

10-MEC

200

2542

8.2

การศึกษาสมรรถนะของกังหันลมชาโวเนียสแบบใบสามารถแกว่งได้

Study of Savonius Rotor Using Swinging Blade

นายสุวิทย์ สมภักดิ์
นายเหม็นต์ วิเศษสิงห์
นายอดิเรก คำพิมพ์

โครงการนิพนธ์การศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2542

2 พ.ค. 2543

หัวข้อโครงการวิศวกรรมศาสตร์

การศึกษาสมรรถนะของกังหันลม

ชาโวนีเยสแบบใบสามารถแกว่งได้

โดย

นายสุวิทย์ สมภักดิ์

นายhemันต์ วิเศษสิงห์

นายอดิเรก คำพิมพ์

ภาควิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา

นายบัญชา คังตระกูล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อนุมัติให้นับโครงการ
วิศวกรรมศาสตร์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รศ.ดร. ศักดิ์ กองสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรมศาสตร์

ประธานกรรมการ

(อาจารย์บัญชา คังตระกูล)

กรรมการ

(ผศ. กันจวีร์ชัย พลุประทุม)

กรรมการ

(อาจารย์สุวัฒน์ จิตศิริพานิช)

กรรมการ

(อาจารย์สมชาย เข้มโต)

การศึกษาสมรรถนะกังหันลมชาโวเนียสแบบใบสามารถแกว่งได้

ปีการศึกษา 2542

โดย

นายสุวิทย์ สมภักดิ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

นายเหม็นต์ วิเศษสิงห์

นายบัญชา คังตระกูล

นายอดิเรก คำพิมพ์

บทคัดย่อ

โครงการวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตนี้เป็นการศึกษาสมรรถนะของกังหันลมชาโวเนียสแบบใบแกว่งได้ โดยออกแบบตัวโรเตอร์กังหันลมให้สามารถติดตั้งใบแบบแกว่งได้ 2 ใบและ 3 ใบเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของค่าอัตราส่วนความหนาแน่นพื้นที่ใบต่อสมรรถนะของโรเตอร์กังหันลมโดยใช้อุโมงค์ลมทดสอบกังหันลมที่ได้ทำการออกแบบไว้

การทดสอบกังหันชนิดที่ได้ออกแบบพบว่า กังหันลมแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ จะให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด 0.032 ที่ความเร็วลม 8 m/s และอัตราส่วนความเร็วปลายใบเท่ากับ 0.686 ส่วนกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ จะให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด 0.038 ที่ความเร็วลม 8 m/s และอัตราส่วนความเร็วปลายใบเท่ากับ 0.558

Study of Savonius Rotor Using Swinging Blade

Academic Year 1999

By

Mr.Suwit Sompuk

Mr.Heamun Wisessing

Mr.Adirek Cumpim

Project Report Advisor

Mr.Bancha Kongtragoul

ABSTRACT

The objective of this project is a studying the performance of Savonius Rotor Using Swing Blade which is designed to change number of blade, 2 and 3 blades. The testing wind rotor models in a wind tunnel to find performance of wind rotor .

From testing of Savonius Rotor Using 2 Swinging Blades, the maximum power coefficient is 0.032 at wind speed 8 m/s and tip speed ratio of 0.686 and Savonius Rotor Using 3 Swinging Blades, the maximum power coefficient is 0.038 at wind speed 8 m/s and tip speed ratio of 0.558.

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการปริญญานิพนธ์นี้ คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ บัญชา กังสระหฤ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์แก่การทำโครงการนี้ และขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ และบุคลากร ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกลที่ได้ให้ข้อคิด และคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำโครงการนี้ กราบขอบพระคุณบิดา มารดา เป็นอย่างสูงที่ได้ให้กำเนิด และได้ให้การอบรมเลี้ยงดูมาโดยตลอด ทำให้คณะผู้จัดทำได้เกิดมามีร่างกายแข็งแรง และสมบูรณ์ มีสติปัญญา มีความคิด สามารถรับผิดชอบตนเองได้ จนสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี

โครงการปริญญานิพนธ์นี้จะเสร็จสมบูรณ์ไม่ได้เลย หากขาดผู้ที่กล่าวนามมาข้างต้น ทั้งนี้รวมทั้งผู้ที่คณะผู้จัดทำไม่ได้กล่าวนามด้วยซึ่งมีส่วนช่วยให้โครงการนี้เสร็จสมบูรณ์

คณะผู้จัดทำ

3 กุมภาพันธ์ 2543

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฅ
บทที่	
1. บทนำ	
ความสำคัญและที่มาของโครงการ	1
วัตถุประสงค์ของโครงการ	7
ขอบเขตโครงการ	7
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
ขั้นตอนการทำโครงการ	
2. ทฤษฎี	
พลังงานที่มีอยู่ในลม	9
การเปลี่ยนกำลังลมเป็นกำลังเพลลา	9
การแบ่งประเภทของกังหันลม	10
กังหันแกนตั้งและกังหันแกนนอน	11
คุณลักษณะของกังหันแกนตั้ง	12
พลังงานลมกับกำลังจากลม	12
สัมประสิทธิ์ของกำลังและแรงบิด	14
ค่า Rotor Solidity	15
การวิเคราะห์กังหันลม	20
Aerodynamic Models	23
Momentum Models	23
Vertex Models	25
Local Circulation Method	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 2 (ต่อ)	
ความเค้นวิกฤต	59
ความกว้างและความยาวของสายพานแบน	60
3. การออกแบบและคำนวณ	
การเลือกขนาดพัลลุมและมอเตอร์	62
การคำนวณมวลของใบพัด	64
การคำนวณมวลของไดนาโมมิเตอร์	66
การคำนวณหาขนาดของเชือก	72
การคำนวณความแข็งแรงของตัวแท่นทดสอบกึ่งหั่นลม	73
ความเค้นเฉือนบนแผ่นเพลตและหัวน็อต	77
การคำนวณการดัดของแท่นทดสอบ	79
การคำนวณ ไดนาโมมิเตอร์	80
การคำนวณเพื่อหาขนาดสปริงที่ใช้	81
การคำนวณเพลต	82
การหาสลัก	83
การหาขนาดของ rod และ น็อต ที่ใช้ยึดสปริงกับฐาน	84
การคำนวณอายุการใช้งานแบร์ริง	84
การคำนวณฐาน	85
การคำนวณ Power screw	86
การเลือกขนาดสายพาน	86
4. อุปกรณ์การทดสอบและผลการทดลอง	
อุปกรณ์การทดสอบ	87
วิธีการทดลอง	88
ตารางแสดงผลการทดสอบกึ่งหั่นลมแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ	89
ตารางแสดงผลการทดสอบกึ่งหั่นลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ	114
ผลการทดลองกึ่งหั่นลมแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ	134
ผลการทดลองกึ่งหั่นลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ	137

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
สรุปผลการทดลอง	141
ข้อเสนอแนะ	142
บรรณานุกรม	143
ภาคผนวกที่ 1 แสดงตารางที่ใช้ในการออกแบบและคำนวณ	144
ภาคผนวกที่ 2 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	158
ภาคผนวกที่ 3 แสดงขนาดและแบบของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	163



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับความเร็วรอบ	14
2.2 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของกังหันชนิดต่างๆ	19
2.3 แสดงค่าความปลอดภัย	40
2.4 ความกว้างสายพานเบนส่งกำลังและความกว้างล้อสายพานที่ สอดคล้องกันตามมาตรฐาน ISO 22 – 1975 (E)	61
4.1 ตารางแสดงผลการทดสอบกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มุม 0°	89
4.2 ตารางแสดงผลการทดสอบกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มุม 15°	94
4.3 ตารางแสดงผลการทดสอบกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มุม 30°	99
4.4 ตารางแสดงผลการทดสอบกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มุม 45°	104
4.5 ตารางแสดงผลการทดสอบกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มุม 60°	109
4.6 ตารางแสดงผลการทดสอบกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มุม 0°	114
4.7 ตารางแสดงผลการทดสอบกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มุม 15°	118
4.8 ตารางแสดงผลการทดสอบกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มุม 30°	122
4.9 ตารางแสดงผลการทดสอบกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มุม 45°	126
4.10 ตารางแสดงผลการทดสอบกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มุม 60°	130
5.1 ตารางแสดงค่า $C_{p_{max}}$ และ λ จากการทดลอง	140

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่

1.1 แสดงกังหันลมมาเกือภาคกลาง	3
1.2 แสดงกังหันลมแนวข้าง	4
1.3 กังหันลมหลายใบ	5
1.4 กังหันลมล้อจักรยาน	6
1.5 กังหันลมมาเกือปัตตานี	7
1.6 กังหันลมที่ใช้ทดสอบ	8
2.1 แสดงรูปกังหันลมขนาดเล็ก	10
2.2 แสดงพื้นที่ A กับปริมาณการไหลต่อวินาที	13
2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับความเร็วรอบที่ความเร็วลมต่างๆ	16
2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบที่ความเร็วลมต่างๆ	17
2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_p , C_t กับ λ	18
2.6 แสดงเส้นการไหล	20
2.7 แสดงแรงต่างๆที่กระทำกับปีกเครื่องบิน	22
2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_p กับ Velocity ratio	22
2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_p กับ Speed ratio	24
2.10 แสดงการเลือกค่า Out put ของกังหันลม	30
2.11 แสดงใบกังหันลมแบบ airfoil หมุนเป็นรูปวงกลม	31
2.12 ค่า C_D สำหรับรูปทรงต่างๆ ($Re \geq 1000$)	33
2.13 แสดงการยืดปลายเสาวิธีต่างๆ	36
2.14 แสดงคานและแกนสะเทิน	37
2.15 แสดงแรงชนิดต่างๆ	38
2.16 ขอบเขตของความเค้นจากทฤษฎีความเสียหาย	42
2.17 แสดงลักษณะทิศทางของความเค้น	42
2.18 แสดงรอยเชื่อมชนิดต่างๆ	43
2.19 แสดงลักษณะการใช้งานของรอยเชื่อม	44

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 แสดงโมเมนต์ความเคี้ยวของรอยเชื่อม	45
2.21 แสดงการเชื่อมศูนย์ของแรง	46
2.22 แสดงโมเมนต์คัตและแรงกระทำ	46
2.23 แสดงความเค้นภายใน	46
2.24 แสดงองค์ประกอบต่างๆเนื่องจากการเบรคของสายพาน	49
2.25 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นบนลิ้ม	52
2.26 แสดงแรงที่กระทำกับลิ้มเนื่องจาก โมเมนต์	53
2.27 แผนภาพแสดงความถ่วงแบบแสดงผลลัพธ์ของจุดเสียหา	55
2.28 แผนภาพที่คั่นแกนแก้ไขแสดงความต้านทานแรงทั้งหมดและ ค่าขีดจำกัดสูงสุดของความเค้นประกอบทั้งหมด	55
2.29 แผนภาพความถ่วงแสดงการหาค่าขีดจำกัดสูงสุดของ σ_x และ σ_y	56
2.30 เครื่องมือทดสอบความถ่วง	57
2.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนวัฏจักร	58
3.1 แสดงพื้นที่รับลมของกังหัน	63
3.2 แสดงใบพัดของกังหัน	64
3.3 แสดงขาใบพัดส่วนใน	65
3.4 แสดงขาใบพัดส่วนนอก	65
3.5 แสดงรูปเพลด	66
3.6 แสดงขนาดของแท่นติดตั้งกังหัน	67
3.7 แสดงหน้าตัดของเหล็กตัว U	68
3.8 แสดงแรงกระทำและระยะ X บนแกนของแท่นทดสอบ	69
3.9 แสดงแรงกระทำบนแกนด้านบน	70
3.10 แสดงแรงกระทำบนแกนด้านล่าง	71
3.11 แสดงลักษณะรอยเชื่อม	72
3.12 (ก) แสดงน้ำหนักของชิ้นส่วนต่างๆ	73
3.12 (ข) แสดงการย้ายแรงมากระทำตามแนวแกน	73

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 แสดงแรงและโมเมนต์ที่กระทำกับน็อตและเพลต	75
3.14 แสดงการบิดรูปไปจากแนวเดิมของแผ่นเพลตเนื่องจากมีแรงและโมเมนต์มากระทำ	76
3.15 แสดงความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นกับหัวน็อตและแผ่นเพลต	77
3.16 แสดงจุดศูนย์กลางถ่วงของชิ้นส่วนต่างๆของแท่นทดสอบ	79
3.17 แสดงแรงที่กระทำสปริง	81
3.18 แสดงแรงที่กระทำที่ตำแหน่งต่างๆของเพลต	82
3.19 แสดง FBD และ BMD	82
3.20 แสดงลักษณะของสลัก	83
3.21 แสดงค่า FBD และค่า MBD ของฐานไคนาโมมิเตอร์	85
3.22 แสดงขนาดของสายพาน	86
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับความเร็รรอบ ที่ความเร็วต่างๆของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มุม 0°	92
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานกับ อัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มุม 0°	93
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับความเร็รรอบ ที่ความเร็วต่างๆของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มุม 15°	97
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานกับ อัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มุม 15°	98
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับความเร็รรอบ ที่ความเร็วต่างๆของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มุม 30°	102
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานกับ อัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มุม 30°	103
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับความเร็รรอบ ที่ความเร็วต่างๆของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มุม 45°	107
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานกับ อัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มุม 45°	108

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับความเร็รรอบ ที่ความเร็วต่างๆของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มุม 60°	112
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานกับ อัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มุม 60°	113
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับความเร็รรอบ ที่ความเร็วต่างๆของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มุม 0°	116
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานกับ อัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มุม 0°	117
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับความเร็รรอบ ที่ความเร็วต่างๆของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มุม 15°	120
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานกับ อัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มุม 15°	121
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับความเร็รรอบ ที่ความเร็วต่างๆของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มุม 30°	124
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานกับ อัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มุม 30°	125
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับความเร็รรอบ ที่ความเร็วต่างๆของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มุม 45°	128
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานกับ อัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มุม 45°	129
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับความเร็รรอบ ที่ความเร็วต่างๆของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มุม 60°	132
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานกับ อัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มุม 60°	133

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่หน้าตัด	m^2
b	ความกว้างของสิ่งประดิษฐ์ตั้งฉาก กับความเร็วลม	
C	ความกว้างใบพัด	m
C_D	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	-
C_L	สัมประสิทธิ์แรงยก	-
C_P	สัมประสิทธิ์กำลังงาน	-
C_t	สัมประสิทธิ์แรงบิด	-
D	Drag force ต่อความยาว	N/m
E	พลังงานจลน์	J
E_v	พลังงานจลน์ต่อปริมาตร	J/m^3
F.S.	ค่าความปลอดภัย	-
F	แรงกระทำ	N
I	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด	mm^4
L_c	ความยาวสมมูล	m
L	ความยาวของสิ่งประดิษฐ์	m
M	โมเมนต์คัต	N.m
N	ความเร็วรอบ	rpm
P	กำลังงาน	watt
P_s	กำลังเพลลา	watt
q	อัตราการไหลต่อเวลา	m^3/s
R	รัศมีนอกกึ่งหันลม	m
Re	ค่าเรโนลด์นัมเบอร์	
r	รัศมีใจเรชัน	m
T	แรงบิด	N.m.
TSR	อัตราส่วนความเร็วปลายใบ	-
U	ความเร็วลมคงที่ก่อนปะทะสิ่งประดิษฐ์	m/s

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
v	ความเร็วลม	m/s
z	โมดูลัสหน้าตัดรอบแกนสะเทิน	mm ³
ρ	ความหนาแน่นของของไหล	kg/m ³
σ	อัตราส่วนโฆดิกคิตี	-
σ	ความเค้น	N/m ²
λ	อัตราส่วนความเร็วปลายใบ	-
ω	ความเร็วเชิงมุม	rad/s
ϕ	มุมที่สายพานคล้อย	-
τ	ความเค้นเฉือน	N/m ²

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของโครงการ

พลังงานลมเป็นรูปแบบหนึ่งที่น่าพลังงานธรรมชาติมาใช้ การใช้งานเช่นนี้ จำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานลมให้เป็นพลังงานกล อุปกรณ์ดังกล่าว คือ กังหันลม ในอดีตได้มีการประยุกต์นำกังหันลมมาใช้ในการขนส่งทางน้ำ โดยมีผู้ออกแบบและประดิษฐ์มาเป็นเวลานานแล้ว แต่เมื่อมีการนำไปใช้งาน องค์ประกอบในการออกแบบ เช่น สภาพพื้นที่ ลักษณะการใช้งานที่ต่างกัน ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง ด้วยเหตุนี้จึงได้มีความคิดที่จะออกแบบและพัฒนากังหันลมที่ใช้ในการขนส่งน้ำให้อยู่ภายใต้ องค์ประกอบต่างๆ ที่เหมาะสมกับการใช้งานในพื้นที่ดังกล่าวเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

เนื่องจากกังหันลมที่ใช้งานในประเทศไทยเป็นแบบกังหันในแนวนอนจึงทำให้ข้อมูลเกี่ยวกับ กังหันในแนวนอนมีมากพอแล้ว จึงได้จัดทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับกังหันลมในแนวตั้งหรือแบบ Savonius ขึ้นเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลเนื่องจากองค์ประกอบต่างๆ ในการออกแบบต่างออกไปจากทฤษฎีที่มีผู้คิดค้นไว้ ทำให้กังหันลมไม่ค่อยมีผู้ใช้กันมากนัก จึงได้จัดทำโครงการนี้มาเพื่อให้สามารถใช้งานได้เหมาะสมกับพื้นที่ ที่ใช้งานจริงจะทำให้ได้ประโยชน์สูงสุดจากการนำกังหันไปใช้งาน

กังหันลมในประเทศไทย

จากอดีตจนถึงปัจจุบัน ประเทศไทยได้มีการนำเอากังหันลมมาใช้ตามภูมิภาคต่างๆ ทั่วประเทศ กังหันลมที่นำมาใช้ทั้งหมดใช้เพื่อสูบน้ำ ส่วนกังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้านั้นเป็นกังหันลมชนิดที่ได้รับความสนใจจากหน่วยงานของรัฐ และสถาบันการศึกษาซึ่งอยู่ในระยะค้นคว้าและทดลองในอันที่จะนำมาใช้แก้ปัญหาในท้องถิ่นที่ยังไม่มีไฟฟ้าใช้ แต่มีพลังงานลมมากพอที่จะนำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้

กังหันลมในประเทศไทยหากจัดแบ่งตามเอกสารของ ESCAP ซึ่งได้จัดกังหันลมเป็น 4 ประเภท ได้แก่

1. กังหันลมรอบช้า
2. กังหันลมรอบปานกลาง
3. กังหันลมรอบเร็ว
4. กังหันลมรอบเร็วจัด

พบว่ามีอยู่ในประเทศไทย คือ ประเภท 1, 2 และ 3 ดังต่อไปนี้

กังหันลมรอบช้า

กังหันลมรอบช้าซึ่งเป็นกังหันลมที่มีอัตราส่วนความเร็วที่ปลายใบ ณ จุดใช้งานมีค่าไม่เกิน 2 ที่พบในประเทศไทยตามแถบชายทะเลฝั่งตะวันออก แถบจังหวัดสมุทรสงคราม สมุทรสาคร และชลบุรี ได้แก่ กังหันลมขนาดเล็กภาคกลาง หรือกังหันลมเตี้ยลำแพนกังหันลมชนิด 6 ใบ ซึ่งกังหันลมประเภทนี้ในระยะหลังมีการดัดแปลงใบกังหันโดยพบว่ามีการใช้ใบผ้าและใบดุงปุยมาแทนใบเสื่อลำแพน ในบางครั้งอาจจะพบว่าใช้จำนวนใบมากกว่า 6 ใบ และรูปร่างใบแตกต่างไปจากของเดิมซึ่งเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก แต่ยังคงใช้จุดระหัดวิดน้ำ กังหันลมอีกแบบหนึ่งซึ่งพบเห็นได้โดยทั่วไปคือ กังหันลมหลายใบหรือแบบอเมริกัน มีจำนวนใบ 20-30 ใบ ใช้ร่วมกับปั๊มลูกสูบ ในระยะแรกได้มีการนำเข้าจากต่างประเทศปัจจุบันได้มีบริษัทที่ผลิตอยู่ในประเทศ 2-3 บริษัท กังหันลมชนิดนี้อาจเป็นกังหันลมที่อยู่ในระหว่างการค้นคว้าวิจัยได้แก่ กังหันลมล้อจักรยานเป็นกังหันลมที่ทำขึ้นมา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก กังหันลมแบบซาโวเนียส (Savonius) เป็นกังหันลมที่หมุนในแนวแกนตั้ง ในรุ่นแรก ๆ เป็นแบบตั้งน้ำมัน 200 ลิตร ฝ่าออกเป็น 2 ซีก ใช้ร่วมกับปั๊มน้ำ

กังหันลมรอบปานกลาง

กังหันลมรอบปานกลาง ซึ่งเป็นกลุ่มกังหันลมที่มีอัตราส่วนความเร็วที่ปลายใบ ณ จุดใช้งานตั้งแต่ 2 แต่ไม่เกิน 4 พบตามแถบชายฝั่งทะเลภาคใต้โดยเฉพาะที่จังหวัดปัตตานี ได้แก่ กังหันลมขนาดเล็กปัตตานี มีจำนวน 2 และ 4 ลักษณะโดยทั่ว ๆ ไปของรูปร่างใบกังหันซึ่งเป็นโครงซึ่งทำด้วยไม้เนื้อแข็งยึดติดกับก้านใบหุ้มด้วยสังกะสีลอนใหญ่ ตั้งหมุนรับลมเพื่อจุดระหัดวิดน้ำในระยะหลัง ๆ นี้มักจะพบที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซลจุดระหัดวิดน้ำ เสริมพลังงานที่ได้จากธรรมชาติ

กังหันลมรอบเร็ว

กังหันลมรอบเร็วซึ่งเป็นกลุ่มกังหันลมที่มีอัตราส่วนความเร็วที่ปลายใบ ณ จุดใช้งานระหว่าง 5-10 ในประเทศไทยพบกังหันลมรอบเร็วตามแถบจังหวัดฉะเชิงเทรา สมุทรปราการ มีนบุรี หนองจอก ได้แก่กังหันลมนาวาหัวมีจำนวนใบ 2 และ 4 ใบ ทำจากไม้เนื้อแข็งขนาดยาว 6-8

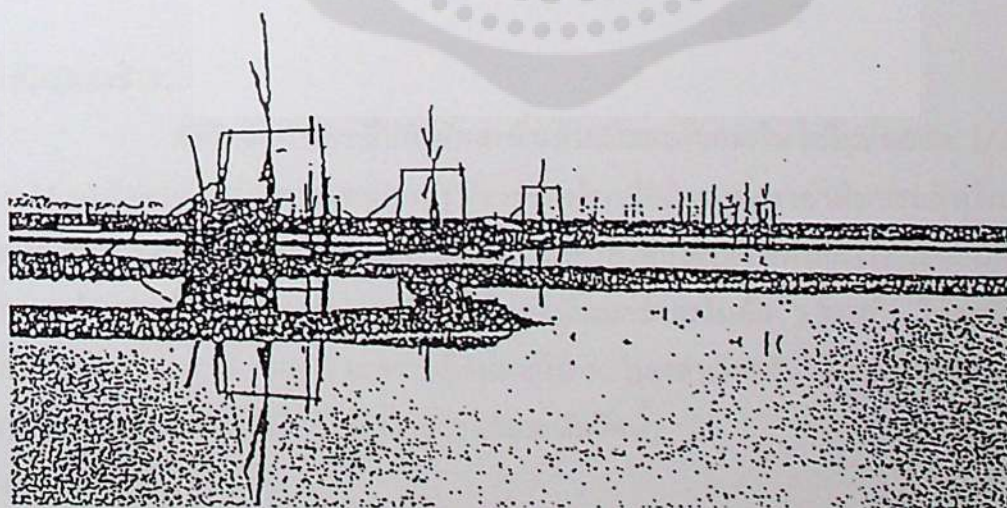
เมตร หน้า 4-5 เซนติเมตร กว้าง 20 เซนติเมตร โดยเหลาให้มีมุมใบบิครบลมตั้งแต่โคนใบ จาก 0 องศา จนถึงปลายใบ 4 ถึง 8 องศา ใช้ร่วมกับระหัดวิดน้ำ

การวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกังหันลมที่ใช้กันมากในประเทศไทย

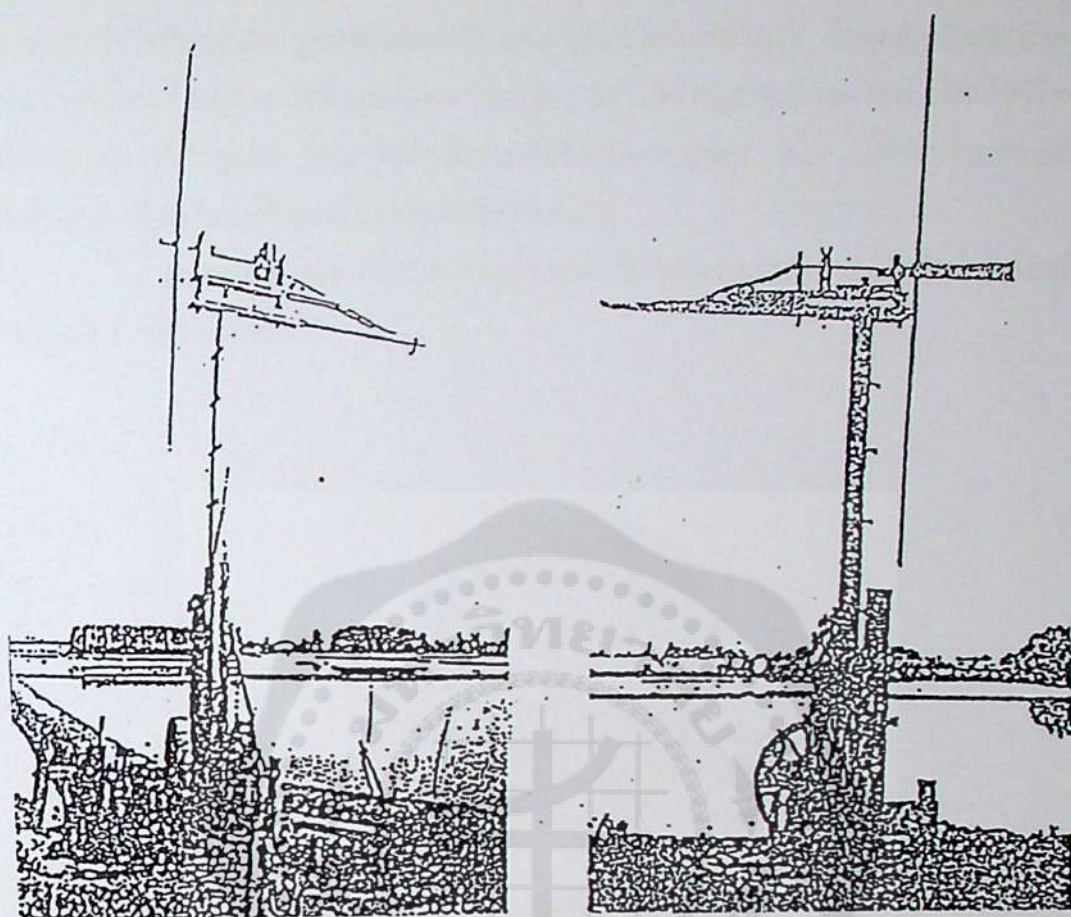
กังหันลม 5 ชนิด อันได้แก่ กังหันลมนาเกลือภาคกลาง กังหันลมนาข้าว กังหันลมหลายใบ กังหันลมล้อจักรยาน และกังหันลมนาเกลือปัตตานี กังหันลมเหล่านี้มักใช้ค่อนข้างแพร่หลายในประเทศไทย มีบุคคลและหน่วยงานรัฐและเอกชนหลายแห่งทำกาวิเคราะห์และวิจัยดังรายละเอียดต่อไปนี้

กังหันลมนาเกลือภาคกลาง

กังหันลมนาเกลือภาคกลางมีชื่อเรียกตามท้องถิ่นว่าพัดลมและมีผู้เรียกอื่น ๆ ได้แก่ กังหันลมเสือสำแพน หรือแบบใบผ้า ได้มีผู้ทำการวิเคราะห์และวิจัยกังหันลมประเภทนี้ คือ สิริ นันทศรี ทำการสำรวจและประเมินการนำกังหันลมแบบต่าง ๆ มาใช้งาน สำนักงานการพลังงานแห่งชาติ ได้ทำการทดสอบภาคสนามแล้วพบว่ากังหันลม 6 ใบ สามารถยกน้ำได้สูง 0.06 เมตร ให้อัตราการไหล 2.8 ลิตรต่อวินาที ที่ความเร็วลม 3.5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 1.1 กังหันลมนาเกลือภาคกลาง



รูปที่ 1.2 กังหันลมน้ำข้าว

กังหันลมน้ำข้าว

กังหันลมน้ำข้าวเป็นกังหันลมพื้นบ้านมีสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) โดย (Mukhia) ทำการวิจัยโดยการทดสอบรูปร่างของใบเพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงดัดที่เปลี่ยนแปลงตามมุมปะทะ นำค่าที่ได้มาคำนวณหาสมรรถนะของกังหันลมน้ำข้าว 4 ใบ มุมตั้งใบ 5 องศา พบว่าได้เรโนลด์ส์นัมเบอร์ของใบพัด 2.9×10^5 ให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด 0.4 ณ อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 5 ในเวลาเดียวกันได้ทำการทดสอบภาคสนามระบบของกังหันลมน้ำข้าวโดยใช้โดยใช้ร่วมกับระหัดวิดน้ำ

กังหันลมหลายใบ

กังหันลมหลายใบหรือแบบอเมริกัน สำนักงานการพลังงานแห่งชาติได้ทดสอบกังหันลมของบริษัทอุตสาหกรรมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.05 เมตร จำนวนใบ 30 ใบมุมบิดของเหล็กฉากที่ซี่ใบ 5 องศาใช้ร่วมกับปั๊มลูกสูบ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 76 มิลลิเมตร พบว่า

สามารถสูบน้ำได้ปีละ 4500 ลูกบาศก์เมตร ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที อิบบอล (Igbal) ทำการวิจัยกังหันลมหลายใบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 14 ฟุต ของบริษัทอุตสาหกรรม โดยใช้วิธีการทดลองเช่นเดียวกันกับมูเกีย พบว่าได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด 0.25 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 1.0 เมื่อเรโนลด์ส์นัมเบอร์ของใบพัดมีค่า 9.5×10^4

จากการทดสอบภาคสนามพบว่าสามารถให้กำลังงานปีละ 175 กิโลวัตต์-ชั่วโมงที่ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที

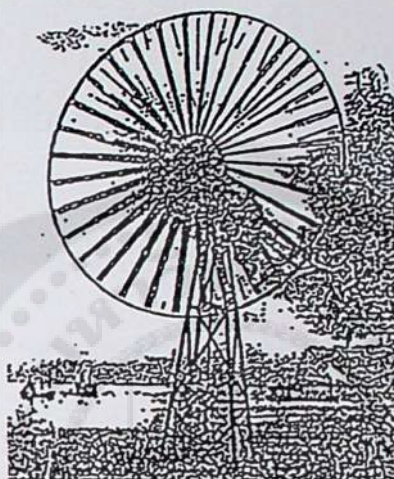


รูปที่ 1.3 กังหันลมหลายใบ

ศักดิ์ชาย เอียดตลอด และคณะได้ทำการออกแบบและสร้างกังหันลมแบบหลายใบเพื่อสูบน้ำ โดยมีจำนวนใบ 20 ใบ เป็นแบบแผ่นเรียบมีเส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด 3 เมตร มุมปะทะของใบพัด 4 องศา พบว่าใช้งานได้ดีกับช่วงความลมต่ำ ๆ โดยสามารถทำงานได้ตั้งแต่ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 27 % ให้อัตราการสูบน้ำ 15 ลิตรต่อวินาที ที่ความเร็วลม 4 เมตรต่อวินาที โดยติดตั้งกับโครงสร้างที่มีความสูง 9 เมตร ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ ประมาณ จันทรักษา กับคณะได้ออกแบบและสร้างกังหันลมแบบหลายใบเพื่อสูบน้ำ โดยใบพัดเป็นแบบแผ่นโค้งจำนวน 20 ใบ เส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด 4 เมตร มุมปะทะใบ 4 องศา พบว่าสามารถเริ่มทำงานตั้งแต่ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาทีขึ้นไปสามารถสูบน้ำได้ 25.5 ลิตรต่อวินาทีที่ความเร็วลมเฉลี่ย 3.8 เมตรต่อวินาที โดยติดตั้งใช้งานที่โรงเรียนภัทรพิทยาคารย์ อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก กังหันลมล้อจักรยาน

ร่ำเฟิง และคณะทำการทดสอบกังหันลมภาคสนามกังหันลมล้อจักรยานขนาดเส้น

ผ่านศูนย์กลาง 3.18 เมตร พบว่าให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด 0.23 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 1.8 สมาน เสนงาม ทดสอบกังหันลมล้อจักรยานเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร จำนวน 25 ใบพัด ใช้ร่วมกับปั๊มสูบน้ำซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร สามารถส่งน้ำได้สูง 8 เมตร ให้อัตราการไหลสูงสุด 9 ลิตรต่อวินาทีที่ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที

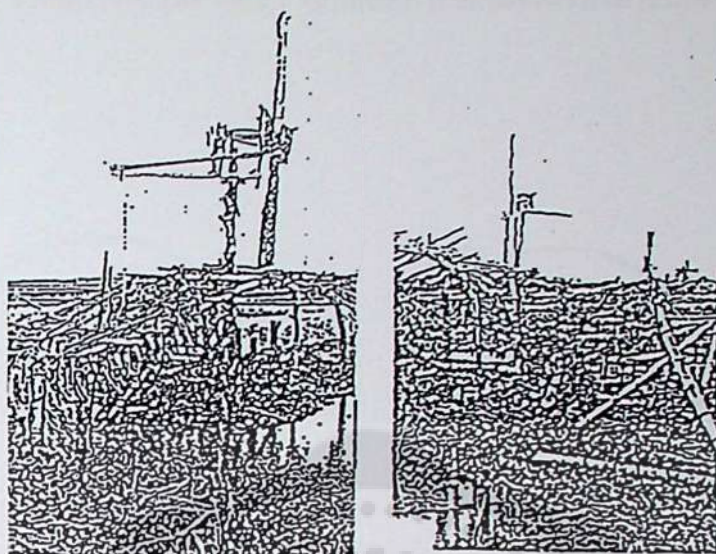


รูปที่ 1.4 กังหันลมล้อจักรยาน

ทรงเกียรติ หลิมศิริ และจตุพร ศัญญิตย์ ทำการวิเคราะห์ข้อมูลระบบการทำงานของกังหันลมซึ่งมีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เมตร ใช้ร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พบว่าได้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อปี 600-800 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

กังหันลมนาเกลือปัตตานี

กังหันลมนี้เป็นกังหันลมชนิดที่มีการสำรวจและวิจัยน้อย เมื่อ พ.ศ.2529 คณิศ ธีรวิชย์ ได้ทำการทดสอบแบบจำลองกังหันลมนาเกลือปัตตานีแบบ 2 ใบที่ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาทีให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด 0.41 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 2.6 และสำหรับกังหันลมนาเกลือแบบ 4 ใบที่ความเร็ว 5 เมตรต่อวินาทีให้ค่าสัมประสิทธิ์พลังงานสูงสุด 0.28 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 1.4



รูปที่ 1.5 กังหันลมนาเกลือปัตตานี

วัตถุประสงค์ของโครงการ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะของกังหันลมแกนคิ่งแบบ Savonius แบบใบสามารถแกว่งได้ (Savonius Rotor Using Swinging Blade) แบ่งตามวัตถุประสงค์ดังนี้

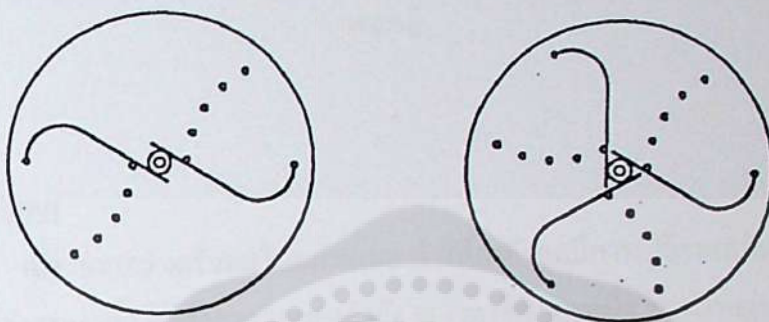
1. ทำการศึกษาสมรรถนะของกังหันลมแบบ Savonius แบบใบสามารถแกว่งได้เปรียบเทียบกับใบแกว่งไม่ได้
2. เพื่อศึกษาวิเคราะห์สมรรถนะกังหันลม Savonius แบบใบแกว่งได้และแกว่งไม่ได้
3. เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกังหันลมทางทฤษฎีเพื่อนำผลการศึกษาสมรรถนะที่ได้จากการวิจัยไปสร้างเป็นงานที่ใช้ได้จริงเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

ขอบเขตของโครงการ

มีผลการวิเคราะห์สมรรถนะของกังหันลมชาโวเนียสแบบใบแกว่งได้ (Savonius Rotor Using Swinging Blade) รวมทั้งลักษณะการวางใบและตำแหน่งองศาการแกว่งของใบ

1. จำนวนใบ 2 , แปรผันตำแหน่งการแกว่งของใบที่ด้านลมไม่น้อยกว่า $0-60^{\circ}$ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งครั้งละประมาณ 15°

2. ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากข้อ 1 จะทดสอบโดยเพิ่มจำนวนใบไม่เกิน 3 ใบ



รูปที่ 1.6 ลักษณะของกึ่งหันลมที่ทำการศึกษา

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. เพื่อนำผลที่ได้จากการทดลองวางใบกึ่งหันในแบบต่างๆมาทำการวิเคราะห์หาตำแหน่งการวางใบว่าการวางใบแบบใดให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด
2. ใช้ข้อมูลจากงานวิจัยนี้เป็นพื้นฐานสำหรับการสร้างกึ่งหันลมชาโวเนียสให้สามารถใช้พลังงานได้เต็มศักยภาพ
3. เพื่อนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มาออกแบบ และสร้างงานจริงให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

บทที่ 2

ทฤษฎี

พลังงานที่มีอยู่ในลม

เนื่องจากความเร็วลมไม่สม่ำเสมอ ทำให้กำลังลมมีการเปลี่ยนแปลงตามความเร็วลมกำลังสาม พลังงานลมที่มีอยู่คือผลรวมของกำลัง ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง ส่วนใหญ่จุดเริ่มต้นที่ใช้ในการคาดคะเนพลังงานลม ณ ตำแหน่งหนึ่ง ๆ ต้องอาศัยความรู้เกี่ยวกับค่าเฉลี่ยและความเร็วลมเฉลี่ย ณ ตำแหน่งนั้น ๆ โดยส่วนใหญ่จะใช้ค่าเฉลี่ยรายเดือน สิ่งสำคัญคือพลังงานลมแท้จริงจะมีค่ามากกว่าพลังงานลมที่คิดจากความเร็วลมเฉลี่ยที่เวลานั้น โดยทั่วไปพลังงานลมที่มีอยู่ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเร็วลมเฉลี่ยกำลังสอง ที่พัดต่อเนื่องในช่วงเวลานั้น เนื่องจากลมมีการเปลี่ยนแปลงขึ้น ๆ ลง ๆ ทำให้ค่าเฉลี่ยของกำลังลมมีค่าเป็นสองเท่าในชั่วพริบตาเดียว ตัวแปรสำคัญที่ทำให้กำลังลมเฉลี่ยมากกว่ากำลังลมซึ่งคิดจากความเร็วลมเฉลี่ยที่มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 – 3 และขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของลมท้องถิ่นด้วย ยังมีการเปลี่ยนแปลงมากตัวแปรนี้จึงจะมีผลมาก

อย่างไรก็ตาม สำหรับลมประเภทใดประเภทหนึ่ง กำลังลมยังคงแปรผันตามความเร็วลมเฉลี่ยกำลังสาม ต่อไปเราจะศึกษาถึงการนำพลังงานลมไปใช้กับกังหันลมให้เกิดประโยชน์

การเปลี่ยนกำลังลมเป็นกำลังเพล

มีกลไก 2 ประเภทใหญ่ ๆ ที่จะแปลงพลังงานจลน์ของลมเป็นกลไกการทำงาน กลไกทั้งสองขึ้นอยู่กับความเร็วลมและวิธีการลดพลังงานจลน์ วิธีการที่ให้ประสิทธิภาพไม่ค่อยดีนักคือการใช้แรงต้านทำให้เกิดการปั่นป่วน และแรงต้านนี้จะกระทำในทิศทางเดียวกับลม ในยุคแรกใช้วิธี “panamones” โดยใช้ผลจากความแตกต่างของแรงต้านในการหมุนใบพัด อีกวิธีที่มีประสิทธิภาพมากในการสร้างกังหันลม คือ การใช้แรงยก แรงยกจะเกิดขึ้นเมื่อกังหันลมทำมุมเล็ก ๆ กับลม และแรงยกซึ่งตั้งฉากกับทิศทางลมจะมีค่าน้อยกว่าแรงต้าน การใช้วิธีนี้เราสามารถเปลี่ยนหรือลด

จำนวนใบพัดลงได้เมื่อมีความเร็วลมสูงขึ้น การใช้แรงยกจึงสามารถลดความปั่นป่วนของพลังงาน
จลน์ ดังนั้นการใช้แรงยกจึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการลดพลังงานลมได้มากกว่าแบบแรงต้าน

ส่วนหนึ่งของพลังงานจลน์จากลมจะนำมาทำให้เกิดประโยชน์จากกังหันลม ได้
เพียง 60 % เนื่องจากเป็นไปไม่ได้ที่จะหยุดลมได้อย่างสมบูรณ์ จึงเป็นข้อจำกัดในการลดพลังงาน
จากลม

การแบ่งประเภทของกังหันลม

แบ่งตามขนาดกำลังที่ได้ มี 3 ขนาดคือ

1. ขนาดเล็ก ส่วนมากใช้ในการสูบน้ำหรือผลิตกระแสไฟฟ้า กำลังงานไม่
เกิน 1 kw
2. ขนาดกลาง ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ให้กำลังงานระหว่าง 1-100 kw
3. ขนาดใหญ่ ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้ากำลังงานเกิน 100 kw



รูปที่ 2.1 แสดงรูปกังหันลมขนาดเล็ก

แบ่งตามแนวแกนหมุน มี 2 แบบ คือ

1. แบบแกนนอน แกนของกังหันลมวางอยู่ในแนวนานกับพื้นโลก หรือในแนวเดียวกับกระแสลม กังหันประเภทนี้ประกอบไปด้วยใบพัดแบบต่างๆ ดังนี้

- แบบ 2 ใบพัด จะให้ความเร็วของใบพัดสูง ให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูง กว่าแบบอื่น มีปัญหาทางการสั่นสะเทือน

- แบบ 3 ใบพัด จะมีความเร็วรอบใบพัดปานกลาง ให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังปานกลาง

- แบบหลายใบพัด จะให้แรงบิดเริ่มต้นสูง ค่าสัมประสิทธิ์กำลังต่ำ

2. แบบแกนตั้ง แกนของกังหันลมตั้งฉากกับพื้นโลก หรือตั้งฉากกับทิศทางลมมีแบบที่นิยมใช้งานดังนี้

- แบบคาร์เรียส ใบของกังหันมีลักษณะคล้ายกับที่ตีไข่

- แบบซาโวนีเยส มีลักษณะคล้ายดังทรงกระบอกผ่าครึ่งแล้วนำมาติดบนเพลาซึ่งความเร็วรอบต่ำ

แบ่งตามลักษณะของแรงขับที่กระทำต่อใบพัด

ความเร็วรอบสูงจะให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงพอๆกันกับแบบ 3 ใบพัด โดยการใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า กล่าวคือ แรงขับที่กระทำบนใบพัด เป็นแรงยก (Lift force) เช่น กังหันลมแบบ พร็อบเพลเลอร์ หรือ แบบคาร์เรียส และแรงขับที่กระทำบนใบพัด เป็นแรงต้าน หรือแรงปะทะ เช่น กังหันลมแบบซาโวนีเยส เป็นต้น

กังหันแกนตั้งและแกนนอน

กังหันจะมีทั้งแบบแกนตั้งและแกนนอนแต่โดยส่วนมากที่นิยมใช้คือแบบแกนนอน ส่วนแกนตั้งก็ต้องอาศัยการพัฒนาให้เหมาะสมอยู่ ซึ่งประโยชน์ของแบบแกนตั้งคือไม่จำเป็นต้องอาศัยการหันทิศทางของใบพัดเข้าปะทะกับทิศทางของลมที่พัดผ่านมาเนื่องจากสามารถรับกระแสลมได้ในทุกทิศทาง แต่ ก็มีข้อเสียคือ ในกรณีที่เกิดลมพายุขึ้นจะไม่สามารถลดแรงกระทำของลมได้ทำให้เกิดการเสียหายต่อตัวกังหันและอุปกรณ์ที่ต่อพ่วงอยู่ทั้งเครื่องสูบน้ำและเครื่องผลิตไฟฟ้า

คุณลักษณะของกังหันแกนตั้ง

กังหันลมแบบแนวแกนตั้งที่สำคัญมีด้วยกัน 3 ชนิดคือ Panamone , Savonius และ Darrieus สำหรับกังหันลมแบบ Savonius โดยส่วนใหญ่จะมี 2 ถึง 3 ใบพัด โดยจะติดตั้งอยู่รอบๆ แกนเพลลา กังหันลมชนิดนี้จะทำงานโดยอาศัยหลักการของ Drag และ Lift ไปพร้อมๆ กัน กังหันลมแบบ Savonius เคยถูกเสนอในลักษณะที่เป็นกังหันที่สามารถทำขึ้นได้เอง แต่ก็พบว่ามีปัญหาเกี่ยวกับการติดตั้ง คือ กังหันต้องมีความแข็งแรงของ bearings สูง และ การติดตั้งcoupling ทำได้ยาก ข้อเสียของกังหันลมแบบ Savonius คือ

1. ไม่คุ้มค่า เนื่องจากต้องอาศัยอุปกรณ์ที่มีความแข็งแรงสูงจึงเป็นกังหันที่มีราคาสูง เมื่อเทียบกับชนิดอื่นๆ
2. การป้องกันการเสียหายทำได้ยาก เนื่องจากการที่กังหันรับแรงลมได้ทุกทิศทาง เมื่อเกิดกระแสลมแรง หรือพายุจึงไม่สามารถที่จะหันกังหันลมหลบได้

กังหันลมแบบ Darrieus มีลักษณะหน้าตัดคล้ายปีกของเครื่องบิน คือ เป็นรูปตัว H แต่จากการทดสอบแล้วจะได้ลักษณะคล้ายที่ติ่ง เนื่องจากแรงที่จุดศูนย์กลางจะไหลผ่านตามความโค้งของใบทำให้เกิดการหมุน ประสิทธิภาพของกังหันลมแบบ Darrieus นั้นจะขึ้นอยู่กับ Lift ที่เกิดขึ้นที่ใบที่ตัดผ่านกระแสลม กังหันลมแบบ Darrieus ได้มีการเริ่มต้นทำแบบง่ายๆ โดยใช้ใบเรือที่มีลักษณะเป็นสามเหลี่ยม โดยพบบริเวณเกาะทางตะวันตกของอินเดีย กังหันลมชนิดนี้ใช้หลักการเดียวกันกับการที่ใบเรือทำให้เรือแล่นได้นั่นเอง

กังหันลมแบบ Darrieus มีด้วยกัน 2 แบบคือ Variable Geometry Vertical Axis Wind Turbine (VGVAWT) ซึ่งพัฒนาโดย Musgrove ในเยอรมัน (ต่อมาได้มีการทดลองใช้เป็นปั๊มลมโดย P I Engineering) และ แบบ Gyromill หรือ Variable Pitch Vertical Axis Wind Turbine (VPVAWT) ซึ่งพัฒนาโดย Pinson ในอเมริกา อย่างไรก็ตามการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากขนาดกลางมาเป็นขนาดใหญ่ หรือใช้ในการปั๊มน้ำในระบบชลประทานขนาดเล็ก

กังหันลมในแนวแกนตั้งยังสามารถพัฒนาให้ใช้ได้อีกหลายทาง ดังนั้นจึงเป็นหัวข้อที่สำคัญสำหรับการทำการวิจัย เนื่องมาจากการสร้างกังหันชนิดนี้ทำได้ง่ายกว่าแบบแกนนอน และทางด้านของราคาที่สูง จึงต้องมีการวิจัยต่อไป

พลังงานลม กับ กาลังจากลม

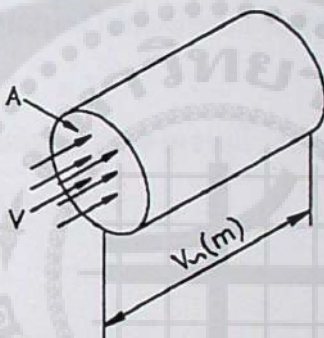
ลม คือ อากาศที่เคลื่อนที่ ลมมีมวลแต่มีความหนาแน่นต่ำ เมื่อลมเคลื่อนที่ด้วย

ความเร็ว V จะทำให้เกิดพลังงานจลน์ (E) ขึ้นตามสมการ

$$E = 0.5 \rho V^2 \quad (\text{J}) \quad (2.1)$$

ถ้า ρ เป็นความหนาแน่นของอากาศ ดังนั้น E_v ซึ่งเป็นพลังงานจลน์ต่อปริมาตรของอากาศหนึ่งหน่วยที่ความเร็วลม V ใดๆ จะได้ว่า

$$E_v = 0.5 \rho V^2 \quad (\text{J/m}^3) \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.2 แสดงพื้นที่ A กับปริมาณการไหลต่อวินาที

พิจารณาพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางลมโดย V มีทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่ A ดังนั้นอัตราการไหลต่อวินาที (q) ผ่านพื้นที่ A คือ

$$q = VA \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (2.3)$$

กำลังงานที่ไหลไปกับอากาศผ่านพื้นที่ A ก็คือ พลังงานจลน์ของอากาศที่ไหลต่อวินาทีผ่านพื้นที่ A นั่นเอง

เมื่อ	กำลังงาน	=	พลังงานต่อเวลา
ดังนั้น	กำลังงาน	=	พลังงานต่อปริมาตร x ปริมาตรต่อเวลา

และจากสมการ (1) และ (2) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} P &= E_v \times q \\ P &= 0.5 \rho V^2 \times VA \quad (J/s = \text{watt}) \\ P &= 0.5 \rho V^3 A \quad (\text{watt}) \end{aligned} \quad (2.4)$$

กำลังนี้เป็นกำลังที่มีอยู่ในลม ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีเพียงบางส่วนของกำลังจากลมนี้เท่านั้นที่ถูกกักกันลมเปลี่ยนไปเป็นพลังงานกล จากสมการ (4) ทำให้ทราบว่า

- กำลังเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อความหนาแน่นของอากาศ (ρ) ตัวประกอบนี้ไม่มีอิทธิพล ต่อ กำลังและมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเมื่อระดับความสูงเปลี่ยนแปลงไป ($\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ที่ระดับน้ำทะเล อุณหภูมิ 15°C)
- กำลังแปรตามกำลังสามของความเร็วลม นั่นคือ กำลังจะเพิ่มขึ้นเป็น 8 เท่าเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น 2 เท่า ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับความเร็วลม

Wind	m/s	2.5	5	7.5	10	15	20	30	40
Speed	Km/s	9	18	27	36	54	72	108	44
	Mph	6	11	17	22	34	45	67	90
Power	Kw/m ²	0.01	0.08	0.27	0.64	2.2	5.1	17	41
Density	hp/ft	0.001	0.009	0.035	0.076	0.23	0.65	2.1	5.2

สัมประสิทธิ์ของกำลังและแรงบิด

ค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังและแรงบิดเป็นค่าที่ได้มาจากการทำการทดลองแล้วเขียนกราฟผลการทดลองออกมา โดยที่สัมประสิทธิ์ของกำลังจะอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังของเพลากับกำลังของลมทั้งหมดที่พัดผ่านจะอยู่ในรูปตัวแปร ไร้มิติ และใช้สัญลักษณ์ C_p แสดงได้ดังสมการ

$$C_p = \frac{P_s}{0.5 \rho A V^3} \quad (2.5)$$

เมื่อ P_s คือกำลังของเพลลา

ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิดจะใช้สัญลักษณ์ C_t แสดงได้ดังสมการ

$$C_t = \frac{T}{0.5 \rho A V^2 R} \quad (2.6)$$

เมื่อ T คือ แรงบิดที่เกิดขึ้น และ R คือรัศมีของกังหัน

สำหรับความเร็วก็จะสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของตัวแปรที่ไร้มิติได้ โดยเรียกว่า Tip-speed-ratio ใช้สัญลักษณ์ λ แสดงได้ดังสมการ

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (2.7)$$

เมื่อ ω คือ ความเร็วรอบ (radians/second)

เมื่อกังหันลมหยุดนิ่ง Tip-speed-ratio ก็จะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อแรงบิดที่เกิด จากลม มีค่าต่ำกว่า แรงบิดเริ่มต้นของเพลลา เมื่อ Tip-speed-ratio มีค่าเป็น 1 หมายความว่า ใบพัดหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วลม (มุมปะทะของลมกับใบพัดต้องมีค่าเป็น 45 องศา) และ ในทำนองเดียวกัน Tip-speed-ratio มีค่าเป็น 2 หมายความว่า ใบพัดหมุนด้วยความเร็วเป็นสองเท่า ของความเร็วลม ตามลำดับ

ค่า Rotor Solidity

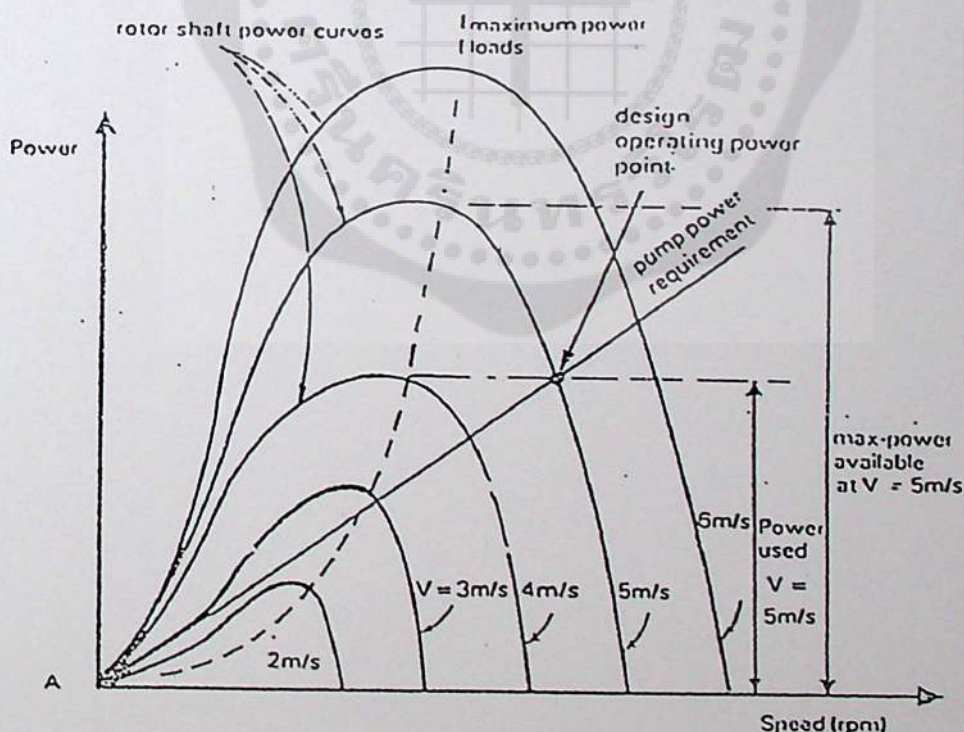
Solidity (σ) จะแปรผันตามพื้นที่การกวาดของใบพัดและพื้นที่จริงของใบพัด ซึ่ง สามารถเขียนเป็นสัดส่วนได้จาก ผลรวมของความกว้าง หรือ chords ของใบพัดแต่ละใบ ต่อความ ยาวเส้นรอบวงดังสมการ

$$(\sigma) = \frac{N C}{2 \pi R} \quad (2.8)$$

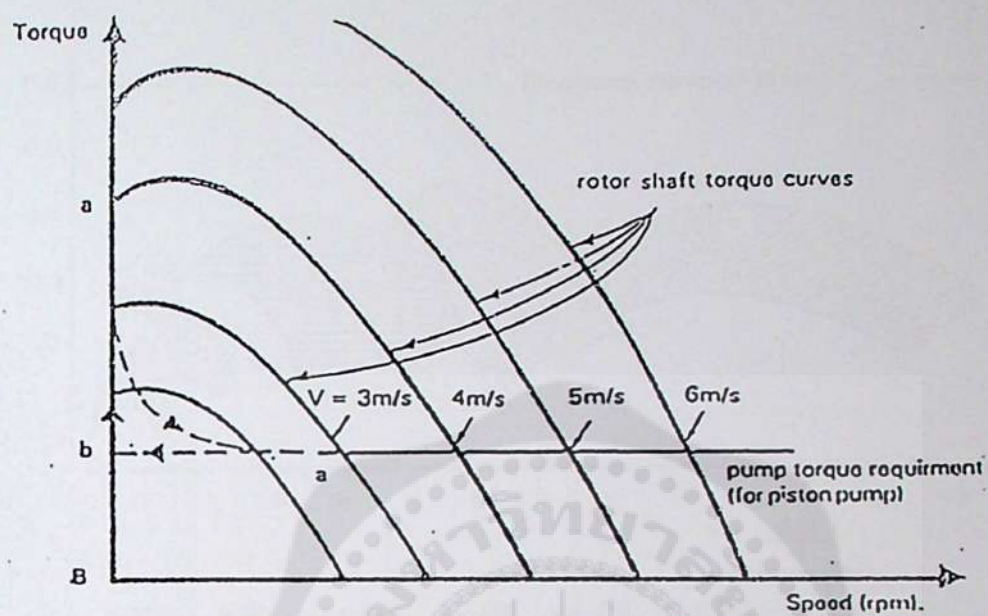
เมื่อ N คือจำนวนใบพัด C คือความกว้างใบพัด หรือ chords และ r คือรัศมีของใบพัด

กังหันแบบหลายใบพัดจะมีค่า Rotor Solidity สูง เนื่องจากมีส่วนของพื้นที่การกวาดมาก ซึ่งส่งผลให้สามารถทำงานได้ที่ความเร็วต่ำ และต้องทำการติดตั้งใบให้มีมุมปะทะที่เหมาะสมด้วย จะทำให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ Tip-speed-ratio ต่ำ คือประมาณ 1.25 และมีค่าไม่แตกต่างจากกังหันชนิดที่มีความเร็วสูงมากนัก แต่อย่างไรก็ตามสูงเมื่อ Tip-speed-ratio มีค่าเป็นศูนย์ กังหันแบบหลายใบพัดนี้ต้องอาศัย แรงบิดเริ่มต้นที่มีค่าสูง (ระหว่าง 0.5 ถึง 0.6) เมื่อเทียบกับกังหันชนิดอื่นๆ

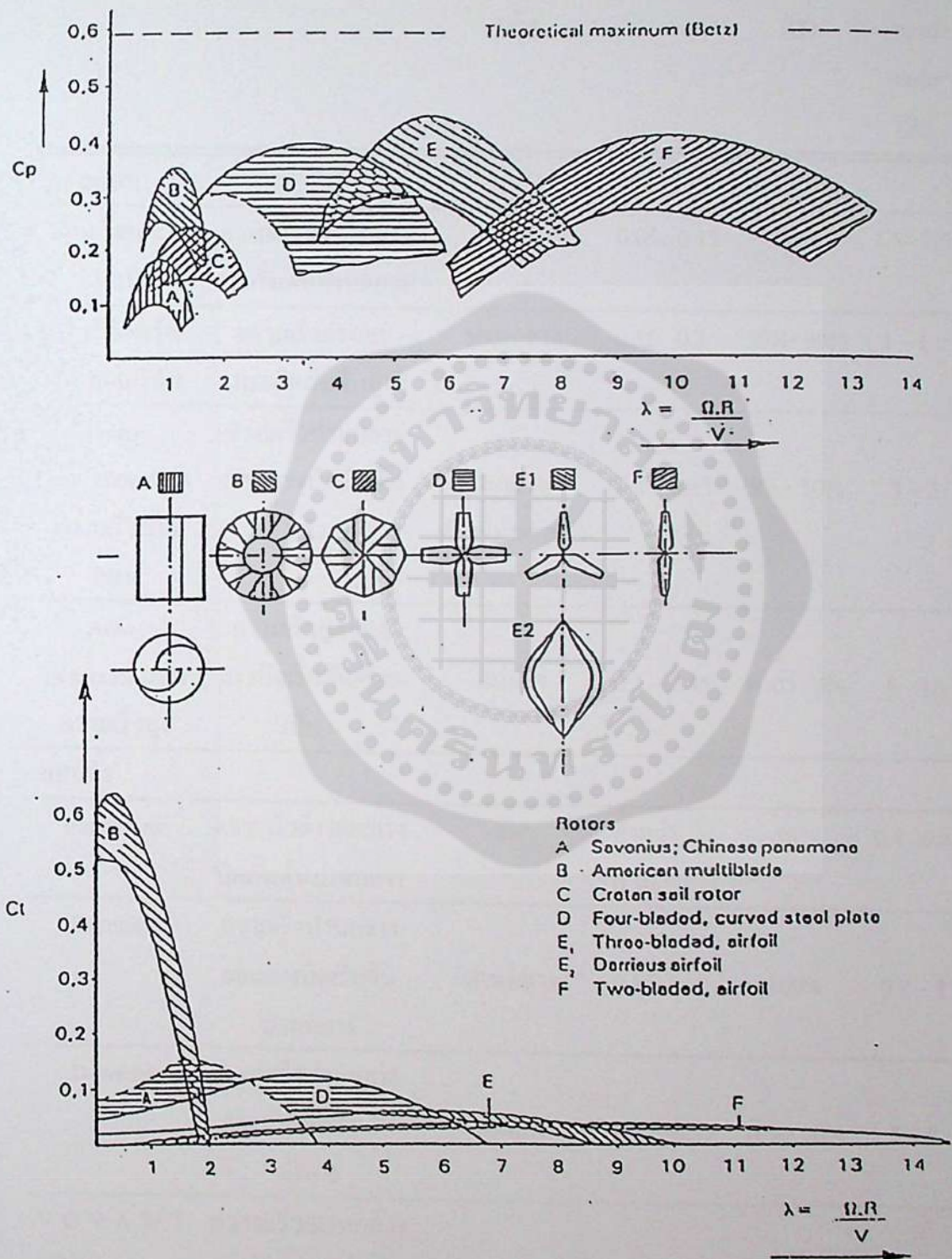
ในทางตรงกันข้ามกังหันแบบที่มีใบพัด 2 ใบพัด หรือ 3 ใบพัด จะมีค่า Rotor Solidity ต่ำ และจะให้ประสิทธิภาพที่ดี เมื่อหมุนด้วยความเร็วมากกว่าความเร็วของลม 6 ถึง 10 เท่า และติดตั้งใบให้มีมุมปะทะที่เหมาะสม กังหันแบบนี้อาศัยแรงบิดเริ่มต้นเพียงเล็กน้อย หรือเกือบจะไม่ต้องใช้เลย ในการทำให้กังหันหมุน



รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับความเร็วรอบที่ความเร็วลมต่างๆ



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบที่ความเร็วลมต่างๆ



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_p , C_t กับ λ

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของกังหันชนิดต่างๆ

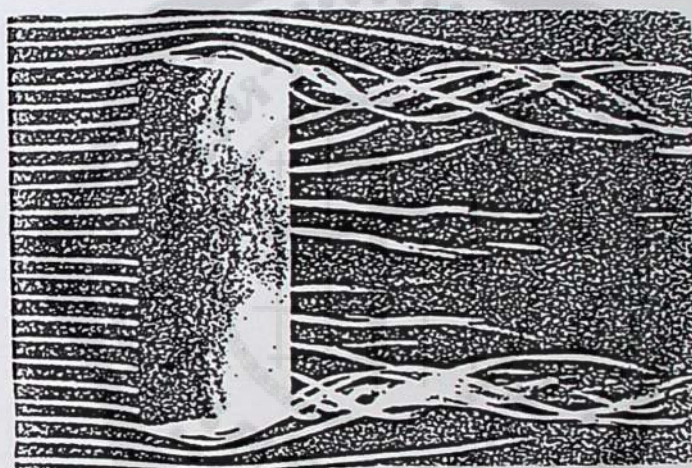
ชนิด	คุณสมบัติ	ลักษณะในการผลิต	Cp	Solidity (σ)	Tip-speed-ratio (λ)
แกนนอน					
แผ่นเรียบ หรือ ใบเรือ	ความเร็วต่ำ และแรงบิดเริ่มต้นปานกลาง	ง่าย	0.05 – 0.15	50%	1.5– 2.0
ใบโค้ง หรือ แบบอเมริกัน	ความเร็วต่ำ และแรงบิดเริ่มต้นสูง	ปานกลาง	0.15 – 0.3	50%- 80%	1 – 1.5
Aero-generator แบบความเร็วปานกลาง	ความเร็วปานกลาง และ แรงบิดเริ่มต้นต่ำ	ปานกลางแต่ต้องแม่นยำบ้าง	0.2 – 0.35	5% - 10%	3 – 5
Aero-generator แบบความเร็วสูง	ความเร็วสูง และแรงบิดเริ่มต้นเกือบเป็น 0	แม่นยำ	0.3 – 0.45	ต่ำกว่า 5%	5 – 10
แกนตั้ง					
Panamone	ความเร็วต่ำ และแรงบิดเริ่มต้นปานกลาง	ง่าย	ต่ำกว่า 0.10	50%	0.4 – 0.8
Savonius	ความเร็วปานกลาง และแรงบิดเริ่มต้นปานกลาง	ปานกลาง	0.15	100%	0.8 – 1
Darrieus	ความเร็วปานกลาง และแรงบิดเริ่มต้นเป็น 0	แม่นยำ	0.25 – 0.35	10%- 20%	3 – 5
V G V A W T หรือ Gyromill	ความเร็วปานกลาง และแรงบิดเริ่มต้นเป็น 0 หรือเล็กน้อย	แม่นยำ	0.20 – 0.35	15%- 40%	2 – 3

การวิเคราะห์กังหันลม

ในหัวข้อนี้จะศึกษาเกี่ยวกับลมที่กระทำกับ ใบพัด โดยมีแรงอยู่ 2 ชนิด คือ drag forces(อยู่ในทิศเดียวกับทิศทางลม) และ แรงยก (ทิศตั้งฉากกับทิศทางลม) ซึ่งในเครื่องจักรพลังงานลมในระยะแรกจะใช้ drag forces เป็นต้นกำลัง ในยุโรป และ อเมริกา โรงสีลมก็ใช้ drag forces เป็นต้นกำลัง แต่ในปัจจุบัน กังหันลม จะใช้แรงยกเป็นต้นกำลังแทนซึ่งจะให้ประสิทธิภาพมากกว่า

ในรูปที่ 2.6 แสดงเส้นการไหลมีแรง drag กระทำกับสิ่งประดิษฐ์ โดยแรง drag มีผลมาจากความสัมพันธ์ระหว่างลมกับสิ่งประดิษฐ์ กำลังที่เกิดขึ้นมาจากสมการ

$$P = D \cdot V = [0.5 \rho (U - V)^2] C_D b \cdot V \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.6 แสดงเส้นการไหล

เมื่อ

P = กำลังที่ได้	(Watt)
D = drag force ต่อ ความยาว	(N/m)
V = ความเร็วลม	(m)
U = ความเร็วลมคงที่ก่อนปะทะสิ่งประดิษฐ์	(m/s)
ρ = ความหนาแน่นของอากาศ	(kg/m ³)
C_D = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	
l = ความยาวของสิ่งประดิษฐ์	(m)
b = ความกว้างของสิ่งประดิษฐ์ (ตั้งฉากกับความเร็วม)	(m)

ความเร็วของสิ่งประดิษฐ์มักจะต่ำกว่าความเร็วลม หรือไม่เกิดทาง drag สัมประสิทธิ์กำลัง (power coefficient) คืออัตราส่วนของกำลังที่สามารถเกิดได้จาก พื้นที่ปะทะลม ของสิ่งประดิษฐ์

$$C_p = \frac{P}{(0.5\rho U^3 bl)} = \left(\frac{V}{U}\right)\left(1-\frac{V}{U}\right)^2 C_D \quad (2.10)$$

เมื่อพิจารณาสิ่งประดิษฐ์ที่เกิดกำลังจากแรงยกของลม จากรูปที่ 2.7 แสดงปีกเครื่องบินที่เลื่อนขึ้นจากมุมทางขวา แรงลม จะทำให้เกิดทั้งทางยกและ drag forces ความเร็วสัมพัทธ์ที่ผ่านผิวก็คือ ผลรวมของเวกเตอร์ระหว่างความเร็วคงที่ของลมและความเร็วลมที่ผ่านไป แล้ว มุมระหว่าง ความเร็วสัมพัทธ์กับเส้นตรงที่ตัดส่วนโค้งของปีกเครื่องบิน ก็คือ มุมปะทะ (α) ในกรณีนี้กำลังหาได้จาก

$$P = 0.5\rho U^3 cl \left(\frac{V}{U}\right) \left[C_L - C_D \left(\frac{V}{U}\right) \right] \left[1 + \left(\frac{V}{U}\right) \right]^{0.5} \quad (2.11)$$

เมื่อ

c = เส้นตรงที่ตัดส่วนโค้งของปีกเครื่องบิน

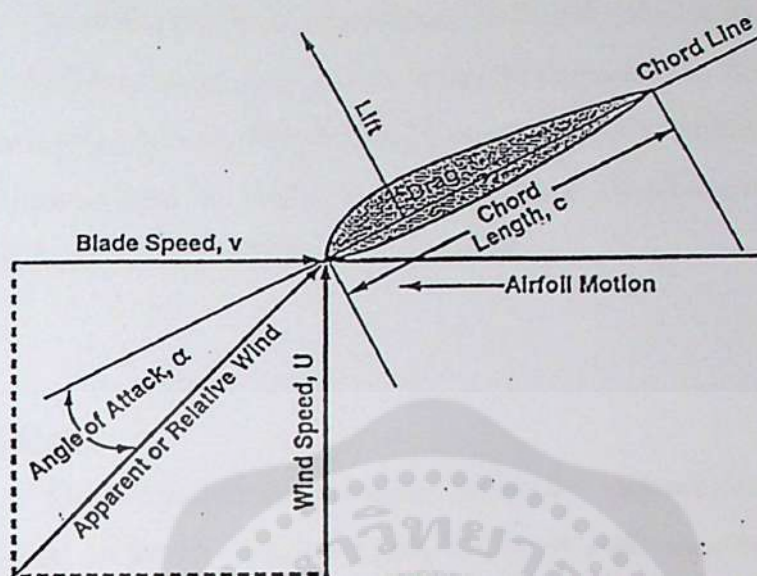
C_L = lift coefficient

C_D = drag coefficient

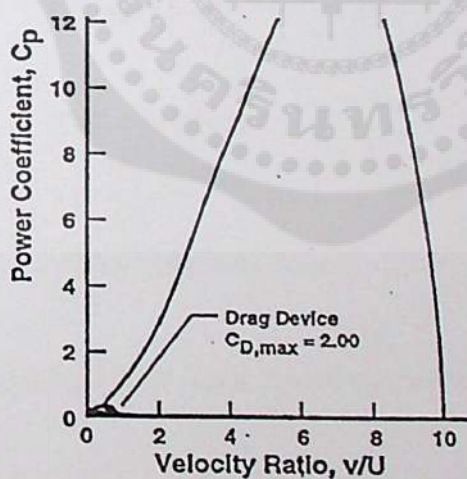
ส่วนสัมประสิทธิ์กำลัง Power coefficient หาได้จาก

$$C_p = \left(\frac{V}{U}\right) \left[C_L - C_D \left(\frac{V}{U}\right) \right] \left[1 + \left(\frac{V}{U}\right) \right]^{0.5} \quad (2.12)$$

จากสมการข้างต้น ถ้าแทนค่า $C_L = 1.0$ $C_D = 1.0$ สำหรับ airfoil และค่าสัมประสิทธิ์แรงปะทะมากที่สุด (maximum drag coefficient) เท่ากับ 2.0 สำหรับเครื่องจักรที่ใช้แรงกระแทกเป็นต้นกำลัง จะให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังมากที่สุด (maximum power coefficient) เท่ากับ 15 หรือแทนค่า 0.3 สำหรับสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้แรงกระแทกเป็นต้นกำลัง



รูปที่ 2.7 แสดงแรงต่างๆที่กระทำกับปีกเครื่องบิน



Airfoil is moving at right angles to the wind
Drag device is moving with the wind.

รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ C_p กับ v/U

Aerodynamic Models

ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับ aerodynamic ของใบพัด (turbine) จะมีอยู่ 2 ลักษณะคือ 1) การวิเคราะห์กำลังที่ได้จาก turbine 2) การวิเคราะห์แรงทาง aerodynamic ที่กระทำบนใบพัดของ turbine ในศึกษาทาง aerodynamic นี้โดยทั่วไปจะใช้ models เดียวกันในการวิเคราะห์ทั้ง 2 แบบ ซึ่งในวิเคราะห์นั้นยุ่งยากพอสมควร ถ้าเป็น models แบบง่าย ๆ สามารถใช้มือคำนวณได้ แต่ถ้าเป็น models ที่ซับซ้อนมาก ๆ ก็สามารถใช้ computer คำนวณได้

Momentum Models

Models วิเคราะห์ทาง aerodynamic จะเป็นแบบ actuator disk models และแบบ single porous disk เมื่อพิจารณา models นี้ แรงที่กระทำบน disk หรือ rotor ของ models ก็คือ การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเทียบกับเวลาของ airstream ที่ไหลผ่าน rotor และ disk โดยใช้กฎทรงมวล , กฎอนุรักษ์โมเมนตัม , สมการ Bernoulli , กฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ และสมมุติการเป็นแบบ isothermal พลังงานที่ได้จาก turbine หาได้จากสมการ

$$P = 2\rho A V^3 a(1-a)^2 \quad (2.13)$$

เมื่อ

V คือ ความเร็วลม

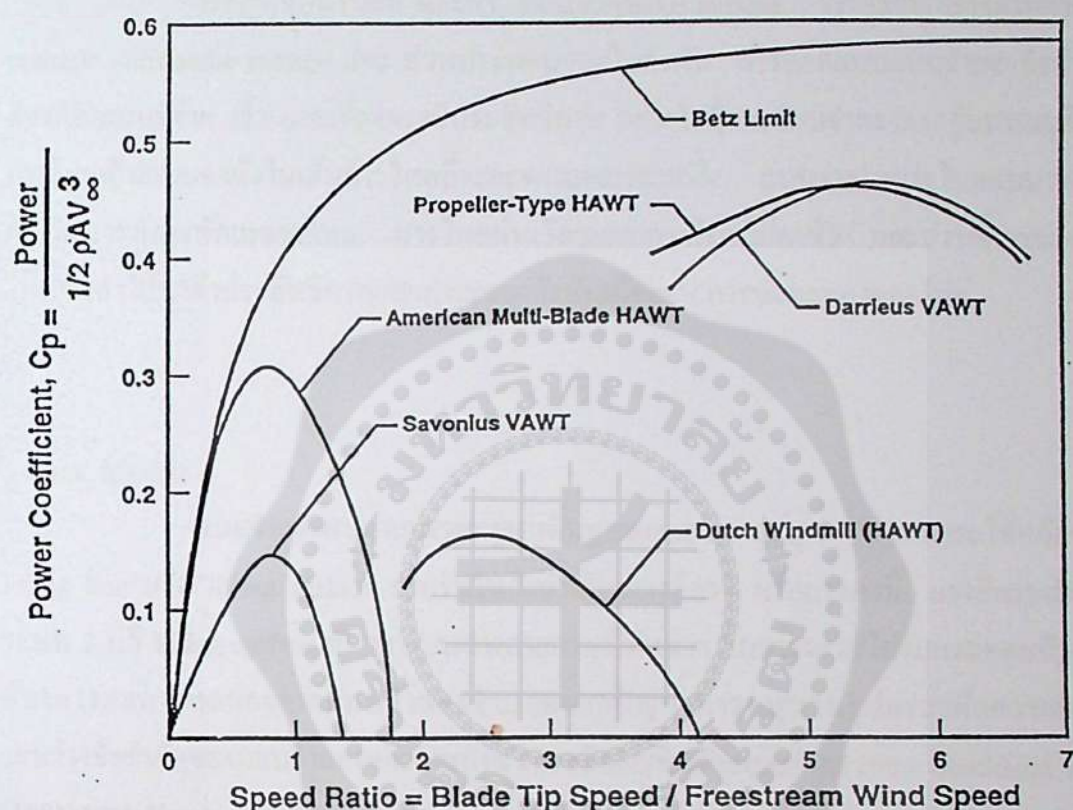
$$a = \frac{V - v}{V}$$

v คือ ความเร็วของ Disk

สัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient) หาได้จาก

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (2.14)$$

จากสมการถ้าเราแทนค่า $a_{\max} = 1/3$ จะได้ค่า $C_{p,\max} = 16/27 = 0.593$ ซึ่งเรียกว่า Betz limit ค่า Betz limit ก็คือ ค่าเศษส่วนมากที่สุดที่ turbine จะให้กำลังออกมา



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Speed Ratio กับ C_p

จากรูปที่ 2.9 แสดงค่าคุณสมบัติต่างๆ แต่ละชนิดของ turbine โดยแสดงค่าระหว่าง Power Coefficient กับค่า Tip-Speed-Ratio จากกราฟจะพบว่า ค่าคุณสมบัติแบบ HAWT และ แบบ VAWT จะสูงกว่าแบบเก่าแต่ก็ยังน้อยกว่าค่า Betz limit อยู่ 10 %

จากทฤษฎีโมเมนตัม ของ HAWTs จะอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับส่วนประกอบของใบพัด, ผลกระทบของแรงยก และแรงกระแทก ที่กระทำกับใบพัด, จำนวนใบและชนิดของใบพัด และยังปรับปรุงการวิเคราะห์การไหลแบบ สามมิติ ที่ปลายใบรวมทั้งยังศึกษาความหนาของใบที่ฐานติดตั้งและช่องว่างระหว่างใบแต่ละใบ ถ้าต้องการข้อมูลเพิ่มเติมก็สามารถค้นหาได้จาก Hansen , Butterfield (1993) และ Wilson(1994)

ทฤษฎีโมเมนตัมช่วยอธิบาย กังหันแบบแกนตั้งเพิ่มเติม จากทฤษฎี multiple streamtube และ double-multiple streamtube แบบ VAWT ซึ่งเหมือนกับ ทฤษฎีส่วนประกอบใบ กังหัน แบบ HAWT อธิบายเพิ่มเติมบนแบบจำลองของ Touryan et al.(1987) และ Wilson (1994)

ค่าแรงเฉือนในลม และค่า local Reynolds number จะเปลี่ยนแปลงตามค่าของ multiple streamtube method และ ส่วนประกอบของใบกังหัน การออกแบบแบบจำลองกังหันลม ต้องเป็นแบบที่ง่าย ,เร็ว และเที่ยงตรงมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามแบบจำลองจะอยู่บนสมมุติฐาน การไหลเป็นแบบคงตัวในเส้นการไหลที่ระยะทางและเวลาหนึ่ง แบบจำลองการไหลแบบวงกลม เพื่อวิเคราะห์การหักเหของไหล, การไหลผ่านวัตถุแบบการไหลไม่คงตัว และส่วนอื่นๆของของไหล ซึ่งทำให้หาค่าประสิทธิภาพและการะของกังหันเนื่องจากการปะทะของของไหล

Vertex Models

แบบจำลองแบบหมุนวนอยู่บนพื้นฐานของสมการหมุน สามารถใช้หลักของ lifting line หรือ lifting surface สำหรับใบกังหันด้วยแรงอิสระ หรือแรงคงที่ แรงอิสระสำหรับ ระบบ 3 มิติ lifting surface เป็นรูปแบบทางกายภาพที่เกิดขึ้นมาก ในการจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ต้องการผลการทดลองจากแบบจำลองจำนวนมากปัญหาการหมุนวนรูปกรวยคือความสมมูลระหว่างข้อจำกัดของแบบจำลองและการคำนวณ อธิบายเพิ่มเติมแบบจำลองของ Strickland et al. (1981) และ Kocurek (1987)

Local Circulation Method

Local circulation method (LCM) สมดุลระหว่างแรงบนใบพัด และการเปลี่ยนโมเมนตัมของลมที่ผ่าน rotor อย่างไรก็ตามการร่วมช่องว่าง span ของใบพัตรูปรีชวแหลมซึ่งแตกต่างกับ Streamtube LCMอาจจะคำนวณที่การไหลไม่คงตัวและสามารถยอมรับรายละเอียดเส้นความเร็วและการที่ใบพัด LCM จะให้คำตอบที่ดีกว่าแบบจำลองโมเมนตัมและจะหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดกับแบบจำลองการหมุนวนและการประมาณของแบบจำลองแรง การคำนวณจะน้อยกว่าแบบจำลองหมุนวน อย่างไรก็ตามไม่นิยมกันแพร่หลาย อธิบายจากการสร้างของ Nasu และ Azuma (1983),Masse (1986) และ Oler (1989)

Common Model Limitations

แบบจำลองการเคลื่อนไหวของอากาศแบบที่ใช้คือปีกเครื่องบินโดยใช้ Characteristic table (สัมประสิทธิ์แรงยกและแรงเฉื่อยในรูปของมุมปะทะและ Reynolds number) เพื่อหาภาระของใบพัดและประสิทธิภาพของกังหัน การทดสอบแบบ 2 มิติโดยใช้อุโมงค์ลมเป็นแบบอยู่กับที่หรือใช้ปีกเครื่องบินในการออกแบบโดยใช้การสังเกตจากการทดลองในทางปฏิบัติการวิเคราะห์ในระบบ 3 มิติเป็นการวิเคราะห์ที่เคลื่อนไหว เห็นการประมาณภาระของใบพัดเป็นการยากที่จะหาภาระจาก airfoil section characteristics อธิบายและอ้างอิงการไหลผ่านกังหันลมของอากาศใน Hansen และ Butterfield (1993) Wilson (1994) สำหรับ HAWTs และ ใน Touryan et al. และ Wilson (1994) สำหรับ VAWTs

Wind Turbine Load

ภาระของกังหันลมเกี่ยวกับการเคลื่อนไหวของอากาศมี 2 ชนิด แบบ narrowband harmonic ที่มีลมคงที่,แรงเฉื่อย,การหมุนและปรากฏการณ์ต่างๆคงที่ แบบ broadband คือภาระที่ไม่คงที่ ทำให้เกิดการปั่นป่วนของลม ถ้ามีการการปั่นป่วนมากๆ การหาค่าประสิทธิภาพทางการเคลื่อนไหวของลมจะต้องใช้ คอมพิวเตอร์เข้าช่วย ภาระแบบ harmonic จะมีระเบียบแบบแผนในการหาประสิทธิภาพของกังหันลม ภาระแบบ random จะต้องอาศัยการทดลองซึ่งแม้ว่าจะมีประโยชน์น้อยมากในการวิเคราะห์การหาประสิทธิภาพ จะไม่มีแบบแผนการทดลอง จากการทดลองเป็นเวลานานทำให้มีความผิดพลาดน้อยลง

การทำนายความสามารถของกังหันไม่สามารถยืนยันได้เพราะมีรายละเอียดของแรงที่ไม่คงที่ มีการรวมแรงที่เข้ากังหันและความผิดพลาดในรายละเอียด แรงแต่ไม่ได้นำมาคิดในการคำนวณค่าประสิทธิภาพเมื่อพิจารณาข้อมูลที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพซึ่งข้อมูลจะน้อยมากเมื่อเทียบกับภาระที่เกิดจากการเคลื่อนไหวของลม

Wind Turbine Dynamic

Vertical-Axis Turbine

การออกแบบกังหันแบบ Darrieus โดยปกติจะคำนึงถึงรูปร่าง โดยใช้ high-aspect-ratio สำหรับใบกังหันกับฐานมีผลให้ยึดหุ่นโครงสร้างมีการเคลื่อนที่สูงด้วยการตั้งจึงต้องระวังในการออกแบบเพื่อให้แน่ใจว่ากังหันจะมีการเคลื่อนไหวที่เสถียร guy cables และ turbine support

สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีธรรมดาแต่ฐานและใบกังหันจะต้องใช้โปรแกรม Finite element ในการวิเคราะห์

ใบกังหันและฐานต้องอยู่ในระนาบการหมุนด้วยเวลาอิสระ สมการการเคลื่อนที่หาจากการคงที่ของแรงหนีศูนย์กลางและแรงโน้มถ่วง, การต้าน aerodynamic forces และ Coriolis forces, ด้วยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของกังหัน อธิบายและสร้างแบบจำลองโดย Lobitz และ Sullivan (1989)

Aerodynamic Load/Bland Motion Coupling

การขับเคลื่อนใบกังหันด้วย aerodynamic พร้อมกับ แรงเกี่ยวกับ การเคลื่อนที่ของใบกังหันจะขึ้นอยู่กับรูปร่างการแบบคู่ของ aerodynamic เพิ่มแรงทำให้การเคลื่อนที่ของใบกังหันทำให้ไม่เกิดการเสถียรแต่ถ้าการเคลื่อนที่ลดลงเป็นประโยชน์โดยเป็นการหน่วง aerodynamic

Stochastic Wind Effects

Stochastic เป็นลมธรรมชาติเป็นลมที่มีการเปลี่ยนแปลงและมีทิศทางน้อยมาก เมื่อกังหันมีขนาดใหญ่ การเปลี่ยนแปลงจะน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดกังหันและไม่ได้นำมาพิจารณา ผลการเปลี่ยนแปลงลมแสดงอาการไหวตัวจะสังเกตผลที่เกิดขึ้นกับกังหันแสดงการเพิ่มขึ้นใน broadband การลดขนาดของ narrowband โดยประกอบด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดแรง การเพิ่ม broadband ประกอบด้วยการกระตุ้นทางไฟฟ้าของกังหันที่สั้นและปิด narrow จะเกิดความถี่และไม่สามารถทำนายการเกิดไฟฟ้าจากลมสม่ำเสมอ

Rotor

เทอร์ไบน์ในแนวนอน จะสามารถใช้จุดศูนย์กลางของวัตถุหรือจะประกอบด้วยระดับความโค้ง โดยส่วนมากแล้วจะครึ่งไว้ที่บ้านพับโดยใบพัดจะสามารถเลื่อนขึ้นลงได้ เช่น กังหันเคียวซึ่งทำให้สมดุลด้วยน้ำหนักที่ใช้ถ่วงแต่ปกติใบพัดจะหมุนด้วยค่า tip speed ที่สูงเพื่อรักษาประสิทธิภาพและสามารถให้กำเนิดเสียงดังโดยทั่วไป Rotor จะมี 2-3 ใบพัด สมัยก่อน Rotor จะถูกใช้ในโรงโมในประเทศเนเธอร์แลนด์และในอังกฤษซึ่งกังหันลมถูกใช้ประโยชน์สร้างโดย Terrence Mehrkam ใน USA จนถึงปี 1980 แต่ปัจจุบันไม่มีใช้แล้ว ความเร็วต่ำ ถูกออกแบบเพื่อการปัมน้ำใช้ 5 ใบพัดและในแพนหางใช้ใบพัด 8 ถึง 24 ใบ และในโรงโมแป้นแบบอเมริกันในช่วงเริ่มต้นจะให้ความเร็วสูงกังหันลมดำมี 2-3 ใบจะมีความเร็วลมในช่วงปานกลางถึงสูงทำให้เราสามารถพัฒนา Rotor โดยใช้วัสดุที่แข็งให้ประสิทธิภาพสูง โดยการเพิ่มจำนวนของใบพัดและทำให้ราคาใบพัดลดลง

การผลิตจะทำมาจาก fiber-reinforced polyester (FRP) เคลือบบนไม้ส่วนใบพัดที่ทำจาก Glass fiber-reinforced polyester (GFRP) ส่วนใบพัดโลหะก็มีใช้อยู่บ้างแต่ดูมีนิยมน้อย การใช้งานน้อย จึงไม่สามารถใช้งานหนักได้และใบโลหะเมื่อเร็ว ๆ นี้ มีการใช้ แอร์ฟรอยด์ ในการพัฒนาเครื่องบินและการเดินเรื่อนั้นการออกแบบจะต้องการกักกันลมที่แตกต่างกันออกไป โดยที่กล่าวมาทั้งหมดจะแตกต่างจากการทำเครื่องบิน

ในบางเงื่อนไข แอร์ฟรอยด์ จะมีคุณสมบัติดีกว่าที่กล่าวมาแล้วเหมือนกันคือ ต้องหลบเลี่ยงสภาวะงานจริง (stall condition)

ในการทำงานจริง กักกันลมจะต้องทำงานในช่วง stall ไม่มากก็น้อยอยู่แล้ว ดังนั้นกักกันลมจึงต้องสร้างให้มีความสูงมากขึ้นและหนาขึ้นเพื่อเพิ่มความแข็งแรง จะต้องใกล้เคียงกับโคนของกักกันมากที่สุด

การพัฒนาส่วนย่อยๆ ของกักกันลมจะต้องใช้แอร์ฟรอยด์ ลักษณะพิเศษซึ่งกักกันจะอยู่ในแนวนอน ภายใต้กฎของ aerodynamicist ของ James Tangler จาก U.S. SERI (now NREL) ปัจจุบันเปลี่ยนเป็น NREL และถูกออกแบบโดย Dan somers

ปรับปรุงการทดสอบเพื่อขึ้นชั้นผลของ Rotors ที่ใช้ NREL airfoils และแอร์ฟรอยด์ที่มีลักษณะพิเศษ ถูกออกแบบเพื่อใช้เป็นกักกันลมซึ่งปัจจุบันใช้กันกว้างขวางทั่วโลก

Rotor แบบใหม่ ϕ -type หมุนในแนวแกนตั้งมีโครงสร้างเป็น GFRP pultrusions หรือ อลูมิเนียมจะมีสลักยึดทั้งข้างบนและข้างล่าง ในการที่จะทำให้ใบพัดแข็งแรงจะต้องใช้กฎของ aerodynamically หรือกล่าวอีกอย่างมันสามารถทำให้เกิดแรงบิดสูง กักกันในแนวตั้งจะมีความดีในการหมุนเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ และการเข้าใจโครงสร้างทาง dynamics เป็นอย่างมีสำคัญในการหลีกเลี่ยง เรโซแนนซ์ ความเร็วลมกว้างมากจะทำให้ทำงานได้ยาก ดังนั้นการทำงานจึงใช้ VAWT มาปรับปรุงแอร์ฟรอยด์

Yaw control

คุณสมบัติของกักกันลมได้จากกราฟ แสดงค่ากำลังของกักกันลม โดยค่ากำลังที่ได้จะอยู่ในรูปฟังก์ชันของความเร็วมีหน่วยเป็น kW จากรูปที่ 2.10 แสดงกราฟกำลังสำหรับการควบคุม stall และ pitch ของแกนหมุน ความเร็วลมที่ทำให้เครื่องชนด์เริ่มทำงานเรียกว่า ความเร็ว cut-in จากนั้นค่ากำลังจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วลมจนถึงจุดที่กำลังคงที่โดย progressive stalling ของแต่ละอันของใบพัด โดยรูปร่างของกราฟกำลังที่ได้ก็คือผลจากการหมุนใบพัดนั่นเอง

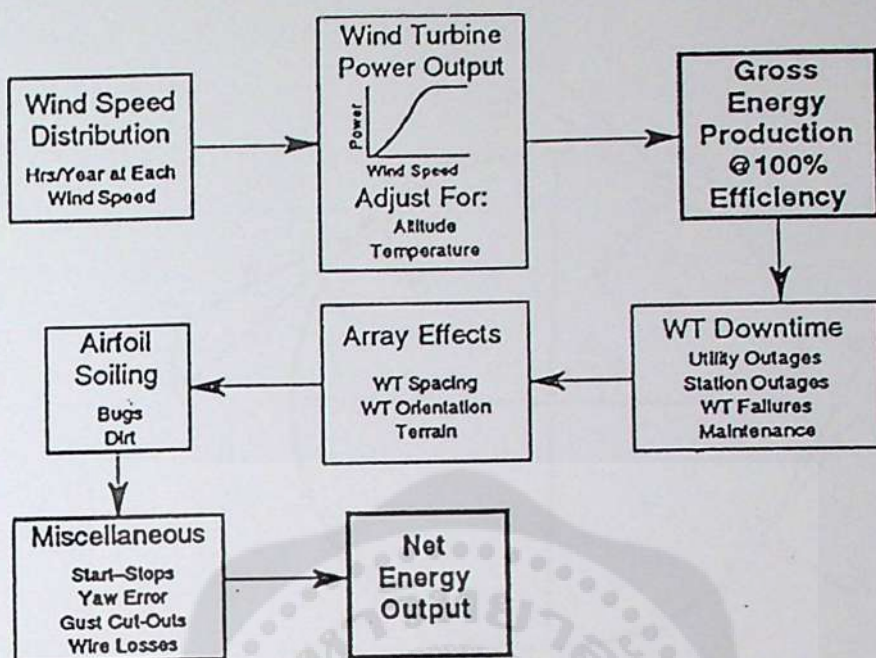
Variable-pitch machines control เป็นการควบคุมกำลังให้เข้าใกล้ค่า rate value มากที่สุด จากค่าตั้งแต่ความเร็ว cut-in จนถึงความเร็ว cut-out ซึ่งถ้าความเร็วที่ได้เกินค่า cut-out เป็นเวลานานจะทำให้เกิดความเสียหายต่อแกนหมุนได้ โดย variable pitch จะทำการควบคุมกำลัง และลดแรงดันจากใบพัดเมื่อได้รับแรงลมที่สูงเกินไป

กราฟกำลังได้จากการคำนวณ จากการออกแบบ และจากการทดลองซึ่งความเร็วลมที่ rate power จากเครื่องชนิดหลาย ๆ เครื่อง และต้องเข้ากันได้กับ wind spectrum ของที่ตั้งไว้ ด้วย เช่นเครื่อง charter 300 ค่า rate power จะผิดปกติ เมื่อมีความเร็วลมสูงถึง 18.8 m/s ซึ่งเครื่องชนิดส่วนมากจะมี rate power ที่ความเร็วลมประมาณ 12-14 m/s ในแถบยุโรปจะผลิตกำลังได้ที่ 12 m/s ซึ่งบอกที่ rate capacity ของเครื่องชนิด พื้นฐานของคุณสมบัติของเครื่องชนิดเหล่านี้ และการทำงานจึงเป็นข้อเปรียบเทียบระหว่างเครื่องชนิด capacity factor เป็นอัตราส่วนของค่า output จริง กับค่า rate capacity ในช่วงเวลาหนึ่ง และค่านี้เป็นส่วนสำคัญของคุณสมบัติของเครื่องชนิด และ wind capacity factor ได้ 0.25 หรือมากกว่า และค่าที่ใช้ได้จะสูงถึง 0.9

สำหรับวิธีการอื่นที่ใช้แสดงคุณสมบัติของเครื่องชนิด คือ กำลังที่ผลิตได้ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ของแกนหมุนมีหน่วยเป็น $\text{kwh/m}^2\text{yr}$ ค่าที่มากกว่าจะได้จากเครื่องชนิด และแกนหมุนที่มากกว่า ส่วนประกอบนี้จะขึ้นอยู่กับที่ตั้งของลมที่ดี

เช่นเคียวกับลักษณะของเครื่องชนิด ค่าที่ได้อาจสูงถึง $1869 \text{ kwh/m}^2\text{yr}$ จากรายงาน ที่มีจากเครื่อง vestas V229 kw ในปี 1994 แม้ว่าค่าที่ได้เข้าใกล้ 1000 ได้จากการใช้ร่วมกับส่วนอื่น ในกลางทศวรรษ 1990 ในรูปของเครื่องชนิด ในแคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา และใน windstats ที่ยุโรป

ค่าพลังงานในอุดมคติได้จากที่ตั้งของลมกับความถี่ของความเร็ว spectrum จากกราฟกำลังของเครื่องชนิดสำหรับกำลังจริงที่ได้จากสถานีย่อย จะถูกหักจากค่าต่าง ๆ คือ ผลรวมของการสูญเสียจากเครื่องชนิดโดยตรงกับแรงลมมี line losses , array losses , forced outages , blacking และอื่น ๆ ซึ่งผู้ดำเนินการสามารถเลือกค่า output ของเครื่องชนิดได้จากรูปที่ 2.10

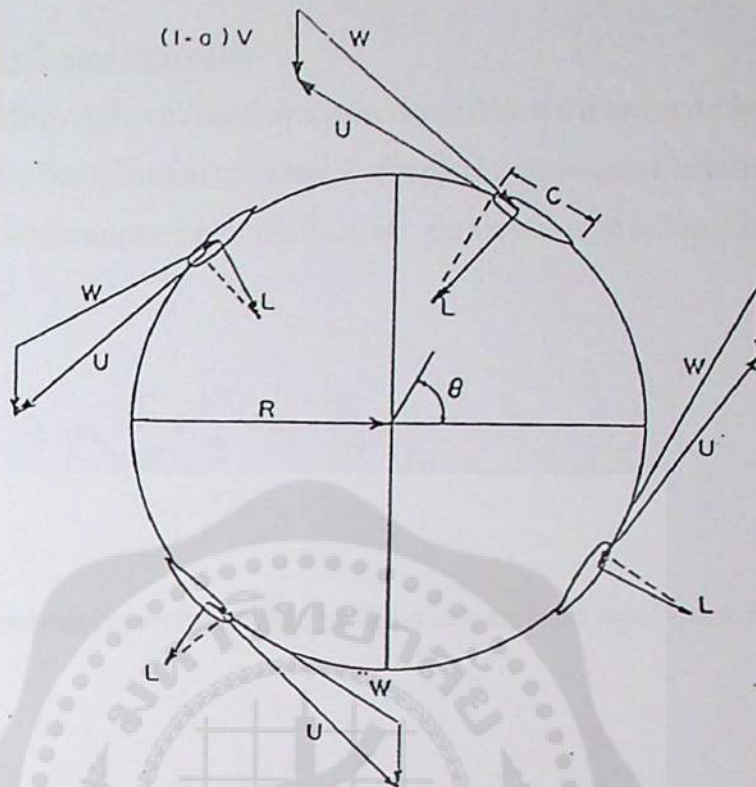


รูปที่ 2.10 แสดงการเลือกค่า output ของกังหันลม

ไดอะแกรมความเร็วสำหรับกังหันลมแกนตั้ง

กังหันลมแกนตั้งสามารถทำงานได้ดีเท่า ๆ กันไม่ว่าลมจะพัดมาในทิศทางใดก็ตาม ใบกังหันซึ่งมีรูปเป็น airfoil จะหมุนเป็นวงกลมดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.41 และการเคลื่อนที่ของใบกังหันนี้จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะใน (angle of attack α) อย่างต่อเนื่อง

จำเป็นที่แรงซึ่งกระทำกับใบกังหัน จะต้องมีความเร็วในทิศทางของการเคลื่อนที่เพื่อทำให้เกิดการหมุนของกังหัน ตามเหลี่ยมของความเร็วสำหรับใบกังหันใน Quadrant ทั้ง 4 แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 Lift vector ถูกเขียนลงในแต่ละไดอะแกรมตั้งฉากกับเวกเตอร์ความเร็วสัมผัส จะเห็นได้ชัดเจนจากไดอะแกรมว่าเมื่อประกอบในทิศสัมผัสของ Lift vector L อยู่ใน Quadrant ทั้ง 4 Quadrant ดังนั้นก็จะมีแรงบิดเกิดขึ้นเสมอไม่ว่าใบกังหันจะอยู่ในตำแหน่งใดก็ตาม แรงบิดต่อใบกังหันสามารถคำนวณได้จากสมการ



รูปที่ 2.11 แสดงใบกังหันลมแบบ airfoil หมุนเป็นรูปวงกลม

เมื่อหาได้จาก

$$T = \rho \pi c R V (1-a)^2 \sin^2 \theta \quad (2.15)$$

$$a = \frac{n_b c R \omega (\sin \theta)}{2 R V} \quad (2.16)$$

R คือ รัศมีสูงสุดของใบกังหันเมื่อเทียบกับแกนของการหมุน, c คือ airfoil chord และตำแหน่งเชิงมุม θ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 กำลังจะหาได้จากสมการ

$$P = T \omega \quad (2.17)$$

ประสิทธิภาพสูงสุดจะได้เมื่อ Tip-speed ratio $\frac{R\omega}{V}$ มีค่าประมาณ 6 และพบว่า

กังหันแกนตั้งนี้จะสามารถผลิตกำลังออกมาได้ถ้า $\frac{R\omega}{V} < 3$

สมการพลังงานสำหรับการไหลอย่างสม่ำเสมอ

กังหันใช้อากาศเป็นของไหลตัวการในการทำงานในการทำงานสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการพลังงานสำหรับการไหลอย่างสม่ำเสมอ ถ้าระดับความสูงของลมที่ไหลผ่านกังหันลมมีการเปลี่ยนแปลงระดับน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งไปได้ สมการพลังงานสำหรับการไหลอย่างสม่ำเสมอจะเขียนได้เป็น

$$q + u_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{V^2}{2} + u_2 + \frac{P_2}{\rho} + w \quad (2.18)$$

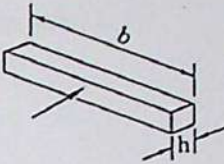
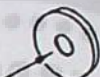
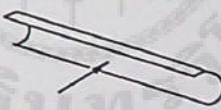
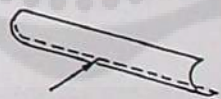
ทฤษฎีการคำนวณ

การไหลผ่านแผ่นระนาบที่วางตั้งฉากกับการไหล จะเกิดแรงดูดเนื่องจากที่เกิดขึ้นดังนี้

$$F_D = \int p da \quad (2.19)$$

การไหลผ่านแผ่นระนาบนี้ จะเกิดการไหลแยกตัว (separation) ขึ้น โดยเริ่มจากบริเวณขอบระนาบ ถึงแม้ว่าความดันทางด้านหลังจะมีค่าคงที่ก็ไม่อาจหาได้โดยการคำนวณจึงต้องอาศัยการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงดูด

สำหรับวัตถุรูปทรงต่าง ๆ ที่มีขอบคม ค่า C_D จะไม่ขึ้นกับ Re เมื่อ $Re \geq 1000$ ทั้งนี้เนื่องจากการไหลแยกตัวจะถูกบังคับให้อยู่ในตำแหน่งที่แน่นอนด้วยลักษณะรูปทรงของวัตถุ ค่า C_D ของวัตถุบางรูปทรงได้แสดงไว้ดังตาราง

วัตถุ	รูปทรง	C_D
ทรงกระบอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส		2.05 ($b/h = \alpha$) 1.05 ($b/h = 1$)
จานกลม		1.17
วงแหวน		1.20
ครึ่งทรงกลม		1.42
		0.38
หน้าตัดตัว C		2.30
		1.20

รูปที่ 2.12 ค่า C_D สำหรับรูปทรงต่างๆ ($Re \geq 1000$)

เสา

เสามีลักษณะเป็นท่อนตรงและรับแรงกดในแนวแกน ถ้าแรงมีค่าไม่มากนัก เสาที่เรียวยาวก็ยังคงอยู่ในสภาพที่ตรงได้ แต่ถ้าเพิ่มแรงขึ้นค่าหนึ่ง เสดังกล่าวก็อาจเกิดการโก่งงอขึ้น (buckling) แรงที่ทำให้เกิดการโก่งงอนี้เรียกว่า แรงวิกฤต (critical load) ความเค้นที่เกิดขึ้นในเสาขณะที่เริ่มเกิดการโก่งงออาจจะต่ำกว่าความเค้นใช้งานก็ได้ อย่างไรก็ตามถ้าเกิดการโก่งงอขึ้น

งานนั้นก็ไม่สามารถจะทำหน้าที่ตามความต้องการได้ ฉะนั้นการออกแบบจึงต้องมีการจำกัดแรงที่ทำให้เกิดการโก่งงอด้วย

เสาเป็นชิ้นส่วนหนึ่งที่ใช้รับแรงกดซึ่งเสาก็มีอยู่หลายชนิด สูตรที่ใช้กับเสาจะจำแนกตามอัตราส่วนความเพียว (slenderness ratio) L_c/r โดยที่

$$\begin{aligned} L_c &= \text{ความยาวสมมูล} \\ r &= \sqrt{\frac{I}{A}} \text{ รัศมีจําเริญ} \\ I &= \text{โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด} \\ A &= \text{พื้นที่หน้าตัด} \end{aligned}$$

เนื่องจากการออกแบบเสาที่อาจเกิดการโก่งงอ จะจำกัดแรงกด ดังนั้นจึงต้องใช้ค่าความปลอดภัยกับแรงกด โดย

$$\text{F.S.} = \frac{P_{cr}}{P_{all}} \quad (2.20)$$

สำหรับเสาที่มีขนาดยาวจะนิยมใช้สูตรของออยเลอร์ (Euler) คือ

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_c^2} \quad (2.21)$$

ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (I) ของท่อวงกลมคือ

$$I = \frac{\pi}{64} (d_o^4 - d_i^4) \quad (2.22)$$

ความเค้นวิกฤตที่เกิดกับเสา (Critical stress) คือ

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(L_e / r)^2} = \frac{P_{cr}}{A} \quad (2.23)$$

$$C_c^2 = \frac{\sqrt{2\pi^2 E}}{\sigma_y} \quad (2.24)$$

ถ้าเป็นเหล็กโครงสร้างแล้วจะใช้สูตรของออยเลอร์ เมื่ออัตราส่วนความเพียวมากกว่า 115 จากสูตรจะเห็นว่าเสาเกิดการโก่งงอรอบแกน ซึ่งโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดหรือรัศมีไจเรชันมีค่าน้อยที่สุด ความเค้นที่ยอมรับได้ของวัสดุที่ใช้ทำเสาก็เป็นอีกค่าหนึ่งที่มีผลต่อความแข็งแรงของเสา ซึ่งจะหาได้จากสมการ คือ

$$\sigma = \frac{P_{all}}{A} \quad (2.25)$$

สำหรับค่าความยาวสมมูลนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของปลายชิ้นงานที่ยึดติดอยู่ ดังรูปที่ 2.13 ปลายยึดแบบธรรมดา (Both ends pinned)

$$L_e = L \quad (2.26ก)$$

ปลายยึดแน่นสองข้าง (Both ends fixed)

$$L_e = 0.5 L \quad (2.26ข)$$

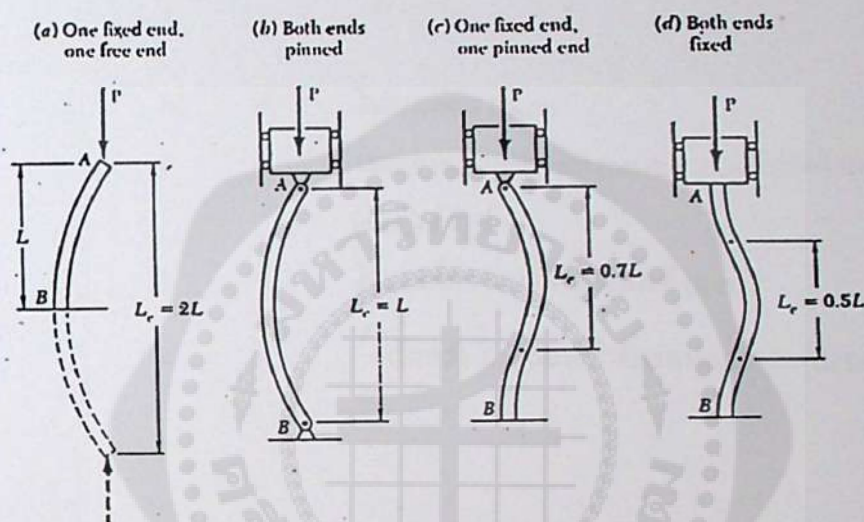
ปลายยึดแบบธรรมดา – ยึดแน่น (One fixed end , one pinned end)

$$L_e = 0.707 L \quad (2.26ค)$$

ปลายยึดแน่นอิสระ (One fixed end , one free end)

$$L_e = 2L \quad (2.26\text{ง})$$

การหาค่าโมเมนต์รอบจุดหมุนของฐานเสาจะเป็นตัวบอกเราว่าเสานั้นเกิดการหมุนขึ้นหรือไม่ เมื่อมีแรงมากระทำในทิศทางต่าง ๆ กัน ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ คือ



รูปที่ 2.13 แสดงการยึดปลายเสาวิธีต่างๆ

$$\begin{aligned} \text{โมเมนต์} &= \text{แรง} \times \text{ระยะทาง} \\ M &= F \times S \end{aligned} \quad (2.27)$$

ค่าโมเมนต์ที่ทำให้เสาเกิดการหมุนแล้วทำให้ล้ม เรียกว่า โอเวอร์เทิร์นนิ่งโมเมนต์ (Over turning moment) และโมเมนต์ที่ต้านเพื่อไม่ให้เกิดการล้มของเสา เรียกว่า รีซิสติงโมเมนต์ (Resisting moment) โดย

$$\begin{aligned} \text{Over turning moment} &= F \times S \\ \text{Resisting moment} &= W \times 1 \\ N &= \frac{\text{Resisting Moment}}{\text{Overturning Moment}} \end{aligned} \quad (2.28)$$

คาน

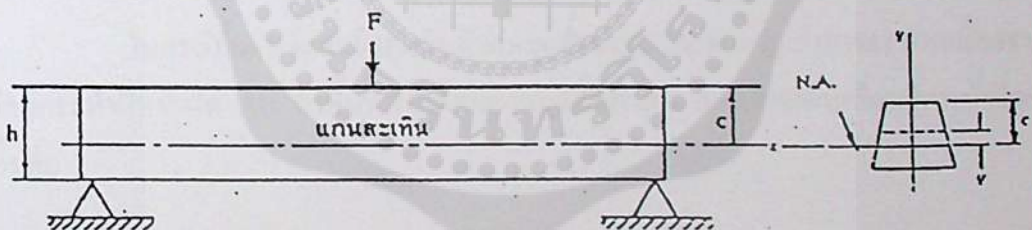
ชิ้นส่วนเครื่องจักรจำนวนมากรับแรงในแนวตั้ง ลักษณะเช่นเดียวกับคานทั่วไป ฉะนั้น จึงใช้ความเค้นดัด (bending stress) เป็นข้อกำหนดในการออกแบบความเค้นดัดสูงสุดเกิดที่ผิวนอกสุดของคาน ณ ตำแหน่งที่โมเมนต์ดัด (bending moment) มีค่าสูงสุดซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma_b = \frac{Mc}{I} = \frac{M}{z} \quad (2.29)$$

โดยที่

M = โมเมนต์ดัด (N.m)

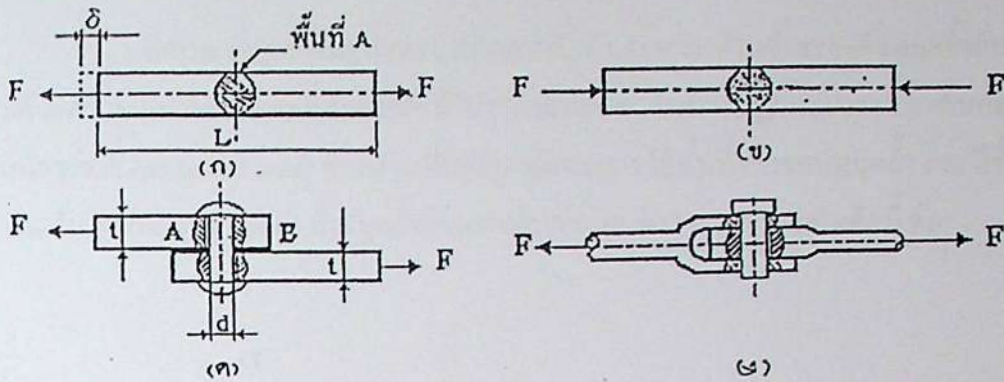
c = ระยะจากแกนสะเทิน (neutral axis) ไปยังผิวนอกสุด (mm.) ดังรูป

I = โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ (mm.⁴)z = $\frac{I}{c}$ เรียกว่า โมดูลัสหน้าตัดรอบแกนสะเทิน (mm.³)

รูปที่ 2.14 แสดงคาน และ แกนสะเทิน

ความเค้น

นิยามของความเค้น คือ แรงหารด้วยหน้าตัดที่รับแรงความเค้นอย่างง่าย (simple stress) มีอยู่ 3 ชนิด คือ ความเค้นดึง ความเค้นกด และความเค้นเฉือน



รูปที่ 2.15 แสดงแรงชนิดต่างๆ

พิจารณารูป (ก) และ (ข) ซึ่งเป็นท่อนโลหะกลมอยู่ภายใต้แรงดึง และแรงกดตามลำดับ ความเค้นดึงและความเค้นกด คือ

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad \text{และ} \quad \sigma_c = \frac{F}{A} \quad (2.30)$$

ในกรณีที่แผ่นโลหะยึดติดกันด้วยหมุดยัดดังรูป (ค) ความหมุดยัดอาจจะขาดเนื่องจากแรงเฉือนกระทำที่หน้าตัด AB ถ้าพื้นที่หน้าตัดของหมุดยัดเท่ากับ A ความเค้นเฉือนในหน้าตัดของหมุดยัด คือ

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.31)$$

ถ้าหน้าตัดของชิ้นงานที่รับแรงเฉือนมีมากกว่าหนึ่งแห่งดังเช่นในรูป (ง) ซึ่งมีสองแห่งพื้นที่หน้าตัดที่รับแรง คือ $2A$ ในกรณีเช่นนี้เรียกว่าหมุดยัดรับแรงเฉือนคู่ (double shear) เพราะฉะนั้น ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในหน้าตัดของหมุดยัดนี้จะเท่ากับ

$$\tau = \frac{F}{2A} \quad (2.32)$$

พิจารณาหมุดย้ำในรูป (ค) จะเกิดการดันกันระหว่างด้านข้างของตัวหมุดย้ำกับแผ่นโลหะด้วยความเค้นที่ผิวโลหะที่สัมผัสกันนี้ไม่สม่ำเสมอ ในทางปฏิบัติจึงหาความเค้นกคนี้โดยใช้พื้นที่ฉายา (projected area) ของส่วนที่อัดกันอยู่แทนการใช้พื้นที่จริงรอบหมุดย้ำ และมีชื่อเรียกว่า ความเค้นอัด (bearing stress) ถ้าหมุดย้ำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d ความเค้นอัดนี้ คือ

$$\sigma = \frac{F}{dt} \quad (2.33)$$

ค่าความปลอดภัย

โดยทั่วไปแล้วค่าความปลอดภัย หมายถึง ตัวเลขที่นำไปหารค่าความต้านทานแรงดึง หรือ ความต้านทานแรงดึงครากของวัสดุ เพื่อให้ได้ค่าความเค้นงาน (working stress) ใช้ขึ้นส่วนที่กำลังออกแบบซึ่งเรียกสั้น ๆ ว่าความเค้นออกแบบ (design stress) หรือความเค้นใช้งาน

ในกรณีที่ได้มีการกำหนดขนาดของชิ้นงานมาแล้ว ค่าความปลอดภัยของชิ้นงานนั้น คือ

$$N_u = \frac{\text{ความต้านทานแรงดึงสูงสุด}}{\text{ความเค้นทางทฤษฎี}} \quad (2.34)$$

$$N_y = \frac{\text{ความต้านทานแรงดึงคราก}}{\text{ความเค้นทางทฤษฎี}} \quad (2.35)$$

สำหรับปัญหาที่ไม่เป็นแบบเชิงเส้น (nonlinear) เช่น ท่อโลหะ หรือเสาที่อาจเสียหายเนื่องมาจากการโก่งงอ จะต้องใช้ค่าความปลอดภัยกับแรงที่มากระทำโดยตรงแทนที่จะใช้กับความเค้น ทั้งนี้เพราะปัญหาแบบไม่ใช่เชิงเส้นความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานอาจจะมิได้แปรผันโดยตรงกับแรงในกรณีเช่นนี้

$$N = \frac{\text{แรงที่ทำให้เสียหาย}}{\text{แรงที่ใช้ออกแบบ}} \quad (2.36)$$

$$F.S. = N \quad (2.37)$$

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าความปลอดภัย

ชนิดของแรง	เหล็กเหนียว	โลหะเหนียว	เหล็กหล่อและโลหะเปราะบาง
	N_y	N_u	N_u
แรงดึง	1.5 - 2	3 - 4	5 - 6
แรงอัดทิศทางเดียวหรือ			
แรงกระแทกเล็กน้อย	3	6	7 - 8
แรงอัดสองทิศทางหรือ			
แรงกระแทกเล็กน้อย	4	8	10 - 12
แรงกระแทกอย่างหนัก	5 - 7	10 - 15	15 - 20

ค่าความปลอดภัยที่เลือกใช้ขึ้นอยู่กับตัวประกอบจำนวนมากดังนี้

- (ก) ชนิดของแรงที่มากระทำต่อชิ้นงานว่าเป็นแรงที่จัดอยู่ในประเภทอยู่นิ่ง หรือเปลี่ยนแปลงขนาดอยู่ตลอดเวลาขณะใช้งาน
- (ข) ขณะการใช้งานของชิ้นงานว่าเกี่ยวข้องกับภาระที่อาจจะสูญเสียชีวิต หรือทรัพย์สินจำนวนมากหรือไม่
- (ค) น้ำหนักของชิ้นงานว่าจำเป็นที่จะต้องเบาที่สุดหรือไม่ เช่น ชิ้นส่วนสำหรับเครื่องบิน เป็นต้น ในกรณีเช่นนี้การใช้ค่าความปลอดภัยจะต้องพิจารณาอย่างละเอียดเป็นพิเศษ
- (ง) จำนวนของชิ้นงานที่จะผลิตออกมาถ้าผลิตครั้งละหลายๆครั้งจะระมัดระวังในการใช้ค่าความปลอดภัยที่ไม่สูงจนเกินไป ทั้งนี้เพื่อให้ประหยัดวัสดุได้มากที่สุด
- (จ) เนื้อหาวัสดุที่ผลิตออกมาอาจจะไม่สม่ำเสมอ กัน ทำให้มีความสามารถในการรับแรงต่างกัน

ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด

ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดเหมาะสำหรับวัสดุเหนียว มีชื่อเสียงอย่างหนึ่งว่าเกณฑ์ของเทรสกา (Tresca's criterion) เป็นทฤษฎีที่นิยมใช้กันมาก เพราะใช้ได้ง่ายและปลอดภัย ทฤษฎีนี้กล่าวว่า วัสดุจะเกิดความเสียหายเมื่อความเค้นเฉือนสูงสุดในวัสดุมีค่าเท่ากับ ความต้านแรงเฉือนของวัสดุนั้นเหมือนกัน ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงเมื่อถึงจุดคราก

จากกลศาสตร์วัสดุ พบว่าความต้านแรงเฉือนสูงสุดเมื่อวัสดุได้รับแรงดึงจนครากมีค่าเท่ากับ

$$\frac{\sigma_y}{2} \quad (2.37)$$

และเกิดระนาบเอียงทำมุม 45° กับแนวแรงดึงจนทดสอบ ซึ่งตามทฤษฎีนี้จะเริ่มเกิด

ความเสียหายเมื่อ $\tau_{\max}$ เท่ากับ $\frac{\sigma_y}{2}$ เพราะฉะนั้นสมการที่ต้องนำมาคิดในการออกแบบคือ

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \pm \frac{\sigma_y}{2N} \quad (2.38)$$

$$\frac{\sigma_1}{2} = \pm \frac{\sigma_y}{2N}$$

$$\frac{\sigma_2}{2} = \pm \frac{\sigma_y}{2N}$$

ซึ่งจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \pm \frac{\sigma_y}{N} \quad (2.39)$$

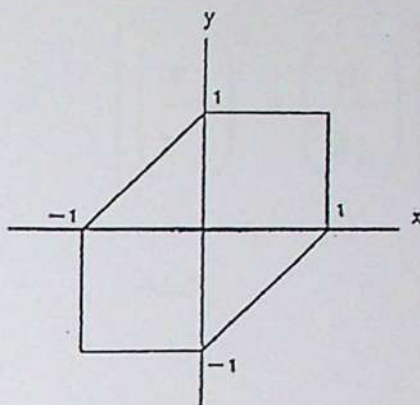
$$\sigma_1 = \pm \frac{\sigma_y}{N}$$

$$\sigma_2 = \pm \frac{\sigma_y}{N}$$

หรือ $x - y = \pm 1, x = \pm 1, y = \pm 1$

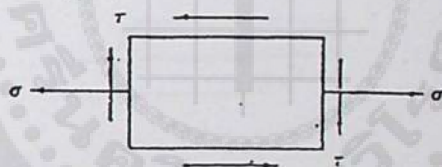
โดยที่ x และ y มีความหมายเช่นเดียวกับในหัวข้อทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด

สมการข้างต้นสามารถสร้างรูปแสดงขอบเขตความเค้นที่ยอมให้มีได้ในวัสดุชิ้นงานที่ออกแบบดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ขอบเขตของความเค้นจากทฤษฎีความเสียหาย

ดังที่กล่าวมาแล้วว่า ชิ้นส่วนเครื่องจักรจำนวนมากจะมีสถานะของความเค้นเป็นกรณีพิเศษดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะทิศทางของความเค้น

ในกรณีนี้ถ้าขอมให้มีความเค้นสูงสุด

$$\tau_{\max} = \frac{\tau_y}{N} \quad (2.40)$$

แทนค่า $\tau_{\max}$ ลงในสมการ $\tau_{\max} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} = \left[\left(\frac{\sigma}{2} \right)^2 + \zeta^2 \right]^{1/2}$

แล้วจัดรูปใหม่จะได้

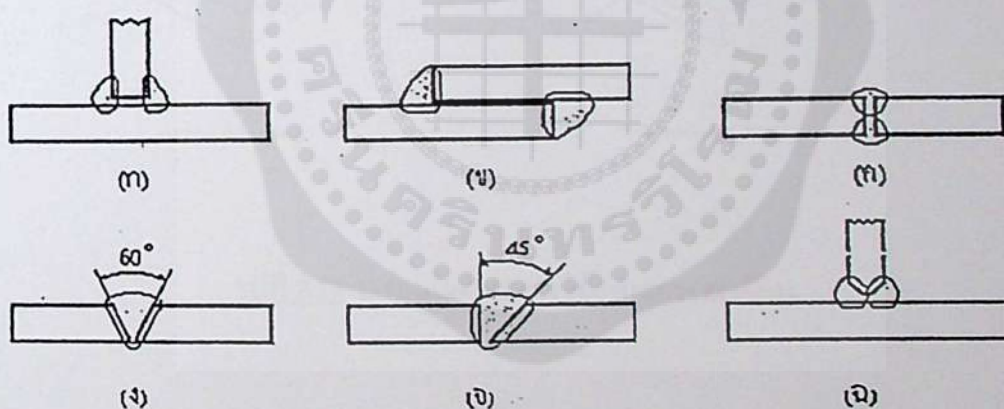
$$\frac{1}{N} = \left[\left(\frac{\tau}{\tau_y} \right)^2 + \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.41)$$

โดยที่

$$\tau_y = 0.5 \sigma_y \quad (2.42)$$

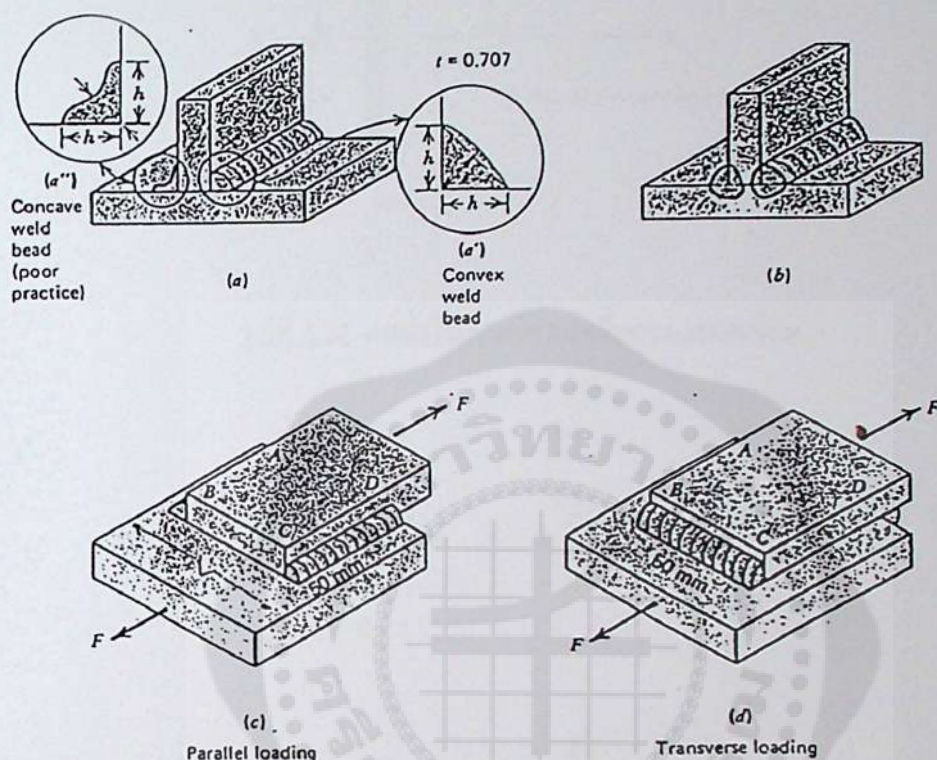
การเชื่อมต่อ

การเชื่อมต่อ (welded joints) เป็นวิธีการต่อชิ้นงานเข้าด้วยกัน ซึ่งนิยมใช้กันมากในงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ สำหรับรอยเชื่อมต้องรับแรงสูง นิยมวิธีการเชื่อมด้วยไฟฟ้า (arc welding) การเชื่อมด้วยแก๊ส (gas welding) และการเชื่อมด้วยความต้านทานไฟฟ้า (resistant welding)



รูปที่ 2.18 แสดงรอยเชื่อมต่างๆ

ตามรูปที่ 2.18 เป็นรูปแบบการเชื่อมในลักษณะต่าง ๆ รูปที่ 2.18c แสดงรอยเชื่อมที่มีภาวะกระทำขนานกับรอยเชื่อมซึ่งเรียกภาวะนั้นว่า parallel load และรูปที่ 2.18d แสดงรอยเชื่อมที่มีภาวะกระทำตั้งฉากกับรอยเชื่อมซึ่งเรียกภาวะนั้นว่า transverse load ซึ่ง parallel load จะทำให้เกิดแรงเฉือนกระทำกับแนวเชื่อม และ transverse load จะทำให้เกิดแรงดึงและแรงเฉือนกระทำกับแนวเชื่อมไปพร้อมกัน รูปที่ 2.19a แสดงขนาดของรอยเชื่อมซึ่ง h คือขาของรอยเชื่อม (leg length) และ t คือคอของรอยเชื่อม (throat length) โดยที่ $t = 0.7070h$



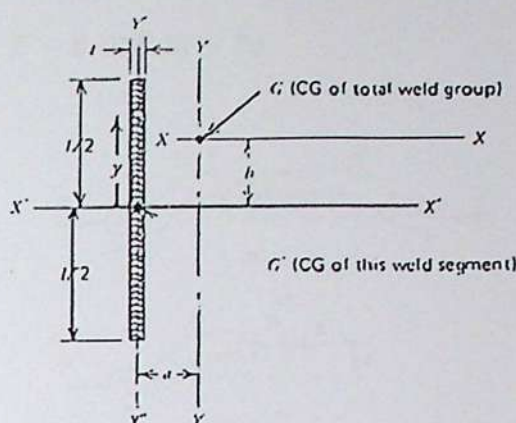
รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะการใช้งานของรอยเชื่อม

การคำนวณรอยเชื่อมจะมีการพิจารณา

1. ทิศทางของความเค้นที่กระทำกับพื้นที่หน้าตัดจะนำมาพิจารณาในการคำนวณ และความเค้นนี้เป็นความเค้นปกติทั่วไปซึ่งสมมติให้มีค่าสม่ำเสมอตลอดแนวเชื่อม

2. ความเค้นเฉือน ความเค้นคด จะคำนวณได้จาก $\tau = T/r$ และ Mc/I และชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อกันจะสมมติให้เป็นเนื้อเดียวกัน

ค่า I และ J เป็นแฟกเตอร์ที่เพิ่มเข้ามาเพื่อใช้ในการคำนวณแนวเชื่อมซึ่งสามารถหาค่าได้โดยรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงโมเมนต์ความเฉื่อยของรอยเชื่อม

$$I_{X'} = \int y^2 dA = 2 \int_0^{L/2} y^2 (t dy) = \frac{L^3}{12} \quad (2.43)$$

$$I_{Y'} = 0 \quad (2.44)$$

เมื่อ

$$I_X = I_{X'} + Ab^2 = \frac{L^3 t}{12} + Ltb^2 \quad (2.45)$$

$$I_Y = I_{Y'} + Ab^2 = Lta \quad (2.46)$$

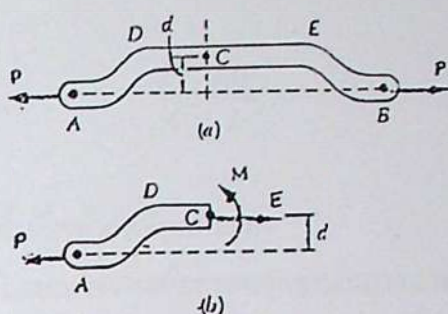
และ

$$J = I_X + I_Y = \frac{L^3 t}{12} + Lt(a^2 + b^2) \quad (2.47)$$

ภาระเยื้องศูนย์กลาง

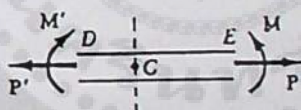
ภาระเยื้องศูนย์กลางเกิดจากการที่มีแรงกระทำเยื้องศูนย์กลางกลางมวลบนพื้นที่หน้าตัดที่ถูกกระทำ ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.21a เมื่อมีแรงกระทำเยื้องกับศูนย์กลางมวลและจะทำให้เกิดโมเมนต์แรงคู่ควบเกิดขึ้นดังรูปที่ 2.21b ที่ส่วนตัด AC แรง F มีขนาดเท่ากับแรง P' และโมเมนต์แรงคู่ควบ M มีค่าเท่ากับโมเมนต์ของแรง P' แต่ทิศทางตรงกันข้ามซึ่งกระทำที่จุด C และ d เป็นระยะทางจากจุดศูนย์กลางมวลถึงเส้น AB ซึ่งมีแรง P และ P' กระทำกันอยู่ในแนวแกนนี้ ซึ่งจะได้

$$F = P \text{ และ } M = Pd$$

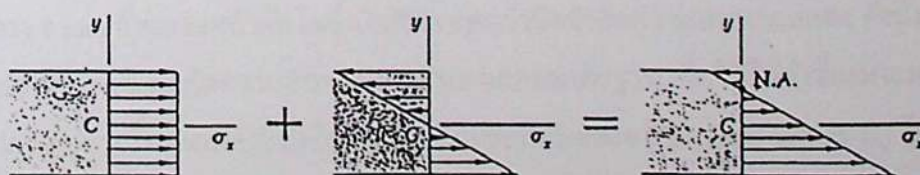


รูปที่ 2.21 แสดงการเชื่อมโยงของแรง

สังเกตว่าตามแนวเส้น AB จะมีแรงกระทำที่จุดศูนย์กลางมวล คือ แรง P และ P' และจะทำให้เกิดโมเมนต์ของแรงคู่ควบ M และ M' ดังรูปที่ 2.21 ดังนั้น จึงเกิดแรงกระทำที่จุดศูนย์กลางมวลและโมเมนต์ที่กระทำที่ปลายทั้งสองตามรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงโมเมนต์คัตและแรงกระทำ



รูปที่ 2.23 แสดงความเค้นภายใน

จะได้

$$\sigma_x = (\sigma_x)_{centric} + (\sigma_x)_{bending}$$

$$\sigma_x = \frac{P}{A} \pm \frac{My}{I} \quad (2.48)$$

- เมื่อ
- A คือพื้นที่หน้าตัดที่ถูกกระทำ
 - I คือโมเมนต์ความเฉื่อยรอบจุดศูนย์กลางมวล
 - y คือระยะจากจุดศูนย์กลางมวลถึงปลายสุดของแต่ละด้าน
- เครื่องหมาย + แสดงว่ามีแรงดึงที่กระทำที่พื้นที่หน้าตัดนั้น ๆ
- เครื่องหมาย - แสดงว่ามีแรงกดกระทำที่พื้นที่หน้าตัดนั้น ๆ

ตัวประกอบของผิว

ค่าขีดจำกัดความทนทานดังที่กล่าวมาแล้วใช้สำหรับชิ้นทดสอบผิวขัดมันเท่านั้น โดยทั่วไปแล้วคุณภาพของผิวชิ้นงานจะต่ำกว่าชิ้นทดสอบ ความขรุขระของผิวหน้าก็ทำให้ชิ้นงานแตกหักเนื่องจากความล้าได้ง่ายขึ้นอีก เพราะฉะนั้นมีการปรับค่าขีดจำกัดความทนทานของชิ้นงานตามสภาพของผิวชนิดต่าง ๆ มีชื่อเรียกว่า ตัวประกอบของผิว (surface factor) C_s ถ้าชิ้นงานที่มีโอกาสแตกหักเนื่องจากความล้าแล้ว คุณภาพของผิวมีผลต่ออายุการใช้งานของชิ้นงานนั้นมาก

ตัวประกอบของขนาด

การทดสอบหาขีดจำกัดความทนทานทำโดยใช้ชิ้นทดสอบขนาดมาตรฐาน เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ถ้าขนาดหน้าตัดโตขึ้น ไปอีกจะพบว่าขีดจำกัดความทนทานลดลง ดังนั้นจึงต้องมีตัวประกอบมาคูณค่าขีดจำกัดความทนทานจากชิ้นทดสอบมาตรฐาน เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่กว่าชิ้นทดสอบซึ่งมีชื่อเรียกว่า ตัวประกอบของขนาด (size factor) C_b โดยแนะนำให้ใช้ค่าดังต่อไปนี้

$$C_b = 1.00 \text{ สำหรับ } d < 8 \text{ mm}$$

$$C_b = 0.85 \text{ สำหรับ } 8 \text{ mm} < d < 50 \text{ mm}$$

$$C_b = 0.75 \text{ สำหรับ } d > 50 \text{ mm}$$

ตัวประกอบของขนาดนี้ใช้ได้ทั้ง การดึง การบิด และการดัด ในกรณีที่ชิ้นงานมีหน้าตัดไม่กลมก็ให้คิดความยาวส่วนที่สั้นที่สุดของหน้าตัดนั้นเป็นหลัก

ตัวประกอบของแรง

จากการที่ได้ทราบมาแล้วว่าวัสดุทั่วไปมีคุณสมบัติในการรับความเค้นเฉือนได้น้อยกว่าความเค้นดึงหรือกด ในกรณีของขีดจำกัดความทนทานก็เช่นเดียวกัน จากการทดสอบจะพบว่าขีดจำกัดความทนทานสำหรับการเฉือนมีค่าน้อยกว่าการดัด ตัวประกอบที่ใช้ลดค่าขีดจำกัดความทนทานจากการดัดนี้เรียกว่าตัวประกอบของแรง (load factor) C_c โดยแนะนำให้ใช้ค่าดังต่อไปนี้

$$C_c = 1.00 \text{ สำหรับการดัด}$$

$$C_c = 0.80 \text{ สำหรับการดึงหรือการกด}$$

$$C_c = 0.60 \text{ สำหรับการเฉือน}$$

เพราะฉะนั้น สำหรับการดัด

$$\sigma_n = C_u C_b C_c$$

สำหรับการดึง

$$\sigma_n = 0.80 \text{ } (\sigma_n \text{ จากการดัด})$$

สำหรับการเฉือน

$$\tau_n = 0.60 \text{ } (\sigma_n \text{ จากการดัด})$$

ตัวประกอบความเค้นหนาแน่น

ความต้านแรงทนทานดังกล่าวมาแล้วเป็นค่าสำหรับชิ้นงานที่มีหน้าตัดคงที่ ในกรณีทั่วไปชิ้นงานอาจมีลักษณะขาดความต่อเนื่อง เช่น มีร่อง รูเจาะ หรือเปลี่ยนขนาด จึงทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้มีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณตามปกติ นั่นคือ

$$\sigma_{\max} = K_t \sigma_0$$

โดยที่ σ_0 เป็นค่าที่คำนวณจาก F/A , Mc/I , หรือ Tr/J โดยคิดพื้นที่หน้าตัดสุทธิ(net) และ K_t มีชื่อเรียกว่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นทางทฤษฎี(theoretical stress concentration factor)

ค่า K_t นี้เป็นค่าที่ได้จากการทดลองชิ้นงานชนิดต่าง ๆ ซึ่งใช้วัสดุพิเศษโดยเฉพาะ เรียกว่าวัสดุยืดหยุ่นโปร่งแสง (photoelastic material) ตามปกติแล้วชิ้นงานจริงจะเป็นวัสดุที่แตกต่างกันไปจากวัสดุที่ใช้ทดลอง ดังนั้นความไว (sensitivity) ของวัสดุต่อการเพิ่มความเค้นบริเวณที่มีร่อง รู หรือเปลี่ยนขนาดจึงแตกต่างกันไปด้วย เช่น เหล็กหล่อเป็นโลหะเนื้อพรุน ฉะนั้นจึงมีตัวต่อความเค้นหนาแน่นอยู่แล้ว ค่า K_t จึงควรเข้าใกล้ 1 (แสดงว่ามีความเค้นหนาแน่นเพิ่มขึ้น เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของชิ้นงานเล็กน้อยมาก) คณิตที่ใช้บอกถึงความไวของวัสดุต่อการวัดความเค้นหนาแน่นนี้เรียกว่า ความไวของรอยเจาะ (notch sensitivity) q ซึ่งมีนิยามว่า

$$q = \frac{(K_f - 1)}{K_t - 1} \quad (2.49)$$

หรือ

$$K_f = 1 + q(K_t - 1)$$

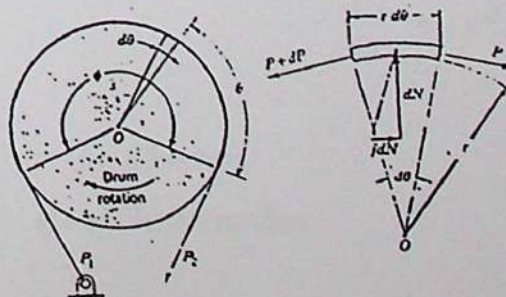
โดยที่ K_f เป็นค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นจริง (actual stress concentration factor)

ถ้า $q = 0$ จะได้ K_f แสดงว่าไม่มีผลของความเค้นหนาแน่น เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของชิ้นงานอยู่ด้วย แต่ถ้า $q = 1$ จะได้ $K_f = K_t$ ซึ่งแสดงว่าวัสดุมีความไวต่อความเค้นหนาแน่นเต็มที่

ผู้ออกแบบบางคนนิยมให้ $K_f = K_t$ (ค่าสูงสุดของตัวประกอบความเค้นหนาแน่น) ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยของชิ้นงาน ดังนั้นในกรณีที่มีข้อมูลไม่เพียงพอก็ควรใช้ $K_f = K_t$ แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้ออกแบบที่จะกำหนดค่า K_t ขึ้นมาใช้

เบรคสายพาน

Flexible band clutch และ brake การวิเคราะห์คำนวณเครื่องหมายถึงในรูปดังนี้



รูปที่ 2.24 แสดงองค์ประกอบต่างๆ เนื่องจากการเบรคของสายพาน

เพราะมีความเสียดทานและการหมุนของล้อ ทำให้แรงคึง P_2 น้อยกว่าแรงคึงที่สลัก P_1 อีติเม้นท์ของสายเบรคมีความยาวเชิงมุม $d\theta$ จะอยู่ในสภาพสมดุลภายใต้แรงคึงแสดงในรูป เมื่อรวมแรงในแนวตั้ง จะได้

$$(P + dP)\sin \theta + P \sin \theta - dN = 0 \quad (2.50)$$

สำหรับมุมเล็ก ๆ จะได้ $\sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) = \frac{d\theta}{2}$ และ $dP \sin$ น้อยมากตัดทิ้งได้ ดังนั้นจึงเหลือ

$$dN = P d\theta \quad (2.51)$$

รวมแรงในแนวนอนจะได้

$$(P + dP) \cos\left(\frac{d\theta}{2}\right) - P \cos\left(\frac{d\theta}{2}\right) - f dN = 0 \quad (2.52)$$

$$dP - f dN = 0 \quad (2.53)$$

แทนค่า dN ของสมการ (b) ลงใน (d) แล้วอินทิเกรต

$$\int_{P_2}^{P_1} \frac{dP}{P} = f \int_0^{\phi} d\theta \ln \frac{P_1}{P_2} = f\phi \quad (2.54)$$

และ

$$\frac{P_1}{P_2} = e^{f\phi} \quad (2.55)$$

f = แรงเสียดทาน

ϕ = มุมที่สายพานคล้อง

การประเมินค่าอายุการใช้งานและแรง

การที่เบร้งมีอายุการใช้งานแตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากความกลมของลูกกลิ้ง และความเรียบของผิวลูกกลิ้ง ดังนั้นอายุการใช้งานที่ผู้ผลิตอ้างถึงจึงมีรากฐานมาจากการใช้หลักวิชาการทางด้านสถิติเข้าช่วย ทางสมาคม AFBMA จึงได้ตั้งนิยามและวิธีการเลือกดังนี้

1. อายุการใช้งานของโรลลิ่งเบร้งหมายถึง จำนวนรอบ(หรือจำนวนชั่วโมงที่ความเร็วคงที่) ซึ่งเบร้งหมุนได้ก่อนที่จะเริ่มเกิดความล้าขึ้นในวงแหวนหรือลูกกลิ้ง

2. อายุประเมิน(rating life) ของโรลลิ่งเบร้งจำนวนหนึ่งซึ่งมีลักษณะเหมือนกันทุกประการซึ่งเบร้ง 90%จากจำนวนนี้สามารถหมุนได้โดยไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้า ผู้ผลิตบางบริษัทอาจจะใช้อายุใช้งานเฉลี่ย(median life)เป็นอายุประเมินก็ได้อายุงานเฉลี่ย หมายถึงจำนวนรอบที่ 50%ของเบร้งที่เหมือนกันจำนวนหนึ่งสามารถหมุนได้โดยไม่เกิดความล้า

3. แรงสถิตย์ประเมิน(basic static load rating)หมายถึงแรงในแนวนอนที่ทำให้เกิดระยะขยุ้มตัวของลูกกลิ้งและวงแหวน และวงแหวนรวมเท่ากับ 0.0001 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลูกกลิ้ง และใช้แทนด้วย C_0 และ C_0 สำหรับเบร้งอนุกรมชนิดต่าง ๆ ดูได้จากภาคผนวก ก-11 ซึ่งจะขึ้นอยู่กัวัสดุที่ใช้ทำเบร้ง จำนวนของลูกกลิ้ง มุมสัมผัส ตลอดจนขนาดของลูกกลิ้ง และ วงแหวน

4. แรงพลวัตประเมิน(basic dynamic load rating)ของโรลลิ่งเบร้ง หมายถึงแรงที่กระทำในแนวนอนซึ่งเบร้งที่มีลักษณะเหมือนกันจะรับได้ โดยอายุประเมินเท่ากับหนึ่งล้านรอบเมื่อวงแหวนอันในเป็นตัวหมุนและวงแหวนอันนอกหยุดนิ่ง และใช้แทนที่ C ซึ่งแสดงในภาคผนวก ก-11 แรงพลวัตประเมิน C นี้เป็นค่าใช้ในการเลือกเบร้งเพื่อรับแรงและมีอายุการใช้งานตามต้องการ โดยเปลี่ยนอายุการใช้งานจริงเป็นอายุการใช้งานในเค้ดตาล็อก หรือในทางกลับกัน เลือกเบร้งจากเค้ดตาล็อกแล้วเปลี่ยนให้รับแรงตามต้องการใช้ทำงานจริง

ให้อายุการใช้งานจริง(L_{10}) ซึ่งมีหน่วยเป็นล้านรอบ (mr) และ P เป็นแรงในแนวนอนที่เบร้งจะต้องรับขณะใช้งานจริง จาก

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^K \quad (2.55)$$

เมื่อ $L_1 = L_{10}$, $L_2 = 1mr$, $P_1 = P$, $P_2 = C$

ดังนั้น

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^K \quad (2.56)$$

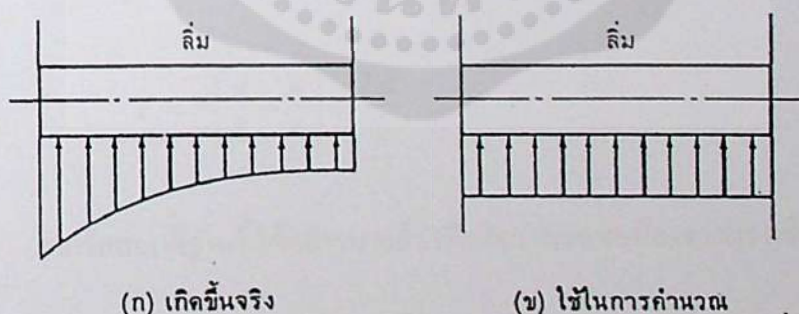
จากสมการดังกล่าวทำให้ทราบว่าแรงที่เลือกมาจากอาชุประมินจำนวนหนึ่งด้านรอบ จะทำงานได้ที่ด้านรอบขณะใช้งานจริง

ความเค้นที่รอยต่อด้วยลิ้ม

เมื่อใช้ลิ้มต่อเพลากับคูดเพื่อส่งโมเมนต์บิด ความเค้นที่เกิดขึ้นในลิ้มจะเป็นแบบสามมิติและ มีความยุ่งยากในการคิดคำนวณมาก ความเค้นที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากแรง 2 ชนิด

1. แรงเนื่องจากการสวมอัดลิ้มลงในร่องลิ้ม เช่น การสวมอัดลิ้มแบบธรรมดาหรือแบบเร็ว แรงเหล่านี้ทำให้เกิดความเค้นอัดขึ้นในลิ้มซึ่ง ไม่อาจหาค่าได้
2. แรงเนื่องจากการส่งโมเมนต์บิด ทำให้เกิดความเค้นอัดและความเค้นเฉือนในลิ้ม

แรงที่กระทำตามแนวขวางของลิ้มจะไม่กระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดความยาวลิ้ม แต่จะมีค่ามากในบริเวณใกล้กับจุดที่รับโมเมนต์บิด ทั้งนี้เนื่องจากการบิดระหว่างเพลากับคูด เพราะเพลามีความแข็งดิ่งบิด (torsional stiffness) น้อยกว่าคูด มีผู้ทำการทดลองหาลักษณะการกระจายความเค้นตลอดความยาว พบว่ามีลักษณะดังรูป

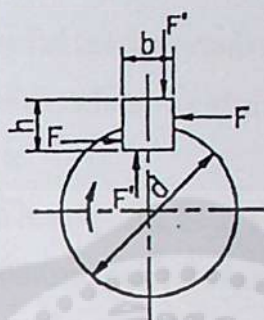


รูปที่ 2.25 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นบนลิ้ม

ในการหาความเค้นที่เกิดขึ้นในลิ้มนั้น เพื่อความสะดวกในการคำนวณจึงมักจะใช้ข้อสมมุติฐานดังนี้

- ก. แรงที่กระจายตลอดความยาวของลิ้มมีค่าสม่ำเสมอ
- ข. ไม่คิดแรงที่เกิดจากการสวมอัดลิ้ม

จากสมมติฐานดังกล่าวทำให้คำนวณหาขนาดของลิ่มได้ง่ายขึ้น ในทางปฏิบัติการคำนวณหาขนาดลิ่มมักจะเป็นการคำนวณหาความยาวของลิ่มเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากลิ่มมีขนาดพื้นที่หน้าตัดเป็นมาตรฐานอยู่แล้ว พร้อมทั้งขนาดของลิ่มที่เหมาะสมกับเพลานาขนาดต่างๆก็หาได้จากตารางภาคผนวก



รูปที่ 2.26 แสดงแรงที่กระทำกับลิ่มเนื่องจากโมเมนต์

พิจารณารอยต่อด้วยลิ่มดังรูปที่ 2.26 ให้ F เป็นแรงที่กระทำกับลิ่มเนื่องจากโมเมนต์บิด และ F' เป็นแรงที่กดลิ่มไว้ไม่ให้ลิ่มเอียง โมเมนต์บิดบนเพลานาทำให้ลิ่มลื่นมีแรงต้านทาน F เกิดขึ้นซึ่งกระทำในแนวตั้งฉากกับลิ่ม สมมติว่าแรงนี้กระทำที่จุดกึ่งกลางของลิ่มส่วนที่โผล่พ้นจากเพลานา ดังนั้นจึงหาแรง F ได้จากสมการ

$$T = F \left[\frac{d}{2} + \frac{h}{4} \right] \cong \frac{Fd}{2} \quad (2.57)$$

จากข้อสมมติฐานที่ได้กล่าวมาแล้ว เมื่อคิดว่าลิ่มขาดเนื่องจากแรงเฉือน ฉะนั้น

$$T = \frac{Fd}{2} = \frac{bl\tau d}{2} \quad (2.58)$$

โดยที่

T คือ โมเมนต์บิดเพลานา

F คือ แรงที่กระทำกับลิ่ม

d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพลานา

b คือ ความกว้างของลิ่ม

I คือ ความยาวของลิ้ม

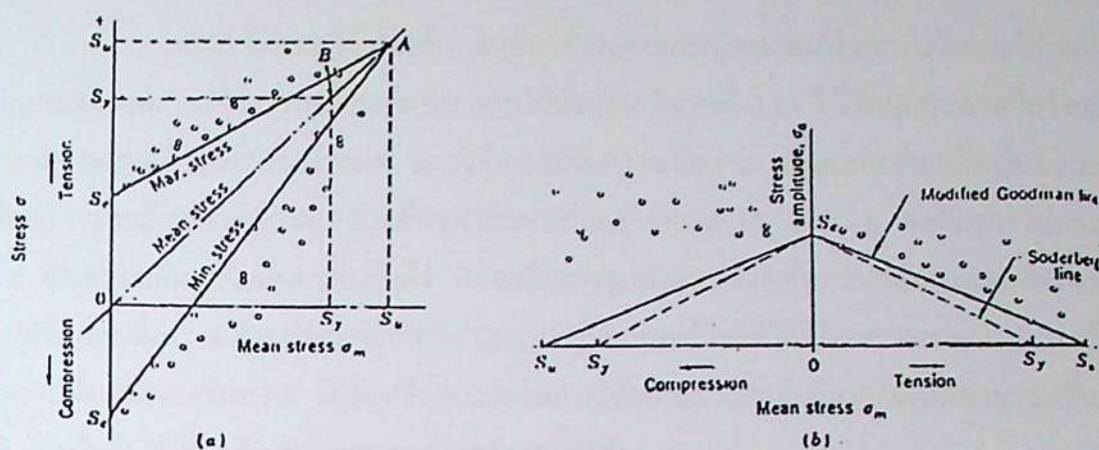
T คือ ความเค้นเฉือนบนลิ้ม

ความคล้ายใต้ความเค้นปกติสถิต

เราจะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดัดกับความเค้นปกติสถิต คือทั้งความเค้นปกติเฉื่อยและความเค้นปกติส่วนเปลี่ยน เราสามารถพล็อตผลการทดลองดังกล่าวได้สองวิธี ดังแสดงในรูปที่ 2.27 a และ 2.27 b

แผนภาพก๊อคแมนแก้ไขของรูปที่ 2.27 a มีความเค้นเฉื่อยพล็อตตามแกนนอนและความเค้นประกอบอื่น ๆ ทั้งหมดพล็อตบนแกนตั้ง โดยความเค้นดัดพล็อตในทิศทางบวกชี้จำกัดความทนทานความต้านแรงดัดหรือความต้านแรงจำกัดอายุ ขึ้นอยู่กับว่าจะใช้รูปแบบค่าใดก็ให้พล็อตบนแกนตั้งเหนือ และได้จุดเริ่มต้นเส้นของความเค้นเฉื่อยคือ เส้นตรงทำมุม 45° จากจุดเริ่มต้นไปยังจุด A จุด A คือความต้านแรงดัดสูงสุดของชิ้นส่วนแผนภาพก๊อคแมนแก้ไขประกอบด้วย เส้นตรงที่ลากจากจุด A ไปยังค่า S_e (หรือ S_y) เหนือ และได้จุดเริ่มต้นถ้าจะให้ค่าเฉลี่ยที่ดีกว่า ควรลากจากจุด A ผ่านจุดเสียหาย แต่จะได้ออกมาเป็นเส้นโค้ง ซึ่งยากในการนำไปใช้ออกแบบ จึงใช้เส้นตรงแทนในทำนองเดียวกันความต้านแรงดัดครากก็พล็อตลงบนแกนทั้งสองเช่นเดียวกัน เพราะว่า การครากก็ทำให้เสียภายใต้เช่นเดียวกันถ้า σ_{max} เกินค่า S_y (มองในแง่ภาวะสถิติของวัสดุเหนียว)

แผนภาพความล้าที่นิยมใช้กันมากคือรูปที่ 2.27 b โดยความเค้นเฉื่อยพล็อตบนแกนนอน ความเค้นดัดไปทางขวาและความเค้นกดไปทางซ้ายแต่บนแกนตั้งมีเพียงความเค้นส่วนเปลี่ยน σ_x พล็อตในแกนนี้ ดังนั้นในแผนภาพนี้มีเพียงความเค้นประกอบสองค่าที่ใช้คือ ชีคจำกัดความทนทาน หรือความต้านแรงดัดหรือความต้านแรงจำกัดอายุ ขึ้นอยู่กับว่าจะใช้ค่าใดออกแบบเป็นค่าชีคจำกัดสูงสุดของความเค้นส่วนเปลี่ยน ดังนั้นจึงพล็อตบนแกนตั้งเส้นตรงที่ลากจาก S_e ไปยัง S_u (ทั้งสองด้าน) บนแกนนอน คือขอบเขตความเสียหายของก๊อคแมน

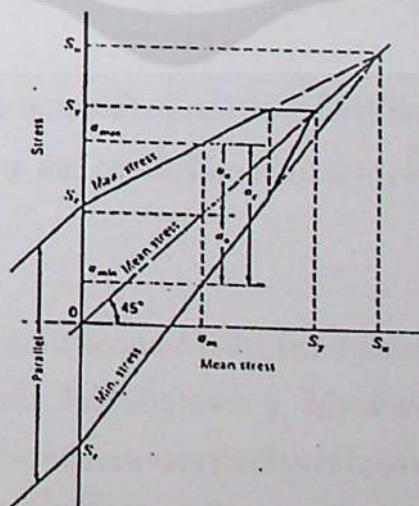


รูปที่ 2.27 แผนภาพแสดงความล้าสองแบบแสดงผลลัพธ์ของจุดเสียหาย

(a) แผนภาพกูดแมนแก้ไข (Modified Goodman diagram)

(b) แผนภาพแสดงกูดแมนแก้ไข

สังเกตผลลัพธ์การทดลองจะเห็นว่า เมื่อความเค้นเฉลี่ยเป็นความเค้นดึงจุดเสียหายเกือบทั้งหมดอยู่เหนือเส้นตรง $S_e - S_u$ แต่เมื่อความเค้นเฉลี่ยเป็นความเค้นดึงจุดเสียหายแสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นกดเฉลี่ย ไม่มีผลต่อมันเลย เส้นโซเคอร์เบอร์ค คือเส้นตรงที่ลากจาก S_u ไปยัง S_y ที่มีความนิยมไปใช้ในการออกแบบเช่นกัน เพราะว่าวัสดุเหนียวถ้าเกิดการครากก็ถือว่าเสียหายเหมือนกันแต่จะเห็นว่าการออกแบบโดยใช้เส้นกูดแมนแก้ไขก็ปลอดภัยอยู่แล้ว เส้นโซเคอร์เบอร์คจึงปลอดภัยขึ้นไปอีก



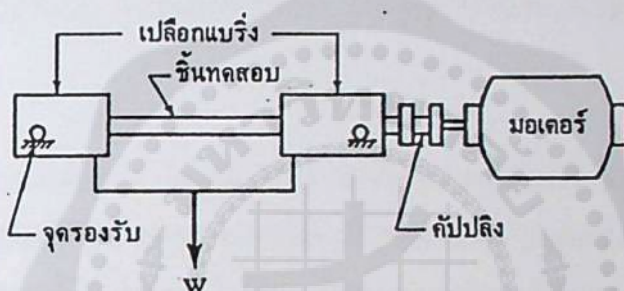
รูปที่ 2.28 แผนภาพกูดแมนแก้ไขแสดงความต้านแรงทั้งหมด

และค่าขีดจำกัดสูงสุดของความเค้นประกอบทั้งหมด

ความต้านแรงทนทานและขีดจำกัดความทนทาน

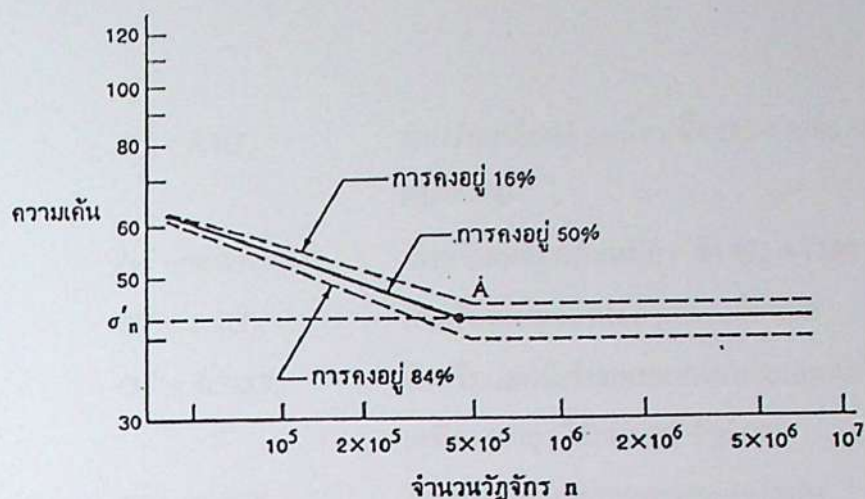
การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่รับแรงเปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักร จะไม่ใช้ความต้านแรงดึงครากหรือความต้านแรงดึงเป็นรากฐาน แต่จะใช้ความต้านแรงที่เรียกว่าความต้านแรงทนทาน ซึ่งหาได้จากขีดจำกัดความทนทาน(endurance limit) หรือจากการทดลอง โดยมีนิยามดังนี้คือ

ขีดจำกัดความทนทานหรือขีดจำกัดความล้า(fatigue limit) σ'_w หมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่กระทำซ้ำกันสองทิศทาง(reversed stress) ต่อชิ้นทดสอบผิวขัดมัน(mirror polished) เป็นจำนวนวัฏจักรนับไม่ถ้วน โดยที่ชิ้นทดสอบนั้นไม่เกิดการแตกหัก (เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นทดสอบประมาณ 8 mm)



รูปที่ 2.30 เครื่องมือทดสอบความล้า

การทดสอบอาจกระทำได้ 3 วิธีคือ การดึง การบิด และการดัด ข้อมูลจากการทดสอบที่มีอยู่ค่อนข้างมากก็คือ การดัด (reversed bending) รูปที่ 2.30 แสดงถึงเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบนี้ในการทดลองให้แขนน้ำหนักที่ต้องการเพื่อทำให้ชิ้นทดสอบเกิดความเค้นดัด จากนั้นมอเตอร์ก็จะหมุนไปด้วยความเร็วรอบคงที่ (น้ำหนักไม่หมุนไปด้วย) ในขณะที่ชิ้นทดสอบหมุนไปครบหนึ่งรอบ ตำแหน่งคงที่ ณ ผิวของชิ้นทดสอบ ก็จะได้รับความเค้นที่เปลี่ยนจากความเค้นดึงสูงสุดไปเป็นความเค้นกดสูงสุดไปเป็นความเค้นดึงสูงสุด แล้ววกกลับมาความเค้นดึงสูงสุดอีก เรียกว่าหนึ่งวัฏจักร ถ้าวัสดุชิ้นทดสอบเป็นเหล็ก เมื่อนำผลจากการทดลองมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนวัฏจักร

จากตำแหน่ง A ในรูปที่ 2.31 จะเห็นว่ากราฟเป็นเส้นตรงเกือบอยู่ในแนวระดับ แสดงว่าถ้าให้ความเค้นต่อชิ้นทดสอบต่ำกว่านี้แล้ว ชิ้นทดสอบจะไม่แตกหักเลย (ทางทฤษฎี) แต่ในทางปฏิบัติชิ้นทดสอบจะต้องขาดออกเมื่อจำนวนวัฏจักรสูงมาก ถ้าชิ้นทดสอบเป็นแบบผิวขัดมัน และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 8 mm ความเค้นที่จุด A บนเส้นการคงอยู่ 50% (survival) เรียกว่า ชีดจำกัดความทนทานและชิ้นทดสอบที่รับความเค้นระดับนี้ให้ถือว่ามียาอายุใช้งานไม่จำกัด (infinite life) ในทางปฏิบัติให้ถือว่าชิ้นงานที่สามารถรับแรงได้จำนวนวัฏจักรมากกว่า 1 ล้าน เป็นชิ้นงานที่มีอายุไม่จำกัด

สำหรับวัสดุบางชนิด เช่น ทองเหลือง ทองแดง อะลูมิเนียม และแมกนีเซียม เส้นกราฟจะไม่มีรอยหักมุม ดังรูปที่ 2.31 แต่เส้นกราฟจะลดลงมาเรื่อยๆ แสดงว่าวัสดุเหล่านี้ไม่มีขีดจำกัดความทนทาน วัสดุเหล่านี้จะต้องระบุจำนวนวัฏจักรและระดับความเค้นที่ทำให้ชิ้นทดสอบแตกหักด้วย และความเค้นนี้เรียกว่า ความต้านแรงทนทาน

ชิ้นงานทั่วไปจะมีขนาดไม่เท่ากับชิ้นทดสอบ และผิวหน้าก็อาจจะไม่ได้ขัดมัน ตลอดจนแรงที่กระทำก็อาจจะเป็นอย่างอื่น ๆ เช่น แรงบิด จากการทดสอบพบว่าขีดจำกัดความทนทานจะผิดไปจากชิ้นทดสอบมาตรฐาน (ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป) ในกรณีเช่นนี้ก็จะเรียกว่าความต้านแรงทนทานเช่นกัน เพราะฉะนั้นเมื่อกล่าวอย่างกว้าง ๆ แล้วความต้านแรงทนทานหมายถึงความต้านแรงทนทานของชิ้นทดสอบที่ไม่มีขีดจำกัดความทนทาน หรือความต้านแรงทนทานของชิ้นงานจริง

เนื่องจากข้อมูลเกี่ยวกับขีดจำกัดความทนทานมีน้อยมาก ดังนั้นจึงใช้วิธีการประมาณค่าขีดจำกัดความทนทาน(สำหรับการคงอยู่ 50%) ในกรณีของการคิด ดังนี้คือ

$\sigma'_n = 0.5\sigma_U$	สำหรับเหล็กกล้าเหนียว ซึ่ง $\sigma_U < 1380 \text{ N/mm}^2$ และ HB < 400
$\sigma'_n = 690 \text{ N/mm}^2$	สำหรับเหล็กกล้าเหนียว ซึ่ง $\sigma_U > 1380 \text{ N/mm}^2$
$\sigma'_n = 0.4\sigma_U$	สำหรับเหล็กกล้าหล่อ และเหล็กหล่อ
$\sigma'_n = 0.38\sigma_U$	สำหรับแมกนีเซียมผสมหล่อ และแมกนีเซียมผสม เหนียว (อายุ ใช้งาน 10^6 วัฏจักร)
$\sigma'_n = 0.45\sigma_U$	สำหรับนิกเกิลผสมและทองแดงผสม
$\sigma'_n = 0.38\sigma_U$	สำหรับอลูมิเนียมผสมเหนียว ที่มีความต้านแรงดึงสูงถึง 275 N/mm^2 (อายุการใช้งาน 5×10^8 วัฏจักร)
$\sigma'_n = 0.16\sigma_U$	สำหรับอลูมิเนียมผสมหล่อที่มีความต้านแรงดึงสูงถึง 345 N/mm^2 (อายุการใช้งาน 5×10^8 วัฏจักร)

ค่าดังกล่าวนี้เป็นเพียงค่าโดยประมาณเพื่อใช้ประกอบการคำนวณในที่นี้เท่านั้น ผู้ที่
ต้องการค่าที่แน่นอนยิ่งขึ้นควรจะสอบถามจากผู้ผลิตหรือทำการทดสอบ

การออกแบบสกรูส่งกำลัง

การคำนวณหาความเค้นในส่วนต่าง ๆ ของสกรูส่งกำลังโดยใช้สมการเบื้องต้นที่ได้
กล่าวมาแล้วในบทก่อนเป็นการประมาณค่าของค่าเค้นที่เกิดขึ้นเท่านั้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การขบกัน
ระหว่างเกลียวของสกรูและแป้นเกลียว ตลอดจนการกระจายของแรงบนเกลียวว่าจะเข้าใกล้สภาพที่
ได้สมมติเอาไว้เพียงใด เกลียวที่อยู่ใกล้หน้าหน้าอาจจะรับแรงมากกว่าเกลียวที่อยู่ห่างออกไป ความ
หลวมระหว่างสกรูและแป้นเกลียวอาจทำให้แรงกระจายไม่สม่ำเสมอ หรือการโก่งของเกลียวอาจทำ
ให้เกลียวบางเกลียวรับแรงมากเกินไป เป็นต้น แต่สิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งที่ไม้อาจจะทราบได้อย่างแน่นอน
ดังนั้นการคำนวณความเค้นในสกรูก็ยังถือหลักการเดิมที่ใช้มาแล้วในบทก่อน

ความเค้นวิกฤต (critical or bucking stress)

ใช้ในการคำนวณหาขนาดของสกรูที่รับแรงกดแต่เพียงอย่างเดียว ถ้าเป็นสกรูสั้นก็
สามารถใช้สมการของความเค้นกด

$$\sigma_c = \frac{W}{A} \quad (2.59)$$

เนื่องจากพื้นเกลียวก็จะช่วยรับแรงนี้ด้วย ดังนั้นพื้นที่รับแรง A_r ก็ควรจะ มีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่ซึ่งคิดที่เส้นผ่านศูนย์กลางน้อย ซึ่งอาจจะประมาณได้ว่าควรจะเป็นเส้นผ่าน ศูนย์กลางเฉลี่ยระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยและเส้นผ่านศูนย์กลางพิศซ์ เพื่อความสะดวกในการ คำนวณจึงขอแนะนำให้ใช้พื้นที่ของเส้นผ่านศูนย์กลางน้อย

คำว่าสกรูสั้นในที่นี้หมายถึง สกรูที่มีอัตราส่วนความเพริชว $L_e / k < 40$ ถ้าหาก สกรูมีอัตราส่วนความเพริชวมากกว่านี้ สกรูอาจจะเกิดการโก่งงอขึ้นได้ก่อนที่ความเค้นจะถึงค่าที่ กำหนดเอาไว้ก็ได้ ในกรณีเช่นนี้การออกแบบสกรูต้องใช้สูตรของเสาแทน

สำหรับสกรูที่มีความยาวปานกลางให้ใช้สูตรของจอห์นสัน

$$W = \frac{A_r Q_y \left[1 - \frac{\sigma_y \left(\frac{L_e}{k} \right)^2}{4\pi^2 E} \right]}{N} \quad 40 < L_e / k < 110 \quad (2.60)$$

สำหรับสกรูยาวให้ใช้สูตรของออยเลอร์

$$W = \frac{\pi^2 EI}{NL_e^2} \quad L_e / k > 110 \quad (2.61)$$

ถ้าวัสดุที่ใช้ทำตัวสกรูไม่ใช่เหล็กกล้า ค่าของความเพริชวที่แบ่งระหว่างการใช้สูตร ของออยเลอร์และจอห์นสันจะคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{L_e}{k} = \left[\frac{2\pi^2 E}{\sigma_y} \right]^{1/2} \quad (2.62)$$

ความกว้างและความยาวของสายพานแบน

เนื่องจากสายพานที่ใช้งานกันอยู่เดิมมีทั้งมาตรฐานที่เป็นระบบหน่วยอังกฤษ และระบบหน่วยเมตริก ซึ่งขนาดไม่สอดคล้องกัน ทำให้เกิดปัญหาค้นเมื่อต้องการเปลี่ยนสายพานใหม่ ดังนั้นองค์การมาตรฐานระหว่างประเทศ (ISO) จึงได้กำหนดมาตรฐานความกว้างของสายพานส่งกำลังและความกว้างของล้อสายพานที่สอดคล้องกัน ใน ISO 22 - 1975 (E) โดยไม่คำนึงถึงวัสดุของสายพาน เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้ขนาดสายพานให้เป็นมาตรฐาน ในการคำนวณต่อไปจะอ้างอิงขนาดสายพานมาตรฐานนี้โดยตลอด ซึ่งจะดูได้จากตาราง

ตารางที่ 2.4 ความกว้างของสายพานแบนส่งกำลังและความกว้างล้อสายพานที่สอดคล้องกันตามมาตรฐาน ISO 22 - 1975 (E)

สายพาน		ล้อสายพาน		สายพาน		ล้อสายพาน	
mm	In	mm	in	mm	in	mm	in
16	0.63	20	0.8	140	5.6	160	6.3
20	0.8	25	1	160	6.3	180	7.1
25	1	32	1.25	180	7.1	200	8
32	1.25	40	1.6	200	8	224	9
40	1.6	50	2	224	9	250	10
50	2	63	2.5	250	10	280	11.2
63	2.5	71	2.8	280	11.2	315	12.5
71	2.8	80	3.15	315	12.5	355	14
80	3.15	90	3.55	355	14	400	16
90	3.55	100	4	400	16	450	18
100	4	112	4.5	450	18	500	20
112	4.5	125	5	500	20	560	22.4
125	5	140	5.6			630	25.0

หมายเหตุ ในบางครั้งเพื่อผลด้านเทคนิค อาจเลือกใช้ล้อสายพานกว้างกว่าค่าที่กำหนดไว้ในตารางได้

บทที่ 3

การออกแบบและคำนวณ

การออกแบบและคำนวณ

การเลือกขนาดของพัดลมและมอเตอร์ ขนาดของพัดลม และมอเตอร์ขึ้นอยู่กับ การกำหนดค่าความเร็วลมสูงสุดที่ต้องการใช้งาน และขนาดของพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ลม และค่าอื่น ๆ ดังนี้

ความเร็วลมสูงสุด	V_{max}	=	8	m/s
พื้นที่หน้าตัด	A	=	0.25	m ²
จากสูตร	Q_{max}	=	AV_{max}	
จะได้อัตราการไหลสูงสุด	Q_{max}	=	2	m ³ /s
ความดันเมื่อหยุดนิ่ง		=	250	Pa
ความดันเมื่อมีความเร็ว		=	69	Pa
ความดันรวม		=	319	Pa
อุณหภูมิของอากาศ		=	25 ^o	C

ทำการเลือกขนาดของพัดลมในที่นี้เลือกแบบ SISW Backward Curved รุ่น BSA 800T ของบริษัท KRUGER VENTILATION INDUSTRY จำกัด

ทำการหาขนาดของมอเตอร์โดยอาศัยกราฟประสิทธิภาพของพัดลมทำให้ทราบค่าต่อไปนี้

ความเร็วรอบของพัดลม	=	575	rpm
กำลังที่พัดลมต้องการใช้งาน	=	0.58	kW
กำลังของมอเตอร์ที่ใช้งานจริง	=	5.50	kW
ความเร็วรอบของมอเตอร์	=	1450	rpm

การหาค่าเรโนลด์นัมเบอร์

$$Re = \frac{Dv}{\nu}$$

ที่ V ที่ $25^{\circ}C = 1.548 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ จากภาคผนวก 1.7

แทนค่า

$$= \frac{(0.05\text{m})(22\text{m/s})}{(1.548 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})}$$

$$Re = 25839.79$$

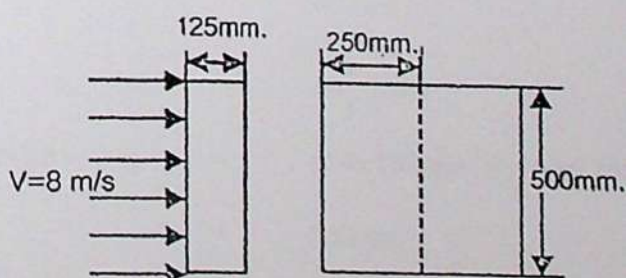
การหาค่าแรงปะทะใบพัดของกังหันมากที่สุด

จาก

$$F_{\max} = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 A$$

$Re > 1000$ สามารถใช้รูปที่ 2.12 เพื่อหาค่า $C_D = 2.3$

จากภาคผนวก 1.7 ที่ $25^{\circ}C$ $\rho = 1.18 \text{ kg/m}^3$



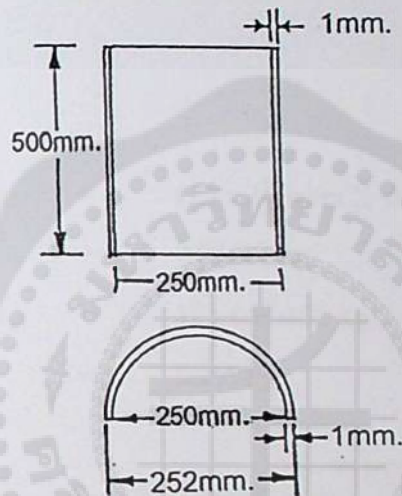
รูปที่ 3.1 แสดงพื้นที่รับลมของกังหัน

แทนค่า

$$\begin{aligned}
 F_{\max} &= \frac{1}{2} (2.3)(1.18 \text{ kg/m}^3)(8 \text{ m/s})^2(0.5 \times 0.5 \text{ m}^2) \\
 &= 21.71 \text{ N}
 \end{aligned}$$

การคำนวณมวลของใบพัด

มวลของใบพัด



รูปที่ 3.2 แสดงใบพัดของกังหัน

มีทั้งหมด 6 ใบ

จากภาคผนวก 1.1

ความหนาแน่นของสเตนเลส = 7.7 Mg/m^3

จาก

$$m = \rho \frac{1}{2} \pi d t h$$

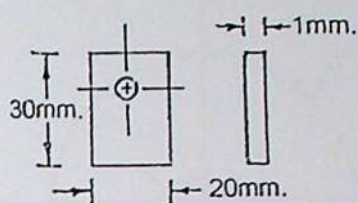
แทนค่า $m = (7.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3) \left[\frac{1}{2} \pi \times 0.2510^2 \times 0.0010 \times 0.5 \right] \text{ m}^3$

$$= 1.52 \text{ kg}$$

$$m_{1u} = 6 \times 1.52 \text{ kg}$$

$$= 9.12 \text{ kg}$$

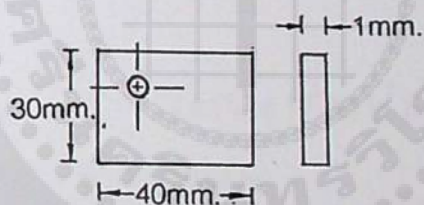
มวลของขาใบพัด



รูปที่ 3.3 แสดงขาใบพัดส่วนใน

มีทั้งหมด 12 ชิ้น

$$\begin{aligned}
 m &= (7.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3) (0.03 \times 0.02 \times 0.001 \text{ m}^3) \\
 &= 0.00462 \text{ kg} \\
 m_{\text{ขา}} &= 12 \times 0.00462 \text{ kg} \\
 &= 0.055 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

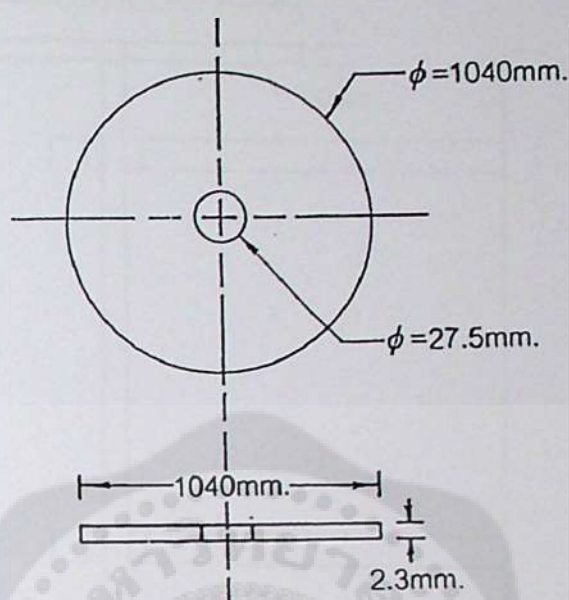


รูปที่ 3.4 แสดงขาใบพัดส่วนนอก

มีทั้งหมด 12 ชิ้น

$$\begin{aligned}
 m &= (7.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3) \times [0.03 \times 0.04 \times 0.001 \text{ m}^3] \\
 &= 0.00924 \text{ kg} \\
 m_{\text{ขา},2} &= 12 \times 0.00924 \text{ kg} \\
 &= 0.111 \text{ kg} \\
 m_{\text{ขา}} &= 0.055 + 0.111 \text{ kg} \\
 &= 0.166 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

มวลของแผ่นเหล็ก



รูปที่ 3.5 แสดงรูปเหล็ก

มีทั้งหมด 2 ชิ้น

$$\begin{aligned}
 m_{\text{เหล็ก}} &= 2 \times (7.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3) \left[\frac{\pi}{4} (1.04^2 - 0.0275^2) \times 0.0023 \right] \text{ m}^3 \\
 &= 30.07 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

มวลของไดนาโมมิเตอร์

จากตารางภาคผนวกที่ 1.1 ความหนาแน่นของเหล็ก = 7.7 kg/m^3

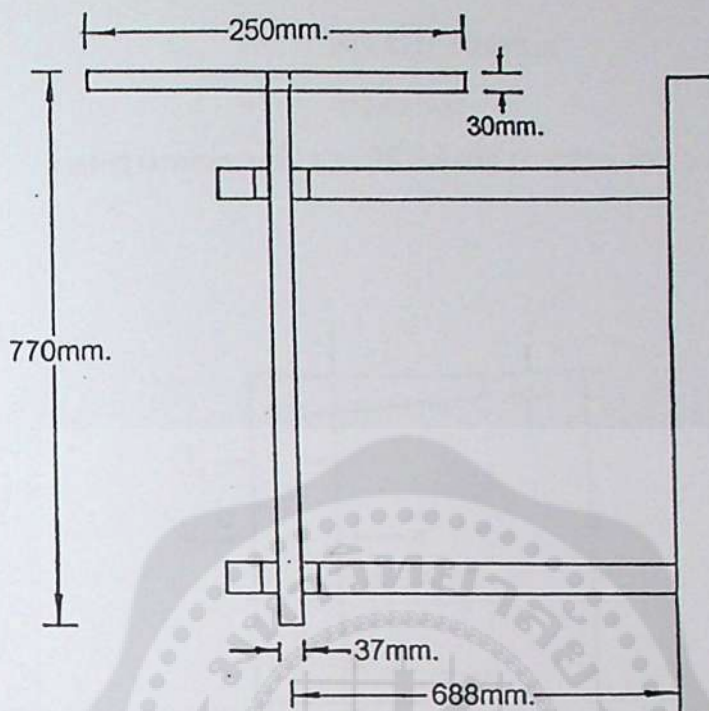
$$\begin{aligned}
 m_{\text{ไดนาโมมิเตอร์}} &= (7.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3) \left(\frac{\pi}{4} \right) (0.25 \text{ m})^2 (0.03 \text{ m}) \\
 &= 11.34 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

มวลของเพลลา

$$\begin{aligned}
 m_{\text{เพลลา}} &= (7.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3) \left(\frac{\pi}{4} \right) (0.037 \text{ m})^2 (0.77 \text{ m}) \\
 &= 6.37 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

มวลลูกปืนซึ่งได้จากการชั่ง อันละ 0.65 kg

$$m_{\text{ลูกปืน}} = 2 \times 0.65 = 1.3 \text{ kg}$$



รูปที่ 3.6 แสดงขนาดของแท่นติดตั้งกังหัน

ดังนั้นแรงที่เกิดจากน้ำหนัก จะได้

$$\begin{aligned}
 m_1 &= m_{\text{ท}} + m_{\text{ใบ}} + m_{\text{เพลา}} + m_{\text{ไดนาโมมอเตอร์}} + m_{\text{เพลา}} + m_{\text{ลูกบิน}} \\
 &= 0.166 + 9.12 + 30.07 + 11.34 + 6.37 + 1.3 \\
 &= 58.36 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

และจะให้ $m_1 = 60 \text{ kg}$ ในการออกแบบและมวลของอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ไม่ได้พิจารณาให้ถือเป็น 10 % ของมวลทั้งหมด

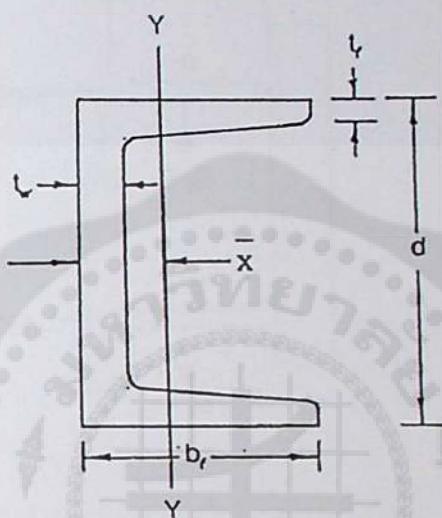
$$\begin{aligned}
 \text{จะได้ } m'_1 &= 0.1 \times 60 \text{ kg} \\
 &= 6 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m_{\text{รวม}} &= 60 + 6 \\
 &= 66 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W &= m_{\text{รวม}} g \\
 &= 66 \times 9.81 \\
 &= 647.46 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_1 &= W \ell \\
 &= 647.46 \text{ N} \times 0.688 \text{ m} \\
 &= 445.45 \text{ N.m}
 \end{aligned}$$

จากตารางภาคผนวกที่ 1.2 ใช้เหล็กตัว U C75 x 40 x 5 x 7

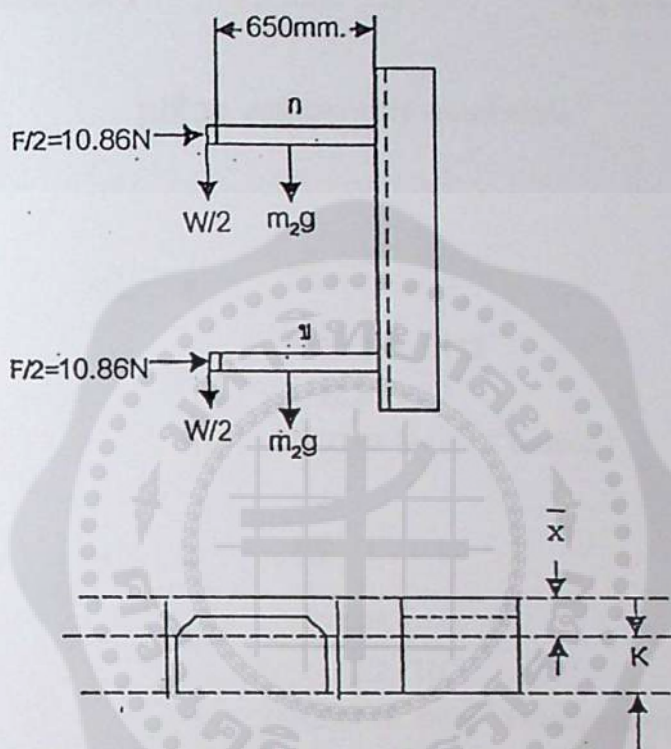


รูปที่ 3.7 แสดงหน้าตัดของเหล็กตัว U

$A = 8.818 \text{ cm}^2$, $d = 75 \text{ mm}$, $b_f = 40 \text{ mm}$, $t_f = 7 \text{ mm}$, $t_w = 5 \text{ mm}$, $W = 6.92 \text{ kg/m}$
ที่แกน Y-Y

$$\begin{aligned}
 I_y &= 12.2 \text{ cm}^4 \\
 \bar{X} &= 1.28 \text{ cm} \\
 K &= b_f - \bar{X} \\
 &= 0.04 - 0.0128 \\
 &= 0.0272 \text{ m} \\
 m_2 &= (6.92 \text{ kg/m})(0.65 \text{ m}) \\
 &= 4.5 \text{ kg} \\
 M_2 &= m_2 g \ell / 2 \\
 &= (4.5 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2)(0.65 \text{ m}) \\
 &= 14.35 \text{ N.m}
 \end{aligned}$$

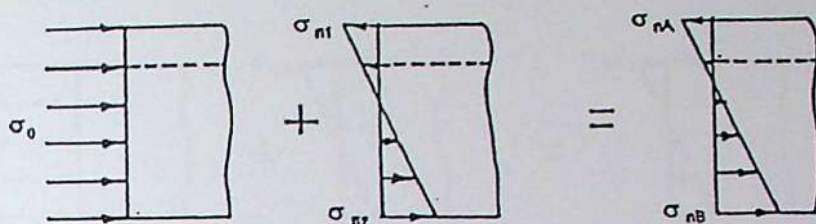
$$\begin{aligned}
 M_{\max} &= \frac{M_1}{2} + M_2 \\
 &= 222.73 + 14.35 \\
 &= 237.08 \text{ N.m}
 \end{aligned}$$



รูปที่ 3.8 แสดงแรงกระทำและระยะ $\bar{X}$ บนแกนของแท่งทดสอบ

ที่ชั้น ก

$$\begin{aligned}
 \sigma_0 &= -\frac{F}{2A} \\
 &= -\frac{10.86}{8.818 \times 10^{-4}} \\
 &= -12.32 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{Compression})
 \end{aligned}$$



รูปที่ 3.9 แสดงแรงกระทำแนวนอน

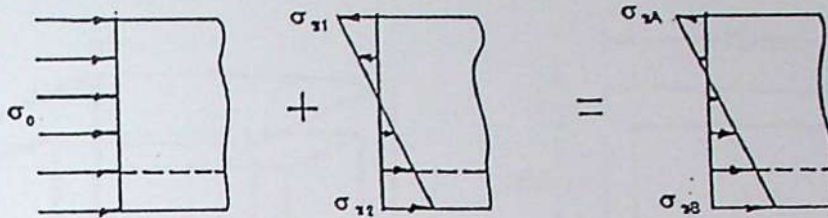
$$\begin{aligned}
 \sigma_{n1} &= \frac{MX}{I} \\
 &= \frac{237.08 \times 0.0128}{12.2 \times 10^{-8}} \\
 &= 24873.97 \text{ kN.m}^{-2} \text{ (Tension)} \\
 \sigma_{n2} &= -\frac{MK}{I} \\
 &= -\frac{237.08 \times 0.0272}{12.2 \times 10^{-8}} \\
 &= -52857.18 \text{ kN.m}^{-2} \text{ (Compression)}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 \sigma_{nA} &= \sigma_0 + \sigma_{n1} \\
 &= -12.32 + 24873.97 \\
 &= 24861.18 \text{ kN.m}^{-2} \text{ (Tension)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{nB} &= \sigma_0 + \sigma_{n2} \\
 &= -12.32 - 52857.18 \\
 &= -52869.50 \text{ kN.m}^{-2} \text{ (Compression)}
 \end{aligned}$$

ที่ชั้น ข



รูปที่ 3.10 แสดงแรงกระทำแนวนด้านล่าง

$$\sigma_0 = -12.32 \text{ kN.m}^{-2} \text{ (Compression)}$$

$$\sigma_{n1} = 52857.18 \text{ kN.m}^{-2} \text{ (Tension)}$$

$$\sigma_{n2} = -24873.97 \text{ kN.m}^{-2} \text{ (Compression)}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{nA} &= \sigma_0 + \sigma_{n1} \\ &= -12.32 + 52857.18 \end{aligned}$$

$$= 52844.86 \text{ kN.m}^{-2} \text{ (Tension)}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{nB} &= \sigma_0 + \sigma_{n2} \\ &= -12.32 - 24873.97 \end{aligned}$$

$$= -24866.29 \text{ kN.m}^{-2} \text{ (Compression)}$$

จะได้

$$\sigma_{\max} = 52869.50 \text{ kN.m}^{-2}$$

แต่ค่า yield stress ของเหล็ก มีค่าเท่ากับ $\sigma_y = 23 \text{ kN.mm}^{-2}$

ซึ่งจะได้

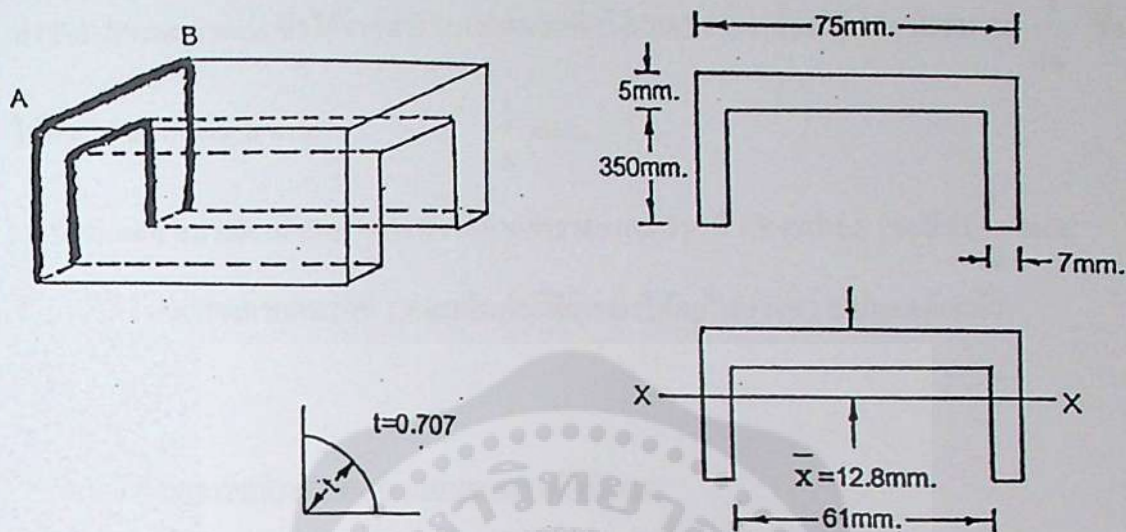
$$\sigma_y = 225630 \text{ kN.m}^{-2}$$

$$\text{F.S.} = \frac{\sigma_y}{\sigma_{\max}}$$

$$= \frac{225\,630.00 \text{ kN.m}^{-2}}{52869.50 \text{ kN.m}^{-2}}$$

$$= 4.27$$

การคำนวณหาขนาดรอยเชื่อม



รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะรอยเชื่อม

จาก 2.54 cm. = 1 inch.

ดังนั้น 25.4 mm. = 1 inch.

พิจารณาความหนาของเหล็กด้านบน 5 mm.

$$\begin{aligned} \text{จะมีค่า } t &= \frac{5}{25.4} \\ &= \frac{1}{5.08} \text{ inch.} \end{aligned}$$

หา Full Strength weld ได้จาก $\omega = \frac{3}{4}t$

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{3}{4} \times \frac{1}{5.08} \\ &= \frac{1}{6.77} \text{ inch.} \end{aligned}$$

หา Minimum leg side of fillet weld ซึ่งได้จากตารางภาคผนวก 1.8 TABLE 2 จะมีค่า $\frac{3}{16}$ inch

พิจารณาความหนาแน่นของเหล็กด้านข้าง 7 mm.

$$\text{จะมีค่า } t = \frac{7}{25.4}$$

$$= \frac{1}{3.62} \text{ inch.}$$

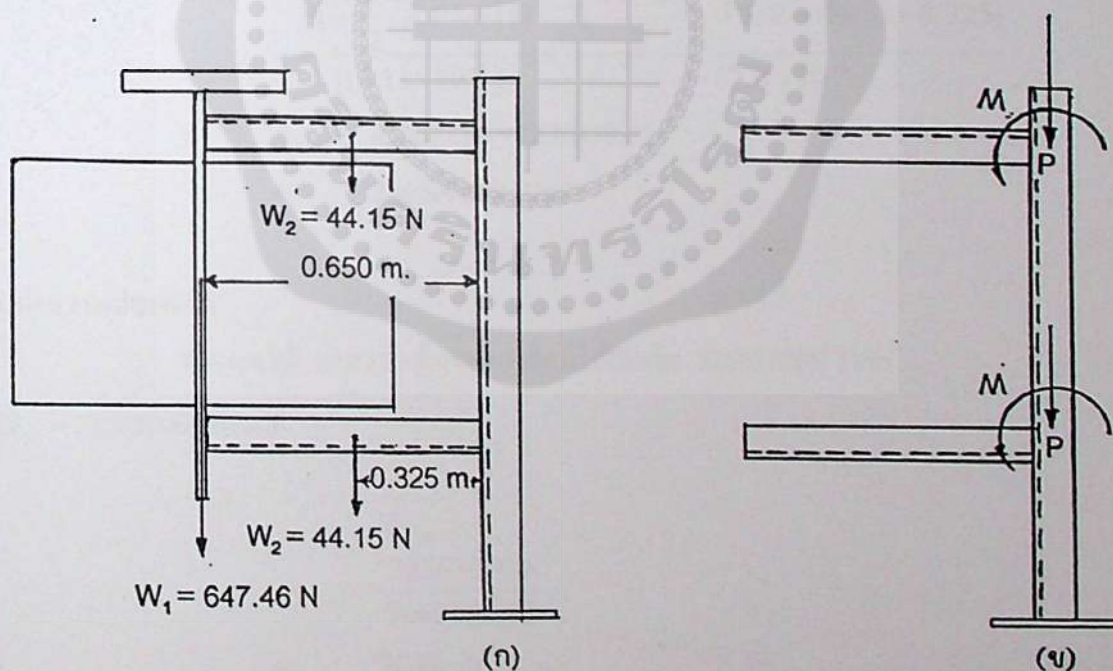
หา Full Strength weld ซึ่งได้จากตารางภาคผนวกที่ 1.8 TABLE 1 ซึ่งจะมีค่า e ประมาณ $\frac{5}{16}$ ซึ่ง

ให้ค่า Full Strength weld $= \frac{1}{4} \text{ inch.}$

หา Minimum leg side of fillet weld ซึ่งได้จากตารางภาคผนวกที่ 1.8 TABLE 2 จะมีค่า $\frac{3}{16}$ inch.

ซึ่งค่าที่ได้จากตารางภาคผนวกที่ 1.8 จะเป็นค่าที่พิจารณาให้อยู่ในช่วงความปลอดภัยแล้ว

การคำนวณหาความแข็งแรงของตัวแท่นทดสอบกึ่งหันลม



รูปที่ 3.12 (ก) แสดงน้ำหนักของชิ้นส่วนต่างๆ (ข) แสดงการย้ายแรงมากระทำตามแนวแกน

เราไม่นำแรงลมที่กระทำกับกังหันมาคิดเพราะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักของชิ้นส่วนต่างๆ
น้ำหนักของกังหันลม, เพลา, ไดนาโมมิเตอร์ และชิ้นส่วนอื่นๆ

$$W_1 = 647.46 \text{ N}$$

น้ำหนักแกนแต่ละอัน

$$W_2 = 44.15 \text{ N}$$

จากตารางภาคผนวกที่ 1.2 ใช้เหล็ก คิว C125x65x6x8 ได้ค่า $A = 17.11 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ และ $Z_x = 67.8 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ นำมาคำนวณความเค้นสูงสุดในการใช้งาน ($\sigma_{\max}$)

$$\begin{aligned} \therefore \sigma_{\max} &= \frac{P}{A} + \frac{M}{Z_x} \\ &= \frac{2\left(\frac{647.46}{2} + 44.15\right)}{(17.11 \times 10^{-4})} + \frac{2\left[\frac{647.46}{2} \times 0.650 + 44.15 \times 0.325\right]}{67.8 \times 10^{-6}} \\ &= 430017.53 + 6630479.35 \\ &= 7060496.88 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

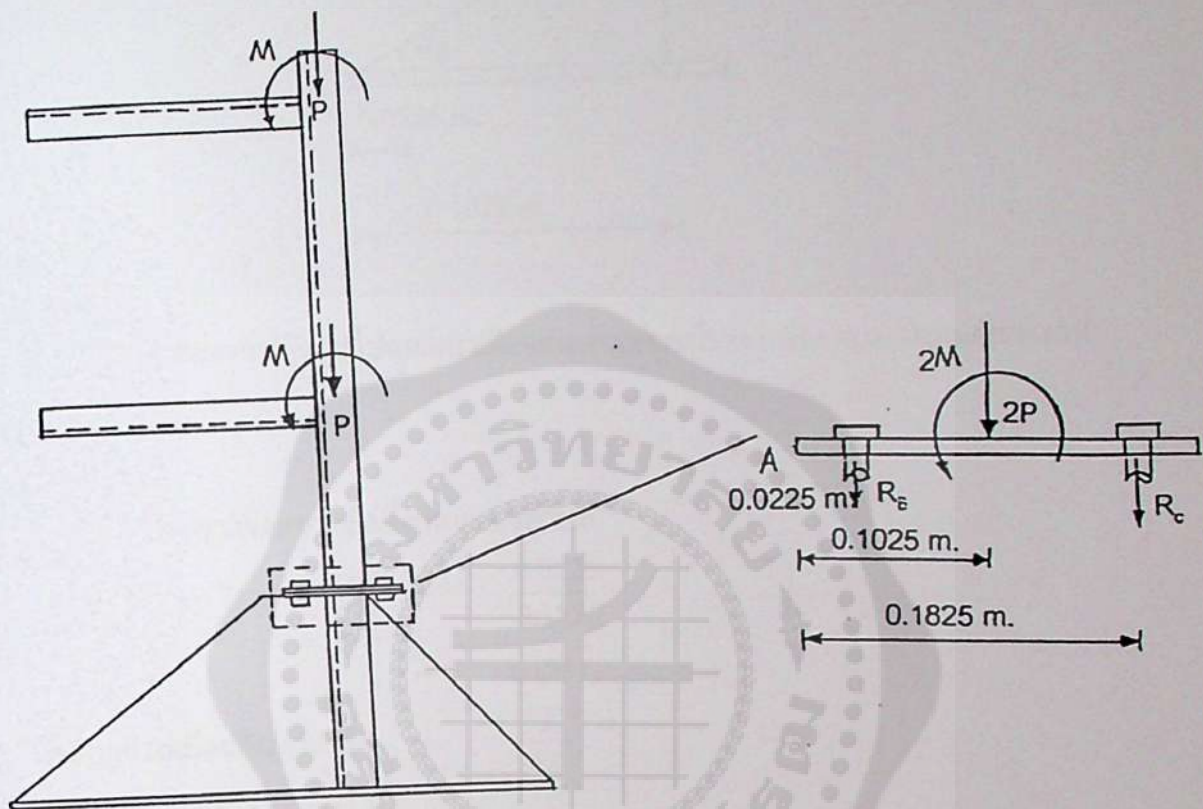
หาค่าความปลอดภัย

กำหนดให้ ค่าความเค้นของเหล็กที่ใช้เท่ากับ 225630000 N/m^2

($\sigma_y = 225630000 \text{ N/m}^2$)

$$\begin{aligned} \therefore \text{F.S.} &= \frac{\sigma_y}{\sigma_{\max}} \\ &= \frac{225630000}{7060496.88} \\ &= 31.91 \end{aligned}$$

การคำนวณความแข็งแรงของน็อตและแผ่นเพลต



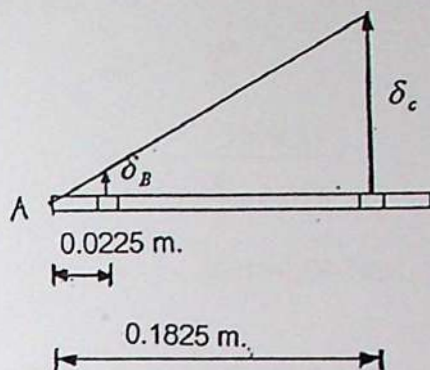
รูปที่ 3.13 แสดงแรงและโมเมนต์ที่กระทำกับน็อตและเพลต

$$\sum M_A = 0$$

$$2M - 2P(0.1025) - 0.0225R_B - 0.1825R_C = 0$$

$$0.0225 R_B + 0.1825 R_C = 449.55 - 735.76(0.1025)$$

$$0.225 R_B + 1.825 R_C = 374.1346 \quad (1)$$



รูปที่ 3.14 แสดงการผิดรูปไปจากแนวเดิมของแผ่นเพลตเนื่องจากมีแรงและโมเมนต์มากระทำ

พิจารณาการผิดรูปเชิงเรขาคณิตซึ่งปลาย A อยู่กับที่

$$\frac{\delta_B}{\delta_c} = \frac{0.0225}{0.1825}$$

$$= 0.1233$$

น๊อตทุกตัวเหมือนกัน จาก δ

$$= \frac{FE}{AE}$$

$$\left(\frac{R_B L}{AE} \right) \left(\frac{AE}{R_C L} \right) = 0.1233$$

$$R_B = 0.1233$$

(2)

นำ (2) แทนใน (1)

$$(0.225 \times 0.1233) R_C + 0.1825 R_C = 374.1346$$

$$0.1853 R_C = 374.1346$$

$$R_C = 2019.08 \text{ N}$$

เลือกคติน๊อตด้านที่รับแรงดึงมากที่สุด ซึ่งมีอยู่ 2 ตัว ช่วยกันรับแรง (ใช้น๊อต M 16)

แรงดึงที่กระทำกับน๊อต 1 ตัว

$$P = \frac{2019.08}{2}$$

$$= 1009.54 \text{ N}$$

ความเค้นดึงสูงสุดในน็อต 1 ตัว

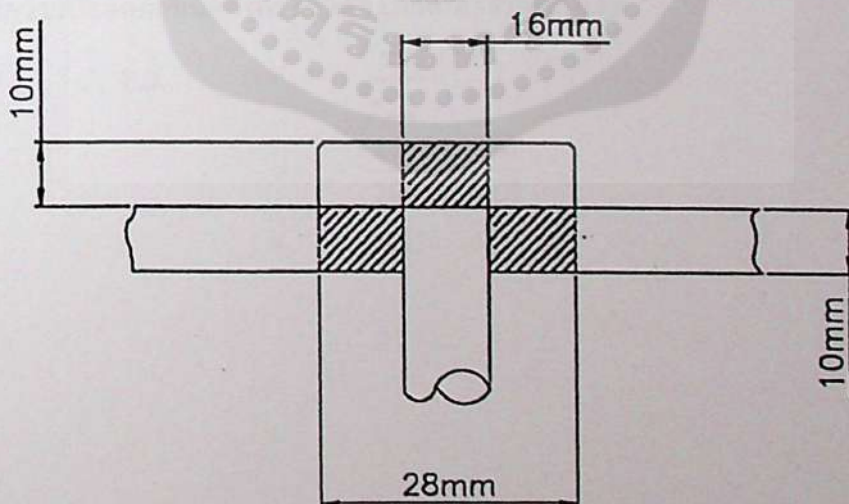
$$\begin{aligned}
 \sigma_{\max} &= \frac{P}{A} \\
 &= \frac{1009.54}{\frac{\pi}{4} \times 0.016^2} \\
 &= 5021040.04 \text{ N/m}^2
 \end{aligned}$$

หาค่าความปลอดภัย

กำหนดให้ค่าความเค้นของน็อตที่ใช้เท่ากับ 225630000 N/m^2

$$\begin{aligned}
 \therefore \text{F.S.} &= \frac{225630000}{5021040.04} \\
 &= 44.93
 \end{aligned}$$

ความเค้นเฉือนบนแผ่นเพลตและหัวน็อต



รูปที่ 3.15 แสดงความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นกับหัวน็อตและแผ่นเพลต

คัตที่แผ่นเพลต ($d = 22 \text{ mm}$, $t = 10 \text{ mm}$)

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{P}{A} \\ &= \frac{P}{\pi dt} \\ &= \frac{1009.54}{\pi \times 0.028 \times 0.01} \\ &= 1147666.29 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

คัตที่หัวน็อต ($d = 16 \text{ mm}$, $t = 10 \text{ mm}$)

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{P}{A} \\ &= \frac{P}{\pi dt} \\ &= \frac{1009.54}{\pi \times 0.016 \times 0.01} \\ &= 2008416.02 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

หาค่าความปลอดภัย

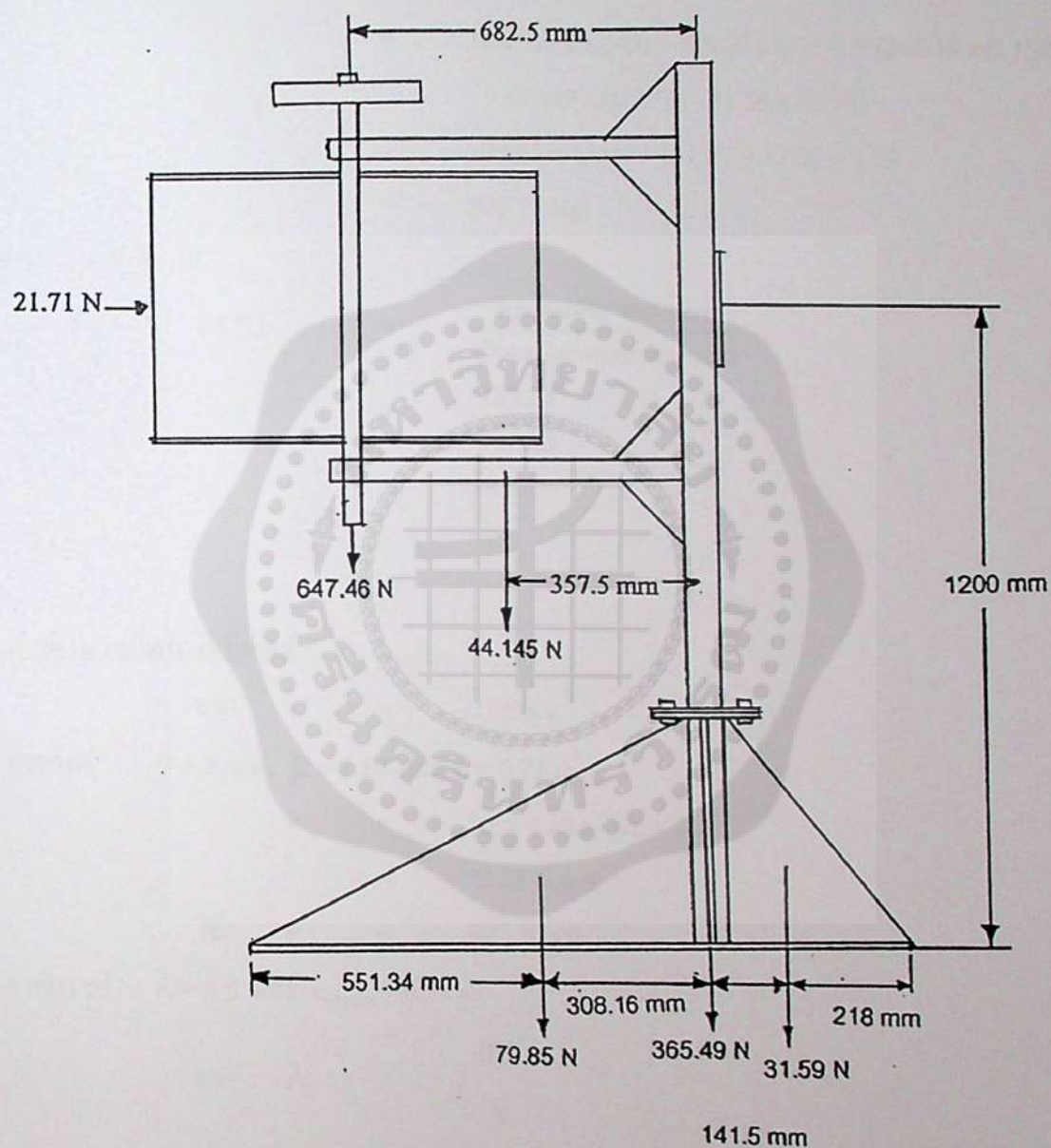
โดยที่ $\tau = 0.5\sigma_y$ และกำหนดให้ $\sigma_y = 225630000 \text{ N/m}^2$

$$\begin{aligned}\tau_y &= 0.5 \times 225630000 \\ &= 112815000 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

เลือกคัตค่าความปลอดภัยที่น้อย เพราะเกิดความเค้นเฉือนมากที่สุด

$$\begin{aligned}\therefore \text{F.S.} &= \frac{\tau_y}{\tau_{\max}} \\ &= \frac{112815000}{2008416.02} \\ &= 56.17\end{aligned}$$

คำนวณการล้มของแท่นทดสอบ



รูปที่ 3.16 แสดงจุดศูนย์ถ่วงของชิ้นส่วนต่างๆ ของแท่นทดสอบ

$$\begin{aligned}
 \text{Over turning moment} &= F \times S \\
 &= 59.71 \times 1.2 \\
 &= 71.652 \text{ Nm} \\
 \text{Resisting moment} &= W \times L \\
 &= (647.46 \times 1.042) + (88.29 \times 0.717) + (365.49 \times 0.3595) \\
 &\quad + (79.85 \times 0.667) + (31.59 \times 0.218) \\
 &= 674.65 + 63.04 + 131.40 + 53.26 + 6.89 \\
 &= 929.24 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

ค่าความปลอดภัย

$$\begin{aligned}
 (\text{F.S.}) &= \frac{\text{Resisting moment}}{\text{Over turning moment}} \\
 &= \frac{929.24}{26.052} \\
 &= 35.67
 \end{aligned}$$

การคำนวณไดนาโมมิเตอร์

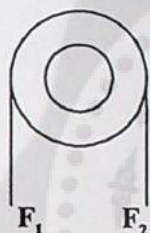
$$\begin{aligned}
 \text{จาก } P &= 0.5 \rho A V^3 \\
 \text{กำหนด } V &= 8 \text{ m/s}, \rho = 1.18 \text{ และ } A = 0.25 \text{ m}^2 \\
 P &= 0.5 \times 1.18 \times 0.25 \times 8 \\
 &= 75.25 \text{ N.m/s} \\
 \text{ใช้ } P &= 80 \text{ N.m/s}
 \end{aligned}$$

จากกราฟ $\lambda = 1.5$ และ $r_{\text{ปลายใบ}} = 0.25 \text{ m}$

$$\begin{aligned}
 \text{จาก } \lambda &= \frac{\omega r}{V} \\
 \omega &= \frac{1.5 \times 8}{0.25} \\
 &= 48 \text{ rad/s} = 458 \text{ rpm} \\
 \text{จาก } P &= T \omega \\
 T &= \frac{P}{\omega}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{80}{48} = 1.67 \text{ N m} \\
 \text{จาก } T &= \Delta F r \\
 \text{โดย } r \text{ คือ รัศมีของ drum} &= 0.125 \text{ m} \\
 \Delta F &= \frac{1.67}{0.125} = 13.36 \text{ N}
 \end{aligned}$$

การคำนวณเพื่อหาขนาดสปริงที่ใช้



รูปที่ 3.17 แสดงแรงที่กระทำสปริง

$$\begin{aligned}
 \text{จาก } F_1 - F_2 &= \Delta F \\
 &= 13.36 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\frac{F_1}{F_2} = e^{f\Phi}$$

โดย $f = 0.3$, $\Phi = \pi$

$$\begin{aligned}
 F_1 &= F_2 e^{0.3 \cdot \pi} \\
 &= 2.566 F_2
 \end{aligned}$$

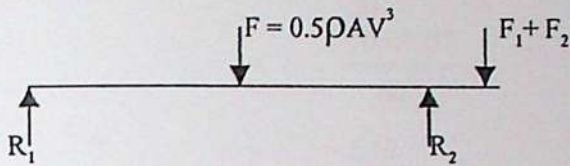
$$\text{จาก } 2.566 F_2 - F_2 = 13.36 \text{ N}$$

$$F_2 = 8.53 \text{ N}$$

$$F_1 = 21.89 \text{ N}$$

ใช้สเกลที่ 0 – 30 N (เลือกใช้ตาชั่งสปริงขนาด 5 kg)

การคำนวณเพลา

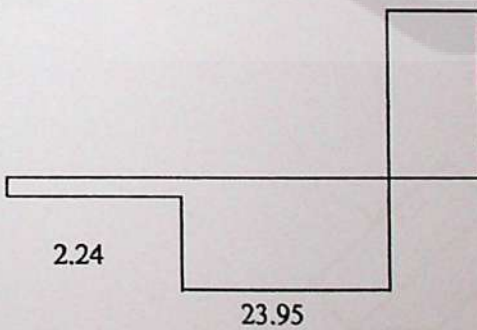


รูปที่ 3.18 แสดงแรงที่กระทำที่ตำแหน่งต่างๆ ของเพลา

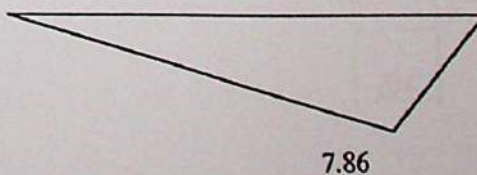
$$\begin{aligned}
 F &= 21.71 \text{ N} \\
 R_2 &= \frac{(21.71 \times 0.3) + (30.42 \times 0.77)}{60} \\
 &= 49.89 \text{ N} \\
 R_1 &= 21.71 + 30.42 - 49.89 \\
 &= 2.24 \text{ N}
 \end{aligned}$$

30.42

FBD



BMD



รูปที่ 3.19 แสดง FBD และ BMD

ใช้ทฤษฎีการออกแบบเพื่อความล้า

ใช้เหล็ก SS 400 , $\sigma_y = 24 \text{ kg/mm}^2$ จะได้ $S_u = 422 \text{ MN/m}^2$,
 $S_y = 236 \text{ MN/m}^2$

$$\begin{aligned}\sigma_{em}(\tau) &= \frac{16T}{\pi d^3} \\ &= \frac{16 \times 1.67}{\pi d^3}\end{aligned}$$

$$\frac{\sigma_{ea}}{\sigma_{em}} = 5.12$$

เขียน กราฟ S-N $S_n = 0.5 S_u C_L C_G C_S$

$C_L = 0.58$, $C_G = 0.9$, $C_S = 0.78$ (จากตารางภาคผนวกที่ 5)

$$S_n = 0.5 \times 422 \times 0.58 \times 0.9 \times 0.78$$

$$S_n = 86 \text{ MN/m}^2$$

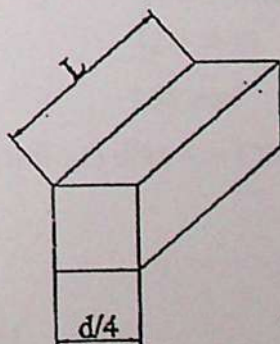
จากกราฟ S-N ได้ σ_u ที่ใช้ออกแบบได้ $\sigma_u = 84 \text{ MN/m}^2$ ใช้ SF = 3

$$84 \times 10^6 = \frac{(32 \times 7.86 \times 30)}{\pi d^3}$$

$$d = 0.0197 \text{ m} = 20 \text{ mm}$$

การคำนวณหาส่วนประกอบไดนามิเตอร์

การหาสลัก



รูปที่ 3.20 แสดงลักษณะของสลัก

ใช้สูตร เมื่อลึมหาดจากแรงเฉือน

$$\begin{aligned} T &= 0.5Fd \\ &= 0.5bLTd \\ b &= 0.25d \\ T &= \frac{\tau L d^2}{8} \end{aligned}$$

ให้ลึมหาดและเพลเป็นวัสดุเดียวกัน

$$\begin{aligned} T &= \frac{\tau L d^2}{8} \\ &= \frac{\pi d^3 \tau}{16} \\ L &= 0.5\pi d \\ &= 1.57d \\ &= 1.57 \times 20 \\ &= 23.55 \text{ ประมาณ } 24 \text{ mm} \end{aligned}$$

จากภาคผนวก เนื่องจากค่า L ที่คำนวณได้ยาวเกินไปจากตารางเลือกที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm จะได้นขนาด 6 x 6

การหาขนาดของ rod และ น็อตที่ใช้ยึดสปริงกับฐาน

จากตารางภาคผนวกที่ 1.12 เลือกเหล็ก Class 4.6 ได้ $S_p = 225 \text{ MN/m}^2$ ใช้ SF = 10 เพื่อให้มีความแข็งแรงและมีขนาดใหญ่

$$\begin{aligned} A_t &= \frac{(165.5 \times 10)}{(225 \times 10^6)} \\ &= 7.36 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

จากตารางภาคผนวกที่ 1.13 เลือก $A_t = 8.78$ ได้นขนาดคือ M4 x 7

คำนวณอายุการใช้งานของ แบร้ง

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^k \quad (\text{เป็นรอบ})$$

$$= \frac{\left[\left(\frac{C}{P} \right)^k \times 10^6 \right]}{(N \times 10)} \quad (\text{เป็นชั่วโมง})$$

ใช้ $k = 3$ สำหรับ ball bearing

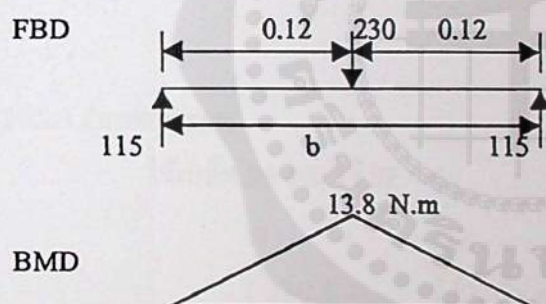
$$\begin{aligned} P &= R_2 \\ &= 49.89 \text{ N} \end{aligned}$$

$C = 10.77 \text{ kN}$ (อนุกรมมิติ 2) เปิดตารางภาคผนวกที่ 1.11

$$\begin{aligned} L_{10} &= \left[\frac{(10.77 \times 10^3)}{49.89} \right]^3 \times \left(\frac{10^6}{1260 \times 10} \right) \\ &= 798\,428\,541 \text{ hr} \end{aligned}$$

ประมาณ 798 000 000 hr

คำนวณฐาน



รูปที่ 3.21 แสดงค่า FBD และค่า MBD ของฐานไคนาโมมิเตอร์

จาก $\sigma = \frac{Mc}{I}$ เลือกเหล็ก SS 400 $\sigma_y = 24 \text{ kN/mm}^2$

$$c = 0.5h$$

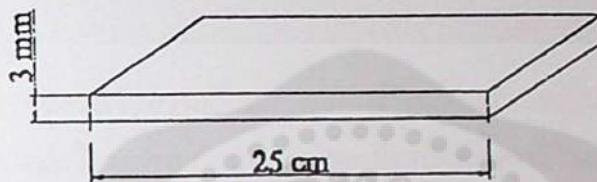
$$I = \frac{bh^3}{12}$$

$b = 0.25 \text{ m}$ ใช้ SF = 5

$$\left[\frac{(236 \times 10^6)}{5} \right] = \left[\frac{(13.8b \times 12bh^3)}{2bh^3} \right]$$

$$\begin{aligned}
 h^2 &= \frac{(13.8 \times 12.5)}{(2 \times 0.25 \times 236 \times 10^6)} \\
 &= 7.017 \times 10^{-6} \\
 h &= 2.649 \times 10^{-3} \text{ m}
 \end{aligned}$$

ใช้ความหนาประมาณ 3 mm



รูปที่ 3.22 แสดงขนาดของสายพาน

คำนวณหา Power screw

ใช้เหล็ก SS 400 ใช้ SF = 5

จาก

$$\begin{aligned}
 W &= \sigma A \\
 \left(\frac{230}{5} \right) &= \left[\frac{(236 \times \pi \times d_r^2)}{(5 \times 4)} \right] \\
 d_r &= 2.49 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

จะเลือกขนาดได้ 8 mm

การเลือกขนาดสายพาน

เราออกแบบขนาดของ drum มีความหนา 30 mm สามารถเลือกขนาดของสายพาน
จากตารางภาคผนวกที่ 24 เลือกความหนา drum ขนาด 32 mm จะได้ขนาดสายพาน กว้าง 25 mm

บทที่ 4

อุปกรณ์การทดสอบและผลการทดลอง

อุปกรณ์การทดสอบ

1. อุปกรณ์วัดความเร็วลม อุปกรณ์วัดความเร็วลมเป็นระบบดิจิทัล ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรฯ
2. อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ ในการวัดความเร็วรอบของกังหันใช้เครื่องวัดรอบอิเล็กทรอนิกส์ ชี้อลูตรอนดิจิทัล (Lutron Digital) แสดงผลเป็นตัวเลข โดยรับสัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณติดตั้งกับเพลากังหัน สามารถวัดความเร็วรอบได้ตั้งแต่ 0 ถึง 9999 รอบต่อวินาที โดยที่มีความละเอียด ± 1 รอบต่อวินาที
3. อุปกรณ์วัดแรงบิดกังหันลม อุปกรณ์วัดแรงบิดกังหันลมที่ใช้ในการวิจัยนี้สร้างขึ้นเอง คือ ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) ซึ่งเป็นเป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดแรงบิดกังหันลมประกอบด้วยขดลวดซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ชีตติดกับเพลากังหัน ดาซังสปริง
4. อุโมงค์ลม อุโมงค์ลมที่ใช้ในการวิจัยนี้สร้างขึ้นเอง มีขนาด 0.5×0.5 เมตร สามารถให้ความเร็วลมสูงสุด 8 เมตรต่อวินาที
5. แท่นทดสอบ อุปกรณ์แท่นทดสอบสร้างขึ้นเองมีขนาดความสูงประมาณ 1.5 เมตร กว้าง 0.8 เมตร สามารถปรับให้กังหันหมุนได้ในแนวตั้งและแนวนอน นอกจากนั้นยังสามารถถอดเปลี่ยนกังหันลมเป็นแบบอื่นได้
6. อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ (Inverter) ชี้อลู ฟรีคอน ขนาด 5 kw
7. กังหันลม กังหันลมที่ใช้ทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางความโค้งของใบ 0.5 เมตร สูง 0.5 เมตร แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะดังนี้
 1. ลักษณะ 2 ใบพัด
 2. ลักษณะ 3 ใบพัด

วิธีการทดสอบ

1. ติดตั้งกังหันลมใบแกว่งได้จำนวน 2 ใบ ที่จะทำการทดสอบเข้ากับแท่น

ทดสอบ

2. ติดตั้งกังหันลมและแท่นทดสอบห่างจากปากอุโมงค์ลม 1 เมตร
3. เดินเครื่องอุโมงค์ลมแล้วปรับความเร็วลมให้อ่านค่าความเร็วลมตามที่ต้องการ โดยการใช้อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบ (Inverter) โดยใช้วิธีปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ได้ความเร็วลมตามที่ต้องการที่จะทดสอบ
4. เมื่อกังหันลมหมุนจนได้ความเร็วรอบคงที่แล้วทำการอ่านค่าความเร็วรอบซึ่งเป็นค่าความเร็วรอบสูงสุด
5. เพิ่มภาระให้กับกังหันลมโดยปรับแรงหน่วงของดาชชิ่งสปริงแล้วอ่านค่าที่ดาชชิ่งสปริง
6. เพิ่มภาระให้กับกังหันลมโดยการกำหนดค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่ทำการทดสอบเพื่อให้ได้ความเร็วรอบกังหันตามต้องการ
7. ทำการอ่านค่าแรงที่กระทำให้กังหันหยุดหมุน
8. เปลี่ยนมุมของกังหันใบแกว่งได้ 2 ใบ จาก 15 – 60 องศาโดยเพิ่มองศาครั้งละ 15 องศา แล้วเริ่มทำการทดสอบตั้งแต่ข้อ 1 ถึง ข้อที่ 7
9. เปลี่ยนจากกังหันใบแกว่งได้ 2 ใบ เป็นกังหันแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ แล้วทำการทดสอบตั้งแต่ข้อ 1 ถึงข้อที่ 8

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบกังหันลม

ประเภท กังหันลมใบแกว่งได้ 2 ใบ

รายละเอียด

รัศมีของกังหัน (m) / มุมใบ(องศา) 0.25/0

พื้นที่ปะทะลม 0.25 m^2

รัศมีของ Dynamometer (r) 0.12 m

อุณหภูมิ/ความดัน/ความหนาแน่น ของอากาศ : $25^\circ\text{C}/1 \text{ atm}/1.185 \text{ kg/m}^3$

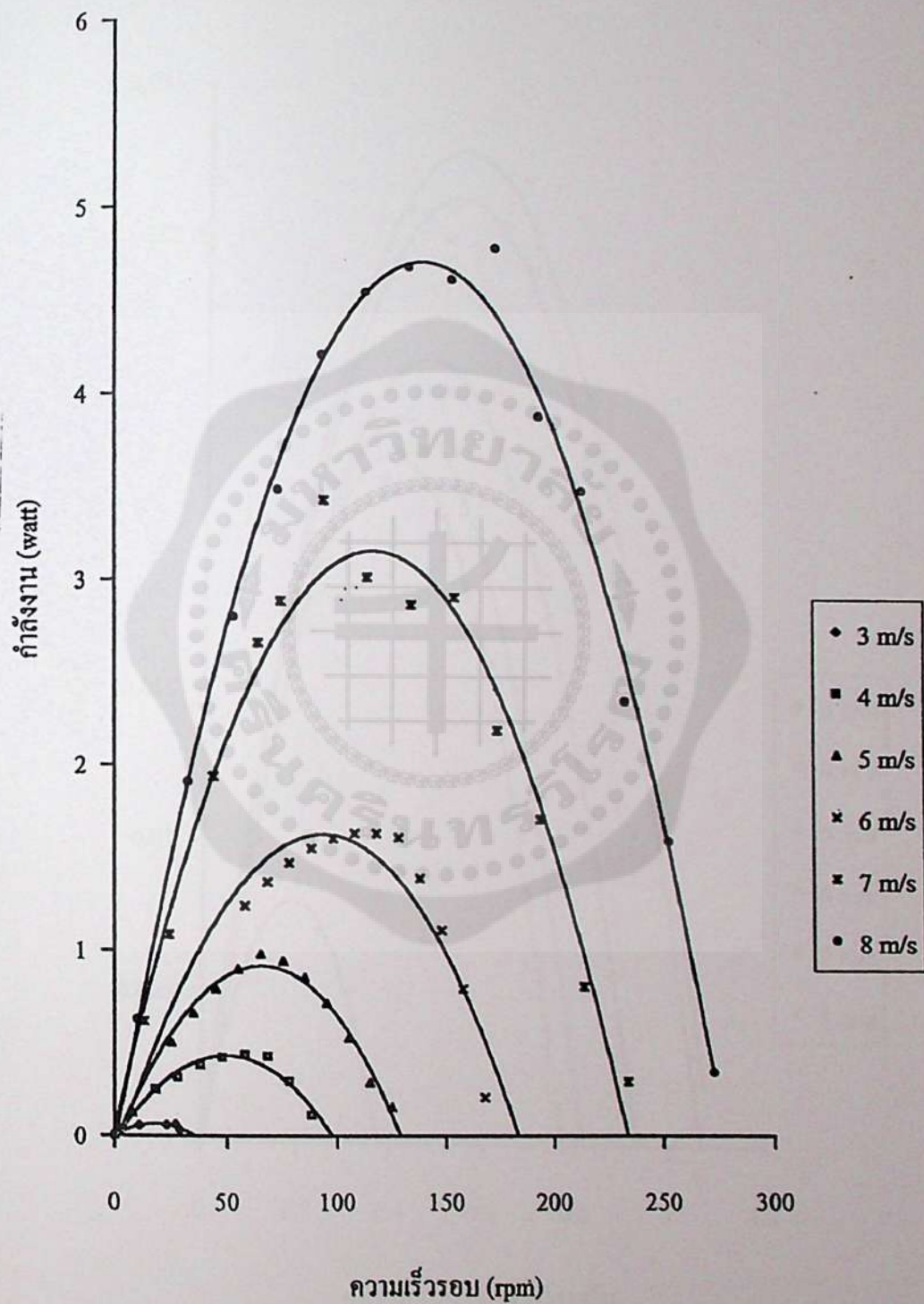
V	N	F	T	P	Cp	λ
3	29	0.1	0.012	0.036	0.005	0.304
3	23	0.2	0.024	0.058	0.007	0.241
3	17	0.3	0.036	0.064	0.008	0.178
3	11	0.4	0.048	0.055	0.007	0.115
3	5	0.5	0.060	0.031	0.004	0.052
4	88	0.1	0.012	0.111	0.006	0.691
4	78	0.3	0.036	0.294	0.016	0.613
4	68	0.5	0.060	0.427	0.023	0.534
4	58	0.6	0.072	0.437	0.023	0.456
4	48	0.7	0.084	0.422	0.022	0.377
4	38	0.8	0.096	0.382	0.020	0.298
4	28	0.9	0.108	0.371	0.017	0.220
4	18	1.1	0.132	0.249	0.013	0.141
4	8	1.2	0.144	0.121	0.006	0.063
5	125	0.1	0.012	0.157	0.004	0.785
5	115	0.2	0.024	0.289	0.008	0.723
5	105	0.4	0.048	0.528	0.014	0.660
5	95	0.6	0.072	0.716	0.019	0.597
5	85	0.8	0.096	0.854	0.023	0.534
5	75	1	0.120	0.942	0.025	0.417
5	65	1.2	0.144	0.980	0.026	0.408
5	55	1.3	0.156	0.898	0.024	0.346

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

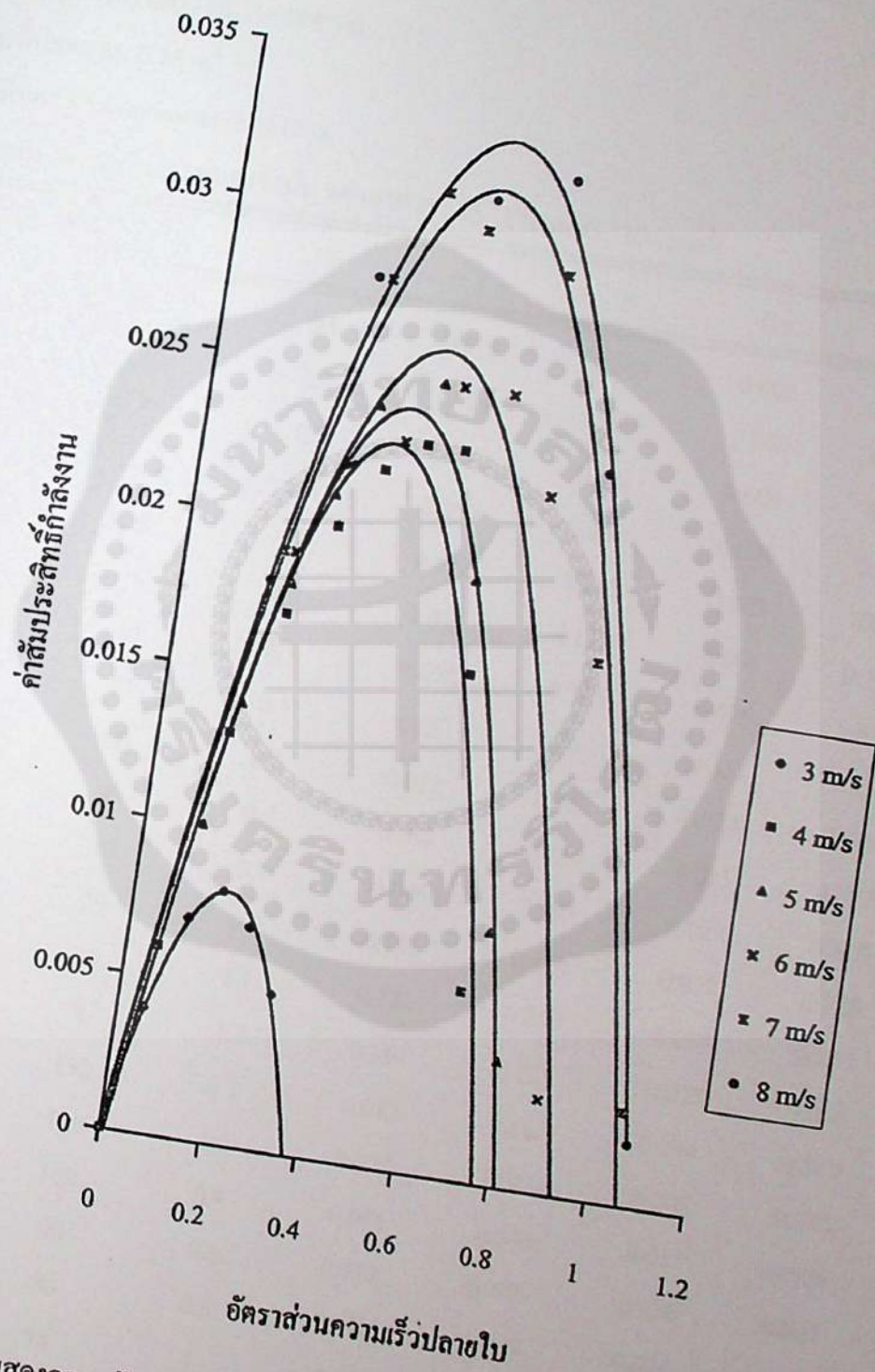
V	N	F	T	P	C _p	λ
5	45	1.4	0.168	0.791	0.021	0.283
5	25	1.6	0.192	0.502	0.014	0.157
6	168	0.1	0.012	0.211	0.003	0.880
6	158	0.4	0.048	0.794	0.012	0.827
6	148	0.6	0.072	1.115	0.017	0.775
6	138	0.8	0.096	1.387	0.022	0.723
6	128	1	0.012	1.068	0.025	0.670
6	118	1.1	0.132	1.630	0.025	0.618
6	108	1.2	0.144	1.628	0.025	0.565
6	98	1.3	0.156	1.600	0.025	0.513
6	88	1.4	0.168	1.547	0.024	0.461
6	78	1.5	0.180	1.470	0.023	0.408
6	68	1.6	0.192	1.367	0.021	0.356
6	58	1.7	0.204	1.238	0.019	0.304
7	234	0.1	0.012	0.294	0.003	1.050
7	214	0.3	0.036	0.806	0.008	0.960
7	194	0.7	0.084	1.706	0.017	0.871
7	174	1	0.120	2.185	0.022	0.781
7	154	1.5	0.180	2.901	0.029	0.691
7	134	1.7	0.204	2.861	0.028	0.601
7	114	2.1	0.252	3.007	0.030	0.512
7	94	2.5	0.300	2.952	0.029	0.422
7	74	3.1	0.372	2.881	0.028	0.332
7	64	3.3	0.396	2.653	0.026	0.287
7	44	3.5	0.420	1.934	0.019	0.197
7	24	3.6	0.432	1.085	0.011	0.108
7	13	3.8	0.456	0.620	0.006	0.058
8	253	0.5	0.06	1.589	0.010	0.994

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

V	N	F	T	P	Cp	λ
7	13	3.8	0.456	0.620	0.006	0.058
8	253	0.5	0.06	1.589	0.010	0.994
8	233	0.8	0.096	2.341	0.015	0.915
8	213	1.3	0.156	3.478	0.023	0.836
8	193	1.6	0.192	3.879	0.026	0.758
8	173	2.2	0.264	4.780	0.032	0.679
8	153	2.4	0.288	4.612	0.030	0.601
8	133	2.8	0.336	4.677	0.031	0.522
8	113	3.2	0.384	4.542	0.030	0.444
8	93	3.6	0.432	4.205	0.028	0.365
8	73	3.8	0.456	3.484	0.023	0.287
8	53	4.2	0.504	2.796	0.018	0.208
8	33	4.6	0.552	1.907	0.013	0.130
8	10	5	0.6	0.628	0.004	0.039



รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับความเร็วรอบที่ความเร็วลมต่างๆของกังหันลม แบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มุม 0 องศา



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิ์กำลังงานกับอัตราส่วนความเร็ว
ความเร็วปลายใบของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มุม 0 องศา

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบกังหันลม

ประเภท กังหันลมใบแกว่งได้ 2 ใบ

รายละเอียด

รัศมีของกังหัน (m) / มุมใบ(องศา) 0.25/15

พื้นที่ปะทะลม 0.25 m^2

รัศมีของ Dynamometer (r) 0.12 m

อุณหภูมิ/ความดัน/ความหนาแน่น ของอากาศ : $25^\circ\text{C}/1 \text{ atm}/1.185 \text{ kg/m}^3$

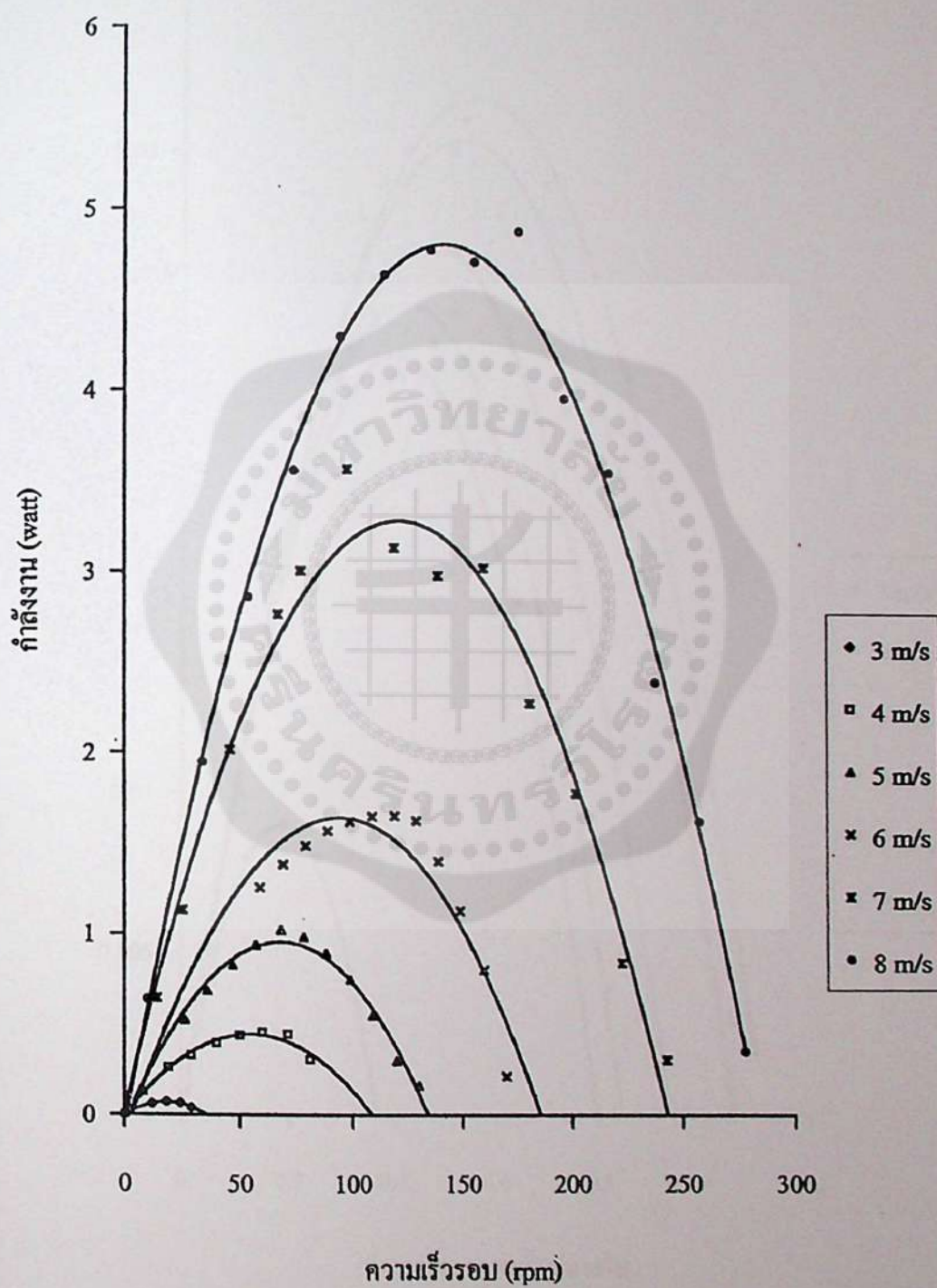
V	N	F	T	P	Cp	λ
3	30	0.1	0.012	0.040	0.005	0.319
3	24	0.2	0.025	0.064	0.008	0.253
3	18	0.3	0.037	0.071	0.009	0.187
3	12	0.4	0.050	0.061	0.008	0.121
3	5	0.6	0.072	0.040	0.005	0.055
4	92	0.1	0.012	0.115	0.006	0.719
4	81	0.3	0.036	0.306	0.016	0.637
4	71	0.5	0.06	0.444	0.023	0.555
4	60	0.6	0.072	0.455	0.024	0.474
4	50	0.7	0.084	0.439	0.023	0.392
4	40	0.8	0.096	0.397	0.021	0.310
4	29	0.9	0.108	0.329	0.017	0.229
4	19	1.1	0.132	0.259	0.014	0.147
4	8	1.2	0.144	0.125	0.007	0.065
5	130	0.1	0.012	0.163	0.004	0.817
5	120	0.2	0.024	0.300	0.008	0.751
5	109	0.4	0.048	0.549	0.015	0.686
5	99	0.6	0.072	0.745	0.020	0.621
5	88	0.8	0.096	0.888	0.024	0.555
5	78	1	0.12	0.980	0.026	0.490
5	68	1.2	0.144	1.019	0.028	0.425

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

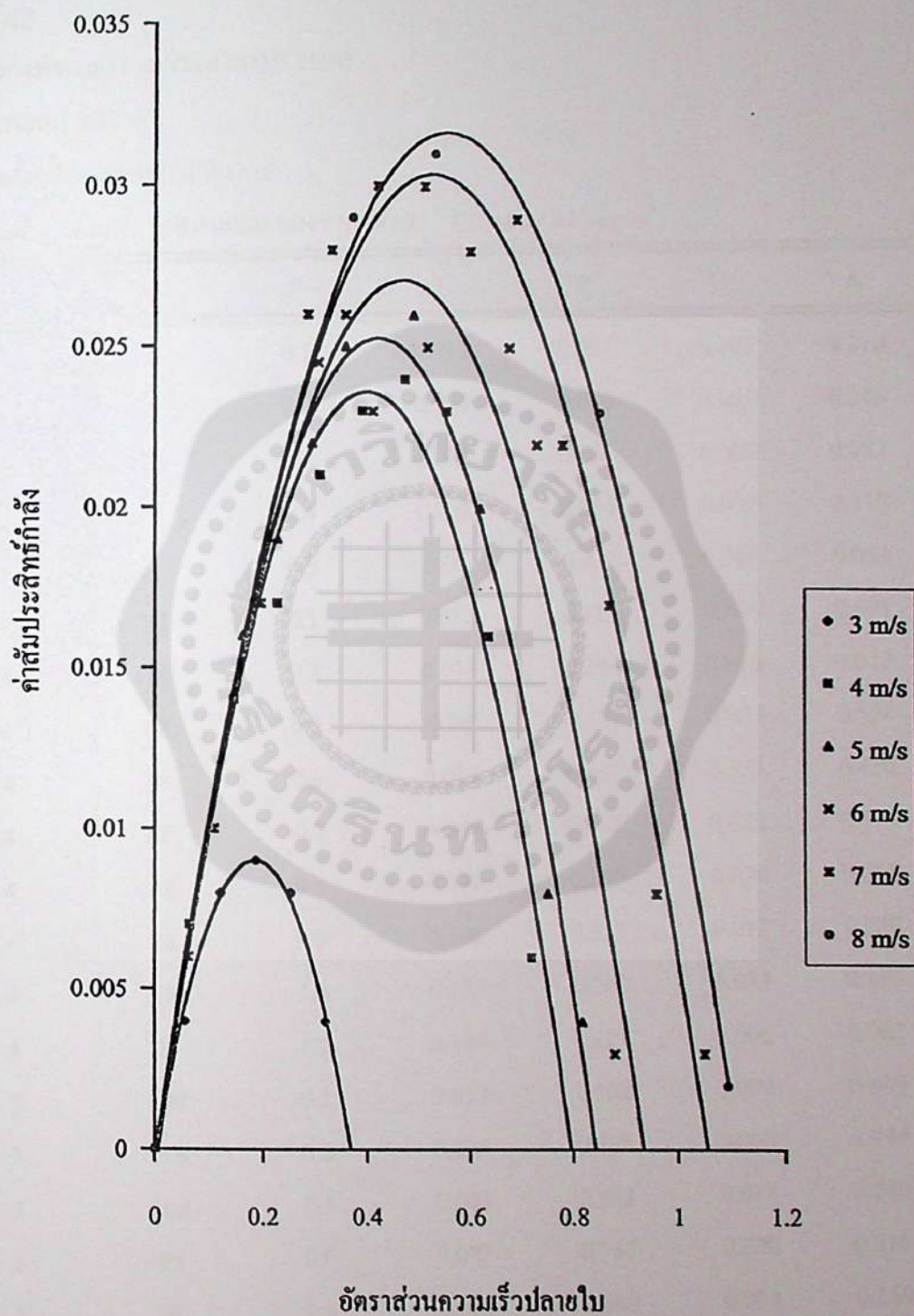
V	N	F	T	P	Cp	λ
5	57	1.1	0.132	0.790	0.021	0.359
5	47	1.4	0.168	0.823	0.022	0.294
5	36	1.5	0.18	0.686	0.019	0.229
5	26	1.6	0.192	0.522	0.014	0.163
6	170	0.1	0.012	0.213	0.003	0.888
6	160	0.4	0.048	0.802	0.013	0.836
6	149	0.6	0.072	1.126	0.018	0.783
6	139	0.8	0.096	1.400	0.022	0.730
6	129	1	0.12	1.624	0.025	0.677
6	119	1.1	0.132	1.647	0.026	0.624
6	109	1.2	0.144	1.644	0.026	0.571
6	99	1.3	0.156	1.616	0.025	0.518
6	89	1.4	0.168	1.563	0.024	0.465
6	79	1.5	0.18	1.484	0.023	0.412
6	69	1.6	0.192	1.380	0.022	0.360
6	59	1.7	0.204	1.251	0.020	0.307
7	243	0.1	0.012	0.306	0.003	1.092
7	223	0.3	0.036	0.839	0.008	0.999
7	202	0.7	0.084	1.774	0.017	0.905
7	181	1	0.12	2.273	0.002	0.812
7	160	1.5	0.18	3.017	0.030	0.719
7	139	1.7	0.204	2.976	0.029	0.625
7	119	2.1	0.252	3.127	0.031	0.532
7	98	2.5	0.3	3.070	0.030	0.439
7	77	3.1	0.372	2.997	0.029	0.345
7	67	3.3	0.396	2.759	0.027	0.299
7	46	3.5	0.42	2.012	0.020	0.205
7	25	3.6	0.432	1.129	0.011	0.112

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

V	N	F	T	P	Cp	λ
7	14	3.8	0.456	0.645	0.006	0.061
8	278	0.1	0.012	0.350	0.002	1.094
8	258	0.5	0.06	1.621	0.011	1.013
8	238	0.8	0.096	2.388	0.016	0.933
8	217	1.3	0.156	3.547	0.023	0.853
8	197	1.6	0.192	3.956	0.026	0.773
8	176	2.2	0.264	4.876	0.032	0.693
8	156	2.4	0.288	4.704	0.031	0.613
8	136	2.8	0.336	4.771	0.031	0.533
8	115	3.2	0.384	4.633	0.031	0.453
8	95	3.6	0.432	4.289	0.028	0.373
8	74	3.8	0.456	3.554	0.023	0.292
8	54	4.2	0.504	2.852	0.019	0.212
8	34	4.6	0.552	1.945	0.013	0.132
8	10	5	0.6	0.641	0.004	0.040



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับความเร็วรอบที่ความเร็วลมต่างๆของกังหันลม แบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มุม 15 องศา



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิ์กำลังงานกับอัตราส่วนความเร็ว
ความเร็วปลายใบของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มีมุม 15 องศา

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบกังหันลม

ประเภท กังหันลมใบแกว่งได้ 2 ใบ

รายละเอียด

รัศมีของกังหัน (m) / มุมใบ(องศา) 0.25/30

พื้นที่ปะทะลม 0.25 m^2

รัศมีของ Dynamometer (r) 0.12 m

อุณหภูมิ/ความดัน/ความหนาแน่น ของอากาศ : $25^\circ\text{C}/1 \text{ atm}/1.185 \text{ kg/m}^3$

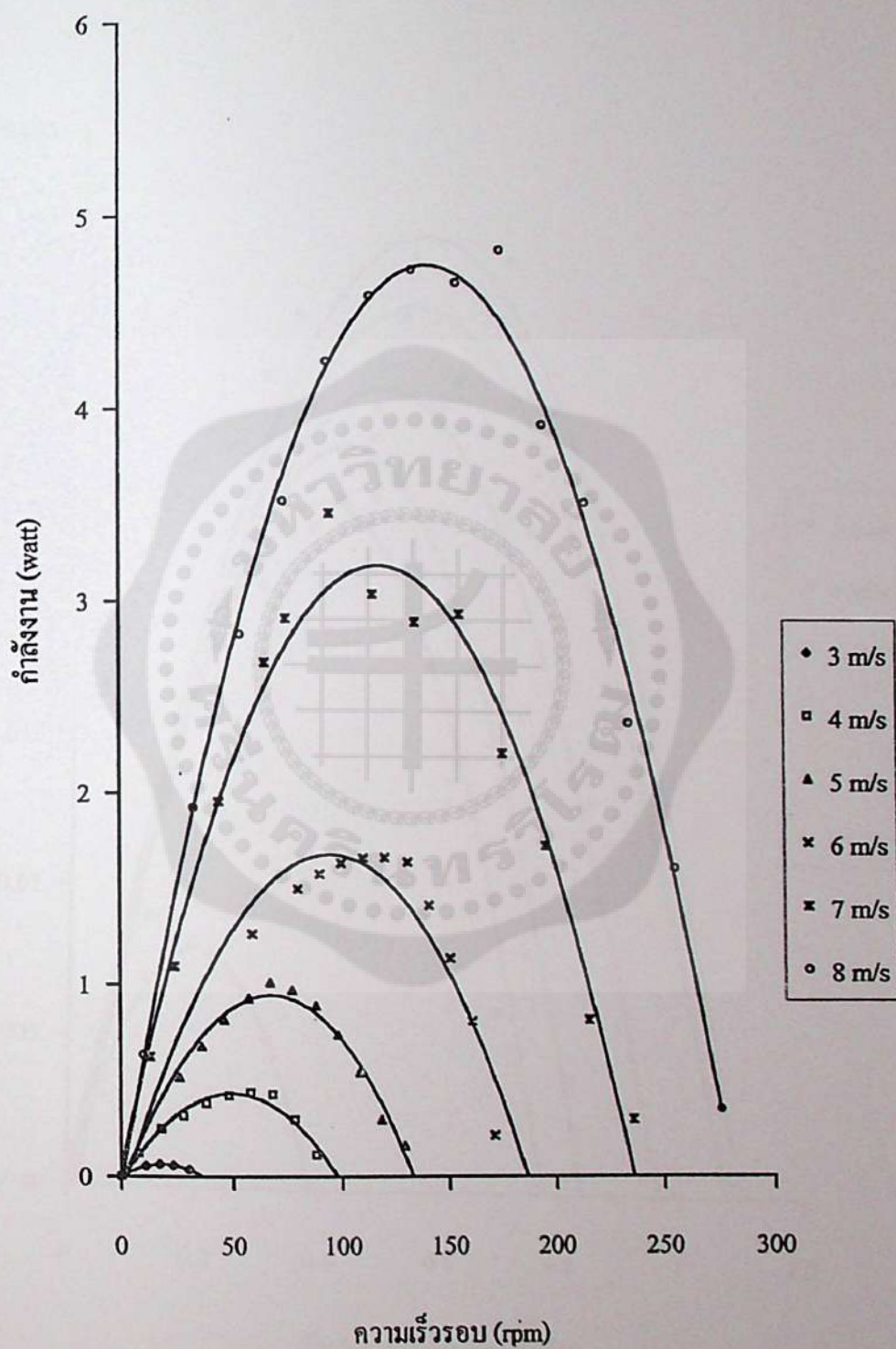
V	N	F	T	P	Cp	λ
3	30	0.1	0.012	0.037	0.005	0.310
3	23	0.2	0.024	0.059	0.007	0.246
3	17	0.3	0.036	0.065	0.008	0.182
3	11	0.4	0.048	0.056	0.007	0.117
3	5	0.5	0.06	0.032	0.004	0.053
4	88	0.1	0.012	0.111	0.006	0.691
4	78	0.3	0.036	0.294	0.016	0.613
4	68	0.5	0.06	0.427	0.023	0.534
4	58	0.6	0.072	0.437	0.023	0.456
4	48	0.7	0.084	0.422	0.022	0.377
4	38	0.8	0.096	0.382	0.020	0.298
4	28	0.9	0.108	0.317	0.017	0.220
4	18	1.1	0.132	0.249	0.013	0.141
4	8	1.2	0.144	0.121	0.006	0.063
5	129	0.1	0.012	0.162	0.004	0.809
5	118	0.2	0.024	0.298	0.008	0.744
5	108	0.4	0.048	0.543	0.015	0.680
5	98	0.6	0.072	0.737	0.020	0.615
5	88	0.8	0.096	0.880	0.024	0.550
5	77	1	0.12	0.970	0.026	0.485
5	67	1.2	0.144	1.009	0.027	0.421
5	57	1.3	0.156	0.925	0.025	0.356

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

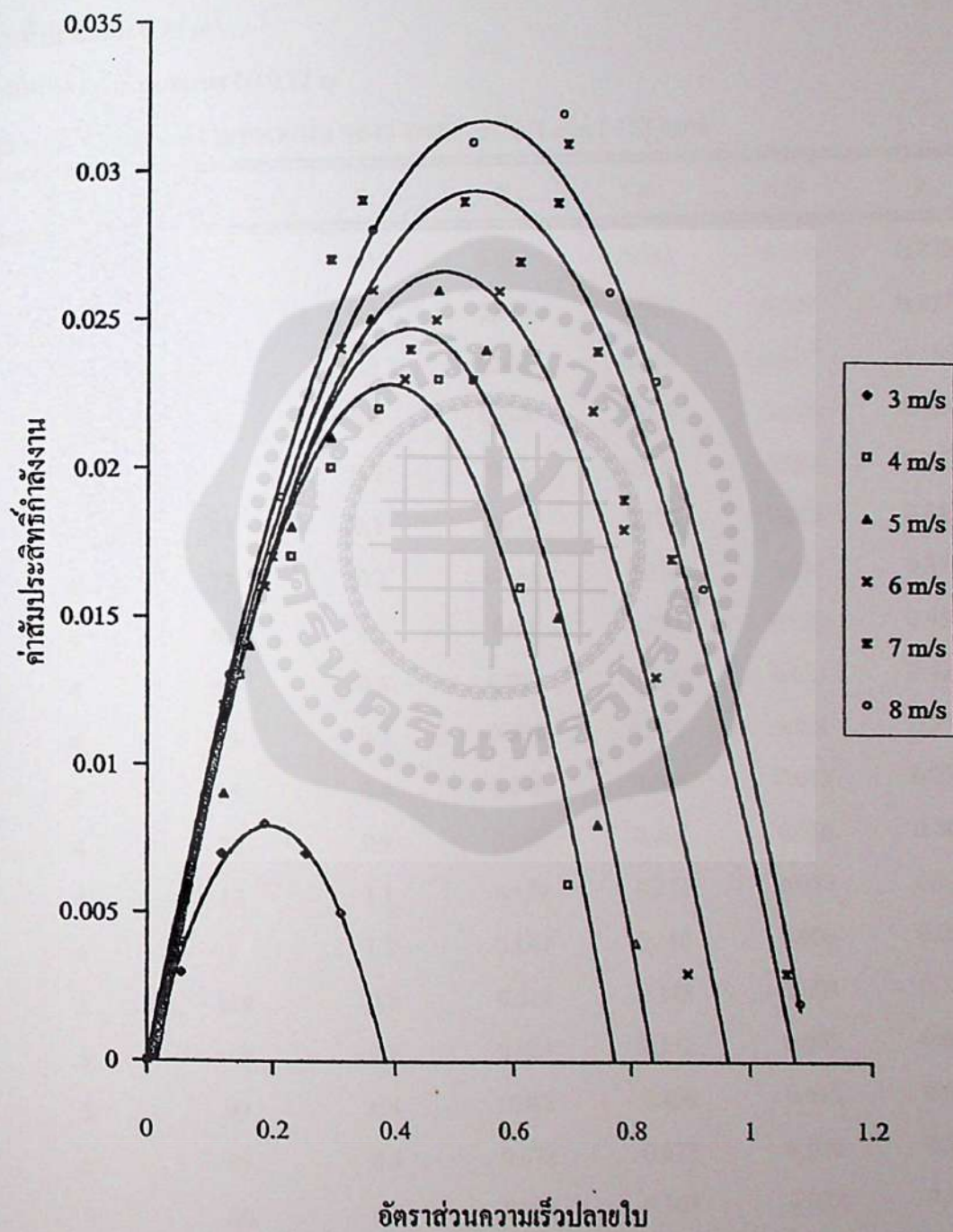
V	N	F	T	P	C _p	λ
5	46	1.4	0.168	0.815	0.022	0.291
5	36	1.5	0.18	0.679	0.018	0.227
5	26	1.6	0.192	0.517	0.014	0.162
6	171	0.1	0.012	0.215	0.003	0.897
6	161	0.4	0.048	0.810	0.013	0.844
6	151	0.6	0.072	1.138	0.018	0.790
6	131	1	0.12	1.640	0.026	0.630
6	120	1.1	0.132	1.663	0.026	0.630
6	110	1.2	0.144	1.660	0.026	0.577
6	100	1.3	0.156	1.632	0.026	0.523
6	90	1.4	0.168	1.578	0.025	0.470
6	80	1.5	0.18	1.499	0.023	0.417
6	69	1.6	0.192	1.394	0.022	0.363
6	59	1.7	0.204	1.263	0.020	0.310
6	236	0.1	0.012	0.297	0.003	1.061
7	216	0.3	0.036	0.814	0.008	0.970
7	196	0.7	0.084	1.723	0.017	0.879
7	176	1	0.12	2.207	0.022	0.789
7	156	1.5	0.18	2.930	0.029	0.698
7	135	1.7	0.204	2.890	0.028	0.607
7	115	2.1	0.252	3.037	0.030	0.517
7	95	2.5	0.3	2.981	0.029	0.426
7	75	3.1	0.372	2.910	0.029	0.335
7	65	3.3	0.396	2.679	0.026	0.290
7	44	3.5	0.42	1.954	0.019	0.199
7	24	3.6	0.432	1.096	0.011	0.109
7	13	3.8	0.456	0.627	0.006	0.059

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

V	N	F	T	P	C _p	λ
8	276	0.1	0.012	0.346	0.002	1.083
8	256	0.5	0.06	1.605	0.011	1.003
8	235	0.8	0.096	2.365	0.016	0.924
8	215	1.3	0.156	3.513	0.023	0.845
8	195	1.6	0.192	3.917	0.026	0.765
8	175	2.2	0.264	4.828	0.032	0.686
8	155	2.4	0.288	4.658	0.031	0.607
8	134	2.8	0.336	4.724	0.031	0.528
8	114	3.2	0.384	4.587	0.030	0.449
8	94	3.6	0.432	4.247	0.028	0.369
8	74	3.8	0.456	3.519	0.023	0.290
8	54	4.2	0.504	2.824	0.019	0.210
8	33	4.6	0.552	1.926	0.013	0.131
8	10	5	0.6	0.634	0.004	0.040



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับความเร็วรอบที่ความเร็วลมต่างๆของกังหันลม แบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มีมุม 30 องศา



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพกำลังงานกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มุม 30 องศา

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบกังหันลม

ประเภท กังหันลมใบแกว่งได้ 2 ใบ

รายละเอียด

รัศมีของกังหัน (m) / มุมใบ(องศา) 0.25/45

พื้นที่ปะทะลม 0.25 m^2

รัศมีของ Dynamometer (r) 0.12 m

อุณหภูมิ/ความดัน/ความหนาแน่น ของอากาศ : $25^\circ\text{C}/1 \text{ atm}/1.185 \text{ kg/m}^3$

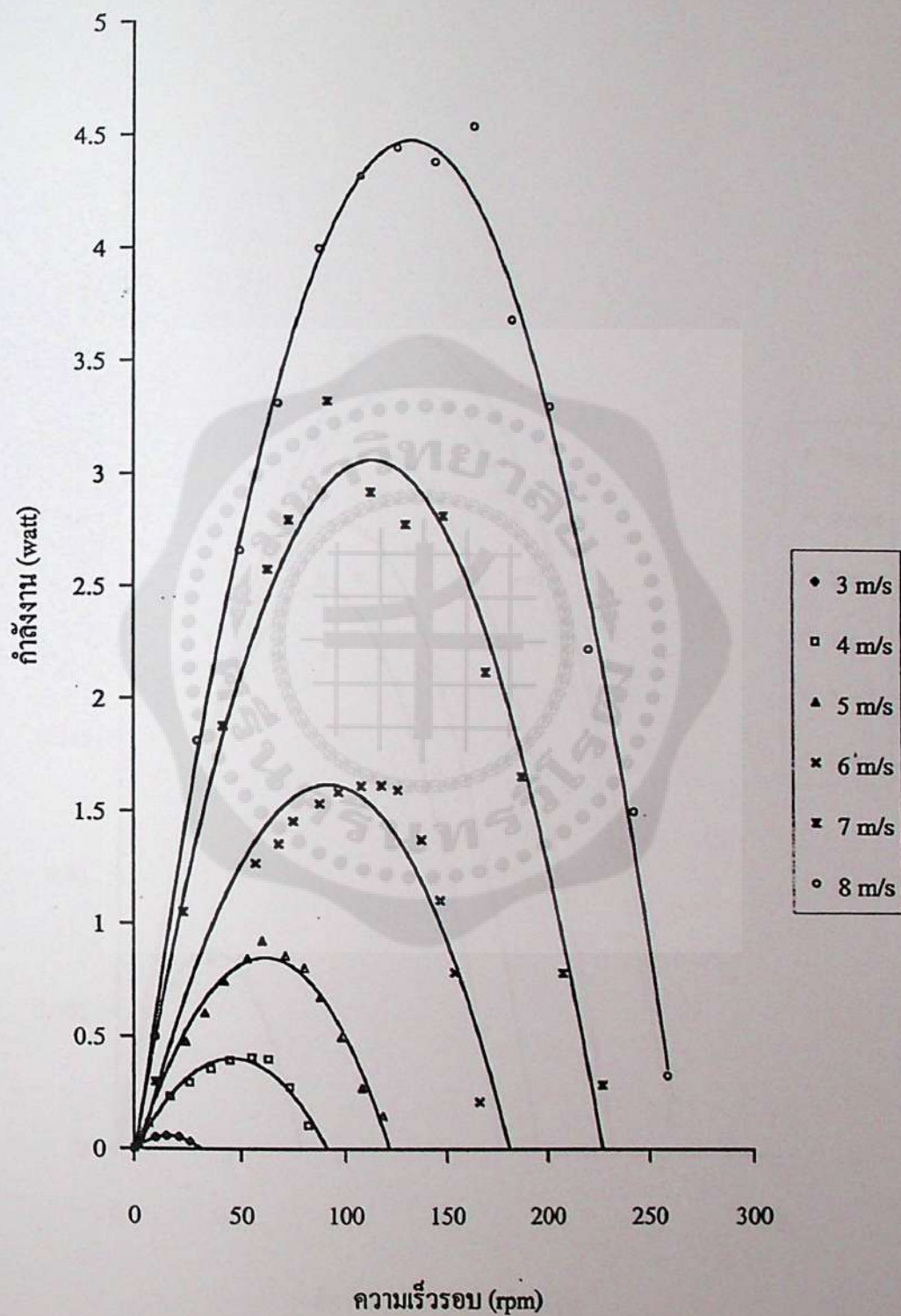
V	N	F	T	P	Cp	λ
3	26	0.1	0.012	0.033	0.004	0.273
3	21	0.2	0.024	0.052	0.007	0.217
3	15	0.3	0.036	0.058	0.007	0.160
3	10	0.4	0.048	0.050	0.006	0.104
3	5	0.5	0.06	0.026	0.004	0.047
4	82	0.1	0.012	0.103	0.005	0.643
4	73	0.3	0.036	0.273	0.014	0.570
4	63	0.5	0.06	0.397	0.021	0.497
4	54	0.6	0.072	0.406	0.021	0.424
4	45	0.7	0.084	0.392	0.021	0.351
4	35	0.8	0.096	0.355	0.019	0.278
4	26	0.9	0.108	0.294	0.016	0.205
4	17	1.1	0.132	0.231	0.012	0.131
4	7	1.2	0.144	0.112	0.006	0.058
5	118	0.1	0.012	0.148	0.004	0.738
5	108	0.2	0.024	0.272	0.007	0.679
5	99	0.4	0.048	0.496	0.013	0.620
5	89	0.6	0.072	0.673	0.018	0.561
5	80	0.8	0.096	0.803	0.022	0.502
5	71	1	0.12	0.885	0.024	0.443
5	61	1.2	0.144	0.921	0.025	0.384
5	52	1.3	0.156	0.844	0.023	0.325

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

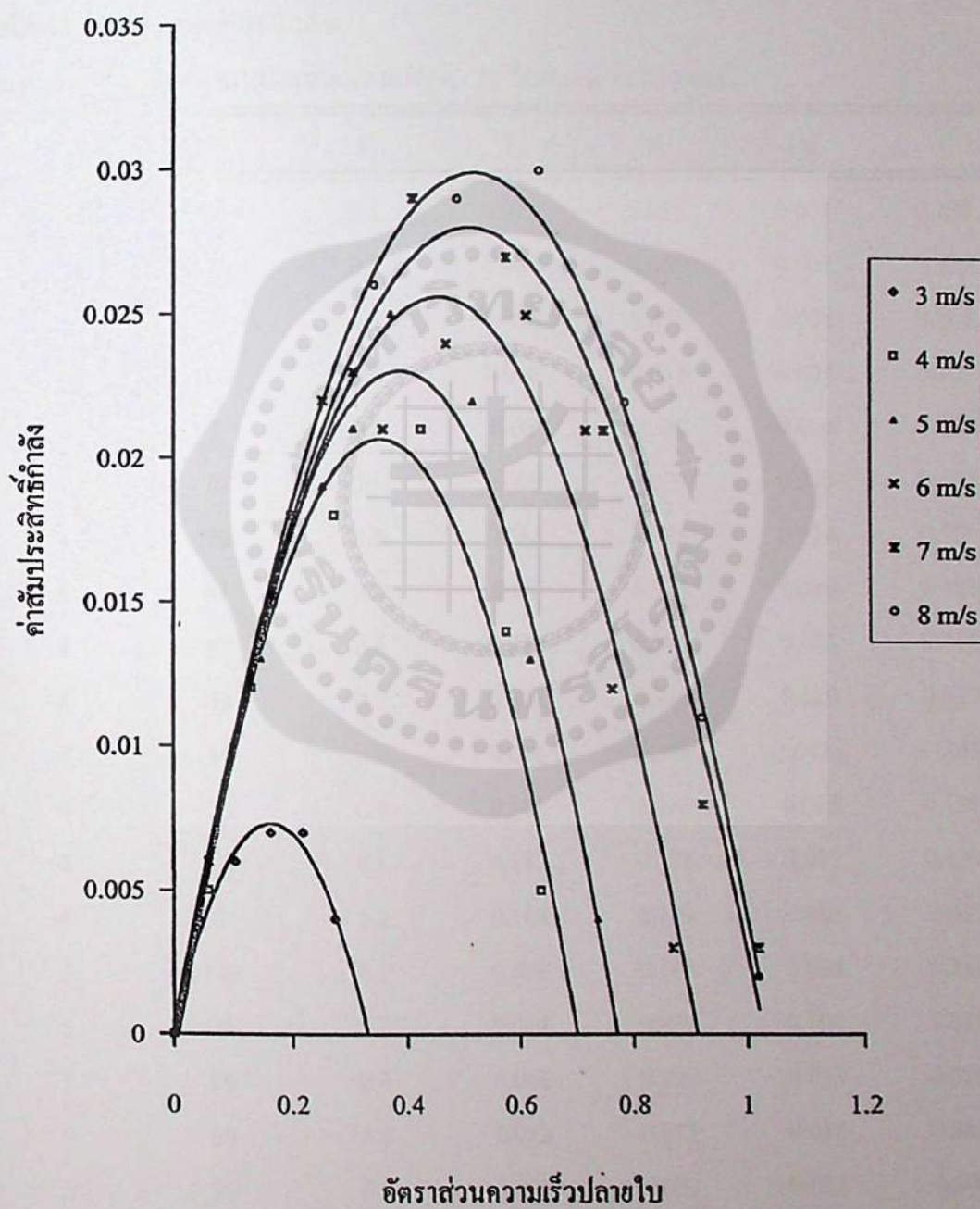
V	N	F	T	P	C _p	λ
5	42	1.4	0.168	0.744	0.020	0.266
5	33	1.5	0.18	0.620	0.017	0.207
5	24	1.6	0.192	0.472	0.013	0.148
6	166	0.1	0.012	0.209	0.003	0.871
6	156	0.4	0.048	0.786	0.012	0.819
6	147	0.6	0.072	1.104	0.017	0.767
6	137	0.8	0.096	1.373	0.021	0.715
6	127	1	0.12	1.592	0.025	0.664
6	117	1.1	0.132	1.614	0.025	0.612
6	107	1.2	0.144	1.611	0.025	0.560
6	97	1.3	0.156	1.584	0.025	0.508
6	87	1.4	0.168	1.532	0.024	0.456
6	77	1.5	0.18	1.455	0.023	0.404
6	67	1.6	0.192	1.353	0.021	0.352
6	57	1.7	0.204	1.226	0.019	0.301
7	227	0.1	0.012	0.285	0.003	1.019
7	208	0.3	0.036	0.782	0.008	0.932
7	188	0.7	0.084	1.654	0.016	0.845
7	169	1	0.12	2.120	0.021	0.757
7	149	1.5	0.18	2.814	0.028	0.670
7	130	1.7	0.204	2.775	0.027	0.583
7	111	2.1	0.252	2.917	0.029	0.496
7	91	2.5	0.3	2.863	0.028	0.409
7	72	3.1	0.372	2.795	0.028	0.322
7	62	3.3	0.396	2.573	0.025	0.279
7	43	3.5	0.42	1.876	0.018	0.192
7	23	3.6	0.432	1.053	0.010	0.104

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

V	N	F	T	P	Cp	λ
8	259	0.1	0.012	0.326	0.002	1.018
8	240	0.5	0.06	1.509	0.010	0.944
8	221	0.8	0.096	2.224	0.015	0.869
8	202	1.3	0.156	3.304	0.022	0.795
8	183	1.6	0.192	3.685	0.024	0.720
8	164	2.2	0.264	4.541	0.030	0.645
8	145	2.4	0.288	4.381	0.029	0.571
8	126	2.8	0.336	4.443	0.029	0.496
8	107	3.2	0.384	4.315	0.028	0.422
8	88	3.6	0.432	3.995	0.026	0.347
8	69	3.8	0.456	3.310	0.022	0.272
8	50	4.2	0.504	2.656	0.018	0.198
8	31	4.6	0.552	1.811	0.012	0.123
8	10	5	0.6	0.597	0.004	0.037



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับความเร็วรอบที่ความเร็วลมต่างๆของกังหันลม แบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มุม 45 องศา



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพกำลังงานกับอัตราส่วนความเร็ว
ความเร็วปลายใบของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มีมุม 45 องศา

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบกังหันลม

ประเภท กังหันลมใบแกว่งได้ 2 ใบ

รายละเอียด

รัศมีของกังหัน (m) / มุมใบ(องศา) 0.25/60

พื้นที่ปะทะลม 0.25 m^2

รัศมีของ Dynamometer (r) 0.12 m

อุณหภูมิ/ความดัน/ความหนาแน่น ของอากาศ : $25^\circ\text{C}/1 \text{ atm}/1.185 \text{ kg/m}^3$

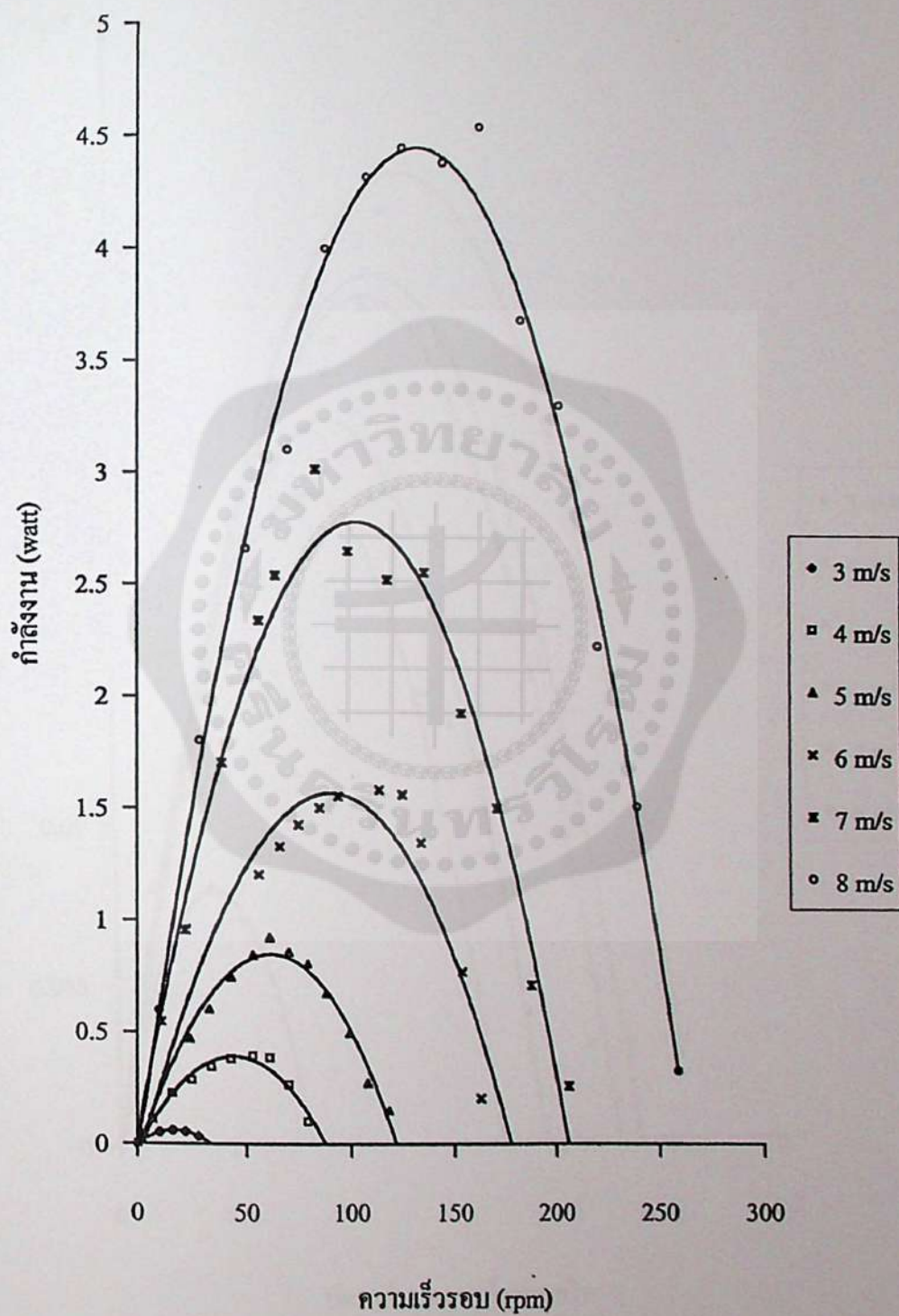
V	N	F	T	P	Cp	λ
3	28	0.1	0.012	0.035	0.004	0.289
3	22	0.2	0.024	0.055	0.007	0.229
3	16	0.3	0.036	0.061	0.008	0.169
3	10	0.4	0.048	0.053	0.007	0.109
3	5	0.5	0.06	0.030	0.004	0.050
4	79	0.1	0.012	0.099	0.005	0.622
4	70	0.3	0.036	0.265	0.014	0.551
4	61	0.5	0.06	0.384	0.020	0.481
4	52	0.6	0.072	0.393	0.021	0.410
4	43	0.7	0.084	0.380	0.020	0.339
4	34	0.8	0.096	0.344	.018	0.269
4	25	0.9	0.108	0.285	0.015	0.198
4	16	1.1	0.132	0.224	0.012	0.127
4	7	1.2	0.144	0.109	0.006	0.057
5	118	0.1	0.012	0.148	0.004	0.738
5	108	0.2	0.024	0.272	0.007	0.679
5	99	0.4	0.048	0.496	0.013	0.620
5	89	0.6	0.072	0.673	0.018	0.561
5	80	0.8	0.096	0.803	0.022	0.502
5	71	1	0.12	0.885	0.024	0.443
5	61	1.2	0.144	0.921	0.025	0.384
5	52	1.3	0.156	0.844	0.023	0.325

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

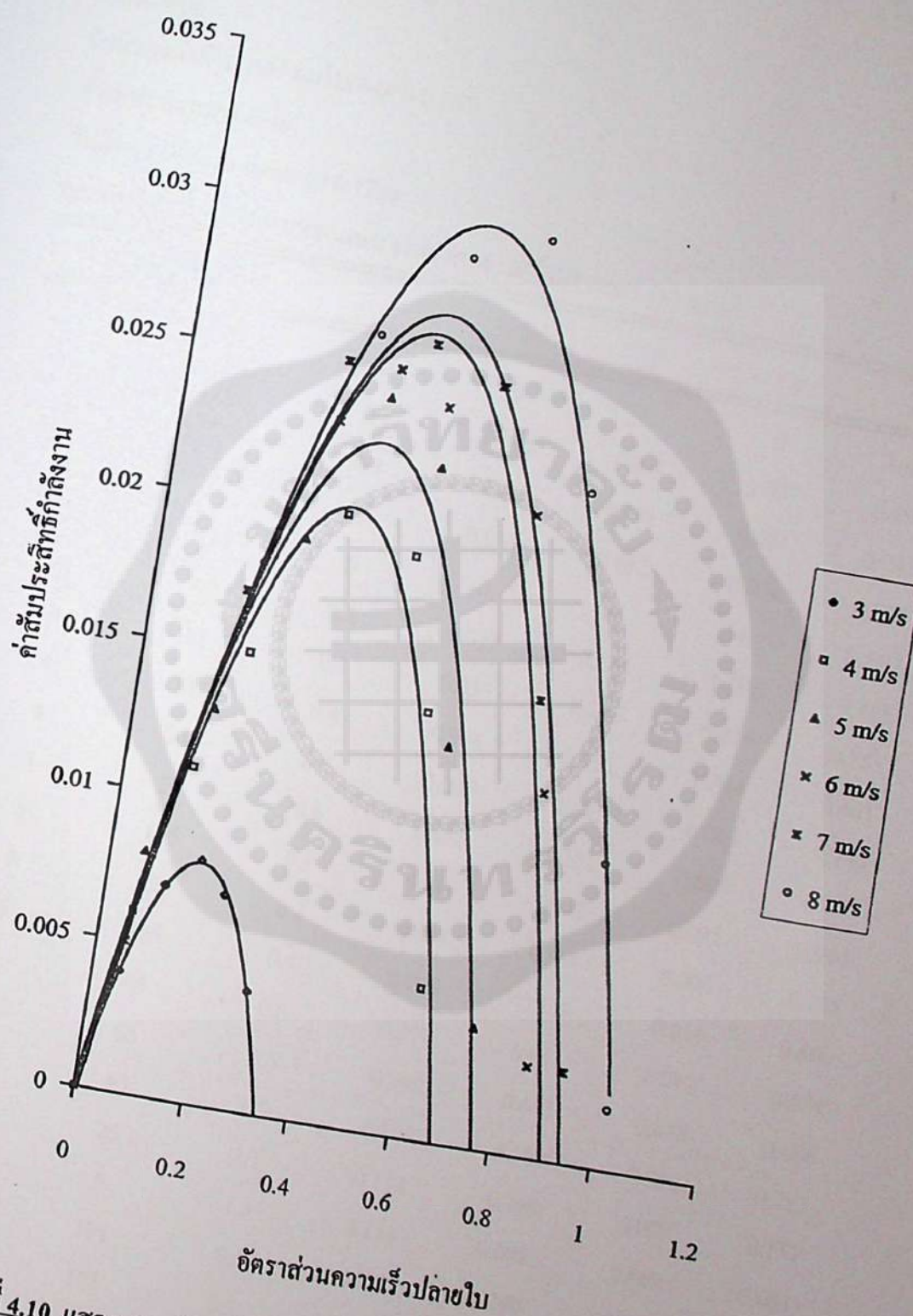
V	N	F	T	P	C _p	λ
5	42	1.4	0.168	0.744	0.020	0.266
5	33	1.5	0.18	0.620	0.017	0.207
5	24	1.6	0.192	0.472	0.013	0.148
6	163	0.1	0.012	0.205	0.003	0.853
6	153	0.4	0.048	0.770	0.012	0.802
6	144	0.6	0.072	1.082	0.017	0.752
6	134	0.8	0.096	1.345	0.021	0.701
6	124	1	0.12	1.559	0.024	0.650
6	114	1.1	0.132	1.581	0.025	0.599
6	105	1.2	0.144	1.579	0.025	0.549
6	95	1.3	0.156	1.552	0.024	0.498
6	85	1.4	0.168	1.501	0.023	0.447
6	76	1.5	0.18	1.425	0.022	0.396
6	66	1.6	0.192	1.326	0.021	0.345
6	56	1.7	0.204	1.201	0.019	0.295
7	206	0.1	0.012	0.259	0.003	0.924
7	188	0.3	0.036	0.710	0.007	0.845
7	171	0.7	0.084	1.501	0.015	0.766
7	153	1	0.12	1.923	0.019	0.687
7	136	1.5	0.18	2.553	0.025	0.608
7	118	1.7	0.204	2.518	0.025	0.529
7	100	2.1	0.252	2.646	0.026	0.450
7	83	2.5	0.3	2.597	0.026	0.371
7	65	3.1	0.372	2.536	0.025	0.292
7	56	3.3	0.396	2.334	0.023	0.253
7	39	3.5	0.42	1.702	0.017	0.174
7	21	3.6	0.432	0.955	0.009	0.095

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

V	N	F	T	P	Cp	λ
7	11	3.8	0.456	0.546	0.005	0.051
8	259	0.1	0.012	0.326	0.002	1.018
8	240	0.5	0.06	1.509	0.010	0.944
8	221	0.8	0.096	2.224	0.015	0.869
8	202	1.3	0.156	3.304	0.022	0.795
8	183	1.6	0.192	3.685	0.024	0.720
8	164	2.2	0.264	4.541	0.030	0.645
8	145	2.4	0.288	4.381	0.029	0.571
8	126	2.8	0.336	4.443	0.029	0.496
8	107	3.2	0.384	4.315	0.028	0.422
8	88	3.6	0.432	3.995	0.026	0.347
8	69	3.8	0.456	3.310	0.022	0.272
8	50	4.2	0.504	2.656	0.018	0.198
8	31	4.6	0.552	1.811	0.012	0.123
8	10	5	0.6	0.597	0.004	0.037



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับความเร็วรอบที่ความเร็วลมต่างๆของกังหันลม แบบใบแกว่งได้ 2 ใบ ที่มุม 60 องศา



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพกับอัตราส่วนความเร็ว
ความเร็วปลายใบของกังหันลมแบบใบกว้างได้ 2 ใบ ที่มุม 60 องศา

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบกังหันลม

ประเภท กังหันลมใบแกว่งได้ 3 ใบ

รายละเอียด

รัศมีของกังหัน (m) / มุมใบ(องศา) 0.25/0

พื้นที่ปะทะลม 0.25 m^2

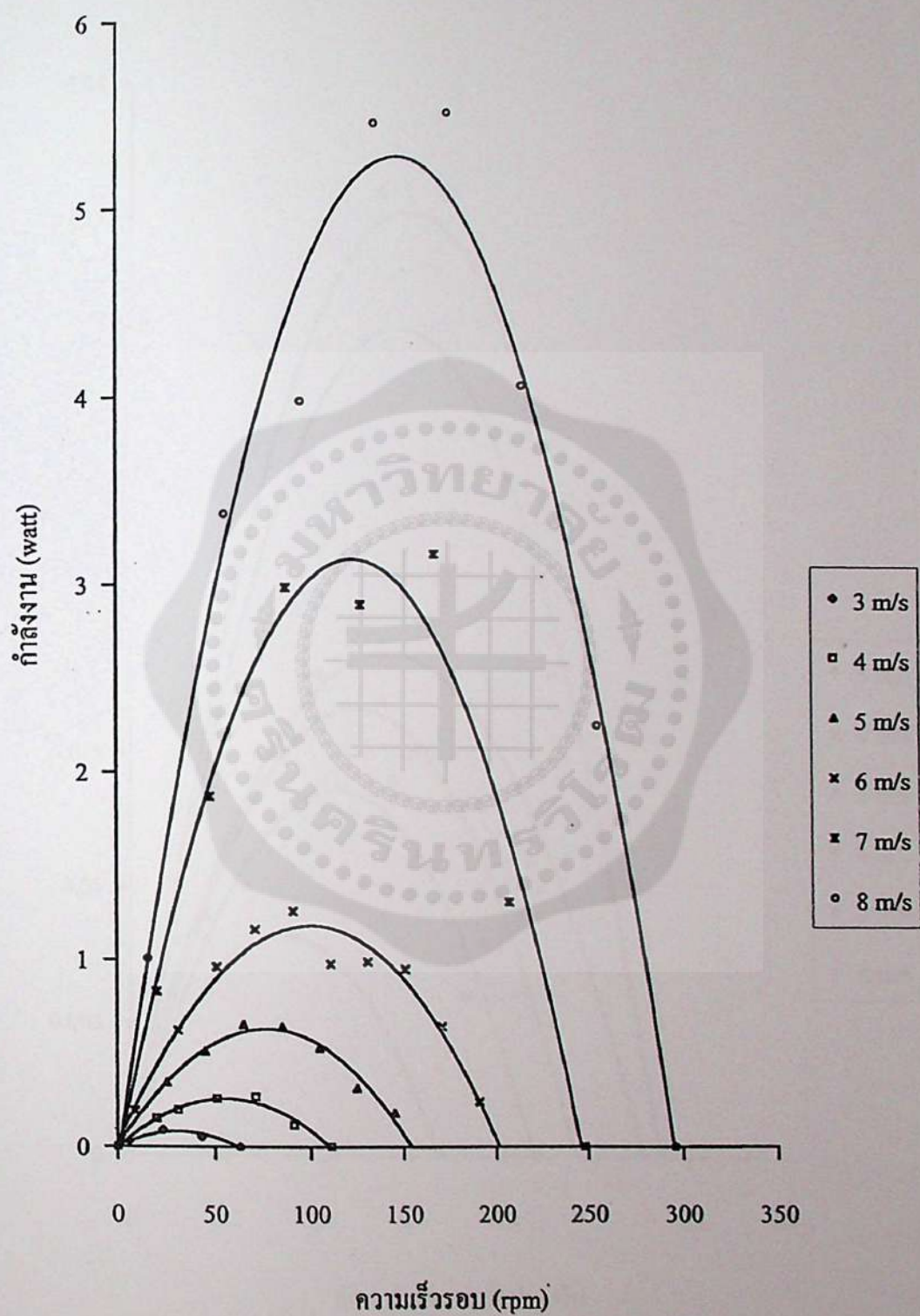
รัศมีของ Dynamometer (r) 0.12 m

อุณหภูมิ/ความดัน/ความหนาแน่น ของอากาศ : $25^\circ\text{C}/1 \text{ atm}/1.185 \text{ kg/m}^3$

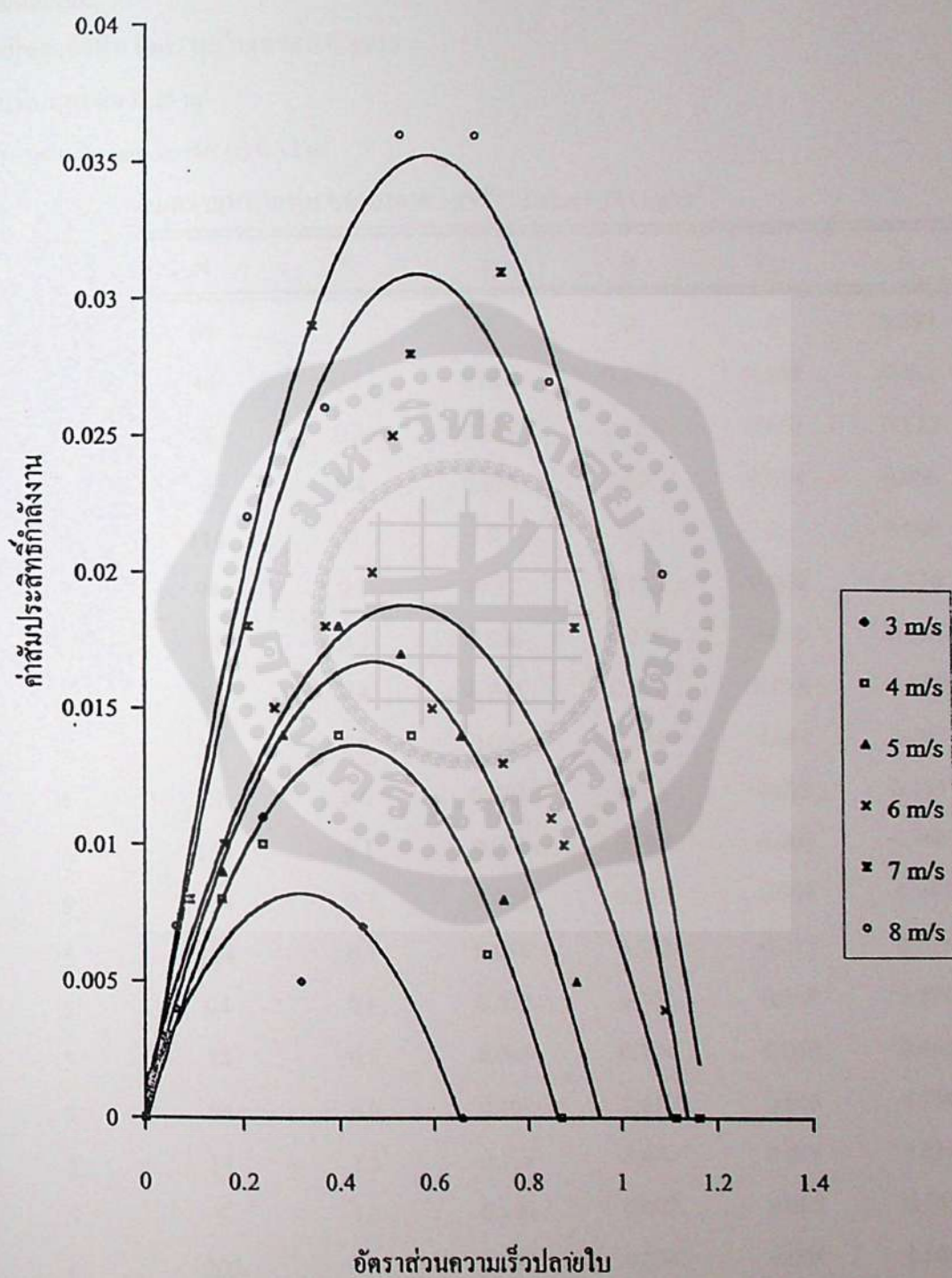
V	N	F	T	P	Cp	λ
3	63	0	0	0	0	0.660
3	43	0.1	0.012	0.054	0.007	0.450
3	23	0.3	0.038	0.091	0.011	0.241
3	6	0.4	0.050	0.032	0.004	0.063
4	111	0	0	0	0	0.872
4	91	0.1	0.012	0.114	0.006	0.715
4	71	0.3	0.036	0.266	0.014	0.555
4	51	0.4	0.048	0.256	0.014	0.401
4	31	0.5	0.006	0.195	0.010	0.243
4	20	0.6	0.072	0.151	0.008	0.157
5	145	0.1	0.012	0.182	0.005	0.911
5	125	0.2	0.024	0.314	0.008	0.785
5	105	0.4	0.048	0.528	0.014	0.660
5	85	0.6	0.072	0.641	0.017	0.534
5	65	0.8	0.096	0.653	0.018	0.408
5	45	0.9	0.108	0.509	0.014	0.283
5	25	1.1	0.132	0.345	0.009	0.157
5	5	1.3	0.156	0.082	0.002	0.031
6	191	0.1	0.012	0.240	0.004	1.000
6	171	0.5	0.036	0.644	0.010	0.895
6	151	0.5	0.060	0.948	0.015	0.791
6	131	0.6	0.072	0.987	0.015	0.686

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

V	N	F	T	P	C _p	λ
6	111	0.7	0.084	0.976	0.015	0.581
6	91	1.1	0.132	1.257	0.020	0.476
6	71	1.3	0.156	1.159	0.018	0.372
6	51	1.5	0.180	0.961	0.015	0.267
6	31	1.6	0.192	0.623	0.010	0.162
6	9	1.7	0.204	0.192	0.003	0.047
7	248	0	0	0	0	1.113
7	208	0.5	0.060	1.306	0.013	0.934
7	168	1.5	0.180	3.165	0.031	0.754
7	128	1.8	0.216	2.894	0.028	0.574
7	88	2.7	0.324	2.984	0.029	0.395
7	48	3.1	0.372	1.869	0.018	0.215
7	20	3.3	0.396	0.829	0.008	0.090
8	296	0	0	0	0	1.162
8	256	0.7	0.084	0.251	0.015	1.005
8	216	1.5	0.180	4.069	0.027	0.848
8	176	2.5	0.300	5.526	0.036	0.691
8	136	3.2	0.384	5.466	0.036	0.534
8	96	3.3	0.396	3.979	0.026	0.377
8	56	4.8	0.576	3.376	0.022	0.220
8	16	5	0.600	1.005	0.007	0.063



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกําลังงานกับความเร็วยรอบที่ความเร็วลมต่างๆของกังหันลม แบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มุม 0 องศา



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิ์กำลังงานกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มุม 0 องศา

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบกังหันลม

ประเภท กังหันลมใบแกว่งได้ 3 ใบ

รายละเอียด

รัศมีของกังหัน (m) / มุมใบ(องศา) 0.25/15

พื้นที่ปะทะลม 0.25 m^2

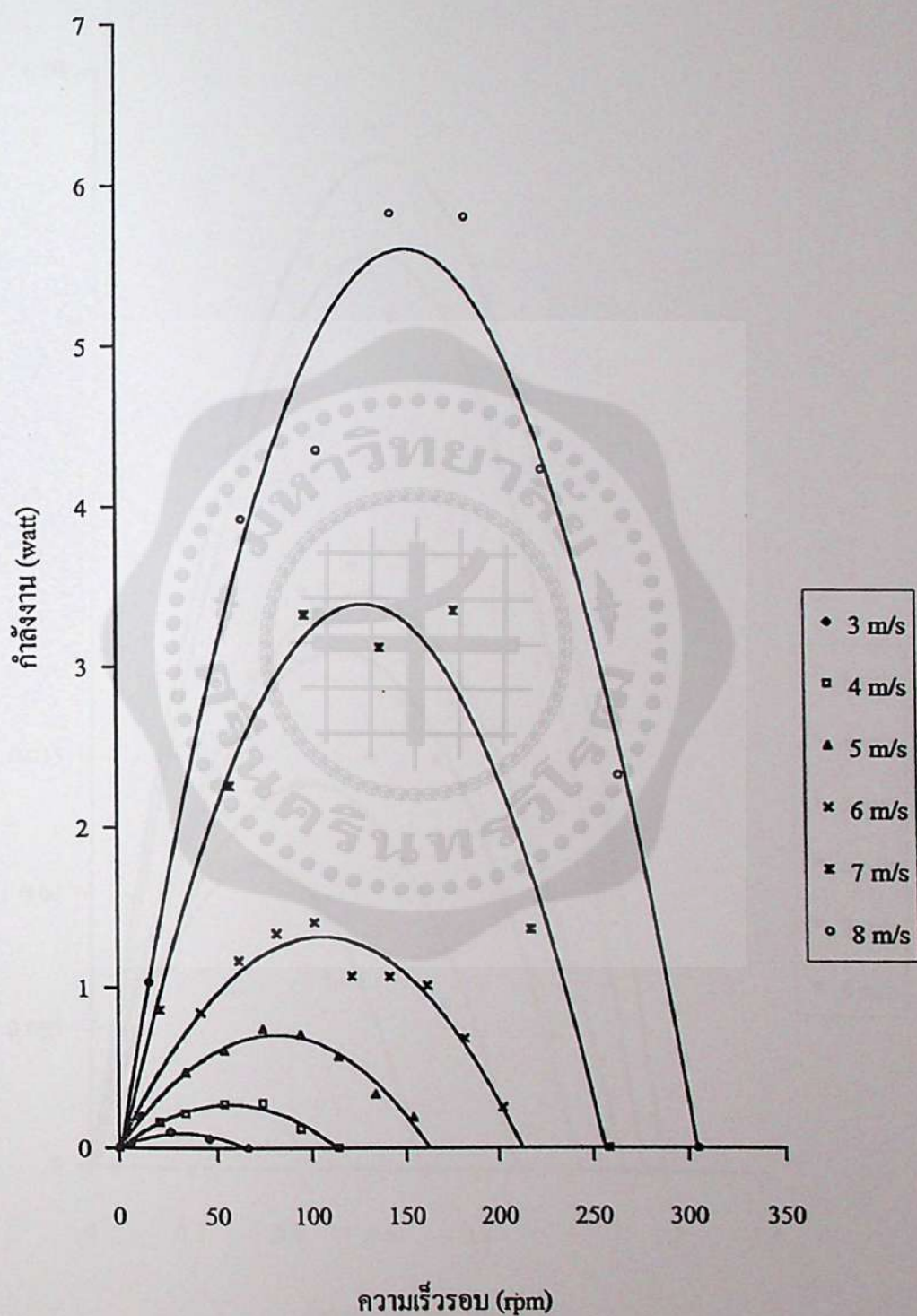
รัศมีของ Dynamometer (r) 0.12 m

อุณหภูมิ/ความดัน/ความหนาแน่น ของอากาศ : $25^\circ\text{C}/1 \text{ atm}/1.185 \text{ kg/m}^3$

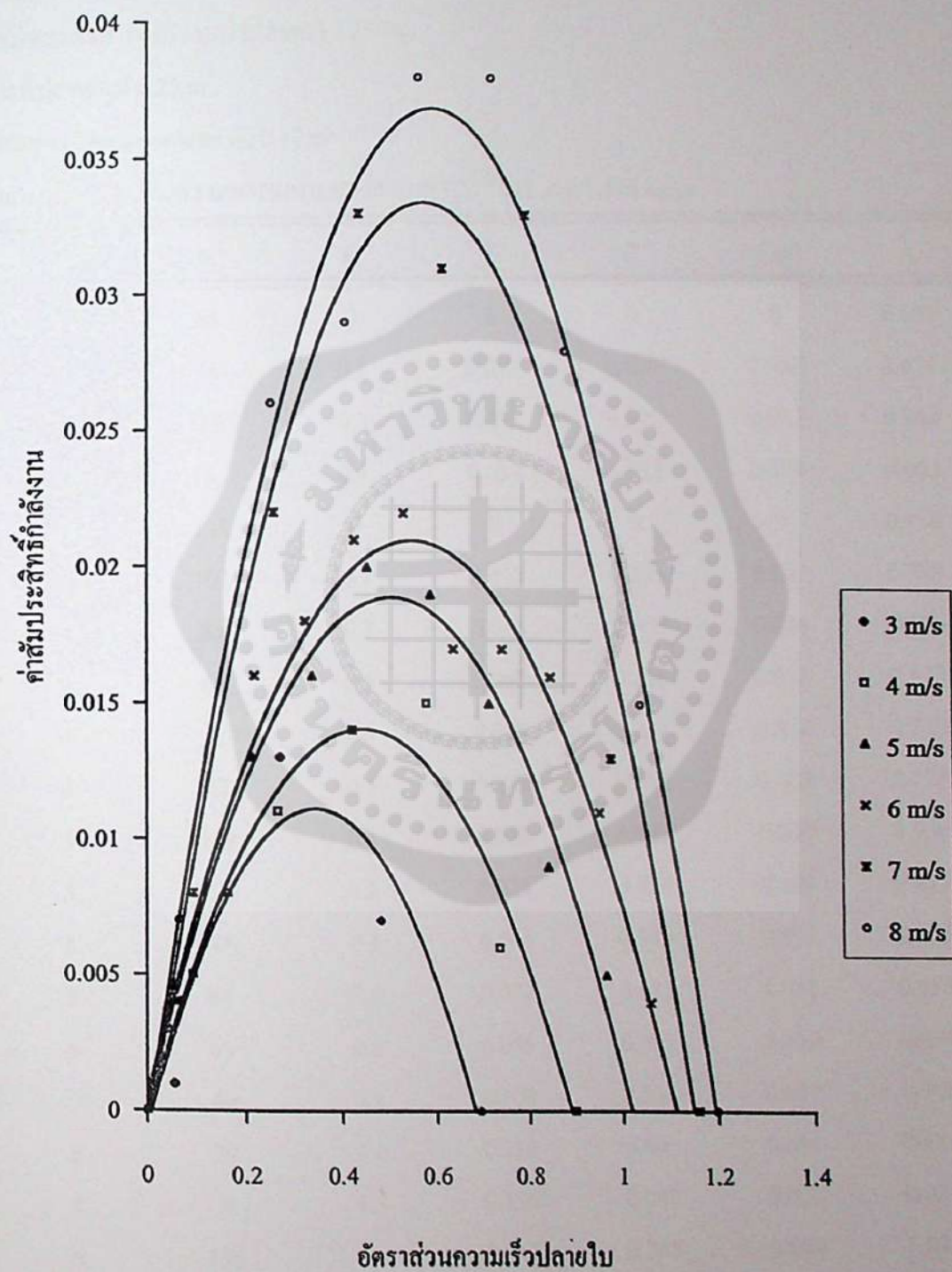
V	N	F	T	P	Cp	λ
3	66	0	0	0	0	0.693
3	46	0.1	0.012	0.058	0.007	0.482
3	26	0.3	0.038	0.103	0.013	0.272
3	6	0.4	0.050	0.033	0.004	0.066
4	114	0	0	0	0	0.898
4	94	0.1	0.012	0.118	0.006	0.736
4	74	0.3	0.036	0.279	0.015	0.581
4	54	0.4	0.048	0.271	0.014	0.424
4	34	0.5	0.006	0.214	0.011	0.267
4	21	0.6	0.072	0.158	0.008	0.165
5	154	0.1	0.012	0.193	0.005	0.966
5	134	0.2	0.024	0.337	0.009	0.842
5	114	0.4	0.048	0.573	0.015	0.716
5	94	0.6	0.072	0.708	0.019	0.591
5	74	0.8	0.096	0.744	0.020	0.465
5	54	0.9	0.108	0.610	0.016	0.339
5	34	1.1	0.132	0.470	0.013	0.214
5	5	1.3	0.156	0.087	0.002	0.033
6	202	0.1	0.012	0.254	0.004	1.060
6	182	0.3	0.036	0.686	0.011	0.953
6	162	0.5	0.060	1.017	0.016	0.848
6	142	0.6	0.072	1.070	0.017	0.744

ตารางที่ 4.7 (ต่อ)

V	N	F	T	P	C _p	λ
6	122	0.7	0.084	1.073	0.017	0.639
6	102	1.1	0.132	1.409	0.022	0.534
6	82	1.3	0.156	1.339	0.021	0.429
6	62	1.5	0.180	1.168	0.018	0.325
6	42	1.6	0.192	0.844	0.013	0.220
6	10	1.7	0.204	0.204	0.003	0.050
7	258	0	0	0	0	1.158
7	218	0.5	0.060	1.369	0.013	0.978
7	178	1.5	0.180	3.354	0.033	0.799
7	138	1.8	0.216	3.120	0.031	0.619
7	98	2.7	0.324	3.323	0.033	0.440
7	58	3.1	0.372	2.258	0.022	0.260
7	21	3.3	0.396	0.862	0.008	0.093
8	305	0	0	0	0	1.197
8	265	0.7	0.084	2.330	0.015	1.041
8	225	1.5	0.180	4.239	0.028	0.884
8	185	2.5	0.300	5.809	0.038	0.726
8	145	3.2	0.384	5.828	0.038	0.569
8	105	3.3	0.396	4.352	0.029	0.412
8	65	4.8	0.576	3.919	0.026	0.255
8	16	5	0.600	1.035	0.007	0.065



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกําลังงานกับความเร็วยรอบที่ความเร็วลมต่างๆของกังหันลม แบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มีมุม 15 องศา



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิ์กำลังงานกับอัตราส่วนความเร็ว
ความเร็วปลายใบของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มุม 15 องศา

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบกังหันลม

ประเภท กังหันลมใบแกว่งได้ 3 ใบ

รายละเอียด

รัศมีของกังหัน (m) / มุมใบ(องศา) 0.25/30

พื้นที่ปะทะลม 0.25 m^2

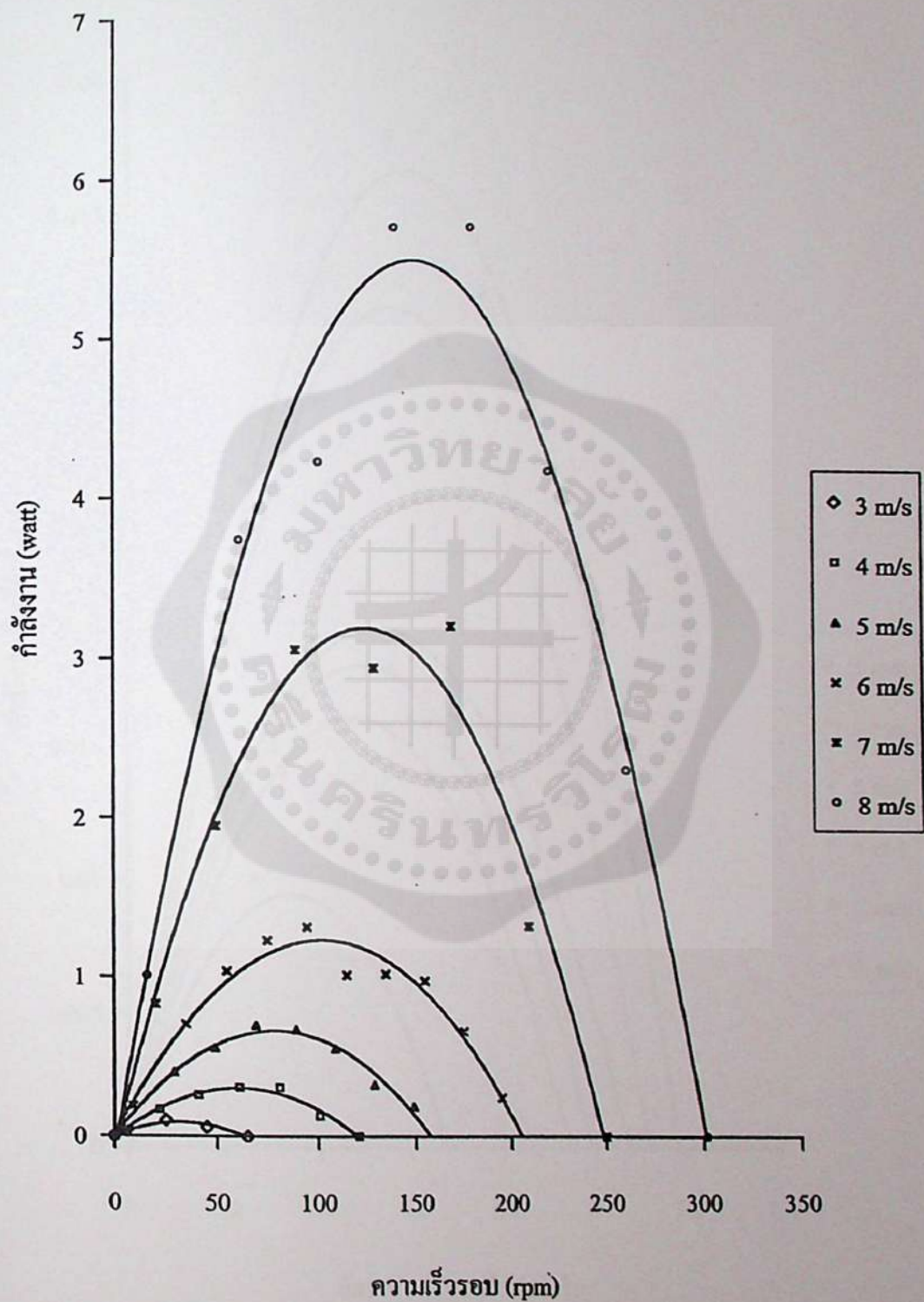
รัศมีของ Dynamometer (r) 0.12 m

อุณหภูมิ/ความดัน/ความหนาแน่น ของอากาศ : $25^\circ\text{C}/1 \text{ atm}/1.185 \text{ kg/m}^3$

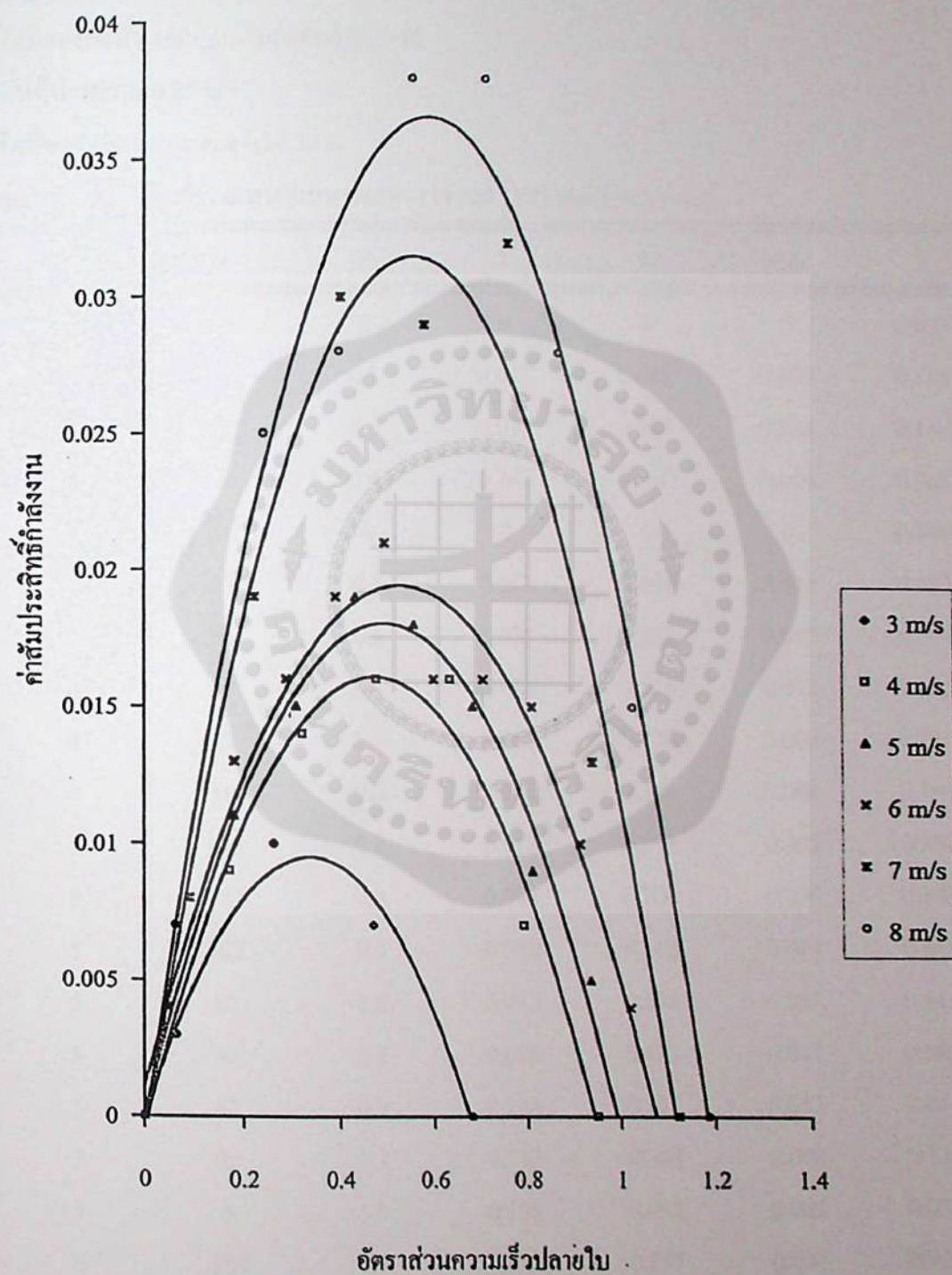
V	N	F	T	P	Cp	λ
3	65	0	0	0	0	0.681
3	45	0.1	0.012	0.057	0.007	0.471
3	25	0.3	0.038	0.099	0.012	0.262
3	6	0.4	0.050	0.032	0.004	0.063
4	121	0	0	0	0	0.950
4	101	0.1	0.012	0.127	0.007	0.793
4	81	0.3	0.036	0.305	0.016	0.636
4	61	0.4	0.048	0.306	0.016	0.479
4	41	0.5	0.006	0.257	0.014	0.322
4	22	0.6	0.072	0.166	0.009	0.173
5	149	0.1	0.012	0.187	0.005	0.936
5	129	0.2	0.024	0.324	0.009	0.811
5	109	0.4	0.048	0.548	0.015	0.685
5	89	0.6	0.072	0.671	0.018	0.559
5	69	0.8	0.096	0.693	0.019	0.434
5	49	0.9	0.108	0.554	0.015	0.308
5	29	1.1	0.132	0.401	0.011	0.182
5	5	1.3	0.156	0.082	0.002	0.031
6	195	0.1	0.012	0.245	0.004	1.021
6	175	0.3	0.036	0.659	0.010	0.916
6	155	0.5	0.060	0.973	0.015	0.812
6	135	0.6	0.072	1.017	0.016	0.707

ตารางที่ 4.8 (ต่อ)

V	N	F	T	P	C _p	λ
6	115	0.7	0.084	1.011	0.016	0.602
6	95	1.1	0.132	1.313	0.021	0.497
6	75	1.3	0.156	1.225	0.019	0.393
6	55	1.5	0.180	1.036	0.016	0.288
6	35	1.6	0.192	0.703	0.011	0.183
6	9	1.7	0.204	0.192	0.003	0.047
7	25	0	0	0	0	1.122
7	210	0.5	0.060	1.319	0.013	0.942
7	170	1.5	0.180	3.203	0.032	0.763
7	130	1.8	0.216	2.939	0.029	0.583
7	90	2.7	0.324	3.052	0.030	0.404
7	50	3.1	0.372	1.947	0.019	0.224
7	20	3.3	0.396	0.829	0.008	0.090
8	302	0	0	0	0	1.186
8	262	0.7	0.084	2.304	0.015	1.029
8	222	1.5	0.180	4.182	0.028	0.872
8	182	2.5	0.300	5.715	0.038	0.715
8	142	3.2	0.384	5.707	0.038	0.558
8	102	3.3	0.396	4.228	0.028	0.401
8	62	4.8	0.576	3.738	0.025	0.243
8	16	5	0.600	1.005	0.007	0.063



รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับความเร็วรอบที่ความเร็วลมต่างๆของกังหันลม แบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มุม 30 องศา



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพกำลังงานกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มุม 30 องศา

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบกังหันลม

ประเภท กังหันลมใบแกว่งได้ 3 ใบ

รายละเอียด

รัศมีของกังหัน (m) / มุมใบ(องศา) 0.25/45

พื้นที่ปะทะลม 0.25 m^2

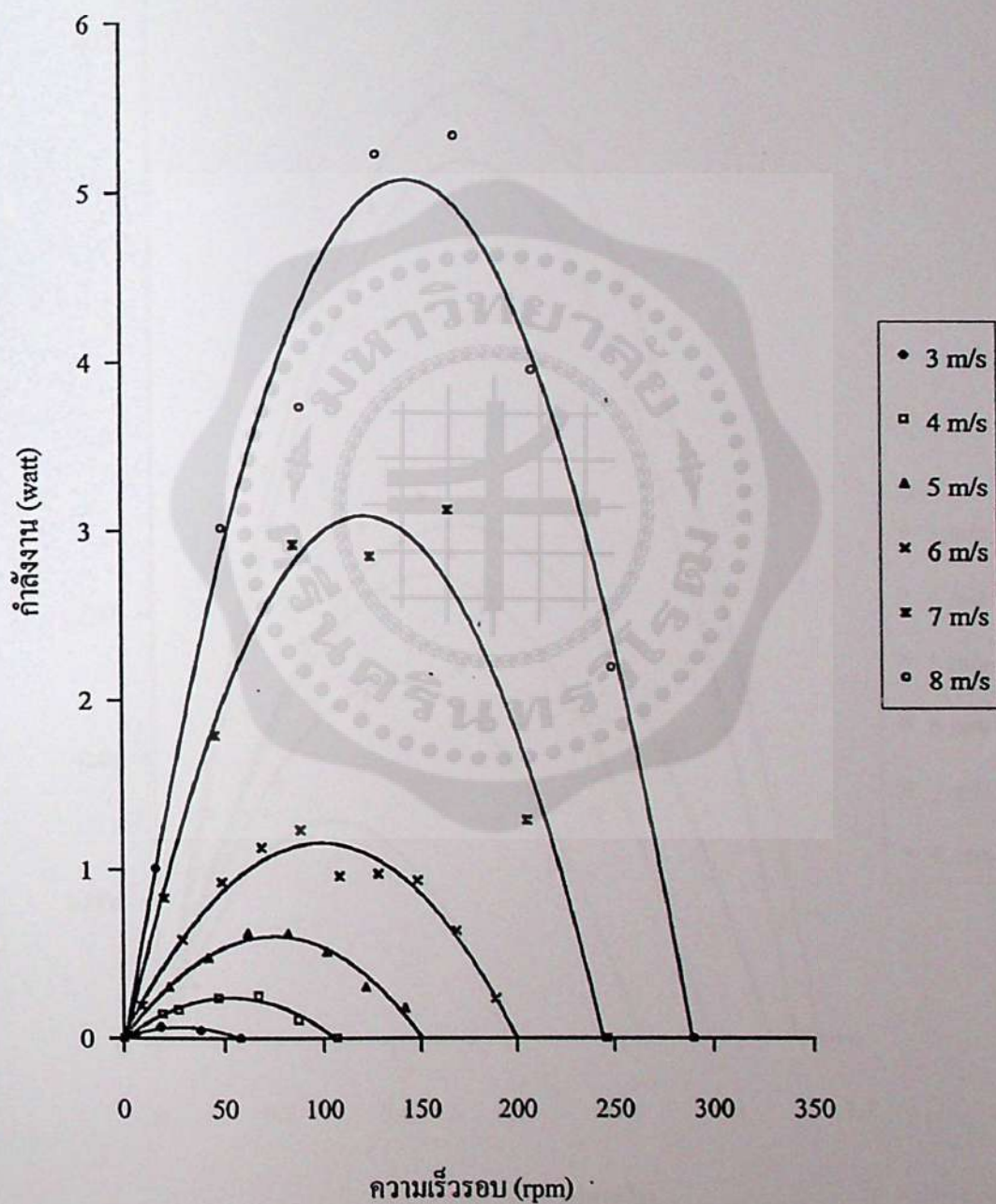
รัศมีของ Dynamometer (r) 0.12 m

อุณหภูมิ/ความดัน/ความหนาแน่น ของอากาศ : $25^\circ\text{C}/1 \text{ atm}/1.185 \text{ kg/m}^3$

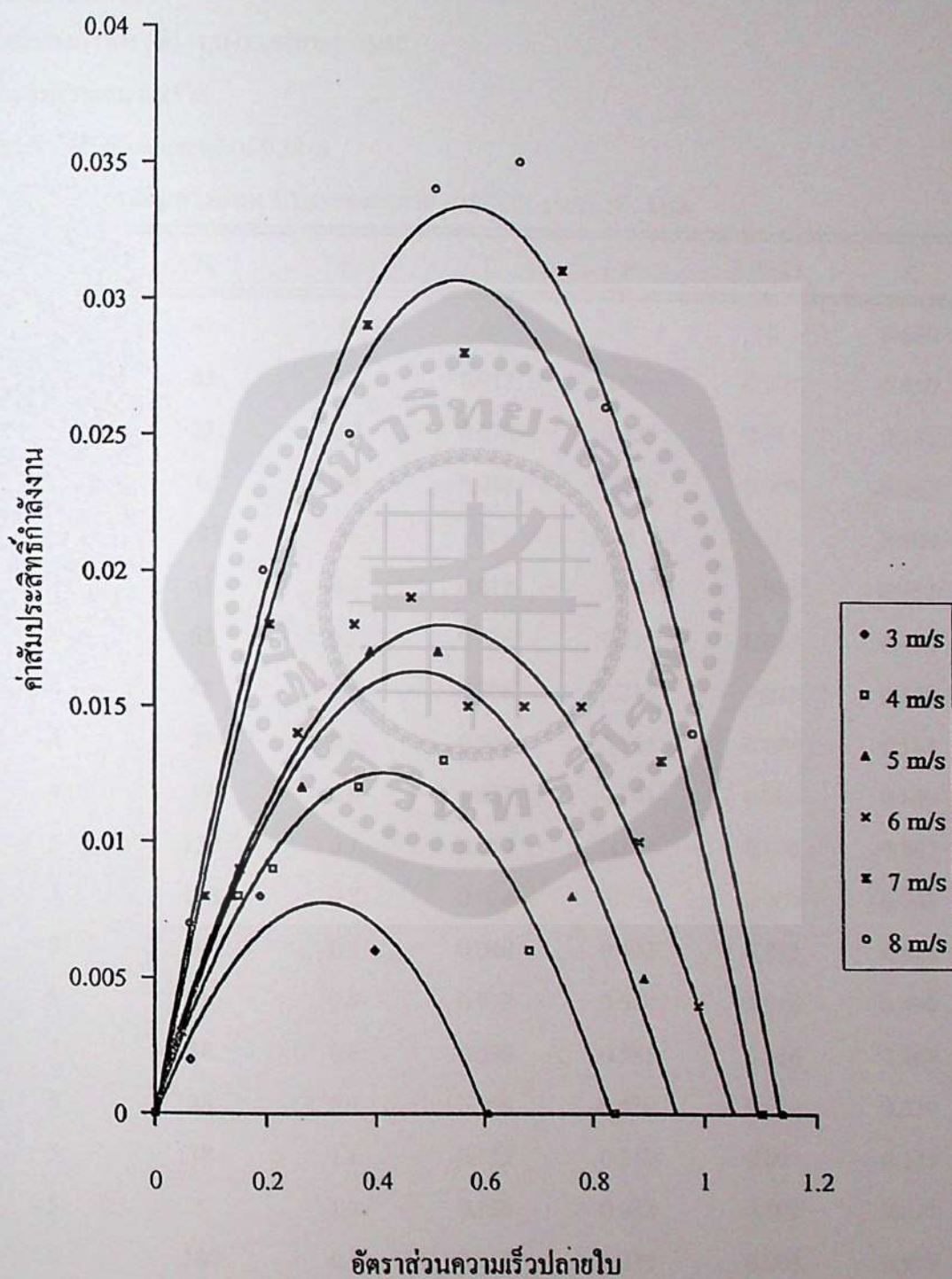
V	N	F	T	P	Cp	λ
3	58	0	0	0	0	0.607
3	38	0.1	0.012	0.048	0.006	0.398
3	18	0.3	0.036	0.068	0.008	0.188
3	6	0.4	0.048	0.030	0.004	0.063
4	107	0	0	0	0	0.840
4	87	0.1	0.012	0.109	0.006	0.683
4	67	0.3	0.036	0.252	0.013	0.526
4	47	0.4	0.048	0.236	0.012	0.369
4	27	0.5	0.006	0.170	0.009	0.212
4	19	0.6	0.072	0.143	0.008	0.149
5	142	0.1	0.012	0.178	0.005	0.892
5	122	0.2	0.024	0.306	0.008	0.767
5	102	0.4	0.048	0.512	0.014	0.641
5	82	0.6	0.072	0.618	0.017	0.515
5	62	0.8	0.096	0.623	0.017	0.390
5	42	0.9	0.108	0.475	0.013	0.264
5	22	1.1	0.132	0.304	0.008	0.138
5	5	1.3	0.156	0.082	0.002	0.031
6	189	0.1	0.012	0.237	0.004	0.990
6	169	0.3	0.036	0.637	0.010	0.885
6	149	0.5	0.060	1.015	0.015	0.780
6	129	0.6	0.072	0.972	0.015	0.675

ตารางที่ 4.9 (ต่อ)

V	N	F	T	P	Cp	λ
6	109	0.7	0.084	1.958	0.015	0.571
6	89	1.1	0.132	1.230	0.019	0.466
6	69	1.3	0.156	1.127	0.018	0.361
6	49	1.5	0.180	0.923	0.014	0.257
6	29	1.6	0.192	0.583	0.009	0.152
6	9	1.7	0.204	0.192	0.003	0.047
7	246	0	0	0	0	1.102
7	206	0.5	0.060	1.294	0.013	0.925
7	166	1.5	0.180	3.127	0.031	0.745
7	126	1.8	0.216	2.849	0.028	0.565
7	86	2.7	0.324	2.916	0.029	0.386
7	46	3.1	0.372	1.791	0.018	0.206
7	20	3.3	0.396	0.829	0.008	0.090
8	290	0	0	0	0	1.139
8	250	0.7	0.084	2.198	0.014	0.982
8	210	1.5	0.180	3.956	0.026	0.825
8	170	2.5	0.300	5.338	0.035	0.668
8	130	3.2	0.384	5.225	0.034	0.511
8	90	3.3	0.396	4.730	0.025	0.353
8	50	4.8	0.576	3.014	0.020	0.196
8	16	5	0.600	1.005	0.007	0.063



รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับความเร็วรอบที่ความเร็ว
ลมต่างๆของกังหันลม แบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มุม 45 องศา



รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิ์กำลังงานกับอัตราส่วนความเร็ว
ความเร็วปลายใบของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มีมุม 45 องศา

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบกังหันลม

ประเภท กังหันลมใบแกว่งได้ 3 ใบ

รายละเอียด

รัศมีของกังหัน (m) / มุมใบ(องศา) 0.25/60

พื้นที่ปะทะลม 0.25 m^2

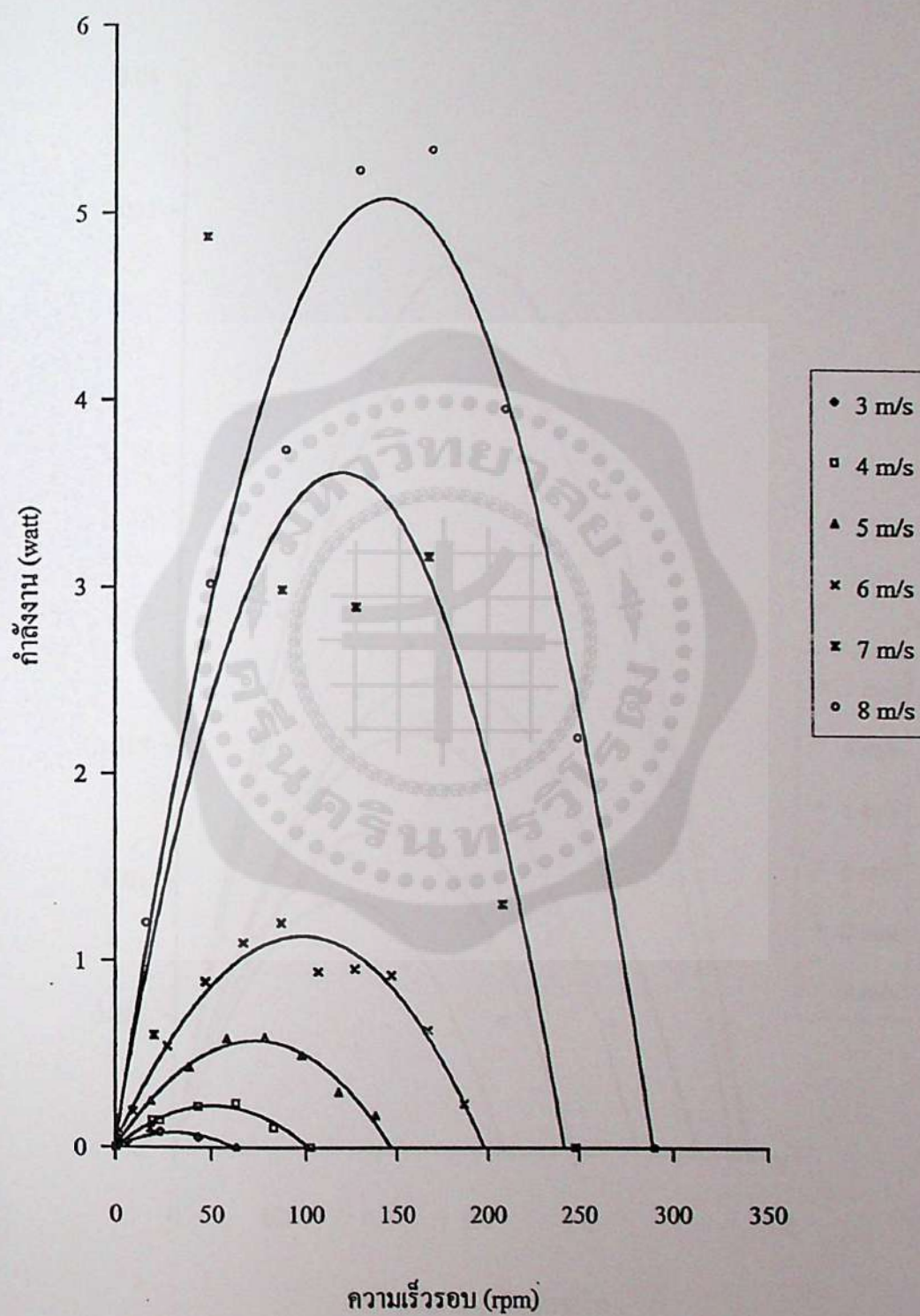
รัศมีของ Dynamometer (r) 0.12 m

อุณหภูมิ/ความดัน/ความหนาแน่น ของอากาศ : $25^\circ\text{C}/1 \text{ atm}/1.185 \text{ kg/m}^3$

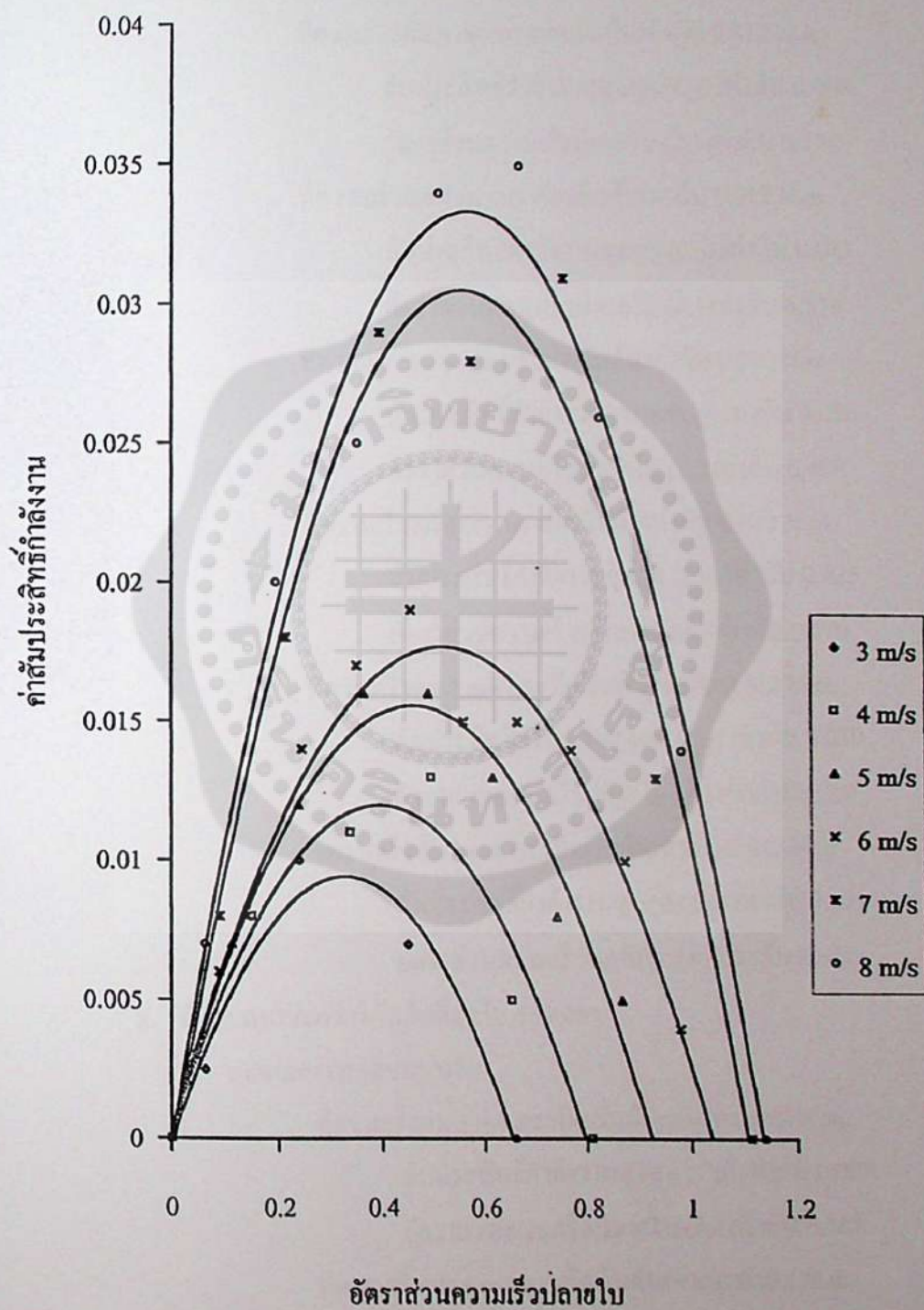
V	N	F	T	P	C _p	λ
3	63	0	0	0	0	0.660
3	43	0.1	0.012	0.054	0.007	0.450
3	23	0.3	0.036	0.087	0.011	0.241
3	6	0.4	0.048	0.030	0.004	0.063
4	103	0	0	0	0	0.809
4	83	0.1	0.012	0.104	0.005	0.652
4	63	0.3	0.036	0.237	0.013	0.495
4	43	0.4	0.048	0.216	0.011	0.338
4	23	0.5	0.006	0.144	0.008	0.181
4	19	0.6	0.072	0.143	0.008	0.149
5	138	0.1	0.012	0.173	0.005	0.867
5	118	0.2	0.024	0.296	0.008	0.741
5	98	0.4	0.048	0.492	0.013	0.616
5	78	0.6	0.072	0.588	0.016	0.490
5	58	0.8	0.096	0.583	0.016	0.364
5	38	0.9	0.108	0.430	0.012	0.239
5	18	1.1	0.132	0.249	0.007	0.113
5	5	1.3	0.156	0.082	0.002	0.031
6	187	0.1	0.012	0.235	0.004	0.979
6	167	0.3	0.036	0.629	0.010	0.874
6	147	0.5	0.060	0.923	0.014	0.770
6	127	0.6	0.072	0.957	0.015	0.665

ตารางที่ 4.10 (ต่อ)

V	N	F	T	P	Cp	λ
6	107	0.7	0.084	0.941	0.015	0.560
6	87	1.1	0.132	1.202	0.019	0.456
6	67	1.3	0.156	1.094	0.017	0.351
6	47	1.5	0.180	0.885	0.014	0.246
6	27	1.6	0.192	0.543	0.008	0.141
6	19	1.7	0.204	0.192	0.003	0.047
7	248	0	0	0	0	1.113
7	208	0.5	0.060	1.306	0.013	0.934
7	168	1.5	0.180	3.165	0.031	0.754
7	128	1.8	0.216	2.894	0.028	0.574
7	88	2.7	0.324	2.984	0.029	0.395
7	48	3.1	0.372	1.869	0.018	0.215
7	20	3.3	0.396	0.829	0.008	0.090
8	290	0	0	0	0	1.139
8	250	0.7	0.084	2.198	0.014	0.982
8	210	1.5	0.180	3.956	0.026	0.825
8	170	2.5	0.300	5.338	0.035	0.668
8	130	3.2	0.384	5.225	0.034	0.511
8	90	3.3	0.396	3.730	0.025	0.353
8	50	4.8	0.576	3.014	0.020	0.196
8	16	5	0.600	1.005	0.007	0.063



รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับความเร็วรอบที่ความเร็ว
ลมต่างๆของกังหันลม แบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มุม 60 องศา



รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพกำลังงานกับอัตราส่วนความเร็ว
ความเร็วปลายใบของกังหันลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ ที่มีมุม 60 องศา

ผลการทดสอบกังหันแบบใบแฉ่งได้ 2 ใบ

1. กังหันลมใบแฉ่งได้ 2 ใบที่มุมใบ 0 องศา

จากผลการทดสอบพบว่า

- ที่ความเร็วลม 3 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
- สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.008
- อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.178
- ที่ความเร็วลม 4 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
- สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.023
- อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.534
- ที่ความเร็วลม 5 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
- สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.026
- อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.408
- ที่ความเร็วลม 6 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
- สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.025
- อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.670
- ที่ความเร็วลม 7 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
- สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.030
- อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.521
- ที่ความเร็วลม 8 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
- สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.031
- อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.522

2. กังหันลมใบแฉ่งได้ 2 ใบที่มุมใบ 15 องศา

จากผลการทดสอบพบว่า

- ที่ความเร็วลม 3 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
- สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.009
- อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.187
- ที่ความเร็วลม 4 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
- สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.024
- อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.474
- ที่ความเร็วลม 5 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.028

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.425

ที่ความเร็วลม 6 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.026

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.624

ที่ความเร็วลม 7 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.031

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.532

ที่ความเร็วลม 8 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.032

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.693

3. กังหันลมใบกว้างได้ 2 ใบที่มุมใบ 30 องศา

จากผลการทดสอบพบว่า

ที่ความเร็วลม 3 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.008

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.182

ที่ความเร็วลม 4 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.023

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.534

ที่ความเร็วลม 5 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.027

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.421

ที่ความเร็วลม 6 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.026

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.684

ที่ความเร็วลม 7 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.030

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.517

ที่ความเร็วลม 8 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.032

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.686

4. กังหันลมใบแกว่งได้ 2 ใบที่มุมใบ 45 องศา

จากผลการทดสอบพบว่า

ที่ความเร็วลม 3 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.007

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.217

ที่ความเร็วลม 4 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.021

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.497

ที่ความเร็วลม 5 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.025

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.384

ที่ความเร็วลม 6 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.025

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.664

ที่ความเร็วลม 7 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.029

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.496

ที่ความเร็วลม 8 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.030

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.645

5. กังหันลมใบแกว่งได้ 2 ใบที่มุมใบ 60 องศา

จากผลการทดสอบพบว่า

ที่ความเร็วลม 3 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.008

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.169

ที่ความเร็วลม 4 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.021

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.410

ที่ความเร็วลม 5 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.025
อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.384
ที่ความเร็วลม 6 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.025
อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.599
ที่ความเร็วลม 7 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.026
อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.450
ที่ความเร็วลม 8 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.030
อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.645

ผลการทดสอบกังหันแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ

1. กังหันลมใบแกว่งได้ 3 ใบที่มุมใบ 0 องศา

จากผลการทดสอบพบว่า

ที่ความเร็วลม 3 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.011
อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.241
ที่ความเร็วลม 4 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.014
อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.555
ที่ความเร็วลม 5 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.018
อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.408
ที่ความเร็วลม 6 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.020
อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.476
ที่ความเร็วลม 7 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.031

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.754
 ที่ความเร็วลม 8 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
 สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.036
 อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.691

2. กังหันลมใบแกว่งได้ 3 ใบที่มุมใบ 15 องศา

จากผลการทดสอบพบว่า

ที่ความเร็วลม 3 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
 สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.013
 อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.272
 ที่ความเร็วลม 4 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
 สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.015
 อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.581
 ที่ความเร็วลม 5 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
 สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.020
 อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.465
 ที่ความเร็วลม 6 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
 สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.022
 อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.534
 ที่ความเร็วลม 7 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
 สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.033
 อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.799
 ที่ความเร็วลม 8 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
 สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.038
 อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.726

3. กังหันลมใบแกว่งได้ 3 ใบที่มุมใบ 30 องศา

จากผลการทดสอบพบว่า

ที่ความเร็วลม 3 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
 สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.012
 อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.626
 ที่ความเร็วลม 4 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.016

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.636

ที่ความเร็วลม 5 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.019

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.434

ที่ความเร็วลม 6 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.021

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.497

ที่ความเร็วลม 7 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.032

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.763

ที่ความเร็วลม 8 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.038

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.558

4. กังหันลมใบแกว่งได้ 3 ใบที่มุมใบ 45 องศา

จากผลการทดสอบพบว่า

ที่ความเร็วลม 3 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.008

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.188

ที่ความเร็วลม 4 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.013

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.526

ที่ความเร็วลม 5 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.017

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.515

ที่ความเร็วลม 6 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.019

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.466

ที่ความเร็วลม 7 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.031

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.745
 ที่ความเร็วลม 8 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
 สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.035
 อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.668

5. กังหันลมใบแกว่งได้ 3 ใบที่มุมใบ 60 องศา

จากผลการทดสอบพบว่า

ที่ความเร็วลม 3 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
 สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.011
 อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.241
 ที่ความเร็วลม 4 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
 สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.013
 อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.495
 ที่ความเร็วลม 5 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
 สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.016
 อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.490
 ที่ความเร็วลม 6 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
 สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.019
 อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.456
 ที่ความเร็วลม 7 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
 สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.029
 อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.395
 ที่ความเร็วลม 8 m/s แรงบิดเริ่มต้นเท่ากับ 0.012 N.m
 สัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_p) เท่ากับ 0.035
 อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) เท่ากับ 0.668

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

ตารางที่ 5.1 แสดงค่า $C_{p_{max}}$ และ λ จากการทดลอง

จำนวนใบ	มุมแฉ่ง (องศา)	ความเร็วลม (m/s)	ความเร็วรอบ (rpm)	$C_{p_{max}}$	λ
2	30	8	175	0.032	0.686
3	30	8	142	0.038	0.558

1. จากผลการทดลองปรากฏว่า

กังหันลมแบบใบแฉ่งได้ 2 ใบ จะให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด 0.032 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 0.686 ที่ องศาการแฉ่ง 30 องศา

กังหันลมแบบใบแฉ่งได้ 3 ใบ จะให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด 0.038 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 0.558 ที่ องศาการแฉ่ง 30 องศา

2. จากผลการทดสอบกังหันลมชาโวเนิส แบบใบแฉ่งได้ 2 ใบ และ กังหันลมชาโวเนิส แบบใบแฉ่งได้ 3 ใบ พบว่าที่ความเร็วรอบเดียวกันและมุมองศาการแฉ่งของใบเดียวกัน กังหันลม แบบใบแฉ่งได้ 3 ใบ ให้ค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบมากกว่ากังหันลมแบบใบแฉ่งได้ 2 ใบ

3. จากการศึกษาสมรรถนะของกังหันลมชาโวเนิส แบบใบแฉ่งได้และแฉ่งไม่ได้พบว่าเมื่อกังหันลมใบแฉ่งได้เริ่มหมุนใบจะเกิดการแฉ่งทำให้กังหันเริ่มหมุนได้เร็วกว่าแบบใบแฉ่งไม่ได้ แต่เมื่อความเร็วลมที่ใบของกังหันจะแนบชิดกับเพลาลูกกลิ้งจะเกิดกับกังหันแบบใบแฉ่งไม่ได้ แสดงให้เห็นว่ากังหันลมใบแฉ่งได้จะให้แรงบิดเริ่มต้นในการออกตัวดีกว่ากังหันใบแฉ่งไม่ได้

4. จากผลการทดสอบกังหันลมชาโวนีเยส แบบใบแกว่งได้ 2 ใบ และ กังหันลมชาโวนีเยส แบบใบแกว่งได้ 3 ใบ พบว่ากังหันลมแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานน้อยกว่ากังหันลมแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ นั้น แสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดที่ได้มีค่าลดลงที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบที่มากขึ้นไปด้วย

5. เมื่อเพิ่มจำนวนใบของกังหันลมจาก 2 ใบ เป็น 3 ใบ จะมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานและค่าแรงบิดเริ่มต้นลดน้อยลงแต่ค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบกลับมีค่าสูงขึ้น

ข้อเสนอแนะ

1. การนำข้อมูลทดสอบไปวิเคราะห์ร่วมกับอุปกรณ์ขนน้ำแบบต่างๆ เช่น ปัมป์สูบน้ำ ระหัดวิดน้ำ
2. ศึกษาและวิจัยการนำกังหันลมไปใช้ให้เหมาะสมกับสภาพความเร็วลม ในแต่ละพื้นที่ของประเทศ
3. ทดสอบกังหันลมที่มีจำนวนใบพัดแตกต่างจากจำนวนใบพัดที่ออกแบบไว้ให้มากขึ้นโดยเปลี่ยนตามรัศมีความโค้งของใบ เพื่อหาค่าแรงบิดเริ่มต้นและสัมประสิทธิ์กำลังงาน

บรรณานุกรม

1. ก่อเกียรติ ศรีบัณฑิตมงคล, เครื่องจักรกลอัตโนมัติ, โครงการวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ. 2540.
2. จำรูญ คันดิพิสาลกุล, กลศาสตร์ของแข็ง : ศูนย์ส่งเสริมกรุงเทพฯ.
3. เฉลิมพล ดันดิปาลีพันธ์, ที่จอดรถสองชั้น, โครงการวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ. 2540.
4. ชนะ กสิภาร, ความแข็งแรงของวัสดุ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ :: โรงพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัด ชวนพิมพ์, 2538.
5. ตารางเหล็กสำหรับผู้รับเหมาก่อสร้างและวิศวกร : Tee Group of Engineers.
6. ศศ.มนตรี พิรุณเกษตร, กลศาสตร์ของวัสดุ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ : โรงพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัด สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.
7. รศ.สมาน เจริญกิจพูลผล และ มนตรี พิรุณเกษตร, กลศาสตร์ของไหล ฉบับเสริมประสบการณ์, บริษัทซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด.
8. ดร.วิวิธ อึ้งภากรณ์ และ ชาญ ถนัดงาน, การออกแบบเครื่องจักรกลเล่ม 2, บริษัทซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด.
9. Ferdinand P Beer and E.Russel Johnston,JR. Mechanics of Materials : Mcgraw – Hill International edition,1992.
10. Frank M. White . Fluid Mechanics : Mcgraw – Hill International edition,1994.
11. Robert C. Juvinall and Kurt M. Marshek. Fundamentals of Machine Component Design : John Wiley & sons.



ภาคผนวกที่ 1

แสดงตารางที่ใช้สำหรับการออกแบบ และการคำนวณ

ตารางภาคผนวกที่ 1.1 แสดงคุณสมบัติของโลหะ

Physical Properties of Common Metals

Metal	Modulus of Elasticity, E		Modulus of Rigidity, G		Poisson's Ratio, ν	Unit Weight, w (lb/in. ³)	Density, ρ (Mg/m ³)	Coefficient of Thermal Expansion, α		Thermal Conductivity		Specific Heat	
	Mpsi	GPa	Mpsi	GPa				10 ⁻⁶ /°F	10 ⁻⁶ /°C	Btu/h-ft-°F	W/m-°C	Btu/lbm-°F	J/kg-°C
Aluminum alloy	10.4 ^a	72	3.9	27	0.32	0.10	2.8	12.0	22	100	173	0.22	920
Beryl. copper	18.5	127	7.2	50	0.29	0.30	8.3	9.3	17	85	147	0.10	420
Brass, Bronze	16	110	6.0	41	0.33	0.31	8.7	10.5	19	45	78	0.10	420
Copper	17.5	121	6.6	46	0.33	0.32	8.9	9.4	17	220	381	0.10	420
Iron, gray cast ^b	15	103	6.0	41	0.26	0.26	7.2	6.4	12	29	50	0.13	540
Magnesium alloy	6.5	45	2.4	17	0.35	0.065	1.8	14.5	26	55	95	0.28	1170
Nickel alloy	30	207	11.5	79	0.30	0.30	8.3	7.0	13	12	21	0.12	500
Steel, carbon	30	207	11.5	79	0.30	0.28	7.7	6.7	12	27	47	0.11	460
Steel, alloy	30	207	11.5	79	0.30	0.28	7.7	6.3	11	22	38	0.11	460
Steel, stainless	27.5	190	10.6	73	0.30	0.28	7.7	8.0	14	12	21	0.11	460
Titanium alloy	16.5	114	6.2	43	0.33	0.16	4.4	4.9	9	7	12	0.12	500
Zinc alloy	12	83	4.5	31	0.33	0.24	6.6	15.0	27	64	111	0.11	460

^aValues given are representative. Exact values may vary with composition and processing, sometimes greatly.

^bSee Appendix C-3 for more detailed elastic properties of cast irons.

Note: See Appendix C-18 for physical properties of some plastics.

ตารางภาคผนวกที่ 1.2 แสดงคุณสมบัติรูปตัวยู

Channel JIS G 3192

Standard Sectional Dimension mm					Sectional Area cm ²	Unit Weight kg/m	Reference							
HxB	t ₁	t ₂	r ₁	r ₂			Position of Centre of Gravity cm		Geometrical Moment of Inertia cm ⁴		Radius of Gyration of Area cm		Modulus of Section cm ³	
							C _x	C _y	I _x	I _y	I _x	I _y	Z _x	Z _y
75 x 40	5	7	8	4	8.818	13.692	0	1.28	75.3	12.2	2.92	1.17	20.1	4.47
100 x 50	5	7.5	8	4	11.92	17.936	0	1.54	188	26.0	3.97	1.48	37.6	7.52
125 x 65	6	8	8	4	17.11	25.447	0	1.90	424	61.8	4.98	1.90	67.8	13.4
150 x 75	6.5	10	10	5	23.71	35.554	0	2.28	861	117	6.03	2.22	115	22.4
150 x 75	9	12.5	15	7.5	30.59	45.053	0	2.31	1050	147	5.86	2.19	140	28.3
180 x 75	7	10.5	11	5.5	27.20	40.247	0	2.13	1380	131	7.12	2.19	153	24.3
200 x 80	7.5	11	12	6	31.33	46.654	0	2.21	1950	168	7.88	2.32	195	29.1
200 x 90	8	13.5	14	7	38.65	57.033	0	2.74	2490	277	8.02	2.68	249	44.2
250 x 90	9	13	14	7	44.07	65.382	0	2.40	4180	294	9.74	2.58	334	44.5
250 x 90	11	14.5	17	8.5	51.17	75.022	0	2.40	4680	329	9.66	2.54	374	49.9
300 x 90	9	13	14	7	48.67	71.444	0	2.22	6440	309	11.5	2.52	429	45.7
300 x 90	10	15.5	19	9.5	55.74	84.837	0	2.34	7410	360	11.5	2.54	494	54.1
300 x 90	12	16	19	9.5	61.90	98.674	0	2.28	7870	379	11.3	2.48	525	56.4
380 x 100	10.5	16	18	9	69.39	102.571	0	2.41	14500	535	14.5	2.78	763	70.5
380 x 100	13	16.5	18	9	78.00	116.004	0	2.33	16300	605	14.1	2.67	823	73.6
380 x 100	13	20	24	12	86.71	127.361	0	2.54	17000	600	14.3	2.76	920	87.8

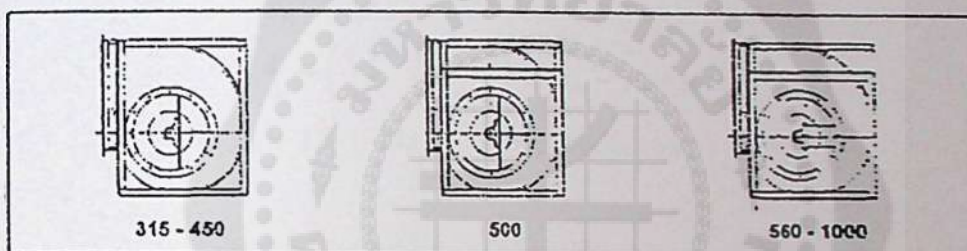
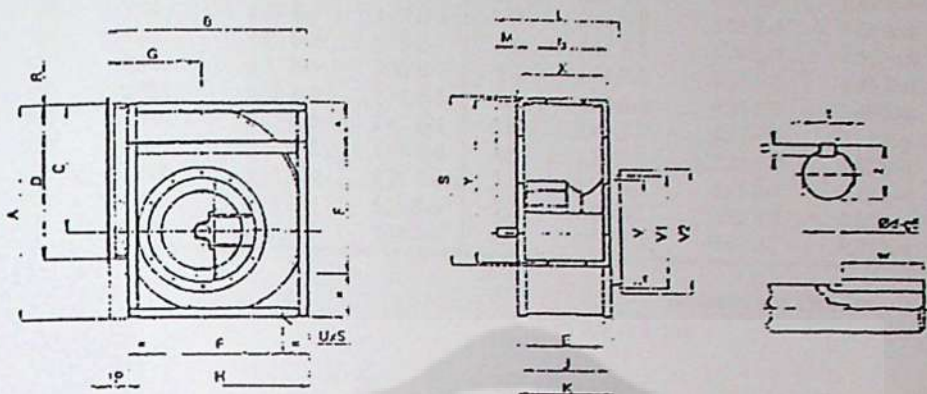
ตารางภาคผนวกที่ 1.3 แสดงคุณลักษณะของ Blower ต่างๆ

		OVERALL DIMENSION - BSA "T" SERIES																	
		60°						270°						360°					
		CW						CW						CW					
		CCW						CCW						CCW					
Model	Motor Frame Size	C*	L	W	H	Weight (kg)		C*	L	W	H	Weight (kg)		C*	L	W	H	Weight (kg)	
315	112	655	1020	460	818	32.0		654	1020	460	818	32.0		632	1000	460	858	30.2	
	132	615	1100	480	818	36.4		635	1100	480	818	32.4		576	1160	480	868	34.8	
355	132	655	1100	475	804	50.0		645	1180	475	804	67.0		613	1290	460	818	50.4	
	160	721	1300	495	804	65.8		742	1300	495	804	65.8		675	1400	495	818	51.1	
400	132	702	1250	834	778	61.0		739	1250	834	778	61.0		698	1300	836	620	61.2	
	160	768	1350	836	778	61.5		796	1350	836	778	61.5		717	1450	836	690	62.0	
450	132	752	1300	873	897	65.8		800	1300	873	897	65.8		705	1420	873	705	66.4	
	160	816	1460	873	897	86.7		855	1490	873	897	86.7		764	1550	873	795	67.2	
600	190	864	1500	617	968	87.5		911	1500	617	968	87.5		811	1650	617	650	84.7	
560	160	928	1500	674	1040	111.3		967	1600	674	1060	111.3		870	1750	674	842	112.4	
630	160	992	1700	908	1207	130.4		1075	1700	908	1207	130.4		941	1900	736	1046	132.0	
	180	1078	1800	767	1382	221.5		1185	1850	767	1382	221.5		1011	2000	767	1200	223.3	
710	160	1119	1950	787	1552	222.7		1221	1950	787	1552	222.7		1050	2100	787	1300	224.8	
	200	1163	2000	787	1582	233.3		1236	2000	787	1582	233.3		1090	2200	787	1290	225.8	
800	100	1051	1700	840	1648	251.3		1133	1700	840	1648	251.3		1070	1900	840	1334	253.8	
	112	1074	1760	840	1648	251.8		1203	1750	840	1648	251.8		1022	1950	840	1334	254.4	
	132	1113	1850	840	1648	263.1		1234	1850	840	1648	263.1		1055	2050	840	1334	255.8	
	160	1175	1950	840	1648	264.4		1270	1950	840	1648	264.4		1109	2200	840	1334	257.4	
	180	1212	2050	840	1648	256.8		1314	2050	840	1648	256.8		1143	2300	840	1334	258.7	
	200	1255	2160	840	1648	260.8		1348	2150	840	1648	260.8		1182	2400	840	1334	259.8	
900	112	1186	1900	916	1728	320.5		1330	1900	916	1728	320.5		1130	2150	916	1488	323.8	
	132	1223	2000	916	1728	321.7		1360	2000	916	1728	321.7		1162	2250	916	1488	324.8	
	160	1278	2150	916	1728	323.6		1412	2150	916	1728	323.6		1210	2350	916	1488	325.0	
	180	1320	2200	916	1728	324.2		1445	2200	916	1728	324.2		1245	2400	916	1488	327.0	
1000	200	1351	2360	916	1728	325.4		1479	2300	916	1728	325.4		1282	2550	916	1488	328.5	
	132	1319	2150	866	1890	371.4		1488	2150	866	1890	371.4		1256	2400	866	1620	374.5	
	160	1376	2250	866	1890	372.7		1532	2250	866	1890	372.7		1302	2500	866	1620	376.4	
	180	1416	2350	866	1890	373.6		1563	2350	866	1890	373.6		1339	2600	866	1620	377.0	
1120	200	1457	2450	866	1890	375.1		1596	2450	866	1890	375.1		1375	2700	866	1620	378.2	
	132	1426	2300	1161	2133	680.0		1617	2300	1161	2133	680.0		1380	2650	1161	1825	678.4	
	160	1478	2450	1161	2133	673.1		1658	2450	1161	2133	673.1		1426	2750	1161	1825	681.1	
	180	1518	2560	1161	2133	675.7		1688	2550	1161	2133	675.7		1460	2850	1161	1825	683.8	
	200	1559	2650	1161	2133	676.4		1721	2650	1161	2133	676.4		1478	2950	1161	1825	686.8	
	225	1611	2760	1161	2133	681.1		1753	2750	1161	2133	681.1		1522	3050	1161	1825	685.1	
1250	250	1664	2850	1161	2133	683.8		1806	2850	1161	2133	683.8		1609	3160	1161	1825	691.8	
	132	1578	2450	1289	2365	875.9		1607	2450	1289	2365	875.9		1510	2900	1289	2230	855.3	
	160	1630	2650	1289	2365	855.8		1647	2650	1289	2365	855.8		1554	3000	1289	2030	856.8	
	180	1658	2750	1289	2365	861.3		1678	2750	1289	2365	861.3		1567	3100	1289	2230	860.6	
	200	1706	2850	1289	2365	853.9		1697	2850	1289	2365	853.9		1620	3200	1289	2030	863.3	
	225	1758	2950	1289	2365	856.8		1948	2950	1289	2365	866.8		1864	3300	1289	2030	890.0	
1400	250	1810	3050	1289	2365	880.3		1967	3050	1289	2365	880.3		1906	3400	1289	2030	888.7	
	160	1776	2800	1385	2668	1164		2032	2800	1385	2668	1164		1710	3200	1385	2270	1173	
	180	1813	3000	1385	2668	1167		2059	3000	1385	2668	1167		1742	3400	1385	2270	1178	
	200	1861	3260	1385	2668	1168		2068	3050	1385	2668	1168		1773	3500	1385	2270	1180	
	225	1899	3200	1385	2668	1172		2126	3200	1385	2668	1172		1817	3600	1385	2270	1183	
	250	1948	3300	1385	2668	1175		2185	3300	1385	2668	1175		1861	3700	1385	2270	1186	

Note. C* = center distance between fan and motor pulley
The above weight does not include motor and drive unit as it varies with supplier.

ตารางภาคผนวกที่ 1.4 แสดงขนาดพัดลมรุ่นต่างๆ

BSA 315-1000 'T'



Model	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	R	S	T	V1	V2	X	Y	z	aa	ab	ac	ad	ae	af
216	578	518	340	404	204	280	236	480	234	264	430	76	260	35	3	460	315	356	325	234	434	6	7	40	33	30	13x16	
345	654	578	383	452	226	355	280	548	268	302	466	78	284	30	6	506	355	395	435	256	482	12	8	40	36	35	13x13	
400	736	650	432	506	256	355	290	612	296	336	505	90	312	38	5	562	400	436	480	266	536	10	6	50	36	35	13x16	
450	827	726	485	563	268	530	322	661	326	368	543	95	344	45	5	624	450	487	536	314	596	12	6	50	40	40	13x18	
690	915	800	538	635	322	530	352	750	382	402	587	106	378	50	5	664	500	541	662	352	663	12	6	50	40	40	13x18	
840	1030	892	602	714	360	530	390	844	410	460	644	114	416	48	7	770	560	606	648	360	744	14	6	50	50	50	13x18	
630	1157	996	679	800	404	530	434	945	454	504	708	134	460	53	6	856	630	674	716	434	830	14	6	60	50	50	13x16	
710	1302	1120	765	895	452	630	464	1057	502	552	757	134	506	63	7	954	710	751	792	432	926	14	6	60	50	50	17x22	
800	1468	1254	852	1006	506	710	540	1150	556	606	810	134	562	74	7	1062	800	837	886	530	1036	14	6	60	50	50	17x22	
900	1643	1426	971	1130	583	802	604	1319	616	666	866	146	624	85	7	1166	900	934	986	596	1106	14	6	60	60	60	17x22	
1000	1810	1540	1080	1266	636	900	656	1450	652	736	956	146	664	90	9	1322	1000	1042	1086	656	1296	14	11	60	60	60	17x22	

As Dimension in mm

ตารางภาคผนวกที่ 1.5 แสดงคุณสมบัติของอากาศ

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{kg/m}^3$	$\mu, \text{N}\cdot\text{s/m}^2$	$\nu, \text{m}^2/\text{s}$	$T, ^\circ\text{F}$	$\rho, \text{slug/ft}^3$	$\mu, \text{lb}\cdot\text{s/ft}^2$	$\nu, \text{ft}^2/\text{s}$
-40	1.52	1.51 E-5	0.99 E-5	-40	2.94 E-3	3.16 E-7	1.07 E-4
0	1.29	1.71 E-5	1.33 E-5	32	2.51 E-3	3.58 E-7	1.43 E-4
20	1.20	1.80 E-5	1.50 E-5	68	2.34 E-3	3.76 E-7	1.61 E-4
50	1.09	1.95 E-5	1.79 E-5	122	2.12 E-3	4.08 E-7	1.93 E-4
100	0.946	2.17 E-5	2.30 E-5	212	1.84 E-3	4.54 E-7	2.47 E-4
150	0.835	2.38 E-5	2.85 E-5	302	1.62 E-3	4.97 E-7	3.07 E-4
200	0.746	2.57 E-5	3.45 E-5	392	1.45 E-3	5.37 E-7	3.71 E-4
250	0.675	2.75 E-5	4.08 E-5	482	1.31 E-3	5.75 E-7	4.39 E-4
300	0.616	2.93 E-5	4.75 E-5	572	1.20 E-3	6.11 E-7	5.12 E-4
400	0.525	3.25 E-5	6.20 E-5	752	1.02 E-3	6.79 E-7	6.67 E-4
500	0.457	3.55 E-5	7.77 E-5	932	0.89 E-3	7.41 E-7	8.37 E-4

Suggested curve fits for air:

Viscosity and Density
of Air at 1 atm

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad R_{\text{air}} \approx 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

Power law:

$$\frac{\mu}{\mu_0} \approx \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0.7}$$

Sutherland law:

$$\frac{\mu}{\mu_0} \approx \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \left(\frac{T_0 + S}{T + S} \right) \quad S_{\text{air}} \approx 110.4 \text{ K}$$

with $T_0 = 273 \text{ K}$, $\mu_0 = 1.71 \text{ E-5 kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$, and T in kelvins.

ตารางภาคผนวกที่ 1.6 แสดงขนาดของรอยเชื่อม

TABLE 1 - RULE-OF-THUMB FILLET WELD SIZES

PLATE THICKNESS (t)	STRENGTH DESIGN	RIGIDITY DESIGN	
	FULL STRENGTH WELD ($a = 3/4 t$)	50% OF FULL STRENGTH WELD ($a = 3/8 t$)	33% OF FULL STRENGTH WELD ($a = 1/4 t$)
1/4	3/16	3/16*	3/16*
5/16	1/4	3/16*	3/16*
3/8	5/16	3/16*	3/16*
7/16	3/8	3/16	3/16*
1/2	3/8	3/16	3/16*
9/16	7/16	1/4	1/4 *
5/8	1/2	1/4	1/4 *
3/4	9/16	5/16	1/4 *
7/8	5/8	3/8	5/16*
1	3/4	3/8	5/16*
1 1/8	7/8	7/16	5/16*
1 1/4	1	1/2	5/16
1 3/8	1	1/2	3/8
1 1/2	1 1/8	9/16	3/8
1 5/8	1 1/4	5/8	7/16
1 3/4	1 3/8	3/4	7/16
2	1 1/2	3/4	1/2
2 1/8	1 5/8	7/8	9/16
2 1/4	1 3/4	7/8	9/16
2 3/8	1 3/4	1	5/8
2 1/2	1 7/8	1	5/8
2 5/8	2	1	3/4
2 3/4	2	1	3/4
3	2 1/4	1 1/8	3/4

*These values have been adjusted to comply with AWS recommended minimums

TABLE 2 - MINIMUM WELD SIZES FOR THICK PLATES (AWS)

THICKNESS OF THICKER PLATE JOINED t	MINIMUM LEG SIZE OF FILLET WELD
to 1/2" incl.	3/16"
over 1/2" thru 3/4"	1/4"
over 3/4" thru 1 1/2"	5/16"
over 1 1/2" thru 2 1/4"	3/8"
over 2 1/4" thru 6"	1/2"
over 6"	5/8"

Minimum leg size need not exceed thickness of the thinner plate.

ตารางภาคผนวกที่ 1.7 แสดงค่าตัวประกอบ C_L, C_G, C_S

Generalized Fatigue Strength Factors for Ductile Materials

	Bending	Axial	Torsion
a. Endurance limit ^a			
$S_n = S'_n C_L C_G C_S$, where S'_n is the R. R. Moore endurance limit, and			
C_L (load factor)	1	1	0.58
C_G (gradient factor): diameter < (0.4 in. or 10 mm) (0.4 in. or 10 mm) < diameter < (2 in. or 50 mm) ^b	1	0.7 to 0.9	1
	0.9	0.7 to 0.9	0.9
C_S (surface factor)	See Fig. 8.13		
b. 10^3 -cycle strength ^c	$0.9S_u$	$0.75S_u$	$0.9S_{ut}$ ^d

Note: 1. For all biaxial loading except torsion, convert actual stresses to an equivalent bending stress using the distortion energy theory. Then relate this equivalent stress to the bending fatigue strength.

2. For other than 50 percent reliability, multiply S_n by C_R . (10^3 -cycle strength is usually not multiplied by C_R .)

^aFor materials not having an endurance limit, apply the factors to the 10^4 or 5×10^4 -cycle strength.

^bFor (2 in. or 50 mm) < diameter < (4 in. or 100 mm) reduce these factors by about 0.1. For (4 in. or 100 mm) < diameter < (6 in. or 150 mm), reduce these factors by about 0.2.

^cNo corrections for gradient or surface are normally made, but the experimental value of S_n or S_{ut} should pertain to sizes reasonably close to those involved.

^d $S_{ut} \approx 0.8S_u$ for steel; $S_{ut} \approx 0.7S_u$ for other ductile metals.

ตารางภาคผนวกที่ 1.8 แสดงคุณสมบัติของเบร้ง

מספר ד mm	O.D. D mm	מספר B mm	מספר 402										מספר 22			מספר 32		
			Self-aligning Ball Bearings		Single Row Deep Groove Ball Bearings		Angular Contact Small Angle Ball Bearings		Angular Contact Steep Angle Ball Bearings		Cylindrical Roller Bearings		Annular B mm	Spherical Roller Bearings		Annular B mm	Double Row Non-Filling Not Ball Bearings	
			C mm	C mm	C mm	C mm	C mm	C mm	C mm	C mm	C mm	C mm		C mm	C mm		C mm	C mm
4	13	5	-	-	0.57	1.19												
5	16	5	-	-	0.94	1.85												
6	19	6	0.53	1.94	0.94	1.85												
7	22	7	0.66	2.05	1.35	2.51												
8	-	-	0.66	2.05	1.35	2.51												
9	26	8	0.93	2.07	1.96	3.49												
10	30	9	1.34	4.23	1.96	3.58	-	-	-	-	-	-	-	-	14.3	3.56	5.52	
12	32	10	1.48	4.30	3.05	5.25	3.27	5.52	-	-	-	-	-	-	15.9	5.56	8.10	
15	35	11	2.01	5.74	3.51	5.87	4.09	6.54	-	-	-	-	-	-	15.9	6.36	9.03	
17	40	12	2.43	6.10	4.45	7.34	5.25	8.19	-	-	-	-	-	-	17.5	8.19	11.30	
20	47	14	3.18	7.61	6.18	9.83	7.25	11.00	-	-	-	-	-	-	20.6	11.30	15.17	
25	52	15	4.03	9.34	6.94	10.77	8.72	12.55	7.70	11.39	7.21	13.26	-	-	20.6	12.73	16.46	
30	62	16	5.83	12.06	10.00	14.95	12.55	17.34	11.08	15.80	9.88	17.67	-	-	23.8	18.33	22.87	
35	72	17	6.68	12.19	13.66	19.76	17.09	22.96	15.08	20.87	15.35	26.25	-	-	27.0	24.92	30.57	
40	80	18	8.59	14.82	15.66	22.43	21.27	27.41	18.64	24.74	20.74	34.13	23	43.92	60.52	30.2	28.61	34.17
45	85	19	9.61	16.82	17.84	25.19	24.21	30.79	21.23	27.72	22.29	35.91	23	50.28	63.19	30.2	32.57	38.36
50	90	20	10.55	17.49	19.80	27.01	26.03	32.31	22.74	28.79	23.90	37.56	23	53.40	65.41	30.2	36.18	41.03
55	100	21	13.40	20.60	25.05	33.38	32.97	39.96	28.79	35.64	29.86	45.84	25	66.75	81.43	33.3	45.83	50.73
60	110	22	15.53	23.14	30.94	40.36	40.72	48.50	35.55	43.16	37.65	56.07	28	83.21	99.23	36.5	56.51	61.41
65	120	23	17.22	23.85	34.13	44.05	44.95	52.51	41.83	48.95	45.39	66.30	31	99.68	116.60	38.1	62.30	66.75
70	125	24	18.78	26.65	37.42	48.06	49.40	57.40	45.84	53.40	45.39	74.76	31	105.91	121.00	39.7	68.53	72.53
75	130	25	21.40	29.86	41.16	50.73	56.51	62.30	48.95	54.73	56.96	81.00	31	111.70	125.50	41.3	75.20	77.00
80	140	26	23.54	30.35	44.50	56.07	62.74	67.86	54.73	61.85	60.96	87.22	33	129.00	143.70	44.4	81.43	85.00
85	150	28	28.43	37.82	53.40	64.08	72.53	78.76	62.74	68.97	70.75	99.68	36	149.50	166.40	49.2	86.77	87.66
90	160	30	31.77	43.79	60.52	73.87	83.44	92.56	74.31	82.32	91.67	127.27	40	179.80	195.80	52.4	98.34	100.60
95	170	32	36.85	48.95	69.42	83.66	91.67	100.00	77.87	87.66	101.46	139.73	43	221.10	235.80	55.6	127.30	127.30

ตารางภาคผนวกที่ 1.9 แสดงคุณสมบัติของสกรูและน็อต

Specifications for Steel Used in Millimeter Series Screws and Bolts

SAE Class	Diameter d (mm)	Proof Load (Strength) ^a S_p (MPa)	Yield Strength ^b S_y (MPa)	Tensile Strength S_u (MPa)	Elongation, Minimum (%)	Reduction of Area, Minimum (%)	Core Hardness, Rockwell	
							Min	Max
4.6	5 thru 36	225	240	400	22	35	B67	B87
4.8	1.6 thru 16	310	—	420	—	—	B71	B87
5.8	5 thru 24	380	—	520	—	—	B82	B95
8.8	17 thru 36	600	660	830	12	35	C23	C34
9.8	1.6 thru 16	650	—	900	—	—	C27	C36
10.9	6 thru 36	830	940	1040	9	35	C33	C39
12.9	1.6 thru 36	970	1100	1220	8	35	C38	C44

^aProof load (strength) corresponds to permanent deformation not over 0.0025 mm measured on actual bolts.

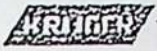
^bYield strength corresponds to 0.2 percent offset measured on machine test specimens.

Source: Society of Automotive Engineers standard J1199 (1979).

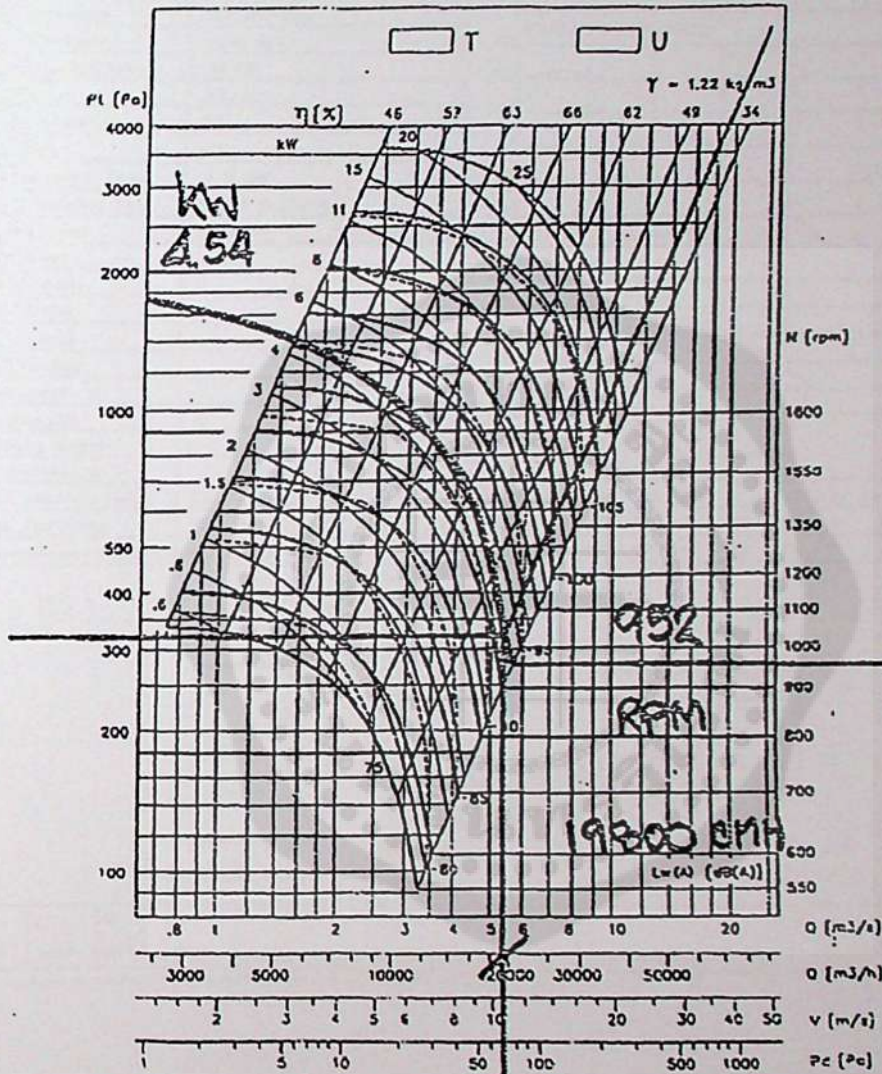
ตารางภาคผนวกที่ 1.10 แสดงการเลือกขนาดนอต

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู		ระยะพิคซ์ P	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพิคซ์ d_2, D_2	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกลางน้อย		พื้นที่รับความเค้น (A_s) mm ²
ช่องที่ 1	ช่องที่ 2			d_1	D_1	
1.00		0.25	0.838	0.693	0.729	0.456
1.20		0.25	1.038	0.893	0.929	0.730
1.60		0.35	1.373	1.170	1.221	1.270
2.00		0.40	1.740	1.509	1.567	2.070
2.50		0.45	2.208	1.948	2.013	3.390
3.00		0.50	2.675	2.387	2.459	5.030
4.00	3.50	0.60	3.110	2.764	2.850	6.780
		0.70	3.545	3.141	3.242	8.780
	4.50	0.75	4.013	3.580	3.688	11.300
5.00		0.80	4.480	4.019	4.134	14.200
6.00		1.00	5.350	4.773	4.917	20.100
8.00		1.25	7.183	6.466	6.647	36.600
10.00	(9)	1.25	8.188	7.466	7.647	48.100
		1.50	9.026	8.160	8.376	58.000
	(11)	1.50	10.026	9.160	9.376	72.300
12.00		1.75	10.863	9.853	10.106	84.300
	14.00	2.00	12.701	11.546	11.835	115.000
16.00		2.00	14.701	13.546	13.835	157.000
20.00	18.00	2.50	16.376	14.933	15.294	192.000
		2.50	18.376	16.933	17.294	245.000
	22.00	2.50	20.376	18.933	19.294	303.000
24.00		3.00	22.051	20.319	20.752	353.000
	27.00	3.00	25.051	23.319	23.752	459.000
30.00		3.50	27.727	25.706	26.211	561.000
36.00	33.00	3.50	30.727	28.706	29.211	694.000
		4.00	33.402	31.093	31.670	817.000
	39.00	4.00	36.402	34.093	34.670	976.000
42.00		4.50	39.077	36.479	37.129	1120.000
	45.00	4.50	42.077	39.479	40.129	1300.000
48.00		5.00	44.752	41.866	42.587	1470.000
56.00	52.00	5.00	48.752	45.866	46.587	1760.000
		5.50	52.428	49.252	50.046	2030.000
	60.00	5.50	56.428	53.252	54.046	2360.000
64.00		6.00	60.103	56.639	57.505	2680.000
	68.00	6.00	64.103	60.639	61.505	3060.000

รูปภาคผนวกที่ 1.1 กราฟแสดงการเลือกขนาด Blower

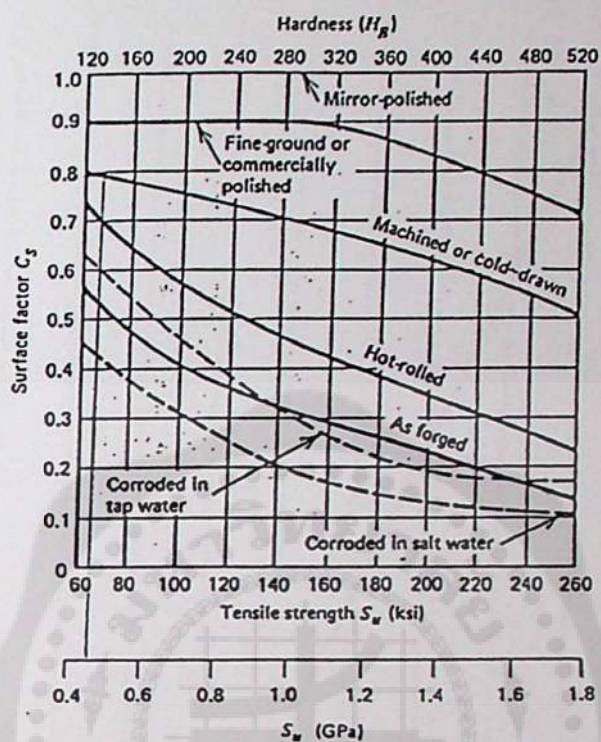


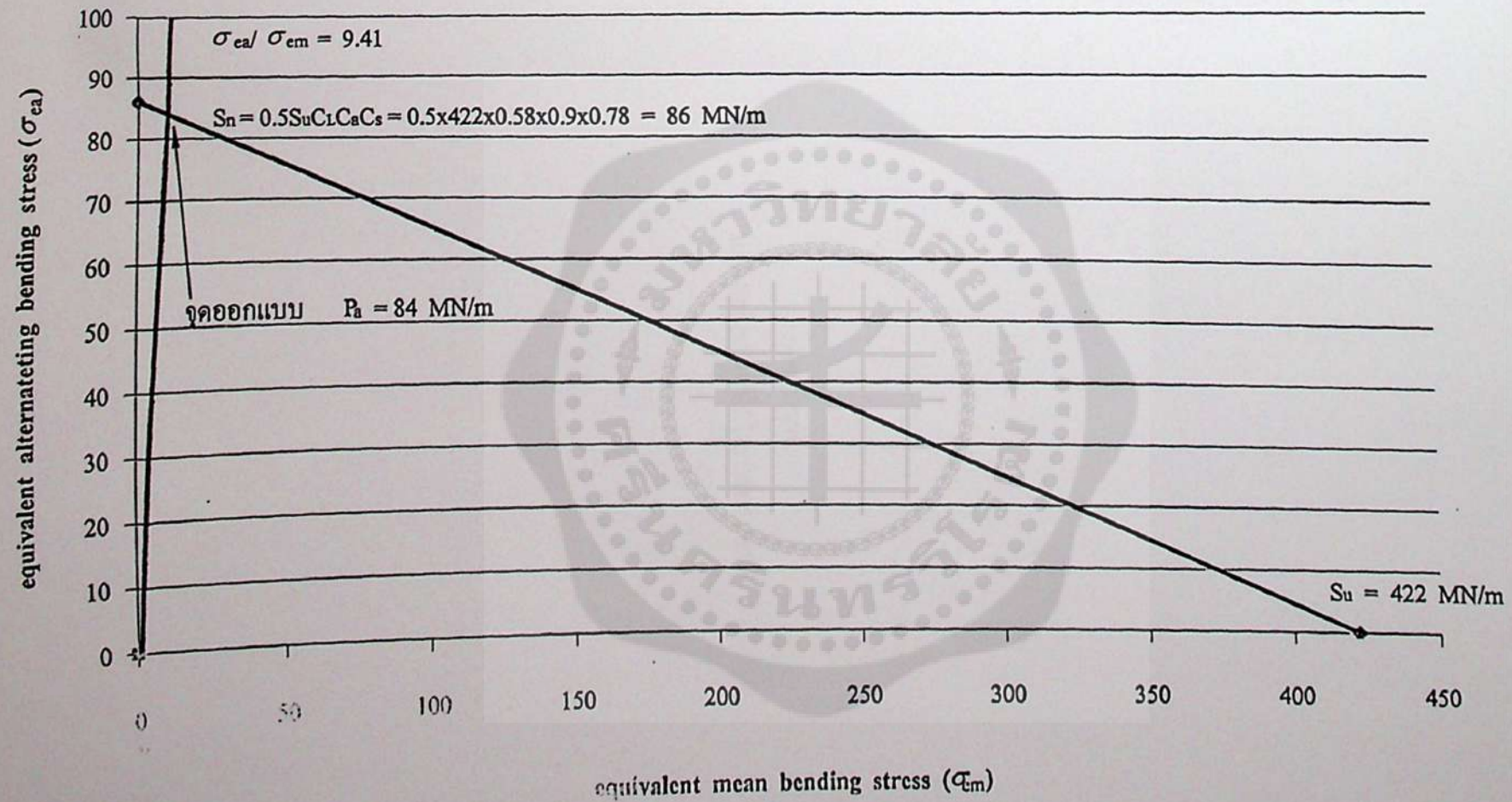
BSA 800



- Performance shown is for installation type B - free inlet, ducted outlet. Performance ratings do not include the effect of apparatus in the system. Power rating kW does not include drive losses.
- The A-weighted sound ratings shown have been calculated per ASHA standard 3.1. Values shown are for inlet L_{WA} and sound power levels for installation type B - free inlet, ducted outlet. Ratings do not include the effect of duct and accessories.

รูปภาคผนวกที่ 1.3 กราฟแสดงหาค่าตัวประกอบผิว (C_s)









รูปภาพผนวกที่ 2.1 แสดงอุปกรณ์วัดความเร็วลม



รูปภาพผนวกที่ 2.2 แสดงอุปกรณ์วัดความเร็วรอบ



รูปภาพผนวกที่ 2.3 แสดงอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์



รูปภาพผนวกที่ 2.4 แสดงกังหันลมชาโวนีชแบบใบแกว่งได้ 2 ใบ



รูปภาพผนวกที่ 2.5 แสดงกังหันลมชาโวเนิสแบบใบแกว่งได้ 3 ใบ

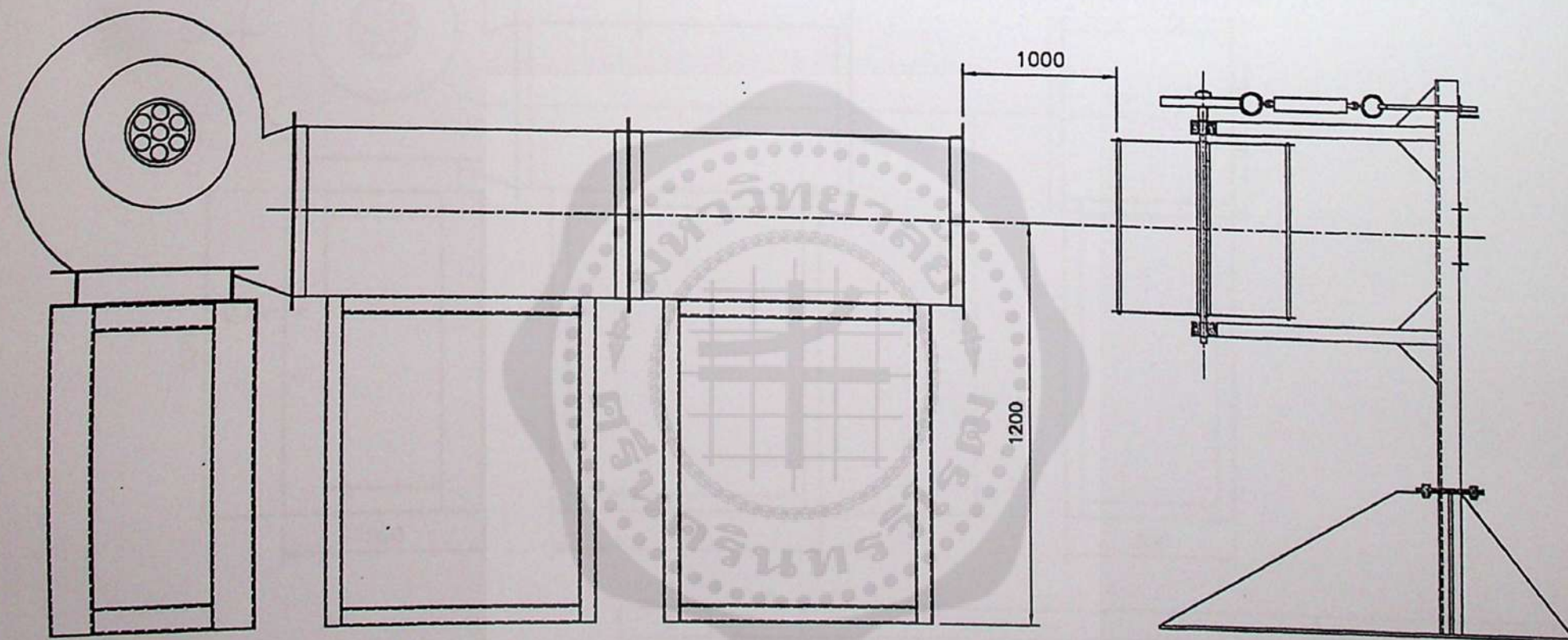


รูปภาพผนวกที่ 2.6 แสดงแท่นทดสอบกังหันลม และอุโมงค์ลม

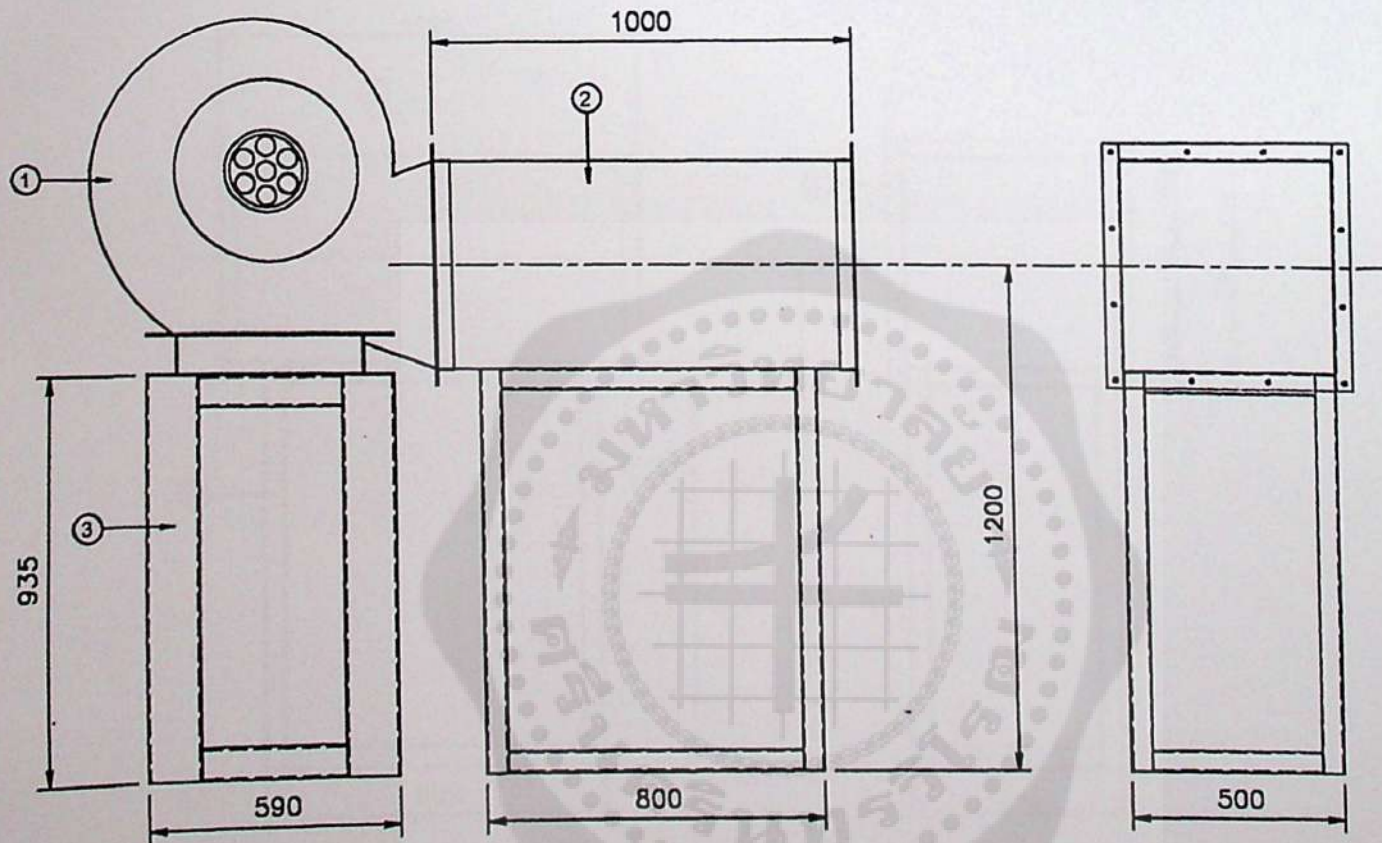


รูปภาพผนวกที่ 2.7 แสดงการติดตั้งกังหันลมเข้ากับแท่นทดสอบ

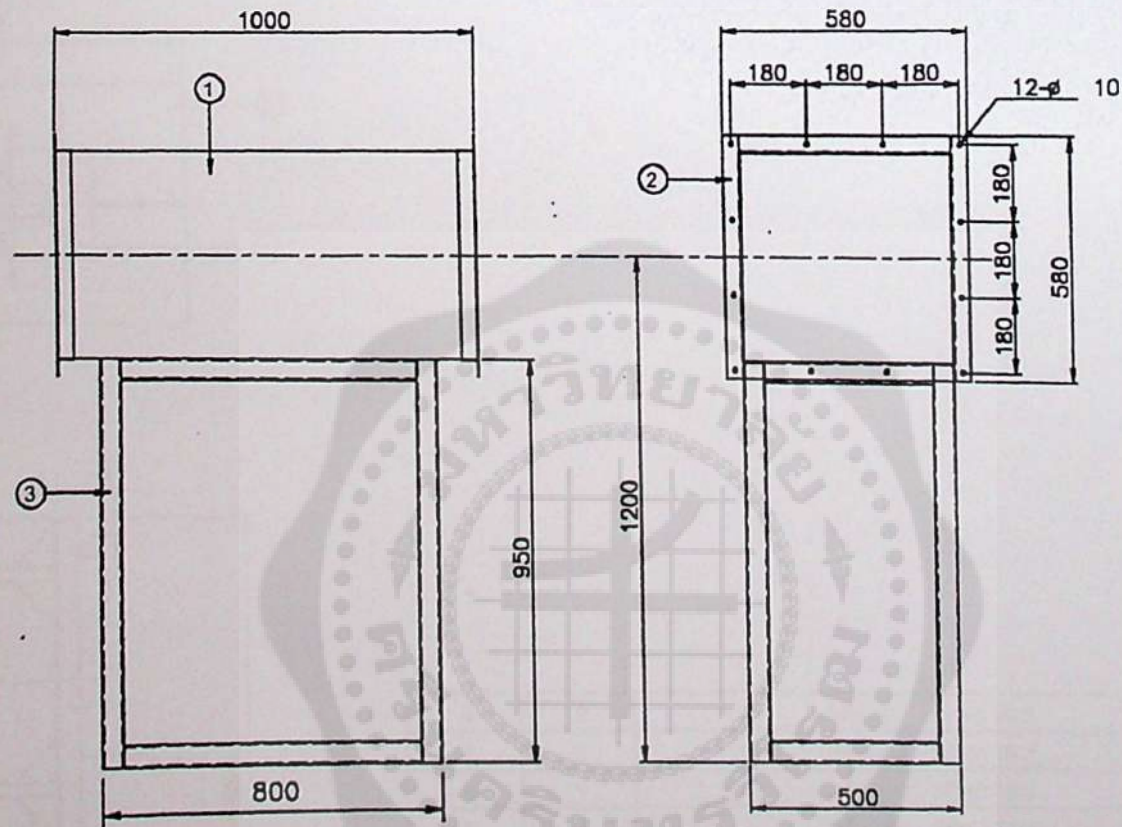




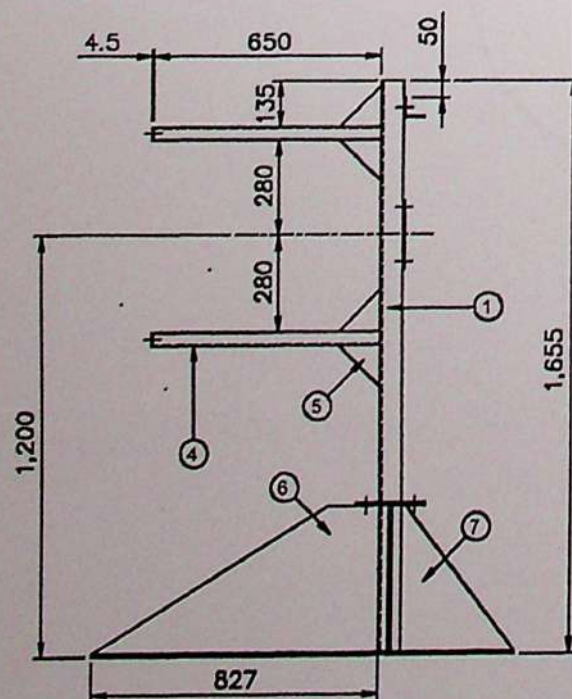
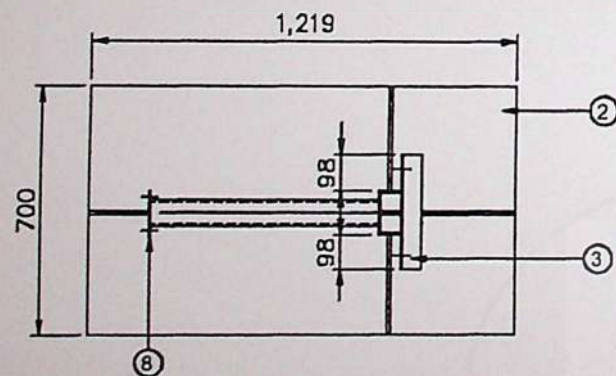
ผู้เขียน นายเหม็นต์	ผู้ตรวจ นายอดิเรก	ผู้อนุมัติ อ.บัญชา คังตระกูล	ชื่อแฟ้ม	วันที่ 19/12/1999	มาตราส่วน 1:18
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์			การศึกษามรรคนะของกังหันลมชาโวนีเยส		
			หมายเลขแบบ ME1999-001	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่ 1



3.	1	Blower stand			
2.	2	Square pipe			
1.	1	Blower , 5 HP , 380 Volt			
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ , วัสดุ , ขนาด		มาตรฐาน	
ผู้เขียน นายเหม็นด์	ผู้ตรวจ นายอดิเรก	ผู้ออก อ.บัญชา คังตระกูล	ชื่อเพิ่ม	วันที่ 19/12/1999	มาตราส่วน 1:18
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์			การศึกษามรณกะของกังหันลมชาโวนีเยส		
			หมายเลขแบบ ME1999-002	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่



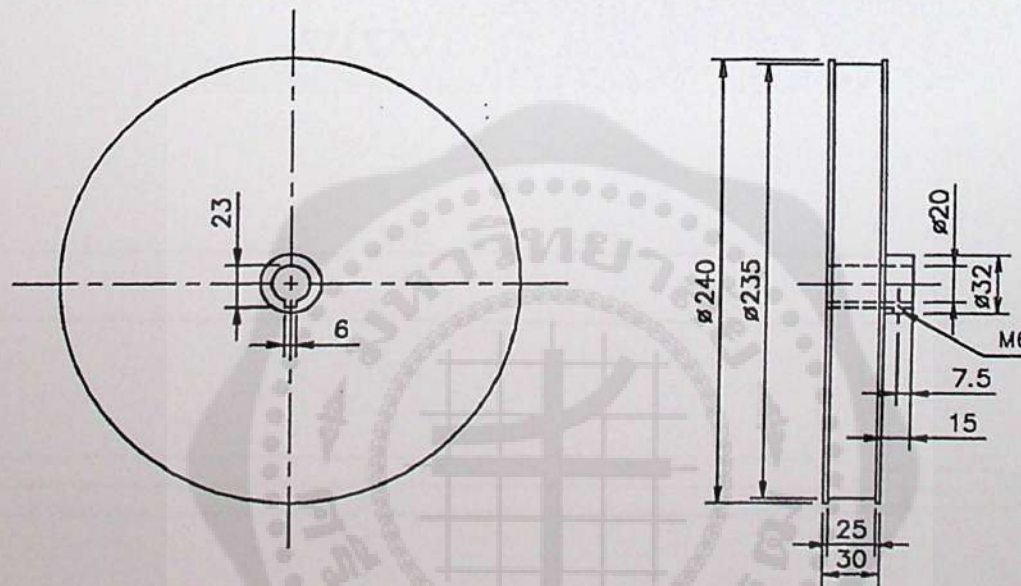
3.	1	Square pipe stand , STKR , 50 x 50 x T2.3		JIS	
2.	1	Square pipe flange , SS41A , 50 x 50 x T2.3		JIS	
1.	1	Square pipe , SPHC , T1.6		JIS	
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ , วัสดุ , ขนาด		มาตรฐาน	
ผู้เขียน นายเหม็นด์	ผู้ตรวจ นายอดิเรก	ผู้อนุมัติ อ.บัญชา คังตระกูล	ชื่อแฟ้ม	วันที่ 19/12/1999	มาตราส่วน 1:18
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์			การศึกษาสมรรถนะของกังหันลมชาโวนีเยล		
			หมายเลขแบบ ME1999-003	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่



8.	2	เหล็กแผ่น , SPHC T4.5	JIS
7.	3	เหล็กแผ่น , SPHC T9.0	JIS
6.	1	เหล็กแผ่น , SPHC T9.0	JIS
5.	4	เหล็กแผ่น , SPHC T4.5	JIS
4.	2	เหล็กตัว U , STKU , 75 x 40 x T5.0	JIS
3.	1	เหล็กฉาก , SS41A , 50 x 50 x T6.0	JIS
2.	1	เหล็กแผ่น , SPHC T9.0	JIS
1.	1	เหล็กตัว U , STKU , 125 x 65 x T7.0	JIS
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ , วัสดุ , ขนาด	มาตรฐาน

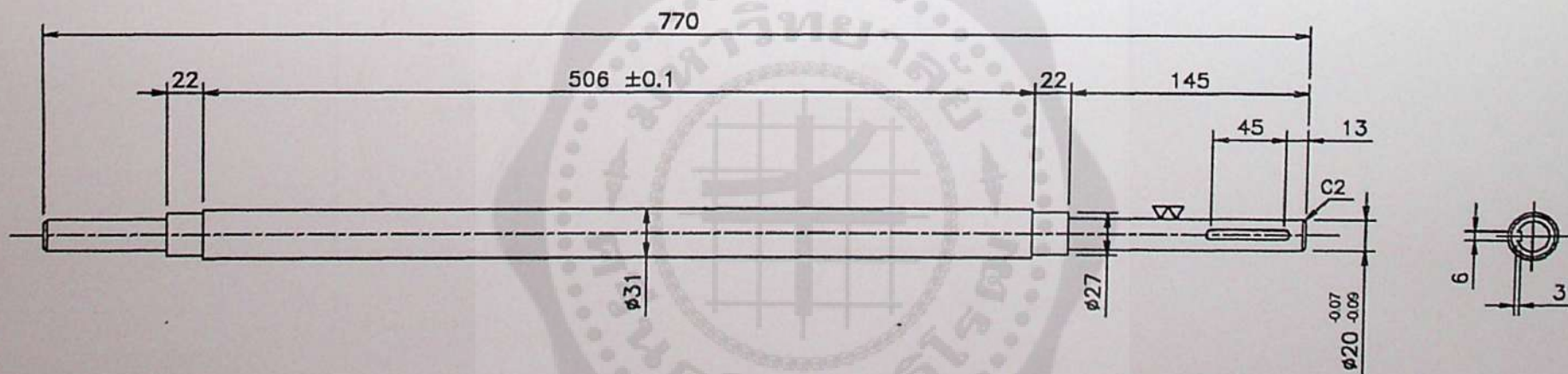
ผู้เขียน นายเหมันต์	ผู้ตรวจ นายสุวิทย์	ผู้อนุมัติ อ.บัญชา คังตระกูล	ชื่อแฟ้ม	วันที่ 19/12/1999	มาตราส่วน 1:22
------------------------	-----------------------	---------------------------------	----------	----------------------	-------------------

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์		การศึกษาสมรรถนะของกังหันลมชาโวเนียส			
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์		หมายเลขแบบ ME1999-004	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่	

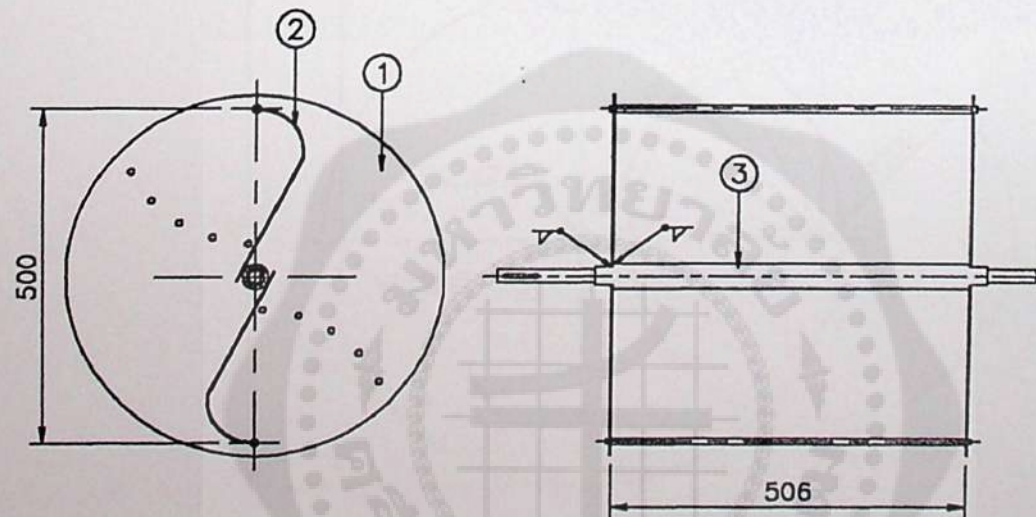


1.	1	Pulley dynamometer , cast Iron FC20			JIS	
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, วัสดุ, ขนาด			มาตรฐาน	
ผู้เขียน นายเหม็นต์		ผู้ตรวจ นายเหม็นต์	ผู้อนุมัติ อ.ปัญญา คังตระกูล	ชื่อแฟ้ม	วันที่ 19/12/1999	มาตราส่วน 1:4
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์				การศึกษามรรณะของกังหันลมชาโวนีเยส		
				หมายเลขแบบ ME1999-005		แก้ไขครั้งที่

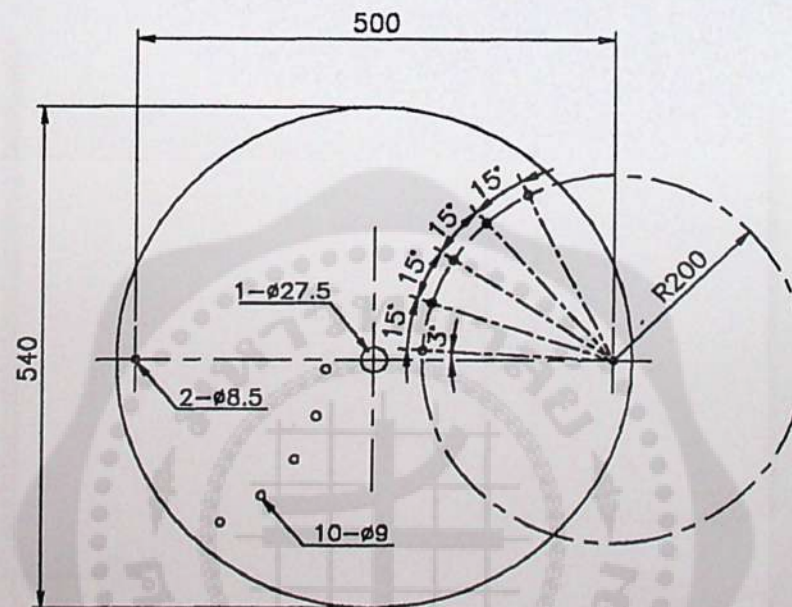
▽(▽▽)



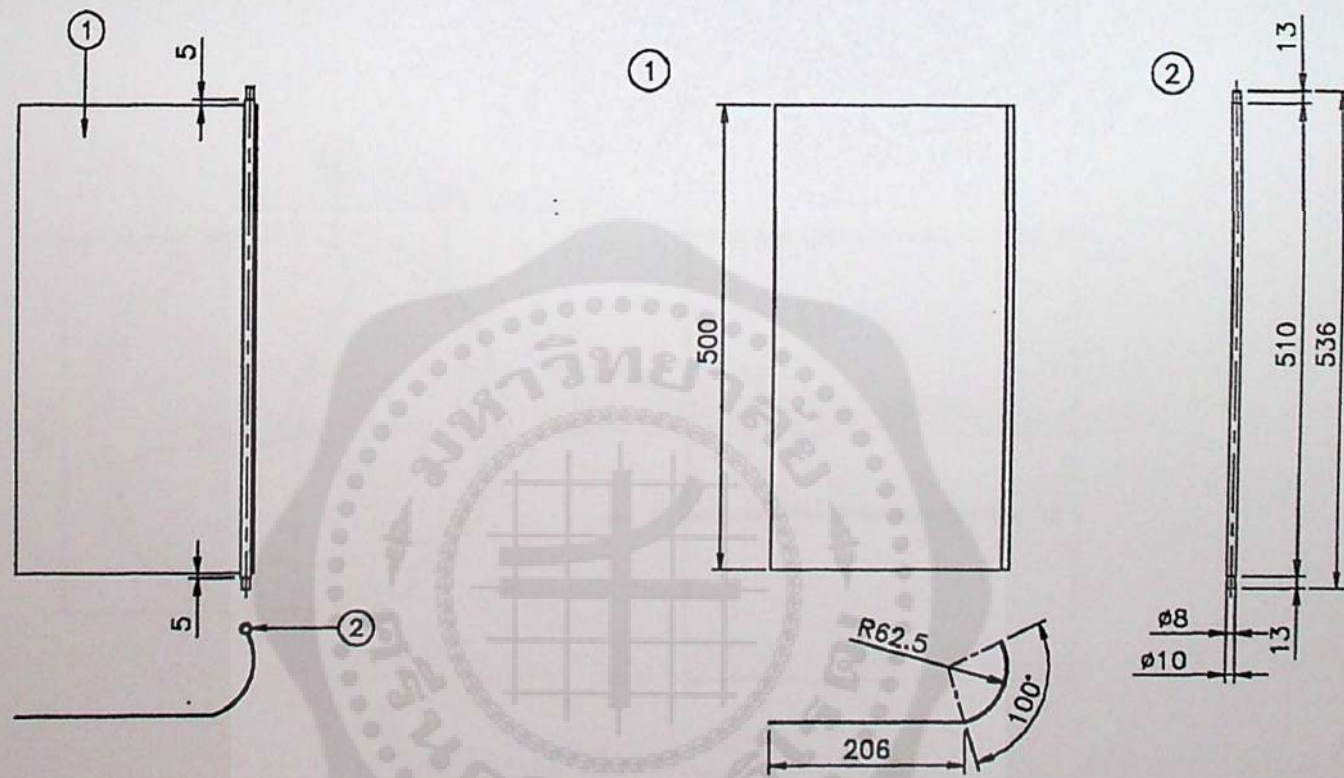
1.	1	Rotor shaft , SC20B-D 35			JIS	
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ , วัสดุ , ขนาด			มาตรฐาน	
ผู้เขียน นายเหม็นต์		ผู้ตรวจ นายเหม็นต์	ผู้อนุมัติ อ.บัญชา คังตระกูล	ชื่อเพิ่ม	วันที่ 19/12/1999	มาตราส่วน 1:4
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์				การศึกษามรรคนะของกังหันลมชาโวเนียส		
				หมายเลขแบบ ME1999-006		แก้ไขครั้งที่



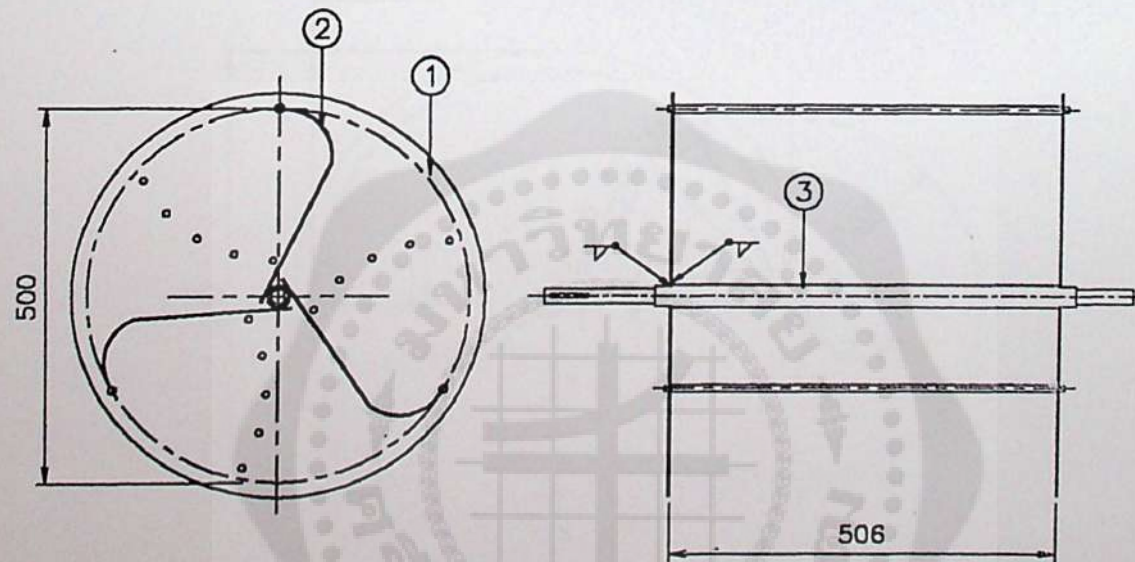
3.	1	Rotor shaft , SC20B-D ϕ 35			JIS
2.	2	SPHC t 1.6			JIS
1.	2	SPHC t 3.2			JIS
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ , วัสดุ , ขนาด			มาตรฐาน
ผู้เขียน นายสุวิทย์	ผู้ตรวจ นายเหม็นต์	ผู้อนุมัติ อ.บัญชา คังตระกูล	ชื่อแฟ้ม	วันที่ 19/12/1999	มาตราส่วน 1:11
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์			การศึกษามรรณกะของกังหันลมชาโวนีเยล		
			หมายเลขแบบ ME1999-007	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่



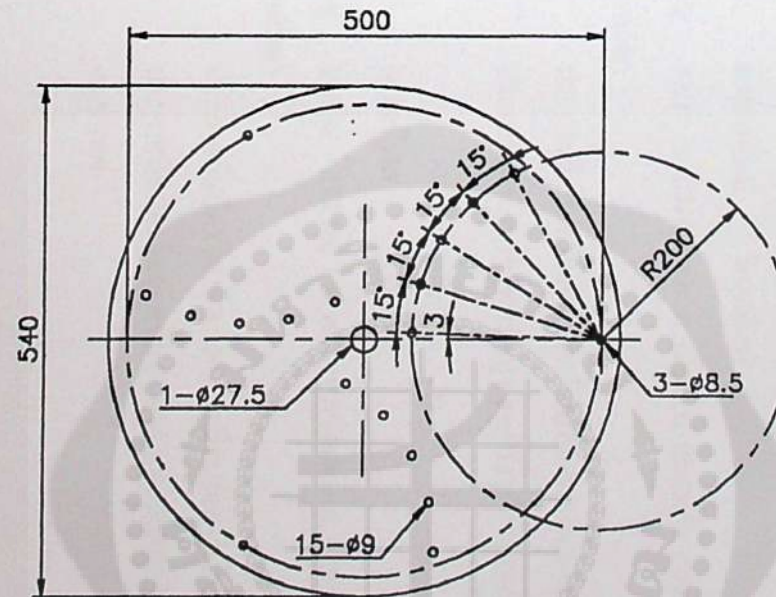
1.	2	SPHC 13.2			JIS	
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, วัสดุ, ขนาด			มาตรฐาน	
ผู้เขียน นายเหม็นต์		ผู้ตรวจ นายเหม็นต์	ผู้ออกแบบ อ.บัญชา หังตระกูล	ชื่อแฟ้ม	วันที่ 19/12/1999	มาตราส่วน 1:8
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์				การศึกษาศมรรถนะของกังหันลมชาโคโนเลียส		
				หมายเลขแบบ MEE1999-007-001		แก้ไขครั้งที่



2.	3	SS41B-D ๑10			JIS	
1.	2	SPHC t1.6			JIS	
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, วัสดุ, ขนาด			มาตรฐาน	
ผู้เขียน นายสุวิทย์		ผู้ตรวจ นายเหม็นต์	ผู้ออก อ.บัญชา คังตระกูล	ชื่อแฟ้ม	วันที่ 19/12/1999	มาตราส่วน 1:8
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์				การศึกษามรรณะของกังหันลมชาโวนีเยส		
				หมายเลขแบบ ME1999-007-002		แก้ไขครั้งที่



3.	1	Rotor shaft , SC20B-D Diameter 35 mm			JIS
2.	3	SPHC t1.6			JIS
1.	2	SPHC t3.2			JIS
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ , วัสดุ , ขนาด			มาตรฐาน
ผู้เขียน นายอดิเรก	ผู้ตรวจ นายเหม็นต์	ผู้อนุมัติ อ.บัญชา คังตระกูล	ชื่อเพิ่ม	วันที่ 19/12/1999	มาตราส่วน 1:11
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์			การศึกษาสมรรถนะของกังหันลมชาโวนีเยล		
			หมายเลขแบบ ME1999-008	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่



1.	2	SPHC I3.2			JIS	
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, วัสดุ, ขนาด			มาตรฐาน	
ผู้เขียน นายสุวิทย์		ผู้ตรวจ นายเหม็นด์	ผู้อนุมัติ อ.บัญชา คังตระกูล	ชื่อแฟ้ม	วันที่ 19/12/1999	มาตราส่วน 1:8
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์				การศึกษาศมรรถนะของกังหันลมชาโวนีล		
				หมายเลขแบบ ME1999-008-001		แก้ไขครั้งที่

ประวัติผู้ทำโครงการ

ชื่อ นายสุวิทย์ สมภักดิ์

ที่อยู่ 109 หมู่ 8 ต. ประสงค์ อ. ท่าชนะ จ. สุราษฎร์ธานี 84170

การศึกษา

ประกาศนียบัตรวิชาชีพ จาก วิทยาลัยเทคนิคชุมพร อ. เมือง จ. ชุมพร

ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง จาก สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตนนทบุรี

ชื่อ นายเหวินต์ วิเศษสิงห์

ที่อยู่ 41/17 ต. บางกระสอบ อ. เมือง จ. นนทบุรี 11000

การศึกษา

ประกาศนียบัตรวิชาชีพ จาก วิทยาลัยเทคนิคกาญจนาบุรี อ.เมือง จ. กาญจนบุรี

ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง จาก โรงเรียนเทคโนโลยีหมู่บ้านครู กรุงเทพฯ

ชื่อ นายอดิเรก คำพิมพ์

ที่อยู่ 15/232 - 233 หมู่ 7 ต. คลองหลวงแพ่ง อ. เมือง จ. ฉะเชิงเทรา 24000

การศึกษา

ประกาศนียบัตรวิชาชีพ จาก โรงเรียนเทคโนโลยีสยาม กรุงเทพฯ

ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ กรุงเทพฯ