$$dT = 4a(1-a)\frac{1}{2}\rho V^2 2\pi r dr$$

$$dT = 4a'(1+a')\frac{1}{2}\rho\Omega^2 r^2 2\pi r dr$$

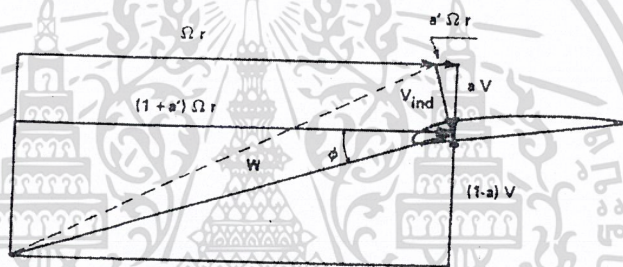
$$dQ = 4a'(1-a)\frac{1}{2}\rho V\Omega r^2 2\pi r dr$$

ทฤษฎีเอลิเมนต์

$$dT = B\frac{1}{2}\rho W^2 (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) c dr$$

$$dQ = B\frac{1}{2}\rho W^2 (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) c dr$$

ผลของการรวมจากทั้งสองทฤษฎีเราสามารถแสดงความเร็วลมสัมพัทธ์ ซึ่งหาจากรูปที่ 5-11



รูปที่ 5-11 ไรอะแกรมความเร็วของเอลิเมนต์ของกังหันลมแกนหมุนในแนวนอน

จากรูปที่ 5-11 เราสามารถสรุปได้ว่า

$$W = \frac{(1-a)V}{\sin \phi} = \frac{(1+a')\Omega r}{\cos \phi} \quad (5.44)$$

และ

$$\tan \phi = \frac{(1-a)V}{(1+a')\Omega r} = \frac{1-a}{1+a'} \times \frac{1}{\lambda_r} \quad (5.45)$$

ถ้ากำหนดให้ค่าอัตราส่วนความหนาแน่นเฉพาะ (local solidity ratio, σ)

$$\sigma = \frac{Bc}{2\pi r}$$

จากนั้นนำไปแทนค่าลงในสมการของทฤษฎีเอลิเมนต์ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$dT = (1-a)^2 \frac{\sigma C_L \cos \phi}{\sin^2 \phi} \left(1 + \frac{C_D}{C_L} \tan \phi \right) \frac{1}{2} \rho V^2 2\pi r dr \quad (5.46)$$

$$dQ = (1+a')^2 \frac{\sigma C_L \sin \phi}{\cos^2 \phi} \left(1 - \frac{C_D}{C_L} \frac{1}{\tan \phi} \right) \frac{1}{2} \rho \Omega^2 \times r^4 2\pi r dr \quad (5.47)$$

รวมเอาสมการ (5.46) และ (5.47) ได้

$$\frac{4a}{1-a} = \frac{\sigma C_L \cos \phi}{\sin^2 \phi} \left(1 + \frac{C_D}{C_L} \tan \phi \right) \quad (5.48)$$

ขณะที่สมการ (5.47), (5.23) และ (5.45) ได้

$$\frac{4a'}{1+a'} = \frac{\sigma C_L}{\cos \phi} \left(1 - \frac{C_D}{C_L} \frac{1}{\tan \phi} \right) \quad (5.49)$$

ทำการตัดเทอรัมของแรงต้านทิ้ง เพราะว่าลักษณะผลของแรงต้านนี้ ไม่มีผลต่อความเร็วที่การประมาณของใบพัดที่มีขนาดความกว้างน้อย จากนั้นใช้ค่าตัวประกอบการเหนี่ยวนำแทนลงไปจะได้

$$\frac{4a}{1-a} = \frac{\sigma C_L \cos \phi}{\sin^2 \phi} \quad (5.50)$$

$$\frac{4a'}{1+a'} = \frac{\sigma C_L}{\cos \phi} \quad (5.51)$$

จากนั้นจึงนำเอาค่า a' ไปแทนลงในสมการ (5.51) และแก้สมการเพื่อกำจัดตัวแปร a แล้วจึงนำไปแทนลงในสมการ (5.50) แล้วจัดให้อยู่ในรูปแบบง่ายๆ ได้เท่ากับ

$$\sigma C_L = 4(1 - \cos \phi) \quad (5.52)$$

ในขณะที่ค่า $\sigma = \frac{Bc}{2\pi r}$ นี้เราสามารถนำไปแทนในสูตรเพื่อให้ออกแบบใบพัด ได้ดังนี้

$$C = \frac{8\pi r}{BC_L} (1 - \cos \phi) \quad (5.8)$$

เราสามารถนำเอาความสัมพันธ์ระหว่าง λ_r และ ϕ นี้ไปแทนลงในสมการ (5.52), (5.25) เอกส และ (5.32) จะได้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_r = \frac{1-a}{1+a'} \times \frac{1}{\tan \phi}$$

$$\lambda_r = \frac{\sin \phi (2 \cos \phi - 1)}{(1 - \cos \phi)(2 \cos \phi + 1)} \quad (5.53)$$

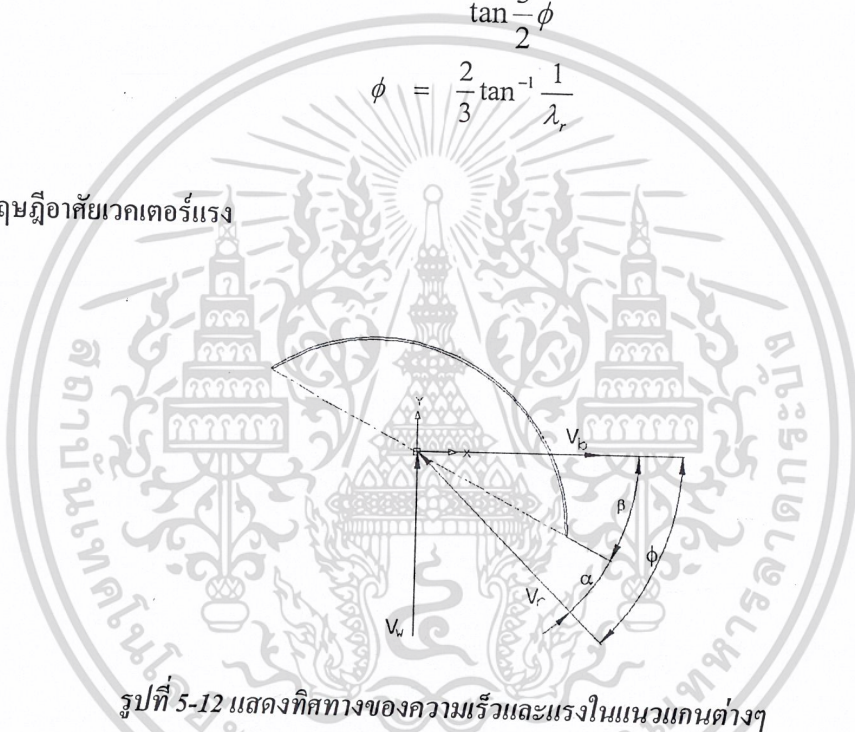
จากนั้นทำการจัดรูปใหม่ได้

$$\lambda_r = \frac{1}{\tan \frac{3}{2} \phi}$$

หรือ

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_r} \quad (5.7)$$

5.2.3 ทฤษฎีอาศัยเวกเตอร์แรง



รูปที่ 5-12 แสดงทิศทางของความเร็วและแรงในแนวแกนต่างๆ

จากรูปที่ 5-12 แสดงให้เห็นถึงความเร็วต่างๆ เริ่มตั้งแต่ ความเร็วลมที่เข้าปะทะ (V_w) ในขณะที่ใบพัดหมุนด้วยความเร็ว (V_b) ทำให้ความเร็วลมที่เข้าปะทะกับใบพัดจริงเป็นความเร็วสัมพัทธ์ (V_r) ซึ่งในการออกแบบใบพัดออกแบบให้ผลต่างระหว่างมุมติดตั้ง (β) ของใบพัด กับมุมความเร็วสัมพัทธ์ (ϕ) เท่ากับมุมปะทะ (α) ซึ่งได้เลือกใช้มุมปะทะที่ให้ค่าอัตราส่วนแรงยกและแรงต้านที่สูง เพื่อให้ได้แรงสุทธิ (F_{NET}) ที่มีค่ามาก โดยเราจะนำแรงสุทธินี้ไปหาแรงที่ทำให้ใบพัดหมุนได้ดังรูปที่ 5-12 ซึ่งขนาดของมุมสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\phi = \tan^{-1} \frac{V_w}{V_b} \quad (5.54)$$

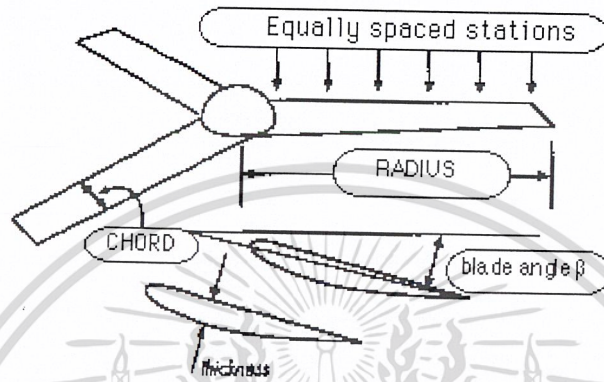
$$\beta = \phi - \alpha \quad (5.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4 ทฤษฎี Betz

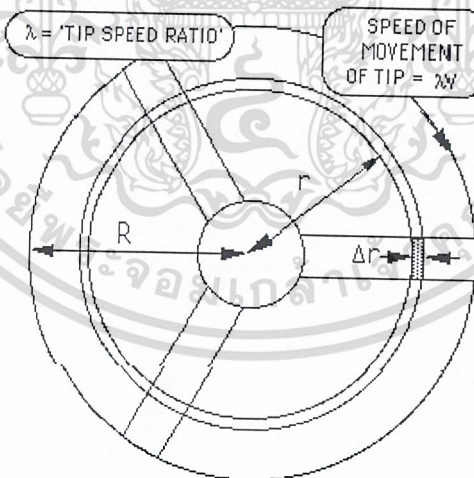
มีที่มาจากสถาบัน CAT หรือ Centre for Alternative Technology Wind power Course ซึ่งมี Hugh Piggott เป็นผู้วิจัยโดยได้ศึกษาถึงหลักการเดิมของ Betz ได้คิดเอาไว้ เพื่อนำมาออกแบบใบพัด

ในการออกแบบใบพัดในขั้นแรกเราจะต้องกำหนดขนาดความกว้างของใบพัดและขนาดของมุมบิดของใบในแต่ละจุดตามความยาวของใบก่อน



รูปที่ 5-13 ขนาดรูปร่างและมุมบิดของใบพัด

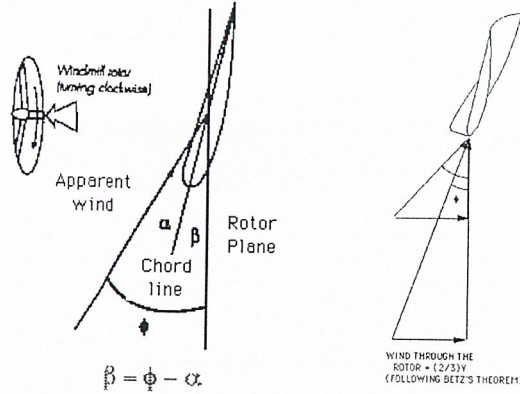
โดยกระบวนการคำนวณแรงและออกแบบรูปร่างที่ดีที่สุดนั้น จะอาศัยการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ และพิจารณาในแต่ละเอลิเมนต์นั้น



รูปที่ 5-14 แสดงเอลิเมนต์ของใบพัด

ในการออกแบบกังหันลมนี้ ค่ามุมปะทะ หรือ α จะขึ้นอยู่กับมุมของลมที่เข้าปะทะ ϕ และขนาดมุมบิดของใบพัด β ดังนั้นเราจึงได้ควบคุมมุมปะทะ ตลอดความยาวของใบพัด เพื่อที่จะได้สามารถควบคุมแรงยกและแรงต้านที่เกิดกับใบพัดได้ ซึ่งในการออกแบบได้ใช้หลักการของ Betz โดยเลือกมุมปะทะที่ให้แรงยกสูง และมีแรงต้านต่ำ หรือ ที่อัตราส่วนแรงยกต่อแรงต้านที่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

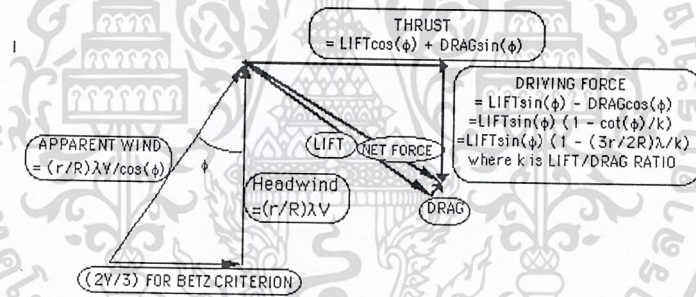


รูปที่ 5-15 แสดงมุมต่างๆ

เราสามารถคำนวณหาค่ามุมต่างๆ ได้ดังนี้

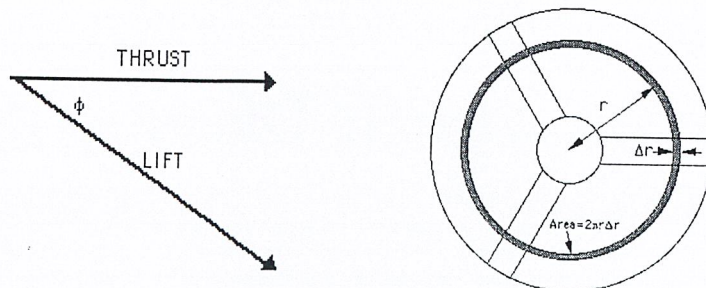
$$\phi = \tan^{-1} \frac{2R}{3r\lambda} \tag{5.56}$$

$$\beta = \phi - \alpha \tag{5.57}$$



รูปที่ 5-16 แสดงแรงที่เกิดขึ้นกับใบพัด

จากหลักการของ Betz กล่าวว่า ลมที่เข้าปะทะในแต่ละจุดบนพื้นที่ของใบพัดในขณะที่หมุนอยู่นั้น เมื่อออกจากใบพัดแล้วความเร็วของลมจะลดลงเหลือประมาณ 1/3 ของความเร็วก่อนเข้าปะทะสาเหตุอันเนื่องมาจากพลังงานส่วนหนึ่งสูญเสียไปกับการหมุนใบพัด



รูปที่ 5-17 แสดงทิศทางลม และพื้นที่ที่เล็กๆบนใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงผลัก thrust = Lift x cos ϕ

$$= \frac{4}{9} \rho A V^2 = \frac{4}{9} \rho (2\pi r \Delta r) V^2 \quad (5.58)$$

จัดรูปใหม่ได้

$$\begin{aligned} \text{Lift} &= C_L \left(\frac{\rho}{2} \right) BC (\Delta r) (V_{\text{apparent}})^2 \\ &= C_L \left(\frac{\rho}{2} \right) BC (\Delta r) \left(\frac{\lambda V (r/R)}{\cos \phi} \right)^2 \end{aligned} \quad (5.59)$$

ในที่สุดเราสามารถหาความกว้างของใบพัดได้เท่ากับ

$$\text{Chord} = \frac{16\pi R (r/R)}{9\lambda^2 B} \quad (5.60)$$

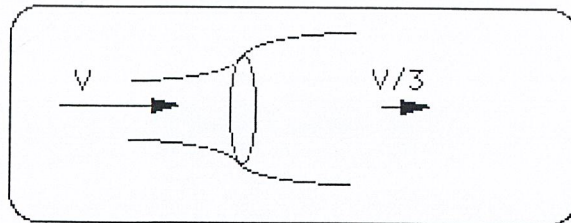
ในขณะที่

$$\begin{aligned} C_L &= \text{สัมประสิทธิ์แรงยก} \\ B &= \text{จำนวนของใบพัด} \\ C &= \text{ขนาดความกว้างของใบพัด} \\ BC(\Delta r) &= \text{ขนาดพื้นที่ของใบที่เกิดแรงยกในรัศมี } r \end{aligned}$$

5.2.4.1 ปัจจัยการสูญเสียที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ทางพลังงาน

ปัจจัยที่ 1

ลมที่ไหลออกไปทางด้านข้าง รอบๆของโรเตอร์ ซึ่งตามหลักการของ Betz ได้กล่าวไว้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ทางพลังงานมีค่าสูงสุดที่ 59.3 % โดยลมที่ไหลออกทางด้านหลังจะมีความเร็วเท่ากับหนึ่งในสามของความเร็วลมที่ทางเข้า

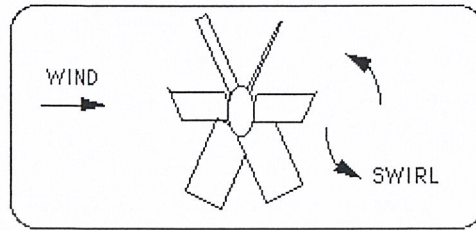


รูปที่ 5-18 ลมไหลเข้าปะทะ และไหลออกจากโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยที่ 2

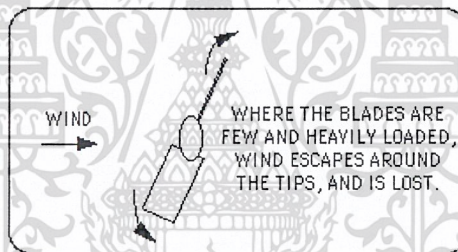
การสูญเสียอันเนื่องมาจากการหมุนวน ซึ่งมักจะเกิดกับโรเตอร์ที่มีแรงบิดสูงๆ และมีอัตราส่วนความเร็วปลาย (Tip speed ratio) ต่ำ



รูปที่ 5-19 การเกิดการหมุนวนทางด้านหลังของโรเตอร์

ปัจจัยที่ 3

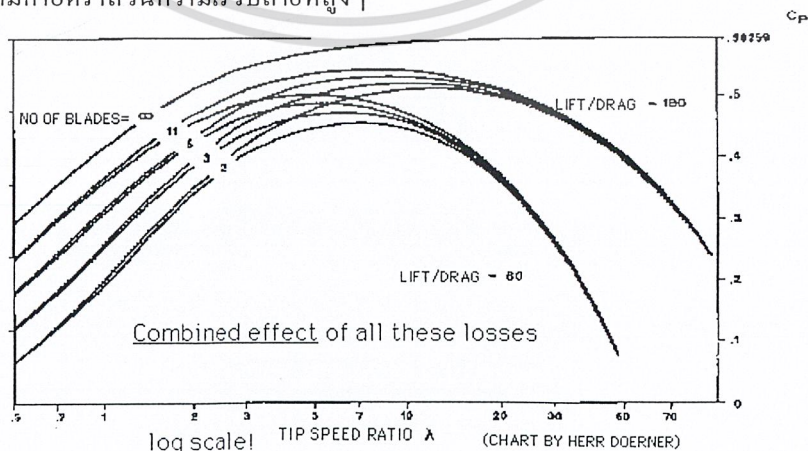
สำหรับกังหันลมที่มีจำนวนใบพัดน้อย จะเกิดแรงผลักที่สูง ซึ่งในขณะที่ลมไหลมากระทบกับใบพัดนั้น ลมจะไหลออกไปตามแนวรัศมีของใบแล้วไหลออกที่ปลายใบ ซึ่งเราจะเรียกการสูญเสียในลักษณะนี้ว่า การสูญเสียที่ปลายใบ (Tip loss)



รูปที่ 5-20 แสดงลมที่ไหลออกที่ปลายใบ

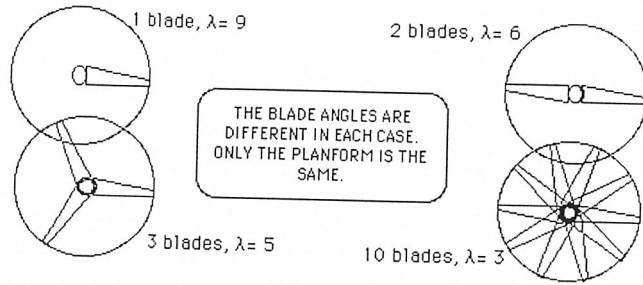
ปัจจัยที่ 4

การสูญเสียเนื่องมาจากแรงต้าน ซึ่งจะขึ้นอยู่กัอัตราส่วนแรงยกต่อแรงต้าน โดยจะมีผลอย่างมากกับโรเตอร์ที่มีค่าอัตราส่วนความเร็วปลายที่สูงๆ



รูปที่ 5-21 แสดงค่าสัมประสิทธิ์พลังงาน

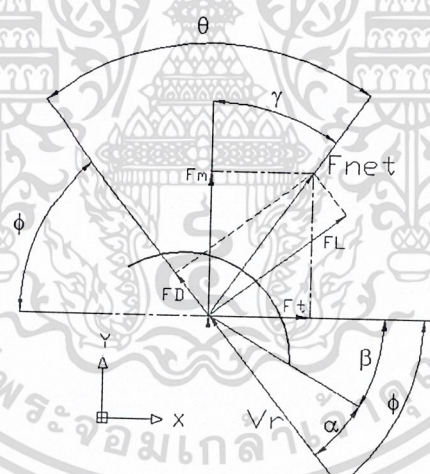
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-22 แนะนำการเลือกใช้ Tip speed ratio

5.3 การคำนวณพลังงานที่ได้จากใบพัด

เราสามารถคำนวณหาพลังงานที่ได้จากใบพัดได้ จากรูปที่ 5-23 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีลมเข้าปะทะกับใบพัดจะก่อให้เกิดแรงยกซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับความเร็วลมสัมพัทธ์ และแรงต้านซึ่งมีทิศทางเดียวกับความเร็วสัมพัทธ์ ซึ่งเราสามารถหาแรงสุทธิ (F_{NET}) ได้จากสมการที่ (5.67) และเมื่อแตกแรงสุทธิเข้าไปในแนวแกน x และ y เราจะได้แรงที่ทำให้ใบพัดสามารถหมุนได้ (F_t) ซึ่งหาได้จากสมการที่ (5.68) และแรงที่ทำให้ใบพัดเกิดความเสียหายเนื่องจากโมเมนต์ตัด (F_m) ซึ่งหาได้จากสมการที่ (5.69)



รูปที่ 5-23 แสดงทิศทางของแรงต่างๆ

$$\beta = \phi - \alpha \tag{5.61}$$

$$\gamma = \phi + \theta - 90 \tag{5.62}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{V_w}{V_b} \tag{5.63}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{F_L}{F_D} \tag{5.64}$$

$$F_L = C_L \times \frac{1}{2} \rho V_r^2 \times A \tag{5.65}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_D = C_D \times \frac{1}{2} \rho V_r^2 \times A \quad (5.66)$$

$$F_{NET} = \sqrt{F_L^2 + F_D^2} \quad (5.67)$$

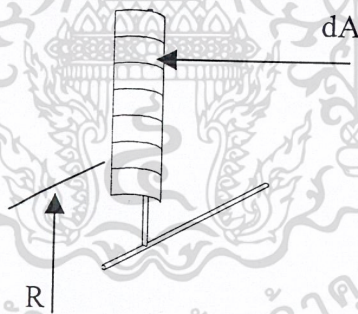
$$F_t = F_{NET} \times \sin \gamma \quad (5.68)$$

$$F_m = F_{NET} \times \cos \gamma \quad (5.69)$$

$$V_r = \sqrt{V_w^2 + V_b^2} \quad (5.70)$$

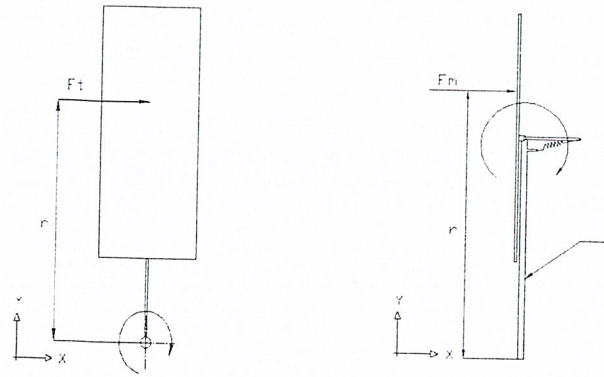
ขณะที่	β	:	ขนาดมุมการติดตั้งของใบพัด	
	ϕ	:	ขนาดมุมของความเร็วสัมพัทธ์	
	α	:	ขนาดของมุมปะทะ	
	θ	:	ขนาดมุมระหว่างแรงยกและแรงต้าน	
	F_t	:	แรงผลักดันทำให้ใบพัดหมุน	(N)
	F_m	:	แรงผลักดันทำให้ใบพัดเกิดความเสียหาย	(N)
	V_r	:	ความเร็วสัมพัทธ์	(m/s)

เมื่อเราได้ค่า C_L, C_D แล้วเราสามารถ คำนวณหาพลังงานที่ได้จากใบพัด โดยเริ่มจากการแบ่งพื้นที่ของใบพัดออกเป็นส่วนย่อยๆ ดังรูปที่ 5-24



รูปที่ 5-24 แสดงการแบ่งพื้นที่บนใบพัด

หาความเร็วของใบพัดในแต่ละจุดบนพื้นที่ย่อยๆ (dA) ซึ่งความเร็วตามแนวความยาวของใบพัดแต่ละจุดจะแตกต่างกัน จากนั้นทำการหามุม ϕ ได้จากสมการที่ (5.63) และหา V_r ได้จากสมการที่ (5.70) ซึ่งเมื่อทำการหาค่าครบทุกตำแหน่งแล้ว จึงจะสามารถหาค่า มุม γ ได้จากสมการที่ (5.62) ต่อมาทำการหาแรงสุทธิ (F_{NET}) จากสมการที่ (5.67) เพื่อหาค่า F_t, F_m จากสมการที่ (5.68) และ (5.69) ตามลำดับ สุดท้ายจึงหาแรงบิดที่ได้จากใบพัดโดย



รูปที่ 5-25 แสดงทิศทางของแรงบิด (F_t) และแรงโมเมนต์ตัด (F_m)

$$T = \sum_{i=1}^N F_{t_i} \times r_i \tag{5.71}$$

และ โมเมนต์ที่ทำให้เกิดความเสียหายกับใบพัดจาก

$$M = \sum_{i=1}^N F_{m_i} \times r_i \tag{5.72}$$

และเราสามารถจำนวนของใบพัดได้จาก

$$\text{จำนวนใบ} = \frac{\text{พลังงานที่ต้องการ}}{\text{(แรงบิดแต่ละใบ} \times \text{ความเร็วรอบของใบ)}} \tag{5.73}$$

จากการคำนวณข้างต้นได้ทำการทดลองคำนวณกำหนดความเร็วรอบหลายๆช่วง พบว่าเมื่อความเร็วรอบมากขึ้น แรงบิดที่ได้จะลดลง ทำให้เราสามารถสรุปได้ว่าถ้าเราเลือกใช้ความเร็วรอบที่สูงเกินไปจะกลายเป็นว่า จากเดิมที่ลมให้พลังงานกับใบพัด กลับเป็นใบพัดต้องให้พลังงานกับลม เช่น ใบพัดในหม้อน้ำรถยนต์ เป็นต้น

ช่วง	ระยะ	V_b	V_r	ϕ	β	α	F_L	F_D	θ	γ	F_{NET}	F_t	F_m
1													
2													
3													

ตารางที่ 5-3 ค่าต่างๆที่ต้องคำนวณเพื่อหาแรงบิดและโมเมนต์ที่ได้จากใบพัดในแต่ละใบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.1 ขั้นตอนในการคำนวณค่าต่างๆของใบพัด

ในการออกแบบกังหันลมนี้ เราได้เลือกใช้ความเร็วลมที่ 5 เมตรต่อวินาที ความเร็วรอบของใบพัดเท่ากับ 60 RPM (6.283 rad/s) อุณหภูมิขณะทดลองประมาณ 30 องศาเซลเซียส เนื่องจากถ้าเราเลือกความเร็วลมที่ต่ำเกินไปเราจะได้ใบพัดที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งจะเกิดปัญหาในการทดลองได้ เพราะเราจะต้องติดตั้งชุดกั้นบนรถยนต์ ดังนั้นถ้าใบพัดมีขนาดใหญ่ เราก็จะต้องสร้างโครงสร้างที่มีความสูงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ทำให้มีผลต่อการเก็บข้อมูลในระหว่างการทดลอง และมีความยุ่งยากในการติดตั้งบนรถยนต์ซึ่งจะเป็นอันตรายได้

ในการออกแบบความเร็วลมที่จะให้ชุดอุปกรณ์ safety เริ่มพบบใบพัดหลบลม เราได้เลือกความเร็วลมที่ 6 เมตรต่อวินาที เนื่องจากในการออกแบบเราต้องการให้กังหันลมทำงานตามสภาวะที่เราต้องการเท่านั้น ซึ่งหมายความว่าในการทำงานจริงเราจะเลือกความเร็วลมที่ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตกำลังงานที่ดีที่สุด โดยอาจจะเป็นความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละพื้นที่การติดตั้งกังหันก็ได้ ซึ่งถ้าความเร็วลมมากกว่านี้ ประสิทธิภาพในการผลิตกำลังงานจะลดลง และถ้าเราปล่อยให้ใบพัดหมุนต่อไป เมื่อความเร็วลมเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดโดเมนตัดที่กั้นใบพัดสูงมากขึ้นด้วย ทำให้ใบพัดเกิดความเสียหายได้ สำหรับการออกแบบชุดอุปกรณ์ safety นี้ เราได้อธิบายในบทที่ 7

เราสามารถแบ่งขั้นตอนในการคำนวณได้ออกเป็น ดังนี้

ขั้นที่ 1 การคำนวณหาความเร็วของใบพัด (V_b) จากสมการ

$$V_b = N \times R \quad (5.74)$$

ในขณะ
 N = ความเร็วรอบของใบพัด (RPM)
 R = รัศมีความยาวของใบพัด (m)
 V_b = ความเร็วบนใบพัด (m/s)

ขั้นที่ 2 การคำนวณหาความเร็วสัมพัทธ์ (V_r) จากสมการ

$$V_r = \sqrt{V_w^2 + V_b^2} \quad (5.70)$$

ในขณะ
 V_w = ความเร็วลม (m/s)

ขั้นที่ 3 การคำนวณหามุมความเร็วสัมพัทธ์ (ϕ) จากสมการ

$$\phi = \tan^{-1} \frac{V_w}{V_b} \quad (5.63)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่ 4 การคำนวณมุมบิดของใบพัด (β) จากสมการ

$$\beta = \phi - \alpha \quad (5.61)$$

ในขณะที่ $\alpha =$ มุมปะทะของใบพัด

ขั้นที่ 5 หาค่า C_L และ C_D ได้จากตารางในภาคผนวกแล้วจึงคำนวณหา F_L และ F_D

$$F_L = C_L \times \frac{1}{2} \rho V_r^2 \times A \quad (5.65)$$

$$F_D = C_D \times \frac{1}{2} \rho V_r^2 \times A \quad (5.66)$$

ในขณะที่

ρ	=	ความหนาแน่นของอากาศ	(kg/m ³)
V_r	=	ความเร็วสัมพัทธ์	(m/s)
A	=	พื้นที่ที่ภาพฉาย	(m ²)
F_L	=	แรงยก	(N)
F_D	=	แรงต้าน	(N)

ขั้นที่ 6 การคำนวณหาแรงสุทธิ (F_{NET}) ได้จาก

$$F_{NET} = \sqrt{F_L^2 + F_D^2} \quad (5.67)$$

ขั้นที่ 7 การคำนวณมุม θ ได้จากสมการ

$$\theta = \tan^{-1} \frac{F_L}{F_D} \quad (5.64)$$

ขั้นที่ 8 คำนวณมุม γ ได้จากสมการ

$$\gamma = \phi + \theta - 90 \quad (5.62)$$

ขั้นที่ 9 คำนวณหาแรงบิด (F) และแรงตัด (F_m) ได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_t = F_{NET} \times \sin \gamma \quad (5.68)$$

$$F_m = F_{NET} \times \cos \gamma \quad (5.69)$$

ขั้นที่ 10 คำนวณหาแรงบิดที่ได้จากใบพัดได้จาก

$$T = \sum_{i=1}^N F_{t_i} \times r_i \quad (5.71)$$

ขั้นที่ 11 คำนวณหาโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นกับใบพัดได้จาก

$$M = \sum_{i=1}^N F_{m_i} \times r_i \quad (5.72)$$

ขั้นที่ 12 คำนวณหาจำนวนของใบพัดได้จาก

$$\text{จำนวนใบ} = \frac{\text{พลังงานที่ต้องการ}}{(\text{แรงบิดแต่ละใบ} \times \text{ความเร็วรอบของใบ})} \quad (5.73)$$

ในการแบ่งพื้นที่บนใบพัด เราได้เลือกแบ่งพื้นที่ออกเป็น 3 ส่วน เพราะจากการคำนวณโดยถ้าเราแบ่งพื้นที่น้อยกว่านี้ เราจะได้แรงบิดที่ต่ำสาเหตุเนื่องมาจากมุมบิดของใบพัดจะไม่แตกต่างกันไปจากมุมที่คำนวณได้มาก และถ้าเราแบ่งมากกว่านี้ ค่าแรงบิดที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันไปจากการแบ่ง 3 ส่วนเท่าใดนัก และเป็นการยุ่งยากต่อการผลิตจริงด้วย เราจึงเลือกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน หลังจากนั้นจึงเริ่มคำนวณค่าต่างๆ ในแต่ละจุดบนใบพัดตั้งแต่ขั้นที่ 1 - 11 โดยค่าที่แสดงในตารางข้างล่างนี้เราได้ใช้มุมบิดที่ได้จากการวัดจากใบพัดหลังการผลิต ซึ่งค่ามุมบิดจะแตกต่างกันไปจากค่าที่คำนวณได้จากทางทฤษฎี

ช่วง	ระยะ	V _b	V _r	φ	β	α	F _L	F _D	F _{NET}	θ	γ	F _t	F _m
1	0.375	2.36	5.53	43.2	31.8	11.4	0.65	0.32	0.73	63.8	17.2	0.22	0.69
2	0.525	3.29	6.00	37.7	19.0	18.7	1.17	0.46	1.26	68.4	16.4	0.36	1.21
3	0.675	4.24	6.36	34.6	16.9	17.6	1.25	0.51	1.35	68.2	13.2	0.31	1.31
4	0.825	5.18	7.20	29.3	15.1	14.3	1.34	0.60	1.50	66.0	5.4	0.15	1.49
5	0.975	6.13	7.90	26.9	11.8	14.4	1.63	0.73	1.80	66.0	2.1	0.07	1.8
6	1.125	7.07	8.66	23.5	7.3	16.2	2.1	0.91	2.31	67.0	0.5	0.02	2.31

ตารางที่ 5-4 แสดงค่าต่างๆที่คำนวณได้ ของใบพัดแบบ VECTOR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

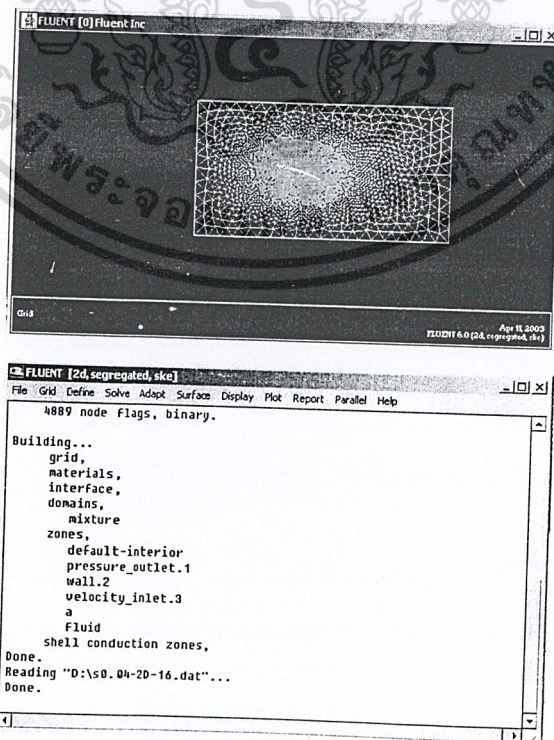
ช่วง	ระยะ	V_b	V_r	ϕ	β	α	F_L	F_D	F_{NET}	θ	γ	F_t	F_m
1	0.375	2.36	5.53	43.2	22.6	20.6	1.02	0.39	1.09	68.9	22.1	0.41	1.00
2	0.525	3.29	6.00	37.7	15.4	22.6	1.20	0.52	1.31	66.1	14.4	0.33	1.26
3	0.675	4.24	6.36	34.6	9.8	24.7	1.52	0.66	1.65	66.6	11.2	0.32	1.62
4	0.825	5.18	7.20	29.3	6.1	23.3	1.80	0.74	1.95	66.6	5.9	0.20	1.94
5	0.975	6.13	7.90	26.9	2.3	23.8	2.17	0.89	2.35	67.6	3.7	0.15	2.34
6	1.125	7.07	8.66	23.5	-1.4	25.0	2.81	1.22	3.06	66.5	0.0	0.00	3.06

ตารางที่ 5-5 แสดงค่าต่างๆที่คำนวณได้ ของใบพัดแบบ SWD

5.4 การศึกษาแนวทางการใช้งานโปรแกรมทางด้าน CFD

วัตถุประสงค์ในการ simulate คือ ศึกษาลำดับขั้นตอนการใช้งานทางด้าน FINITE VOLUME เพื่อนำมาช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบ รวมไปถึงการนำเอาโปรแกรมไปประยุกต์ใช้เพิ่มเติมหรือทดแทนบางส่วนของวิธีการออกแบบที่มีอยู่เดิม

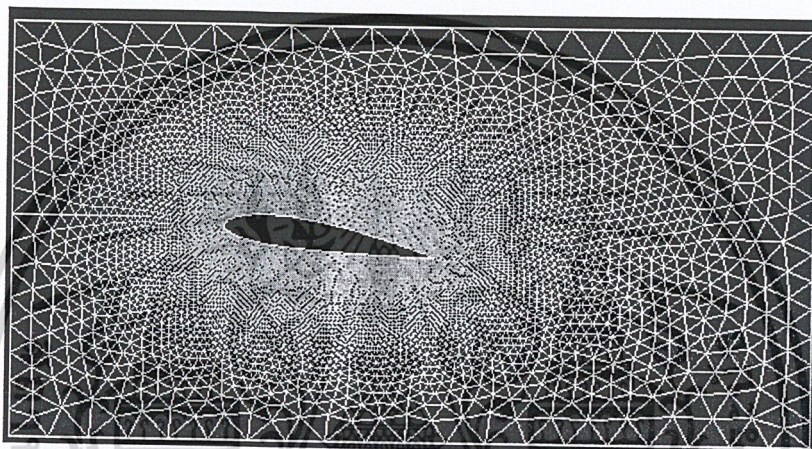
ซึ่งในขั้นแรกนี้เราได้ทำการฝึกการใช้งานในเบื้องต้นก่อน โดยเริ่มตั้งแต่การสร้างแบบจำลองขึ้นมาโดยใช้โปรแกรม GAMBIT ซึ่งในส่วนนี้จะรวมขั้นตอนตั้งแต่การสร้าง model และการกำหนด boundary ให้กับงาน จากนั้นจึงส่งไฟล์ของ model ไปให้โปรแกรม FLUENT ทำการวิเคราะห์อีกต่อหนึ่งซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 5-21



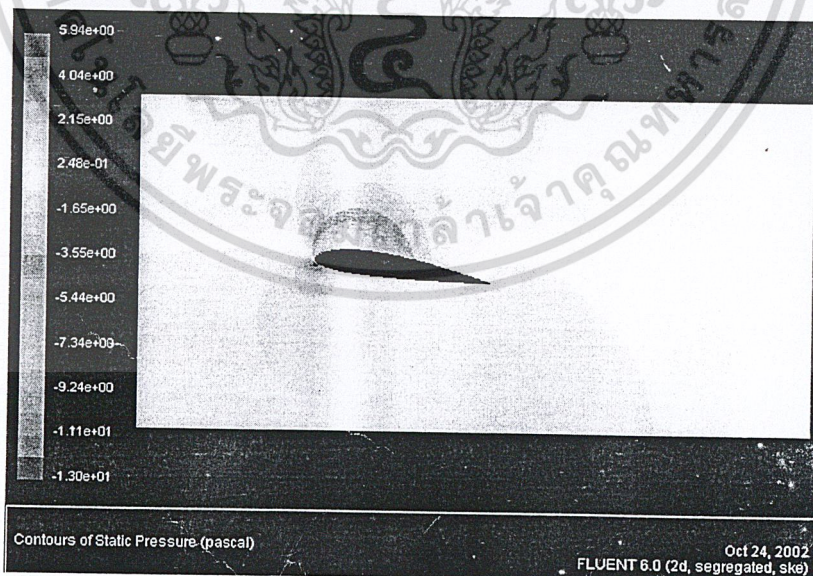
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 5-26 แสดงลักษณะรูปร่างของโปรแกรม FLUENT ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเริ่มใช้งานได้แล้วจึงทดลอง simulate งานในแบบ 2 มิติ ซึ่งในที่นี้ได้เลือก simulate อากาศ ขณะไหลผ่านปีกเครื่องบิน ซึ่งเรามีข้อมูลผลการทดลองอยู่แล้ว เพื่อที่จะนำมาตรวจสอบผลที่ได้จากการ simulate และการ simulate ปีกเครื่องบินนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบใบพัดได้ โดยใช้เป็นเครื่อง เพื่อช่วยในการวิเคราะห์หว่า ที่มุมปะทะของปีกเครื่องบิน (airfoil) ในแต่ละแบบนั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรง ยกและแรงต้านเท่าใด

โดยได้เลือก simulate ปีก airfoil ของ naca 0012 และ naca 2415 ที่มุมปะทะต่างๆได้ผลดังรูป ที่ 5-32 และรูปที่ 5-33 ตามลำดับ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่ไม่เกิน 10 %

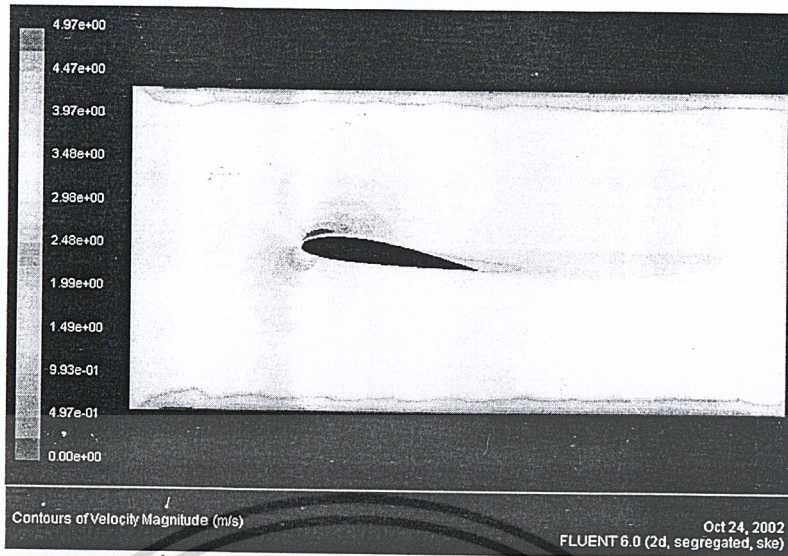


รูปที่ 5-27 แสดงการสร้าง mesh ของปีก naca 0012



รูปที่ 5-28 แสดง pressure contour ของ naca 0012

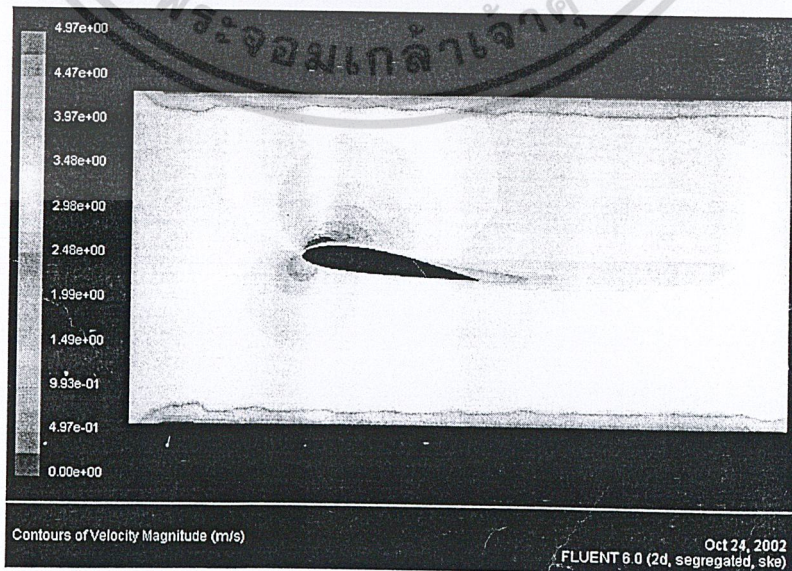
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



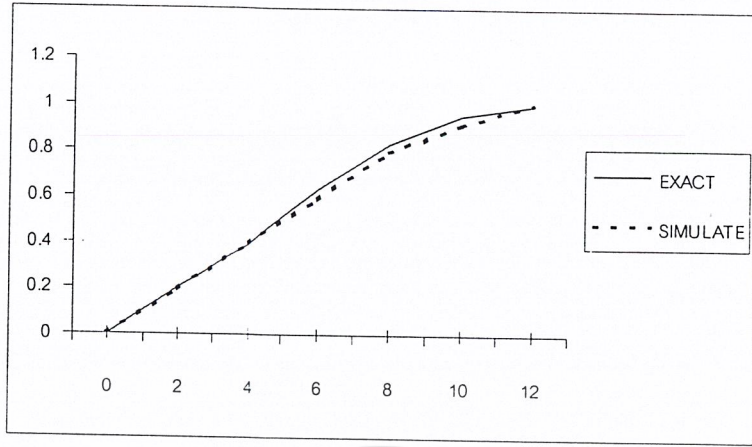
รูปที่ 5-29 แสดง velocity contour ของ naca 0012



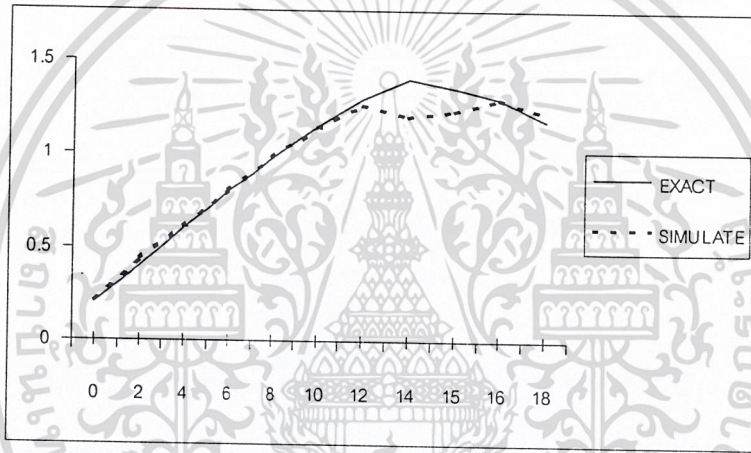
รูปที่ 5-30 แสดง pressure contour ของ naca 2415



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 5-31 แสดง velocity contour ของ naca 2415 นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

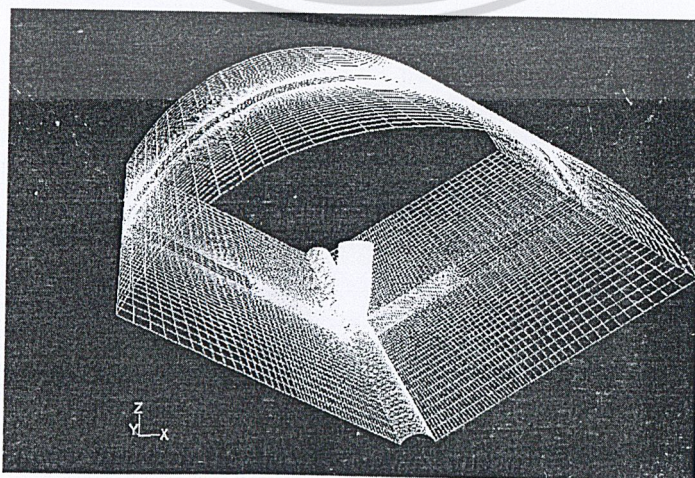


รูปที่ 5-32 การเปรียบเทียบข้อมูล ส.ป.ส. แรียงยก ระหว่างผลการทดลองและ simulate ของ naca 0012

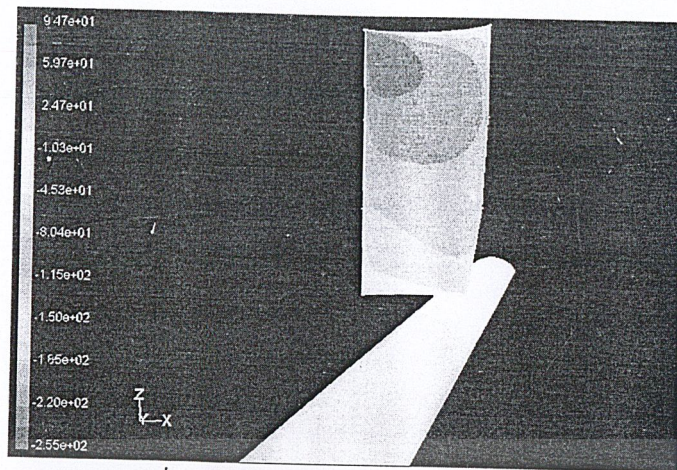


รูปที่ 5-33 การเปรียบเทียบข้อมูล ส.ป.ส. แรียงยก ระหว่างผลการทดลองและ simulate ของ naca 2415

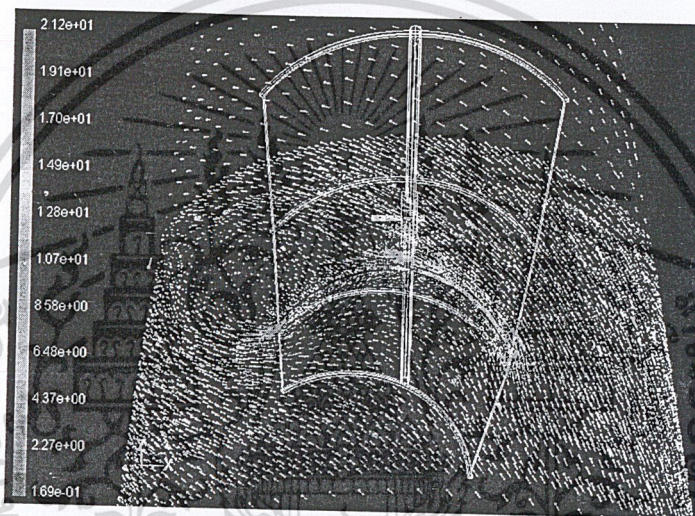
จากนั้นจึงได้ทำการ simulate ในแบบ 3 มิติ โดยจำลองแบบ cyclic ซึ่งใช้การจำลองใบพัดเพียง 1 ใบ ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 5-29 ในการจำลองใช้ turbulent model แบบ k-e ซึ่งผลที่ได้ยังไม่ตรงกับ การทดลองเท่าใดนักซึ่งยังคงต้องศึกษาลักษณะของ turbulent model ให้มากกว่านี้จึงให้ผลที่ดีกว่านี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 5-34 แสดงลักษณะการจำลองแบบ periodic ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

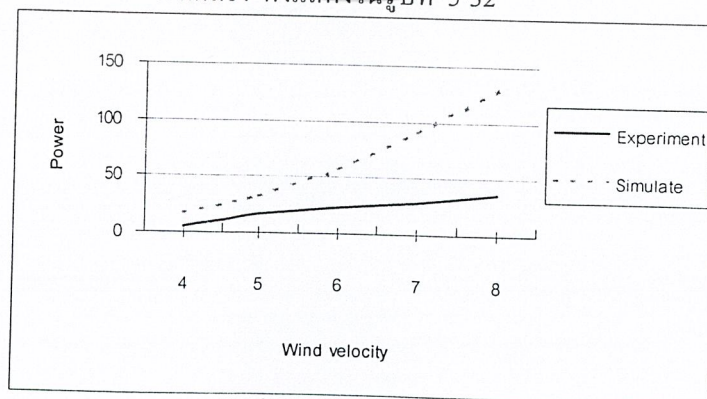


รูปที่ 5-35 แสดง pressure contour ของใบพัด



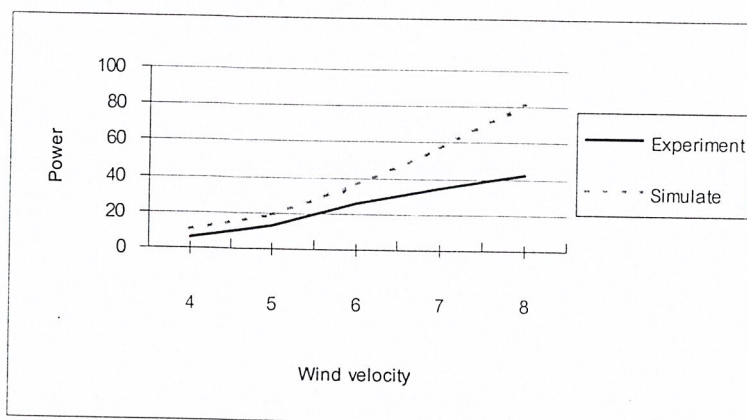
รูปที่ 5-36 แสดง relative velocity ของใบพัด

โดยจากรูปที่ 5-31 นี้ เราจะเห็นได้ว่าเกิดความปั่นป่วนอย่างสูงที่บริเวณด้านหลังของใบพัด ซึ่งความปั่นป่วนนี้เองจะเป็นตัวลดประสิทธิภาพกำลังงานของใบพัด โดยถ้าเราสามารถที่จะลดความปั่นป่วนนี้ได้ โดยอาจจะเลือกใช้ใบพัดแบบ naca เป็นต้น ซึ่งค่าความแตกต่างผลของพลังงานที่ได้จากการ simulate กับพลังงานที่ได้จากการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 5-32



รูปที่ 5-37 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากการทดลองกับพลังงานที่ได้จากการ simulate ของ ใบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน **พัดแบบ VECTOR** นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-38 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากการทดลองกับพลังงานที่ได้จากการ *simulate* ของ ใบพัดแบบ SWD



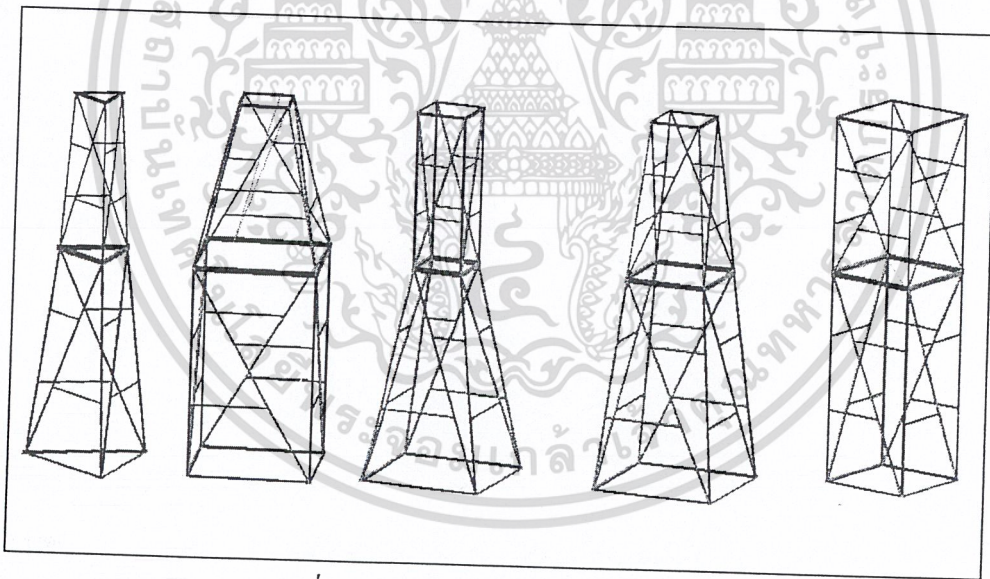
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

โครงสร้าง

6.1 บทนำ

ในส่วนการออกแบบโครงสร้างนี้ ได้ทำการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างเพื่อให้สามารถรับภาระเนื่องจากน้ำหนักที่กดลงมา และภาระเนื่องจากแรงลมได้ ซึ่งมีจุดประสงค์คือสามารถรับความเค้นได้สูง และใช้ปริมาณวัสดุในการผลิตที่น้อย โดยในการวิเคราะห์ได้ใช้หลักการทางด้านสถิตศาสตร์ (static) ซึ่งจะเป็นการแก้ปัญหาด้วยหลักการสมดุลย์แรงและโมเมนต์ภายใต้สมมุติฐานว่าในขณะนั้นเป็นสภาวะ static และได้นำเอาโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้าน Finite element ชื่อโปรแกรม Nastran มาช่วยในการออกแบบ ซึ่งสามารถลดระยะเวลาที่ต้องใช้ในการคำนวณลงได้ และเป็นการเพิ่มทักษะความรู้ในด้านการประยุกต์นำเอาโปรแกรมมาช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบด้วย โดยในขั้นต้นเราได้ทำการออกแบบชนิดของโครงสร้างมาทั้งหมด 5 แบบด้วยกัน ดังรูป 6-1 เรียงลำดับหมายเลขจาก 1-5 จากด้านซ้ายมือสุดไปขวามือสุดตามลำดับ จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความเสียหายด้วยทฤษฎีดังต่อไปนี้



รูปที่ 6-1 แสดงรูปแบบของโครงสร้างทั้ง 5 แบบ

6.2 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง

6.2.1 เสา

เสามีลักษณะเป็นท่อนตรงและรับแรงกดในแนวแกน ถ้าแรงมีค่าไม่มากนักเสาที่ยาวก็ยังคงอยู่ในสภาพที่ตรงได้ แต่ถ้าแรงเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่ง เสาดังกล่าวก็อาจจะเกิดการโก่งงอขึ้น (buckling) แรงที่ทำให้เกิดการโก่งงอนี้เรียกว่า แรงวิกฤต (critical load) ความเค้นที่เกิดในขณะที่เสาจะเริ่มเกิดการโก่งงออาจจะต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้นใช้งานก็ได้อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดการโก่งงอขึ้นแล้วชิ้นงานนั้นก็ไม่สามารถที่จะทำหน้าที่ได้ตามต้องการ ฉะนั้นการออกแบบจึงอาจจะจำกัดแรงที่จะทำให้เกิดการโก่งงอแทนที่จะจำกัดความเค้น

ชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลจำนวนมากก็ทำหน้าที่เช่นเดียวกับเสา เช่น ก้านสูบ สูตรที่ใช้กับเสาจะจำแนกออกตามอัตราส่วนความเพรียว (slenderness ratio) L_c/k โดยที่

L_c คือความยาวสมมูล (equivalent length)

$$k = (I/A)^{1/2}$$

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด

A คือพื้นที่หน้าตัด

เนื่องจากการออกแบบเสาที่อาจจะเกิดการโก่งงอจะจำกัดแรงกด แทนที่จะจำกัดความเค้น ดังนั้นจึงต้องใช้ค่าความปลอดภัยกับแรงกด ถ้าให้ F_c เป็นแรงวิกฤต แรงกดใช้งานคือ $F = F_c/N$

สำหรับเสาที่มีความยาวจะนิยมใช้สูตรของออยเลอร์ (Euler) คือ

$$F = \frac{\pi^2 EA}{N(L_c/k)^2} = \frac{\pi^2 EI}{NL_c^2} \quad (6.1)$$

ซึ่งถ้าเป็นหลัก โครงสร้างแล้วจะใช้สูตรของออยเลอร์เมื่ออัตราส่วนความเพรียวมากกว่า 115 จากสูตรจะเห็นว่าเสาจะเกิดการโก่งรอบแกน ซึ่งโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดหรือรัศมีจอร์เจชันมีค่าน้อยที่สุด ส่วนค่าความปลอดภัยสำหรับเสายาวนี้ ในทางการออกแบบเครื่องกลแนะนำให้ใช้ประมาณ 3.5

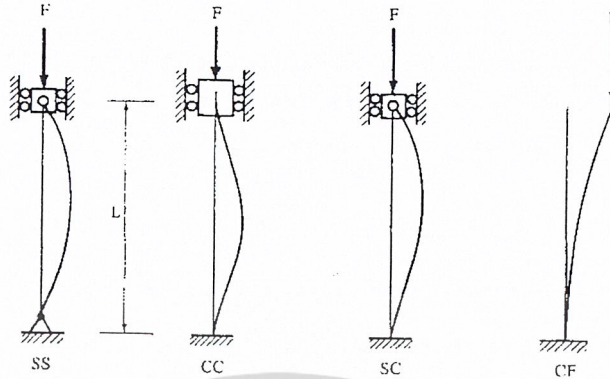
สำหรับค่าความยาวสมมูลนี้ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของปลายชิ้นงานที่ยึดอยู่ ดังรูปที่ 6-2

ปลายยึดแบบธรรมดา (SS : simply supported) $L_c = L$ (6.2 ก)

ปลายยึดแน่นทั้งสองข้าง (CC : clamped) $L_c = L/2$ (6.2 ข)

ปลายยึดแบบธรรมดา – ยึดแน่น (SC : simply supported-clamped) $L_c = 0.707L$ (6.2 ค)

ปลายยึดแน่นอิสระ (CF : clamped-free) $L_c = 2L$ (6.2 ง)



รูปที่ 6-2 แสดงรูปการยึดที่ปลายเสาแบบต่างๆ

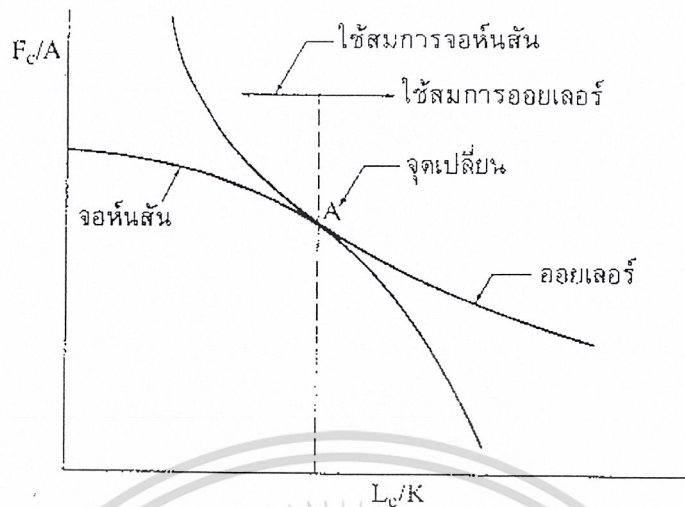
จะเห็นว่าปลายแบบ CC มีความแข็งแรงสูงสุดและปลายแบบ CF รับแรงกดได้น้อยที่สุดในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่มีลักษณะเช่นเดียวกับเสา ปลายมักจะเป็นแบบ SS, SC หรือ CF ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะที่แท้จริงของชิ้นงานนั้น

สำหรับเสาที่มีขนาดสั้นลงมาก สูตรของออยเลอร์จะใช้งานไม่ได้ดีนัก ทั้งนี้เพราะความเสียหายที่แท้จริงอาจจะเนื่องมาจากผลของการโก่งงอ และการที่ความเค้นในเสาเกินขีดจำกัดยืดหยุ่นพร้อมกันในกรณีเช่นนี้ผู้ออกแบบมักจะนิยมใช้สูตรของจอห์นสัน (Johnson) หรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าสูตรพาราโบลา (parabolic formula) คือ

$$F = \frac{\sigma_y A}{N} \left(1 - \frac{\sigma_y (L_e/k)^2}{4\pi^2 E} \right) \quad (6.3)$$

สำหรับเหล็กโครงสร้างแล้ว จะใช้สูตรของจอห์นสันเมื่ออัตราส่วนความเพริยามีค่าประมาณ $40 < L_e/k \leq 115$

เนื่องจากเส้นกราฟที่ได้จากสูตรออยเลอร์และจอห์นสันจะสัมผัสกันที่จุด A ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งเรียกว่าจุดเปลี่ยน (transition point) และค่า $L_e/k = 115$ ดังกล่าวมาแล้วก็คือค่าประมาณที่จุดนี้ เพราะฉะนั้นสำหรับวัสดุอื่นๆ ที่มีค่า E แตกต่างกันไปอีกมาก ก็อาจจะหาจุดเปลี่ยนเพื่อเลือกใช้สูตรที่ถูกต้องได้ โดยการให้ความลาด (slope) ของกราฟที่ได้จากสมการที่ (6.1) และสมการที่ (6.3) เท่ากัน คือ



รูปที่ 6-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับอัตราส่วนความเพียว

$$\left. \frac{d(F/A)}{d(L_e/k)} \right|_{euler} = \left. \frac{d(F/A)}{d(L_e/k)} \right|_{johnson}$$

ซึ่งจะได้จุดเปลี่ยนคือ

$$\frac{L_e}{k} = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma_y}} \tag{6.4}$$

สำหรับสูตรของเสาอื่นๆ ที่มีอยู่ แต่ไม่เป็นมีนิยมนำใช้ในการออกแบบเครื่องจักรกลคือ สูตรเส้นตรง และสูตรซีแคนต์(secant formula) ซึ่งจะไม่กล่าวในถึงในที่นี้ ผู้ที่สนใจจะหาดูได้จากหนังสือกลศาสตร์วัสดุทั่วไป

สมการที่ (6.1) และสมการที่ (6.3) อาจจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\sigma_e = \alpha \frac{F}{A} \tag{6.5}$$

โดยที่

$$\alpha = \frac{\sigma_y (L_e/k)^2}{\pi^2 E} \quad \text{สำหรับสูตรของออยเลอร์}$$

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{\sigma_y (L_e/k)^2}{4\pi^2 E}} \quad \text{สำหรับสูตรของจ้อหั่นสั้น}$$

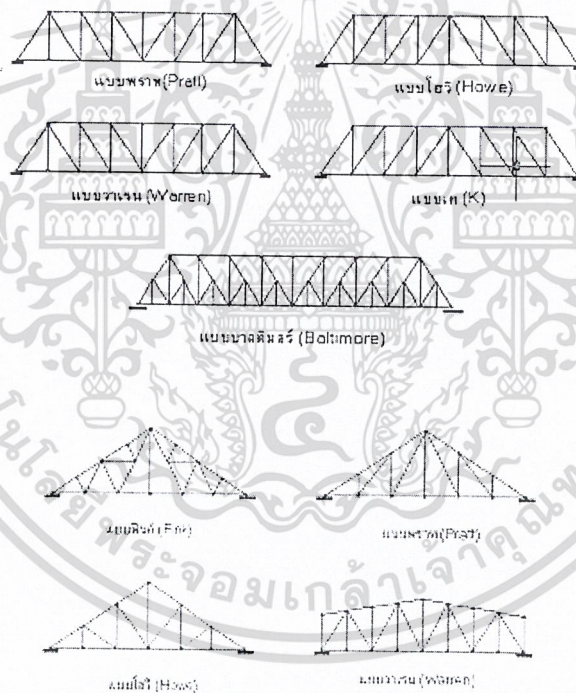
ค่า σ_c นี้เรียกว่า ความเค้นสมมูล(equivalent stress) ซึ่งได้มาจากการให้

$$N = \frac{F_c}{F} = \frac{\sigma_y}{\sigma_e} \quad (6.6)$$

และเป็นการบอกถึงความปลอดภัยอีกวิธีหนึ่งว่า ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าความต้านแรงดึงครากเท่าไร

6.2.2 หลักการวิเคราะห์ทางสถิตศาสตร์ (static)

โครงสร้างในระนาบคือ โครงสร้างเกร็งในระนาบที่ประกอบขึ้น โดยการนำชิ้นส่วนต่างๆ มายึดต่อปลายเข้าด้วยกันด้วยหมุดยึดหรือการเชื่อมได้แก่โครงสร้างหลังคา โครงสร้างสะพานดังรูปที่ 6-4



รูปที่ 6-4 แสดงลักษณะของโครงสร้างแบบต่างๆ

ในการคำนวณเรามีข้อสมมติดังนี้

1. ทุก ๆ ชิ้นส่วนของโครงสร้าง ถือว่ามีแรงกระทำที่ปลายทั้งสองของชิ้นส่วนเท่านั้น
2. การยึดต่อเข้าด้วยกันของชิ้นส่วนถือว่าใช้หมุดร้อย (pin) เป็นตัวยึดต่อ
3. แรงภายนอกและการส่งผ่านแรงของชิ้นส่วน ให้กระทำผ่านหมุดร้อย (pin)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.น้ำหนักของชิ้นส่วนถือว่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับแรงภายนอกที่มากระทำ ในกรณีที่ต้องคิณน้ำหนักของชิ้นส่วนให้แบ่งน้ำหนักออกเป็นสองส่วนคือ $w/2$ ไปกระทำที่จุดปลายทั้งสองด้านของชิ้นส่วน ชนิดของโครงสร้างในระนาบ เราสามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดคือ

1. โครงสร้างในระนาบที่สามารถคำนวณได้โดยสมการสมดุล ($\sum \vec{F} = 0$ และ $\sum \vec{M} = 0$)
จำนวนตัวไม่ทราบค่า = จำนวนสมการ

$$M+3 = 2j \quad (6.7)$$

โดยที่ m คือ จำนวนชิ้นทั้งหมดของโครงสร้าง

3 คือ จำนวนสูงสุดของตัวไม่ทราบค่า (unknowns) ที่จุดรองรับของโครงสร้าง โดยทั่วไป

j คือ จำนวนจุดยึดต่อทั้งหมดของโครงสร้าง

ตัวอย่างเช่น โครงสร้างดังรูป 6-5 จะมีจำนวนชิ้นทั้งหมดคือ $m = 7$ จำนวนตัวไม่ทราบค่าที่จุดรองรับในที่นี้คือ $3(A_x, A_y, \text{ และ } D_y)$ จำนวนจุดยึดต่อทั้งหมดคือ $j = 5$ ดังนั้น $m+3 = 2j = 10$

รูปที่ 6-5 แสดงตัวอย่างจำนวนจุดยึดต่อ

2. โครงสร้างในระนาบที่ไม่สามารถคำนวณได้โดยสมการสมดุล

ถ้า $m+3 > 2j$ แสดงว่ามีชิ้นส่วนเกินความจำเป็นสำหรับการสมดุลของโครงสร้าง และชิ้นส่วนที่เกินนี้เราเรียกว่า Redundant

ถ้า $m+3 < 2j$ แสดงว่ามีชิ้นส่วนไม่เพียงพอสำหรับการสมดุลของโครงสร้าง ดังนั้นโครงสร้างจะยุบพังลงเมื่อมีแรงมากระทำ

ในที่นี้เราจะวิเคราะห์เฉพาะโครงสร้างในระนาบที่สามารถคำนวณได้โดยสมการสมดุลเท่านั้น
วิธีคำนวณ

1. วิธียึดจุดต่อ ใช้หลักการคิดสมดุลของตัวหมุดร้อยแต่ละตัว สมการที่ใช้มี 2 สมการคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sum F_x = 0 \quad (6.8)$$

$$\sum F_y = 0 \quad (6.9)$$

หลักการคำนวณโดยวิธีนี้คือ

- หมุดร้อยที่นำมาคิดสมดุลจะต้องมีจำนวนไม่ทราบค่าไม่เกิน 2 ตัว (เนื่องจากมีสมการ 2 สมการ) และมีตัวทราบค่าอย่างน้อย 1 ตัว
- แรงที่ขึ้นส่วนแต่ละชั้นกระทำต่อหมุดร้อย จะต้องเขียนไว้ทางด้านเดียวกับชั้นส่วนนั้น แรงที่มีทิศทางพุ่งเข้าหมุดร้อยจะเป็นแรงกด แรงที่มีทิศทางพุ่งออกจากหมุดร้อยจะเป็นแรงดึง และชั้นส่วนนั้นจะรับแรงดึง
- กรณีเฉพาะที่มักพบได้บ่อยและสามารถคำนวณได้ง่าย ๆ มีดังนี้



รูปที่ 6-6 แสดงทิศทางของแรงกดและแรงดึง

จุดยึดต่อที่ประกอบด้วย 3 ชั้นส่วน โดยมี 2 ชั้นส่วนอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันดังรูปที่ 6-7 (ก)

จากสมการ $\sum F_y = 0$ จะได้ว่า $F_3 = 0$

จากสมการ $\sum F_x = 0$ จะได้ว่า $F_1 = F_2$

จุดยึดต่อที่ประกอบด้วย 2 ชั้นส่วนที่ไม่ได้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันดังรูปที่ 6-7 (ข)

จากสมการ $\sum F_x = 0$ จะได้ว่า $F_1 = 0$

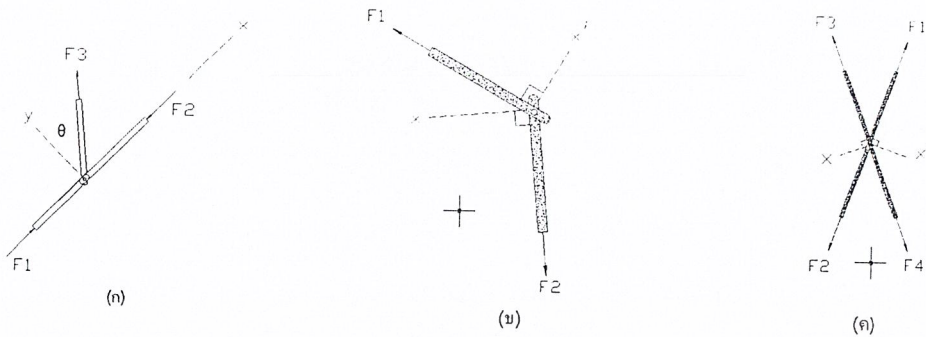
จากสมการ $\sum F_y = 0$ จะได้ว่า $F_2 = 0$

จุดยึดต่อที่ประกอบด้วย 4 ชั้นส่วนแต่ละคู่อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันดังรูปที่ 6-7 (ค)

จากสมการ $\sum F_x = 0$ จะได้ว่า $F_1 = F_2$

จากสมการ $\sum F_y = 0$ จะได้ว่า $F_3 = F_4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- รูปที่ 6-7 (ก) แสดงจุดยึดต่อที่ประกอบด้วย 3 ชิ้นส่วน โดยมี 2 ชิ้นส่วนอยู่ในแนวเส้นตรง
 (ข) แสดงจุดยึดต่อที่ประกอบด้วย 2 ชิ้นส่วน โดยที่ไมได้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน
 (ค) แสดงจุดยึดต่อที่ประกอบด้วย 4 ชิ้นส่วนโดยชิ้นส่วนแต่ละคู่อยู่ในเส้นตรงเดียวกัน

2. วิธีส่วนตัด ใช้หลักการคิดสมดุลของส่วนตัดของโครงสร้างสมการที่ใช้มี 3 สมการ คือ

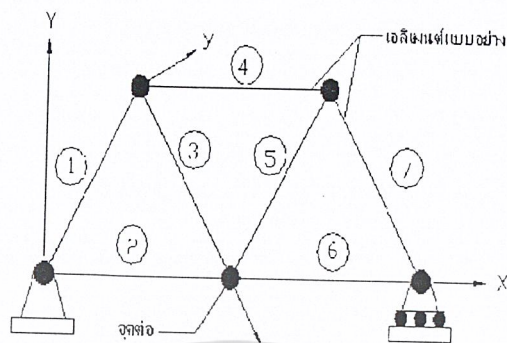
$$\begin{aligned}\sum F_x &= 0 \\ \sum F_y &= 0 \\ \sum M &= 0\end{aligned}$$

หลักการคำนวณ โดยวิธีคือ

- ส่วนตัดของโครงสร้างที่จะนำมาคิดสมดุล จะต้องมีส่วนไม่ทราบค่าไม่เกิน 3 ตัว (เนื่องจากมีสมการ 3 สมการ) และมีตัวไม่ทราบค่าอย่างน้อย 1 ตัว
- แรงในแต่ละชิ้นส่วนที่ถูกตัดผ่าน ให้เขียนไว้ด้านนอกส่วนตัด แรงที่มีทิศทางพุ่งเข้าหาส่วนตัดจะเป็นแรงกด และชิ้นส่วนนั้นจะรับแรงกด และแรงที่มีทิศทางพุ่งออกจากส่วนตัดจะเป็นแรงดึง และชิ้นส่วนนั้นจะรับแรงดึง

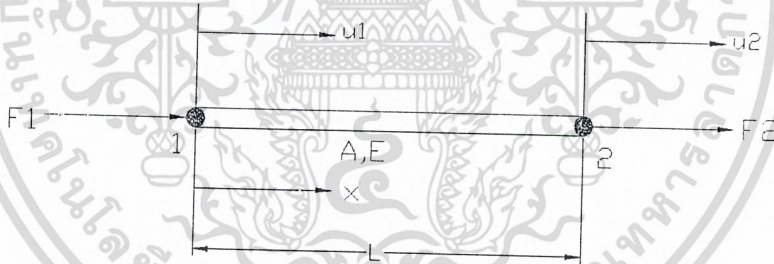
6.2.3 หลักการทางด้าน finite element

ปัญหาทางโครงสร้าง (Truss problem) ดังแสดงโดยตัวอย่างง่ายในรูปที่ 6-8 นี้ สามารถนำไปสู่ความเข้าใจในการสร้างสมการของเอลิเมนต์ได้เป็นอย่างดี โครงสร้างในรูป 6-8 นี้ ประกอบด้วยเหล็กท่อน (rod) ทั้งหมด 7 ท่อนซึ่งอาจทำการจำลองแบบด้วยเอลิเมนต์ทั้งหมดจำนวน 7 เอลิเมนต์ เอลิเมนต์ทั้งหมดนี้อยู่ในระบบแกนรวมใหญ่



รูป 6-8 ตัวอย่างปัญหาทางโครงสร้างแบบง่าย ๆ

X-Y (global coordinate system) หากเราพิจารณาเข้าไปในแต่ละเอลิเมนต์ เช่น เอลิเมนต์หมายเลข 3 เราจะเห็นว่าเอลิเมนต์นี้วางอยู่ในแกน x ซึ่งอยู่ในระบบแกนย่อย x-y (local coordinate system) เมื่อ โครงสร้าง ในรูปที่ 6-8 นี้ถูกแรงภายนอกมากระทำ เราสามารถหาคำนวณการเคลื่อนตัวของจุดต่างๆ ได้โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แต่ขั้นตอนแรกที่เราจำเป็นต้องทำคือ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ขึ้นมาก่อน ดังเช่นหากเรานำเอลิเมนต์ใดเอลิเมนต์หนึ่งเช่น เอลิเมนต์ 3 นี้ มาพิจารณาดังแสดงในรูป 6-9



รูป 6-9 ลักษณะเอลิเมนต์แบบอย่างง่ายสำหรับโครงสร้าง

เอลิเมนต์แบบอย่างในรูป 6-9 นี้ประกอบด้วย 2 จุดต่อหมายเลข 1 และ 2 ที่ปลายทั้งสองข้าง เอลิเมนต์นี้ทำจากวัสดุที่มีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) เท่ากับ E มีพื้นที่หน้าตัด (cross-sectional area) เท่ากับ A และมีความยาวเท่ากับ L มีแรง F_1 และ F_2 กระทำในแนวแกน x ที่จุดต่อ 1 และ 2 ตามลำดับ แรงดังกล่าวเป็นแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกนเอลิเมนต์นี้เมื่อ โครงสร้างอยู่ภายใต้สภาวะสมดุล และแรงดังกล่าวทำให้จุดต่อ 1 และ 2 เคลื่อนตัวไปในแนวแกน x ซึ่งมีค่าเท่ากับ u_1 และ u_2 ตามลำดับ

เริ่มต้นจากสมการความสัมพันธ์ของความเค้น (stress) และความเครียด (strain) ที่เรียกกันว่ากฎของฮุก (Hooke's law) นั่นคือ

$$\sigma = E\varepsilon \quad (6.10)$$

โดย σ แทนค่าความเค้นและ ε แทนค่าความเครียด สมมติว่าจากรูป 6-8 เราจับยึดที่จุดต่อ 1 และดึงที่จุดต่อ 2 ด้วยแรง F_2 สมการ (6.10) จะเขียนได้ในรูปแบบดังนี้

$$\frac{F_2}{A} = E \left(\frac{u_2 - u_1}{L} \right)$$

$$F_2 = \frac{AE}{L} (u_2 - u_1)$$

$$-\frac{AE}{L} (u_1 - u_2) = F_2 \quad (6.11)$$

แต่ภายใต้สภาวะสมดุล

$$\sum F_x = 0$$

$$F_1 + F_2 = 0$$

$$F_1 = -F_2$$

$$F_1 = \frac{AE}{L} (u_1 - u_2)$$

(6.12)

นั่นคือ สมการ (6.11) และสมการ (6.12) สามารถนำมาเขียนด้วยกันได้ ดังนี้

$$\frac{AE}{L} (u_1 - u_2) = F_1$$

$$-\frac{AE}{L} (u_1 - u_2) = F_2$$

ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้

$$\begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & -\frac{AE}{L} \\ -\frac{AE}{L} & \frac{AE}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{AE}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} \quad (6.13)$$

หรือเขียนย่อได้เป็น

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (6.14)$$

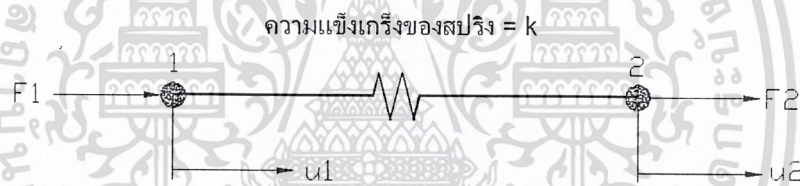
ในที่นี้

$[K]$ เรียกว่า เอลิเมนต์ของความแข็งเกร็ง (element stiffness matrix)

$\{u\}$ เรียกว่า เมตริกซ์ของการเคลื่อนตัวที่จุดต่อ (vector of nodal displacements)

$\{F\}$ เรียกว่า เมตริกซ์ของแรงกระทำที่จุดต่อ (vector of nodal forces)

รูปแบบของสมการของเอลิเมนต์ดังแสดงโดยสมการ (6.13) สามารถนำไปใช้กับสปริง ดังแสดงในรูป 6-10 ได้โดย



รูป 6-10 สปริงเอลิเมนต์

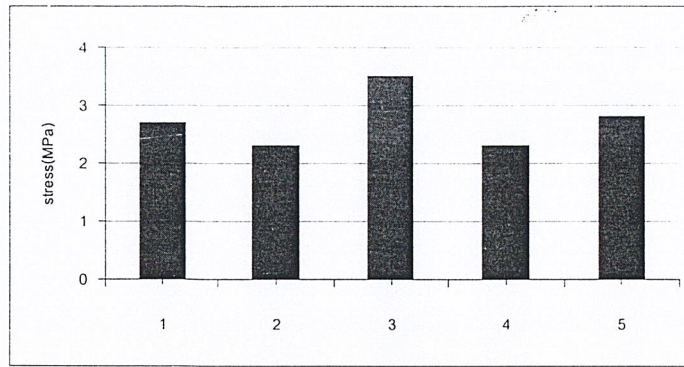
โดย k คือ ค่าความแข็งเกร็งของสปริง (spring stiffness) โดยมีหน่วยเป็นแรงต่อระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น นิวตันต่อเซนติเมตร เป็นต้น สมการของสปริงเอลิเมนต์ ดังแสดงในรูป 6-10 คือ

$$k \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} \quad (6.15)$$

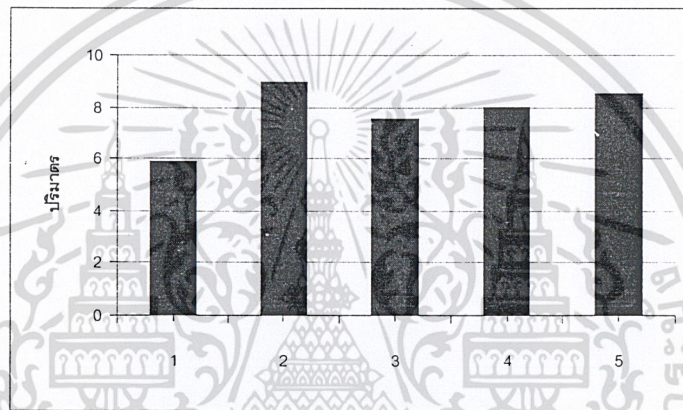
6.3 ผลการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง

ผลจากการวิเคราะห์ความเสียหายจากการใช้ทฤษฎีที่ได้กล่าวมาแล้ว เราได้นำมาเปรียบเทียบกับทั้งความเสียหายที่เกิดขึ้น และปริมาตรของวัสดุที่ใช้ในแต่ละโครงสร้างทั้ง 5 แบบซึ่งได้ผลออกมาดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

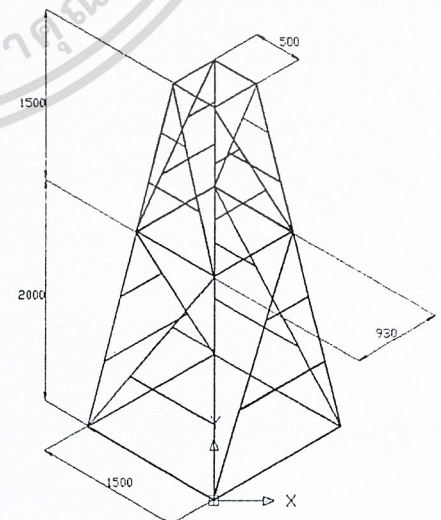
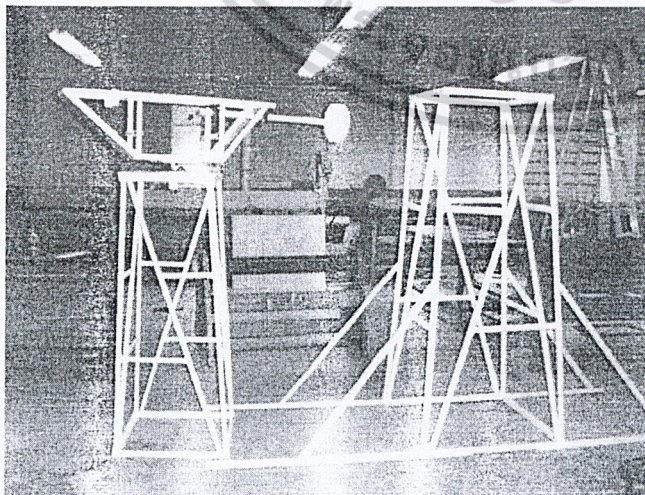


รูปที่ 6-11 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างแต่ละแบบ



รูปที่ 6-12 แสดงการเปรียบเทียบปริมาตรของวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างแต่ละแบบ

ซึ่งจากการพิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นและปริมาตรที่ใช้กับวัสดุแล้ว เราได้เลือกโครงสร้างในแบบที่ 4 ไปผลิตจริง เพราะว่าแบบที่ 4 นี้เกิดความเค้นต่ำที่สุดและใช้ปริมาตรที่ไม่สูงมากนัก



รูปที่ 6-13 แสดงรูปโครงสร้างแบบที่ 4 หลังจากผลิตจริงและขนาดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

ชุดอุปกรณ์ป้องกันความเสียหาย

7.1 บทนำ

ในการออกแบบกังหันลมนั้น โดยทั่วไปเราจะออกแบบทุกชิ้นส่วนให้สามารถทนต่อแรงต่างๆ ที่จะทำให้เกิดความเสียหาย ความเสียหายจากลมนั้นก็เป็นส่วนหนึ่ง ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบให้สามารถทนต่อแรงดังกล่าวได้ โดยการเริ่มจากพิจารณาว่ากังหันลมที่เราทำการออกแบบจะทำงานที่ความเร็วลมเท่าใด จากนั้นจึงหาแรงที่เกิดขึ้นในขณะนั้น แล้วจึงนำค่าแรงนั้นไปทำการออกแบบชิ้นส่วนต่างๆ ของกังหันลม แต่เนื่องจากความเร็วลมไม่คงที่ บางเวลามีความเร็วสูง บางเวลาความเร็วต่ำ โดยถ้าหากมีความเร็วลมสูงมากจนสูงกว่าที่เราทำการออกแบบเอาไว้ก็จะส่งผลเสียหายต่อกังหันลมได้ ดังนั้นจึงต้องมีอุปกรณ์ช่วยป้องกันความเสียหาย (safety) ซึ่งถ้าหากมีความเร็วลมสูงกว่าค่าที่ออกแบบเอาไว้ใบของกังหันลมก็จะทำการหักหลบเพื่อลดแรงปฏิกิริยาที่ลมกระทำกับใบของกังหัน ดังนั้นแรงที่กระทำกับกังหันลมที่ความเร็วลมสูงก็จะลดลง ซึ่งจะเป็นการลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับกังหันลมลงได้

7.2 ขั้นตอนในการออกแบบ

1. พิจารณาเลือกขอบเขตการทำงานของ safety
2. ออกแบบกลไกการทำงานของระบบ safety
3. พิจารณาเลือกกลไกที่จะทำการผลิต
4. การคำนวณและออกแบบ

7.2.1 พิจารณาเลือกขอบเขตในการออกแบบ

ก่อนการออกแบบจำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขความต้องการที่จะให้ระบบที่จะทำการออกแบบสามารถทำงานได้ โดยจะกำหนดจากความสัมพันธ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง หรือมีผลต่อส่วนนั้นๆ ซึ่งกลายเป็นเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบดังนี้

1. เนื่องจากการออกแบบใบพัด เราเลือกออกแบบที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที โดยมีเหตุผลดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น ดังนั้นหากระบบ safety จะทำงานก็จะต้องทำงานหลังจากที่ความเร็วลมเกิน 5 เมตรต่อวินาทีไปแล้ว
2. เมื่อระบบมีการทำงานจะต้องมีผลทำให้ลดความเสียหายลงจากเดิมที่ไม่มีระบบ
3. ประสิทธิภาพในการทำงานจะต้องไม่ต่ำจนเกินไป

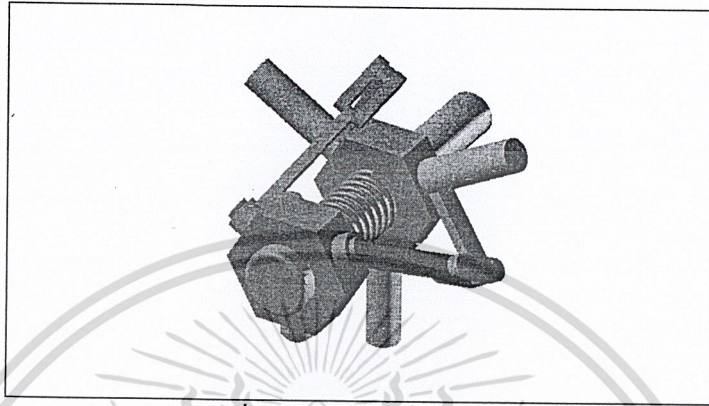
7.2.2 ออกแบบกลไกการทำงานของระบบ safety

ในการออกแบบ safety เราเริ่มจากพิจารณาว่าจะใช้แรงอะไรในการที่จะสร้างโมเมนต์ด้านการ

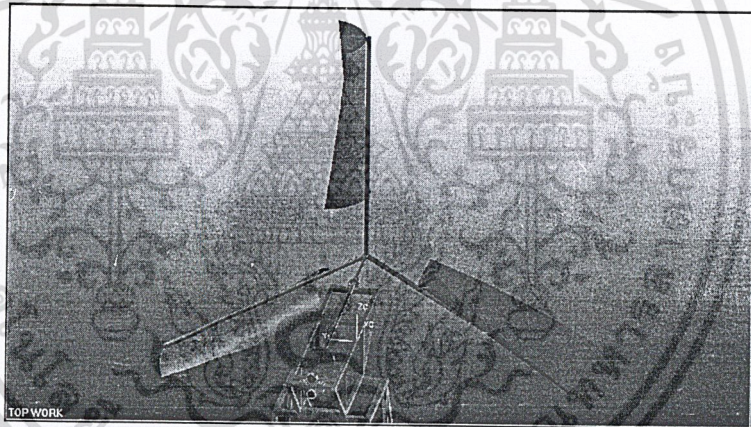
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พับของใบ หลังจากได้พิจารณาวัสดุต่างๆ จึงได้เลือกที่จะใช้สปริงเป็นตัวสร้างโมเมนต์ดังกล่าว หลังจากนั้นจึงออกแบบกลไกที่ใช้สปริงเป็นวัสดุที่ใช้ทำงาน โดยได้ออกแบบและพัฒนาแบบของกลไก safety ภายใต้เงื่อนไขในการออกแบบข้างต้น จึงได้มีการพัฒนากลไกการทำงานดังนี้

7.2.2.1 แบบที่ 1



รูปที่ 7-1 กลไกการทำงาน



รูปที่ 7-2 ลักษณะการพับหลบของใบพัด

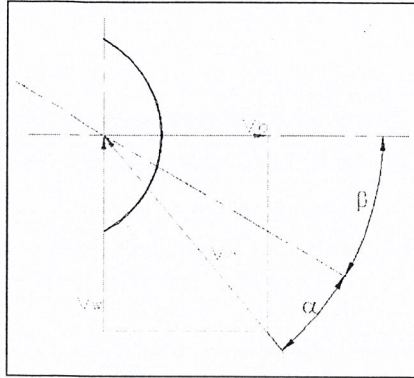
ลักษณะการทำงาน

อาศัยสปริงเพียงตัวเดียวที่จุดศูนย์กลางเป็นตัวดำเนินการพับของใบพัด โดยการพับนั้นทั้ง 3 ใบจะมีการพับที่พร้อมกัน โดยเมื่อใบมีการพับจะมีคั่นชักที่บริเวณ โคนใบส่งกำลังไปกดสปริง ที่สปริงจะมีตัวปรับความแข็งของสปริง ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดว่าจะให้ใบพัดเริ่มพับที่ความเร็วลมเท่าใด หากปรับให้สปริงหดตัวมากขึ้น ใบพัดก็จะพับที่ความเร็วลมสูงขึ้น

การพิจารณาความเหมาะสม

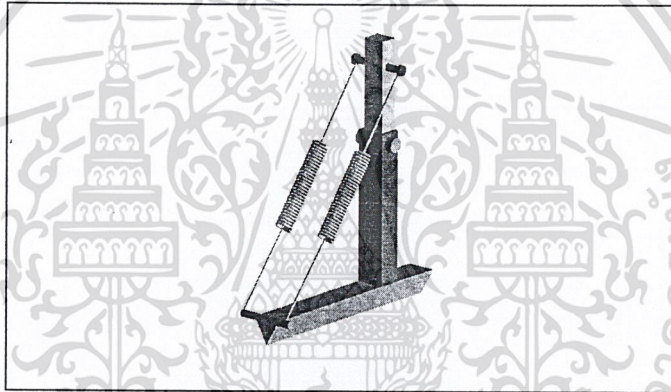
การทำงานของกลไกชนิดนี้มีข้อเสียคือ ถึงแม้ว่าใบพัดจะมีการบิดหลบลมที่เข้าปะทะจนสุดแล้วก็ตาม ก็สามารถลดความเสียหายได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

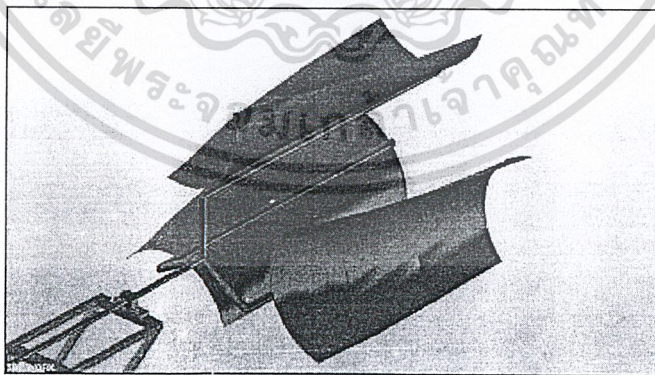


รูปที่ 7-3 แสดงการพับ

7.2.2.2 แบบที่ 2



รูปที่ 7-4 แสดงกลไกการทำงาน



รูปที่ 7-5 แสดงลักษณะการพับ

ลักษณะการทำงาน

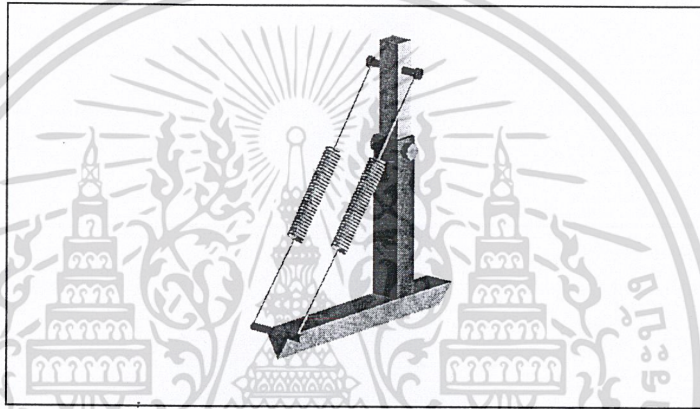
การทำงานจะอาศัยแรงดึงของสปริงที่บริเวณ โคนของใบพัด โดยที่ใบพัดจะมีการพับตัวของมันเองไปทางด้านหลัง ซึ่งในการออกแบบนี้แรงต้านของสปริงจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของการติดตั้งและความเอกซานนี้ เป็นเอกซานที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แข็งของสปริงที่เลือกมาใช้งาน เราจะใช้ตัวแปรทั้งสองนี้ออกแบบว่าจะให้เกิดการพับที่ความเร็วลมเท่าใด และออกแบบว่าจะให้เกิดการพับลีดอกที่องศาเท่าใด

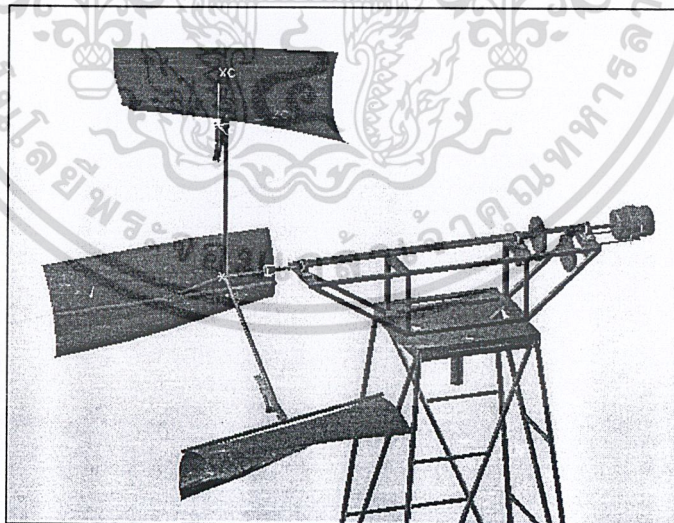
การพิจารณาความเหมาะสม

เมื่อพิจารณากลไกแบบนี้ก็พบว่า กลไกเหมาะสมกับใบพัดที่มีความเบา เนื่องจากถ้าใบพัดมีน้ำหนักมากจะมีผลทำให้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ด้านการพับของใบมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเมื่อพิจารณาใบพัดที่เราได้เลือกใช้พบว่า ใบพัดที่เลือกมีน้ำหนักที่มากซึ่งไม่เหมาะสมกับการออกแบบชนิดนี้ จึงต้องมีการพัฒนาต่อในแบบที่ 3

7.2.2.3 แบบที่ 3



รูปที่ 7-6 แสดงกลไกการทำงานของใบพัด



รูปที่ 7-7 แสดงลักษณะการพับของใบพัด

ลักษณะการทำงาน

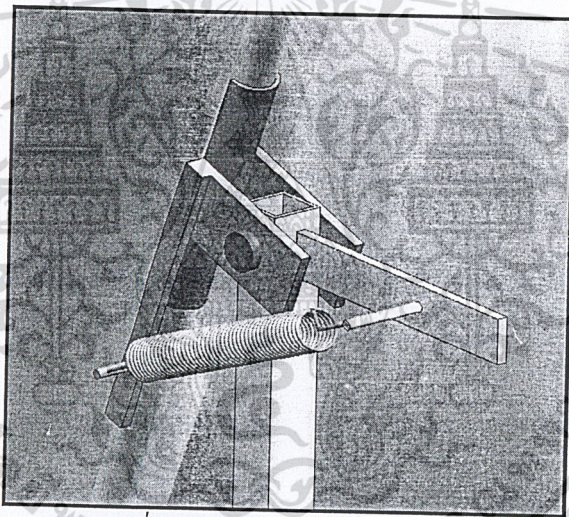
เนื่องจากในแบบที่ 2 เราพบอุปสรรคในการออกแบบคือ ใบพัดของเรามีน้ำหนักมากทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมาก ซึ่งมีผลทำให้ใบพัดไม่สามารถพับได้ ดังนั้นเราจึงได้แก้ปัญหาโดยการกำจัดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางโดยการเลื่อนจุดหมุนไปอยู่ที่จุดศูนย์กลางน้ำหนักของใบพัด ซึ่งทำให้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวถูกกำจัดไป ส่วนกลไกการติดตั้งสปริงเราได้ออกแบบโดยแทนที่จะใช้การดึงของสปริงได้เปลี่ยนมาใช้เป็นแรงต้านการพับที่เกิดจากการกดอัดของสปริงแทน ซึ่งการออกแบบก็จะใช้ 2 ตัวแปรในการออกแบบการพับเหมือนกับแบบที่ 2 คือลักษณะการติดตั้ง และความแข็งของสปริง

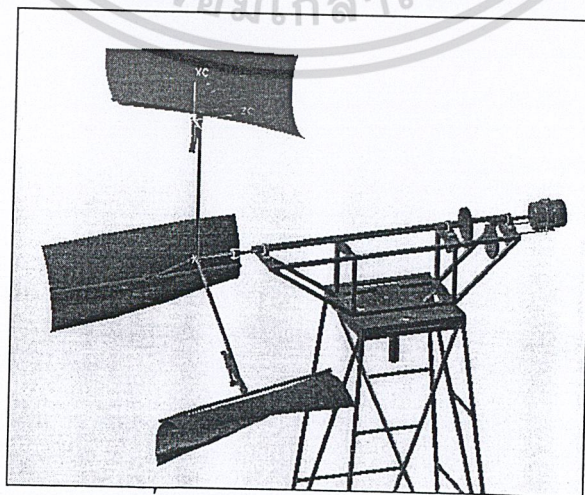
การพิจารณาความเหมาะสม

เมื่อพิจารณาแล้วพบว่ามีจุดอ่อนคือ ใบพัดทั้ง 3 ใบมีการพับหลบคมที่เป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นถ้าหากมีลมกระโชกแรง อาจจะทำให้ใบพัดใบใดใบหนึ่งเกิดการพับไปก่อน ซึ่งจะมีผลทำให้ใบพัดที่เหลือเกิดความไม่สมดุล และเกิดการสั่นสะเทือนซึ่งจากการคำนวณเราพบว่ามีความสูงมาก ทางออกสำหรับปัญหานี้มีอยู่ 2 ทางคือ ออกแบบให้ทุกชิ้นส่วนของก้านลมสามารถทนต่อแรงสั่นสะเทือนดังกล่าวให้ได้ แต่จากการคำนวณพบว่าจะต้องเพิ่มขนาดใหญ่มากขึ้น ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ทางออกที่ 2 คือเปลี่ยนรูปแบบใหม่เป็นแบบที่ 4

7.2.2.4 แบบที่ 4



รูปที่ 7-8 แสดงกลไกการทำงาน



รูปที่ 7-9 แสดงลักษณะการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการทำงาน

การทำงานของกลไกในแบบที่ 4 นี้มีการเปลี่ยนแปลงกลไกการพับของแบบที่ 3 คือได้กลับมาใช้แรงต้านการพับโดยใช้การดึงของสปริงเช่นเดียวกับแบบที่ 2 นอกจากนี้ก็ได้ออกแบบป้องกันการลื่นตัวของใบพัด โดยการติดตั้งตัวหยุดการพับของใบพัดที่ 40 องศา ทำให้ใบพัดจะเกิดการพับได้แค่ 40 องศาเท่านั้น ก่อนที่จะเกิดการพับตัวเอง

การพิจารณาความเหมาะสม

เมื่อพิจารณาข้อเสียของกลไกแบบนี้พบว่า มีข้อเสียเพียงเล็กน้อยนั่นคือสามารถลดความเสียหายได้น้อยกว่าแบบที่ 3 นอกจากนั้นพบว่ามีความเหมาะสมมากที่จะทำการผลิต ดังนั้นจึงได้เลือกที่จะทำการออกแบบและผลิตรระบบ safety แบบที่ 4 นี้

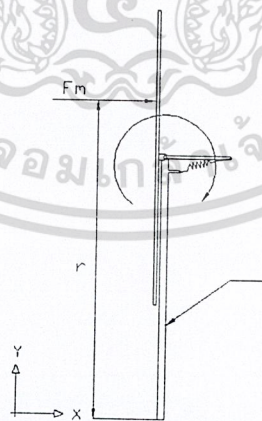
7.2.4 การคำนวณและออกแบบ

การคำนวณและออกแบบเริ่มจากการพิจารณาว่าในขณะที่กังหันลมทำงานจริงมีแรงโมเมนต์อะไรกระทำกับใบพัดบ้าง โดยการพิจารณาพบว่าแรงโมเมนต์ที่กระทำกับใบพัดมีด้วยกัน 3 แรงคือ

1. แรงโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากลมที่ปะทะใบพัด
2. แรงโมเมนต์ที่เกิดจากการหมุนของใบพัดหรือแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของใบพัด
3. แรงโมเมนต์ต้านการพับของใบพัดหรือแรงจากชุด Safety

ซึ่งเราสามารถคำนวณหาแรงโมเมนต์ต่างๆ ได้ดังนี้

7.2.4.1 แรงโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากลมที่ปะทะใบพัด

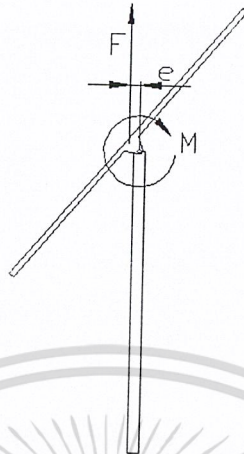


รูปที่ 7-10 แสดงลักษณะของแรงที่ก่อให้เกิดโมเมนต์ในการพับของใบพัด

แรงโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากลมที่เข้าปะทะกับใบพัดนี้ เราสามารถที่จะคำนวณได้จากวิธีการคำนวณพลังงานที่ได้จากใบพัดคงที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ซึ่งจะอยู่ในรูปของแรง F_m โดยแรงนี้จะเพิ่มขึ้นตามความเร็วลม และเมื่อความเร็วลมสูงจนถึงค่าที่กำหนด แรงจะมีค่าโมเมนต์มากกว่าโมเมนต์เนื่องจากแรงสปริงทำให้ใบพัดสามารถที่จะพับหลบลมได้เอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2.4.2 แรงโมเมนต์ที่เกิดจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของใบพัด



รูปที่ 7-11 แสดงลักษณะของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของใบพัด

จากรูปจะเห็นได้ว่า โมเมนต์ที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางเดียวกันกับ โมเมนต์เนื่องจากแรงลม ซึ่งหมายความว่าโมเมนต์เนื่องจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางนี้ จะเป็นตัวเพิ่มค่าโมเมนต์ในการพับหลบลมของใบพัด ซึ่งในการคำนวณค่าโมเมนต์นี้จะขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 ตัวแปรได้แก่ แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (F) โดยแรงนี้จะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของใบพัด และความเร็วรอบที่ใบพัดหมุนอยู่ในขณะนั้น และอีกตัวแปรหนึ่งคือระยะห่างจากจุดหมุน โดยเราจะต้องคำนึงถึงทั้งสองตัวแปรนี้อย่างยิ่งเพราะว่าจะมีผลต่อการพับของใบพัดอย่างมาก

7.2.4.3 แรงโมเมนต์ต้านการพับของใบพัดหรือแรงจากชุด Safety

เริ่มแรกหาสมการที่แสดงโมเมนต์ที่ชุด Safety กระทำกับใบพัดที่องศาต่างๆ หรือ สมการโมเมนต์ในฟังก์ชันตัวแปร มุมของการพับ สมการเริ่มต้นคือ

$$M = FD \tag{7.1}$$

ในขณะที่	M	=	โมเมนต์	(Nm)
	F	=	แรงที่กระทำ	(N)
	D	=	ระยะที่แรง F กระทำห่างจากจุดหมุน	(m)

แรง F เกิดขึ้นจากแรงของสปริง โดยมีค่าเป็น $F = KX$ ซึ่งระยะ X ก็จะแปรผันตามองศาการพับของใบ โดยสามารถหาค่าได้ดังนี้

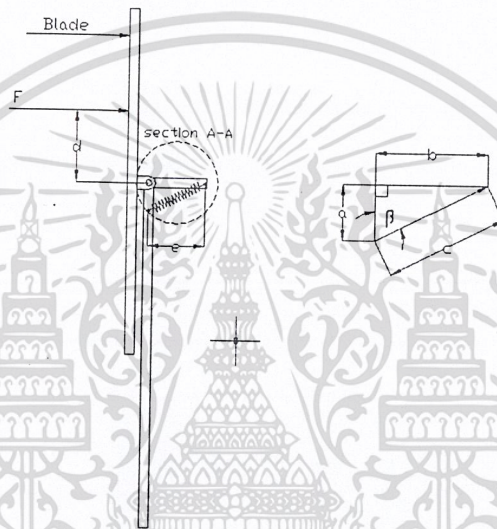
จากนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ F ใช้งาน = เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (7.2)

โดย $X = C - L$ (7.3)

เมื่อ $L =$ ความยาวเดิมของสปริง (m)
 $C =$ ระยะในการติดตั้งสปริง (m)

ดังนั้น $F = K(C - L)$ (7.4)

ต่อมาพิจารณาค่าของ D ในฟังก์ชันขององศาการพับของใบพัด จากรูป FBD ของระบบ



รูปที่ 7-12 แสดงลักษณะของแรงลมที่กระทำที่จุดศูนย์กลางความดันบนใบพัด

จากรูปจะได้รับความสัมพันธ์

$$\frac{A}{\sin \beta} = \frac{C}{\sin \theta}$$

ดังนั้น $\sin \beta = \frac{A}{C} \sin \theta$ (7.5)

และ $\frac{D}{\sin \beta} = \frac{B}{\sin 90}$

ดังนั้น $D = B \sin \beta$ (7.6)

แทนสมการ (7.5) ในสมการ (7.6)

$$D = \frac{AB}{C} \sin \theta$$
 (7.7)

รวมสมการ (7.2) และ (7.7) เข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดรูปใหม่

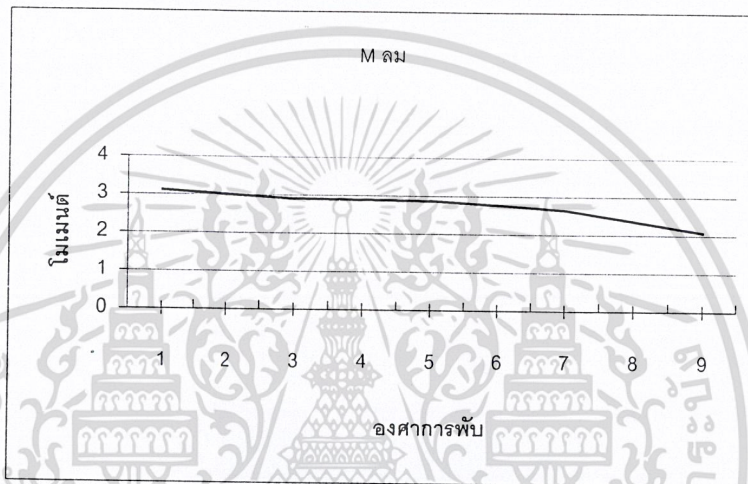
$$M = \frac{ABK}{C}(C - L)\sin \theta$$

เมื่อ

$$M = ABK \sin \theta - \frac{ABKL}{C} \sin \theta \quad (7.8)$$

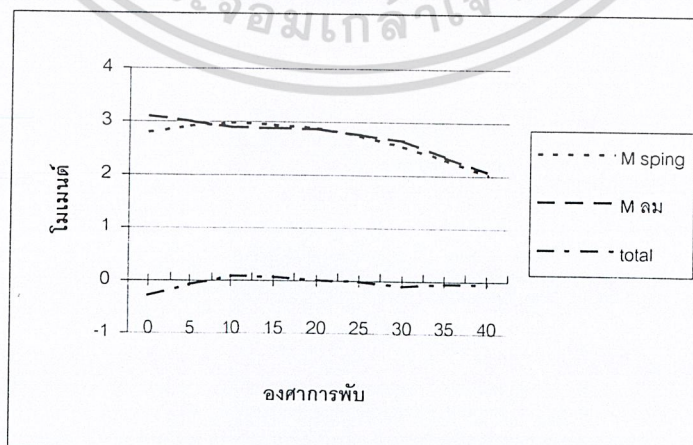
$$C^2 = A^2 + B^2 - 2AB \cos \theta$$

จากสมการทั้งหมดเราจึงใช้สมการเหล่านี้ในการออกแบบเริ่มจากในขั้นตอนแรกเราหาแรงโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากแรงลมที่ความเร็ว 6 m/s และแรงโมเมนต์ที่เกิดจากแรงหนีศูนย์กลางของใบพัด ในองศาต่างๆ ซึ่งค่าที่คำนวณได้เป็นผลรวมของแรงทั้ง 2 ดังที่แสดงในกราฟ



รูปที่ 7-13 แสดงกราฟของโมเมนต์รวมที่แต่ละองศาของการพับ

จากนั้นเราจึงใช้สมการที่ (7.8) ในการออกแบบให้โมเมนต์ซึ่งจะเป็นโมเมนต์ที่ต้านกับแรงแรก โดยออกแบบให้มีความสัมพันธ์กัน ในการออกแบบนี้จะใช้การเปลี่ยนตัวแปร A และ B จนได้กราฟที่มีความใกล้เคียงกันดังกราฟ

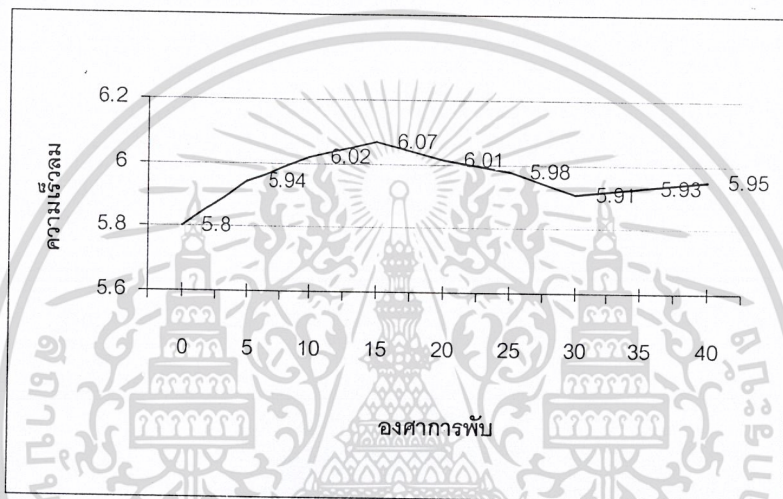


รูปที่ 7-14 แสดงผลรวมของกราฟโมเมนต์เนื่องจากแรงลมและแรงสปริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นจึงทำการรวมโมเมนต์ทั้งสองตัวดังกล่าว ก็จะเห็นได้ว่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นมีค่าโมเมนต์ที่เกือบจะเป็น 0 นั้นหมายความว่าที่ความเร็วลม 6 m/s โมเมนต์ที่ทำให้เกิดการพับมีค่าเท่ากับโมเมนต์ที่ต้านการพับ ดังนั้น หากลมมีความเร็วสูงกว่า 6 m/s ขึ้นไปก็จะมีผลทำให้โมเมนต์ที่ทำให้ใบพับมีค่ามากกว่าโมเมนต์ที่ต้านการพับ จึงมีผลให้ใบเกิดการพับนั่นเอง

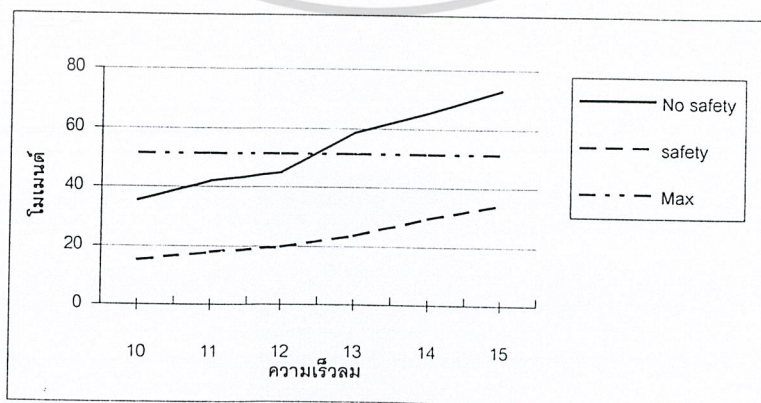
จากนั้นนำค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากการออกแบบชุด Safety ไปทำการคำนวณหาว่าตลอดการพัดหลบลมของใบกังหันลมตั้งแต่ 0 ถึง 40 องศา ต้องใช้ความเร็วของลมเท่าใดใบจึงจะเกิดการพับจนสุด โดยจากการคำนวณได้ผลดังแสดงในกราฟ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงความเร็วลม 6 m/s ซึ่งมีค่าสูงกว่าความเร็วลม 5 m/s ตามที่เราต้องการ



รูปที่ 7-15 แสดงความเร็วลมในแต่ละองศาการพับ

และในขั้นตอนสุดท้ายจึงนำค่าที่ได้จากการออกแบบทั้งหมดมาทำการประเมินประสิทธิภาพของระบบที่เราทำการออกแบบ โดยการเปรียบเทียบระหว่างกังหันลมที่มีการติดตั้ง Safety และกังหันลมที่ไม่มีการติดตั้งระบบ Safety ว่ามีผลแตกต่างกันเพียงใด ดังแสดงในกราฟ

รูปที่ 7-16



รูปที่ 7-16 แสดงการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นระหว่างมีอุปกรณ์ safety และไม่มีอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปก็จะเห็นได้ว่าเมื่อไม่มีการติดตั้งระบบ Safety ผลคือ กังหันลมจะเกิดความเสียหายเนื่องจากแรงลมที่ความเร็วลม 12.5 m/s แต่ถ้าหากกังหันลมมีการติดตั้งระบบ Safety ผลคือ กังหันลมจะเกิดความเสียหายที่ความเร็วลม 17.5 m/s นั่นก็หมายความว่าชุด Safety นี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านลมได้ถึง 40% ก่อนที่จะเกิดความเสียหาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

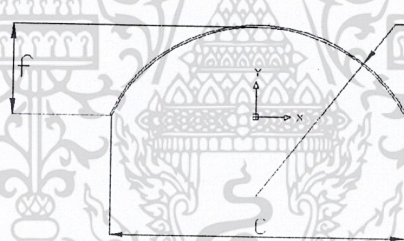
การผลิตและทดสอบ

8.1 วัตถุประสงค์

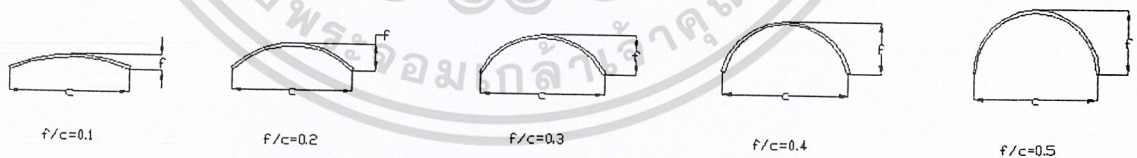
1. เพื่อเก็บข้อมูลแรงยกและแรงต้านของใบพัดแบบ สำหรับนำไปคำนวณหาแรงต่างๆ
2. เพื่อเก็บข้อมูลความเร็วรอบของใบพัด และตรวจสอบว่าตรงกับที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่
3. เพื่อเก็บข้อมูลพลังงานที่ได้จากใบพัดทั้งสองแบบ คือแบบ SWD และแบบ VECTOR สำหรับนำมาตรวจสอบกับพลังงานที่คำนวณได้จากทางทฤษฎี

8.2 การทดสอบเก็บข้อมูลแรงยกและแรงต้านของใบพัด

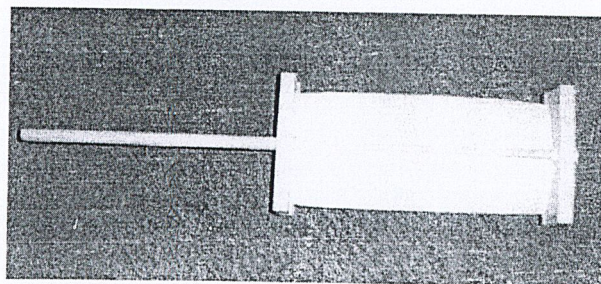
เราได้ทำการผลิตรูปร่างของใบพัดมาทั้งหมด 5 แบบด้วยกัน ซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 8-2 จากนั้นจึงนำเอาไปทดลองในอุโมงค์ลมเพื่อเก็บข้อมูลแรงยกและแรงต้านของใบพัด เพื่อที่จะเลือกรูปแบบของใบพัดที่ให้อัตราส่วนแรงยกต่อแรงต้านที่สูง แล้วจึงนำค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้านของใบพัดในแบบนี้ไปคำนวณหาพลังงานที่ได้จากใบพัด



รูปที่ 8-1 แสดงลักษณะ curve ของใบพัด

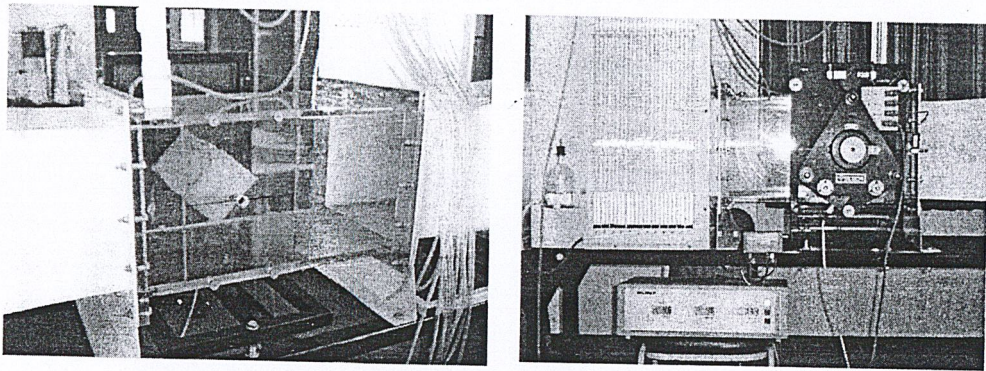


รูปที่ 8-2 แสดงลักษณะของใบพัดทั้ง 5 แบบ



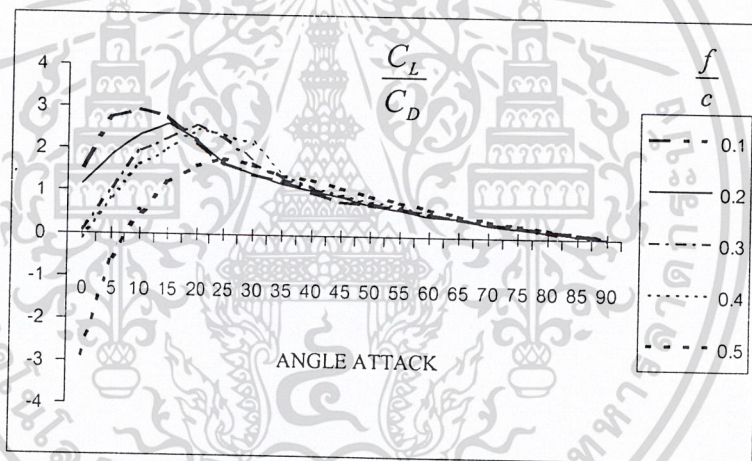
รูปที่ 8-3 แสดงโมเดลใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

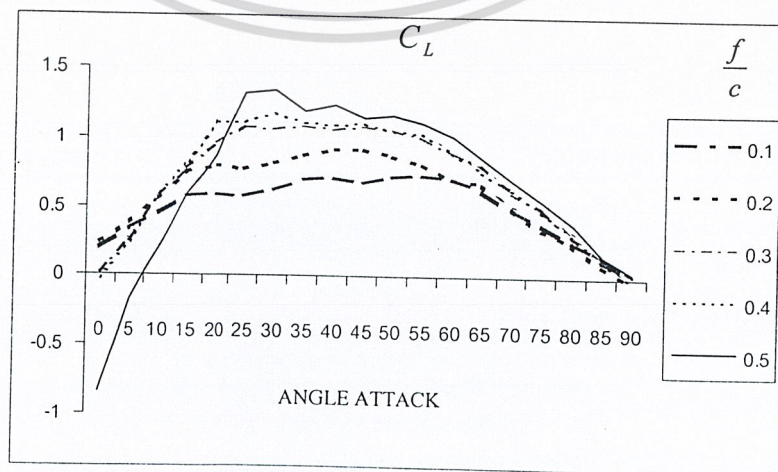


รูปที่ 8-4 แสดงลักษณะของเครื่องมือที่ใช้ในการวัดแรงยกและแรงต้าน

โดยลักษณะรูปร่างของ curve ใช้แบบส่วนโค้งของวงกลมดังรูปที่ 8-1 ซึ่งเป็นอัตราส่วน $\frac{f}{c}$ ต่างๆ ซึ่งได้ทำการสร้าง model และทดลองในอุโมงค์ลมทั้งหมด 5 แบบ ตั้งแต่ $\frac{f}{c} = 0.1$ ถึง $\frac{f}{c} = 0.5$ ทำให้เราได้ค่าแรงยกและแรงต้าน ดังรูปที่ 8-5



รูปที่ 8-5 แสดงการเปรียบเทียบ ส.ป.ส.แรงยกต่อ ส.ป.ส.แรงต้านของ curve ในแต่ละแบบ

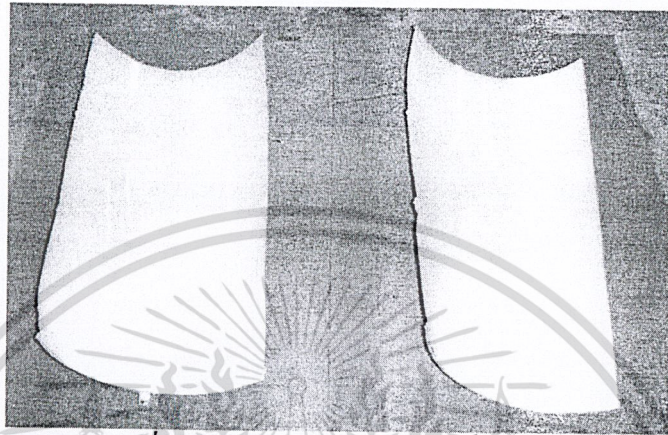


รูปที่ 8-6 แสดงค่าส.ป.ส.แรงยกของ curve ในแต่ละแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่ให้ผู้อื่นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.3 ขั้นตอนการผลิตใบพัด

ในส่วนของการผลิตใบพัด เราได้ทำการผลิตใบพัดทั้งหมด 2 แบบด้วยกันประกอบด้วย ใบพัดแบบ SWD และใบพัดแบบ VECTOR โดยในแต่ละชุดจะมี 3 ใบ ซึ่งจำนวนของใบพัดนี้เราได้จากการคำนวณจากที่ผ่านมา จากรูปด้านล่าง ทางด้านซ้ายมือเป็นใบพัดแบบ SWD และทางขวามือเป็นใบพัดแบบ VECTOR



รูปที่ 8-7 แสดงรูปแบบของใบพัดที่ผลิต

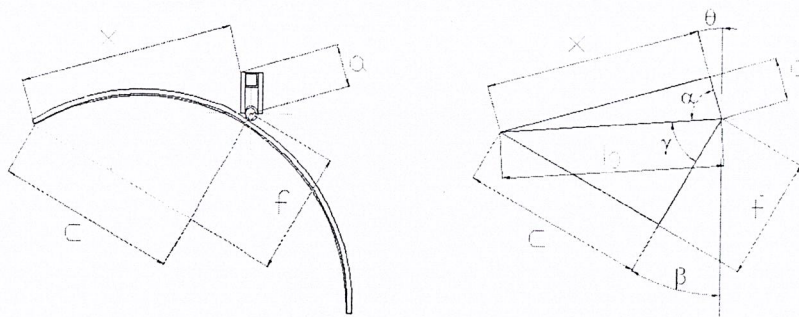


รูปที่ 8-8 แสดงโครงและขนาดของใบพัด

สำหรับขั้นตอนในการผลิตใบพัด 1 ใบ เราเริ่มจากการใช้เหล็กเส้นแบนตัดด้วยเครื่องจักรให้เป็นโค้งตามที่เรต้องการจนครบทั้งหมด 4 อัน โดยในการเลือกแบ่งส่วนของพื้นที่ใบพัดออกเป็น 3 ส่วนเพราะจากการคำนวณแล้วเราพบว่าถ้าเกิดแบ่งมากกว่า 3 ส่วนแรงที่ได้ก็ไม่ค่อยแตกต่างกันเท่าใดนัก แต่ถ้าแบ่งน้อยกว่า 3 ส่วนแรงที่ได้ยังคงแตกต่างกันอยู่ค่อนข้างมากเพราะมุมบิดจะไม่ได้ตามที่ออกแบบเอาไว้นั่นเอง หลังจากผลิตครบที่ 4 อันเราก็เริ่มเชื่อมติดเข้ากับแกนของใบพัด ซึ่งขั้นตอนในการตั้งมุมนี้เราสามารถตั้งมุมได้จากการคำนวณโดยใช้ระยะต่างๆ จากสมการ

$$x = \sqrt{a^2 + (f^2 + c^2) - 2a\sqrt{(f^2 + c^2)} \cos\{180 - [\beta + \theta + \gamma]\}} \quad (8-1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในวงจำกัดเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8-9 แสดงการคำนวณหาระยะเพื่อตั้งมุมบิดของใบ

ค่ามุมบิดต่างๆเราสามารถหาได้จากผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีทั้งสองทฤษฎี คือ SWD และ VECTOR ดังแสดงในตารางที่ 8-1

R	SWD (°)	VECTOR (°)
0.3	26	38
0.6	15	22
0.9	8	10
1.2	2	2

ตารางที่ 8-1 แสดงค่ามุมบิดของใบพัดที่ได้จากการคำนวณ

หลังจากที่คำนวณได้แล้วเราจึงทำการผลิตจริง ซึ่งหลังจากการผลิตแล้วเราได้ทำการตรวจสอบมุมบิดอีกครั้ง โดยใช้หลักการเดียวกันกับการตั้งมุมในตอนแรก ซึ่งผลปรากฏว่าค่ามุมที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไปจากที่คำนวณได้ในทางทฤษฎี ดังแสดงในตารางที่ 8-2

R	SWD (°)	VECTOR (°)
0.3	26	36
0.6	12	20
0.9	4	13
1.2	-3	6

ตารางที่ 8-2 แสดงค่ามุมบิดของใบพัดที่สร้างได้จริง

ผลความแตกต่างของมุมสูงสุดที่ 5 องศาซึ่งผลของความแตกต่างนี้ทำให้พลังงานที่ได้จะไม่ตรงเอกภาคมุมทางทฤษฎี แต่เรายังสามารถคำนวณหาพลังงานจากมุมที่สร้างได้จริงได้จำกัดวิธีการคำนวณเดียวกันไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเก็บข้อมูลพลังงานแรงบิดและความเร็วรอบ

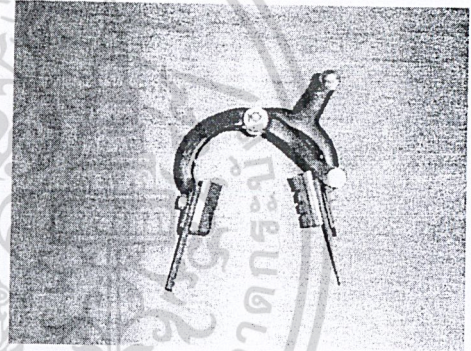
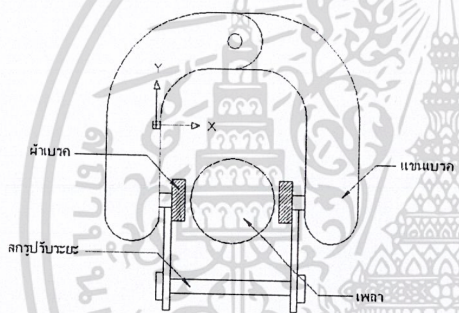
1. ชุดเบรก
2. เครื่องมือวัดความเร็วลม
3. เครื่องมือวัดความเร็วรอบ

8.4.1 ชุดเบรก

สำหรับอุปกรณ์ชุดเบรกนี้ ได้มีการพัฒนารูปแบบเรื่อยมาเนื่องจากเบรกที่ใช้ในตอนแรกมีปัญหาทำให้เมื่อทดลองเบรกแล้ว ผลปรากฏว่าแรงเบรกไม่คงที่

8.4.1.1 เบรกชนิดแรก

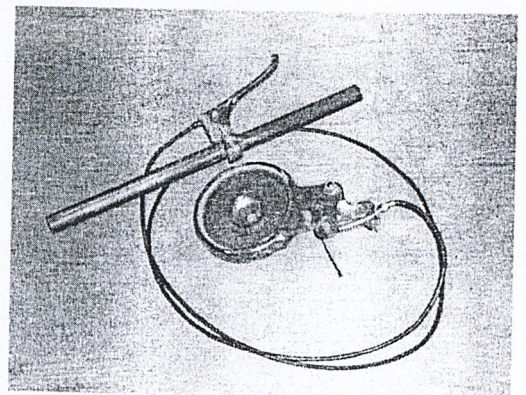
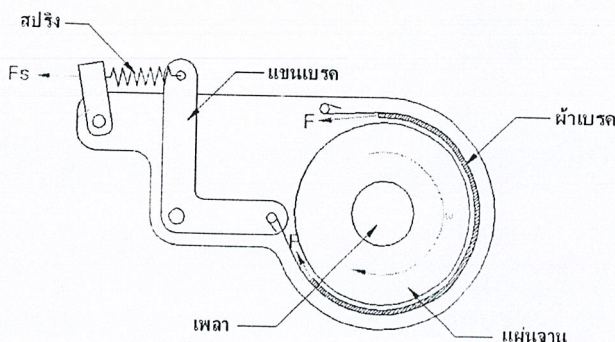
เบรกกำมปู มีข้อเสียคือ เราไม่สามารถที่จะใช้แรงในการเบรกที่สูงๆได้ เนื่องจากยางเบรกจะสึกหรออย่างรวดเร็ว



รูปที่ 8-10 เบรกกำมปู

8.4.1.2 เบรกชนิดที่สอง

ดรัมเบรก มีข้อเสียคือ การปรับตั้งศูนย์ระหว่างแกนเฟลา และเบรกกระทำได้ยาก ทำให้ในขณะที่เบรกเกิดการเสียดสีที่ไม่ต่อเนื่อง แรงเบรกเกิดการสั่น

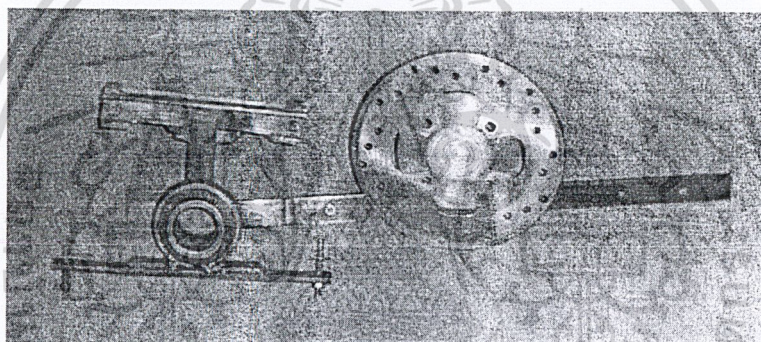
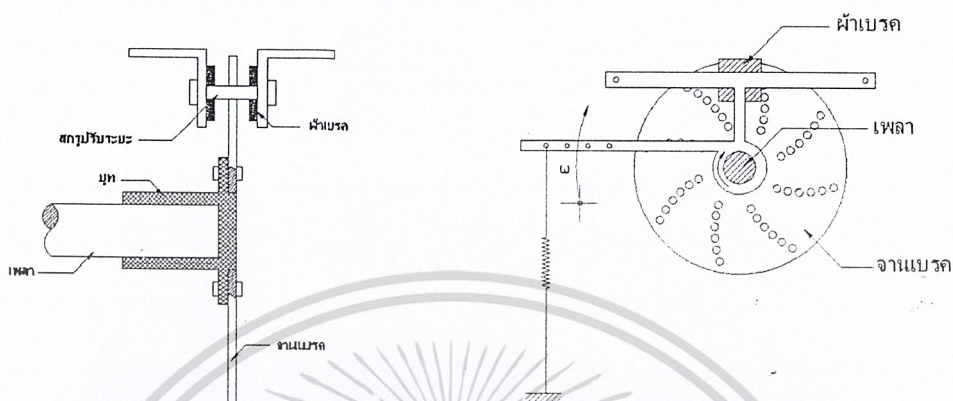


รูปที่ 8-11 ดรัมเบรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.4.1.3 เบรกชนิดที่สาม

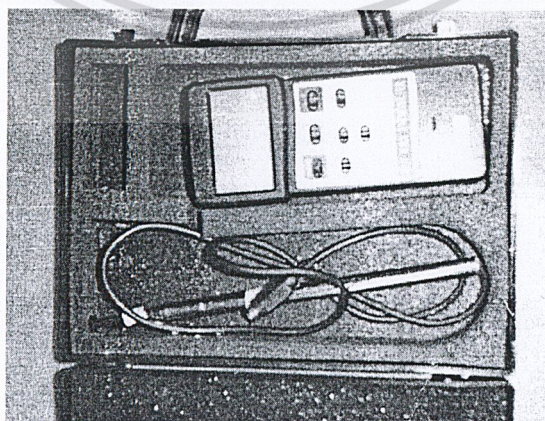
ดิสก์เบรก หลังจากพบกับปัญหาจากเบรกชนิดแรก ด้านแรงที่ใช้ในการเบรก และเบรกชนิดที่สอง ด้านการตั้งศูนย์เบรก เราจึงได้พัฒนามาใช้เบรกแบบดิสก์ ซึ่งผลที่ได้สามารถแก้ปัญหาทั้งสองได้ และให้แรงที่สม่ำเสมอดี



รูปที่ 8-12 ดิสก์เบรก

8.4.2 เครื่องมือวัดความเร็วลม (hot wire)

เป็นเครื่องมือแสดงผลแบบดิจิตอล ซึ่งเราสามารถอ่านค่าความเร็วลมได้โดยการขึ้นปลายของ hot wire รับความเร็วลม จากนั้นสามารถอ่านค่าได้จากหน้าปัด รวมถึงอุณหภูมิในขณะนั้นด้วย



รูปที่ 8-13 เครื่องมือวัดความเร็วลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.5 ขั้นตอนการทดลองเก็บข้อมูลพลังงานแรงบิดและความเร็วรอบ

เริ่มจากการประกอบ โครงสร้างส่วนบนและล่างเข้าด้วยกันพร้อมกับประกอบชุดใบพัด ดังรูป



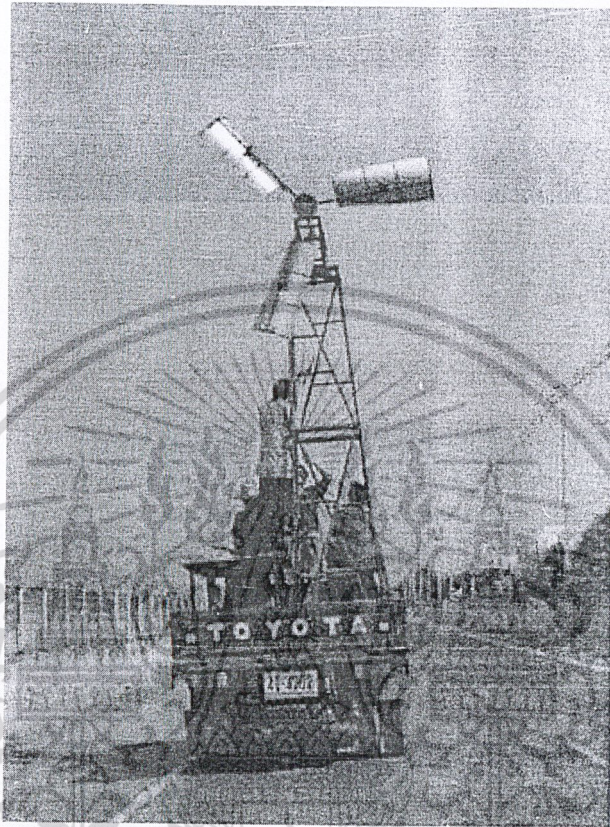
รูปที่ 8-14 การประกอบโครงสร้างส่วนบนและล่างเข้าด้วยกัน



รูปที่ 8-15 แสดงการประกอบชุดใบพัดเข้ากับแกนหมุน

เริ่มทำการเก็บข้อมูลหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการผลิตทุกชิ้นส่วนแล้วจึงนำเอาชุดกั้นนี้ไปทดสอบ ซึ่งขั้นตอนในการทดสอบนี้ได้ทำการยกกั้นขึ้นไปติดตั้งบนท้ายรถยนต์ จากนั้นจึงให้รถยนต์ขับไปด้วยความเร็วตามต้องการ โดยมีอุปกรณ์ตรวจวัดระดับความเร็วลมในขณะนั้นด้วย จากนั้นจึงเริ่มเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการเก็บข้อมูลความเร็วรอบ และพลังงานที่ได้ โดยในการเก็บค่าพลังงานได้ใช้อุปกรณ์ชุดเบรกซึ่งมี
 กานต่อจากชุดเบรกไปที่ตาชั่งสปริงเพื่อวัดแรงบิดจากเพลาลมของใบพัด และวัดความเร็วรอบด้วย
 เครื่องมือวัดรอบ



รูปที่ 8-16 แสดงการติดตั้งชุดกังหันบนรถยนต์เพื่อเก็บข้อมูล

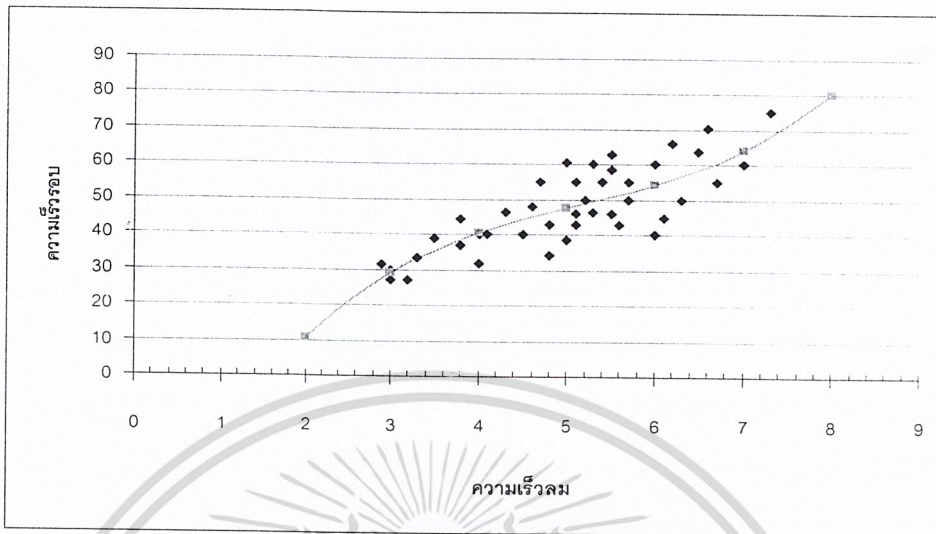
สำหรับการทดลองจะเก็บข้อมูลของใบพัดที่ได้ออกแบบจากทั้ง 2 ทฤษฎี ซึ่งมีขั้นตอนในการเก็บข้อมูลดังนี้

1. ให้รถยนต์ขับด้วยความเร็วจนได้ระดับที่ต้องการซึ่งสามารถรู้ได้จากการอ่านค่าที่อุปกรณ์วัดความเร็วลม (hot wire) จากนั้นจึงคงที่ระดับความเร็วในขณะนั้นเอาไว้
2. เริ่มทำการเบรกโดยการเพิ่มแรงบีบที่ดิสก์เบรกเข้าไปให้มากขึ้น จนกานที่ต่อกับชุดเบรคดึงตาชั่งสปริงขึ้นไปต่อน้ำหนักประมาณ 1-2 kg แล้วจึงเก็บค่าความเร็วรอบ
3. หลังจากเก็บข้อมูลเสร็จแล้ว จึงปล่อยแรงบีบที่เบรกและให้ใบพัดหมุนได้ตามปกติ
4. เปลี่ยนระดับความเร็วลม แล้วจึงทำการเก็บข้อมูลโดยทำซ้ำกับขั้นตอนที่ 1-3 จนได้ข้อมูลตามต้องการ

8.6 ผลการทดลองการเก็บข้อมูลพลังงานแรงบิดและความเร็วรอบใบพัด

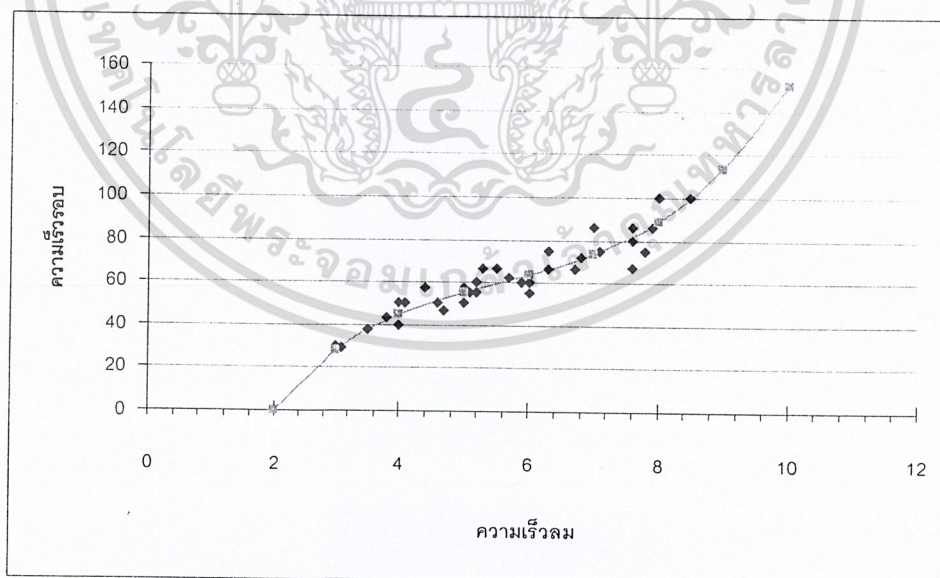
ผลจากการทดสอบวัดความเร็วรอบของใบพัดแบบของ VECTOR เราได้ออกแบบค่าความเร็ว
 เอกสารฉบับของใบพัดเท่ากับ 60 รอบต่อวินาที ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที ผลปรากฏว่า ที่ความเร็วนี้
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนรอบของใบพัดได้ประมาณ 50 รอบต่อนาทีซึ่งต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ประมาณ 16.67 % และที่ความเร็วลมสูงขึ้นความเร็วรอบก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 8-17 ข้อมูลผลการทดลองความเร็วรอบของใบพัดแบบ VECTOR

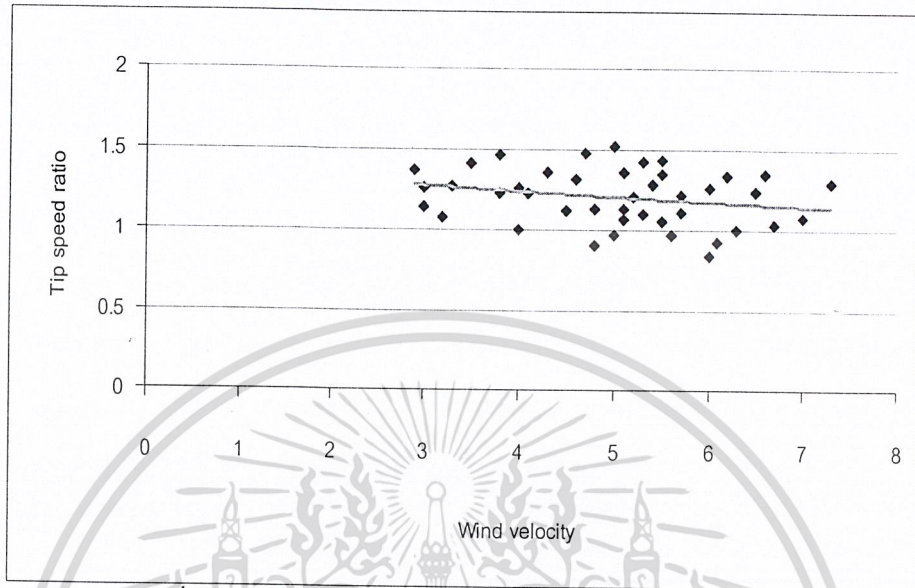
ผลจากการทดสอบความเร็วรอบของใบพัดแบบของ SWD นี้จากเดิมเราได้ทำการออกแบบค่าความเร็วรอบของใบพัดเท่ากับ 60 รอบต่อนาที ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที เช่นเดียวกับของ VECTOR จากการทดสอบปรากฏว่าสามารถวัดความเร็วรอบได้ประมาณ 55 รอบต่อนาที ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ออกแบบไว้ประมาณ 8.33% ซึ่งดีกว่าใบพัดแบบ VECTOR



รูปที่ 8-18 ข้อมูลผลการทดลองความเร็วรอบของใบพัดแบบ SWD

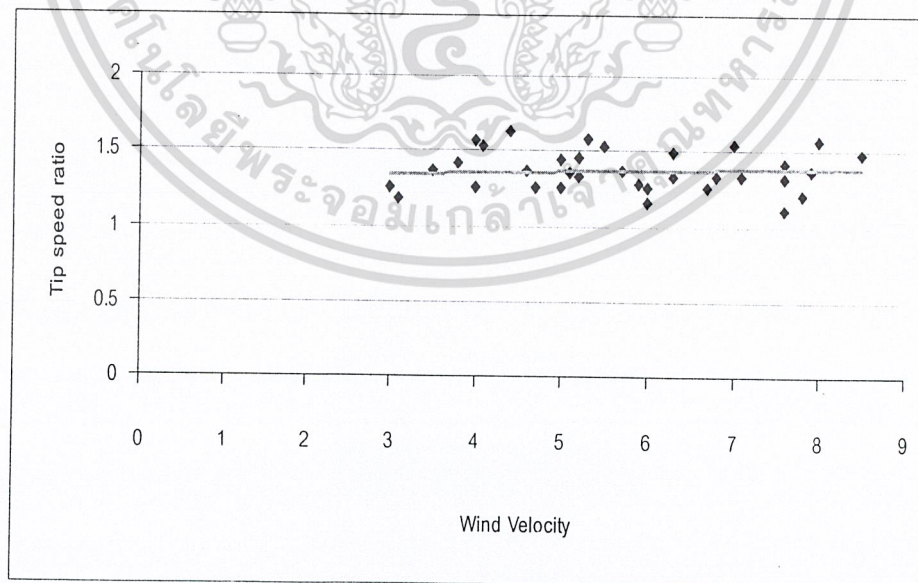
จากนั้นเราได้ทำการหาอัตราส่วนความเร็วปลายของใบพัด หรือ Tip speed ratio (λ) หรืออัตราส่วนระหว่างความเร็วที่ปลายใบพัดต่อความเร็วลมที่เข้าปะทะ โดยในเบื้องต้นเราได้ออกแบบค่า λ เท่ากับ 1.5 หมายถึงความว่า ความเร็วที่ปลายใบพัดเท่ากับ 7.5 เมตรต่อวินาที ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที อย่างไรก็ตามทั้งนี้ทั้งนั้น อาจมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วินาที ผลจากการทดสอบใบพัดแบบ VECTOR ปรากฏว่า ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที เราได้ λ ประมาณ 1.22 คลาดเคลื่อนไปจากที่ออกแบบเอาไว้ประมาณ 18.66% และมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อความเร็วลมสูงขึ้น



รูปที่ 8-19 ข้อมูล Tip speed ratio ของใบพัดแบบ VECTOR

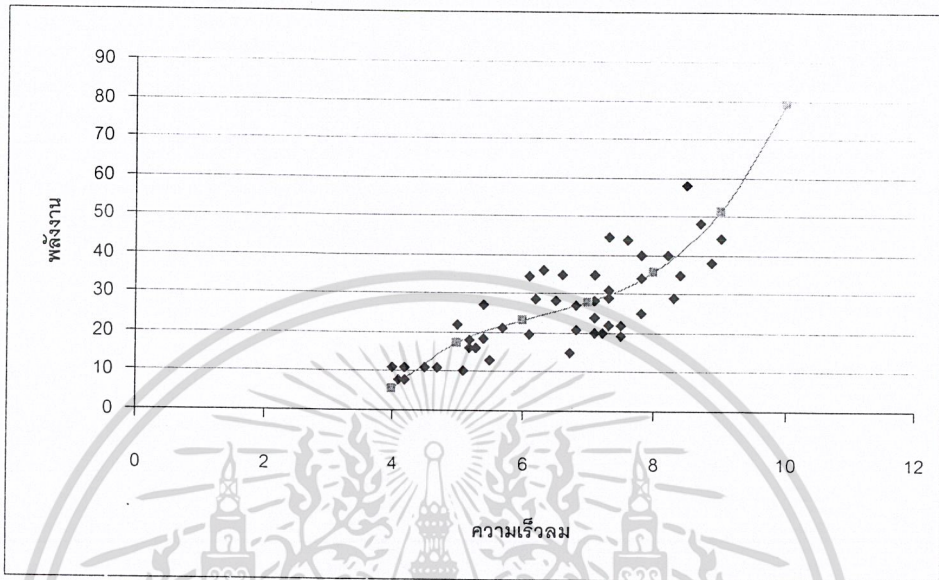
สำหรับใบพัดแบบ SWD เราได้ออกแบบ λ ที่ 1.5 เช่นกัน ผลการทดสอบปรากฏว่า ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที ได้ λ ประมาณ 1.366 ซึ่งเข้าใกล้กับค่าที่ออกแบบเอาไว้ คลาดเคลื่อนประมาณ 8.93% ซึ่งให้ผลที่ดีกว่าใบพัดแบบ VECTOR และมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ ที่ความเร็วลมสูงขึ้น



รูปที่ 8-20 ข้อมูล Tip speed ratio ของใบพัดแบบ VECTOR

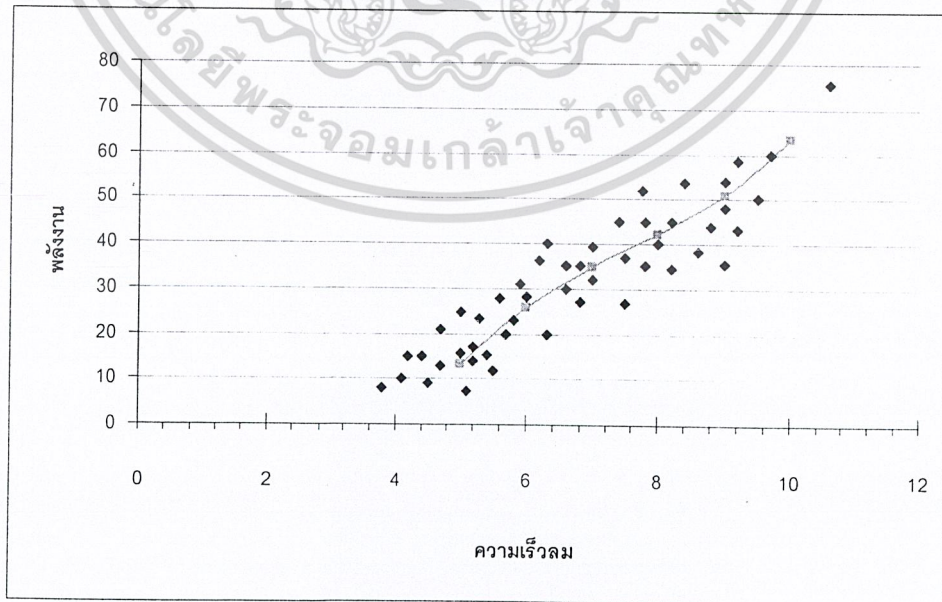
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการทดสอบพลังงานแรงบิดที่ได้จากใบพัดแบบ VECTOR ผลปรากฏว่าที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที จะให้พลังงานแรงบิดประมาณ 17 วัตต์ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆที่ความเร็วลมสูงขึ้น ซึ่งค่าพลังงานที่ได้จากการทดสอบนี้เราจะนำไปเปรียบเทียบกับพลังงานที่ได้จากการคำนวณในภายหลัง



รูปที่ 8-21 ข้อมูลพลังงานของใบพัด VECTOR

สำหรับใบพัดแบบ SWD ผลจากการทดสอบปรากฏว่าเราสามารถวัดพลังงานแรงบิดที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที ได้ประมาณ 13 วัตต์ ซึ่งน้อยกว่าใบพัดแบบ VECTOR และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ความเร็วลมสูงขึ้น



รูปที่ 8-22 ข้อมูลพลังงานของใบพัด SWD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

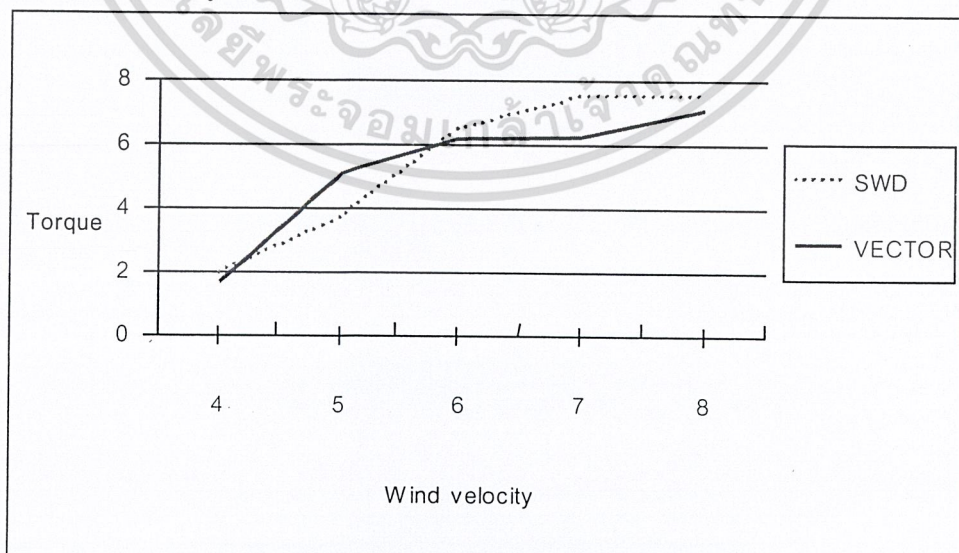
ผลจากการทดสอบพลังงานที่ได้จากใบพัดทั้งสองแบบ เราได้นำมาเปรียบเทียบกันเพื่อให้สามารถเข้าใจได้ง่ายขึ้นว่าใบพัดแบบใด ให้พลังงานมากกว่ากัน

จากกราฟเราจะเห็นได้ว่าที่ความเร็วลมต่ำกว่า 5 เมตรต่อวินาที พลังงานของใบพัดแบบ VECTOR จะมากกว่า SWD และเมื่อความเร็วลมมากกว่า 5 เมตรต่อวินาที แนวโน้มของพลังงานที่ได้จากใบพัดแบบ SWD มากกว่าใบพัดแบบ VECTOR และให้พลังงานเท่ากันประมาณ 21 วัตต์ที่ความเร็วลมประมาณ 5.5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 8-23 เปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากใบพัดทั้งสองแบบ

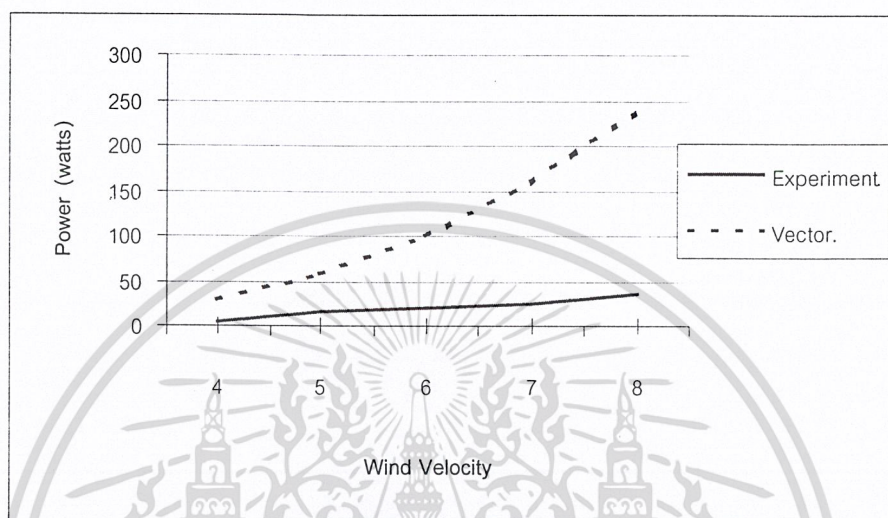
จากนั้นจึงได้เปรียบเทียบแรงบิดที่ได้จากใบพัดทั้งสองแบบ ซึ่งผลที่ได้มีลักษณะค่อนข้างคล้ายกับค่าพลังงานที่วัดได้ จากรูปที่แล้ว



รูปที่ 8-24 เปรียบเทียบแรงบิดที่ได้จากใบพัดทั้งสองแบบ

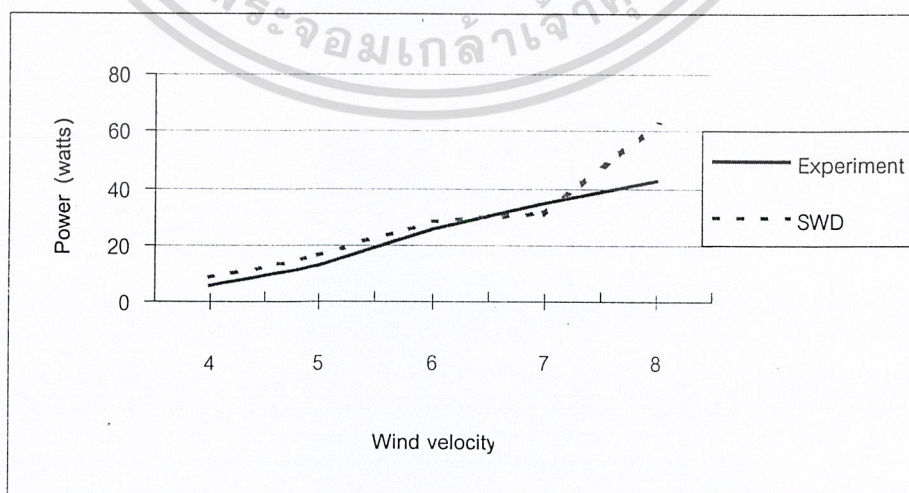
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่เราได้ข้อมูลพลังงานจากการทดสอบใบพัดแบบ VECTOR แล้วจึงได้นำมาเปรียบเทียบกับพลังงานที่คำนวณได้จากการ โดยใช้ทฤษฎีคำนวณพลังงานของ VECTOR ซึ่งผลที่ได้ที่ความเร็วลม 4 เมตรต่อวินาที ค่าคลาดเคลื่อนไป 6.75 เท่าของพลังงานจากการทดลอง และเพิ่มมากขึ้นที่ความเร็วสูงขึ้น และที่ความเร็วลม 8 เมตรต่อวินาที ค่าคลาดเคลื่อนไป 5.7 เท่าจากพลังงานที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 8-25 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากการทดลองกับพลังงานที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีพลังงาน VECTOR คำนวณใบพัดที่ออกแบบมูบิคด้วยทฤษฎี VECTOR

หลังจากที่เราได้ข้อมูลพลังงานจากการทดสอบใบพัดแบบ SWD แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบกับพลังงานที่คำนวณได้จากทฤษฎี SWD ซึ่งผลที่ได้ปรากฏว่า ที่ความเร็วลม 4 เมตรต่อวินาที ค่าคลาดเคลื่อนไปจากการทดลองประมาณ 41.4 % และที่ความเร็วลม 8 เมตรต่อวินาที คลาดเคลื่อนประมาณ 10.4 % ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วค่าที่คำนวณคลาดเคลื่อนไปจากค่าการทดลองประมาณ 16.5 %

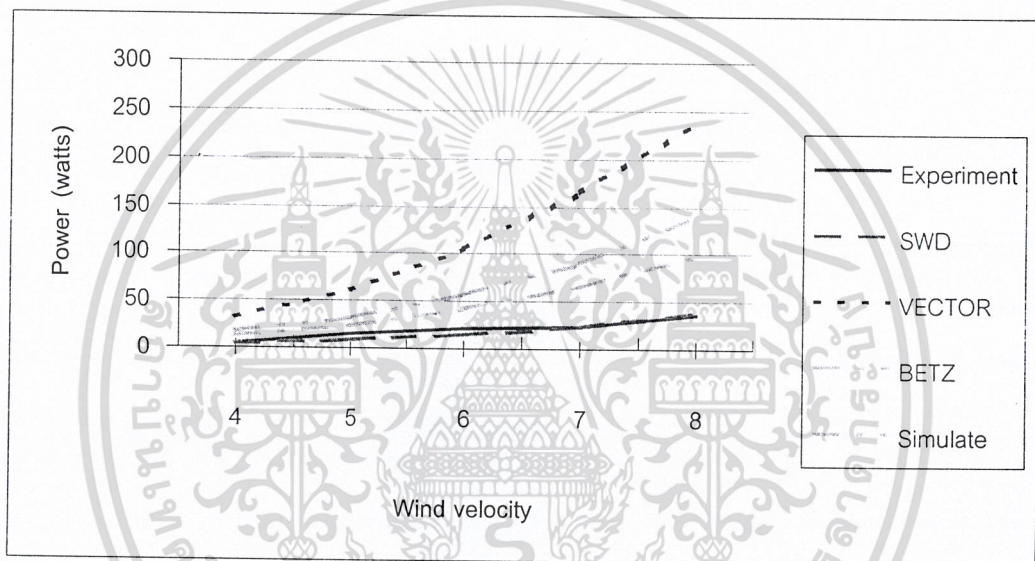


รูปที่ 8-26 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากการทดลองกับพลังงานที่ได้จากการคำนวณโดยใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ ทฤษฎีพลังงาน SWD คำนวณใบพัดที่ออกแบบมูบิคด้วยทฤษฎี SWD ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

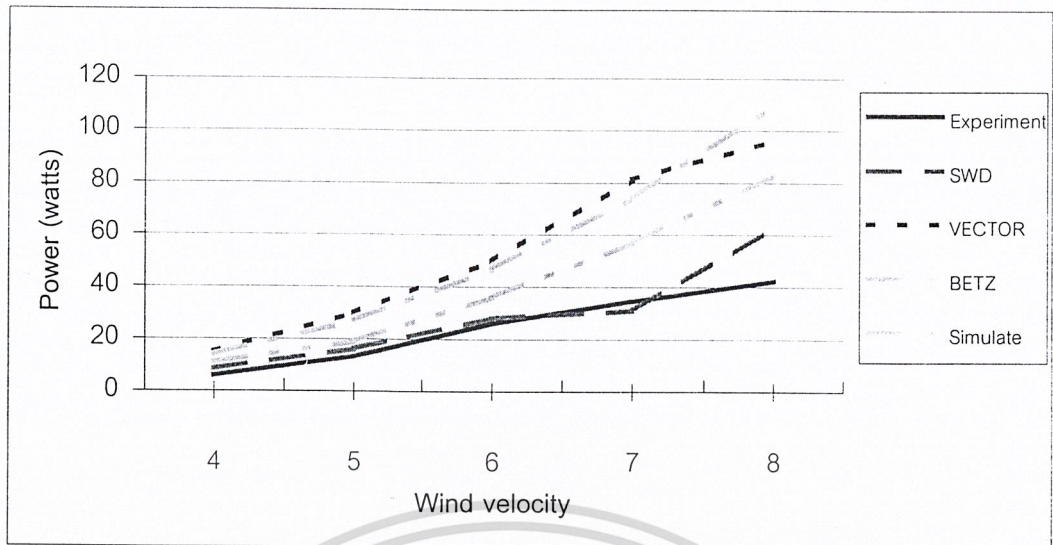
จากนั้นจึงได้ใช้ทฤษฎีการคำนวณพลังงานทฤษฎีอื่น มาคำนวณพลังงานจากใบพัดแบบ VECTOR โดยทำการเปรียบเทียบทั้งหมด 3 ทฤษฎี และผลที่ได้จากการ simulation โดยผลจากการ simulate นี้อาจจะเรายังไม่สามารถสรุปได้เพราะจากวัตถุประสงค์ของเราคือต้องการศึกษาแนวทางการใช้งาน ไม่ได้นำมาใช้ในการออกแบบมากนักทำให้ไม่ได้ค้นคว้าถึงลักษณะ turbulent model ที่ดีนัก และรวมไปถึงการกำหนด boundary ต่างๆ ทำให้ค่าที่ได้ยังคงคลาดเคลื่อนอยู่มาก

จากภาพเราจะเห็นได้ว่าทฤษฎีของ SWD ให้ผลที่ใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุด โดยค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยประมาณ 0.3 เท่าของพลังงานที่ได้จากการทดลอง รองลงมาเป็นทฤษฎีของ Betz ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยประมาณ 1.3 เท่าของพลังงานที่ได้จากการทดลอง และสุดท้ายเป็นทฤษฎีของ VECTOR ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยประมาณ 4.933 เท่าของพลังงานที่ได้จากการทดลอง



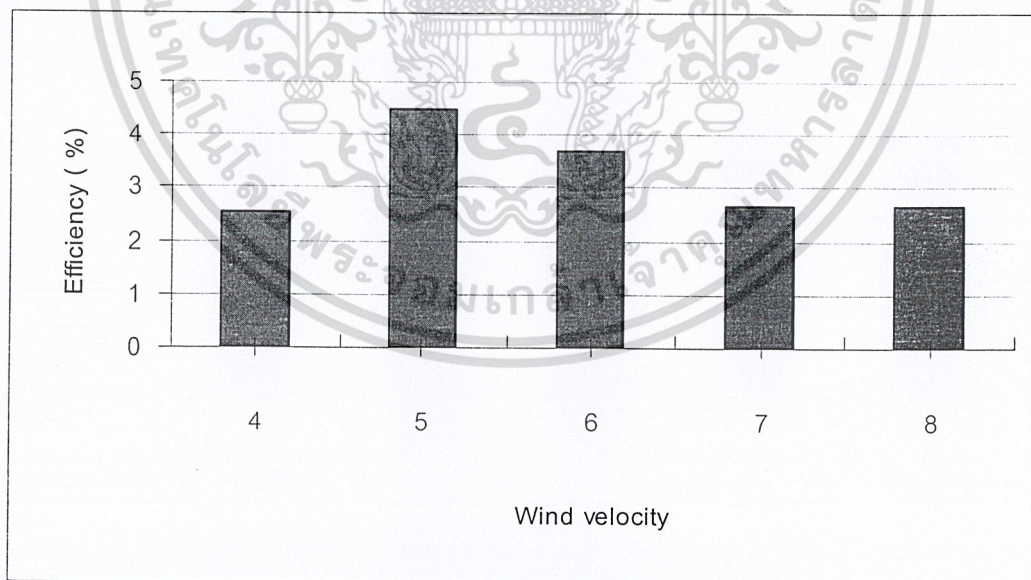
รูปที่ 8-27 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากการทดลองกับพลังงานที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีพลังงานหลายๆ ทฤษฎี มาคำนวณใบพัดที่ออกแบบมุมบิดด้วยทฤษฎี VECTOR

จากนั้นจึงได้ใช้ทฤษฎีการคำนวณพลังงานทฤษฎีอื่น มาคำนวณพลังงานจากใบพัดแบบ SWD โดยทำการเปรียบเทียบทั้งหมด 3 ทฤษฎี และผลที่ได้จากการ simulation จากภาพเราจะเห็นได้ว่าทฤษฎีของ SWD ให้ผลที่ใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุด โดยค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยประมาณ 0.2 เท่าของพลังงานที่ได้จากการทดลอง รองลงมาเป็นทฤษฎีของ Betz ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยประมาณ 1.1 เท่าของพลังงานที่ได้จากการทดลอง และสุดท้ายเป็นทฤษฎีของ VECTOR ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยประมาณ 1.3 เท่าของพลังงานที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 8-28 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากการทดลองกับพลังงานที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีพลังงานหลายๆ ทฤษฎี มาคำนวณใบพัดที่ออกแบบมมบิตด้วยทฤษฎี SWD

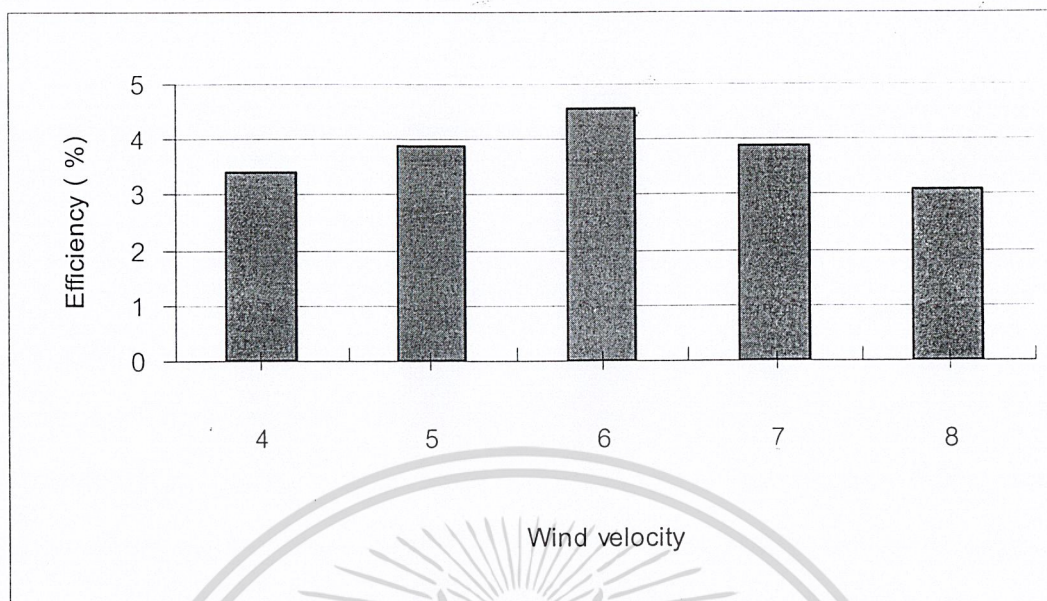
เมื่อทำการคำนวณหาประสิทธิภาพของใบพัดแบบ VECTOR ผลปรากฏว่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที และลดลงที่ความเร็วลมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งถือได้ว่าตรงกับความเร็วลมที่ได้เลือกได้ออกแบบเอาไว้เพราะในแต่ละความเร็วลมและ tip speed ratio จะมีค่ามุมของใบพัดที่แตกต่างกันออกไป



รูปที่ 8-29 แสดงประสิทธิภาพที่ได้จากกังหันที่มีใบพัดออกแบบด้วยทฤษฎี VECTOR

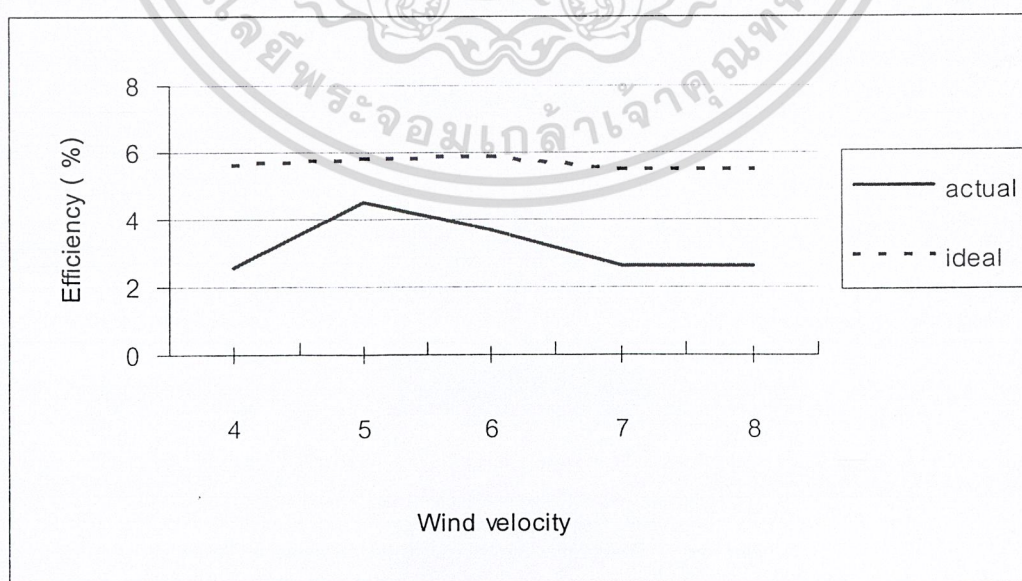
เมื่อทำการคำนวณหาประสิทธิภาพของใบพัดแบบ SWD ผลปรากฏว่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที และลดลงที่ความเร็วลมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งคลาดเคลื่อนไปจากความเร็วที่ออกแบบเอาไว้เล็กน้อยเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8-30 แสดงประสิทธิภาพที่ได้จากกังหันที่มีใบพัดออกแบบด้วยทฤษฎี VECTOR

จากนั้นเราจึงทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของใบพัดแบบ VECTOR ระหว่างมุมบิดที่คำนวณได้จากทางทฤษฎี ซึ่งเราสามารถหาพลังงานได้จากการคำนวณด้วยทฤษฎี SWD เพราะมีค่าคลาดเคลื่อนไปจากการทดลองต่ำที่สุด เปรียบเทียบกับใบพัดที่มีมุมบิดที่วัดได้จริงซึ่งมีค่าพลังงานที่ได้จากการทดลอง ผลปรากฏว่า มีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันมากนัก โดยประสิทธิภาพของใบพัดแบบมุมบิดจากการคำนวณมีประสิทธิภาพค่อนข้างคงที่ ที่ประมาณ 5.5 % และสูงสุดที่ความเร็วลมประมาณ 6 เมตรต่อวินาที

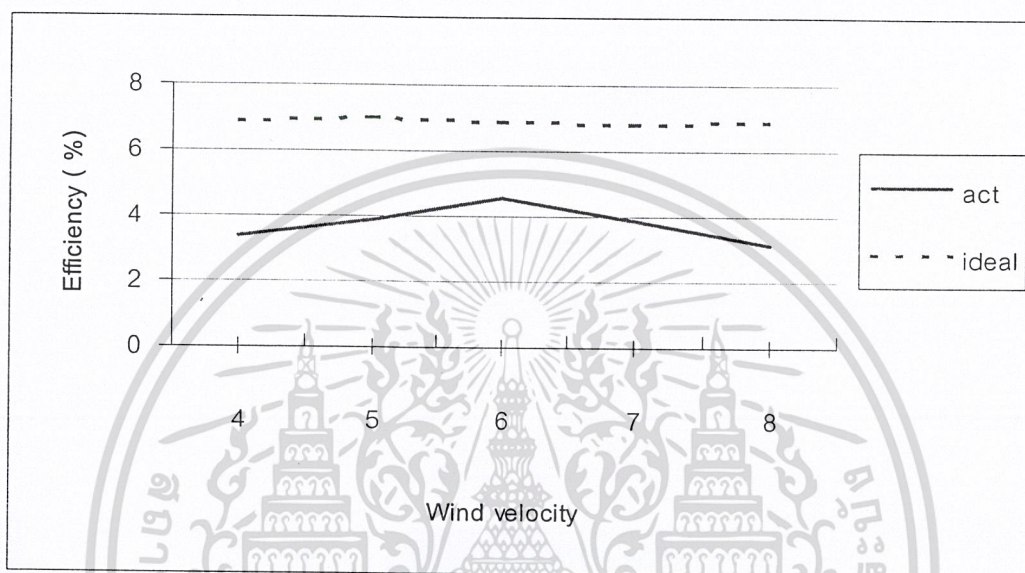


รูปที่ 8-31 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของใบพัดแบบ VECTOR ระหว่างใบพัดที่มีมุมบิดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานกับมุมบิดทางทฤษฎีนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นเราจึงทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของใบพัดแบบ SWD ระหว่างมุมบิดที่คำนวณได้จากทางทฤษฎี โดยใช้การหาพลังงานจากการคำนวณด้วยทฤษฎี SWD แล้วนำมาเปรียบเทียบกับใบพัดที่มีมุมบิดที่วัดได้จริงซึ่งมีค่าพลังงานที่ได้จากการทดลอง

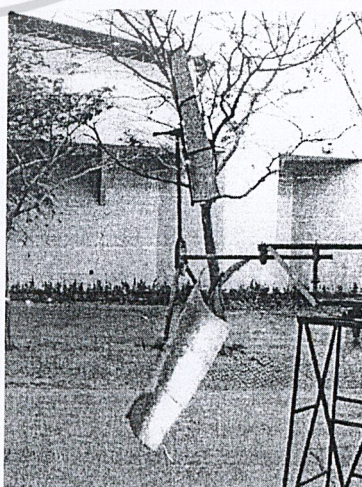
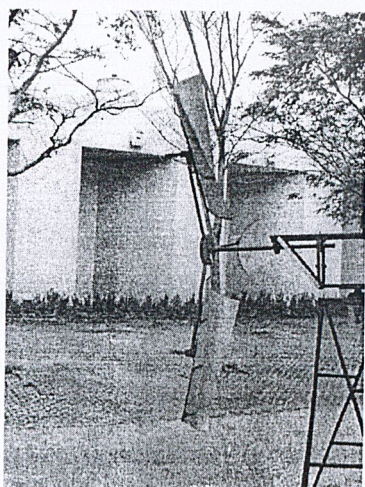
ผลปรากฏว่า มีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันมากนัก โดยประสิทธิภาพของใบพัดแบบมุมบิดจากการคำนวณมีประสิทธิภาพค่อนข้างคงที่ที่ประมาณ 7 % และสูงสุดที่ความเร็วลมประมาณ 5 เมตรต่อวินาที



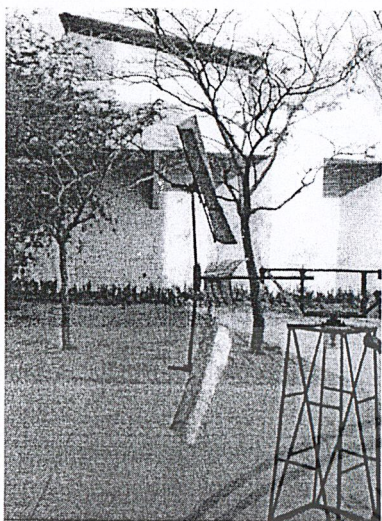
รูปที่ 8-32 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของใบพัดแบบ SWD ระหว่างใบพัดที่มีมุมบิดจริงกับมุมบิดทางทฤษฎี

8.7 ผลการทดลองระบบ Safety

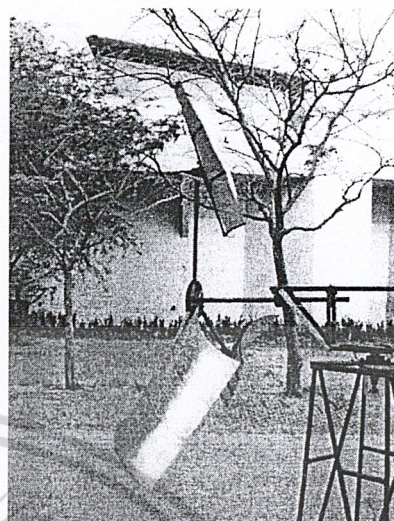
เมื่อทำการผลิตระบบ Safety ตามที่ได้ออกแบบไว้จนเสร็จ แล้วจึงได้นำกังหันลมที่มีระบบ Safety ไปทำการทดลองว่าเป็นอย่างไร โดยผลที่ได้ก็เป็นที่น่าพอใจคือกังหันสามารถพับหลบลมได้ใกล้เคียงกับที่เราได้คำนวณไว้มาก ดังแสดงในรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสาร $V = 5 \text{ m/s}$ ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุ $V = 6 \text{ m/s}$ ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$V = 7 \text{ m/s}$



$V = 8 \text{ m/s}$

รูปที่ 8-33 แสดงลักษณะการฟุ้งของใบพัดที่ความเร็วลมต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

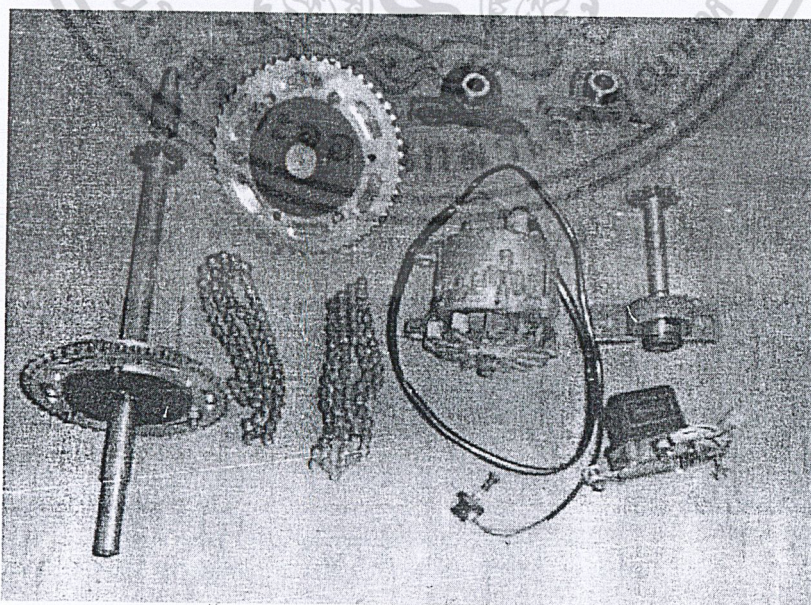
บทที่ 9

สรุป

จากวัตถุประสงค์ของโครงการนี้เกี่ยวข้องกับการออกแบบและพัฒนากังหันลม โดยการค้นคว้าหาทฤษฎีต่างๆ เพื่อที่จะศึกษาว่าควรใช้ทฤษฎีใดมาออกแบบใบพัดเพื่อให้กังหันลมสามารถผลิตกำลังงานออกมาได้ตรงที่เราต้องการ ซึ่งในการวัดพลังงานที่ได้ออกมาจะอยู่ในรูปของพลังงานแรงบิดของเพลแกนหมุนของใบพัด ทั้งนี้เนื่องจากถ้าเราเลือกวัดพลังงานไฟฟ้า เราจะต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของเครื่องเจนเนอเรเตอร์ด้วย ซึ่งยุ่งยากเกินไป และได้ออกแบบโครงสร้างฐานของกังหันลมโดยได้มีการนำเอาโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้าน Finite element มาช่วยในการวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วย ซึ่งลดระยะเวลาในการคำนวณไปได้อย่างมาก รวมถึงการออกแบบให้ฐานรองรับชุดกังหันสามารถที่จะหมุนเข้าหาลมได้เองเมื่อลมเกิดเปลี่ยนทิศทาง โดยเราได้เลือกติดตั้งชุดใบพัดไว้ที่ด้านหลังของจุดหมุนของโครงสร้าง เพราะเมื่อลมเกิดเปลี่ยนทิศทางจะเกิดโมเมนต์รอบจุดหมุนซึ่งทำให้ชุดกังหันหมุนเข้าหาทิศทางลมได้เอง ซึ่งจะแตกต่างกับการเลือกติดตั้งไว้ที่ด้านหน้าจุดหมุนของโครงสร้าง เพราะเมื่อลมเกิดเปลี่ยนทิศทางจะเกิดโมเมนต์ที่จะหมุนชุดกังหันหลบลม และการออกแบบชุดอุปกรณ์ป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับใบพัด เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดกับใบที่ความเร็วลมสูงๆ ซึ่งในขั้นตอนของการออกแบบนี้เราคำนึงถึงแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางด้วย เพราะแรงนี้จะมีผลอย่างมากต่อการพับของใบ ซึ่งถ้าเราเลือกจุดพับที่ไม่เหมาะสมจะเกิดโมเมนต์เนื่องจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมากทำให้ใบพัดไม่สามารถที่จะพับหลบลมได้ ทั้งนี้รวมถึงการศึกษาถึงแนวทางการนำเอาโปรแกรมทางด้าน CFD (Computation Fluid Dynamic) มาช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ใบพัดด้วย

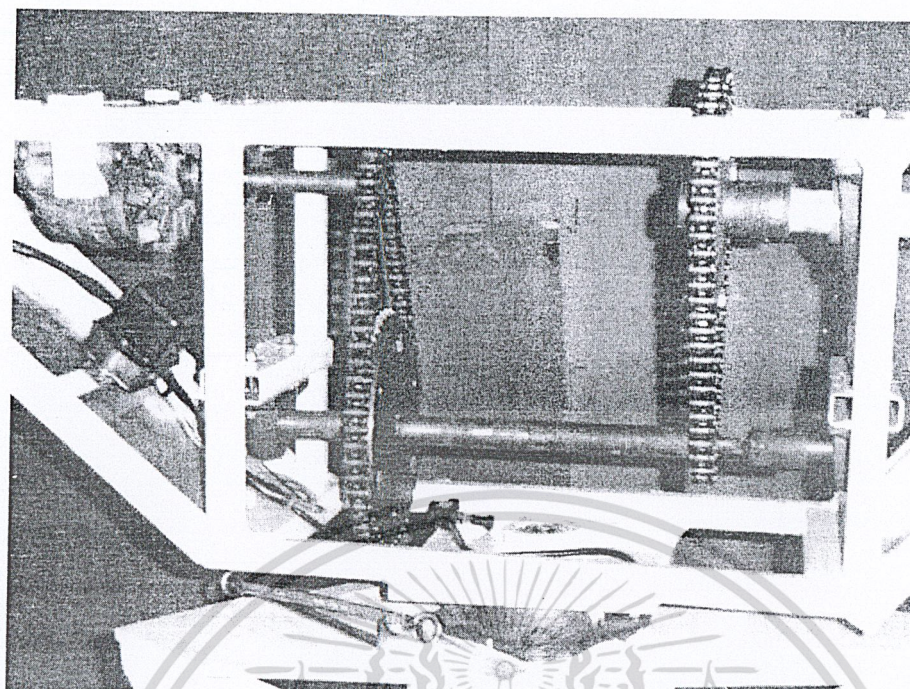
นอกจากนี้ได้แสดงการติดตั้งอุปกรณ์เจนเนอเรเตอร์เพื่อนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าจริงได้ด้วยดัง

รูป

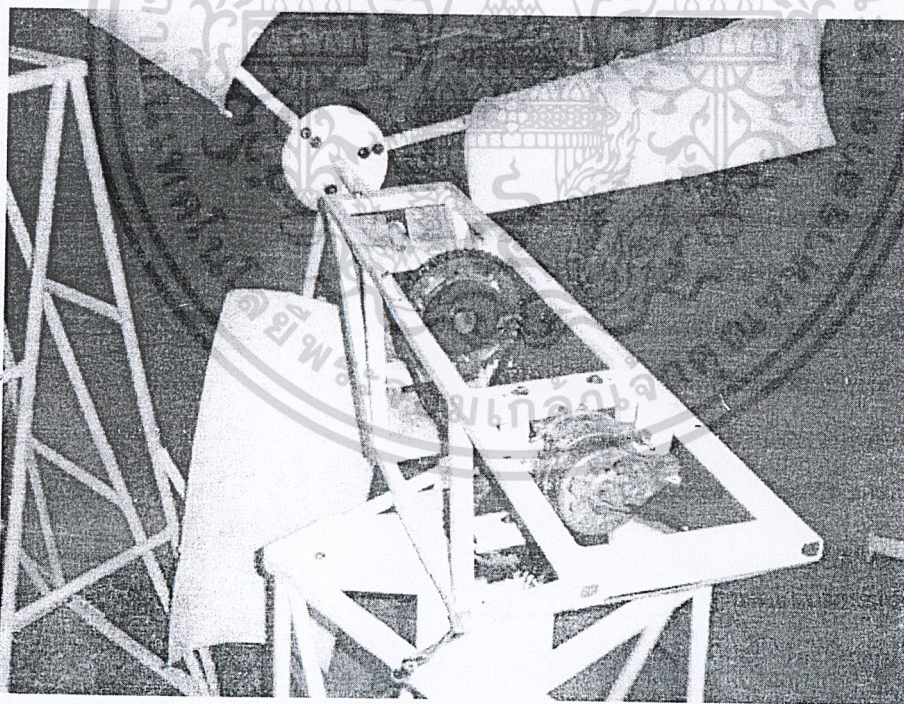


รูปที่ 9-1 แสดงถึงอุปกรณ์ต่างๆ ที่ติดตั้งเพื่อนำเอาพลังงานไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

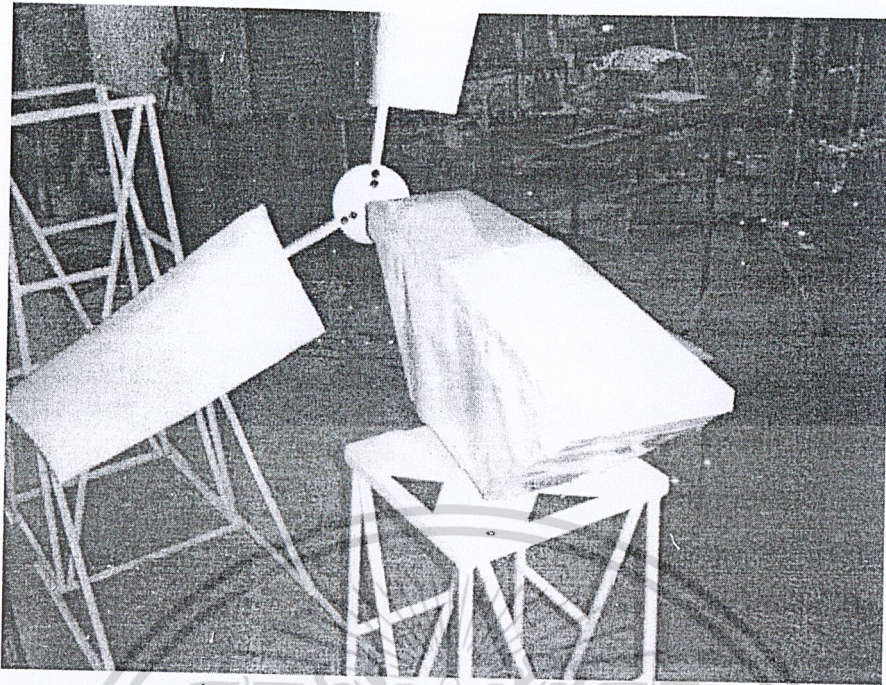


รูปที่ 9-2 แสดงชุดเฟืองทดเพื่อเพิ่มความเร็วรอบของแกนหมุน



รูปที่ 9-3 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดเข้ากับชุดกังหัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9-4 แสดงฉากกรอบเพื่อป้องกันน้ำเข้าสู่อุปกรณ์

9.1 สรุปผล

จากการดำเนินงานมาทั้งหมดเราสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ทฤษฎีที่ให้ผลแม่นยำมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบทฤษฎีทั้งหมด 3 ทฤษฎี ได้แก่ SWD , Vector และ Betz คือ ทฤษฎีของ SWD ทำให้ในการออกแบบใบพัดในครั้งต่อไปเราสามารถที่จะออกแบบขนาดสัดส่วนต่างของใบพัด ได้แก่ มุมบิดของใบพัด ขนาดความกว้างของใบ ความยาว และจำนวนใบพัด เพื่อให้กังหันลมสามารถผลิตกำลังได้ออกมาตามที่เราต้องการได้
2. จากการนำเอาโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้าน Finite element มาช่วยในการวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้าง ทำให้เราสามารถที่จะลดระยะเวลาที่ต้องใช้ในการคำนวณๆ ได้อย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องคิดเลขคำนวณด้วยตัวเอง
3. สำหรับการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันความเสียหายของใบพัด หลังจากการนำไปทดลองพบว่าเมื่อความเร็วลมสูงขึ้นจนถึงค่าที่กำหนดใบพัดสามารถที่จะเริ่มพับหลบลมได้เอง ซึ่งเมื่อเรากำหนดความเสียหายของแกนใบพัดเพื่อเปรียบเทียบระหว่างมีอุปกรณ์ป้องกัน และไม่มีอุปกรณ์ป้องกันแล้ว พบว่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นที่แกนของใบพัดที่มีอุปกรณ์ป้องกันความเสียหายนี้จะเกิดน้อยกว่าแกนที่ไม่มีอุปกรณ์นี้
4. จากการนำเอาชุดกังหันออกไปทดสอบการหมุนเข้าหาทิศทางลม โดยในขั้นแรกได้หมุนให้ใบพัดหลบทิศทางลมไปมากกว่า 90 องศา จากนั้นจึงปล่อยเอาไว้ ชักพัดลมสามารถที่จะพัดให้ชุดใบพัดสามารถหมุนเข้าหาทิศทางลมได้เอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.2 ปัญหาที่พบ

- การตั้งมุมบิดของใบพัดให้ได้ตามที่คำนวณเอาไว้ในตอนแรกนั้น ทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากในขณะที่ทำการเชื่อมเพื่อยึดติดระหว่างโครงเหล็กกับแกนของใบพัดนี้ วัสดุอาจจะเกิดการหดตัวและเกิดการกระทบกันระหว่างลวดเชื่อมกับโครงเหล็กทำให้มุมอาจเกิดคลาดเคลื่อนไปได้บ้าง
- ในการประกอบยึดแผ่นสังกะสีเข้ากับโครงสร้างของใบพัดที่มีมุมบิดมาๆนั้นจะยึดค่อนข้างยาก เพราะแรงดึงของแผ่นสังกะสีจะสูงถ้าเกิดเรอบิดมาๆ ทำให้เกิดขีดจำกัดทางด้านวัสดุด้วย
- ในขั้นตอนของการทดลองวัดค่าพลังงานแรงบิดที่ได้จากใบพัด พลังงานส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปกับแรงเสียดทานต่างๆ เช่นที่แบริ่ง ทำให้พลังงานที่ได้จึงคลาดเคลื่อนไปบ้าง
- ในขณะที่ทำการทดลอง ค่าความเร็วลมที่วัดได้จะแกว่งอยู่บ้าง ทั้งนี้เนื่องจากการยากที่จะควบคุมความเร็วของรถยนต์ให้ได้คงที่ตลอดเวลา และรวมถึงลมที่เกิดกระโชกแรงในบางครั้งด้วยซึ่งจะต้องรอให้ลมสงบ กงที่ก่อนจึงจะเก็บค่าต่อได้ แต่ข้อมูลที่ได้อาจเปลี่ยนแปลงอยู่ ไม่คงที่เท่าใดนัก
- ลักษณะรูปร่างโค้งของใบพัดที่ใช้ในนี้ ในขณะที่หมุนอยู่จะเกิดการปั่นป่วนที่บริเวณด้านหลังของใบสูง ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานและประสิทธิภาพของใบลดลงไปด้วย ซึ่งในการพัฒนาขั้นต่อไป ควรเลือกใช้รูปร่างของใบพัดที่เกิดความปั่นป่วนที่ด้านหลังใบน้อยๆ เช่น แบบ nasa 4412 , nasa 2415 เป็นต้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของใบพัดให้ได้มากกว่านี้
- คอมพิวเตอร์ที่ใช้ใน simulate ยังมีประสิทธิภาพที่ไม่สูงมากนัก ทำให้ใช้ระยะเวลาในการประมวลผลมาก ซึ่งในบางข้อมูลต้องการใช้เวลาในการประมวลผลหลายวันจึงจะได้ผลออกมา
- การศึกษาความรู้ทางด้าน CFD ยังไม่มากพอที่จะสามารถวิเคราะห์ปัญหาได้ว่าควรจะใช้ turbulent model แบบใดจึงจะให้ผลตรงกับข้อมูลจากการทดลอง
- ใช้ระยะเวลามากในการศึกษาโปรแกรม เนื่องจากไม่มีความรู้ทางด้านนี้มาก่อน
- จากผลการ simulate ปีกของ naca แบบ 2 มิติ ให้ผลที่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง แต่เมื่อทดลอง simulate ใบพัดแบบ f/c ผลปรากฏว่า เกิดค่าคลาดเคลื่อนมากพอสมควร ซึ่งคาดว่าอาจเกิดจาก ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหลังของใบจะมีผลกับความแม่นยำของโปรแกรม

9.3 แนวทางแก้ไขและพัฒนา

- ควรเลือกใช้ใบพัดที่มีรูปร่างที่มีความปั่นป่วนบริเวณด้านหลังใบน้อยๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกังหัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เลือกใช้วัสดุที่มีความยืดหยุ่นนำมาทำใบ เพื่อให้สามารถที่จะบิดตัวดุนั้น ให้เข้ากับมุมบิดของโครงสร้างใบพัดได้
- ในการ simulate ควรใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อลดระยะเวลาในการประมวลผล
- ถ้าต้องการให้ผลการวิเคราะห์จาก simulate แม่นยำควรจะศึกษาความรู้ทางด้าน CFD และเข้าใจลักษณะการไหล การเกิดความปั่นป่วน เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการกำหนดให้กับโมเดล ให้มากขึ้น
- ในการทดลอง ถ้าเป็นไปได้ควรรอให้ลมสงบนิ่งเป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนแล้วจึงเริ่มเก็บค่า เพื่อให้ได้ข้อมูลที่คงที่ น่าเชื่อถือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลการทดสอบแรงยกและแรงต้านของใบพัดในอุโมงค์ลม f/c ต่างๆ

$$f/c = 0.1$$

angle	FORE	AFT	DRAG	LIFT	CL	CD	CL/CD
0	0.04	0.26	0.19	0.3	0.194805	0.123377	1.578947
5	0.13	0.39	0.19	0.52	0.337662	0.123377	2.736842
10	0.24	0.46	0.24	0.7	0.454545	0.155844	2.916667
15	0.33	0.56	0.32	0.89	0.577922	0.207792	2.78125
20	0.31	0.59	0.41	0.9	0.584416	0.266234	2.195122
25	0.31	0.57	0.52	0.88	0.571429	0.337662	1.692308
30	0.35	0.61	0.67	0.96	0.623377	0.435065	1.432836
35	0.39	0.69	0.85	1.08	0.701299	0.551948	1.270588
40	0.46	0.63	1.08	1.09	0.707792	0.701299	1.009259
45	0.44	0.61	1.3	1.05	0.681818	0.844156	0.807692
50	0.43	0.69	1.52	1.12	0.727273	0.987013	0.736842
55	0.41	0.72	1.8	1.13	0.733766	1.168831	0.627778
60	0.41	0.69	2.02	1.1	0.714286	1.311688	0.544554
65	0.33	0.65	2.22	0.98	0.636364	1.441558	0.441441
70	0.22	0.54	2.39	0.76	0.493506	1.551948	0.317992
75	0.17	0.43	2.54	0.6	0.38961	1.649351	0.23622
80	0.09	0.33	2.67	0.42	0.272727	1.733766	0.157303
85	0.04	0.19	2.69	0.23	0.149351	1.746753	0.085502
90	-0.02	0.07	2.73	0.05	0.032468	1.772727	0.018315

ตารางที่ 1 แสดงค่าแรงยกและแรงต้านที่มุมปะทะต่างๆของ $f/c = 0.1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f/c = 0.2$$

ANGLE	FORE	AFT	DRAG	LIFT	CL	CD	CL/CD
0	0	0.35	0.3	0.35	0.227273	0.194805	1.166667
5	0.13	0.46	0.32	0.59	0.383117	0.207792	1.84375
10	0.3	0.56	0.37	0.86	0.558442	0.24026	2.324324
15	0.5	0.65	0.44	1.15	0.746753	0.285714	2.613636
20	0.52	0.7	0.56	1.22	0.792208	0.363636	2.178571
25	0.46	0.72	0.7	1.18	0.766234	0.454545	1.685714
30	0.52	0.74	0.89	1.26	0.818182	0.577922	1.41573
35	0.52	0.82	1.13	1.34	0.87013	0.733766	1.185841
40	0.54	0.87	1.33	1.41	0.915584	0.863636	1.06015
45	0.56	0.85	1.59	1.41	0.915584	1.032468	0.886792
50	0.52	0.82	1.84	1.34	0.87013	1.194805	0.728261
55	0.48	0.78	2.04	1.26	0.818182	1.324675	0.617647
60	0.39	0.7	2.28	1.09	0.707792	1.480519	0.47807
65	0.37	0.67	2.52	1.04	0.675325	1.636364	0.412698
70	0.22	0.56	2.71	0.78	0.506494	1.75974	0.287823
75	0.15	0.39	2.76	0.54	0.350649	1.792208	0.195652
80	0.04	0.35	2.87	0.39	0.253247	1.863636	0.135889
85	-0.02	0.17	2.91	0.15	0.097403	1.88961	0.051546
90	-0.07	0.02	2.93	-0.05	-0.032468	1.902597	-0.017065

ตารางที่ 2 แสดงค่าแรงยกและแรงต้านที่มุมปะทะต่างๆของ $f/c = 0.2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f/c = 0.3$$

ANGLE	FORE	AFT	DRAG	LIFT	CL	CD	CL/CD
0	-0.07	0.09	0.35	0.02	0.012987	0.227273	0.057143
5	0.02	0.39	0.37	0.41	0.266234	0.24026	1.108108
10	0.22	0.65	0.44	0.87	0.564935	0.285714	1.977273
15	0.44	0.74	0.52	1.18	0.766234	0.337662	2.269231
20	0.7	0.78	0.57	1.48	0.961039	0.37013	2.596491
25	0.81	0.85	0.72	1.66	1.077922	0.467532	2.305556
30	0.72	0.93	0.96	1.65	1.071429	0.623377	1.71875
35	0.7	0.98	1.26	1.68	1.090909	0.818182	1.333333
40	0.67	0.98	1.46	1.65	1.071429	0.948052	1.130137
45	0.7	0.98	1.76	1.68	1.090909	1.142857	0.954545
50	0.67	0.89	2.07	1.56	1.012987	1.344156	0.753623
55	0.63	0.83	2.32	1.46	0.948052	1.506494	0.62931
60	0.54	0.78	2.56	1.32	0.857143	1.662338	0.515625
65	0.56	0.8	2.8	1.36	0.883117	1.818182	0.485714
70	0.3	0.63	3	0.93	0.603896	1.948052	0.31
75	0.2	0.57	3.17	0.77	0.5	2.058442	0.242902
80	0.07	0.41	3.28	0.48	0.311688	2.12987	0.146341
85	-0.02	0.26	3.33	0.24	0.155844	2.162338	0.072072
90	-0.09	0.13	3.36	0.04	0.025974	2.181818	0.011905

ตารางที่ 3 แสดงค่าแรงยกและแรงต้านที่มุมปะทะต่างๆของ $f/c = 0.3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{f}{c} = 0.4$$

ANGLE	FORE	AFT	DRAG	LIFT	CL	CD	CL/CD
0	-0.2	0.15	0.41	-0.05	-0.032468	0.266234	-0.121951
5	-0.4	0.39	0.43	-0.01	-0.006494	0.279221	-0.023256
10	0.24	0.67	0.56	0.91	0.590909	0.363636	1.625
15	0.5	0.76	0.63	1.26	0.818182	0.409091	2
20	0.89	0.83	0.69	1.72	1.116883	0.448052	2.492754
25	0.98	0.74	0.72	1.72	1.116883	0.467532	2.388889
30	1.06	0.76	0.85	1.82	1.181818	0.551948	2.141176
35	0.85	0.87	1.21	1.72	1.116883	0.785714	1.421488
40	0.8	0.89	1.46	1.69	1.097403	0.948052	1.157534
45	0.8	0.91	1.74	1.71	1.11039	1.12987	0.982759
50	0.78	0.85	2	1.63	1.058442	1.298701	0.815
55	0.74	0.87	2.26	1.61	1.045455	1.467532	0.712389
60	0.64	0.76	2.5	1.4	0.909091	1.623377	0.56
65	0.5	0.68	2.73	1.18	0.766234	1.772727	0.432234
70	0.41	0.59	2.89	1	0.649351	1.876623	0.346021
75	0.26	0.48	3	0.74	0.480519	1.948052	0.246667
80	0.15	0.35	3.15	0.5	0.324675	2.045455	0.15873
85	-0.02	0.22	3.19	0.2	0.12987	2.071429	0.062696
90	-0.09	0.06	3.21	-0.03	-0.019481	2.084416	-0.009346

ตารางที่ 4 แสดงค่าแรงยกและแรงต้านที่มุมปะทะต่างๆของ $\frac{f}{c} = 0.4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f/c = 0.5$$

ANGLE	FORE	AFT	DRAG	LIFT	CL	CD	CL/CD
0	-0.4	-0.9	0.56	-1.3	-0.844156	0.363636	-2.321429
5	-0.32	0.04	0.5	-0.28	-0.181818	0.324675	-0.56
10	-0.15	0.45	0.59	0.3	0.194805	0.383117	0.508475
15	0.22	0.69	0.76	0.91	0.590909	0.493506	1.197368
20	0.52	0.82	0.83	1.34	0.87013	0.538961	1.614458
25	0.87	1.16	1.13	2.03	1.318182	0.733766	1.79646
30	1.05	1.02	1.2	2.07	1.344156	0.779221	1.725
35	1.04	1.08	1.21	2.12	1.376623	0.785714	1.752066
40	1.11	1.08	1.3	2.19	1.422078	0.844156	1.684615
45	0.96	0.8	1.59	1.76	1.142857	1.032468	1.106918
50	0.89	0.91	1.95	1.8	1.168831	1.266234	0.923077
55	0.76	0.96	2.19	1.72	1.116883	1.422078	0.785388
60	0.67	0.91	2.43	1.58	1.025974	1.577922	0.650206
65	0.57	0.76	2.65	1.33	0.863636	1.720779	0.501887
70	0.43	0.65	2.78	1.08	0.701299	1.805195	0.388489
75	0.33	0.52	2.99	0.85	0.551948	1.941558	0.284281
80	0.2	0.41	3.13	0.61	0.396104	2.032468	0.194888
85	0	0.26	3.19	0.26	0.168831	2.071429	0.081505
90	-0.07	0.13	3.21	0.06	0.038961	2.084416	0.018692

ตารางที่ 5 แสดงค่าแรงยกและแรงต้านที่มุมปะทะต่างๆของ $f/c = 0.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลการทดสอบความเร็วรอบและพลังงานแรงบิดของใบพัดแบบ SWD

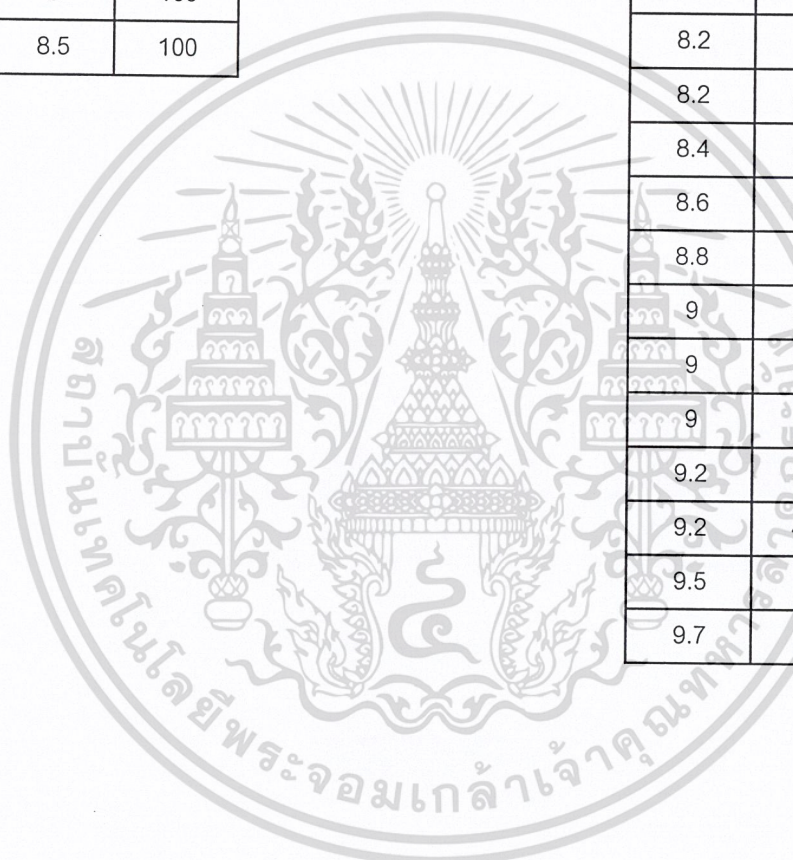
Vw	N(RPM)
3	30
3	30
3	30
3.1	29
3.5	38
3.8	43
4	40
4	50
4.1	50
4.4	57
4.6	50
4.7	47
5	57.1
5	50
5.1	55
5.1	55
5.1	55
5.2	55
5.2	60
5.3	66.7
5.5	66.67
5.7	62
5.9	60
6	60
6	55
6.3	66.67

Vw	P(watt)
3.8	8
4.1	10
4.2	15
4.4	14.8
4.5	9
4.7	13
4.7	20.7
5	15.7
5	24.6
5.1	7.2
5.2	14
5.2	17
5.3	23.3
5.4	15.4
5.5	12
5.6	28
5.7	20
5.8	23
5.9	30.8
6	28.2
6.2	36.16
6.3	20
6.3	40
6.6	30
6.6	35
6.8	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.7	66.7
6.8	72
7	86
7.1	75
7.6	86
7.6	67
7.6	80
7.8	75
7.9	86
8	100
8.5	100

6.8	35
7	39.447
7	32
7.4	45
7.5	36.98
7.5	26.9
7.75	51.8
7.8	35
7.8	45
8	40
8.2	45
8.2	34.4
8.4	53.4
8.6	38.4
8.8	44
9	35.4
9	48
9	54
9.2	58.4
9.2	43.3
9.5	50
9.7	60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการทดสอบความเร็วรอบและพลังงานแรงบิดของใบพัดแบบ VECTOR

Vw	N (RPM)
2.9	31.6
3	30
3	27.3
3.2	27.3
3.3	33.3
3.5	39.1
3.8	37
3.8	44.3
4	32
4	40
4.1	40
4.3	46.2
4.3	46.2
4.5	40
4.6	48
4.7	55
4.8	43
4.8	34.3
5	38.7
5	60.5
5.1	55
5.1	43
5.1	46
5.2	50
5.3	60
5.3	46.2
5.4	55

Vw	P(watt)
4	11
4.1	8
4.2	11
4.2	8
4.5	11
4.7	11
5	22
5.1	10
5.2	16
5.2	18
5.3	16
5.4	18.4
5.4	27
5.5	13
5.7	21
6.1	34.3
6.1	19.5
6.2	28.4
6.3	36
6.5	28
6.6	34.7
6.7	14.8
6.8	20.7
6.8	27
7.1	20
7.1	24
7.1	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5	62.7
5.5	46
5.5	58.6
5.6	43
5.7	55
5.7	50
6	40
6	60
6.1	45
6.2	66
6.3	50
6.5	63.8
7.3	75
6.6	70.5
6.7	55
7	60

7.1	28
7.1	35
7.2	20
7.3	22
7.3	44.6
7.3	29
7.3	31
7.5	22
7.5	19
7.6	44
7.8	25
7.8	40
8.2	40
8.3	29
8.5	58
8.87	38
8.4	35
8.7	48
7.8	34
9	44.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] วรวิทย์ อึ้งภากรณ์ , “การออกแบบเครื่องมือกล”, กรุงเทพฯ
- [2] วีระศักดิ์ ทรัพย์วิเชียร , สมาน เจริญกิจพุดผล, “กลศาสตร์วิศวกรรม”, กรุงเทพฯ
- [3] ดร.เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์ , “กลศาสตร์วัสดุ” ,นนทบุรี 2540
- [4] E.H.Lysen , “INTRODUCTION TO WIND ENERGY” , Netherland, August 1982
- [5] Jack Park , “SIMJPLIFIED WIND POWER SYSTEM FOR EXPERIMENTERS” , Symler California 1975
- [6] Bridget Cheyney , Joan Mackey , Mary Mudge , “WIND ENERGY FOR THE EIGHTTTIES” , British wind energy associated
- [7] Frank M.White , “Fluid Mechanic” , McGRAW-HILL, INC. , 3rd edition



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้