

การศึกษาสมรรถนะของกังหันลมชาโวเนียสแบบใบโค้งครึ่งวงกลมชนิดมีช่องว่างตรงกลาง

Study of Savonius Wind turbine : space center type

๓๑ พ.ค. ๒๕๔๓



นายเสกสิทธิ์ ปกป้องเสถียร
นายจักรินทร์ ภาพจิตรศิลป์
นายสุรเชษฐ์ กลมเกลี้ยง

โครงการวิศวกรรมศาสตร์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2542

หัวข้อโครงการวิศวกรรมศาสตร์

โดย

ภาควิชา

อาจารย์ที่ปรึกษา

การศึกษาศมรรณะของกังหันลมชาโวเนียส

แบบใบโค้งครึ่งวงกลมชนิดมีช่องว่างตรงกลาง

นายเสกสิทธิ์ ปกป้องเสถียร

นายจักรินทร์ ภาพจิตรศิลป์

นายสุรเชษฐ์ กลมเกลี้ยง

วิศวกรรมเครื่องกล

อ. บัญชา คังตระกูล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อนุมัติให้รับโครงการวิศวกรรม
ศาสตร์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รศ.ดร. ศักดิ์ กองสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรมศาสตร์

ประธานกรรมการ

(อาจารย์บัญชา คังตระกูล)

กรรมการ

(อาจารย์กัมจักษ์วิทย์ พูลปราชญ์)

กรรมการ

(อาจารย์สุวณิช จิตศิริพานิช)

กรรมการ

(อาจารย์สมชาย แฉ่มใส)

การศึกษาสมรรถนะของกังหันลมชาโวเนียสแบบใบโค้งครึ่งวงกลมชนิดมีช่องว่างตรงกลาง
ปีการศึกษา 2542

โดย

นายเสกสิทธิ์ ปกป้องเสถียร
นายจักรินทร์ ภาพจิตรศิลป์
นายสุรเชษฐ์ กลมเกลี้ยง

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. บัญชา กังตระกูล

บทคัดย่อ

โครงการวิศวกรรมศาสตร์นี้เป็นการศึกษาสมรรถนะของกังหันลมชาโวเนียสชนิดมีช่องว่างตรงกลาง เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนารูปแบบกังหันลมในแนวตั้งต่อไป โดยตัวกังหันลมชาโวเนียสทำด้วยเหล็ก มีขนาดเมื่อกางใบพัดเต็มที่ 0.5×0.5 m. รับความเร็วลมตั้งแต่ 2 – 8 m/s โดยใช้มอเตอร์ (Blower) เป็นตัวกำเนิดกระแสลม และใช้ท่อส่งลมเป็นตัวควบคุมกระแสลมให้เกิดความสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัดมายังตัวกังหัน ซึ่งให้กำลังสูงสุดที่ความเร็วลม 8 m/s 2 ใบพัด $a/r = 0.8$ จากการทดลองที่ 2, 3 และ 4 ใบพัด พบว่าเมื่อความเร็วลมและ a/r เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังของกังหันเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

STUDY OF SAVONIUS WIND TURBINE : SPACE CENTER TYPE

Academic Year 1999

By

Mr. Seksit Pokpongsatian

Mr. Jakarin Papwijitsil

Mr. Surachet klomkleang

Project report advisor

Mr. Bunchar Kongtrakun

ABSTRACT

The object of this engineering project is study of savonius wind turbine ,space center type. For data base are used to develop the vertical wind turbine. The savonius wind turbine can calculate and designing by iron. It has maximum blade area 0.5×0.5 m. ,wind speed from 2 to 8 m/s. The blower is wind source and use a duct control wind is steady flow. Maximum power of wind turbine at wind speed is 8 m/s ,two blades and $a/r = 0.8$. The experiment for 2 ,3 and 4 blades was found wind speed and a/r are increased this event, power of wind turbine will be increased.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณ อาจารย์บัญชา คังตระกูล อาจารย์ปรีक्षा
โครงการ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุรนครินทร์วิโรฒ ตลอดจนอาจารย์ในภาควิชา
วิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและขั้นตอนการดำเนินงาน จนทำให้โครงการนี้สำเร็จ
ลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณบิดามารดา และคณาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนให้ความรู้แก่ผู้
เขียนตั้งแต่ต้นจนกระทั่งผู้เขียนมีโอกาเขียนโครงการวิศวกรรมศาสตร์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

ท้ายสุดนี้คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณทุก ๆ ท่านที่ได้ช่วยเหลือในการทำโครงการ
วิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งไม่สามารถเอ่ยนามได้ทั้งหมด มาไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ผู้จัดทำ

14 กุมภาพันธ์ 2543

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญรูป	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ผ

บทที่

1. บทนำ

ความสำคัญและที่มาของโครงการ	1
การวิจัยกังหันลมที่ใช้มากในประเทศไทย	3
วัตถุประสงค์ของ โครงการงาน	7
ขอบเขตของโครงการงาน	8
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	9
ขั้นตอนการทำโครงการงาน	9

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

พลังงานที่มีอยู่ในลม	10
การเปลี่ยนแปลงกำลังลมเป็นกำลังเพลลา	10
การแบ่งประเภทของกังหัน	11
กังหันแกนตั้งและนอน	12
คุณลักษณะของกังหันแกนตั้ง	12
พลังงานกับกำลังลม	13
สัมประสิทธิ์ของกำลังและแรงบิด	15
ค่า Rotor Solidity	16
การวิเคราะห์กังหันลม	21
แบบ Model	24
Wind Turbine Dynamic	27

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ (ต่อ)	
ไดอะแกรมความเร็วสำหรับกังหันลมแกนตั้ง	31
สมการพลังงานการไหลสม่ำเสมอ	32
ทฤษฎีการคำนวณ	32
เสา	34
คาน	37
ความเค้น	38
ค่าความปลอดภัย	39
ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด	40
การเชื่อมต่อ	43
ภาระเชิงศูนย์	46
เบรคสายพาน	49
การประเมินอายุการใช้งานและแรง	50
ความเค้นที่รอยต่อด้วยลิ้ม	51
ความล้าภายใต้ความเค้นปกติสลับ	54
การออกแบบสกรูกำลัง	59
ความเค้นวิกฤต	59
ความกว้างและความยาวของสายพานแบน	60
3. การออกแบบและการคำนวณ	
อุปกรณ์ การวิจัย	62
การเลือกขนาดพัดลมและมอเตอร์	63
การหาค่าแรงลมประทะใบกังหัน	64
การคำนวณหามวลของใบพัด	65
การคำนวณหามวลของไดนาโมมิเตอร์	68
การคำนวณหารอยเชื่อม	72
การคำนวณหาความแข็งแรงของตัวแท่นทดสอบกังหันลม	73
การคำนวณหาความแข็งแรงของน็อตและแผ่นเพลต	77
การคำนวณการล้าของแท่น	79

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ (ต่อ)	หน้า
การคำนวณไคนาโมมิเตอร์	80
การคำนวณหาขนาดสปริง	81
การคำนวณหาขนาดเพลลา	81
การคำนวณหาส่วนประกอบของไคนาโมมิเตอร์	83
การเลือกขนาดสายพาน	86
4. อุปกรณ์วิธีการทดลองและผลการทดลอง	
อุปกรณ์การทดลอง	87
ขั้นตอนการทดลองชุดทดสอบกัมมันตภาพไอโซโทปชนิดมีช่องว่างตรงกลาง	87
ผลการทดลอง	89
ตัวอย่างการคำนวณการทดลองชุดทดสอบกัมมันตภาพไอโซโทปชนิดมีช่องว่างตรงกลาง	168
5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
สรุปผลการทดลอง	170
ข้อเสนอแนะ	171
บรรณานุกรม	172
ภาคผนวก	173
- ภาคผนวก 1	174
- ภาคผนวก 2	189
- ภาคผนวก 3	195

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางแสดงความสัมพันธ์และความเร็วลม	15
2.2 ตารางแสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของกังหันลมชนิดต่างๆ	20
2.3 ตารางแสดงค่าความปลอดภัย	40
2.4 ตารางความกว้างของสายพานส่งกำลังและความกว้างล้อสายพานที่สอดคล้องกัน	61
4.1 ตารางบันทึกผลการทดลองของใบกังหันจำนวน 2 ใบ $a/r = 0.2$	89
4.2 ตารางบันทึกผลการทดลองของใบกังหันจำนวน 2 ใบ $a/r = 0.3$	92
4.3 ตารางบันทึกผลการทดลองของใบกังหันจำนวน 2 ใบ $a/r = 0.4$	96
4.4 ตารางบันทึกผลการทดลองของใบกังหันจำนวน 2 ใบ $a/r = 0.5$	100
4.5 ตารางบันทึกผลการทดลองของใบกังหันจำนวน 2 ใบ $a/r = 0.6$	104
4.6 ตารางบันทึกผลการทดลองของใบกังหันจำนวน 2 ใบ $a/r = 0.7$	108
4.7 ตารางบันทึกผลการทดลองของใบกังหันจำนวน 2 ใบ $a/r = 0.8$	112
4.8 ตารางบันทึกผลการทดลองของใบกังหันจำนวน 3 ใบ $a/r = 0.2$	116
4.9 ตารางบันทึกผลการทดลองของใบกังหันจำนวน 3 ใบ $a/r = 0.3$	119
4.10 ตารางบันทึกผลการทดลองของใบกังหันจำนวน 3 ใบ $a/r = 0.4$	123
4.11 ตารางบันทึกผลการทดลองของใบกังหันจำนวน 3 ใบ $a/r = 0.5$	127
4.12 ตารางบันทึกผลการทดลองของใบกังหันจำนวน 3 ใบ $a/r = 0.6$	131
4.13 ตารางบันทึกผลการทดลองของใบกังหันจำนวน 3 ใบ $a/r = 0.7$	135
4.14 ตารางบันทึกผลการทดลองของใบกังหันจำนวน 3 ใบ $a/r = 0.8$	139
4.15 ตารางบันทึกผลการทดลองของใบกังหันจำนวน 4 ใบ $a/r = 0.2$	143
4.16 ตารางบันทึกผลการทดลองของใบกังหันจำนวน 4 ใบ $a/r = 0.3$	146
4.17 ตารางบันทึกผลการทดลองของใบกังหันจำนวน 4 ใบ $a/r = 0.4$	149
4.18 ตารางบันทึกผลการทดลองของใบกังหันจำนวน 4 ใบ $a/r = 0.5$	152
4.19 ตารางบันทึกผลการทดลองของใบกังหันจำนวน 4 ใบ $a/r = 0.6$	156
4.20 ตารางบันทึกผลการทดลองของใบกังหันจำนวน 4 ใบ $a/r = 0.7$	160
4.21 ตารางบันทึกผลการทดลองของใบกังหันจำนวน 4 ใบ $a/r = 0.8$	164
5.1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่า P และ C_p สูงสุดที่จำนวนใบพัด 2, 3 และ 4 ใบ	171

สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้า

ตารางภาคผนวกที่

1.1 ตารางแสดงคุณสมบัติของโลหะ	175
1.2 ตารางแสดงคุณสมบัติของเหล็กกล้า	176
1.3 ตารางแสดงชนิดของพัลลัม	177
1.4 ตารางแสดงการติดตั้งสำหรับพัลลัมรุ่นต่างๆ	178
1.5 ตารางแสดงขนาดของพัลลัมรุ่นต่างๆ	179
1.6 ตารางแสดงคุณลักษณะของอากาศ	180
1.7 ตารางแสดงการรับภาระของรอยเชื่อม	181
1.8 ตารางแสดงขนาดรอยเชื่อม	181
1.9 ตารางแสดงค่าตัวประกอบ C_G, C_S, C_L	182
1.10 ตารางแสดงคุณสมบัติของแบร็ง	183
1.11 ตารางแสดงคุณสมบัติของสกรูและน็อต	184
1.12 ตารางแสดงการเลือกขนาดน็อต	185

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่

1.1 รูปกังหันลมนาเกลือภาคกลาง	3
1.2 รูปกังหันลมนาข้าว	4
1.3 รูปกังหันลมหลายใบ	5
1.4 รูปกังหันลมล้อจักรยาน	6
1.5 รูปกังหันลมนาปัตตานี	7
1.6 รูปลักษณะของกังหันลมที่ทำการศึกษ	8
2.1 รูปกังหันลมขนาดเล็ก	11
2.2 แสดงพื้นที่ A กับปริมาตรการไหลต่อวินาที	14
2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับความเร็วรอบที่ความเร็วลมต่าง ๆ	18
2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบที่ความเร็วลมต่าง ๆ	18
2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_p, C_t กับ λ	19
2.6 รูปแสดงเส้นการไหล	21
2.7 แสดงแรงต่าง ๆ ที่กระทำกับปีกเครื่องบิน	23
2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_p กับ v/U	23
2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Speed Ratio กับ Power Coefficient	25
2.10 แสดงการเลือกค่า out put ของกังหันลม	30
2.11 แสดงใบกังหันแบบ airfoil หมุนเป็นวงกลม	31
2.12 ค่า C_D สำหรับรูปทรงต่าง ๆ ($Re \leq 1000$)	33
2.13 รูปแสดงการยืดปลายเสาวิธีต่าง ๆ	36
2.14 รูปแสดงคาน และ แกนสะเทิน	37
2.15 รูปแสดงแรงชนิดต่าง ๆ	38
2.16 รูปขอบเขตของความเค้นจากทฤษฎีความเสียหาย	42
2.17 รูปแสดงลักษณะทิศทางของความเค้น	42
2.18 รูปแสดงรอยเชื่อมต่าง ๆ	43
2.19 รูปแสดงลักษณะการใช้งานของรอยเชื่อม	44
2.20 รูปแสดงโมเมนต์ความเฉื่อยของรอยเชื่อม	45
2.21 รูปแสดงการเอียงศูนย์ของแรง	46

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
2.22 รูปแสดงโมเมนต์คัตและแรงกระทำ	46
2.23 รูปแสดงความเค้นภายใน	47
2.24 รูปองค์ประกอบต่าง ๆ เนื่องจากการเบรคของสายพาน	49
2.25 รูปแสดงความเค้นที่เกิดบนลิ้ม	52
2.26 แรงที่กระทำกับลิ้มเนื่องจากโมเมนต์	53
2.27 แสดงแผนภาพความด้าแบบแสดงผลลัพธ์ของจุดเสียหาย	54
2.28 แสดงแผนภาพของก๊อคแมน	55
2.29 แสดงแผนภาพความด้าและขีดจำกัดสูงสุด	56
2.30 เครื่องมือทดสอบความด้า	57
2.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนวัฏจักร	57
3.1 แสดงพื้นที่รับลมของกังหัน	64
3.2 แสดงใบพัดของกังหัน	65
3.3 แสดงขาใบพัดส่วนใน	66
3.4 แสดงขาใบพัดส่วนนอก	66
3.5 แสดงรูปเพลต	67
3.6 แสดงแกนของแท่นติดตั้งกังหัน	68
3.7 แสดงหน้าตัดของเหล็กกราง	69
3.8 แสดงแรงกระทำและระยะ $\bar{x}$ บนแกนของแท่น	70
3.9 แสดงแรงกระทำแกนด้านบน	71
3.10 แสดงแรงกระทำแกนด้านล่าง	71
3.11 แสดงลักษณะรอยเชื่อม	72
3.12 แสดงแท่นทดสอบส่วนบน	74
3.13 แสดงแรงและโมเมนต์กระทำกับน็อตและแผ่นเพลต	75
3.14 แสดงการผิดรูปจากแนวเดิมของแผ่นเพลตเนื่องจากมีแรงและโมเมนต์มากระทำ	76
3.15 แสดงความเค้นเฉือนที่เกิดกับหัวน็อตและแผ่นเพลต	78
3.16 แสดงจุดศูนย์กลางถ่วงของชิ้นส่วนต่างๆ ของแท่นทดสอบ	79
3.17 แสดงแรงที่กระทำกับสปริง	81
3.18 แสดงเส้นแรงที่กระทำแกนเพลลา	81

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

3.19 แสดง FBD และ MBD ที่กระทำแกนเพลลา	82
3.20 แสดงขนาดของสลัก	83
3.21 แสดง ค่าFBD และค่า MBD	83
3.22 แสดงขนาดของสายพาน	86
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 2 ใบ $a/r = 0.2$	90
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (C_p) และ (λ) ของใบพัด 2ใบ $a/r = 0.2$	91
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 2 ใบ $a/r = 0.3$	94
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (C_p) และ (λ) ของใบพัด 2ใบ $a/r = 0.3$	95
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 2 ใบ $a/r = 0.4$	98
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (C_p) และ (λ) ของใบพัด 2ใบ $a/r = 0.4$	99
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 2 ใบ $a/r = 0.5$	102
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (C_p) และ (λ) ของใบพัด 2ใบ $a/r = 0.5$	103
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 2 ใบ $a/r = 0.6$	106
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (C_p) และ (λ) ของใบพัด 2ใบ $a/r = 0.6$	107
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 2 ใบ $a/r = 0.7$	110
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (C_p) และ (λ) ของใบพัด 2ใบ $a/r = 0.7$	111
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 2 ใบ $a/r = 0.8$	114
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (C_p) และ (λ) ของใบพัด 2ใบ $a/r = 0.8$	115
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.2$	117
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (C_p) และ (λ) ของใบพัด 3ใบ $a/r = 0.2$	118
4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.3$	121
4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (C_p) และ (λ) ของใบพัด 3ใบ $a/r = 0.3$	122
4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.4$	125
4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (C_p) และ (λ) ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.4$	126
4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.5$	129
4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (C_p) และ (λ) ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.5$	130
4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.6$	133
4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (C_p) และ (λ) ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.6$	134

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.7$	137
4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (C_p) และ (λ) ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.7$	138
4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.8$	141
4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (C_p) และ (λ) ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.8$	142
4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.2$	144
4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (C_p) และ (λ) ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.2$	145
4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.3$	147
4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (C_p) และ (λ) ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.3$	148
4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.4$	150
4.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (C_p) และ (λ) ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.4$	151
4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.5$	154
4.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (C_p) และ (λ) ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.5$	155
4.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.6$	158
4.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (C_p) และ (λ) ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.6$	159
4.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.7$	162
4.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (C_p) และ (λ) ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.7$	163
4.41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.8$	166
4.42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (C_p) และ (λ) ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.8$	167

รูปภาคผนวกที่

1.1 รูปแสดงการหาคุณสมบัติของพัดลม	186
1.2 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Surface Factor กับ Tensile Strength	187
1.3 รูปแสดงการหาจุดออกแบบของเพลลา	188
2.1 รูปแสดงการปรับความเร็วรอบของหันเพื่อหาภาระกระทำ	190
2.2 รูปแสดงการติดตั้งกังหันเข้ากับตัวแท่น	191
2.3 รูปแสดงกังหันพร้อมกับแท่นและไดนาโมมิเตอร์	192

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
P	กำลัง	W
P_{all}	แรงที่ใช้กระทำทั้งหมด	N
P_{cr}	แรงที่จุดวิกฤต	N
P_s	กำลังของเพลลา	W
q	อัตราการไหลต่อวินาที	m^3/s
r	รัศมีจเรชั้น	m
R	รัศมีของกึ่งหัน	m
Re	เรโนลด์นัมเบอร์	-
S	ความเค้น	N/m^2
S_n	ความเค้นที่จุดใช้งาน	N/m^2
S_u	ความเค้นสูงสุด	N/m^2
T	แรงบิด	N.m
U	พลังงานต่อหน่วยมวล	J/kg
U	ความเร็วลมคงที่ก่อนประทะสิ่งประดิษฐ์	m/s
V	ความเร็วลม	m/s
V	ความเร็วของ disk	m/s
W	งานต่อหน่วยมวล	J/kg
Z	โมดูลัสหน้าตัดรอบแกนสะเทิน	mm^3
λ	อัตราส่วนความเร็วปลายมใบ	-
τ	แรงเฉือน	N
ω	ความเร็วรอบ	Radiun/s
ρ	ความหนาแน่น	Kg/m^3
σ	ความเค้น	N/m^2

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่หน้าตัด	m^2
A_b	พื้นที่หน้าตัดของสลัก	m^2
b	ความกว้างสิ่งประดิษฐ์	m
c	ระยะจากแกนสะเทิน	Mm
C_b	ตัวประกอบขนาด	-
C_c	ตัวประกอบแรง	-
C_D	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	-
C_L	สัมประสิทธิ์แรงยก	-
C_P	สัมประสิทธิ์กำลัง	-
C_t	สัมประสิทธิ์แรงบิด	-
C_s	ตัวประกอบผิว	-
D	drag force ต่อ ความยาว	N/m
d	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพลลา	m
E	พลังงานจลน์	J
EV	พลังงานจลน์ต่อปริมาตรอากาศ	J/m^3
f	แรงเสียดทาน	N
F.S	ค่าความปลอดภัย	-
h	ความสูง	m
I	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด	m^4
K_f	ตัวประกอบความเค้นแน่นจริง	-
l	ความยาวสิ่งประดิษฐ์	m
Le	ความยาวสมมูล	m
m	มวล	kg
M	โมเมนต์คด	N.m
N	จำนวนใบพัด	ใบ
N_u	ค่าความปลอดภัยของชิ้นงาน	-
N_y	ค่าความปลอดภัยของชิ้นงาน	-

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของโครงการ

พลังงานลมเป็นรูปแบบหนึ่งที่น่าพลังงานธรรมชาติมาใช้ การใช้งานเช่นนี้จำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานลมให้เป็นพลังงานกล 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 ซึ่งได้จัดกังหันลม

เป็น 4 ประเภท ได้แก่

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

พบว่ามียูในประเทศไทย คือ ประเภท 1, 2 และ 3 ดังต่อไปนี้

กังหันลมรอบช้า

กังหันลมรอบช้าซึ่งเป็นกังหันลมที่มีอัตราส่วนความเร็วที่ปลายใบ ณ จุดใช้งานมีค่าไม่เกิน 2 ที่พบในประเทศไทยตามแถบชายทะเลฝั่งตะวันออก แถบจังหวัดสมุทรสงคราม สมุทรสาคร และชลบุรี ได้แก่ กังหันลมนาเกลือภาคกลาง หรือกังหันลมเสื่อลำแพนกังหันลมชนิด 6 ใบ ซึ่งกังหันลมประเภทนี้ในระยะหลังมีการดัดแปลงใบกังหันโดยพบว่ามีการใช้ใบผ้าและใบลูกปัดมาแทนใบเสื่อลำแพน ในบางครั้งอาจจะพบว่าใช้จำนวนใบมากกว่า 6 ใบ และรูปร่างใบแตกต่างไปจากของเดิมซึ่งเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก แต่ยังคงใช้จุดระหัดวิดน้ำ กังหันลมอีกแบบหนึ่งซึ่งพบเห็นได้โดยทั่วไปคือ กังหันลมหลายใบหรือแบบอเมริกัน มีจำนวนใบ 20-30 ใบ ใช้ร่วมกับปั๊มลูกสูบ ในระยะแรกได้มีการนำเข้าจากต่างประเทศปัจจุบันได้มีบริษัทที่ผลิตอยู่ในประเทศ 2-3 บริษัท กังหันลมนอกเหนือจากนี้เป็นกังหันลมที่อยู่ในระหว่างการค้นคว้าวิจัยได้แก่ กังหันลมล้อจักรยานเป็นกังหันลมที่ทำขึ้นมาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก กังหันลมแบบซาโวเนียส (Savonius) เป็นกังหันลมที่หมุนในแนวแกนตั้ง ในรุ่นแรก ๆ เป็นแบบถ่วงน้ำหนัก 200 ลิตร ผ่าออกเป็น 2 ซีก ใช้ร่วมกับปั๊มน้ำ

กังหันลมรอบปานกลาง

กังหันลมรอบปานกลางซึ่งเป็นกลุ่มกังหันลมที่มีอัตราส่วนความเร็วที่ปลายใบ ณ จุดใช้งานตั้งแต่ 2 แต่ไม่เกิน 4 พบตามแถบชายฝั่งทะเลภาคใต้โดยเฉพาะที่จังหวัดปัตตานี ได้แก่ กังหันลมนาเกลือปัตตานี มีจำนวน 2 และ 4 ลักษณะโดยทั่ว ๆ ไปของรูปร่างใบกังหันซึ่งเป็นโครงซึ่งทำด้วยไม้เนื้อแข็งยึดติดกับแกนใบหุ้มด้วยสังกะสีลอนใหญ่ ตั้งหมุนรับลมเพื่อจุดระหัดวิดน้ำในระยะหลัง ๆ นี้มักจะพบว่าใช้เครื่องขุดดีเซลจุดระหัดวิดน้ำ เสริมพลังงานที่ได้จากธรรมชาติ

กังหันลมรอบเร็ว

กังหันลมรอบเร็วซึ่งเป็นกลุ่มกังหันลมที่มีอัตราส่วนความเร็วที่ปลายใบ ณ จุดใช้

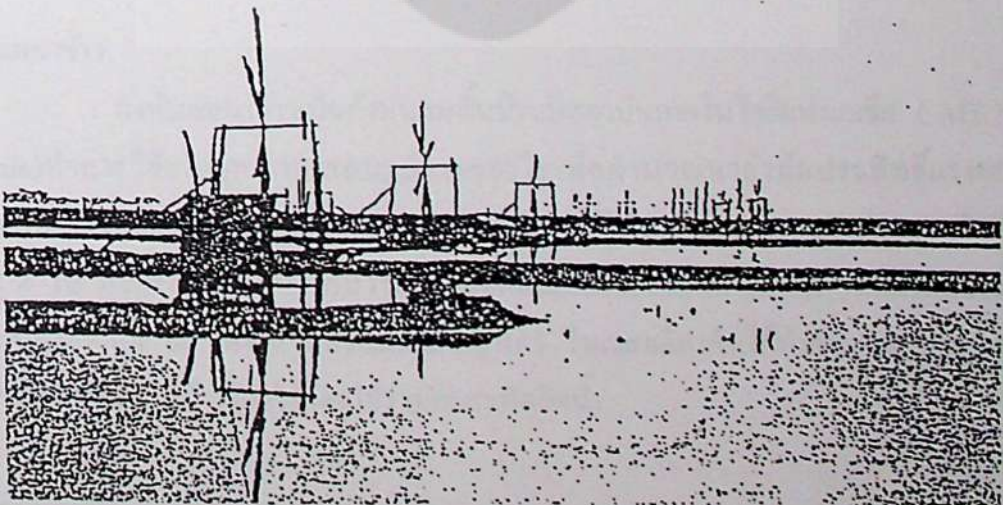
งานระหว่าง 5-10 ในประเทศไทยพบกั้งหันลมรอบเร็วตามแถบจังหวัดฉะเชิงเทรา สมุทรปราการ มีนบุรี หนองจอก ได้แก่กั้งหันลมนาวามีจำนวนใบ 2 และ 4 ใบ ทำจากไม้เนื้อแข็งขนาดยาว 6-8 เมตร หนา 4-5 เซนติเมตร กว้าง 20 เซนติเมตร โดยเหลาให้มีมุมใบบิดรับลมตั้งแต่โคนใบจาก 0 องศา จนถึงปลายใบ 4 ถึง 8 องศา ใช้ร่วมกับระหัดวิดน้ำ

การวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกั้งหันลมที่ใช้กันมากในประเทศไทย

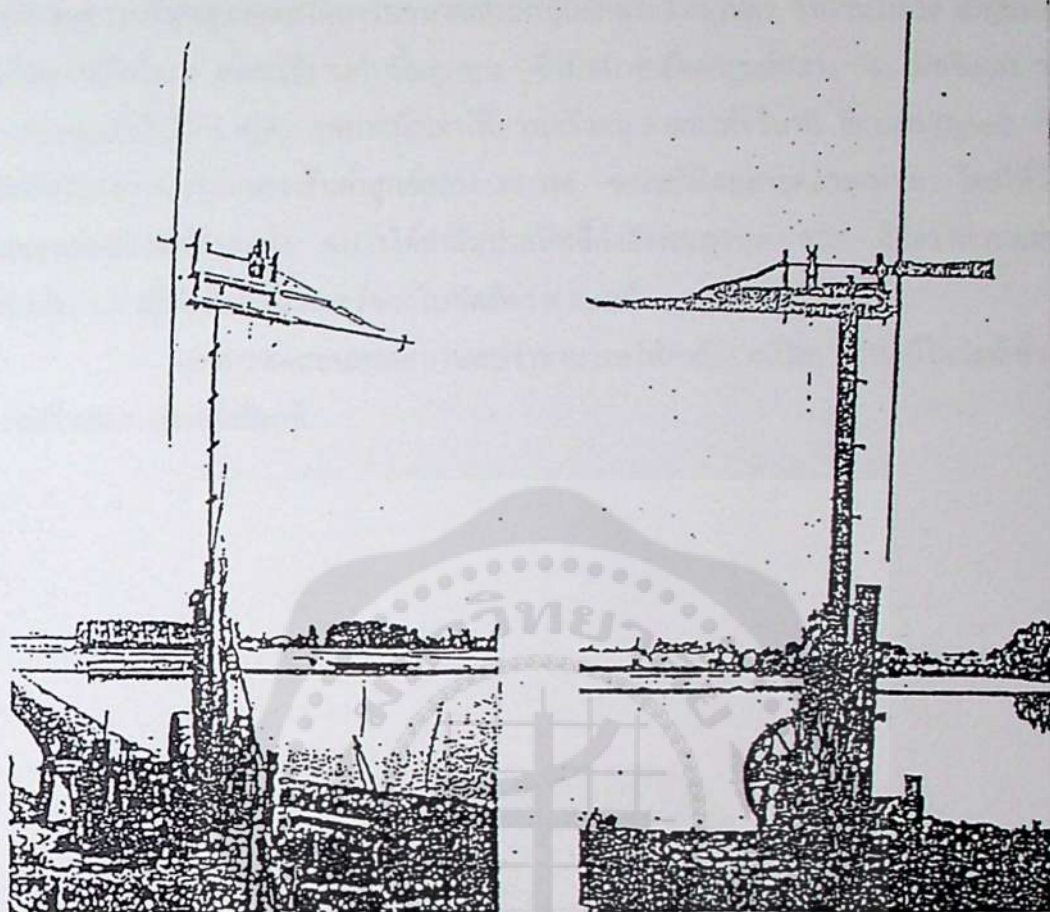
กั้งหันลม 5 ชนิด อันได้แก่ กั้งหันลมนาเกลือภาคกลาง กั้งหันลมนาข้าว กั้งหันลมหลายใบ กั้งหันลมล้อจักรยาน และกั้งหันลมนาเกลือปัตตานี กั้งหันลมเหล่านี้นักใช้ค่อนข้างแพร่หลายในประเทศไทย มีบุคคลและหน่วยงานรัฐและเอกชนหลายแห่งทำกาวิเคราะห์และวิจัยดังรายละเอียดต่อไปนี้

กั้งหันลมนาเกลือภาคกลาง

กั้งหันลมนาเกลือภาคกลางมีชื่อเรียกตามท้องถิ่นว่าพัดลมและมีผู้เรียกอื่น ๆ ได้แก่ กั้งหันลมเสื่อลำแพน หรือแบบใบผ้า ได้มีผู้ทำการวิเคราะห์และวิจัยกั้งหันลมประเภทนี้ คือ สิริ นันทศรี ทำการสำรวจและประเมินการนำกั้งหันลมแบบต่าง ๆ มาใช้งาน สำนักงานการพลังงานแห่งชาติ ได้ทำการทดสอบภาคสนามแล้วพบว่ากั้งหันลม 6 ใบ สามารถยกน้ำได้สูง 0.06 เมตร ให้อัตราการไหล 2.8 ลิตรต่อวินาที ที่ความเร็วลม 3.5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 1.1 กั้งหันลมนาเกลือภาคกลาง



รูปที่ 1.2 กังหันลมนาข้าว

กังหันลมนาข้าว

กังหันลมนาข้าวเป็นกังหันลมพื้นบ้านมีสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) โดย (Mukhia) ทำการวิจัยโดยการทดสอบรูปร่างของใบเพื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงดูดที่ เปลี่ยนแปลงตามมุมปะทะ นำค่าที่ได้มาคำนวณหาสมรรถนะของกังหันลมนาข้าว 4 ใบ มุมตั้งใบ 5 องศา พบว่าได้เรโนลด์ส์นัมเบอร์ของใบพัด 2.9×10^5 ให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด 0.4 ณ อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 5 ในเวลาเดียวกันได้ทำการทดสอบภาคสนามระบบของกังหันลมนาข้าวโดยใช้โดยใช้ร่วมกับระดัควัดน้ำ

กังหันลมหลายใบ

กังหันลมหลายใบหรือแบบอเมริกัน สำนักงานการพลังงานแห่งชาติได้ทดสอบ

กังหันลมของบริษัทยูทาสาอุตสาหกรรมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.05 เมตร จำนวนใบ 30 ใบมุมบิดของ เหล็กฉากที่ซี่ใบ 5 องศาใช้ร่วมกับปั้มลูกสูบ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 76 มิลลิเมตร พบว่า สามารถสูบน้ำได้ปีละ 4500 ลูกบาศก์เมตร ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที อิกบอล (Igbal) ทำการ วิจัยกังหันลมหลายใบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 14 ฟุต ของบริษัทยูทาสาอุตสาหกรรม โดยใช้วิธีการ ทดลองเช่นเดียวกันกับมูเกีย พบว่าได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด 0.25 ที่อัตราส่วนความเร็ว ปลาใบ 1.0 เมื่อเรโนลด์ส์นัมเบอร์ของใบพัดมีค่า 9.5×10^4

จากการทดสอบภาคสนามพบว่าสามารถให้กำลังงานปีละ 175 กิโลวัตต์-ชั่วโมงที่ ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที



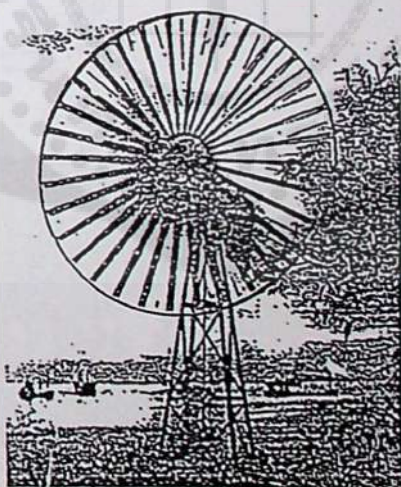
รูปที่ 1.3 กังหันลมหลายใบ

ศักดิ์ชาย เอียดตลอด และคณะได้ทำการออกแบบและสร้างกังหันลมแบบหลาย ใบเพื่อสูบน้ำ โดยมีจำนวนใบ 20 ใบ เป็นแบบแผ่นเรียบมีเส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด 3 เมตร มุม ปะทะของใบพัด 4 องศา พบว่าใช้งานได้ดีกับช่วงความลมต่ำ ๆ โดยสามารถทำงานได้ตั้งแต่ ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 27 % ให้อัตราการสูบ น้ำ 15 ลิตรต่อวินาที ที่ความเร็วลม 4 เมตรต่อวินาที โดยติดตั้งกับโครงสร้างที่มีความสูง 9 เมตร ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ ประมาณ จันทรักษา กับ คณะได้ออกแบบและสร้างกังหันลมแบบหลายใบเพื่อสูบน้ำ โดยใบพัดเป็นแบบแผ่นโค้งจำนวน 20 ใบ เส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด 4 เมตร มุมปะทะใบ 4 องศา พบว่าสามารถเริ่มทำงานตั้งแต่

ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาทีขึ้นไปสามารถสูบน้ำได้ 25.5 ลิตรต่อนาทีที่ความเร็วลมเฉลี่ย 3.8 เมตรต่อวินาที โดยติดตั้งใช้งานที่โรงเรียนภัทรพิทยาคาร อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก

กังหันลมล้อจักรยาน

รำพึง และคณะทำการทดสอบกังหันลมภาคสนามกังหันลมล้อจักรยานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.18 เมตร พบว่าให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด 0.23 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 1.8 สมาน เสงงาม ทดสอบกังหันลมล้อจักรยานเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร จำนวน 25 ใบพัด ใช้ร่วมกับปั๊มสูบน้ำซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร สามารถส่งน้ำได้สูง 8 เมตร ให้อัตราการไหลสูงสุด 9 ลิตรต่อนาทีที่ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที

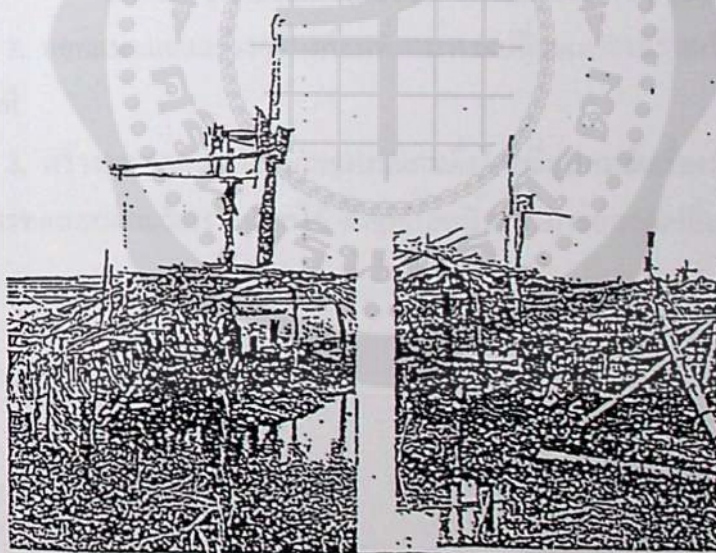


รูปที่ 1.4 กังหันลมล้อจักรยาน

ทรงเกียรติ หล่มศิริ และจุฑพร สัตยญทิพย์ ทำการวิเคราะห์ข้อมูลระบบการทำงานของกังหันลมซึ่งมีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เมตร ใช้ร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พบว่าได้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อปี 600-800 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

กังหันลมนานาเกลียวปิดตานี

กังหันลมนี้นี้เป็นกังหันลมชนิดที่มีการสำรวจและวิจัยน้อย เมื่อ พ.ศ.2529 กนิช ธิรวณิช ได้ทำการทดสอบแบบจำลองกังหันลมนานาเกลียวปิดตานีแบบ 2 ใบที่ความเร็วลม 6 เมตร ต่อวินาทีให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด 0.41 ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 2.6 และสำหรับ กังหันลมนานาเกลียวแบบ 4 ใบที่ความเร็ว 5 เมตรต่อวินาทีให้ค่าสัมประสิทธิ์พลังงานสูงสุด 0.28 ที่ อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 1.4



รูปที่ 1.5 กังหันลมนานาเกลียวปิดตานี

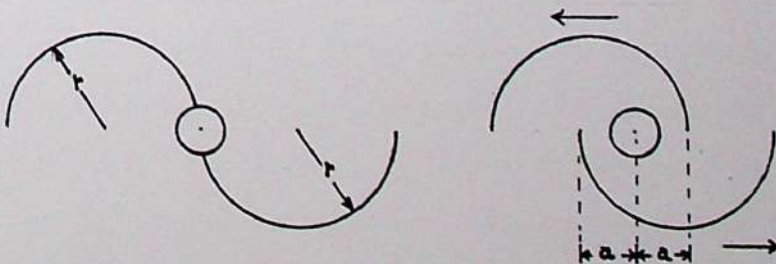
วัตถุประสงค์ของโครงการ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะของกังหันลมแกนตั้งแบบ Savonius ซึ่งมีลักษณะใบกังหันแบบครึ่งวงกลมดังนี้

1. ทำการศึกษาสมรรถนะของกังหันลมแบบ Savonius ที่มีใบกังหันเป็นแบบครึ่งวงกลมแบบมีช่องว่างตรงกลาง
2. เพื่อศึกษาวิเคราะห์สมรรถนะกังหันลมทางทฤษฎี
3. เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกังหันลม กับผลที่ได้จากทฤษฎี

ขอบเขตของโครงการ

1. สร้างกังหันลมที่สามารถปรับลักษณะต่าง ๆ เพื่อศึกษาสมรรถนะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะต่าง ๆ ของกังหันลมได้ คือ
 - 1.1 ความเร็วลมที่ใช้ 2, 3, ..., 8 m/s
 - 1.2 อัตราส่วนระหว่าง ระยะห่างจากจุดหมุน ถึงจุดเริ่มโค้งของใบ (a) กับ รัศมีความโค้ง (r) ที่ใช้ 0.2, 0.3, 0.4, ..., 0.6, 0.7, 0.8 เมื่อได้ค่า a/r ที่ Optimum จะทำการเพิ่มจำนวนใบพัด
 - 1.3 จำนวนใบพัดของใบของกังหันลมที่ใช้ คือ 2, 3 และ 4 ใบ
2. ออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมที่สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วของลมได้ตั้งแต่ 0 ถึง 8 เมตร / วินาที
3. สร้างชุดทดสอบกังหันลมแบบแกนตั้ง โดยมีอุปกรณ์เครื่องมือวัดครบสมบูรณ์ให้สามารถทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลได้ ซึ่งชุดทดสอบนี้จะสามารถถอดเปลี่ยนกังหันเป็นแบบอื่นได้



รูปที่ 1.6 ลักษณะของกังหันลมที่ทำการศึกษา

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. นำกังหันลมที่ได้ทดสอบไปทำเป็นต้นแบบในงานจริง
2. สามารถใช้เป็นแนวทางในการที่จะนำไปสร้างกังหันที่ใหญ่ขึ้น
3. มีผลการทดสอบสมรรถนะของกังหันแบบ Savonius เป็นข้อมูลไว้อ้างอิง
4. สามารถใช้ข้อมูลจากงานวิจัยนี้เป็นพื้นฐานสำหรับพัฒนากังหันในประเทศไทย

ให้สามารถใช้พลังงานได้เต็มตามศักยภาพ



บทที่ 2

ทฤษฎี

พลังงานที่มีอยู่ในลม

เนื่องจากความเร็วลมไม่สม่ำเสมอ ทำให้กำลังลมมีการเปลี่ยนแปลงตามความเร็วลมกำลังตาม 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 ยังมีการเปลี่ยนแปลงมากตัวแปรนี้ยังจะมีผลมาก

อย่างไรก็ตามสำหรับลมประเภทใดประเภทหนึ่ง กำลังลมยังคงแปรผันตามความเร็วลมเฉลี่ยกำลังสาม ต่อไปเราจะศึกษาถึงการนำพลังงานลมไปใช้กับกังหันลมให้เกิดประโยชน์

การเปลี่ยนกำลังลมเป็นกำลังเพล

มีกลไก 2 ประเภทใหญ่ ๆ ที่จะแปลงพลังงานจลน์ของลมเป็นกลไกการทำงาน กลไกทั้งสองขึ้นอยู่กับความเร็วลมและวิธีการลดพลังงานจลน์ วิธีการที่ให้ประสิทธิภาพไม่ต่อยอดนักคือการใช้แรงต้านทำให้เกิดการปั่นป่วน และแรงต้านนี้จะกระทำในทิศทางเดียวกับลม ในยุคแรกใช้วิธี “panamones” โดยใช้ผลจากความแตกต่างของแรงต้านในการหมุนใบพัด

อีกวิธีที่มีประสิทธิภาพมากในการสร้างกังหันลม คือ การใช้แรงยก แรงยกจะเกิดขึ้นเมื่อกังหันลมทำมุมเล็ก ๆ กับลม และแรงยกซึ่งตั้งฉากกับทิศทางลมจะมีค่าน้อยกว่าแรงต้าน การ

ใช้ วิธีนี้เราสามารถเปลี่ยนหรือลดจำนวนใบพัดลงได้เมื่อมีความเร็วลมสูงขึ้น การใช้แรงยกจึงสามารถลดความปั่นป่วนของพลังงานจลน์ ดังนั้นการใช้แรงยกจึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการลดพลังงานลมได้มากกว่าแบบแรงต้าน

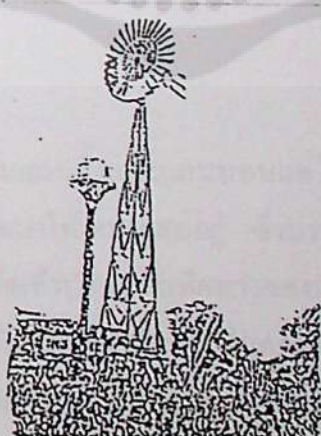
ส่วนหนึ่งของพลังงานจลน์จากลมจะนำมาทำให้เกิดประโยชน์จากกังหันลมได้เพียง 60 % เนื่องจากเป็นไปไม่ได้ที่จะหยุดลมได้อย่างสมบูรณ์ จึงเป็นข้อจำกัดในการลดพลังงานจากลม

การแบ่งประเภทของกังหันลม

ถูกแบ่งประเภทตามลักษณะดังนี้

แบ่งตามขนาดกำลังที่ได้ มี 3 ขนาดคือ

1. ขนาดเล็ก ส่วนมากใช้ในการสูบน้ำหรือผลิตกระแสไฟฟ้า กำลังงานไม่เกิน 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 ให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงกว่าแบบอื่น มีปัญหาทางการสั่นสะเทือน

- แบบ 3 ใบพัด จะมีความเร็วรอบใบพัดปานกลาง ให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังปานกลาง

- แบบหลายใบพัด จะให้แรงบิดเริ่มต้นสูง ค่าสัมประสิทธิ์กำลังต่ำ

2. แบบแกนตั้ง แกนของกังหันลมตั้งฉากกับพื้นโลก หรือตั้งฉากกับทิศทางลมมีแบบที่นิยมใช้งานดังนี้

- แบบคาร์เรียส ใบของกังหันมีลักษณะคล้ายกับที่ตีไข่

-แบบซาโวเนียส มีลักษณะคล้ายดังทรงกระบอกผ่าครึ่งแล้วนำมาติดบนเพลลาซึ่งความเร็วรอบต่ำ

แบ่งตามลักษณะของแรงขับที่กระทำต่อใบพัด

ความเร็วรอบสูงจะให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงพอๆกับแบบ 3 ใบพัด โดยการใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า กล่าวคือ แรงขับที่กระทำบนใบพัด เป็นแรงยก (Lift force) เช่น กังหันลมแบบ พร็อบเพลเจอร์ หรือ แบบคาร์เรียส และแรงขับที่กระทำบนใบพัด เป็นแรงต้าน หรือแรงปะทะ เช่น กังหันลมแบบซาโวเนียส 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 force และ Lift force ไปพร้อมๆ กัน กังหันลมแบบ Savonius เคยถูกเสนอในลักษณะที่เป็นกังหันที่สามารถทำขึ้นได้เอง แต่ก็พบว่ามีปัญหาเกี่ยวกับการติดตั้ง คือ กังหันต้องมีความแข็งแรงของ bearings สูง และ การติดตั้ง coupling ทำได้ยาก ข้อเสียของกังหันลมแบบ Savonius คือ

1. ไม่คุ้มค่า เนื่องจากต้องอาศัยอุปกรณ์ที่มีความแข็งแรงสูงจึงเป็นกังหันที่มีราคาสูงเมื่อเทียบกับชนิดอื่นๆ
2. การป้องกันการเสียหายทำได้ยาก เนื่องจากการที่กังหันรับแรงลมได้ทุกทิศทางเมื่อเกิดกระแสลมแรง หรือพายุจึงไม่สามารถที่จะหันกังหันลมหลบได้

กังหันลมแบบ Darrieus มีลักษณะหน้าตัดคล้ายปีกของเครื่องบิน คือ เป็นรูปตัว H แต่ จากการทดสอบแล้วจะได้ลักษณะคล้ายที่ติ่งไข่ เนื่องจากแรงที่จุดศูนย์กลางจะไหลผ่านตามความโค้งของใบทำให้เกิดการหมุน ประสิทธิภาพของกังหันลมแบบ Darrieus นั้นจะขึ้นอยู่กับ Lift force ที่เกิดขึ้นที่ใบที่ตัดผ่านกระแสลม กังหันลมแบบ Darrieus ได้มีการเริ่มต้นทำแบบง่ายๆ โดยใช้ใบเรือที่มีลักษณะเป็นสามเหลี่ยม โดยพบบริเวณเกาะทางตะวันตกของอินเดีย กังหันลมชนิดนี้ใช้หลักการเดียวกันกับการที่ใบเรือทำให้เรือแล่นได้นั่นเอง

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

กังหันลมในแนวแกนตั้งยังสามารถพัฒนาให้ใช้ได้อีกหลายทาง ดังนั้นจึงเป็นหัวข้อที่สำคัญสำหรับการทำการวิจัย เนื่องมาจากการสร้างกังหันชนิดนี้ทำได้ง่ายกว่าแบบแกนนอน และทางด้านของราคาที่สูง จึงต้องมีการวิจัยต่อไป

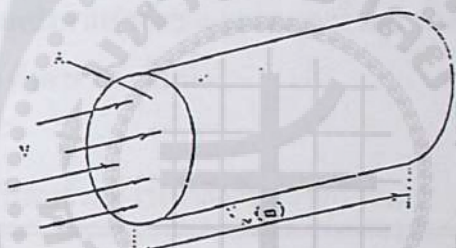
พลังงานลม กับ กำลังจากลม

ลม คือ อากาศที่เคลื่อนที่ ลมมีมวลแต่มีความหนาแน่นต่ำ เมื่อลมเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว V จะทำให้เกิดพลังงานจลน์ (E) ขึ้นตามสมการ

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

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 $\times$ ปริมาตรต่อเวลา

และจากสมการ (2.1) และ (2.2) จะได้ว่า

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

กำลังนี้เป็นกำลังที่มีอยู่ในลม ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีเพียงบางส่วนของกำลังจากลมนี้เท่านั้นที่ถูกกังหันลมเปลี่ยนไปเป็นพลังงานกล จากสมการ (2.4) ทำให้ทราบว่า

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

ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับความเร็วลม

Wind speed			Power density	
m/s	km/h	mph	kw/m ²	hp/ft ³
2.5	9	6	0.01	0.001
5	18	11	0.08	0.009
7.5	27	17	0.27	0.035
10	36	22	0.64	0.076
15	54	34	2.2	0.23
20	72	45	5.1	0.65
30	108	67	17	2.1
40	144	90	41	5.2

สัมประสิทธิ์ของกำลังและแรงบิด

กราฟผลการทดลองออกมา

โดยที่สัมประสิทธิ์ของกำลังจะอาศัยความระหว่าง

สัมพัทธ์กำลังของเพลากับกำลังของลมทั้งหมดที่พัดผ่านจะอยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ และใช้สัญลักษณ์ C_p แสดงได้ดังสมการ

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

เมื่อ P_t คือกำลังของเพล

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 แรงบิดเริ่มต้นของเพล เมื่อ Tip-speed-ratio มีค่าเป็น 1 หมายความว่า ใบพัดหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วลม (มุมปะทะของลมกับใบพัดต้องมีค่าเป็น 45 องศา) และ ในทำนองเดียวกัน Tip-speed-ratio มีค่าเป็น 2 หมายความว่า ใบพัดหมุนด้วยความเร็วเป็นสองเท่าของความเร็วลม ตามลำดับ

ค่า Rotor Solidity

Solidity (σ) จะแปรผันตามพื้นที่การกวาดของใบพัดและพื้นที่จริงของใบพัด ซึ่ง

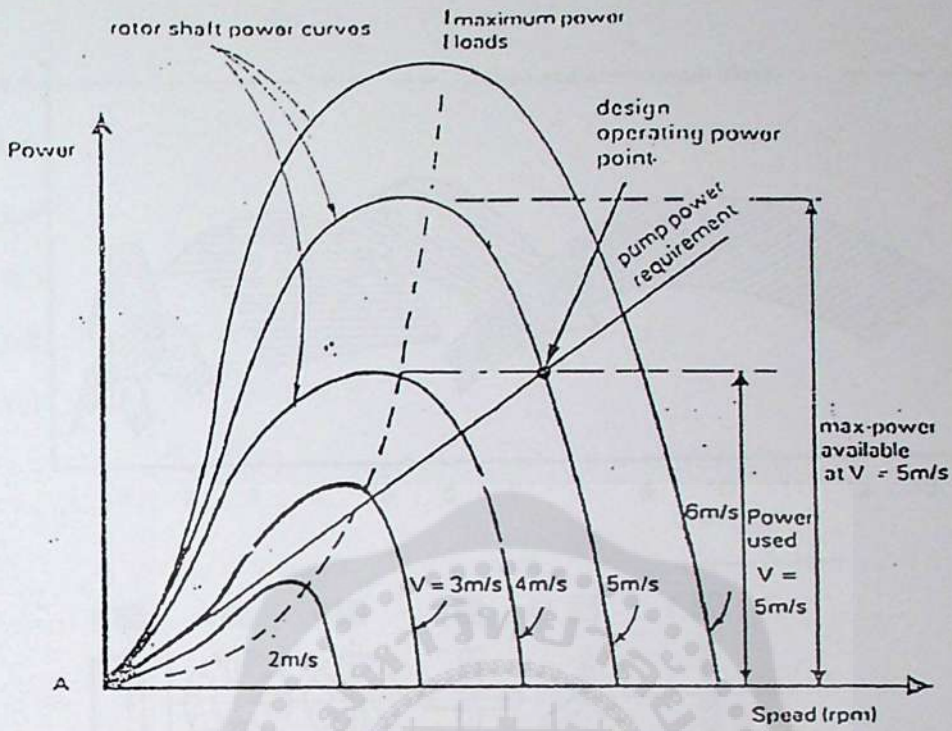
สามารถเขียนเป็นสัดส่วนได้จาก ผลรวมของความกว้าง หรือ chords ของใบพัดแต่ละใบ ต่อความยาวเส้นรอบวงดังสมการ

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

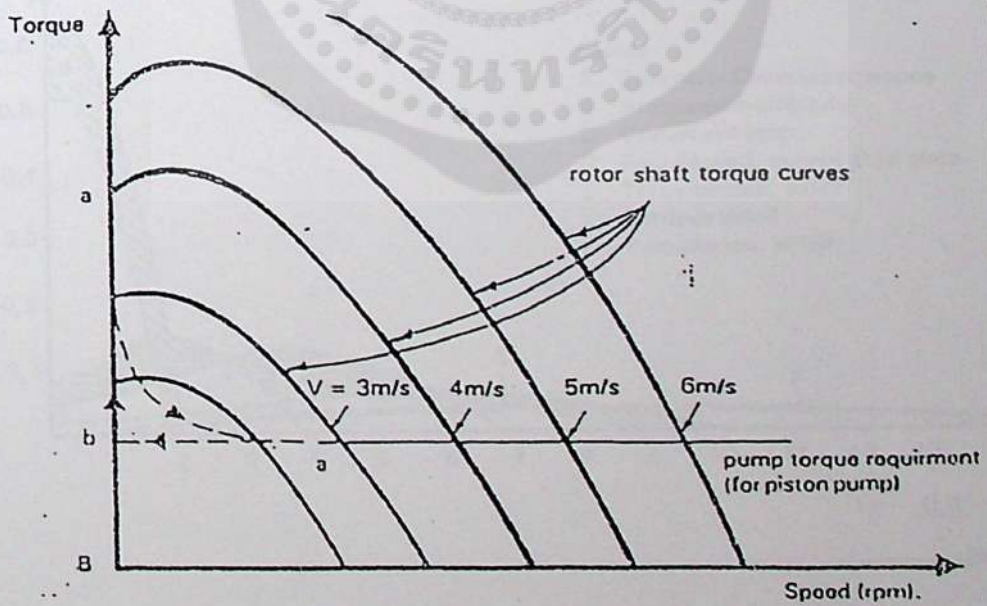
เมื่อ N คือจำนวนใบพัด C คือความกว้างใบพัด หรือ chords และ r คือรัศมีของใบพัด

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

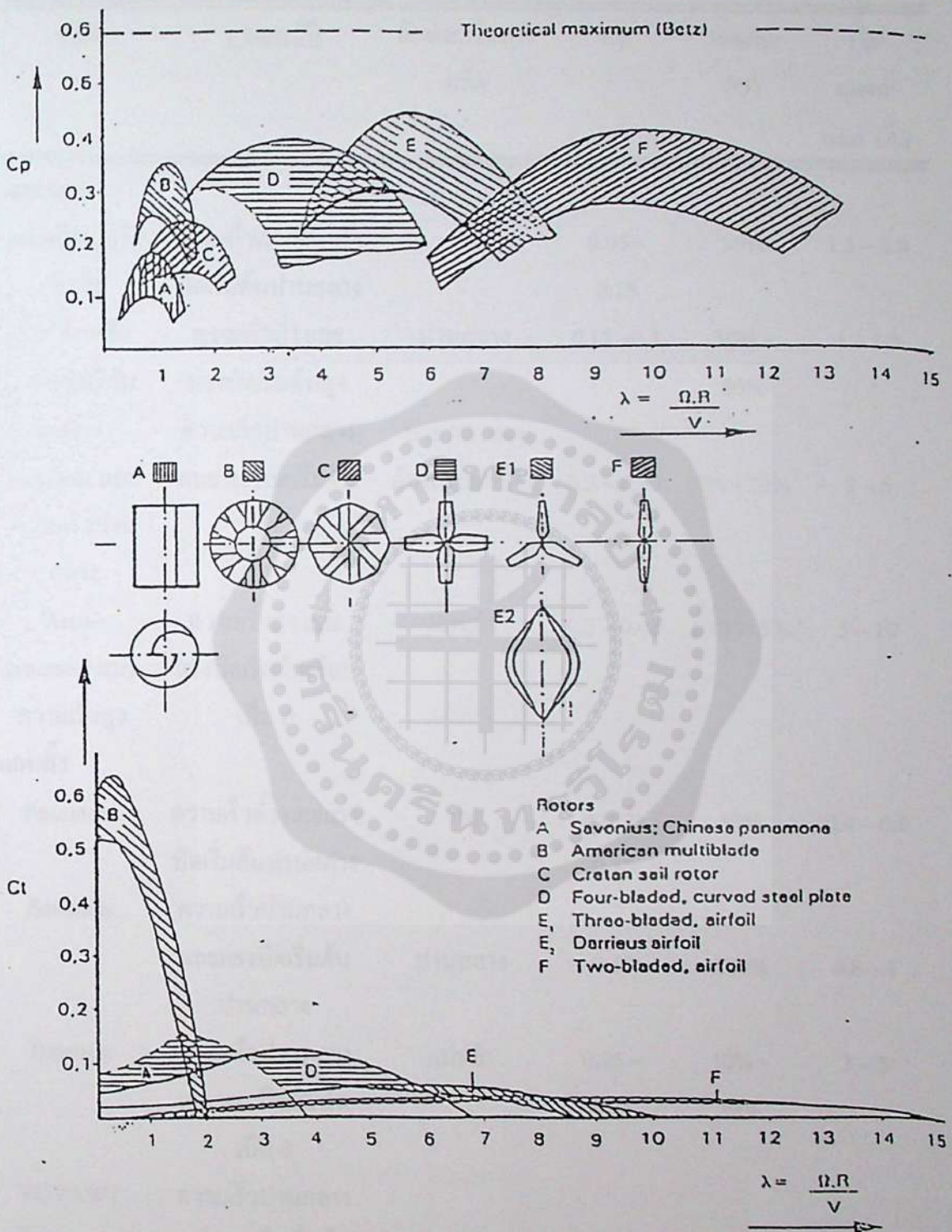
ในทางตรงกันข้ามกังหันแบบที่มีใบพัด 2 ใบพัด หรือ 3 ใบพัด จะมีค่า Rotor Solidity ต่ำ และจะให้ประสิทธิภาพที่ดี เมื่อหมุนด้วยความเร็วมากกว่าความเร็วของลม 6 ถึง 10 เท่า และติดตั้งใบให้มีมุมปะทะที่เหมาะสม กังหันแบบนี้อาศัยแรงบิดเริ่มต้นเพียงเล็กน้อย หรือเกือบจะไม่ต้องใช้เลย ในการทำให้กังหันหมุน



รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับความเร็วรอบที่ความเร็วลมต่างๆ



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบที่ความเร็วลมต่างๆ



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_p , C_t กับ λ

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของกังหันชนิดต่างๆ

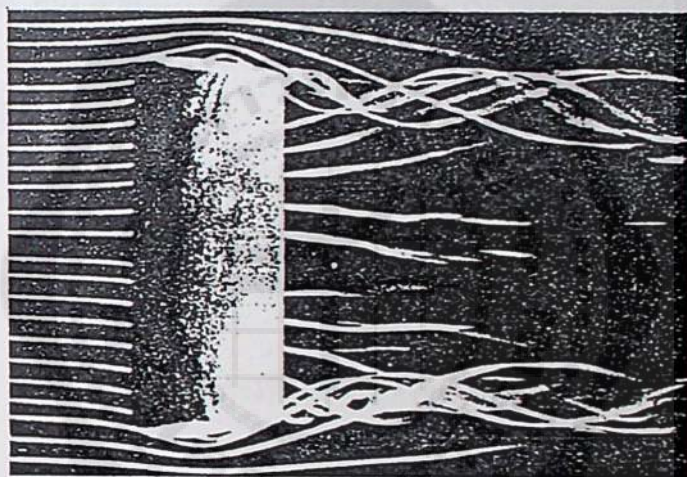
ชนิด	คุณสมบัติ	ลักษณะในการผลิต	Cp	Solidity (σ)	Tip-speed-ratio (λ)
แกนนอน					
แผ่นเรียบ หรือ ใบเรือ	ความเร็วต่ำ และแรงบิดเริ่มต้นปานกลาง	ง่าย	0.05 – 0.15	50%	1.5 – 2.0
ใบโค้ง หรือ แบบอเมริกัน	ความเร็วต่ำ และแรงบิดเริ่มต้นสูง	ปานกลาง	0.15 – 0.3	50% - 80%	1 – 1.5
Aero-generator แบบความเร็วปานกลาง	ความเร็วปานกลาง และแรงบิดเริ่มต้นต่ำ	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
VGVAWT หรือ Gyromill	ความเร็วปานกลาง และแรงบิดเริ่มต้นเป็น 0 หรือเล็กน้อย	แม่นยำ	0.20 – 0.35	15% - 40%	2 – 3

การวิเคราะห์กังหันลม

ในหัวข้อนี้จะศึกษาเกี่ยวกับลมที่กระทำกับใบพัดโดยมีแรงอยู่ 2 ชนิด คือ drag forces (อยู่ในทิศเดียวกับทิศทางการไหล) และ แรงยก (ทิศตั้งฉากกับทิศทางการไหล) ซึ่งในเครื่องจักรพลังงานลมในระยะแรกจะใช้ drag forces เป็นต้นกำลัง ในยุโรป และ อเมริกา โรงสีลมก็ใช้ drag forces เป็นต้นกำลัง แต่ในปัจจุบัน กังหันลม จะใช้แรงยกเป็นต้นกำลังแทนซึ่งจะให้ประสิทธิภาพมากกว่า

ในรูปที่ 2.6 แสดงเส้นการไหลมีแรง drag กระทำกับสิ่งประดิษฐ์ โดยแรง drag มีผลมาจากความสัมพันธ์ระหว่างลมกับสิ่งประดิษฐ์ กำลังที่เกิดขึ้นมาจากสมการ

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



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 (ตั้งฉากกับความเร็วลม)	(m)

ความเร็วของสิ่งประดิษฐ์มักจะต่ำกว่าความเร็วลม หรือไม่เกิดแรง drag สัมประสิทธิ์กำลัง (power coefficient) คืออัตราส่วนของกำลังที่จะนำไปใช้ กับกำลังที่ได้จากพื้นที่ปะทะลมของสิ่งประดิษฐ์

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

เมื่อพิจารณาสิ่งประดิษฐ์ที่เกิดกำลังจากแรงยกของลม จากรูปที่ 2.7 แสดงปีกเครื่องบินที่เลื่อนขึ้นจากมุมทางขวา แรงลม จะทำให้เกิดทั้งทางยกและ drag forces ความเร็วสัมพัทธ์ที่ ผ่านผิวก็คือ ผลรวมของเวกเตอร์ระหว่างความเร็วคงที่ของลมและความเร็วลมที่ผ่านไป แล้ว และมุมระหว่าง 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

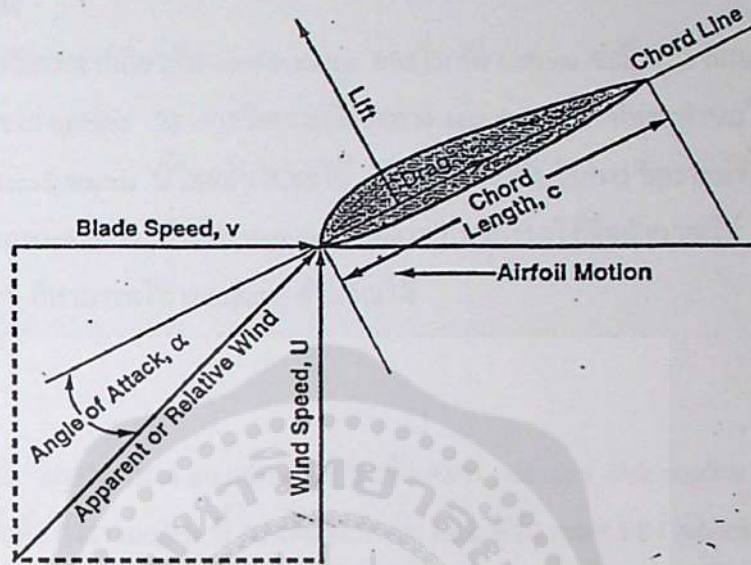
C_L = lift coefficient

C_D = drag coefficient

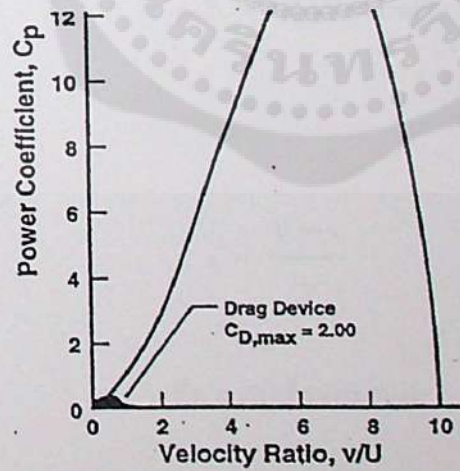
ส่วนสัมประสิทธิ์กำลัง Power coefficient หาได้จาก

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

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



รูปที่ 2.7 แสดงแรงต่าง ๆ ที่กระทำกับปีกเครื่องบิน



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

รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_p กับ v/U

แบบ Model

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 แบบง่ายๆ 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 และสมมติการไหลเป็นแบบ 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

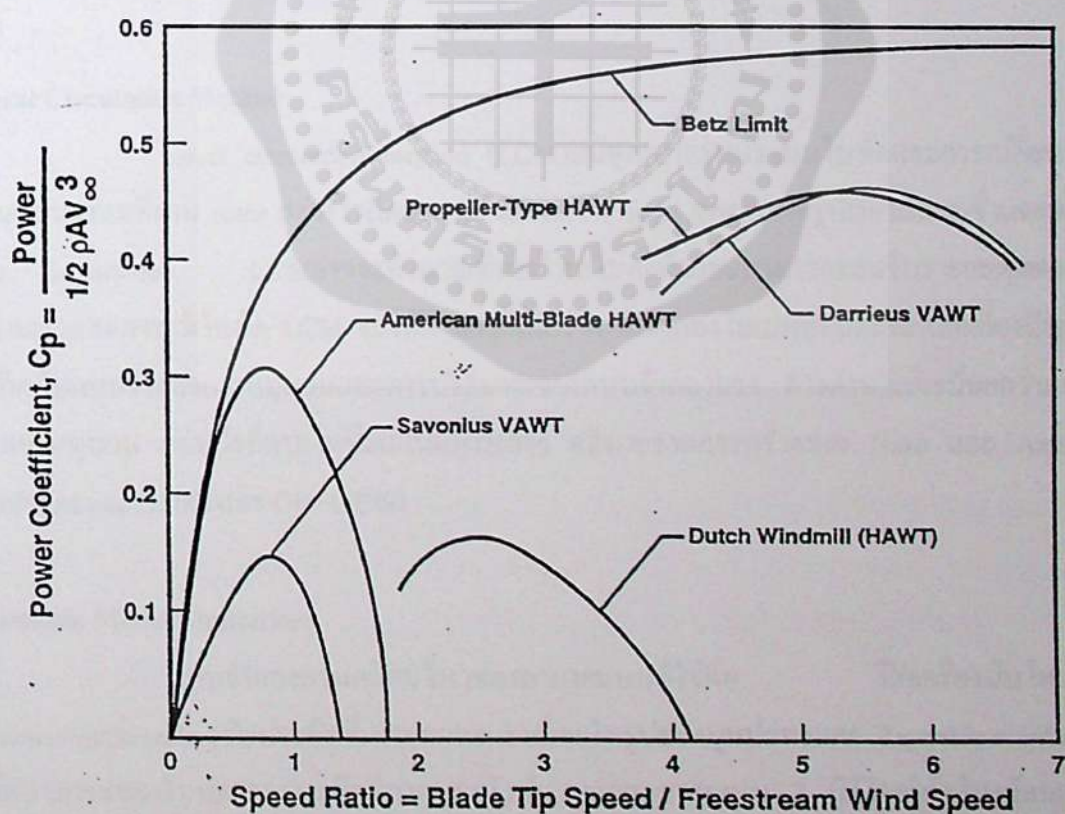
$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (2.14)$$

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

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

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

ทฤษฎีโมเมนตัมช่วยอธิบาย กังหันแบบแกนตั้งเพิ่มเติมจากทฤษฎี multiple streamtube และ double-multiple streamtube แบบ VAWT ซึ่งเหมือนกับ ทฤษฎีส่วนประกอบใบกังหัน แบบ HAWT อธิบายเพิ่มเติมบนแบบจำลองของ Touryan et al.(1987) และ Wilson (1994)



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Speed Ratio กับ C_p

ค่าแรงเฉือนในลมและค่า local Reynolds number จะเปลี่ยนแปลงตามค่าของ multiple streamtube method และ ส่วนประกอบของใบกังหัน การออกแบบแบบจำลองกังหันลม ต้องเป็นแบบที่ง่าย เร็ว และเที่ยงตรงมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามแบบจำลองจะอยู่บนสมมุติฐาน การไหลเป็นแบบคงตัวในเส้นการไหลที่ระยะทางและเวลาหนึ่ง แบบจำลองการไหลแบบวงกลม เพื่อวิเคราะห์การหักเหของไหล การไหลผ่านวัตถุแบบการไหลไม่คงตัว และส่วนอื่นๆของของไหล ซึ่งทำให้หาค่าประสิทธิภาพและภาระของกังหันเนื่องจากการปะทะของของไหล

Vertex Models

แบบจำลองแบบหมุนวนอยู่บนพื้นฐานของสมการหมุนสามารถใช้หลักของ lifting line หรือ lifting surface สำหรับใบกังหันด้วยแรงอิสระ หรือแรงคงที่ แรงอิสระสำหรับ ระบบ 3 มิติ lifting surface เป็นรูปแบบทางกายภาพที่เกิดมาก ในการจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ต้องการผลการทดลองจากแบบจำลองจำนวนมากปัญหาการหมุนวนรูปกรวยคือความสมดุล ระหว่างข้อจำกัดของแบบจำลองและการคำนวณ อธิบายเพิ่มเติมแบบจำลองของ Strickland et al. (1981) และ Kocurek (1987)

Local Circulation Method

Local circulation method (LCM) สมดุลระหว่างแรงบนใบพัดและการเปลี่ยนโมเมนตัมของลมที่ผ่าน rotor อย่างไรก็ตามการร่วมช่องว่าง span ของใบพัตรูปรียาวแหลมซึ่งแตกต่างกับ Streamtube LCMอาจจะคำนวณที่การไหลไม่คงตัวและสามารถยอมรับรายละเอียดเส้นความเร็วและภาระที่ใบพัด LCM จะให้คำตอบที่ดีกว่าแบบจำลองโมเมนตัมและจะหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดกับแบบจำลองการหมุนวนและการประมาณของแบบจำลองแรง การคำนวณจะน้อยกว่าแบบจำลองหมุนวน อย่างไรก็ตามไม่นิยมกันแพร่หลาย อธิบายจากการสร้างของ Nasu และ Azuma (1983), Masse (1986) และ Oler (1989)

Common Model Limitations

แบบจำลองการเคลื่อนไหวยของอากาศแบบที่ใช้คือ ปีกเครื่องบินโดยใช้ Characteristic table (สัมประสิทธิ์แรงยกและแรงเฉื่อยในรูปของมุมปะทะและ Reynolds number) เพื่อหาภาระของใบพัดและประสิทธิภาพของกังหัน การทดสอบแบบ 2 มิติโดยใช้อุโมงค์ลมเป็นแบบอยู่กับที่ หรือใช้ปีกเครื่องบินในการออกแบบโดยใช้การสังเกตจากการทดลองในทางปฏิบัติการ วิเคราะห์ในระบบ 3 มิติเป็นการวิเคราะห์ที่เคลื่อนไหว เห็นการประมาณภาระของใบพัดเป็น

การยากที่จะหาภาระจาก airfoil section characteristics อธิบายและอ้างอิงการไหลผ่านกังหันลมของอากาศใน Hansen และ Butter field (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 แรงเฉือน 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 สำหรับใบกังหันกับฐานมีผลให้ยึดหยุ่น โครงสร้างมีการเคลื่อนที่สูงด้วยการสั่นธรรมชาติจึงต้องระวังในการออกแบบเพื่อให้แน่ใจว่ากังหันจะมีการเคลื่อนไหวที่เสถียร guy cables และ turbine support สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีธรรมดาแต่ฐานและใบกังหันจะต้องใช้โปรแกรม Finite element ในการวิเคราะห์

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

Aerodynamic Load/Bland Motion Coupling

การขับเคลื่อนใบกังหันด้วย aerodynamic พร้อมกับ แรงเกี่ยวกับ เคลื่อนที่ การเคลื่อนที่ของใบกังหันจะขึ้นอยู่กับรูปร่างภาระแบบถู่ของ aerodynamic เพิ่มแรงทำให้การเคลื่อนที่ของใบกังหันทำให้ไม่เกิดการเสถียรแต่ถ้าการเคลื่อนที่ลดลงเป็นประโยชน์โดยเป็นการหน่วง aerodynamic

Stochastic Wind Effects

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

Rotor

กังหันแกนนอน จะสามารถใช้จุดศูนย์กลางของวัตถุหรือจะประกอบด้วยระดับความโค้ง โดยส่วนมากแล้วจะตั้งไว้ที่บานพับโดยใบพัดจะสามารถเลื่อนขึ้นลงได้ เช่น กังหันเดี่ยวซึ่งทำให้สมดุลด้วยน้ำหนักที่ใช้ถ่วงแต่ปกติใบพัดจะหมุนด้วยค่า 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 และในโรงโมแปงแบบอเมริกันในช่วงเริ่มต้นจะให้ความเร็วสูงกังหันลมถ้ามี 2-3 ใบจะมีความเร็วลมในช่วงปานกลางถึงสูงทำให้เราสามารถพัฒนา Rotor โดยใช้วัสดุที่แข็งให้ประสิทธิภาพสูง โดยการเพิ่มจำนวนของใบพัดและทำให้ราคาใบพัดลดลง

การผลิตจะทำมาจาก fiber-reinforced polyester (FRP) เคลือบบนไม้ส่วนใบพัดที่ทำมาจาก Glass fiber-reinforced polyester (GFRP) ส่วนใบพัดโลหะก็มีใช้อยู่บ้างแต่ลูมิเนียมมีอายุการใช้งานน้อย จึงไม่สามารถใช้งานหนักได้และใบโลหะเมื่อเร็ว ๆ นี้มีการใช้ แอร์ฟอยล์ ในการ

พัฒนาเครื่องบินและการเดินเรือนั้นการออกแบบจะต้องการกักกันลมที่แตกต่างกันออกไป โดยที่กล่าวมาทั้งหมดจะแตกต่างจากการทำเครื่องบิน

ในบางเงื่อนไข แอร์ฟอยล์ จะมีคุณสมบัติที่กล่าวมาแล้วเหมือนกันคือ ต้องหลบเลี่ยงสภาวะงานจริง (stall condition)

ในการทำงานจริง กักกันลมจะต้องทำงานในช่วง stall ไม่มากก็น้อยอยู่แล้ว ดังนั้นกักกันลมจึงต้องสร้างให้มีความสูงมากขึ้นและหนาขึ้นเพื่อเพิ่มความแข็งแรง จะต้องใกล้เคียงกับโคนของกักกันมากที่สุด

การพัฒนาส่วนย่อยๆ ของกักกันลมจะต้องใช้ แอร์ฟอยล์ ลักษณะพิเศษซึ่งกักกันจะอยู่ในแนวนอน ภายใต้กฎของ aerodynamics ของ James Tangler จาก U.S. SERI (now NREL) ปัจจุบันเปลี่ยนเป็น NREL และถูกออกแบบโดย Dan somers

ปรับปรุงการทดสอบเพื่อยืนยันผลของ Rotors ที่ใช้ NREL airfoils และ แอร์ฟอยล์ที่มีลักษณะพิเศษ ถูกออกแบบเพื่อใช้เป็นกักกันลมซึ่งปัจจุบันใช้กันกว้างขวางทั่วโลก

Rotor แบบใหม่ ϕ -type หมุนในแนวแกนตั้งมีโครงสร้างเป็น GFRP pultrusions หรือ อลูมิเนียม จะมีสลักยึดทั้งข้างบนและข้างล่าง ในการที่จะทำให้ใบพัดแข็งแรงจะต้องใช้กฎของ aerodynamics หรือกล่าวอีกอย่างมันสามารถทำให้เกิดแรงบิดสูง กักกันในแนวตั้งจะมีความดีในการหมุนเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ และการเข้าใจโครงสร้างทาง dynamics เป็นอย่างดีมีส่วนสำคัญในการหลีกเลี่ยง เรโซแนนซ์ ความเร็วลมกว้างมากจะทำให้ทำงานได้ยาก ดังนั้นการทำงานจึงใช้ VAWT มาปรับปรุง แอร์ฟอยล์

Yaw control

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

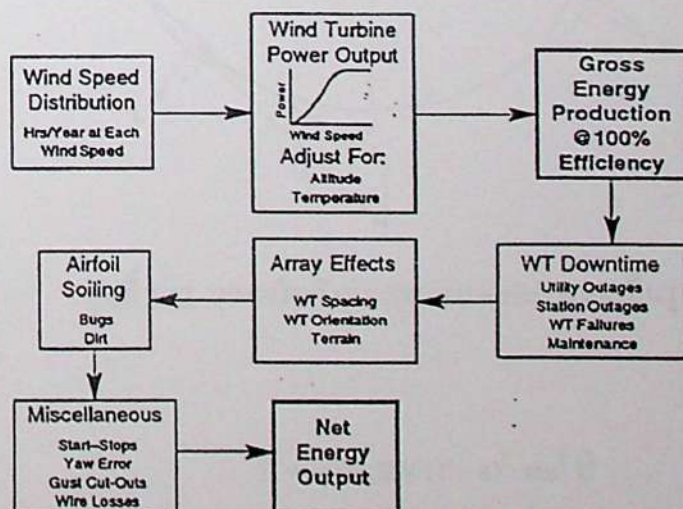
Variable-pitch machines control เป็นการควบคุมกำลังให้เข้าใกล้ค่า rated value มากที่สุด จากค่าตั้งแต่ว่าความเร็ว cut-in จนถึงความเร็ว cut-out ซึ่งถ้าความเร็วที่ได้เกินค่า cut-out เป็นเวลานานจะทำให้เกิดความเสียหายต่อแกนหมุนได้ โดย variable pitch จะทำการควบคุมกำลังและลดแรงดันจากใบพัดเมื่อได้รับแรงลมที่สูงเกินไป

กราฟกำลังได้จากการคำนวณ จากการออกแบบ และจากการทดลองซึ่งความเร็วลมที่ rated power จากกังหันลมหลาย ๆ เครื่อง และต้องเข้ากันได้กับ wind spectrum ของที่ตั้งไว้ด้วย เช่นเครื่อง charter 300 ถ้า rated power จะผลิตปกติ เมื่อมีความเร็วลมสูงถึง 18.8 m/s ซึ่งกังหันลมส่วนมากจะมี rated power ที่ความเร็วลมประมาณ 12-14 m/s ในแถบยุโรปจะผลิตกำลังได้ที่ 12 m/s ซึ่งบอกที่ rated capacity ของกังหันลมพื้นฐานของคุณสมบัติของกังหันลมเหล่านี้ และการทำงานจึงเป็นข้อเปรียบเทียบระหว่างกันกังหันลม capacity factor เป็นอัตราส่วนของค่า output จริงกับค่า rated capacity ในช่วงเวลาหนึ่ง และค่านี้เป็นส่วนสำคัญของคุณสมบัติของกังหันลม และ wind capacity factor ได้ 0.25 หรือมากกว่า และค่าที่ใช้ได้จะสูงถึง 0.9

สำหรับวิธีการอื่นที่ใช้แสดงคุณสมบัติของกังหันลมคือ กำลังที่ผลิตได้ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ของแกนหมุนมีหน่วยเป็น $\text{kwh/m}^2\text{yr}$ ค่าที่มากกว่าจะได้จากกังหันลม และแกนหมุนที่มากกว่า ส่วนประกอบนี้จะขึ้นอยู่กับที่ตั้งของลมที่ดี

เช่นเดียวกับลักษณะของกังหันลมค่าที่ได้อาจสูงถึง 1869 $\text{kwh/m}^2\text{yr}$ จากรายงานที่มี จากเครื่อง vestas V229 kw ในปี 1994 แม้ว่าค่าที่ได้เข้าใกล้ 1000 ได้จากการใช้ร่วมกับส่วนอื่นในกลางทศวรรษ 1990 ในรูปของกังหันลมในแคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา และใน windstats ที่ยุโรป

ค่าพลังงานในอุดมคติได้จากที่ตั้งของลมกับความถี่ของความเร็ว spectrum จากกราฟกำลังของกังหันลมสำหรับกำลังจริงที่ได้จากสถานีย่อย จะถูกหักจากค่าต่าง ๆ คือ ผลรวมของการสูญเสียจากกังหันลมโดยตรงกับแรงลม ซึ่งผู้ดำเนินการสามารถเลือกค่า output ของกังหันลมได้จากรูปที่ 2.10

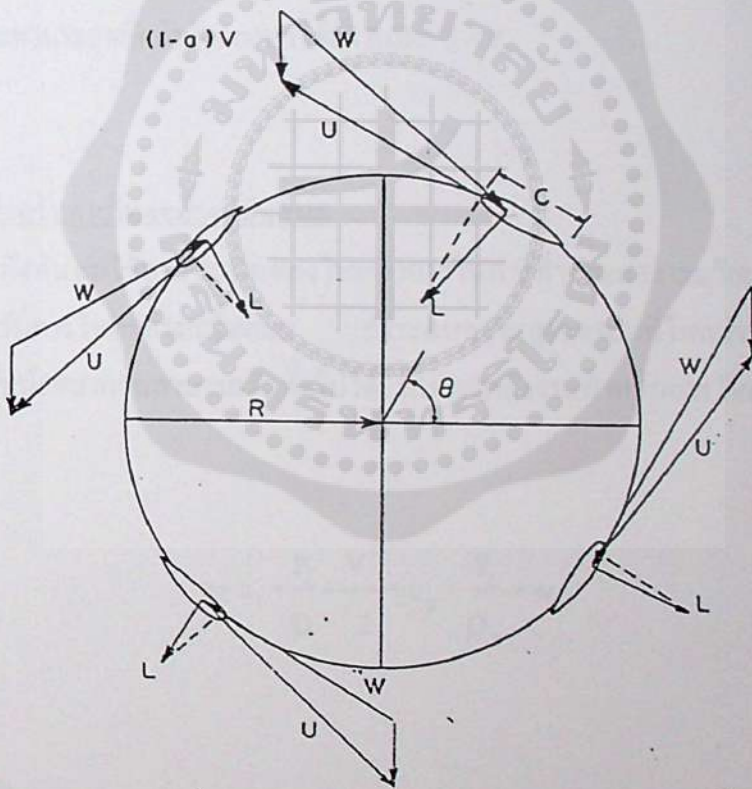


รูปที่ 2.10 แสดงการเลือกค่า output ของกังหันลม

ไดอะแกรมความเร็วสำหรับกังหันลมแกนตั้ง

กังหันลมแกนตั้งสามารถทำงานได้ดีเท่า ๆ กันไม่ว่าลมจะพัดมาในทิศทางใดก็ตาม ใบกังหันซึ่งมีรูปเป็น airfoil จะหมุนเป็นวงกลมดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.11 และการเคลื่อนที่ของใบกังหันนี้จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะใน (angle of attack α) อย่างต่อเนื่อง

จำเป็นที่แรงซึ่งกระทำกับใบกังหันจะต้องมีแรงย่อยในทิศทางของการเคลื่อนที่เพื่อทำให้เกิดการหมุนของกังหัน สามเหลี่ยมของความเร็วสำหรับใบกังหันใน Quadrant ทั้ง 4 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 Lift vector ถูกเขียนลงในแต่ละไดอะแกรมตั้งฉากกับเวกเตอร์ความเร็วสัมผัส จะเห็นได้ชัดเจนจากไดอะแกรมว่ามีองค์ประกอบในทิศสัมผัสของ Lift vector L อยู่ใน Quadrant ทั้ง 4 Quadrant ดังนั้นก็จะมีแรงบิดเกิดขึ้นเสมอไม่ว่าใบกังหันจะอยู่ในตำแหน่งใดก็ตาม แรงบิดต่อใบกังหันสามารถคำนวณได้จากสมการ



รูปที่ 2.11 แสดงใบกังหันลมแบบ airfoil หมุนเป็นรูปวงกลม

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

เมื่อหาได้จาก

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

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

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

ประสิทธิภาพสูงสุดจะได้เมื่อ Tip-speed ratio $R \omega / V$ มีค่าประมาณ 6 และพบว่า กังหันแกนตั้งนี้จะสามารถผลิตกำลังออกมาได้ถ้า $R \omega / V < 3$

สมการพลังงานสำหรับการไหลอย่างสม่ำเสมอ

กังหันลมใช้อากาศเป็นของไหลตัวการในการทำงานสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการพลังงานสำหรับการไหลอย่างสม่ำเสมอ ถ้าระดับความสูงของลมที่ไหลผ่านกังหันลมมีการเปลี่ยนแปลงระดับน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งไปได้ สมการพลังงานสำหรับการไหลอย่างสม่ำเสมอจะเขียนได้เป็น

$$q + u_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{V^2}{2} + u_2 + \frac{P_2}{\rho_2} + w \quad (2.18)$$

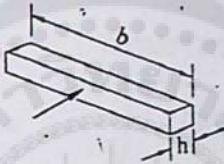
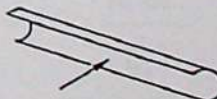
ทฤษฎีการคำนวณ

การไหลผ่านแผ่นระนาบที่วางตั้งฉากกับการไหล จะเกิดแรงกดเนื่องจากที่เกิดขึ้นดังนี้

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

การไหลผ่านแผ่นระนาบนี้จะเกิดการไหลแยกตัว (separation) ขึ้นโดยเริ่มจากบริเวณขอบระนาบ ถึงแม้ว่าความดันทางด้านหลังจะมีค่าคงที่ก็ไม่อาจหาได้โดยการคำนวณจึงต้องอาศัยการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุด

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

วัตถุ	รูปทรง	C_D
ทรงกระบอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส		2.05 ($b/h = \infty$) 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 สำหรับรูปทรงต่าง ๆ ($Re \geq 1000$)

เสา

เสามีลักษณะเป็นท่อนตรงและรับแรงกดในแนวแกน ถ้าแรงมีค่าไม่มากนัก เสาที่เรียวยาวก็ยังคงอยู่ในสภาพที่ตรงได้ แต่ถ้าเพิ่มแรงขึ้นค่าหนึ่ง เสดังกล่าวก็อาจเกิดการโก่งงอขึ้น (buckling) แรงที่ทำให้เกิดการโก่งงอนี้เรียกว่า แรงวิกฤต (critical load) ความเค้นที่เกิดขึ้นในเสา ขณะที่เริ่มเกิดการโก่งงออาจจะต่ำกว่าความเค้นใช้งานก็ได้ อย่างไรก็ตามถ้าเกิดการโก่งงอขึ้นชิ้นงานนั้นก็ไม่สามารถจะทำหน้าที่ตามความต้องการได้ ฉะนั้นการออกแบบจึงต้องมีการจำกัดแรงที่ทำให้เกิดการโก่งงอด้วย

เสาเป็นส่วนหนึ่งที่ใช้รับแรงกดซึ่งเสาก็มีอยู่หลายชนิด สูตรที่ใช้กับเสาจะจำแนกตามอัตราส่วนความเพียว (slenderness ratio) L_e/r โดยที่

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

เนื่องจากการออกแบบเสาที่อาจจะเกิดการโก่งงอ จะจำกัดแรงกด ดังนั้นจึงต้องใช้ค่าความปลอดภัยกับแรงกดโดย

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

สำหรับเสาที่มีขนาดยาวจะนิยมใช้สูตรของออยเลอร์ (Euler) คือ

$$P_{\sigma} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2} \quad (2.21)$$

ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (I) ของท่อกวกลมคือ

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

ความเค้นวิกฤตที่เกิดกับเสา (Critical stress) คือ

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

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

ถ้าเป็นเหล็กโครงสร้างแล้วจะใช้สูตรของออยเลอร์ เมื่ออัตราส่วนความเพริชมากกว่า 115 จากสูตรจะเห็นว่าเสาเกิดการโก่งงอรอบแกน ซึ่งโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดหรือรัศมีไจเรชันมีค่าน้อยที่สุด

ความเค้นที่ยอมรับได้ของวัสดุที่ใช้ทำเสาก็เป็นอีกค่าหนึ่งที่มีผลต่อความแข็งแรงของเสา ซึ่งจะหาได้จากสมการ คือ

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

สำหรับค่าความยาวสมมูลนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของปลายขงงานที่ยึดติดอยู่ดังรูปที่ 2.13

ปลายยึดแบบธรรมดา (Both ends pinned)

$$L_e = L \quad (2.26ก)$$

ปลายยึดแน่นสองข้าง (Both ends fixed)

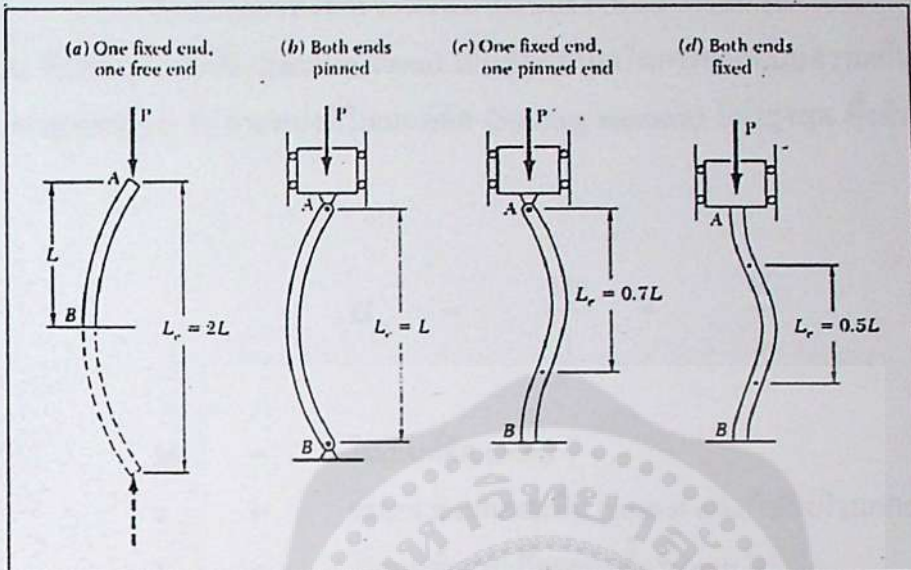
$$L_e = 0.5 L \quad (2.26ข)$$

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

$$L_e = 0.707 L \quad (2.26ค)$$

ปลายยึดแน่นอิสระ (One fixed end , one free end)

$$L_e = 2 L \quad (2.26ง)$$



รูปที่ 2.13 แสดงการยึดปลายเสาวิธีต่างๆ

การหาค่าโมเมนต์รอบจุดหมุนของฐานเสาจะเป็นตัวบอกเราว่าเสานั้นเกิดการหมุนขึ้นหรือไม่ เมื่อมีแรงมากระทำในทิศทางต่าง ๆ กัน ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ คือ

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

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

$$\text{Over turning moment} = FS$$

$$\text{Resisting moment} = Wl \quad (2.28)$$

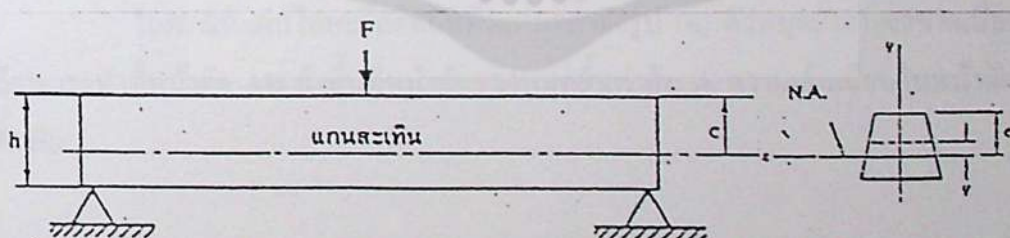
$$N = \frac{\text{Resisting moment}}{\text{Over turning moment}}$$

กาน

ชิ้นส่วนเครื่องจักรจำนวนมากรับแรงในแนวตั้งลักษณะเช่นเดียวกับคานทั่วไป
 ฉะนั้น จึงใช้ความเค้นดัด (bending stress) เป็นข้อกำหนดในการออกแบบความเค้นดัดสูงสุดเกิดที่
 ผิวนอกสุดของคาน ณ ตำแหน่งที่โมเมนต์ดัด (bending moment) มีค่าสูงสุด ซึ่งคำนวณได้จากสม
 การ

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

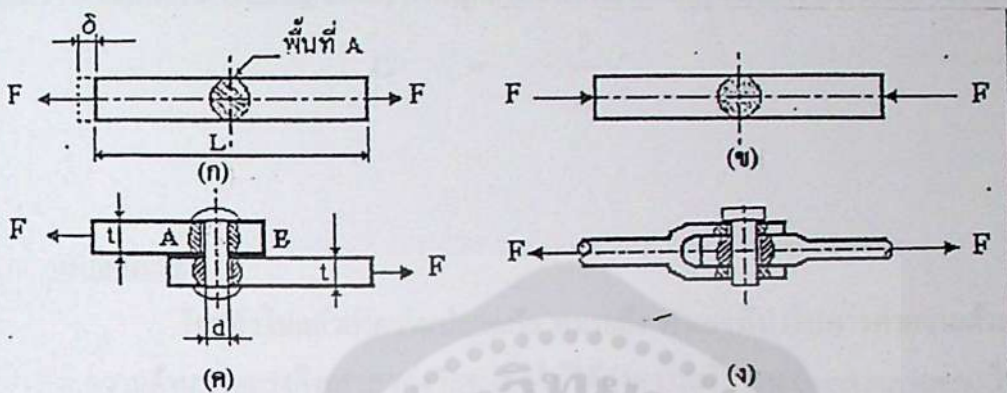
โดยที่ M = โมเมนต์ดัด (N.m)
 c = ระยะจากแกนสะเทิน (neutral axis) ไปยังผิวนอกสุด(mm.) ดังรูป
 I = โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ (mm.⁴)
 z = $\frac{I}{c}$ เรียกว่า โมดูลัสหน้าตัดรอบแกนสะเทิน (mm.³)



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

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

ในกรณีที่แผ่นโลหะยึดติดกันด้วยหมุดยัดรูป (ค) ตัวหมุดยัดอาจจะขาดเนื่องจากแรงเฉือนกระทำที่หน้าตัด 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) จะเกิดการคั่นกันระหว่างด้านข้างของตัวหมุดย้ำกับแผ่นโลหะด้วยความเค้นที่ผิวโลหะที่สัมผัสกันนี้ไม่สม่ำเสมอ ในทางปฏิบัติจึงหาความเค้นก้นนี้โดยใช้พื้นที่ฉายภาพ (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) ใช้ชิ้นส่วนที่กำลังออกแบบซึ่งเรียกสั้น ๆ ว่าความเค้นออกแบบ (design stress) หรือความเค้นใช้งาน

ในกรณีที่ได้มีการกำหนดขนาดของชิ้นงานมาแล้ว ค่าความปลอดภัยของชิ้นงานนั้น คือ

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

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

สำหรับปัญหาที่ไม่เป็นแบบเชิงเส้น (nonlinear) เช่น ท่อโลหะ หรือเสาที่อาจเสียหายเนื่องมาจากการโก่งงอ จะต้องใช้ค่าความปลอดภัยกับแรงที่มากระทำโดยตรงแทนที่จะใช้กับความเค้น ทั้งนี้เพราะปัญหาแบบไม่ใช่เชิงเส้นความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานอาจจะมีได้แปรผันโดยตรงกับแรงในกรณีเช่นนี้

$$N = \frac{\text{แรงทำให้เสียหาย}}{\text{แรงที่ใช้ออกแบบ}} \quad (2.37)$$

$$F.S. = N$$

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าความปลอดภัย

ชนิดของแรง	เหล็กเหนียว	โลหะเหนียว	เหล็กหล่อและโลหะเปราะ
	N_y	N_u	N_u
แรงอยู่นิ่ง	1.5 - 2	3 - 4	5 - 6
แรงซ้ำทิศทางเดียวหรือ	3	6	7 - 8
แรงกระแทกเล็กน้อย			
แรงซ้ำสองทิศทางหรือ	4	8	10 - 12
แรงกระแทกเล็กน้อย			
แรงกระแทกอย่างหนัก	5 - 7	10 - 15	15 - 20

ค่าความปลอดภัยที่เลือกใช้ขึ้นอยู่กับตัวประกอบจำนวนมากดังนี้

- (ก) ชนิดของแรงที่มากระทำต่อชิ้นงานว่าเป็นแรงที่จัดอยู่ในประเภทอยู่นิ่ง หรือ เปลี่ยนแปลงขนาดอยู่ตลอดเวลาขณะใช้งาน
- (ข) ขณะการใช้งานของชิ้นงานว่าเกี่ยวข้องกับการที่อาจจะสูญเสียชีวิต หรือ ทรัพย์สินจำนวนมากหรือไม่
- (ค) น้ำหนักของชิ้นงานว่าจำเป็นที่จะต้องเบาที่สุดหรือไม่ เช่น ชิ้นส่วนสำหรับ เครื่องบิน เป็นต้น ในกรณีเช่นนี้การใช้ค่าความปลอดภัยจะต้องพิจารณาอย่างละเอียดเป็นพิเศษ
- (ง) จำนวนของชิ้นงานที่จะผลิตออกมา ถ้าผลิตครั้งละมาก ๆ ควรระมัดระวังในการใช้ค่าความปลอดภัยที่ไม่สูงจนเกินไป ทั้งนี้เพื่อให้ประหยัดวัสดุได้มากที่สุด
- (จ) เนื้อหาวัสดุที่ผลิตออกมาอาจจะไม่สม่ำเสมอ กัน ทำให้มีความสามารถในการรับแรงต่างกัน

ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด

ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดเหมาะสำหรับวัสดุเหนียว มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เกณฑ์ของเทรสกา (Tresca's criterion) เป็นทฤษฎีที่นิยมใช้กันมาก เพราะใช้ได้ง่ายและปลอดภัย

ทฤษฎีนี้ กล่าวว่า วัสดุจะเกิดความเสียหายเมื่อความเค้นเฉือนสูงสุดในวัสดุมีค่าเท่ากับ ความต้านแรงเฉือนของวัสดุชนิดเดียวกัน ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงเมื่อถึงจุดคราก

จากกลศาสตร์วัสดุ พบว่าความต้านแรงเฉือนสูงสุดในวัสดุได้รับแรงดึงจนครากมีค่าเท่ากับ

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

และเกิดระนาบเอียงทำมุม 45° กับแนวแรงดึงขึ้นทดสอบ ซึ่งตามทฤษฎีนี้จะเริ่มเกิดความเสียหายเมื่อ $\tau_{\max}$ เท่ากับ $\frac{\sigma_y}{2}$ เพราะฉะนั้นสมการที่ต้องนำมาคิดในการออกแบบคือ

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

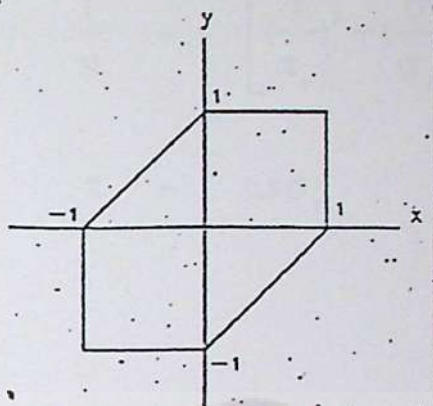
ซึ่งจัดรูปใหม่ได้เป็น

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

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

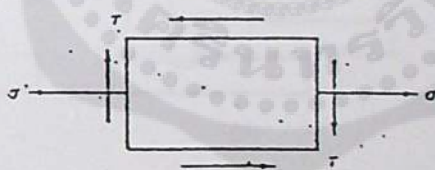
โดยที่ x และ y มีความหมายเช่นเดียวกับในหัวข้อทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด

สมการข้างต้นสามารถสร้างรูปแสดงขอบเขตความเค้นที่ยอมให้มีได้ในวัสดุชิ้นงานที่ ออกแบบดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ขอบเขตของความเค้นจากทฤษฎีความเสียหาย

ดังที่กล่าวมาแล้วว่า ชิ้นส่วนเครื่องจักรจำนวนมากจะมีสถานะของความเค้นเป็นกรณี พิเศษดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะทิศทางของความเค้น

ในกรณีนี้ถ้ายอมให้มีความเค้นสูงสุด

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

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

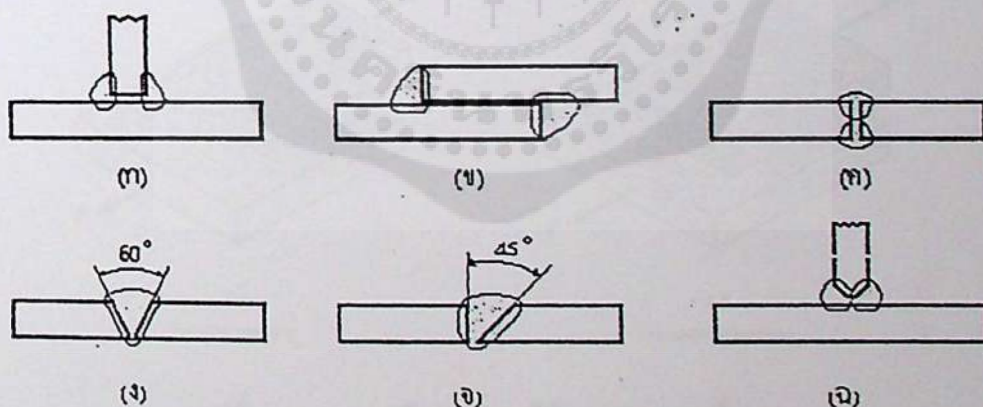
$$\frac{1}{N} = \left[\left(\frac{\tau}{\tau_y} \right)^2 + \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.41)$$

โดยที่

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

การเชื่อมต่อ

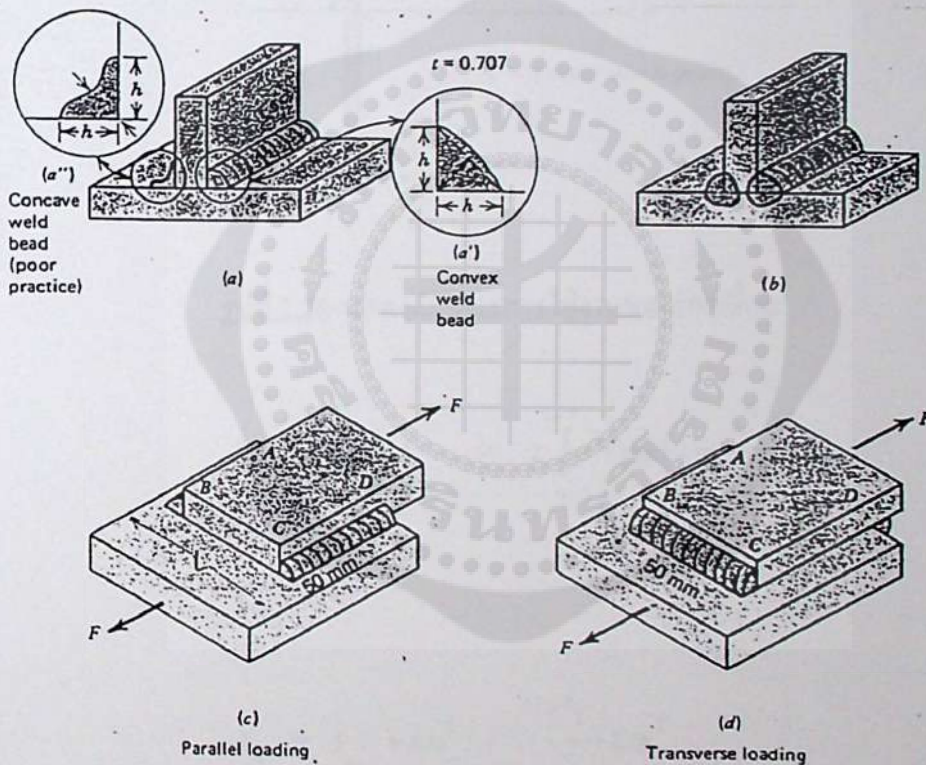
การเชื่อมต่อ (welded joint) เป็นวิธีการต่อชิ้นงานเข้าด้วยกัน ซึ่งนิยมใช้กันมากในงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ สำหรับรอยเชื่อมต้องรับแรงสูง นิยมวิธีการเชื่อมด้วยไฟฟ้า (arc welding) การเชื่อมด้วยแก๊ส (gas welding) และการเชื่อมด้วยความต้านทานไฟฟ้า (resistant welding)



รูปที่ 2.18 แสดงรอยเชื่อมต่างๆ

ตามรูปที่ 2.19 เป็นรูปแบบการเชื่อมในลักษณะต่าง ๆ รูปที่ 2.19c แสดงรอยเชื่อมที่มี ภาวะกระทำขนานกับรอยเชื่อมซึ่งเรียกภาวะนั้นว่า parallel load และรูปที่ 2.19d แสดงรอยเชื่อมที่มี ภาวะกระทำตั้งฉากกับรอยเชื่อมซึ่งเรียกภาวะนั้นว่า transverse load ซึ่ง parallel load จะทำ

ให้เกิดแรงเฉือนกระทำกับแนวเชื่อม และ transverse load จะทำให้เกิดแรงดึงและแรงเฉือนกระทำกับแนวเชื่อมไปพร้อมกัน รูปที่ 2.19a แสดงขนาดของรอยเชื่อมซึ่ง h คือขาของรอยเชื่อม (leg length) และ t คือคอกของรอยเชื่อม (throat length) โดยที่ $t = 0.707h$

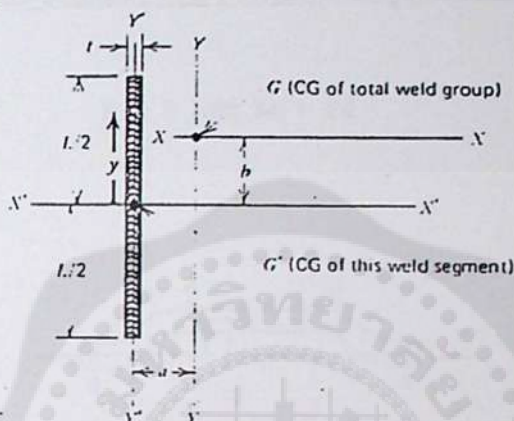


รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะการใช้งานของรอยเชื่อม

การคำนวณรอยเชื่อมจะมีการพิจารณา

1. ทิศทางของความเค้นที่กระทำกับพื้นที่หน้าตัดจะนำมาพิจารณาในการคำนวณ และความเค้นนี้เป็นความเค้นปกติทั่วไปซึ่งสมมติให้มีค่าสม่ำเสมอตลอดแนวเชื่อม
2. ความเค้นเฉือน ความเค้นดัด จะคำนวณได้จาก $\tau = Tr/J$ และ M/I และชิ้นส่วนที่ เชื่อมต่อกันจะสมมติให้เป็นเนื้อเดียวกัน

ค่า I และ J เป็นแฟกเตอร์ที่เพิ่มเข้ามาเพื่อใช้ในการคำนวณแนวเชื่อมซึ่งสามารถหาค่าได้โดยรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะการใช้งานของรอยเชื่อม

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

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

เมื่อ

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

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

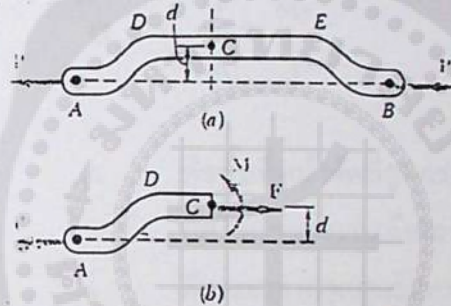
และ

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

การเยื้องศูนย์

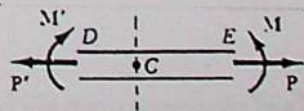
การเยื้องศูนย์เกิดจากการที่มีแรงกระทำเยื้องศูนย์กลางมวลบนพื้นที่หน้าตัดที่ถูกกระทำ ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.21a เมื่อมีแรงกระทำเยื้องกับศูนย์กลางมวลและจะทำให้เกิดโมเมนต์แรงคู่ควบเกิดขึ้นดังรูปที่ 2.21b ที่ส่วนตัด AC แรง F มีขนาดเท่ากับแรง P' และโมเมนต์แรงคู่ควบ M มีค่าเท่ากับโมเมนต์ของแรง P' แต่ทิศทางตรงกันข้ามซึ่งกระทำที่จุด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

$$F = P \text{ และ } M = Pd$$

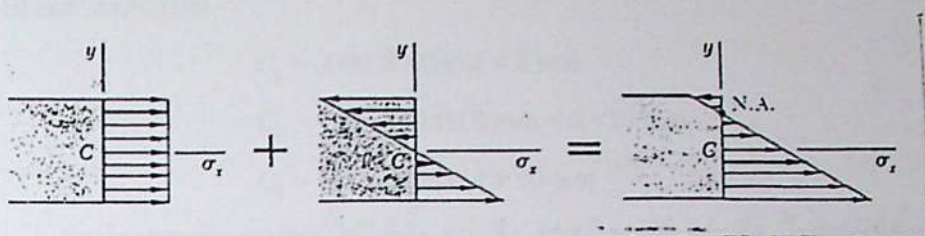


รูปที่ 2.21 แสดงการเยื้องศูนย์ของแรง

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



รูปที่ 2.22 แสดงโมเมนต์และแรงกระทำ



รูปที่ 2.23 แสดงความเค้นภายใน

จะได้

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

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

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 ถ้าขนาดหน้าตัดโตขึ้นไปอีกจะพบว่าขีดจำกัดความทนทานลดลง ดังนั้นจึงต้องมี ตัวประกอบมาคูณค่าขีดจำกัดความทนทานจากชิ้นทดสอบมาตรฐาน เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม

สมกับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่กว่าชิ้นทดสอบซึ่งมีชื่อเรียกว่า 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

จากการที่ได้ทราบมาแล้วว่าวัสดุทั่วไปมีคุณสมบัติในการรับความเค้นเหี้ยนได้น้อยกว่าความเค้นดึงหรือกด ในกรณีของขีดจำกัดความทนทานก็เช่นเดียวกัน จากการทดสอบจะพบว่าขีดจำกัดความทนทานสำหรับการเหี้ยนมีค่าน้อยกว่าการดัด ตัวประกอบที่ใช้ลดค่าขีดจำกัดความทนทานจากการดัดนี้เรียกว่าตัวประกอบของแรง (load factor) C_c โดยแนะนำให้ใช้ค่าดังต่อไปนี้

$$C_c = 1.00 \text{ สำหรับการดัด}$$

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

$$C_c = 0.60 \text{ สำหรับการเหี้ยน}$$

เพราะฉะนั้น สำหรับการดัด $\sigma_u = C_b C_c \sigma_u$

สำหรับการดึง $\sigma_u = 0.80 (\sigma_u \text{ จากการดัด})$

สำหรับการเหี้ยน $\tau_u = 0.60 (\sigma_u \text{ จากการดัด})$

ตัวประกอบความเค้นหนาแน่น

ความต้านแรงทนทานดังกล่าวมาแล้วเป็นค่าสำหรับชิ้นงานที่มีหน้าตัดคงที่ ในกรณีทั่วไปชิ้นงานอาจมีลักษณะขาดความต่อเนื่อง เช่น มีร่อง รูเจาะ หรือเปลี่ยนขนาด จึงทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้มีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณตามปกติ นั่นคือ

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

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

ค่า K_t นี้เป็นค่าที่ได้จากการทดลองชิ้นงานชนิดต่าง ๆ ซึ่งใช้วัสดุพิเศษโดยเฉพาะ เรียกว่าวัสดุยืดหยุ่นโปร่งแสง (photoelastic material) ตามปกติแล้วชิ้นงานจริงจะเป็นวัสดุที่แตกต่างไปจากวัสดุที่ใช้ทดลอง ดังนั้นความไว (sensitivity) ของวัสดุต่อการเพิ่มความเค้นบริเวณที่มีร่อง รู หรือเปลี่ยนขนาดจึงแตกต่างกันไปด้วย เช่น เหล็กหล่อเป็นโลหะเนื้อพรุน ฉะนั้นจึงอึดต่อความเค้นหนาแน่นอยู่แล้ว ค่า K_t จึงควรเข้าใกล้ 1 (แสดงว่ามีความเค้นหนาแน่นเพิ่มขึ้น เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของชิ้นงานอีกน้อยมาก) คำนี้นี้ใช้บอกถึงความไวของวัสดุต่อการวัดความเค้นหนาแน่นนี้เรียกว่า ความไวของรอยเจาะ (notch sensitivity) q ซึ่งมีนิยามว่า

$$q = (K_t - 1) / (K_f - 1) \quad (2.49)$$

หรือ

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

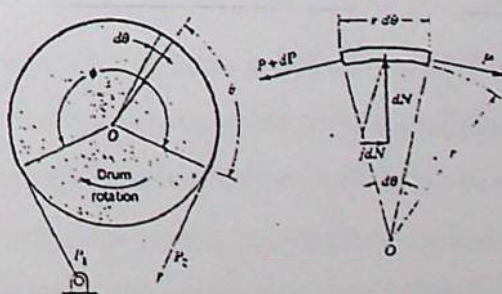
โดยที่ K_f เป็นค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นจริง (actual stress concentration factor)

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

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

เบรคสายพาน

Flexible band clutch และ brake การวิเคราะห์ดำเนินการตามเครื่องหมายในรูปดังนี้



รูปที่ 2.24 แสดงองค์ประกอบต่าง ๆ เนื่องจากการเบรคของสายพาน

เพราะมีความเสียดทานและการหมุนของล้อ ทำให้แรงดึง P_2 น้อยกว่าแรงดึงที่สลัก P_1 อิทธิพันธ์ของสายเบรคมีความยาวเชิงมุม $d\theta$ จะอยู่ในสภาพสมดุลภายใต้แรงดังแสดงในรูป เมื่อรวมแรงในแนวตั้ง จะได้

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

สำหรับมุมเล็ก ๆ จะได้ $\sin \left(\frac{d\theta}{2}\right) = \left(\frac{d\theta}{2}\right)$ 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 (2.51) ลงใน (2.53) 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 = มุมที่สายพานคล้อย

การประเมินอายุการใช้งานและแรง

การที่เบร้งมีอายุการใช้งานแตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากความกลมของลูกกลิ้ง และความเรียบของผิวลูกกลิ้ง ดังนั้นอายุการใช้งานที่ผู้ผลิตอ้างถึงจึงมีรากฐานมาจากการใช้หลักวิชาการทางด้านสถิติเข้าช่วย ทางสมาคม AFBMA จึงได้ตั้งนิยามและวิธีการเลือกดังนี้

1. อายุการใช้งานของโรลลิงเบร้ง หมายถึงจำนวนรอบ (หรือจำนวนชั่วโมงที่ความเร็วคงที่) ซึ่งเบร้งหมุนได้ก่อนที่จะเริ่มเกิดความล้าขึ้นในวงแหวนหรือลูกกลิ้ง
2. อายุประเมิน (rating life) ของโรลลิงเบร้งจำนวนหนึ่งซึ่งมีลักษณะเหมือนกันทุกประการซึ่งเบร้ง 90% จากจำนวนนี้สามารถหมุนได้โดยไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้า ผู้ผลิตบางบริษัทอาจจะใช้อายุใช้งานเฉลี่ย (median life) เป็นอายุประเมินก็ได้ อายุงานเฉลี่ย หมายถึงจำนวนรอบที่ 50% ของเบร้งที่เหมือนกันจำนวนหนึ่งสามารถหมุนได้โดยไม่เกิดความล้า

3. แรงสถิตยประเมิน(basic static load rating)หมายถึงแรงในแนวนรัศมีที่ทำให้เกิดระยะขยุตัวของลูกกลิ้งและวงแหวน และวงแหวนรวมเท่ากับ 0.0001 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลูกกลิ้ง และใช้แทนด้วย C_0 และ C_0 สำหรับเบร้งอนุกรมมิติต่าง ๆ คูได้จากภาคผนวก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำเบร้ง จำนวนของลูกกลิ้ง มุมสัมผัส ตลอดจนขนาดของลูกกลิ้งและ วงแหวน

4. แรงพลวัตประเมิน(basic dynamic load rating) ของโรลลิ่งเบร้ง หมายถึงแรงที่กระทำในแนวนรัศมีซึ่งเบร้งที่มีลักษณะเหมือนกันจะรับได้ โดยอายุประเมินเท่ากับหนึ่งล้านรอบเมื่อวงแหวนอันในเป็นตัวหมุนและวงแหวนอันนอกหยุดนิ่ง และใช้แทนที่ C ซึ่งแสดงในภาคผนวก แรงพลวัตประเมิน C นี้เป็นค่าใช้ในการเลือกเบร้งเพื่อรับแรงและมีอายุการใช้งานตามต้องการโดยเปลี่ยนอายุการใช้งานจริงเป็นอายุการใช้งานในเค็ดตลือก หรือในทางกลับกัน เลือกเบร้งจากเค็ดตลือกแล้วเปลี่ยนให้รับแรงตามต้องการใช้ทำงานจริง

ให้อายุการใช้งานจริง(L_{10}) ซึ่งมีหน่วยเป็นล้านรอบ (mr) และ P เป็นแรงในแนวนรัศมีที่เบร้งจะต้องรับขณะใช้งานจริง 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
$$L_c = \left(\frac{C}{P} \right)^k \quad (2.56)$$

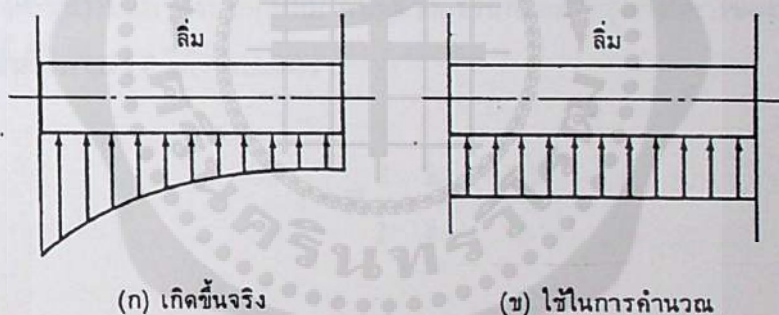
จากสมการดังกล่าวทำให้ทราบว่าเบร้งที่เลือกมาจากอายุประเมินจำนวนหนึ่งล้านรอบ จะทำงานได้กี่ล้านรอบขณะใช้งานจริง

ความเค้นที่รอยต่อด้วยลิ้ม

เมื่อใช้ลิ้มต่อเพลากับคูลเพื่อส่ง โมเมนตัมบิด ความเค้นที่เกิดขึ้นในลิ้มจะเป็นแบบสามมิติและ มีความยุ่งยากในการคิดคำนวณมาก ความเค้นที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากแรง 2 ชนิด

1. แรงเนื่องจากการสวมอัดลึกลงในร่องลึ้ม เช่น การสวมอัดลึ้มแบบธรรมดาหรือแบบเรียว แรงเหล่านี้ทำให้เกิดความเค้นอัดขึ้นในลึ้มซึ่งไม่อาจหาค่าได้
2. แรงเนื่องจากการส่งโมเมนต์บิด ทำให้เกิดความเค้นอัดและความเค้นเฉือนในลึ้ม

แรงที่กระทำตามแนวขวางของลึ้มจะไม่กระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดความยาวลึ้ม แต่จะมี ค่ามากในบริเวณใกล้กับจุดที่รับโมเมนต์บิด ทั้งนี้เนื่องจากการบิดระหว่างเพลากับคุดลื้อ เพราะเพลามีความแข็งตึงบิด (torsional stiffness) น้อยกว่าคุดลื้อ มีผู้ทำการทดลองหาลักษณะการกระจายความเค้นตลอดความยาว พบว่ามีลักษณะดังรูป

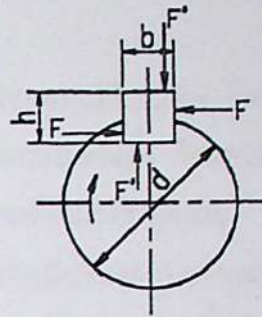


รูปที่ 2.25 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นบนลึ้ม

ในการหาความเค้นที่เกิดขึ้นในลึ้มนั้น เพื่อความสะดวกในการคำนวณจึงมักจะใช้ข้อสมมุติฐานดังนี้

- ก. แรงที่กระจายตลอดความยาวของลึ้มมีค่าสม่ำเสมอ
- ข. ไม่เกิดแรงที่เกิดจากการสวมอัดลึ้ม

จากสมมุติฐานดังกล่าวทำให้คำนวณหาขนาดของลึ้มได้ง่ายขึ้น ในทางปฏิบัติการคำนวณหาขนาดลึ้มมักจะเป็นการคำนวณหาความยาวของลึ้มเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากลึ้มมีขนาดพื้นที่หน้าตัดเป็นมาตรฐานอยู่แล้ว พร้อมทั้งขนาดของลึ้มที่เหมาะสมกับเพลานาขนาดต่างๆก็หาได้จากตารางภาคผนวก



รูปที่ 2.26 แสดงแรงที่กระทำกับลิมเนื่องจากโมเมนต์

พิจารณารอบด้วยลิมดังรูปที่ 2.26 ให้ F เป็นแรงที่กระทำกับลิมเนื่องจากโมเมนต์บิด และ F' เป็นแรงที่กดลิมไว้ไม่ให้ลิมเอียง โมเมนต์บิดบนเพลลาทำให้ลิมลื่นมีแรงต้านทาน F เกิดขึ้นซึ่งกระทำในแนวตั้งฉากกับลิม สมมติว่าแรงนี้กระทำที่จุดกึ่งกลางของลิมส่วนที่โผล่พ้นจากเพลลา ดังนั้นจึงหาแรง F ได้จากสมการ

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

จากข้อสมมติฐานที่ได้กล่าวมาแล้ว เมื่อคิดว่าลิมขาดเนื่องจากแรงเฉือน ฉะนั้น

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

โดยที่

T คือ โมเมนต์บิดเพลลา

F คือ แรงที่กระทำกับลิม

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลา

B คือ ความกว้างของลิม

l คือ ความยาวของลิม

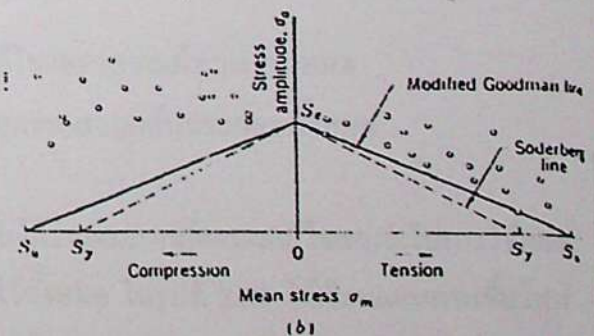
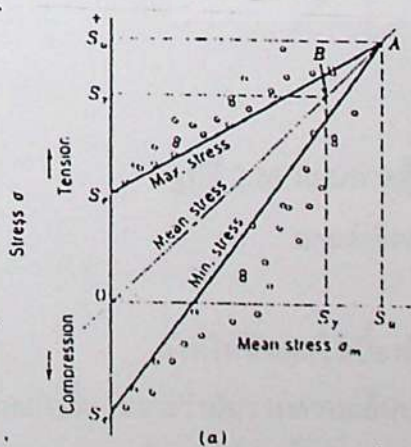
τ คือ ความเค้นเฉือนบนลิม

ความล้าภายใต้ความเค้นปกติสถิต

เราจะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงล้ากับความเค้นปกติสถิต คือทั้งความเค้นปกติเฉลี่ยและความเค้นปกติส่วนเปลี่ยน เราสามารถพล็อตผลการทดลองดังกล่าวได้สองวิธี ดังแสดงในรูปที่ 2.27 a และ 2.27 b

แผนภาพกู๊ดแมนแก้ไขของรูปที่ 2.27 a มีความเค้นเฉลี่ยพล็อตตามแกนนอนและความเค้นประกอบอื่น ๆ ทั้งหมดพล็อตบนแกนตั้ง โดยความเค้นดึงพล็อตในทิศทางบวกขีดจำกัดความทนทานความต้านแรงล้าหรือความต้านแรงจำกัดอายุ ขึ้นอยู่กับว่าจะใช้รูปแบบค่าใดก็ได้ให้พล็อตบนแกนตั้งเหนือ และได้จุดเริ่มต้นเส้นของความเค้นเฉลี่ยคือ เส้นตรงทำมุม 45° จากจุดเริ่มต้นไปยังจุด A จุด A คือความต้านแรงดึงสูงสุดของชิ้นส่วนแผนภาพกู๊ดแมนแก้ไขประกอบด้วยเส้นตรงที่ลากจากจุด A ไปยังค่า S_e (หรือ S_p) เหนือ และได้จุดเริ่มต้นถ้าจะให้ค่าเฉลี่ยที่ดีกว่า ควรลากจากจุด A ผ่านจุดเสียหาย แต่จะได้ออกมาเป็นเส้นโค้ง ซึ่งยากในการนำไปใช้ออกแบบ จึงใช้เส้นตรงแทนในทำนองเดียวกันความต้านแรงดึงครากก็พล็อตลงบนแกนทั้งสองเช่นเดียวกัน เพราะว่าการครากก็ทำให้เสียหายได้เช่นเดียวกันถ้า σ_{max} เกินค่า S_y (มองในแง่ภาวะสถิติของวัสดุเหนียว)

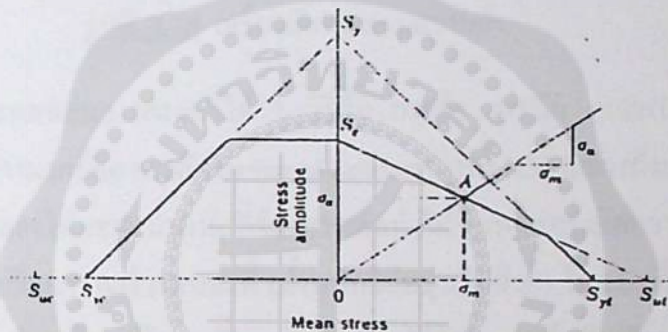
แผนภาพความล้าที่นิยมใช้กันมากคือรูปที่ 2.27 b โดยความเค้นเฉลี่ยพล็อตบนแกนนอน ความเค้นดึงไปทางขวาและความเค้นกดไปทางซ้ายแต่บนแกนตั้งมีเพียงความเค้นส่วนเปลี่ยน σ_s พล็อตในแกนนี้ ดังนั้นในแผนภาพนี้มีเพียงความเค้นประกอบสองค่าที่ใช้คือ ขีดจำกัดความทนทาน หรือความต้านแรงล้าหรือความต้านแรงจำกัดอายุ ขึ้นอยู่กับว่าจะใช้ค่าใดออกแบบเป็นค่าขีดจำกัดสูงสุดของความเค้นส่วนเปลี่ยน ดังนั้นจึงพล็อตบนแกนตั้งเส้นตรงที่ลากจาก S_e ไปยัง S_u (ทั้งสองด้าน) บนแกนนอน คือขอบเขตความเสียหายของกู๊ดแมน



รูปที่ 2.27 แผนภาพแสดงความล้าสองแบบแสดงผลลัพท์ของจุดเสียหาย

ความต้านแรงดึงคราก ดังแสดงโดยเส้นทึบ แผนภาพก๊อคแมนแก้ไขใช้ได้ดีในการวิเคราะห์ เมื่อเรารู้สัดส่วนทั้งหมดของชิ้นส่วน แต่ก่อนข้างจะยากในการใช้ออกแบบนั่นคือถ้าเราไม่รู้สัดส่วนของชิ้นส่วน ดังนั้นจึงได้มีการดัดแปลงแผนภาพอีกครั้ง (ครั้งที่สี่)

แผนภาพความล้าของรูปที่ 2.29 เป็นอันที่เหมาะสมอย่างยิ่งที่จะใช้ออกแบบโดยเส้นทึบในรูปที่ 2.29 จะใช้เป็นเส้นขอบเขตความเสียหาย ในที่นี้เราใช้ค่าความต้านแรงครากเป็นหลัก (แทนการใช้ความต้านแรงสูงสุด) โดยพล็อตบนแกนความเค้นเฉลี่ย ทั้งด้านดึงและกดอีกทั้งบนแกนความเค้นส่วนเปลี่ยนด้วย เส้นตรงที่ลากจาก S_y ไปยัง S_{ye} เป็นเส้นกำหนดความเสียหายโดยการคราก ส่วนจาก S_y ไปยัง S_{ye} เป็นเส้นกำหนด



รูปที่ 2.29 แผนภาพความล้าแสดงการหาค่าขีดจำกัดสูงสุดของ σ_u และ σ_{ue} เมื่อรู้อัตราส่วนของค่าทั้งสอง

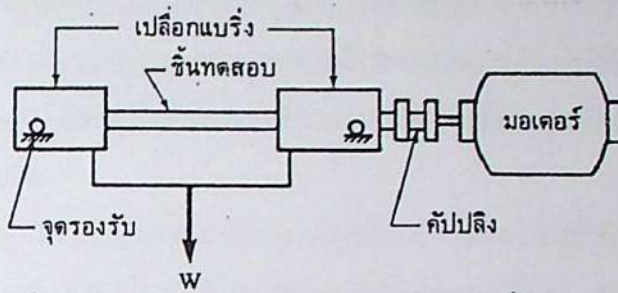
ความเสียหายโดยการดึงคราก เราสร้างเส้นก๊อคแมนแก้ไขสำหรับความเค้นดึงเฉลี่ย คือเส้นที่ลากจาก S_y ไป S_{ue} และสำหรับความเค้นกดเฉลี่ย คือเส้นที่ลากจาก S_y ไปหาซ้ายขนานกับแกนนอน จุดตัดของเส้นทั้งสองทั้งด้านดึงและกด คือจุดต่อระหว่างความเสียหายโดยการล้าและความเสียหายโดยการคราก ดังนั้นพื้นที่เงาของเส้นทึบคือพื้นที่ที่จะบ่งว่าเป็นความเสียหายแบบใด

ความต้านแรงทนทานและขีดจำกัดความทนทาน

การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่รับแรงเปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักร จะไม่ใช้ความต้านแรงดึงครากหรือความต้านแรงดึงเป็นรากฐาน แต่จะใช้ความต้านแรงที่เรียกว่าความต้านแรงทนทาน ซึ่งหาได้จากขีดจำกัดความทนทาน(endurance limit) หรือจากการทดลอง โดยมีนิยามดังนี้คือ

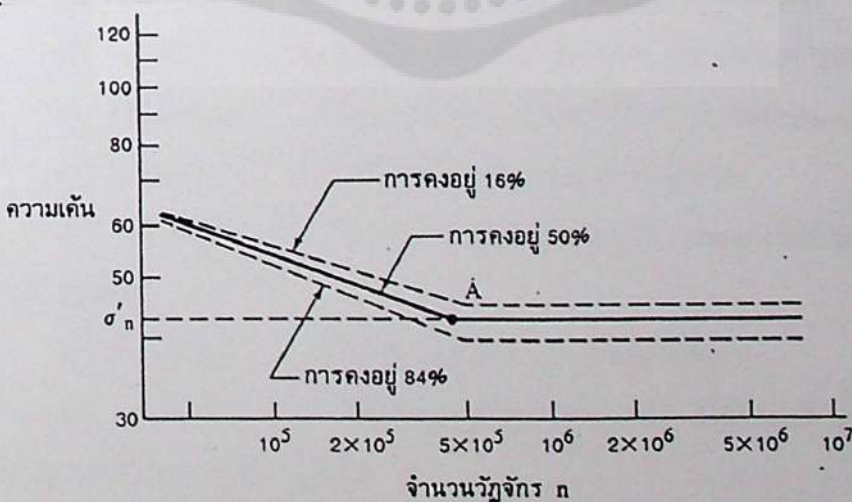
ขีดจำกัดความทนทานหรือขีดจำกัดความล้า(fatigue limit) σ_u หมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่กระทำซ้ำกันสองทิศทาง(reversed stress) ต่อชิ้นทดสอบผิวขัดมัน(mirror polished)

เป็นจำนวนวัฏจักรนับไม่ถ้วน โดยที่ชิ้นทดสอบนั้นไม่เกิดการแตกหัก (เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นทดสอบประมาณ 8 mm)



รูปที่ 2.30 เครื่องมือทดสอบความล้า

การทดสอบอาจกระทำได้ 3 วิธีคือ การดึง การบิด และการดัด ข้อมูลจากการทดสอบที่มีอยู่ค่อนข้างมากก็คือ การดัด (reversed bending) รูปที่ 2.30 แสดงถึงเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบนี้ในการทดลองให้แขนน้ำหนักที่ต้องการเพื่อให้ชิ้นทดสอบเกิดความเค้นดัด จากนั้นมอเตอร์ก็ จะหมุนไปด้วยความเร็วรอบคงที่ (น้ำหนักไม่หมุนไปด้วย) ในขณะที่ชิ้นทดสอบหมุนไปครบหนึ่งรอบ ตำแหน่งคงที่ ณ ผิวของชิ้นทดสอบ ก็จะได้รับความเค้นที่เปลี่ยนจากความเค้นดึงสูงสุดไปเป็นความเค้นกดสูงสุดไปเป็นความเค้นดึงสูงสุด แล้วกลับมาความเค้นดึงสูงสุดอีก เรียกว่าหนึ่งวัฏจักร ถ้าวัสดุชิ้นทดสอบเป็นเหล็ก เมื่อนำผลจากการทดลองมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนวัฏจักร

จากตำแหน่ง A ในรูปที่ 2.31 จะเห็นว่ากราฟเป็นเส้นตรงเกือบอยู่ในแนวระดับ แสดงว่าถ้าให้ความเค้นต่อชิ้นทดสอบต่ำกว่านี้แล้ว ชิ้นทดสอบจะไม่แตกหักเลย (ทางทฤษฎี) แต่ในทางปฏิบัติชิ้นทดสอบจะต้องขาดออกเมื่อจำนวนวัฏจักรสูงมาก ถ้าชิ้นทดสอบเป็นแบบผิวขัดมัน และมี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 8 mm ความเค้นที่จุด A บนเส้นการคงอยู่ 50% (survival) เรียกว่า ชีดจำกัดความทนทานและชิ้นทดสอบที่รับความเค้นระดับนี้ให้ถือว่ามิอายุใช้งานไม่จำกัด (infinite life) ในทางปฏิบัติให้ถือว่าชิ้นงานที่สามารถรับแรงได้จำนวนวัฏจักรมากกว่า 1 ล้าน เป็น ชิ้นงานที่มี อายุไม่จำกัด

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

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

เนื่องจากข้อมูลเกี่ยวกับขีดจำกัดความทนทานมีน้อยมาก ดังนั้นจึงใช้วิธีการประมาณค่าขีดจำกัดความทนทาน(สำหรับการคงอยู่ 50%) ในกรณีของการคิด ดังนี้คือ

$$\sigma'_n = 0.5\sigma_u \quad \text{สำหรับเหล็กกล้าเหนียว ซึ่ง } \sigma_u < 1380 \text{ N/mm}^2 \text{ และ } HB < 400$$

$$\sigma'_n = 690 \text{ N/mm}^2 \quad \text{สำหรับเหล็กกล้าเหนียว ซึ่ง } \sigma_u > 1380 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma'_n = 0.4\sigma_u \quad \text{สำหรับเหล็กกล้าหล่อ และเหล็กหล่อ}$$

$$\sigma'_n = 0.38\sigma_u \quad \text{สำหรับแมกนีเซียมผสมหล่อ และแมกนีเซียมผสมเหนียว}$$

(อายุ ใช้งาน 10^6 วัฏจักร)

$$\sigma'_n = 0.45\sigma_u \quad \text{สำหรับนิกเกิลผสมและทองแดงผสม}$$

$$\sigma'_n = 0.38\sigma_u \quad \text{สำหรับอลูมิเนียมผสมเหนียว ที่มีความต้านแรงดึงสูงถึง } 275 \text{ N/mm}^2 \text{ (อายุการใช้งาน } 5 \times 10^8 \text{ วัฏจักร)}$$

$$\sigma'_n = 0.16\sigma_u \quad \text{สำหรับอลูมิเนียมผสมหล่อที่มีความต้านแรงดึงสูงถึง } 345 \text{ N/mm}^2 \text{ (อายุการใช้งาน } 5 \times 10^8 \text{ วัฏจักร)}$$

ค่าดังกล่าวนี้เป็นเพียงค่าโดยประมาณเพื่อใช้ประกอบการคำนวณในที่นี้เท่านั้น ผู้ที่ต้องการค่าที่แน่นอนยิ่งขึ้นควรจะสอบถามจากผู้ผลิตหรือทำการทดสอบ

การออกแบบสกรูส่งกำลัง

การคำนวณหาความเค้นในส่วนต่าง ๆ ของสกรูส่งกำลังโดยใช้สมการเบื้องต้นที่ได้กล่าวมาแล้ว เป็นการประมาณค่าของความเค้นที่เกิดขึ้นเท่านั้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการขบกันระหว่างเกลียวสกรูและเป็นเกลียว ตลอดจนการกระจายของแรงบนเกลียวว่าจะเข้าใกล้สภาพที่ได้สมมติเอาไว้เพียงใด เกลียวที่อยู่ใกล้หน้าหนักร่างจะรับแรงมากกว่าเกลียวที่อยู่ห่างออกไปความหลวมระหว่างสกรูและเป็นเกลียวอาจทำให้แรงกระจายไม่สม่ำเสมอ หรือการโค้งของเกลียวอาจทำให้เกลียวบางเกลียวรับแรงมากเกินไป เป็นต้น แต่สิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งที่ไม้อาจจะทราบได้อย่างแน่นอน ดังนั้นการคำนวณความเค้นในสกรูก็ยังถือหลักการเดิม

ความเค้นวิกฤต (Critical or Bucking stress)

ใช้ในการคำนวณหาขนาดของสกรูที่รับแรงกดแต่เพียงอย่างเดียว ถ้าเป็นสกรูสั้นก็สามารถที่จะใช้ในสมการของความเค้นกด

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

เนื่องจากพื้นเกลียวก็จะช่วยรับแรงนี้ด้วย ดังนั้นพื้นที่รับแรง A_r ก็ควรจะมีความใหญ่กว่าพื้นที่ซึ่งคิดที่เส้นผ่านศูนย์กลางน้อย ซึ่งอาจจะประมาณได้ว่าควรจะเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยและเส้นผ่านศูนย์กลางพิชช์ เพื่อความสะดวกในการคำนวณจึงขอแนะนำให้ใช้พื้นที่ของเส้นผ่านศูนย์กลางน้อย

คำนวณสกรูสั้นในที่นี้หมายถึง สกรูสั้นในที่นี้หมายถึงสกรูที่มีอัตราส่วนความเพริช $L/k < 40$ ถ้าหากสกรูมีอัตราส่วนความเพริชมากกว่านี้ สกรูอาจจะเกิดการโก่งงอขึ้นได้ก่อนที่จะถึงความเค้นจะถึงค่าที่กำหนดเอาไว้ก็ได้ ในกรณีเช่นนี้การออกแบบสกรูต้องใช้สูตรของเสาแทนสมการที่ (2.59)

สำหรับสกรูที่มีความยาวปานกลางให้สูตรของจอห์นสัน

$$W = \frac{Ar [1 - (Le/k)^2/4 2E]}{N} \quad 40 < \frac{L_e}{k} < 110 \quad (2.60)$$

สำหรับสกรูยาวให้ใช้สูตรของออยเลอร์

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

ถ้าวัสดุที่ใช้ทำสกรูไม่ใช่เหล็กกล้า ค่าของความเพียวที่แบ่งระหว่างการใช้สูตรของออยเลอร์และจอห์นสันจะคำนวณได้จากสมการ

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

ความกว้างและความยาวของสายพานแบน

เนื่องจากสายพานที่ใช้งานกันอยู่เดิมมีทั้งมาตรฐานที่เป็นระบบหน่วยอังกฤษ และระบบหน่วยเมตริก ซึ่งขนาดไม่สอดคล้องกัน ทำให้เกิดปัญหาขึ้นเมื่อต้องการเปลี่ยนสายพานใหม่ ดังนั้นองค์การมาตรฐานระหว่างประเทศ (ISO) จึงได้กำหนดมาตรฐานความกว้างของสายพาน สังก้างและความกว้างของล้อสายพานที่สอดคล้องกัน ใน ISO 22 – 1975 (E) โดยไม่คำนึงถึงวัสดุของสายพาน เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้ขนาดสายพานให้เป็นมาตรฐาน ในการคำนวณต่อไปจะอ้างอิงขนาดสายพานมาตรฐานนี้โดยตลอด ซึ่งจะดูได้จากตาราง

ตารางที่ 2.4 ความกว้างของสายพานแบนส่งกำลังและความกว้างล้อสายพานที่สอดคล้องกันตาม
มาตรฐาน 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

การออกแบบและการคำนวณ

อุปกรณ์การวิจัย

อุปกรณ์การวิจัยประกอบไปด้วย

1. อุปกรณ์วัดความเร็วลม

อุปกรณ์วัดความเร็วลมเป็นระบบดิจิทัล ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

2. อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ

ในการวัดความเร็วรอบของกังหันใช้เครื่องวัดความเร็วรอบ อิเล็กทรอนิกส์ ยี่ห้อ ดิจิตอล (Lutron Digital) แสดงผลตัวเลข โดยรับสัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ ติดตั้งกับเพลากังหัน สามารถวัดความเร็วรอบได้ตั้งแต่ 0 ถึง 9999 รอบต่อนาที โดยมีความละเอียด ± 1 รอบต่อนาที

3. อุปกรณ์วัดแรงบิดกังหันลม

อุปกรณ์วัดแรงบิดกังหันลมที่ใช้ในการวิจัยนี้สร้างขึ้นเอง คือ ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดแรงบิดกังหันลมประกอบด้วยวงล้อซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร บิดติดกับเพลากังหัน トラッキングสปริง และลูกค้อนน้ำหนัก

4. อุโมงค์ลม

อุโมงค์ลมที่ใช้ในการวิจัยนี้ สร้างขึ้นเองมีขนาด 0.5×0.5 เมตร สามารถให้ความเร็วลมสูงสุด 8 เมตรต่อวินาที

5. แท่นทดสอบ

อุปกรณ์แท่นทดสอบสร้างขึ้นเองมีความสูงประมาณ 1.7 กว้าง 0.7 เมตรสามารถปรับให้หมุนได้ในแนวตั้ง และแนวนอน นอกจากนี้ยังสามารถถอดเปลี่ยน กังหันเป็นแบบอื่นได้

6. กังหันลม

กังหันลมที่ใช้ทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางความโค้งของใบ 0.25 เมตร สูง 0.5 เมตร แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะดังนี้

- | | | |
|-----------|---|-------|
| 1. ลักษณะ | 2 | ใบพัด |
| 2. ลักษณะ | 3 | ใบพัด |
| 3. ลักษณะ | 4 | ใบพัด |

การเลือกขนาดของพัดลมและมอเตอร์

ขนาดของพัดลม และมอเตอร์ขึ้นอยู่กับกำหนัดค่าความเร็วลมสูงสุดที่ต้องการใช้งานและขนาดของพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ลมและค่าอื่น 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	°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

$$Re = \frac{Lv}{\nu} \quad (3-1)$$

ที่ V ที่ $25^{\circ}C = 1.548 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ จากตารางภาคผนวกที่ 1.6 แทนค่า

$$Re = \frac{(0.05\text{m.})(8\text{m/s})}{(1.548 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})}$$

$$Re = 25\,839.79$$

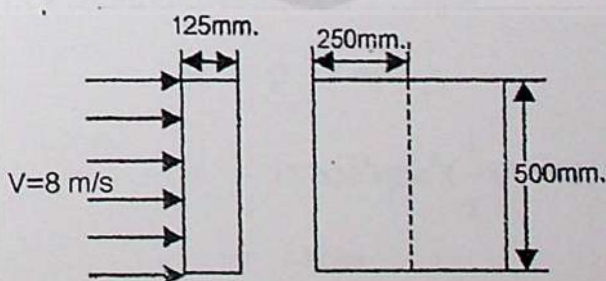
การหาค่าแรงลมปะทะใบพัดของกังหัน

จาก

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

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

จากตารางภาคผนวกที่ 1.6 ที่ $25^{\circ}C$ $\rho = 1.18 \text{ kg/m}^3$



รูปที่ 3.1 แสดงพื้นที่รับลมของกังหัน

แทนค่า

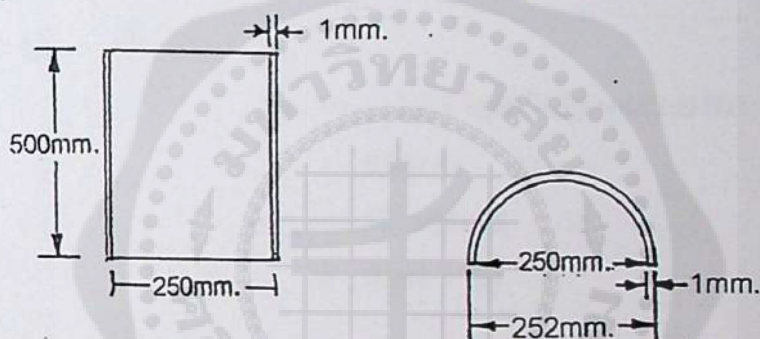
$$F_{\max} = \frac{1}{2}(2.3)(1.18 \text{ kg/m}^3)(8 \text{ m/s})^2(0.5 \times 0.5 \text{ m}^2)$$

$$= 21.17 \text{ N}$$

เนื่องจากตัวแท่นติดตั้งใช้ร่วมกับโครงงานกลุ่มอื่นด้วยในที่นี้จึงขอพิจารณาवल
กัณฑ์ในโครงงานของ สุทธิเกียรติ ซึ่งกัณฑ์มีขนาดใหญ่ที่สุด

การคำนวณมวลของใบพัด

มวลของใบพัด



รูปที่ 3.2 แสดงใบพัดของกัณฑ์

มีทั้งหมด 6 ใบ

จากตารางภาคผนวกที่ 1.1 ความหนาแน่นของเหล็ก = 7.7 Mg/m^3

จาก

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

แทนค่า

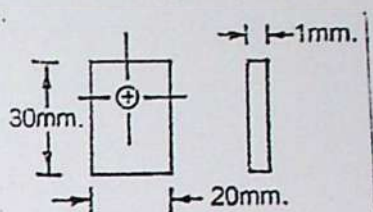
$$m = (7.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3) \left[\frac{1}{2} \pi \times 0.2510 \times 0.0010 \times 0.5 \right] \text{ m}^3$$

$$= 1.52 \text{ kg}$$

$$m_{\text{ใบ}} = 6 \times 1.52 \text{ kg}$$

$$= 9.12 \text{ kg}$$

มวลของขาใบพัด



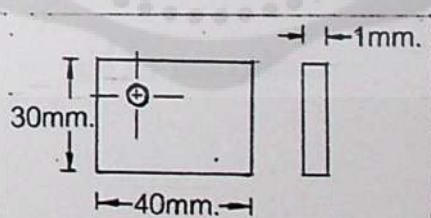
รูปที่ 3.3 แสดงขาใบพัดส่วนใน

มีทั้งหมด

12

ชิ้น

$$\begin{aligned}
 m &= (7.7 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3)(0.03 \times 0.02 \times 0.001 \text{ m}^3) \\
 &= 0.00462 \text{ kg} \\
 m_{v,1} &= 12 \times 0.00462 \text{ kg} \\
 &= 0.055 \text{ kg}
 \end{aligned}$$



รูปที่ 3.4 แสดงขาใบพัดส่วนนอก

มีทั้งหมด

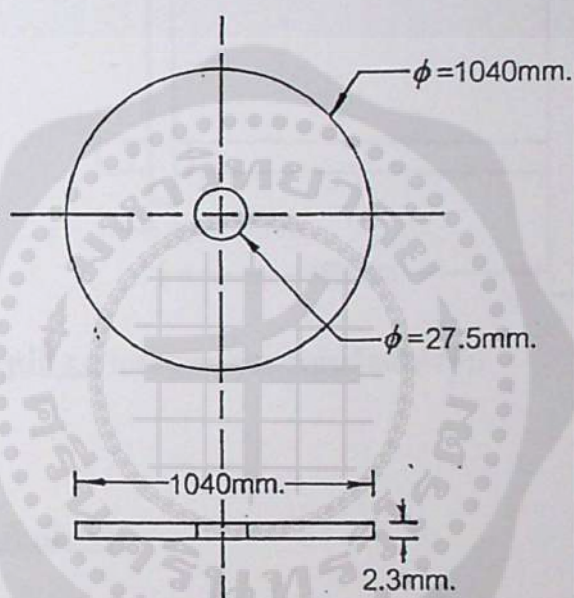
12

ชิ้น

$$\begin{aligned}
 m &= (7.7 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3)(0.03 \times 0.04 \times 0.001 \text{ m}^3) \\
 &= 0.00924 \text{ kg} \\
 m_{v,2} &= 12 \times 0.00924 \text{ kg} \\
 &= 0.111 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m_{\text{ท}} &= 0.055 + 0.111 \quad \text{kg} \\
 &= 0.166 \quad \text{kg}
 \end{aligned}$$

มวลของแผ่นเพลต



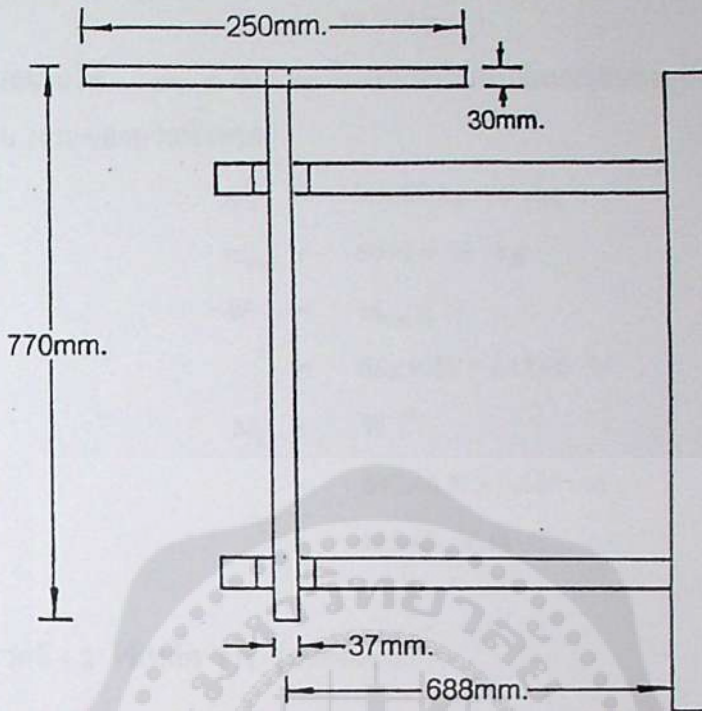
รูปที่ 3.5 แสดงรูปเพลต

มีทั้งหมด

2

ชิ้น

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



รูปที่ 3.6 แสดงขนาดของแท่นติดตั้งกังหัน

การคำนวณหามวลของไดนาโมมิเตอร์

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

มวลของเพลลา

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

มวลลูกปืน

ซึ่งได้จากการชั่งอันละ 0.65 kg

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

ดังนั้นแรงที่เกิดจากน้ำหนัก จะได้

$$m_1 = m_{\text{ลู}} + m_{\text{ขา}} + m_{\text{เพลลา}} + m_{\text{ไดนาโมมิเตอร์}} + m_{\text{เพลลา}} + m_{\text{ลูกปืน}}$$

$$= 9.12 + 0.166 + 30.07 + 11.34 + 6.37 + 1.3$$

$$= 58.36 \text{ kg}$$

และจะให้ $m_1 = 60 \text{ kg}$ ในการออกแบบและมวลของอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ไม่ได้พิจารณา ให้ถือเป็น 10% ของมวลทั้งหมด
จะได้

$$m'_1 = 0.1 \times 60 \text{ kg} = 6 \text{ kg}$$

$$m_{รวม} = 60 + 6 = 66 \text{ kg}$$

$$W = m_{รวม} g$$

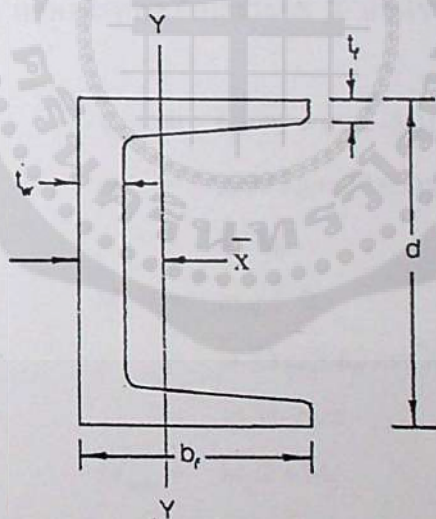
$$= 66 \times 9.81 = 647.46 \text{ N}$$

$$M_1 = W \ell$$

$$= 647.46 \text{ N} \times 0.688 \text{ m}$$

$$= 445.45 \text{ N.m}$$

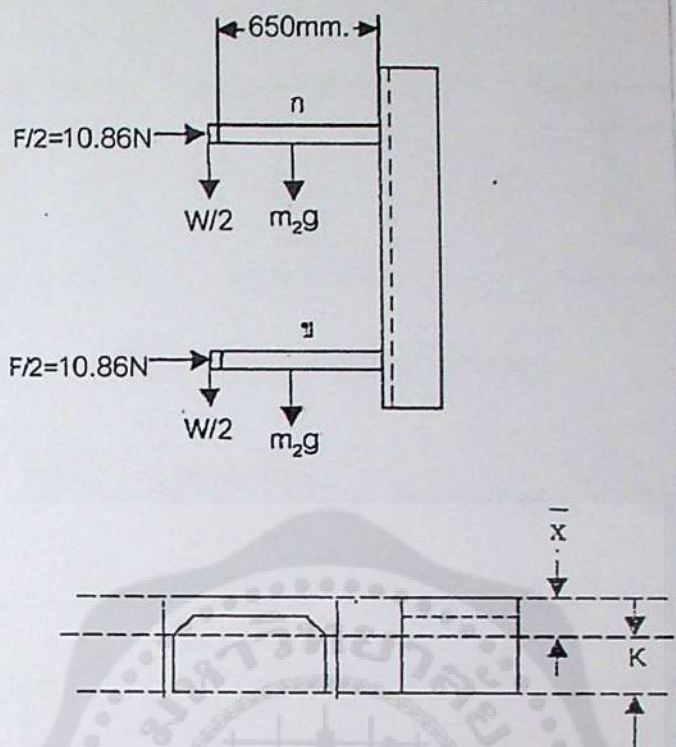
จากตารางภาคผนวกที่ 1.2 ใช้เหล็ก ราง [75x40x5x7



รูปที่ 3.7 แสดงหน้าตัดของเหล็กราง

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

$$I_y = 12.2 \text{ cm}^4 \quad \bar{X} = 1.28 \text{ cm}$$



รูปที่ 3.8 แสดงแรงกระทำและระยะ $\bar{X}$ บนแกนของแท่น

$$K = b_f - \bar{X} = 0.04 - 0.0128 = 0.0272 \text{ m}$$

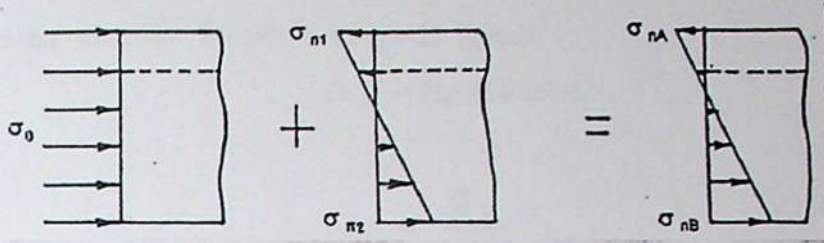
$$\begin{aligned} m_2 &= (6.92 \text{ kg/m})(0.65 \text{ m}) \\ &= 4.5 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_2 &= m_2 g l / 2 \\ &= (4.5 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2)(0.65 \text{ m}) \\ &= 14.35 \text{ N.m} \end{aligned}$$

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

ที่ชั้น ก

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



รูปที่ 3.9 แสดงแรงกระทำแกนด้านบน

$$\sigma_{n1} = \frac{M\bar{X}}{I} = \frac{237.08 \times 0.0128}{12.2 \times 10^{-8}} = 24\,873.97 \text{ kN.m}^{-2} \text{ (Tension)}$$

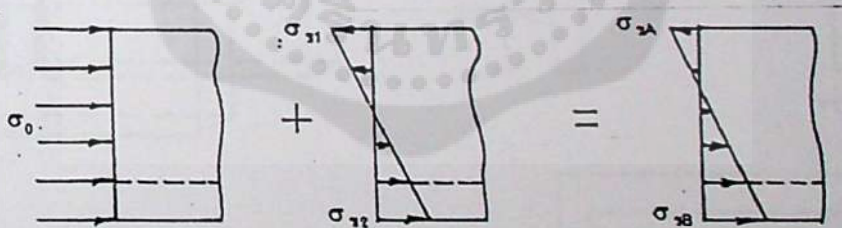
$$\sigma_{n2} = -\frac{MK}{I} = -\frac{237.08 \times 0.0272}{12.2 \times 10^{-8}} = -52\,857.18 \text{ kN.m}^{-2} \text{ (Compression)}$$

ดังนั้น

$$\sigma_{nA} = \sigma_0 + \sigma_{n1} = -12.32 + 24\,873.97 = 24\,861.18 \text{ kN.m}^{-2} \text{ (Tension)}$$

$$\sigma_{nB} = \sigma_0 + \sigma_{n2} = -12.32 - 52\,857.18 = -52\,869.50 \text{ kN.m}^{-2} \text{ (Compression)}$$

ที่ชั้น ข



รูปที่ 3.10 แสดงแรงกระทำแกนด้านล่าง

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

$$\sigma_{v1} = 52\,857.18 \text{ kN.m}^{-2} \text{ (Tension)}$$

$$\sigma_{v2} = -24\,873.97 \text{ kN.m}^{-2} \text{ (Compression)}$$

$$\sigma_{vA} = \sigma_0 + \sigma_{v1} = -12.32 + 52\,857.18 = 52\,844.86 \text{ kN.m}^{-2} \text{ (Tension)}$$

$$\sigma_{vB} = \sigma_0 + \sigma_{v2} = -12.32 - 24\,873.97 = -24\,886.29 \text{ kN.m}^{-2} \text{ (Compression)}$$

จะได้

$$\sigma_{\max} = 52\,869.50 \text{ kN.m}^{-2}$$

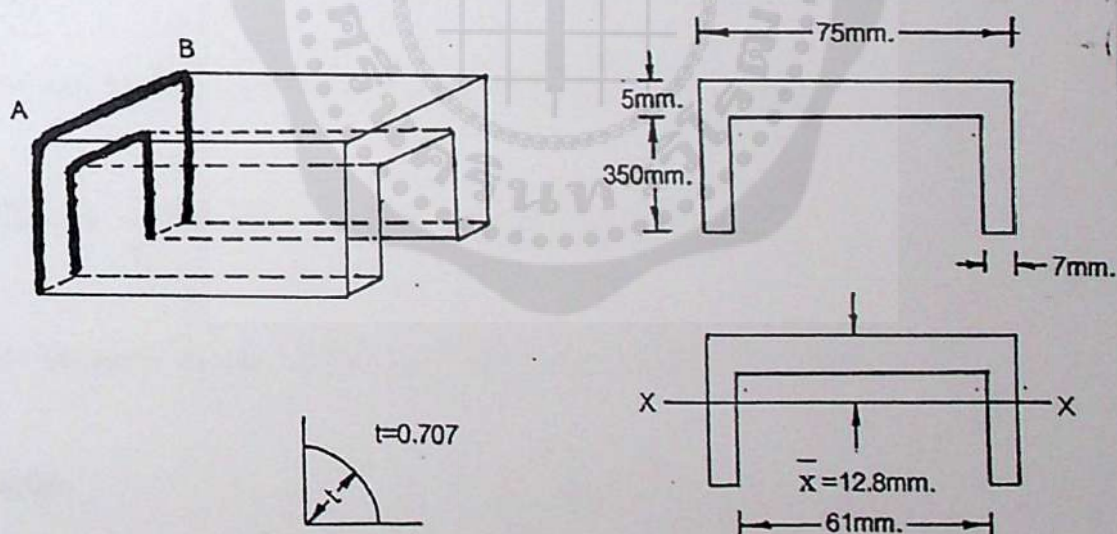
แต่ค่า yield stress ของเหล็ก มีค่าเท่ากับ $\sigma_{y2} = 23 \text{ kg/mm}^2$

ซึ่งจะได้

$$\sigma_{y2} = 225\,630 \text{ kN.m}^{-2}$$

$$\begin{aligned} \text{F.S.} &= \frac{\sigma_y}{\sigma_{\max}} \\ &= \frac{225\,630.00 \text{ kN.m}^{-2}}{52\,869.50 \text{ kN.m}^{-2}} \\ &= 4.27 \end{aligned}$$

การคำนวณหารอยเชื่อม



รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะรอยเชื่อม

จาก

$$2.54 \text{ cm.} = 1 \text{ inch.}$$

ดังนั้น

$$25.4 \text{ mm.} = 1 \text{ inch.}$$

พิจารณาความหนาของเหล็กด้านบน

$$= 5 \text{ mm.}$$

จะมีค่า

$$t = \frac{5}{25.4} = \frac{1}{5.08} \text{ inch.}$$

หา Full Strength weld ได้จาก

$$W = \frac{3}{4} t$$

$$W = \frac{3}{4} \times \frac{1}{5.08} = \frac{1}{6.77} \text{ inch.}$$

หา Minimum leg side of fillet weld ซึ่งได้จากตารางภาคผนวกที่ 1.8

จะมีค่า

$$\frac{3}{16} \text{ inch.}$$

พิจารณาความหนาแน่นของเหล็กด้านข้าง = 7 mm.

จะมีค่า

$$t = \frac{7}{25.4} = \frac{1}{3.62} \text{ inch.}$$

หา Full Strength weld ซึ่งจะได้จากตารางภาคผนวกที่ 1.7 ซึ่งจะมีค่า t

ประมาณ $\frac{5}{16}$ ซึ่งจะให้ค่า Full Strength weld = $\frac{1}{4}$ inch.

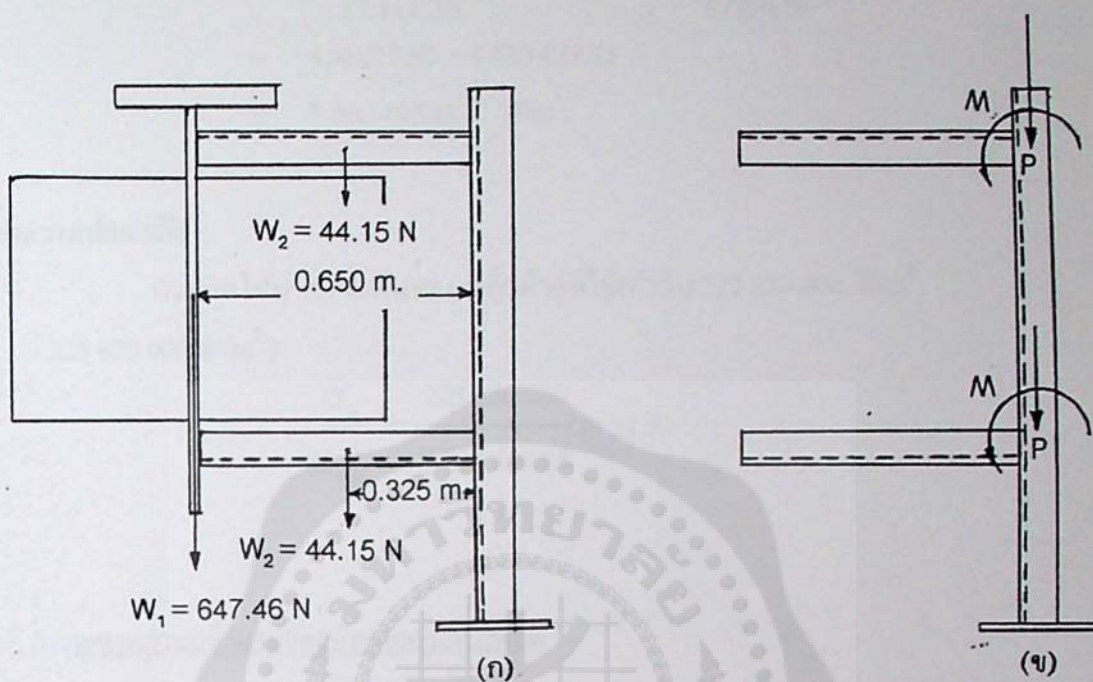
หา Minimum leg side of fillet weld ซึ่งได้จากตารางภาคผนวกที่ 1.8

จะมีค่า

$$\frac{3}{16} \text{ inch.}$$

ซึ่งค่าที่ได้จากตารางภาคผนวกที่ 1.8 จะเป็นค่าที่พิจารณาให้อยู่ในช่วงความปลอดภัยแล้ว

การคำนวณหาความแข็งแรงของตัวแท่นทดสอบกึ่งหั่นลม



รูปที่ 3.12 (ก) แสดงน้ำหนักของชิ้นส่วนต่างๆ (ข) แสดงการย้ายแรงมากระทำตามแนวแกน

เราไม่นำแรงลมที่กระทำกับกึ่งหั่นมาคิดเพราะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักของชิ้นส่วนต่างๆ

น้ำหนักกึ่งหั่นลม เพลา ไคนาโมมิเตอร์ และชิ้นส่วนอื่นๆ

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

น้ำหนักแขนแต่ละอัน

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

จากตารางภาคผนวกที่ 1.2 ใช้เหล็กทรง C125 x 65 x 6 x 8 ได้ค่า $A = 17.11 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $Z_x = 67.8 \times 10^{-6} \text{ m}^3$

$$\sigma_{\max} = \frac{P}{A} + \frac{M}{Z_x}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{2\left(\frac{647.46}{2} + 44.15\right)}{17.11 \times 10^{-4}} + \frac{2\left[\frac{647.46}{2} \times 0.650 + 44.15 \times 0.325\right]}{67.8 \times 10^{-6}} \\
 &= 430\,017.53 + 6\,630\,479.35 \\
 &= 7\,060\,496.88 \text{ N/m}^2
 \end{aligned}$$

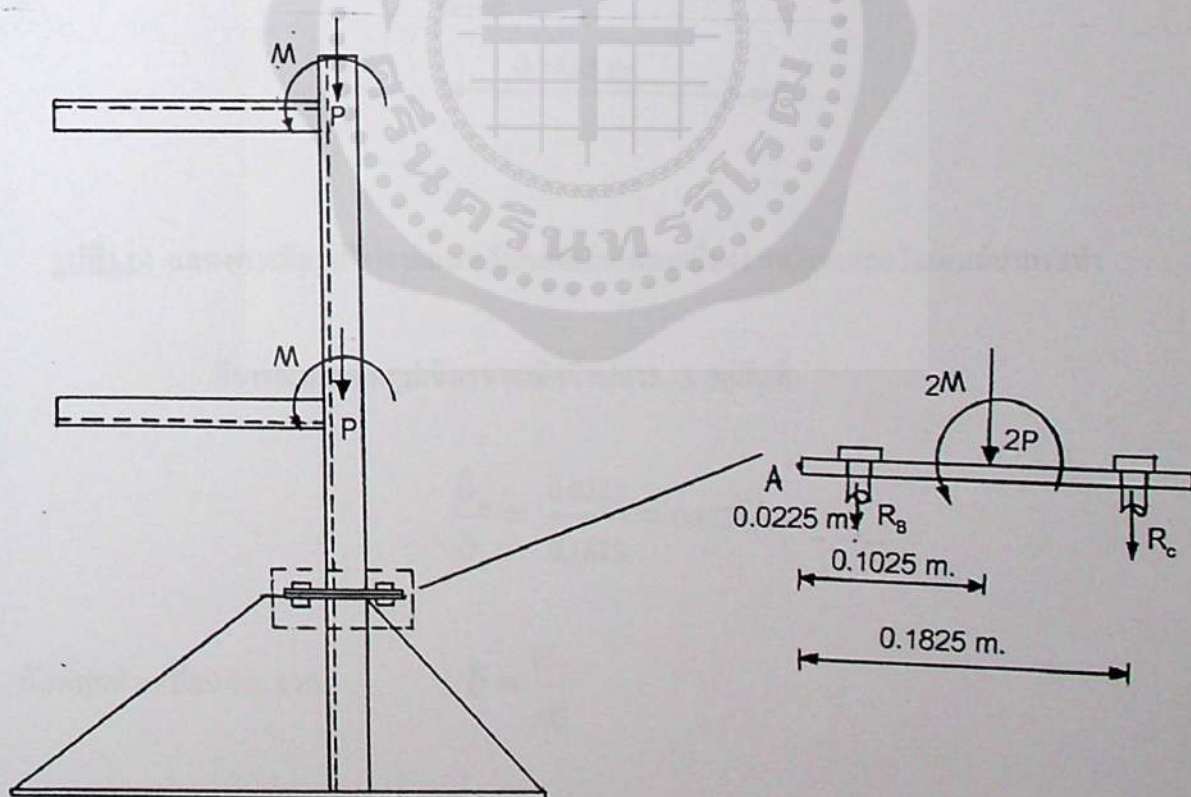
หาค่าความปลอดภัย

กำหนดให้ค่าความเค้นของเหล็กตัวบูที่ใช้เท่ากับ $225\,630\,000 \text{ N/m}^2$

($\sigma_y = 225\,630\,000 \text{ N/m}^2$)

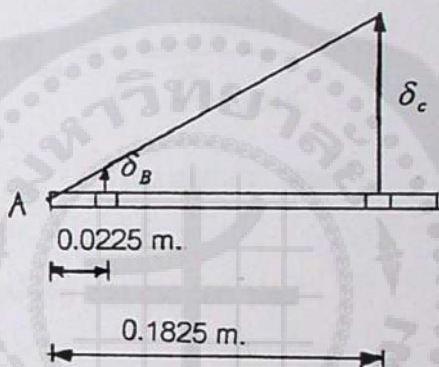
$$\therefore \text{F.S.} = \frac{\sigma_y}{\sigma_{\max}} = \frac{225\,630\,000}{7\,060\,496.88} = 31.91$$

การคำนวณหาความแข็งแรงของน็อตและแผ่นเพลต



รูปที่ 3.13 แสดงแรงและโมเมนต์ที่กระทำกับน็อตและแผ่นเพลต

$$\begin{aligned}
 \sum M_A = 0 \quad \curvearrowright + : 2M - 2P(0.1025) - 0.0225R_B - 0.1825R_C &= 0 \\
 0.0225R_B + 0.1825R_C &= 449.55 - 735.76(0.1025) \\
 0.0225R_B + 0.1825R_C &= 374.1346 \quad (3.1)
 \end{aligned}$$



รูปที่ 3.14 แสดงการผิดรูปไปจากแนวเดิมของแผ่นเพลตเนื่องจากมีแรงและโมเมนต์กระทำ

พิจารณาการผิดรูปเชิงเรขาคณิตซึ่งปลาย A อยู่กับที่

$$\frac{\delta_B}{\delta_C} = \frac{0.0225}{0.1825} = 0.1233$$

นี่ยึดทุกตัวเหมือนกัน จาก $\delta = \frac{FL}{AE}$

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

$$R_b = 0.1233 \quad (3.2)$$

นำ (3.2) แทนใน (3.1)

$$(0.0225 \times 0.1233)R_c + 0.1825 R_c = 374.1346$$

$$0.1853 R_c = 374.1346$$

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

เลือกคานี้อยอด้านที่รับแรงดึงมากที่สุด ซึ่งมีอยู่ 2 ตัว ช่วยกันรับแรง (ใช้นี้อยอด M 16)

แรงดึงที่กระทำกับนี้อยอด 1 ตัว

$$P = \frac{2019.08}{2} = 1009.54 \text{ N}$$

ความเค้นดึงสูงสุดในตัวนี้อยอด 1 ตัว

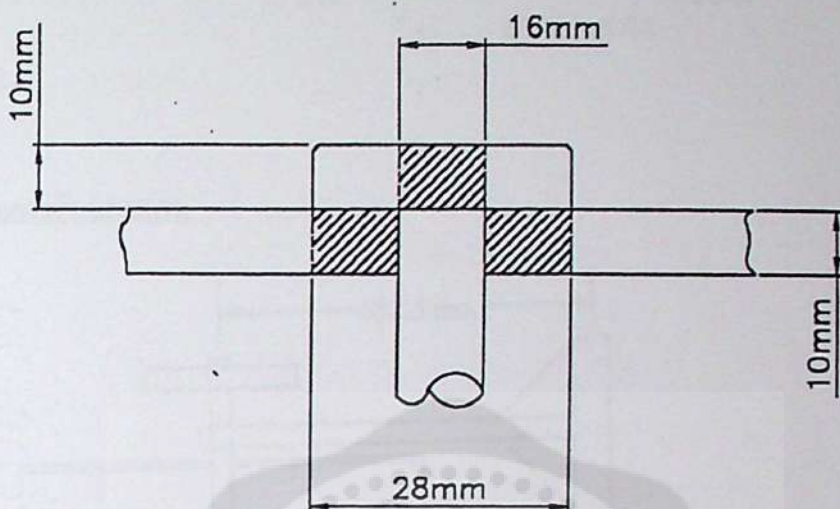
$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{P}{A} = \frac{1009.54}{\frac{\pi}{4} \times 0.016^2} \\ &= 5021040.04 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

หาค่าความปลอดภัย

กำหนดให้ค่าความเค้นของนี้อยอดที่ใช้เท่ากับ 225630000 N/m^2

$$\therefore \text{F.S.} = \frac{225630000}{5021040.04} = 44.93$$

การคำนวณหาความแข็งแรงของน็อตและแผ่นเพลต



รูปที่ 3.15 แสดงความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นกับหัวน็อตและแผ่นเพลต

คิดที่แผ่นเพลต ($d = 28 \text{ mm.}$, $t = 10 \text{ mm.}$)

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{P}{A} = \frac{P}{\pi dt} \\ &= \frac{1009.54}{\pi \times 0.028 \times 0.01} \\ &= 1\,147\,666.29 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{P}{A} = \frac{P}{\pi dt} \\ &= \frac{1009.54}{\pi \times 0.016 \times 0.01} \\ &= 2\,008\,416.02 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

หาค่าความปลอดภัย

โดยที่

$$\tau_y = 0.5 \sigma_y \quad \text{และกำหนดให้ } \sigma_y = 225\,630\,000 \text{ N/m}^2$$

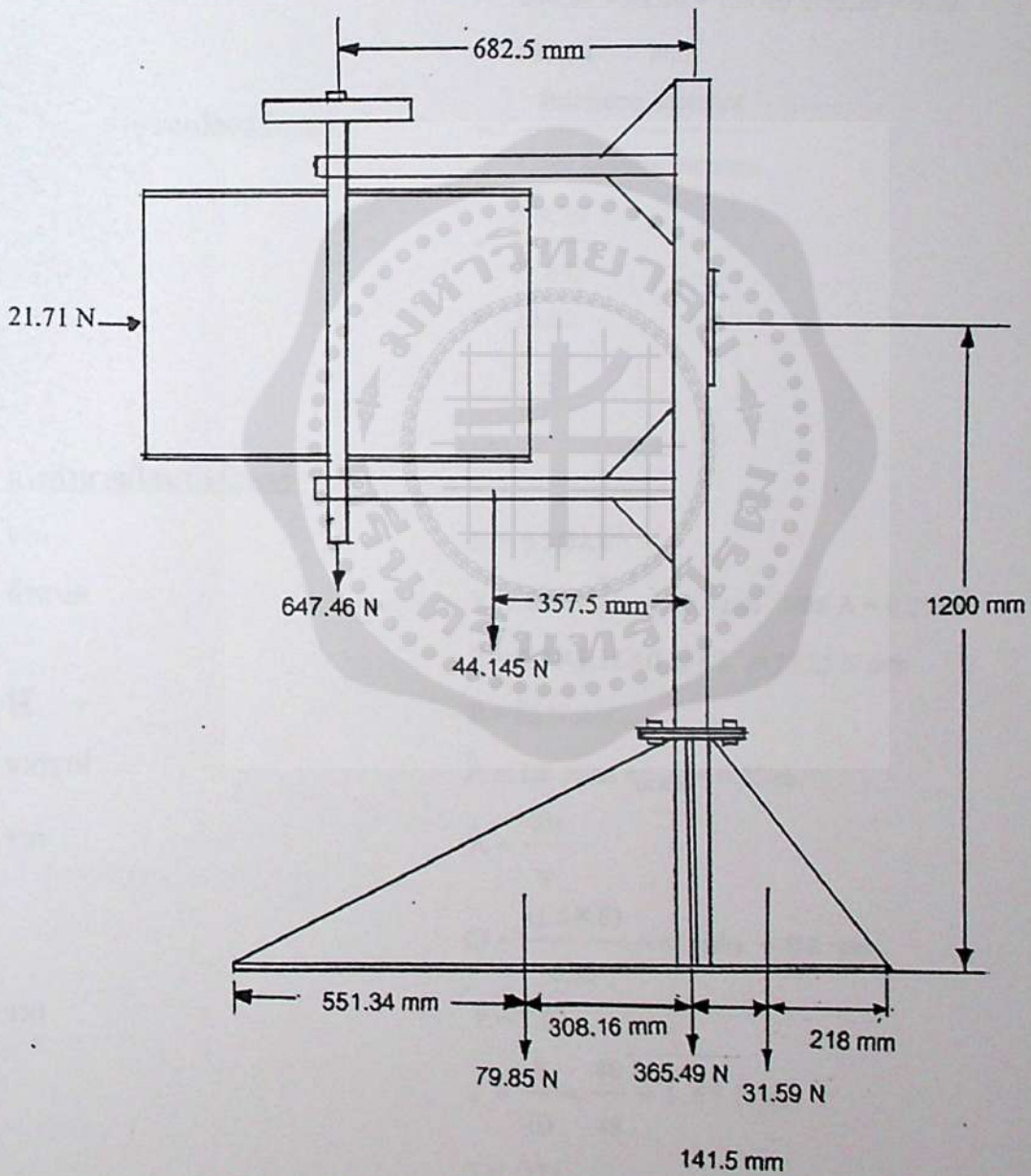
$$\tau_y = 0.5 \times 225\,630\,000$$

$$= 112\,815\,000 \text{ N/m}^2$$

เลือกคิดค่าความปลอดภัยที่น้อย เพราะเกิดความเค้นเฉือนมากที่สุด

$$\therefore F.S. = \frac{\tau_y}{\tau_{max}} = \frac{115\,815\,000}{2\,008\,416.02} = 56.17$$

การคำนวณการล้มของแท่น



รูปที่ 3.16 แสดงจุดศูนย์ถ่วงของชิ้นส่วนต่างๆ ของแท่นทดสอบ

Over turning moment

$$\begin{aligned}
 &= F S \\
 &= 59.71 \times 1.2 \\
 &= 71.652 \text{ N.m}
 \end{aligned}$$

Resisting moment

$$\begin{aligned}
 &= W L \\
 &= (647.46 \times 1.042) + (88.29 \times 0.714) + (365.49 \times 0.3595) + (79.85 \times 0.667) + (31.59 \times 0.218) \\
 &= 674.65 + 63.04 + 131.40 + 53.26 + 6.89 \\
 &= 929.24 \text{ N.m}
 \end{aligned}$$

ค่าความปลอดภัย (N)

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{Resisting moment}}{\text{Over turning moment}} \\
 &= \frac{929.24}{71.652} \\
 &= 12.97
 \end{aligned}$$

การคำนวณไดนาโมมิเตอร์

จาก

$$P = 0.5 \rho A V^3$$

กำหนด

$$V = 8 \text{ m/s} \quad \rho = 1.18 \text{ kg/m}^3 \quad \text{และ} \quad A = 0.25 \text{ m}^2$$

$$P = 0.5 \times 1.18 \times 0.25 \times 8^3 = 75.25 \text{ N.m/s}$$

ใช้

$$P = 80 \text{ N.m/s}$$

จากราฟ

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

จาก

$$\lambda = \frac{\omega r}{V}$$

$$\omega = \frac{(1.5 \times 8)}{0.25} = 48 \text{ rad/s} = 458 \text{ rpm}$$

จาก

$$P = T \cdot \omega$$

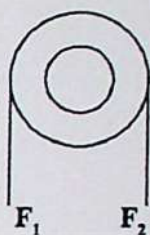
$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{80}{48} = 1.67 \text{ N.m}$$

$$T = \Delta F r$$

โดย r คือ รัศมีของ drum = 0.125 m

$$\Delta F = \frac{1.67}{0.125} = 13.36 \text{ N}$$

การคำนวณหาขนาดสปริง



รูปที่ 3.17 แสดงแรงที่กระทำกับสปริง

จาก

$$F_1 - F_2 = \Delta F = 13.36 \text{ N}$$

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

โดย

$$f = 0.3, \Phi = \pi$$

$$F_1 = F_2 e^{0.3 \times \pi} = 2.566 F_2$$

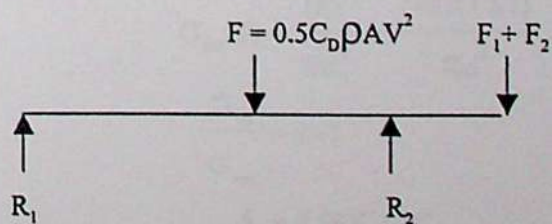
จาก

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

$$F_2 = 8.53, F_1 = 21.89 \text{ N}$$

ใช้สเกลที่ 0–30 N (เลือกใช้ตาชั่งสปริงขนาด 5 kg)

การคำนวณเพลลา

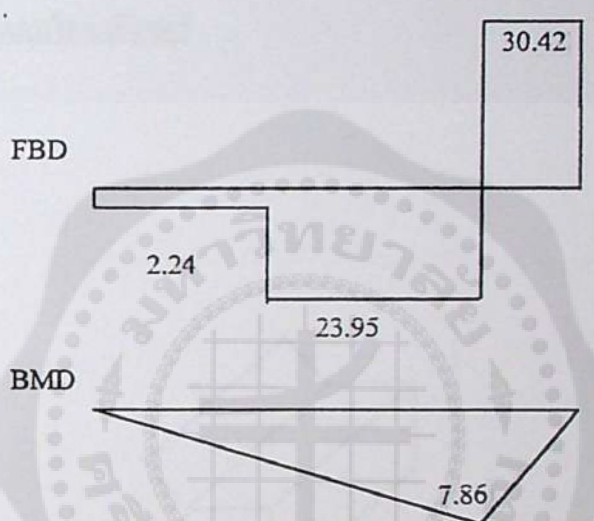


รูปที่ 3.18 แสดงเส้นแรงที่กระทำกับแกนเพลลา

$$F = 21.71 \text{ N}$$

$$\curvearrowright \quad R_2 = \frac{[(21.71 \times 0.30) + (30.42 \times 0.77)]}{0.60} = 49.89 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0 \quad R_1 = 21.71 + 30.42 - 49.89 = 2.24 \text{ N}$$



รูปที่ 3.19 แสดง FBD และ BMD ที่กระทำกับแกนเพลลา

ใช้ทฤษฎีการออกแบบเพื่อความด้า

ใช้เหล็ก

$$\text{SS 400} \quad \sigma_y = 24 \text{ kg/mm}^2$$

ได้

$$S_u = 422 \text{ MN/m}^2 \quad S_y = 236 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_{ca}(\sigma) = \frac{32M}{\pi d^3} = \frac{(32 \times 7.86)}{\pi d^3}$$

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

$$\frac{\sigma_{ca}}{\sigma_{em}} = 9.41$$

เขียน กราฟ S-N

$$S_n = 0.5 S_u C_L C_G C_S$$

$$C_L = 0.58 \quad C_G = 0.9 \quad C_S = 0.78 \text{ (จากตารางภาคผนวกที่ 1.9 , รูปภาคผนวกที่ 1.3)}$$

$$S_n = 0.5 \times 422 \times 0.58 \times 0.9 \times 0.78 = 86 \text{ MN/m}^2$$

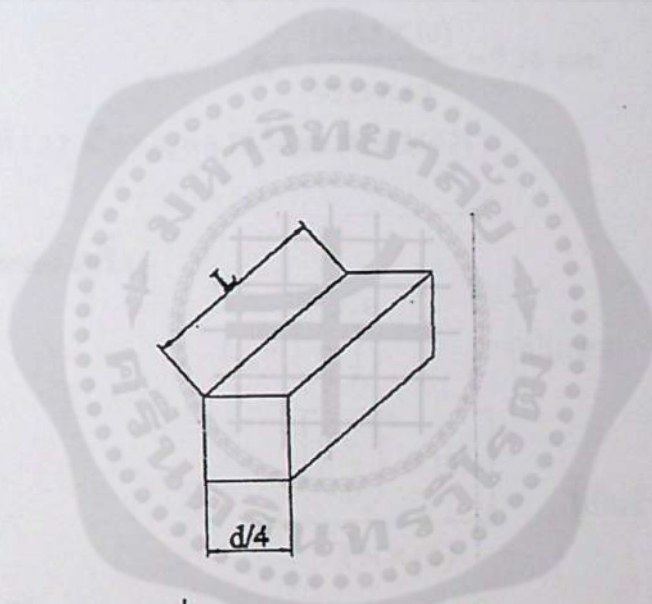
จากรูปภาคผนวกที่ 1.3 กราฟ S-N ได้ σ_u ที่ใช้ออกแบบได้ $\sigma_u = 84 \text{ MN/m}^2$ ใช้ SF = 3

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

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

การคำนวณหาส่วนประกอบไดนามิเตอร์

การหาสลัก



รูปที่ 3.20 แสดงขนาดของสลัก

ใช้สูตร เมื่อลิ้มขาดจากแรงเฉือน

$$T = 0.5Fd = 0.5bLTd$$

$$b = 0.25d$$

$$T = \frac{\tau L d^2}{8}$$

ให้ลิ้มและเพลเป็นวัสดุเดียวกัน

$$T = \frac{\tau L d^2}{8} = \frac{\pi d^3 \tau}{16}$$

$$L = 0.57 \pi d = 1.57 = 1.57 \times 20$$

$$= 23.55 \text{ ประมาณ } 24 \text{ mm}$$

เนื่องจากค่า L ที่คำนวณได้ยาวเกินไปจากตารางเลือกที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm จะได้ขนาด 6×6

การหาขนาดของ rod และน็อตที่ใช้ยึดสปริงกับฐาน

จากตารางภาคผนวกที่ 1.11 เลือกเหล็ก Class 4.6 ได้ $S_p = 225 \text{ MN/m}^2$ ใช้ SF = 10 เพื่อให้มีความแข็งแรงและมีขนาดใหญ่

$$A_t = \frac{(165.5 \times 10)}{9225 \times 10^6} = 7.36 \text{ mm}^2$$

จากตารางภาคผนวกที่ 1.12 เลือก $A_t = 8.78$ ได้ขนาดคือ M4 $\times$ 7

คำนวณอายุการใช้งานของ แบร์ริง

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

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

ใช้ $k = 3$ สำหรับ ball bearing

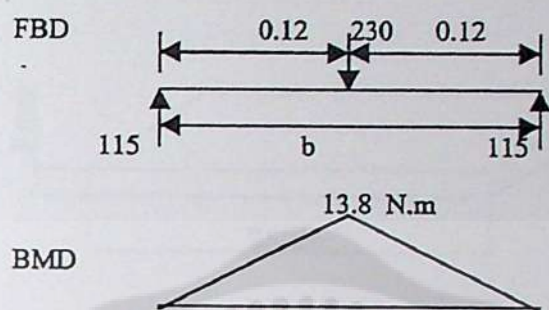
$$P = R_2 = 49.89 \text{ N}$$

$C = 10.77 \text{ kN}$ อนุกรมมิติ 2 เปิดตารางภาคผนวกที่ 1.10

$$L_{10} = \left[\frac{(10.77 \times 10^3)}{49.89} \right]^3 \times \left(\frac{10^6}{(1260 \times 10)} \right)$$

$$= 798\,428\,541 \text{ hr ประมาณ } 798\,000\,000 \text{ hr}$$

คำนวณฐาน



รูปที่ 3.21 แสดงค่า FBD และค่า BMD ของฐานไคนาโมมิเตอร์

จาก

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

$$c = 0.5h$$

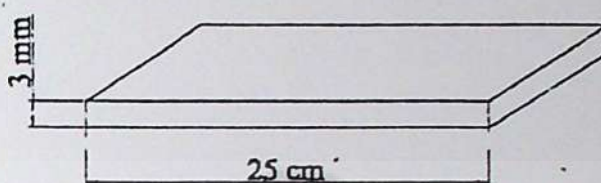
$$I = \frac{bh^3}{12} \quad b = 0.25 \text{ m} \quad \text{ใช้ SF} = 5$$

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

$$h^2 = \frac{(13.8 \times 12.5)}{(2 \times 0.25 \times 236 \times 10^6)} = 7.017 \times 10^{-6}$$

$$\therefore h = 2.649 \times 10^{-3} \text{ m}$$

ใช้ความหนาประมาณ 3 mm



รูปที่ 3.22 แสดงขนาดของสาดพาน

การเลือกขนาดสาดพาน

เราออกแบบขนาดของ drum มีความหนา 30 mm สามารถเลือกขนาดของสาดพาน จาก ตารางที่ 2.5 เลือกความหนา drum 32 mm จะได้ขนาดสาดพาน กว้าง 25 mm

บทที่ 4

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

อุปกรณ์ในการทดลอง

1. มอเตอร์ Blower
2. เครื่องวัดความเร็วรอบ
3. เครื่องวัดความเร็วลม
4. แท่นทดสอบกึ่งหัน
5. กังหันลมชาโวเนียสชนิดมีช่องว่างตรงกลาง
6. ไคนาโมมิเตอร์
7. ท่อส่งลม
8. อินเวอร์เตอร์

ขั้นตอนการทดลอง ชุดทดสอบกึ่งหันลมชาโวเนียสชนิดมีช่องว่างตรงกลาง

1. ติดตั้งกังหันลมชาโวเนียสชนิดมีช่องว่างตรงกลาง ไว้กับแท่นทดสอบกึ่งหัน
2. ติดตั้งไคนาโมมิเตอร์เข้ากับเพลลาของแกนกังหัน
3. ปรับระยะของใบพัดให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ
4. เปิดสวิตช์มอเตอร์ให้ Blower ทำงาน
5. ปรับความเร็วลมโดยใช้อินเวอร์เตอร์
6. วัดความเร็วรอบของกังหันในขณะที่ไม่มีภาระมากระทำ
7. นำค่าความเร็วรอบที่ได้ไปคำนวณหาความเร็วที่ปลายใบ
8. กำหนดช่วงความเร็วที่ปลายใบที่จะทำให้การทดลอง ระหว่างค่าความเร็วปลาย

ใบในขณะที่ไม่มีภาระมากระทำ จนถึงค่าความเร็วที่ปลายใบที่รับภาระเต็มที่

9. นำค่าความเร็วที่ปลายใบที่ได้ไปคำนวณหาค่าความเร็วรอบ เพื่อใช้ในการ

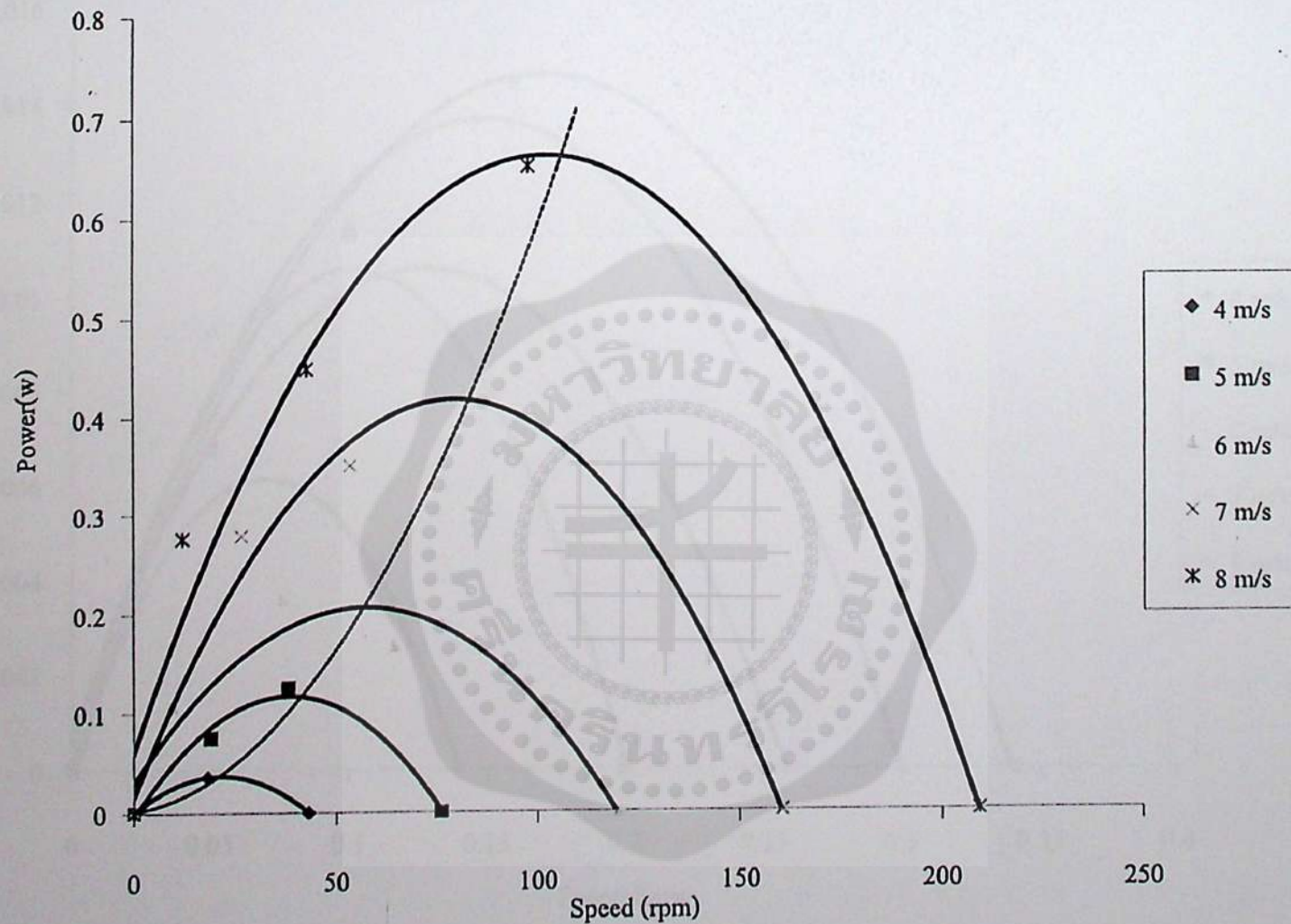
ทดลอง

10. ทำการทดลองบันทึกค่าภาระ F_1 และ F_2 ที่ความเร็วรอบต่างๆ

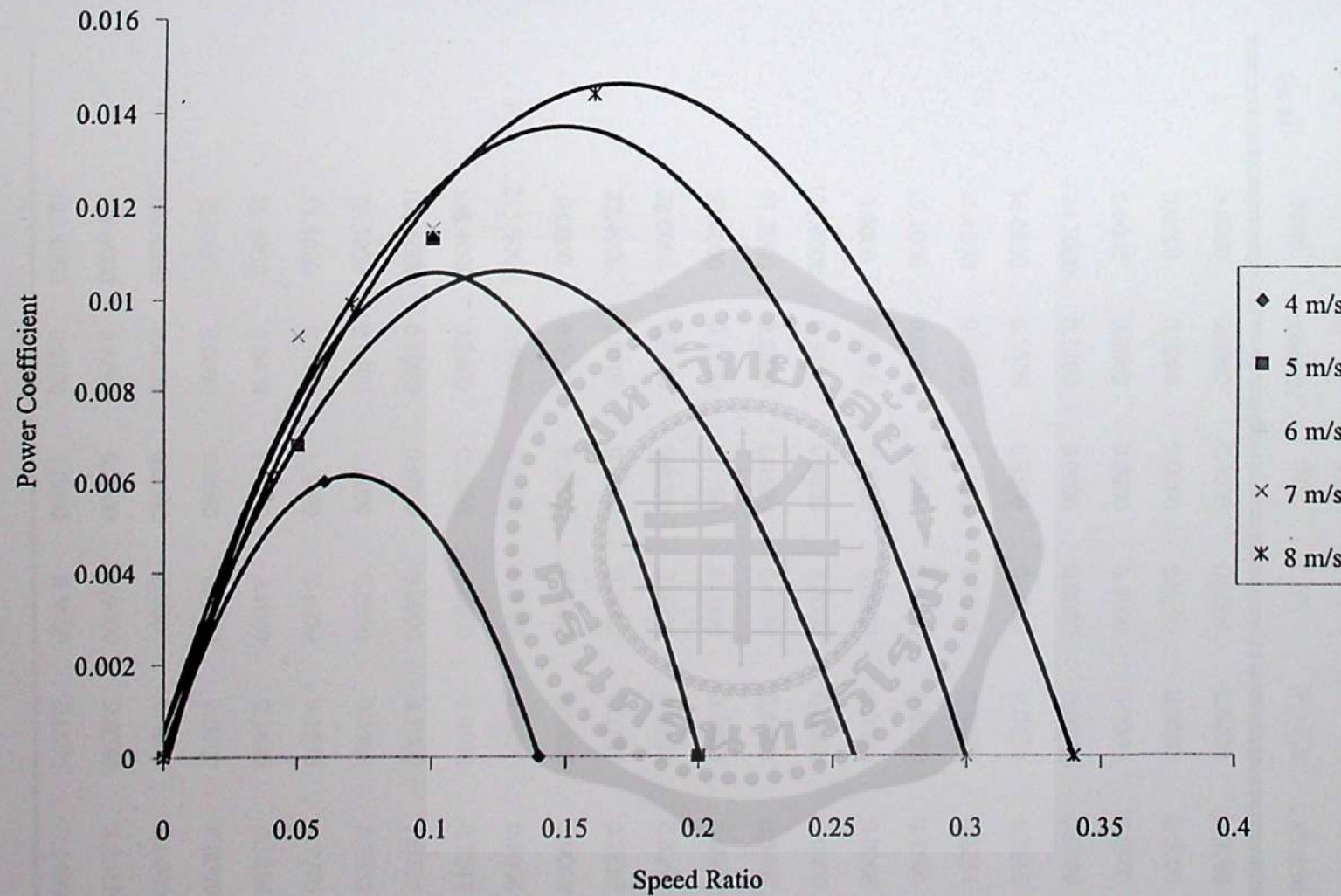
11. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 – 10 ใหม่อีกครั้ง โดยแต่ละครั้งให้ปรับระยะของ
ใบพัดตามขนาด $a/r = 0.2, 0.3, \dots, 0.8$

12. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 – 11 โดยเปลี่ยนจำนวนใบพัด เป็น 2, 3 และ 4
ใบตามลำดับ





รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 2 ใบ $a/r = 0.2$



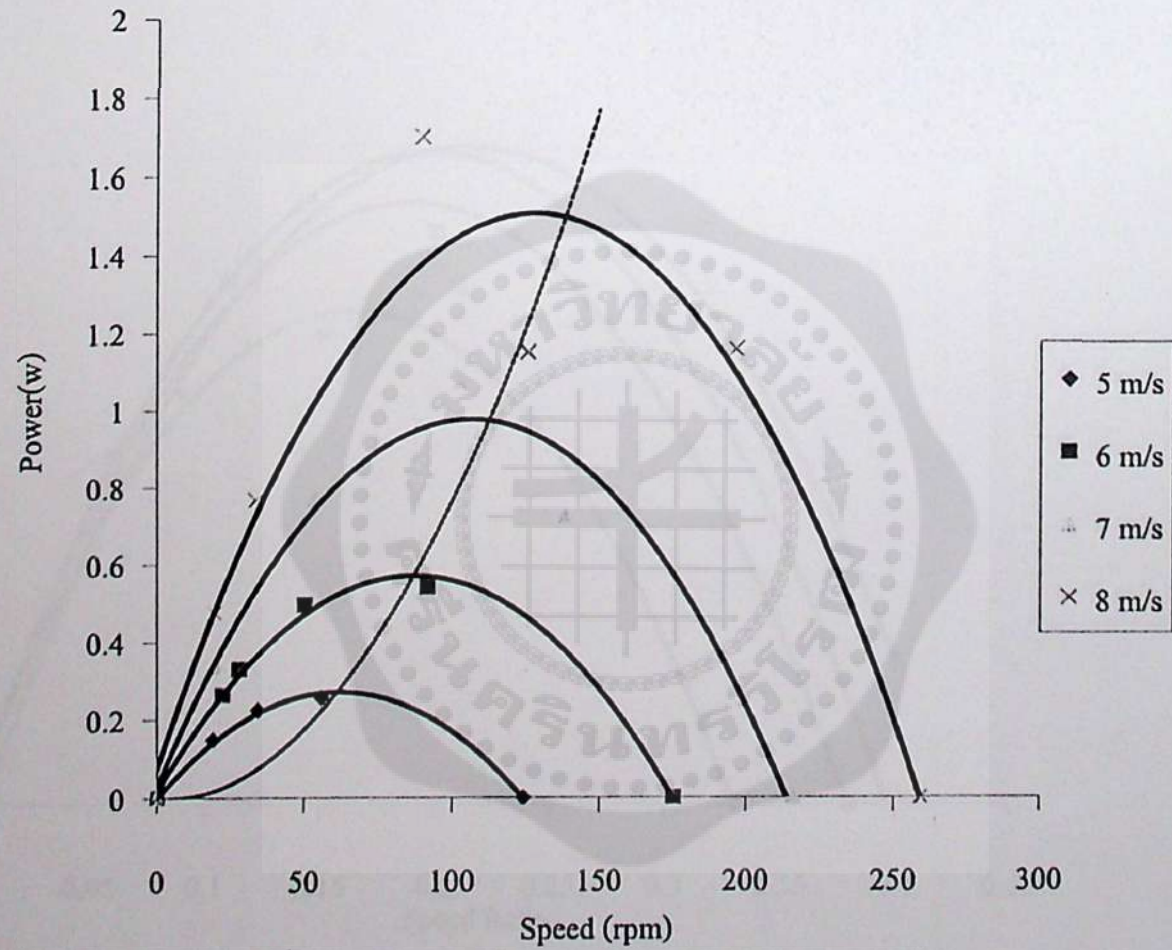
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Power Coefficient และ Speed Ratio ของใบพัด 2 ใบ $a/r = 0.2$

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองและการคำนวณของกังหันลมชนิด 2 ใบ $a/r = 0.3$

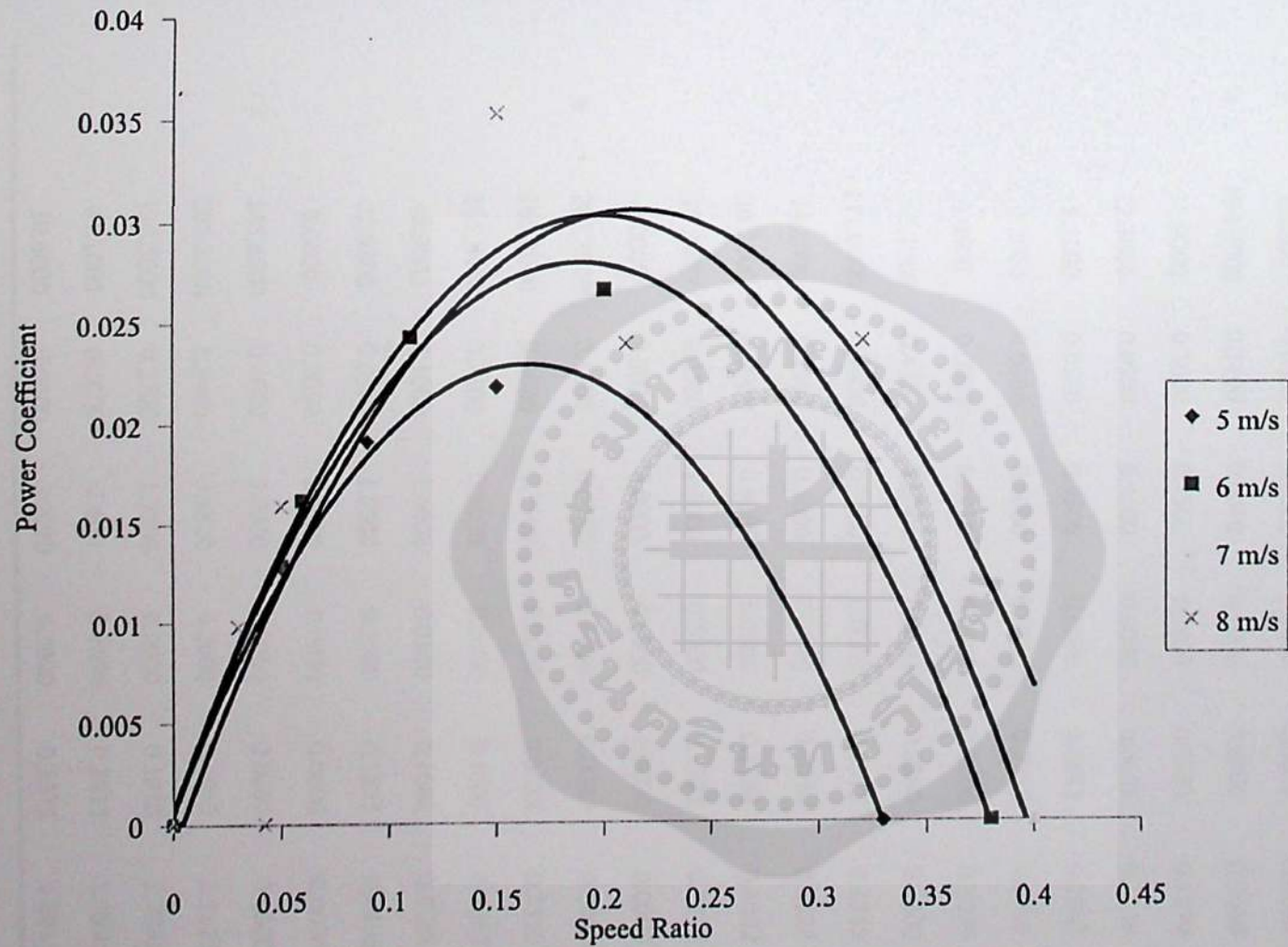
V (m/s)	N (rpm)	$\lambda = \frac{2\pi r N}{60 V}$	F_1 (N)	F_2 (N)	$T = (F_1 - F_2)r$	$P = \frac{2\pi T N}{60}$	$C_p = \frac{2P}{\rho A V^3}$
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	124.3000	0.3300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	56.0000	0.1500	0.3500	0.0000	0.0438	0.2566	0.0218
	34.4000	0.0900	0.5000	0.0000	0.0625	0.2251	0.0191
	19.1000	0.0500	0.6000	0.0000	0.0750	0.1500	0.0128
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	175.6000	0.3800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	91.7000	0.2000	0.4500	0.0000	0.0563	0.5402	0.0266
	50.4000	0.1100	0.7500	0.0000	0.0938	0.4948	0.0243
	28.0000	0.0610	0.9000	0.0000	0.1125	0.3299	0.0162
	22.4000	0.0500	0.9500	0.0000	0.1188	0.2639	0.0162
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	215.9000	0.4000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	138.4000	0.2600	0.4000	0.0000	0.0500	0.7247	0.0225
	102.5000	0.1900	0.8000	0.0000	0.1000	1.0734	0.0333
	75.5000	0.1400	1.0000	0.0500	0.4488	0.9327	0.0288
	53.5000	0.1000	1.2000	0.1000	0.1375	0.7703	0.0239
	19.9000	0.0400	1.4500	0.1500	0.1625	0.3386	0.0105
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	259.4000	0.4200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	196.4000	0.3200	0.4500	0.0000	0.0563	1.1569	0.0240
	125.5000	0.2100	1.2000	0.5000	0.0875	1.1499	0.0240

V (m/s)	N (rpm)	$\lambda =$ $2\pi N/60V$	F_1 (N)	F_2 (N)	$T =$ $(F_1 - F_2)r$	$P =$ $2\pi TN/60$	$C_p =$ $2P/\rho A V^3$
	89.6000	0.1500	1.6000	0.1500	0.1813	1.7006	0.0353
	33.5000	0.0500	2.0000	0.2500	0.2188	0.7674	0.0159
	19.6000	0.0300	2.2000	0.3500	0.2313	0.1746	0.0098
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000





รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 2 ใบ $a/r = 0.3$



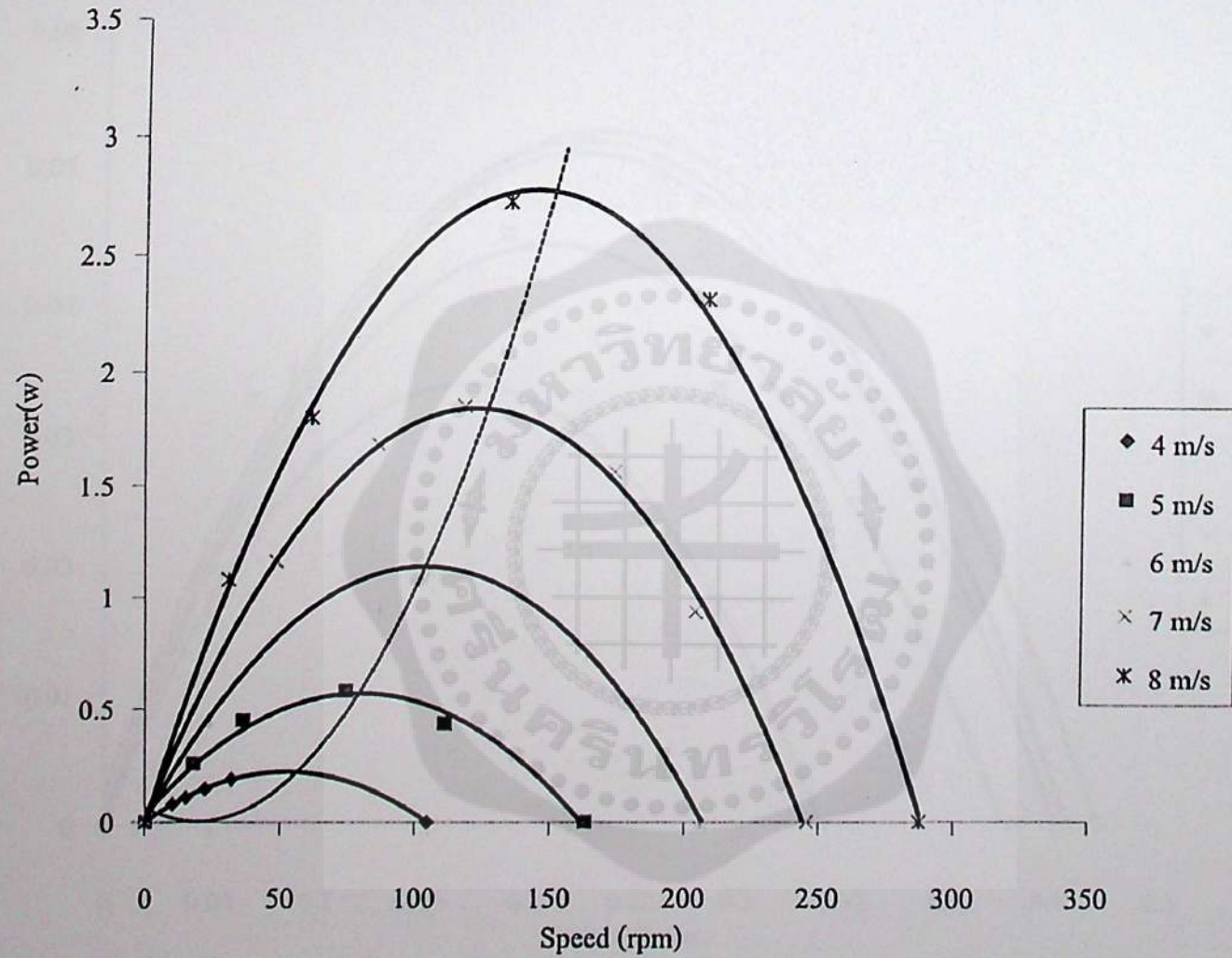
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Power Coefficient และ Speed Ratio ของใบพัด 2 ใบ $a/r = 0.3$

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองและการคำนวณของกังหันลมชนิด 2 ใบ $a/r = 0.4$

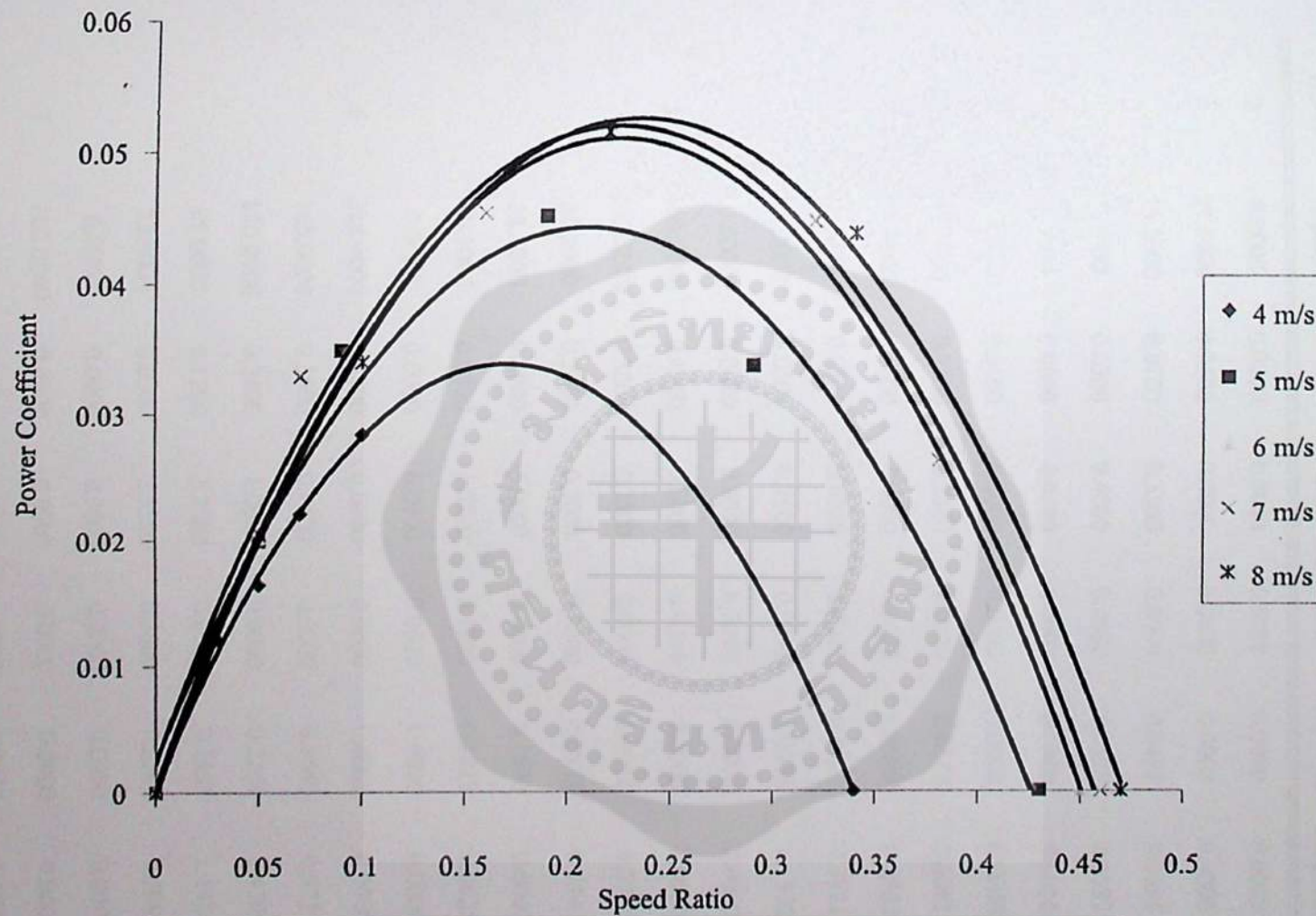
V (m/s)	N (rpm)	$\lambda =$ $2\pi rN/60V$	F_1 (N)	F_2 (N)	$T =$ $(F_1 - F_2)r$	$P =$ $2\pi rTN/60$	$C_p =$ $2P/\rho AV^3$
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	104.7000	0.3400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	31.9000	0.1000	0.4500	0.0000	0.0563	0.1879	0.0284
	22.3000	0.0700	0.5000	0.0000	0.0625	0.1459	0.0221
	15.1000	0.0500	0.5500	0.0000	0.0685	0.1083	0.0164
	10.2000	0.0300	0.6000	0.0000	0.0750	0.0801	0.0121
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	163.1000	0.4300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	111.0000	0.2900	0.3000	0.0000	0.0375	0.4359	0.0337
	74.2000	0.1900	0.6000	0.0000	0.0750	0.5828	0.0452
	36.2000	0.0900	0.9500	0.0000	0.1188	0.4502	0.0349
	17.9000	0.0500	1.1000	0.0000	0.1375	0.2577	0.0199
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	206.3000	0.4500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	165.3000	0.3600	0.3500	0.0000	0.0438	0.7573	0.0339
	105.2000	0.2300	0.8000	0.0000	0.1000	1.1017	0.0493
	46.9000	0.1000	1.4000	0.0500	0.1688	0.8288	0.0372
	22.9000	0.0500	1.6500	0.1500	0.1875	0.4496	0.0202
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	245.6000	0.4600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	207.8000	0.3400	0.8500	0.0000	0.1063	2.3121	0.0439
	134.5000	0.2200	1.7500	0.2000	0.1938	2.7995	0.0304
	61.1000	0.1000	2.600	0.3500	0.2813	1.7995	0.0304
	30.6000	0.0500	3.2000	0.5000	0.3375	1.0815	0.0205

V (m/s)	N (rpm)	$\lambda =$ $2\pi rN/60V$	F_1 (N)	F_2 (N)	$T =$ $(F_1 - F_2)r$	$P =$ $2\pi TN/60$	$C_p =$ $2P/\rho AV^3$
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	287.2000	0.4700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	207.8000	0.3400	0.8500	0.0000	0.1063	2.3121	0.0439
	134.5000	0.2200	1.7500	0.2000	0.1938	2.7289	0.0516
	61.1000	0.1000	2.6000	0.3500	0.2813	1.7995	0.0304
	30.6000	0.0500	3.2000	0.5000	0.3375	1.0815	0.0205
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000





รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 2 ใบ $a/r = 0.4$

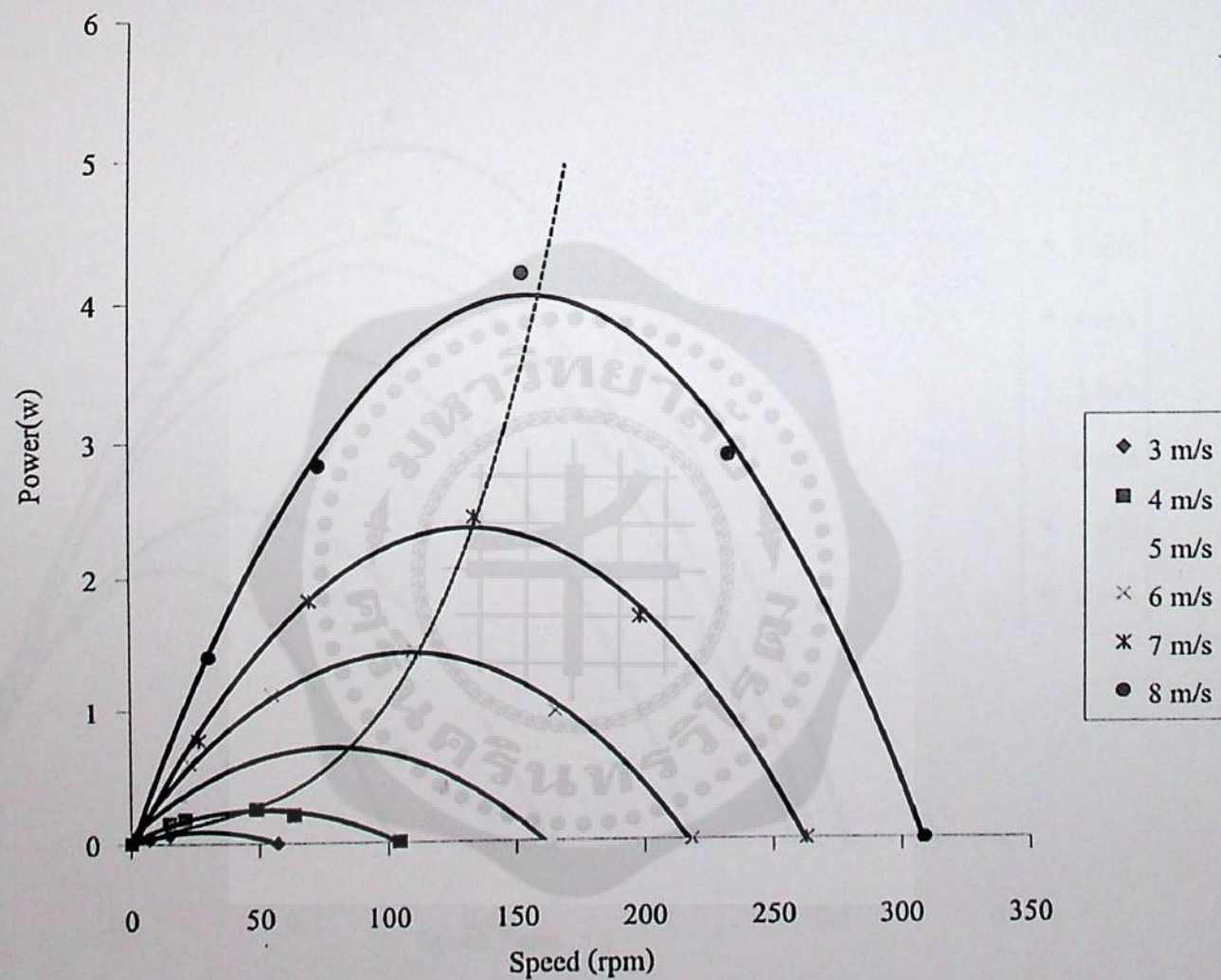


รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Power Coefficient และ Speed Ratio ของใบพัด 2 ใบ $a/r = 0.4$

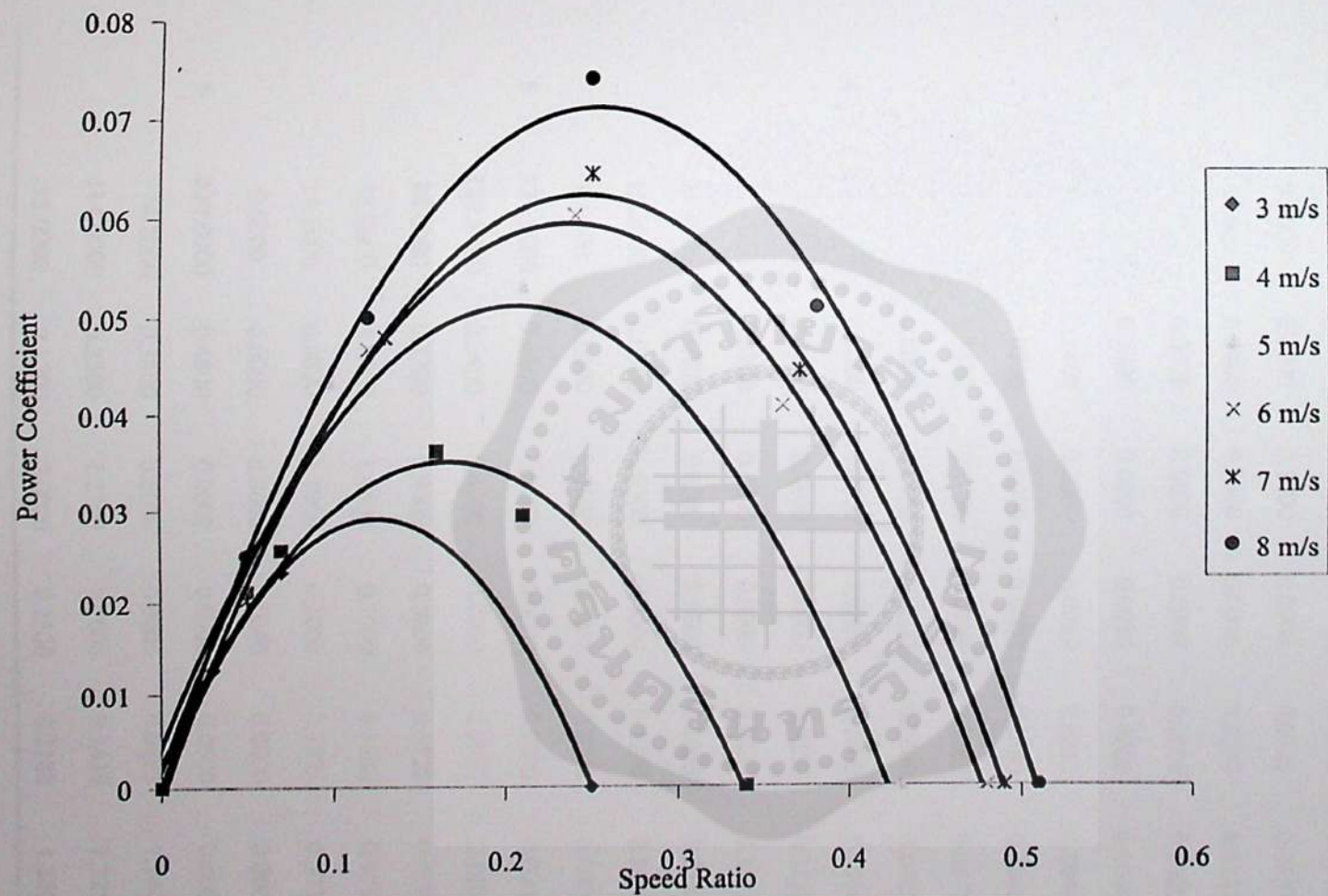
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองและการคำนวณของกังหันลมชนิด 2 ใบ $a/r = 0.5$

V	N	$\lambda =$	F_1	F_2	T =	P =	$C_p =$
(m/s)	(rpm)	$2\pi rN/60V$	(N)	(N)	$(F_1 - F_2)r$	$2\pi TN/60$	$2P/\rho AV^3$
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	57.1000	0.2500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	15.2000	0.0700	0.3500	0.0000	0.0438	0.0696	0.0255
	7.3000	0.0300	0.4000	0.0000	0.0500	0.0382	0.0127
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	104.5000	0.3400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	63.6000	0.2100	0.2500	0.0000	0.0313	0.2081	0.0294
	48.9000	0.1600	0.4000	0.0000	0.05000	0.2560	0.0294
	21.4000	0.0700	0.6500	0.0000	0.0813	0.1821	0.0212
	15.3000	0.0500	0.7500	0.0000	0.0938	0.1502	0.0212
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	163.5000	0.4300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	122.2000	0.3200	0.2500	0.0000	0.0313	0.3999	0.0289
	80.2000	0.2100	0.7000	0.0000	0.0875	0.7249	0.0531
	38.2000	0.1000	1.2000	0.0000	0.1500	0.6000	0.0434
	19.1000	0.0500	1.5500	0.1000	0.1813	0.3625	0.0262
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	218.0000	0.4800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	165.0000	0.3600	0.4500	0.0000	0.0563	0.9719	0.0407
	110.0000	0.2400	1.0000	0.0000	0.1250	1.4399	0.0603
	55.0000	0.1200	1.7500	0.2000	0.1938	1.1159	0.0467
	22.9000	0.0500	2.3500	0.3500	0.2500	0.5995	0.0251
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	262.6000	0.4900	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	197.9000	0.3700	0.6500	0.0000	0.0813	1.6838	0.0444

V	N	λ	=	F ₁	F ₂	T =	P =	C _p =
(m/s)	(rpm)	$2\pi rN/60V$		(N)	(N)	(F ₁ - F ₂)r	$2\pi TN/60$	$2P/\rho AV^3$
	133.7000	0.2500		1.6000	0.2000	0.1748	2.4474	0.0645
7	69.5000	0.1300		2.3500	0.3500	0.2500	1.8195	0.0479
	26.7000	0.0500		2.3500	1.0500	0.2750	0.7689	0.0203
	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	308.7000	0.5100		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	232.2000	0.3800		1.0000	0.0500	0.1188	2.8875	0.0510
	152.8000	0.2500		2.4500	0.3500	0.2625	4.2003	0.0742
	73.3000	0.1200		3.5500	0.6000	0.3688	2.8305	0.0500
	30.6000	0.0500		4.3500	0.8500	0.4375	1.4019	0.0251
	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000



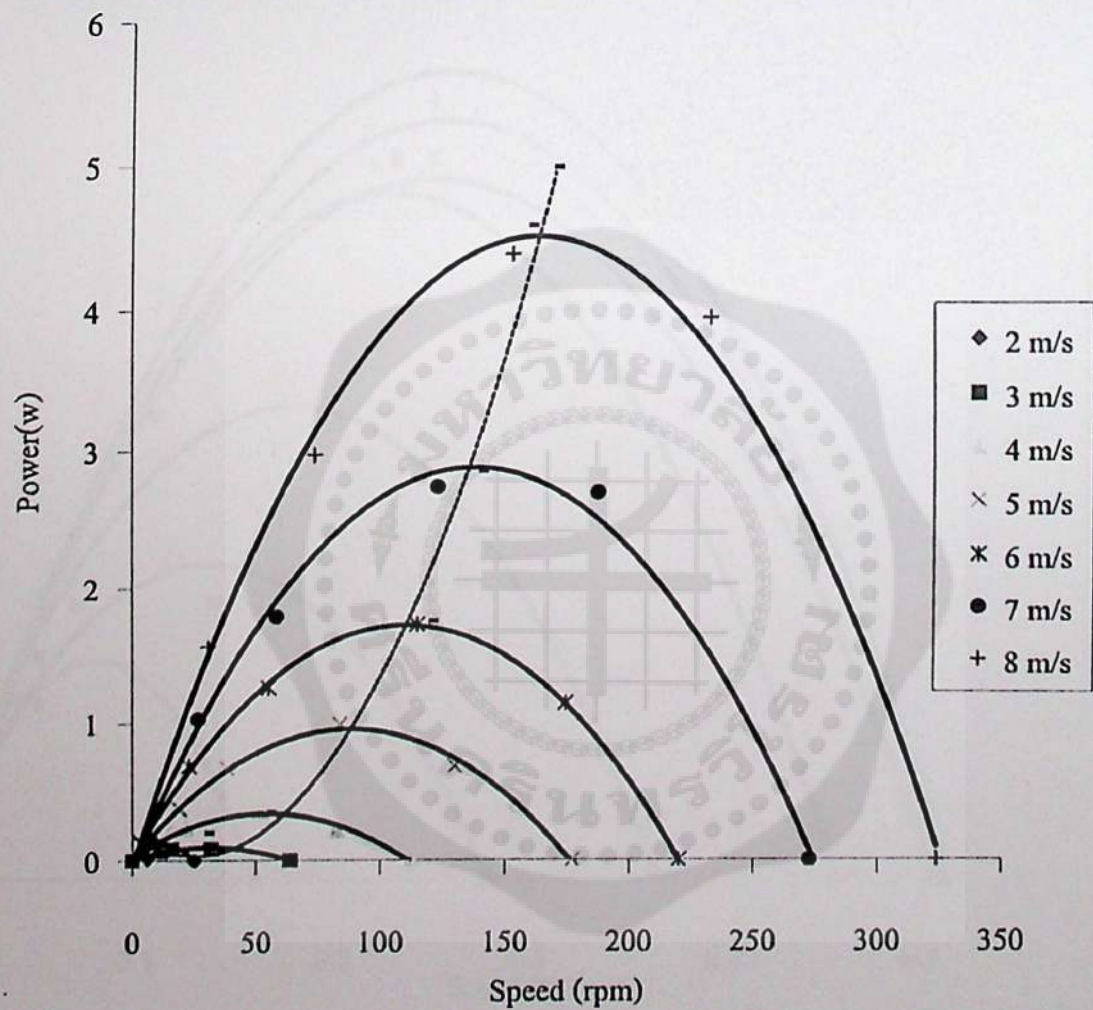
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 2 ใบ $a/r = 0.5$



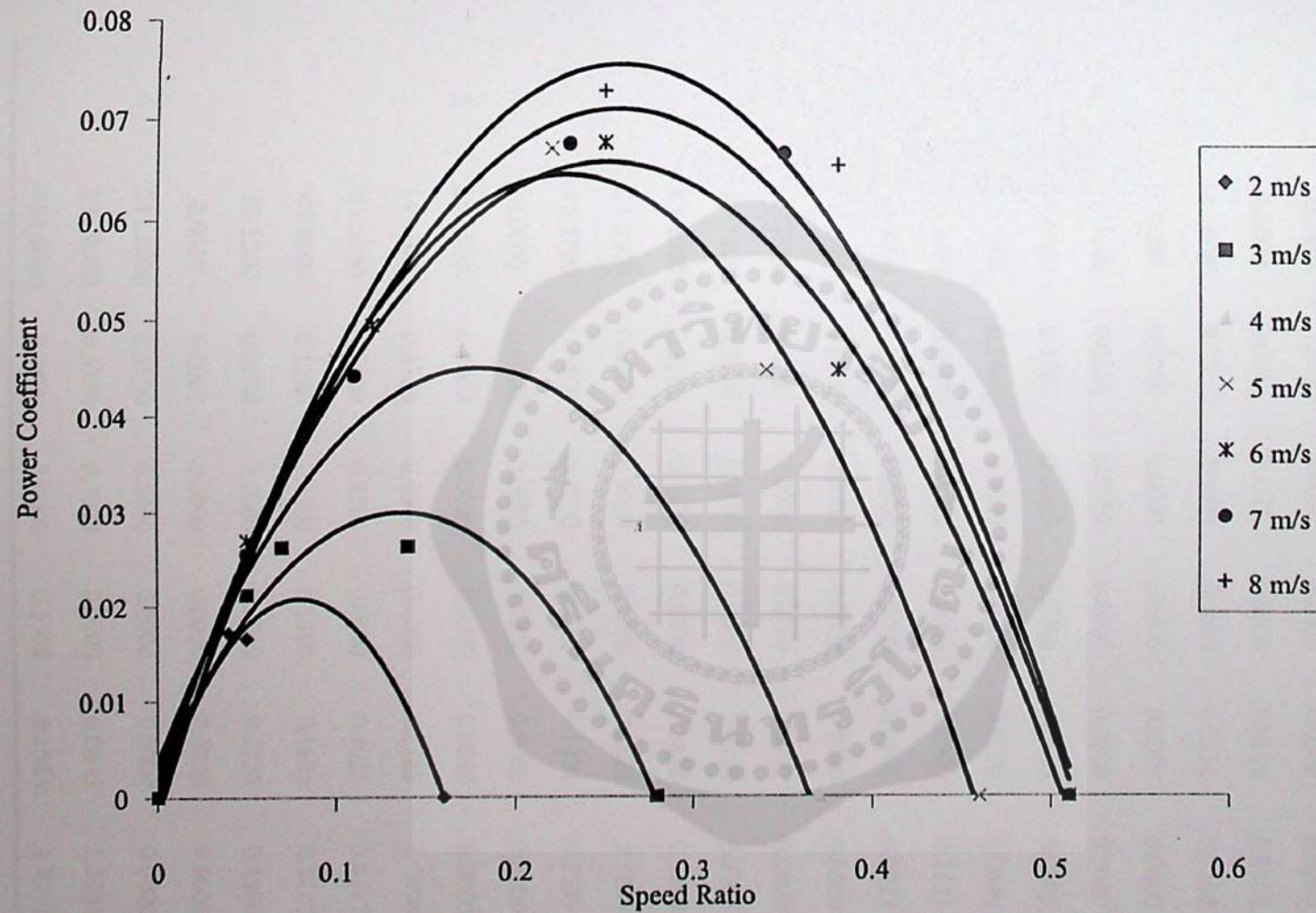
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Power Coefficient และ Speed Ratio ของใบพัด 2 ใบ $a/r = 0.5$

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองและการคำนวณของกังหันลมชนิด 2 ใบ $a/r = 0.6$

V (m/s)	N (rpm)	$\lambda =$ $2\pi rN/60V$	F_1 (N)	F_2 (N)	T = $(F_1 - F_2)r$	P = $2\pi TN/60$	$C_p =$ $2P/\rho AV^3$
2	25.1000	0.1600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	8.0000	0.0500	0.1500	0.0000	0.0188	0.0157	0.0166
	6.2000	0.0400	0.2000	0.0000	0.0250	0.0162	0.0172
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	63.9000	0.2800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	32.1000	0.1400	0.2000	0.0000	0.0250	0.0840	0.0264
	16.0000	0.0700	0.4000	0.0000	0.0500	0.0840	0.0264
	11.5000	0.0500	0.4500	0.0000	0.0563	0.0677	0.0212
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	112.6000	0.3700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	82.5000	0.2700	0.2000	0.0000	0.0250	0.2159	0.0286
	51.9000	0.1700	0.5000	0.0000	0.0625	0.3533	0.0468
	21.4000	0.0700	0.8500	0.0000	0.1063	0.2381	0.0315
	15.3000	0.0500	1.0000	0.0000	0.1250	0.2003	0.0265
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	177.2000	0.4600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	129.9000	0.3400	0.4000	0.0000	0.0500	0.6802	0.0412
	84.0000	0.2200	0.9000	0.0000	0.1125	0.9896	0.0671
	38.2000	0.1000	1.4500	0.1000	0.1688	0.6750	0.0458
	19.1000	0.0500	1.7000	0.2000	0.1875	0.3750	0.0254
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	220.0000	0.4800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	174.2000	0.3800	0.5000	0.0000	0.0625	1.1401	0.0447
	114.6000	0.2500	1.2500	0.1000	0.1438	1.7251	0.0677
	55.0000	0.1200	2.0000	0.2500	0.2188	1.2599	0.0494



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 2 ใบ $a/r = 0.6$

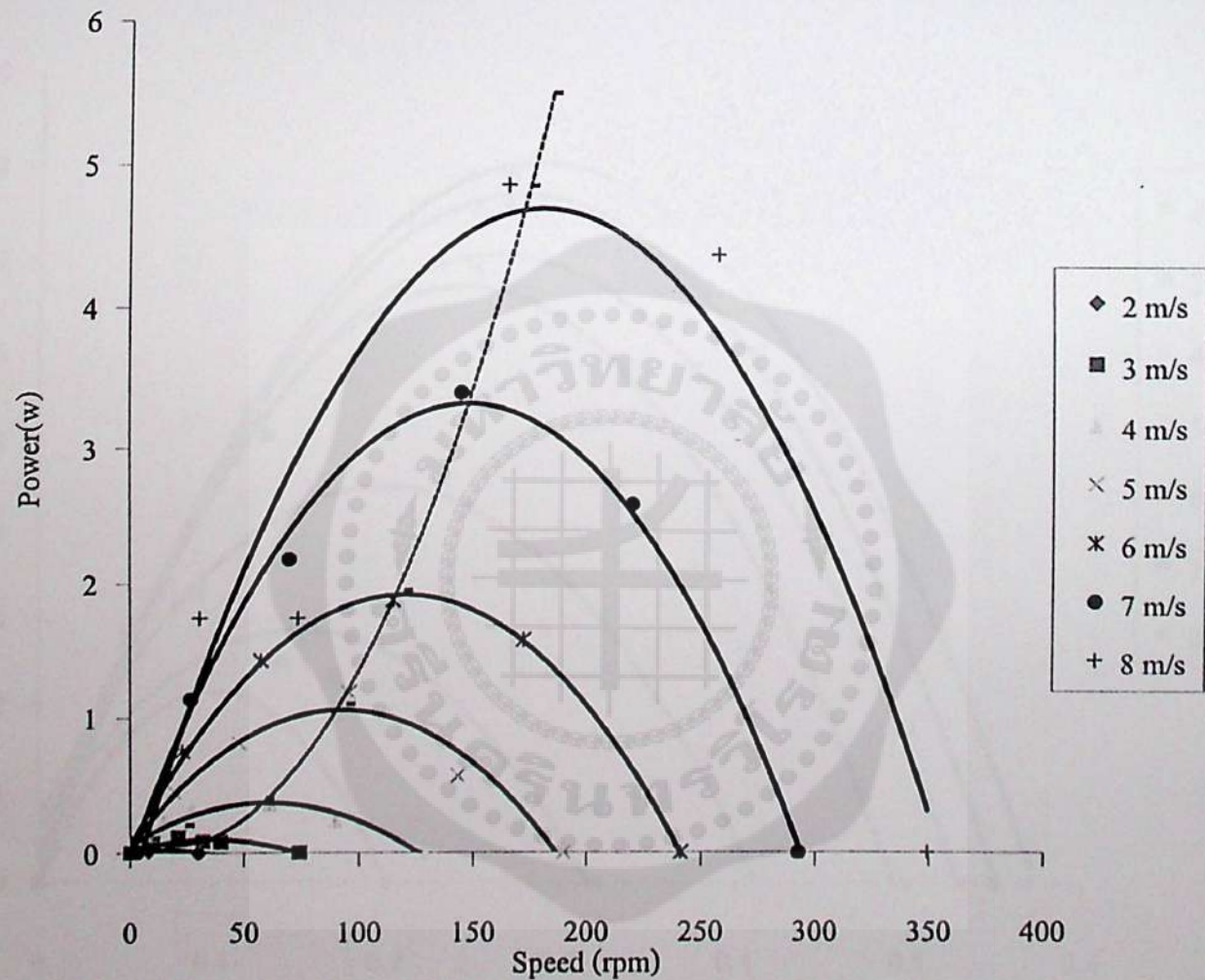


รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Power Coefficient และ Speed Ratio ของใบพัด 2 ใบ $a/r = 0.6$

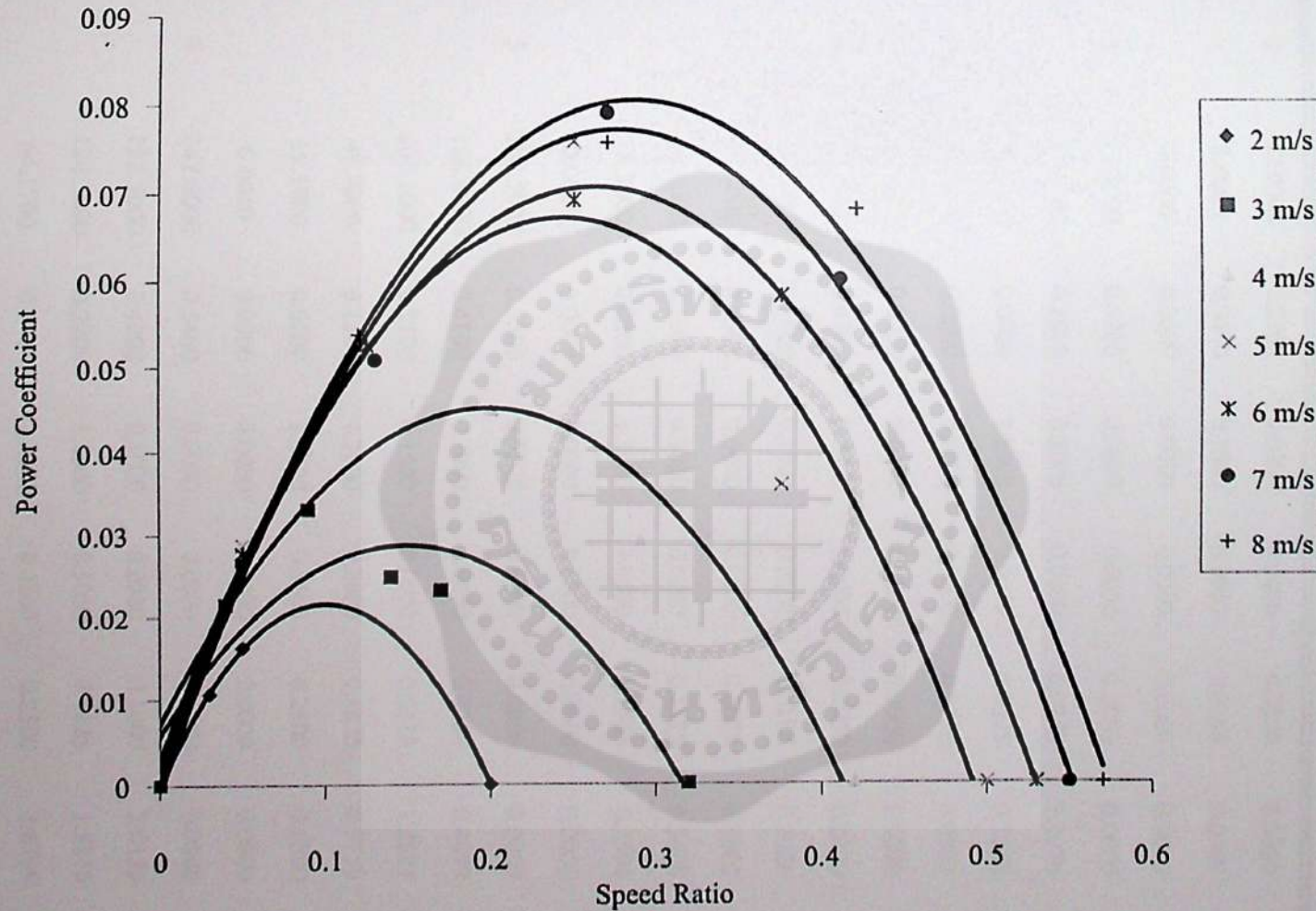
ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดลองและการคำนวณของกังหันลมชนิด 2 ใบ $a/r = 0.7$

V (m/s)	N (rpm)	$\lambda =$ $2\pi rN/60V$	F_1 (N)	F_2 (N)	$T =$ $(F_1 - F_2)r$	$P =$ $2\pi TN/60$	$C_p =$ $2P/\rho AV^3$
2	30.1000	0.2000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	8.3000	0.0500	0.1500	0.0000	0.0188	0.0163	0.0163
	4.1000	0.0300	0.2000	0.0000	0.0250	0.0107	0.0107
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	74.4000	0.0320	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	40.0000	0.1700	0.1500	0.0000	0.0188	0.0785	0.0232
	32.1000	0.1400	0.2000	0.0000	0.0250	0.0840	0.0248
	21.4000	0.0900	0.4000	0.0000	0.0500	0.1121	0.0331
	10.1000	0.0400	0.5500	0.0000	0.0688	0.0727	0.0215
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	128.2000	0.4200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	89.7000	0.2900	0.2000	0.0000	0.0250	0.2348	0.0293
	61.1000	0.2000	0.4500	0.0000	0.5630	0.3599	0.449
	21.5000	0.0900	0.9000	0.0000	0.1125	0.3239	0.0404
	15.2700	0.0500	1.2000	0.0500	0.1438	0.2299	0.0287
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	189.8000	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	143.2000	0.3750	0.3000	0.0000	0.1188	1.1876	0.0758
	95.5000	0.2500	0.9500	0.0000	0.1625	0.8117	0.0518
	47.7000	0.1250	1.4500	0.1500	0.1625	0.8117	0.0518
	19.1000	0.0500	2.1000	0.3000	0.2255	0.4500	0.0287
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	241.2000	0.5800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	171.9000	0.3750	0.7000	0.0000	0.0875	1.5751	0.0582
	114.6000	0.2500	1.4000	0.1500	0.1563	1.8751	0.0692

V	N	λ	=	F_1	F_2	T=	P=	C_p =
(m/s)	(rpm)	$2\pi r N/60V$		(N)	(N)	$(F_1 - F_2)r$	$2\pi T N/60$	$2P/\rho A V^3$
6	57.3000	0.1250		2.2500	0.3500	0.2375	1.4251	0.0526
	22.9000	0.0500		3.1000	0.6000	0.3125	0.7494	0.0277
	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	292.8000	0.5500		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	219.3000	0.4100		0.9500	0.0500	0.1125	2.5836	0.0600
	144.4000	0.2700		2.1000	0.3000	0.2250	3.4023	0.0791
8	69.5000	0.1300		2.9000	0.5000	0.3000	2.1834	0.5080
	26.7000	0.0500		4.1000	0.8500	0.4063	1.1358	0.0264
	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	349.3000	0.5700		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	256.7000	0.4200		1.4500	0.1500	0.1625	4.3683	0.0681
	165.0000	0.2700		2.7000	0.4500	0.2813	4.8596	0.0757
	73.3000	0.1200		4.5000	0.9000	0.4500	3.4542	0.0538
	30.6000	0.0500		5.4500	1.1000	0.5438	1.7426	0.0271
	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000



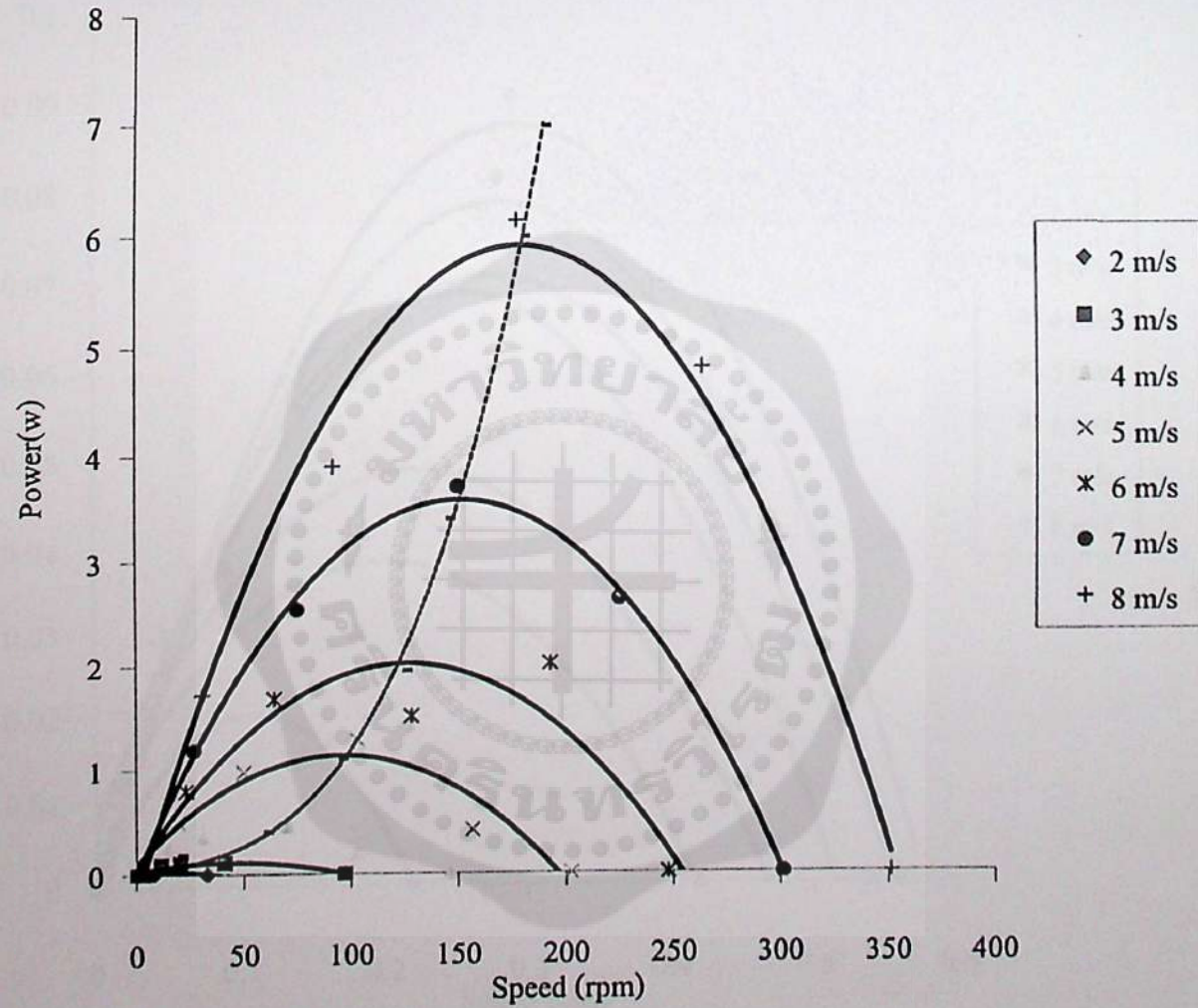
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 2 ใบ $a/r = 0.7$



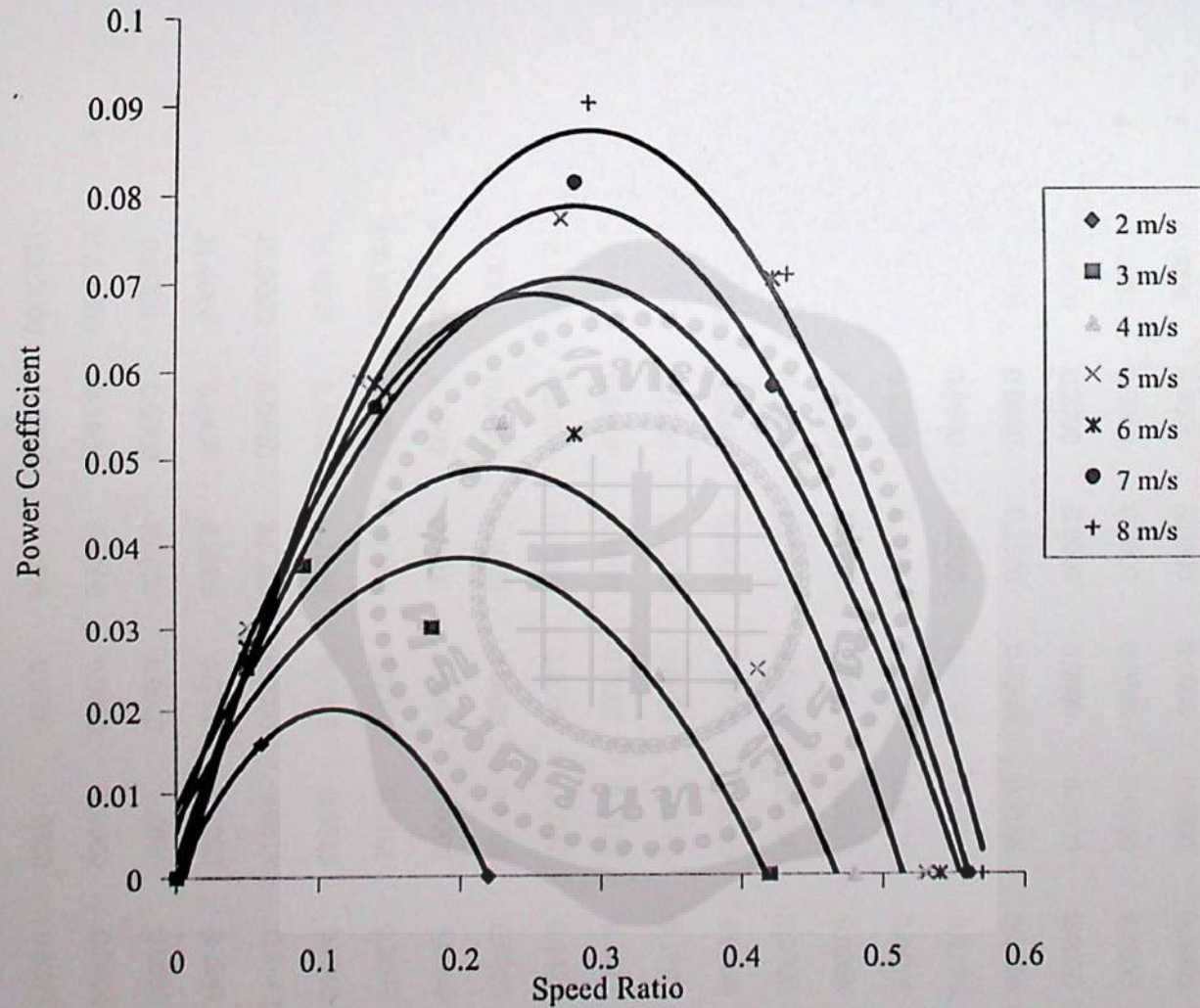
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Power Coefficient และ Speed Ratio ของใบพัด 2 ใบ $a/r = 0.7$

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดลองและการคำนวณของกังหันลมชนิด 2 ใบ $a/r = 0.8$

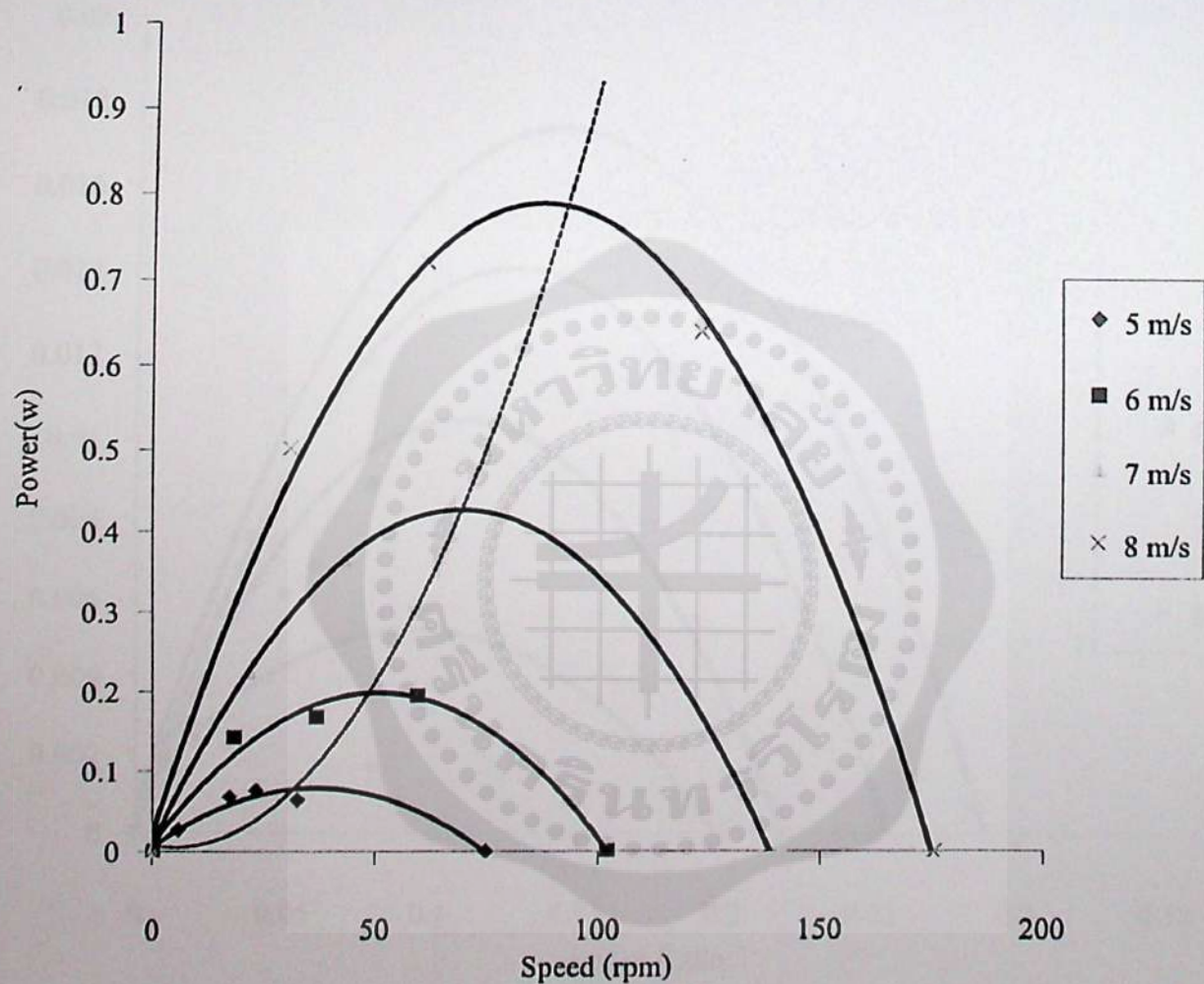
V (m/s)	N (rpm)	$\lambda = \frac{2\pi r N}{60V}$	F_1 (N)	F_2 (N)	$T = (F_1 - F_2)r$	$P = \frac{2\pi T N}{60}$	$C_p = \frac{2P}{\rho A V^3}$
2	32.9000	0.2200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	8.6000	0.0600	0.1500	0.0000	0.0188	0.0169	0.0159
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	97.3000	0.4200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	41.1000	0.1800	0.2000	0.0000	0.0250	0.1076	0.1013
	20.6000	0.0900	0.5000	0.0000	0.0625	0.1348	0.0376
	11.5000	0.0500	0.6000	0.0000	0.0750	0.0903	0.0252
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	146.6000	0.4800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	103.2000	0.3400	0.1500	0.0000	0.0188	0.2026	0.0239
	70.3000	0.2300	0.5000	0.0000	0.0625	0.4601	0.0542
	30.6000	0.1000	0.9000	0.0000	0.1125	0.3605	0.0424
	15.3000	0.0500	1.3000	0.0500	0.1563	0.2504	0.0295
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	202.5000	0.5300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	156.6000	0.4100	0.2000	0.0000	0.0250	0.4099	0.0247
	103.1000	0.2700	0.1500	0.0000	0.0119	1.2821	0.0773
	49.7000	0.1300	1.7000	0.2000	0.1875	0.9759	0.0588
	19.1000	0.0500	2.3500	0.3500	0.2500	0.5000	0.0301
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	247.5000	0.5400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	192.5000	0.4200	0.8000	0.0000	0.1000	2.0159	0.0703
	128.3000	0.2800	1.4000	0.5000	0.1125	1.5115	0.0527
	64.1700	0.1400	2.3500	0.3500	0.2500	1.6799	0.0586
	22.9000	0.0500	3.2500	0.6000	0.3313	0.7944	0.0277



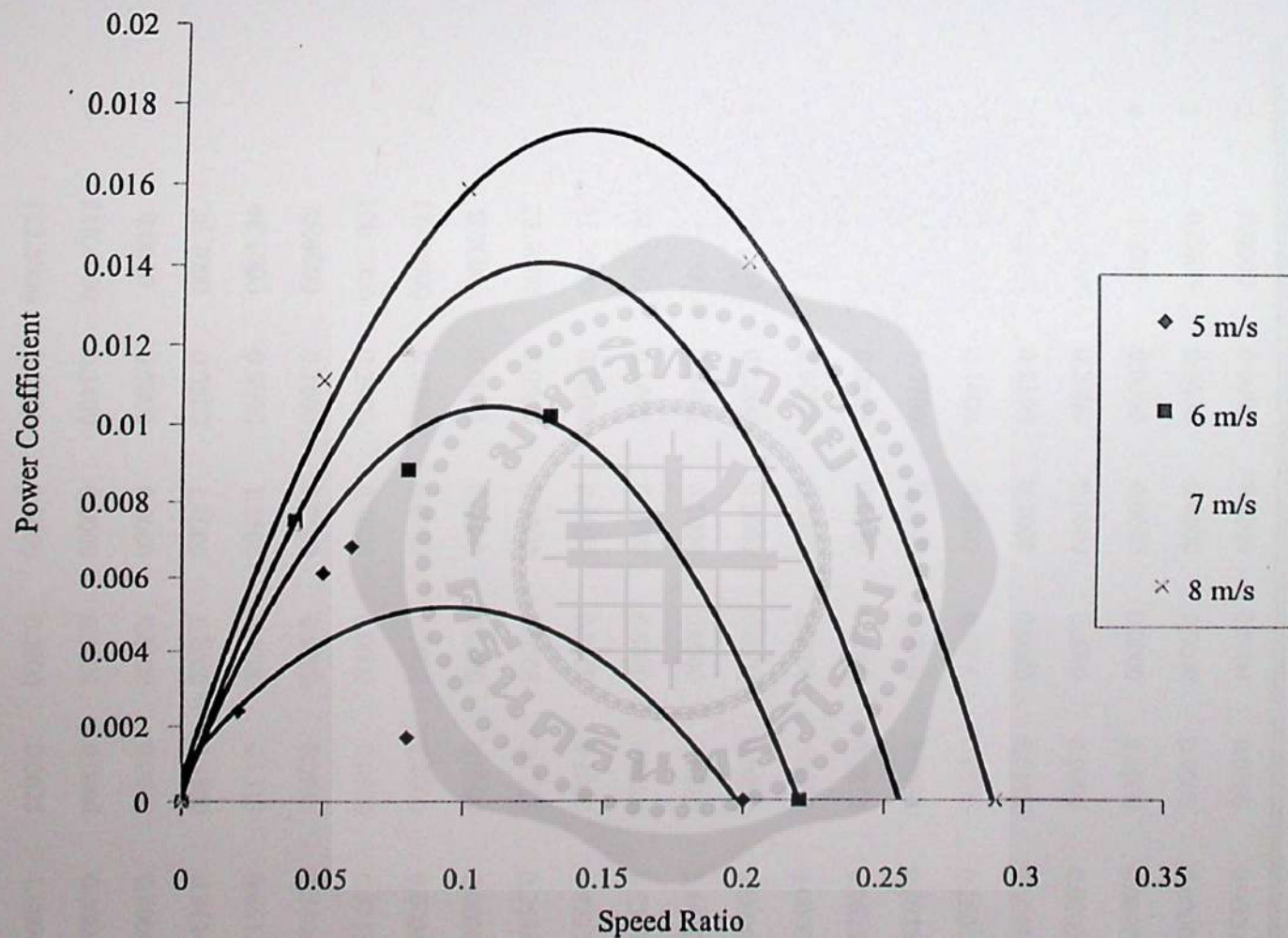
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 2 ใบ $a/r = 0.8$



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Power Coefficient กับ Speed Ratio ของใบพัด 2 ใบ $a/r = 0.8$



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) กับ (N) ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.2$



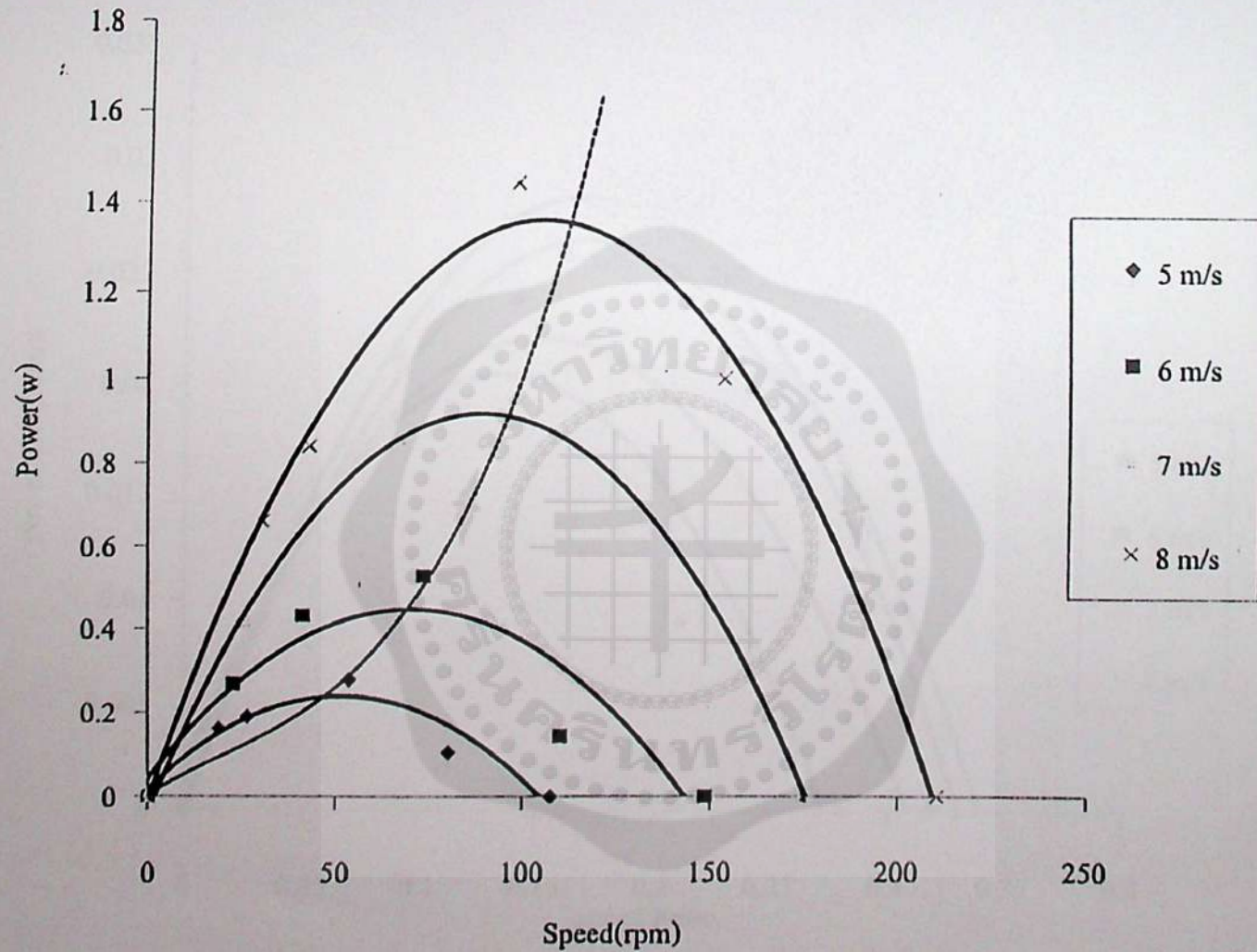
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Power Coefficient กับ Speed Ratio ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.2$

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดลองและการคำนวณของกังหันลมชนิด 3 ใบ $a/r = 0.3$

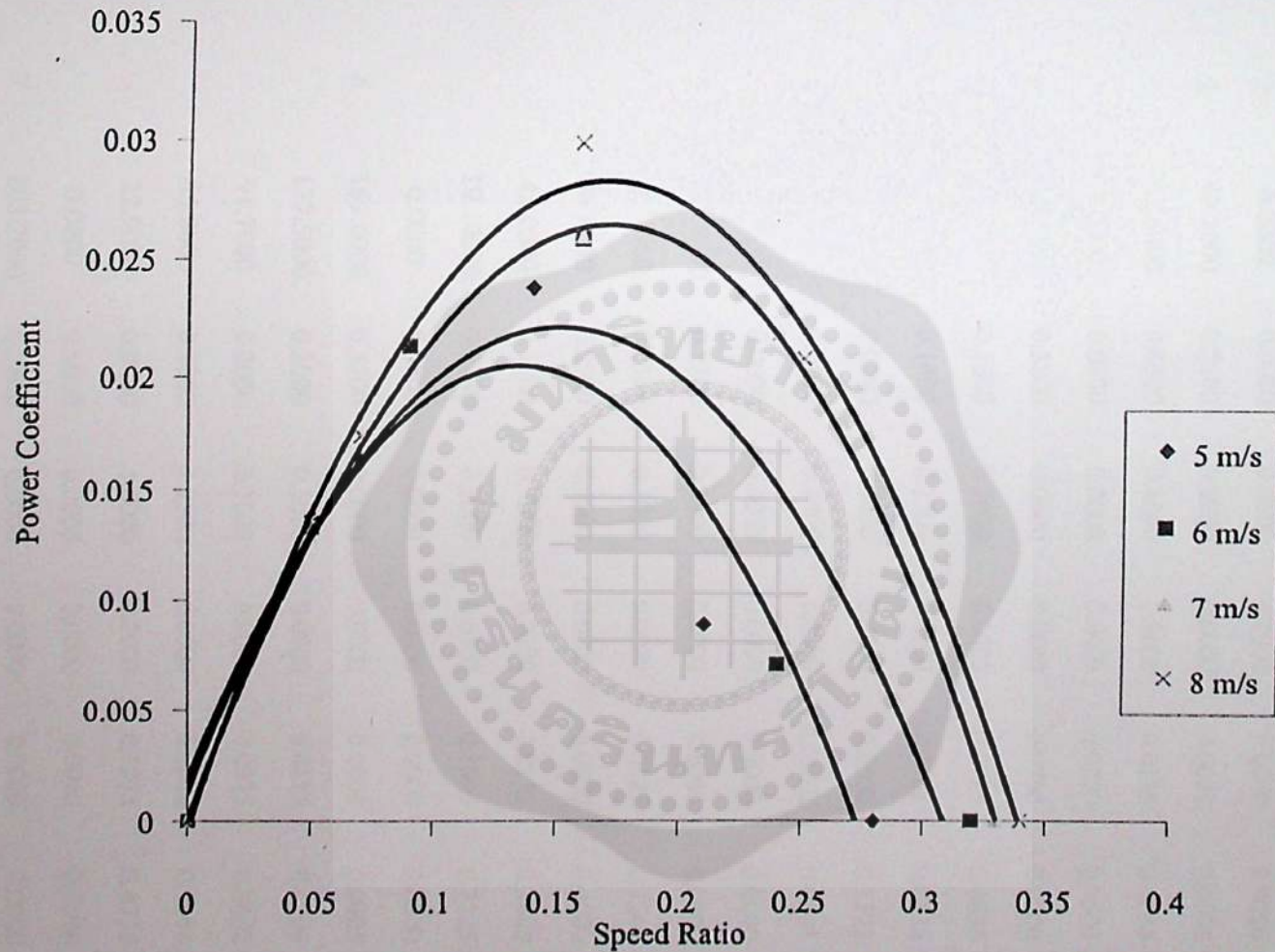
V (m/s)	N (rpm)	$\lambda =$ $2\pi N/60V$	F_1 (N)	F_2 (N)	T= $(F_1 - F_2)r$	P= $2\pi TN/60$	$C_p =$ $2P/\rho A V^3$
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	107.5000	0.2800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	80.2000	0.2100	0.1000	0.0000	0.0125	0.1049	0.0089
	53.5000	0.1400	0.4000	0.0000	0.0500	0.2801	0.0238
	26.7000	0.0700	0.5500	0.0000	0.0688	0.1922	0.0163
	19.1000	0.0500	0.6500	0.0000	0.0813	0.1625	0.0138
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	148.7000	0.3200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	110.000	0.2400	0.1000	0.0000	0.0125	0.1439	0.0071
	73.3000	0.1600	0.5500	0.0000	0.0688	0.5277	0.0259
	41.3000	0.0900	0.8000	0.0000	0.1000	0.4325	0.0213
	22.9000	0.0500	0.9500	0.0500	0.1125	0.2698	0.0133
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	174.6000	0.3300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	128.3000	0.2400	0.4000	0.0000	0.0500	0.6718	0.0219
	85.6000	0.1600	0.7500	0.0000	0.0938	0.8408	0.0260
	48.1000	0.0900	1.1500	0.1000	0.1313	0.6611	0.0205
	26.7000	0.0500	1.4000	0.2000	0.1500	0.4194	0.0129
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	210.4000	0.3400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	125.8000	0.2500	0.5000	0.0000	0.0625	1.0000	0.0208
	97.8000	0.1600	1.3000	0.1000	0.1500	1.4419	0.0299
	42.8000	0.0700	1.7500	0.2500	0.1875	0.8404	0.0174
	30.6000	0.0500	2.0000	0.3500	0.2065	0.6609	0.0137

V	N	$\lambda =$	F_1	F_2	$T =$	$P =$	$C_p =$
(m/s)	(rpm)	$2rN/60V$	(N)	(N)	$(F_1 - F_2)r$	$2\pi TN/60$	$2P/\rho AV^3$
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000





รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) กับ (N) ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.3$



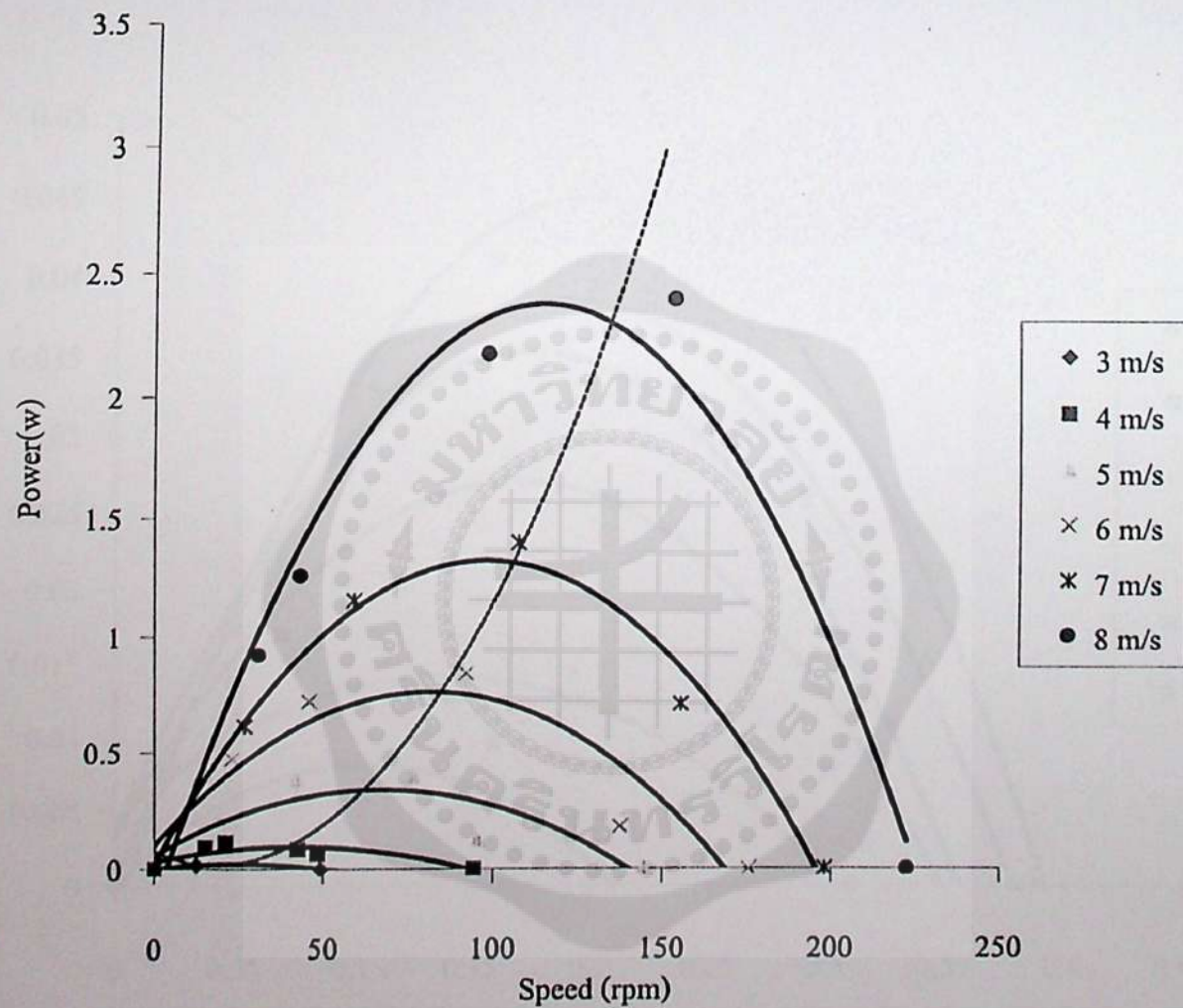
รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Power Coefficient กับ Speed Ratio ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.3$

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดลองและการคำนวณของกังหันลมชนิด 3 ใบ $a/r = 0.4$

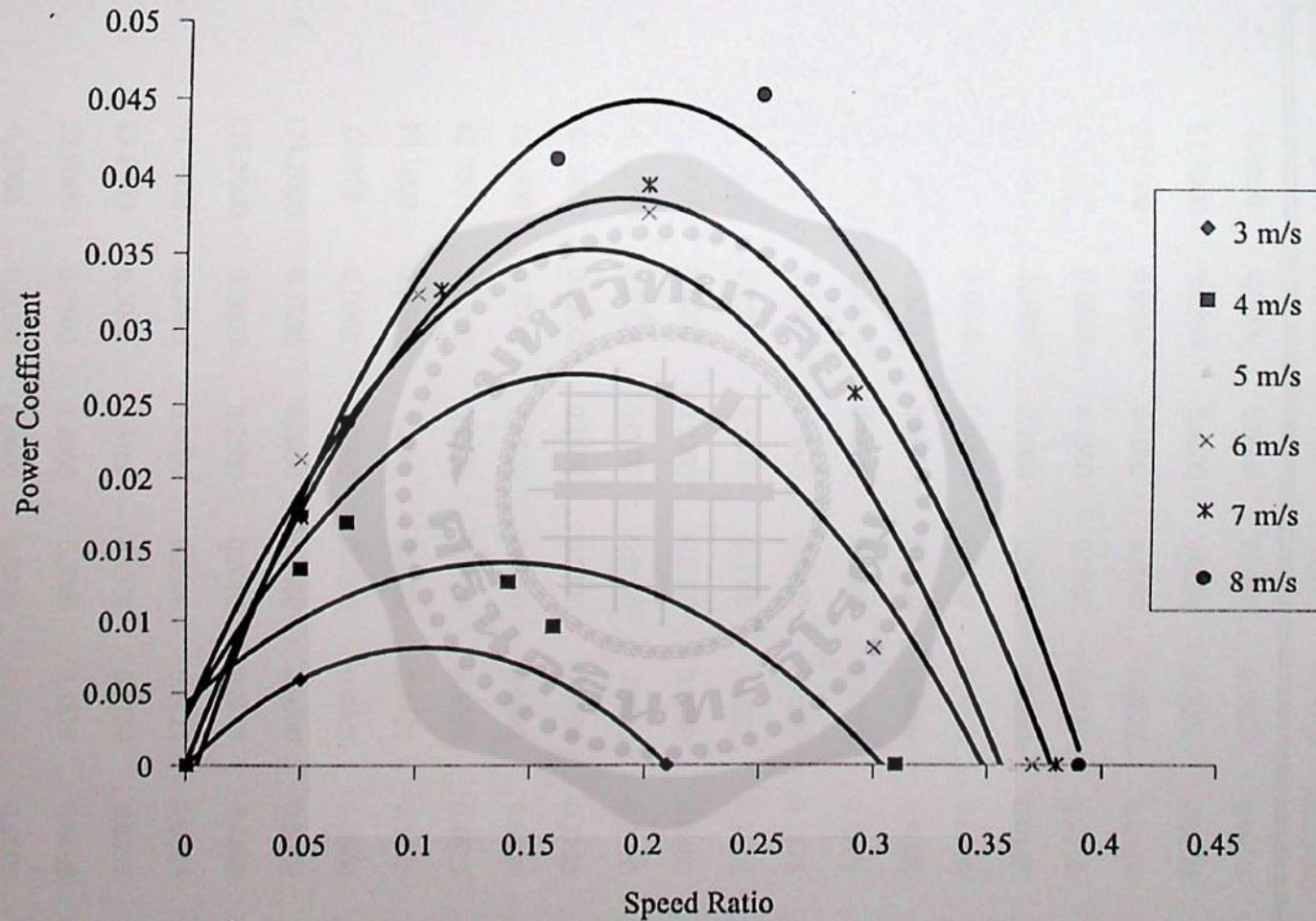
V (m/s)	N (rpm)	$\lambda =$ $2\pi N/60V$	F_1 (N)	F_2 (N)	$T =$ $(F_1 - F_2)r$	$P =$ $2\pi TN/60$	$C_p =$ $2P/\rho A V^3$
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	49.2000	0.2100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	12.6000	0.0500	0.1000	0.0000	0.0125	0.0634	0.0096
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	94.3000	0.3100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	48.4000	0.1600	0.1000	0.0000	0.0125	0.0634	0.0096
	42.6000	0.1400	0.1500	0.0000	0.0188	0.0836	0.0127
	21.4000	0.0700	0.4000	0.0000	0.0500	0.1121	0.0169
	15.3000	0.0500	0.4500	0.0000	0.05625	0.0901	0.0136
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	137.5000	0.3600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	95.4000	0.2500	0.1000	0.0000	0.0125	0.1249	0.0097
	76.4000	0.2000	0.4000	0.0000	0.0500	0.4000	0.0309
	42.0000	0.1100	0.7000	0.0000	0.0875	0.3848	0.0298
	19.10000	0.0500	0.9000	0.0500	0.1065	0.2125	0.0165
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	169.6000	0.3700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	137.5000	0.3000	0.1000	0.0000	0.0125	0.1799	0.0081
	91.7000	0.2000	0.7000	0.0000	0.0875	0.8402	0.0377
	45.8000	0.1000	1.2500	0.0500	0.1500	0.7194	0.0323
	22.9000	0.0500	1.6000	0.2000	0.1975	0.4736	0.0212
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	203.2000	0.3800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	155.1000	0.2900	0.4500	0.0000	0.0563	0.9136	0.0258
	106.9000	0.2000	1.0500	0.0500	0.1250	1.3993	0.0395
	58.8000	0.1100	1.7000	0.2000	0.1875	1.1545	0.0326
	26.7000	0.0500	2.1000	0.3500	0.2188	0.6116	0.0173

V (m/s)	N (rpm)	$\lambda =$ $2\pi N/60V$	F_1 (N)	F_2 (N)	$T =$ $(F_1 - F_2)r$	$P =$ $2\pi TN/60$	$C_p =$ $2P/\rho A V^3$
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	238.4000	0.3900	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	152.8000	1.3000	0.1000	0.1500	2.4002	0.0454	0.2500
	97.8000	0.1600	2.0000	0.3000	0.2125	2.1763	0.0412
	42.8000	0.0700	2.7500	0.5000	0.2813	1.2606	0.0238
	30.6000	0.0500	2.8000	0.5000	0.2875	0.9213	0.0174
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000





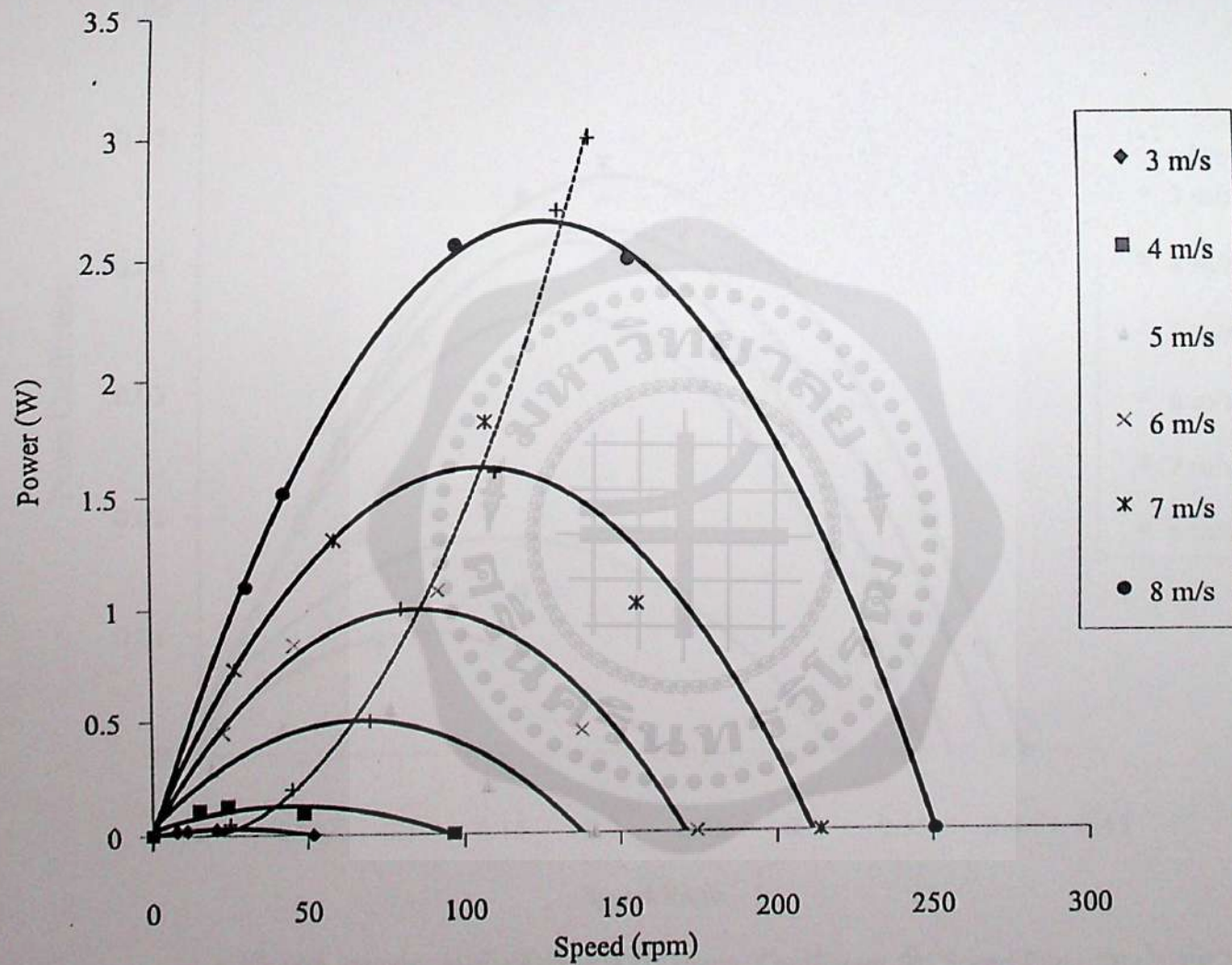
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) กับ (N) ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.4$



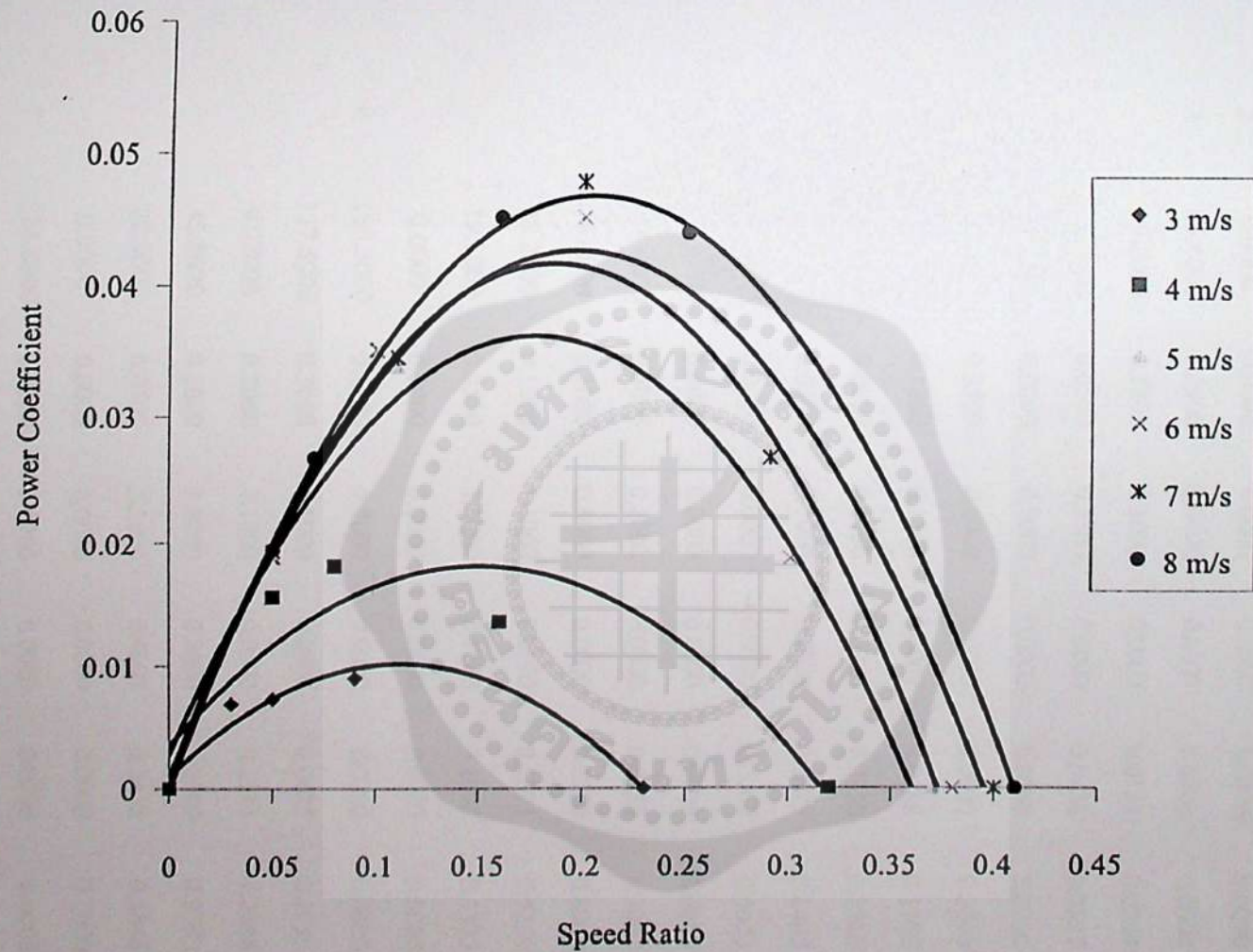
รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Power Coefficient กับ Speed Ratio ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.4$

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดลองและการคำนวณของกังหันลมชนิด 3 ใบ $a/r = 0.5$

V	N	λ	=	F_1	F_2	T=	P=	$C_p =$
(m/s)	(rpm)	$2rN/60V$		(N)	(N)	$(F_1 - F_2)r$	$2\pi TN/60$	$2P/\rho AV^3$
2	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	51.8000	0.2300		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	20.6000	0.0900		0.1000	0.0000	0.0125	0.0269	0.0090
	11.2000	0.0500		0.1500	0.0000	0.0188	0.0219	0.00730
	7.9000	0.0300		0.2000	0.0000	0.0250	0.0207	0.0069
	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	96.8000	0.3200		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	48.9000	0.1600		0.1500	0.0000	0.0188	0.0960	0.0136
	24.4000	0.0800		0.4000	0.0000	0.0500	0.1278	0.0181
	15.3000	0.0500		0.5500	0.0000	0.0687	0.1102	0.0156
	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	141.3000	0.3700		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	107.2000	0.2800		0.1500	0.0000	0.0188	0.2105	0.0152
	76.4000	0.2000		0.5500	0.0000	0.0688	0.5500	0.0398
	42.0000	0.1100		0.8500	0.0000	0.1063	0.4673	0.0388
	19.1000	0.0500		1.200	0.0500	0.1438	0.2875	0.0208
	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	174.2000	0.3800		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	137.5000	0.3000		0.2500	0.0000	0.0313	0.4499	0.0188
	91.7000	0.2000		0.9000	0.0000	0.1125	1.0803	0.0452
	45.8000	0.1000		1.5500	0.1500	0.1750	0.8393	0.0351
	22.9000	0.0500		1.8000	0.3000	0.1875	0.4496	0.0188
	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	213.9000	0.4000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	155.1000	0.2900		0.5000	0.0000	0.0625	1.0151	0.0268
	106.9000	0.2000		1.4000	0.1000	0.165	1.8191	0.0479
	58.8000	0.1100		2.0000	0.3000	0.2125	1.3085	0.0345



รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) กับ (N) ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.5$

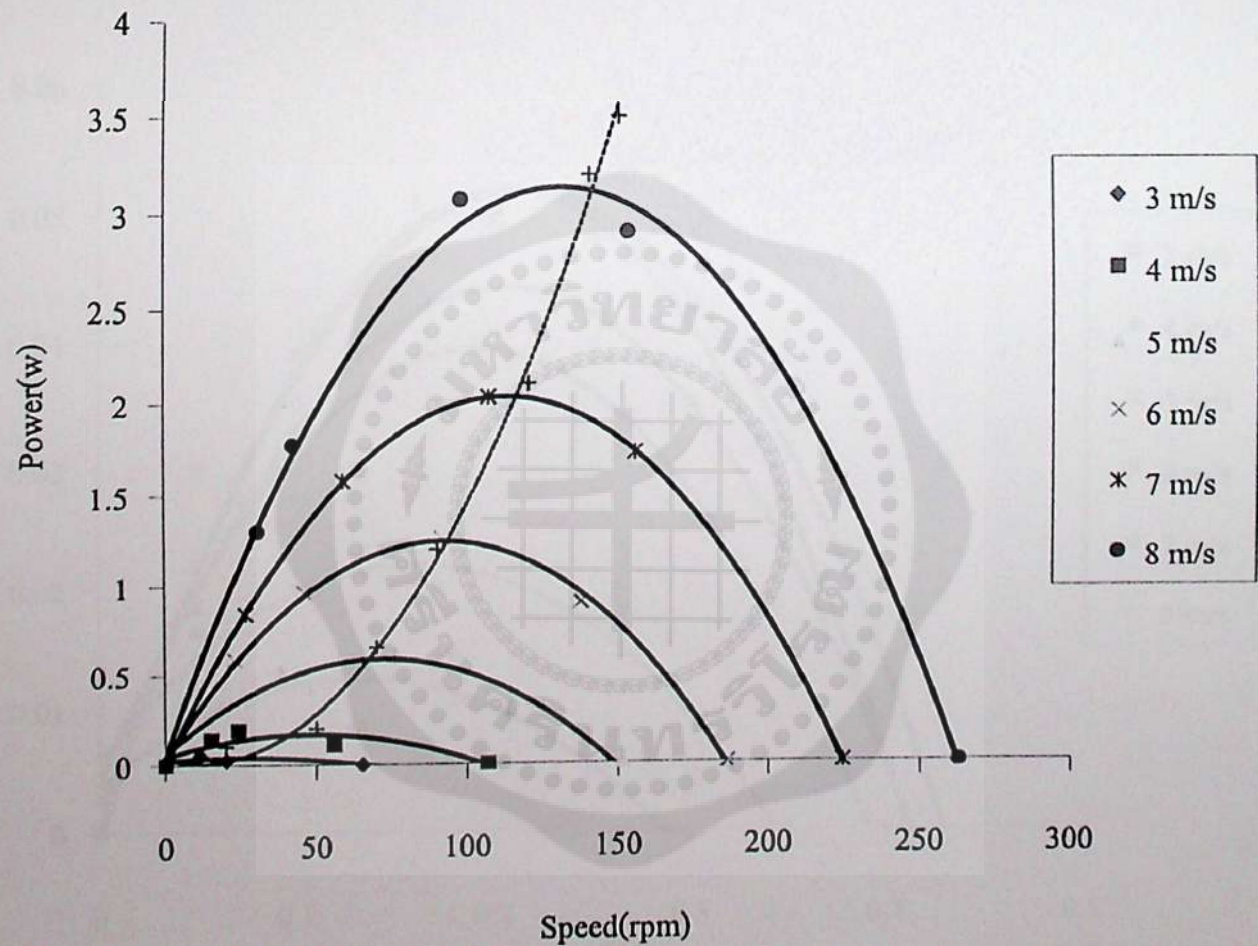


รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Power Coefficient กับ Speed Ratio ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.5$

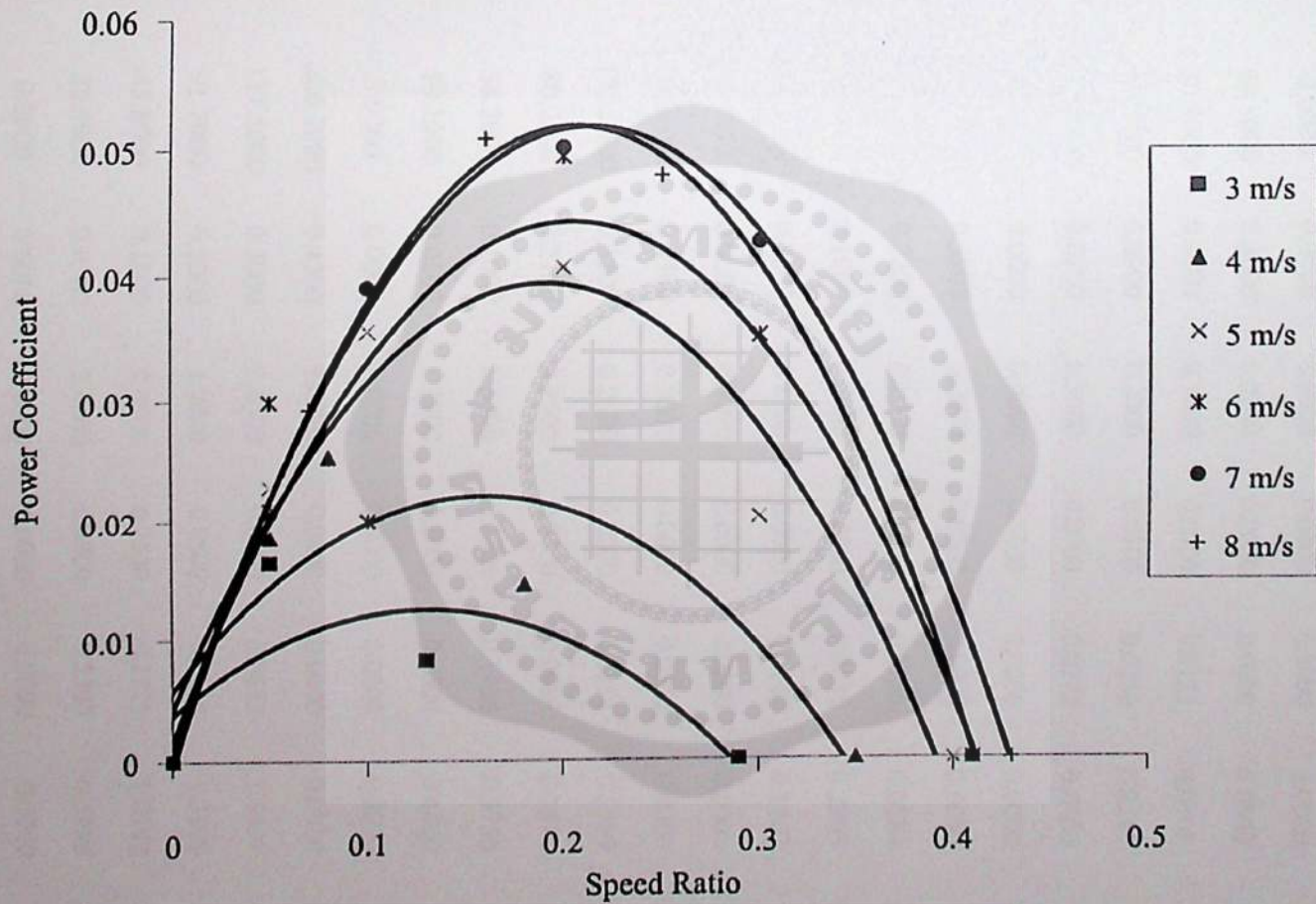
ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดลองและการคำนวณของกังหันลมชนิด 3 ใบ $a/r = 0.6$

V (m/s)	N (rpm)	$\lambda =$ $2\pi rN/60V$	F_1 (N)	F_2 (N)	$T =$ $(F_1 - F_2)r$	$P =$ $2\pi TN/60$	$C_p =$ $2P/\rho AV^3$
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	65.4000	0.2900	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	20.2000	0.1300	0.1000	0.0000	0.0125	0.0264	0.0083
	11.5000	0.0500	0.3500	0.0000	0.0438	0.0527	0.0165
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	107.000	0.3500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	56.1000	0.1800	0.1500	0.0000	0.0188	0.1102	0.0146
	24.4000	0.0800	0.6000	0.0000	0.0750	0.1916	0.0254
	15.3000	0.0500	0.7000	0.0000	0.0875	0.1402	0.0186
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	151.5000	0.4000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	114.6000	0.3000	0.2000	0.0000	0.0250	0.3000	0.0203
	76.4000	0.2000	0.6000	0.0000	0.0750	0.6000	0.0407
	38.2000	0.1000	1.1000	0.0500	0.1313	0.5250	0.0356
	19.1000	0.0500	1.5000	0.1500	0.1688	0.3375	0.0229
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	186.3000	0.4100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	137.5000	0.3000	0.5000	0.0000	0.0625	0.8999	0.0353
	91.7000	0.2000	1.1000	0.0500	0.1313	1.2608	0.00495
	45.8000	0.1000	1.8000	0.2000	0.2000	0.9592	0.2000
	22.9000	0.0500	2.3500	0.4000	0.2438	0.5845	0.0229
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	224.6000	0.4200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	155.1000	0.2900	0.9000	0.0500	0.1063	1.7265	0.0427
	106.9000	0.2000	1.7500	0.3000	0.1813	2.0296	0.0502
	58.8000	0.1100	2.5500	0.5000	0.2563	1.5782	0.0390
	26.7000	0.0500	3.1500	0.7500	0.3000	0.8388	0.0207

V	N	λ	=	F_1	F_2	T=	P=	C_p =
(m/s)	(rpm)	$2rN/60V$		(N)	(N)	$(F_1 - F_2)r$	$2\pi TN/60$	$2P/\rho AV^3$
7	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	262.8000	0.4300		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	152.8000	0.2500		1.7000	0.2500	0.1813	2.9002	0.0480
	97.8000	0.1600		2.9500	0.5500	0.3000	3.0725	0.0509
	42.3000	0.0700		4.1000	0.9000	0.4000	1.7719	0.0293
	30.6000	0.0500		4.2500	1.0000	0.4063	1.3018	0.0215
	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000



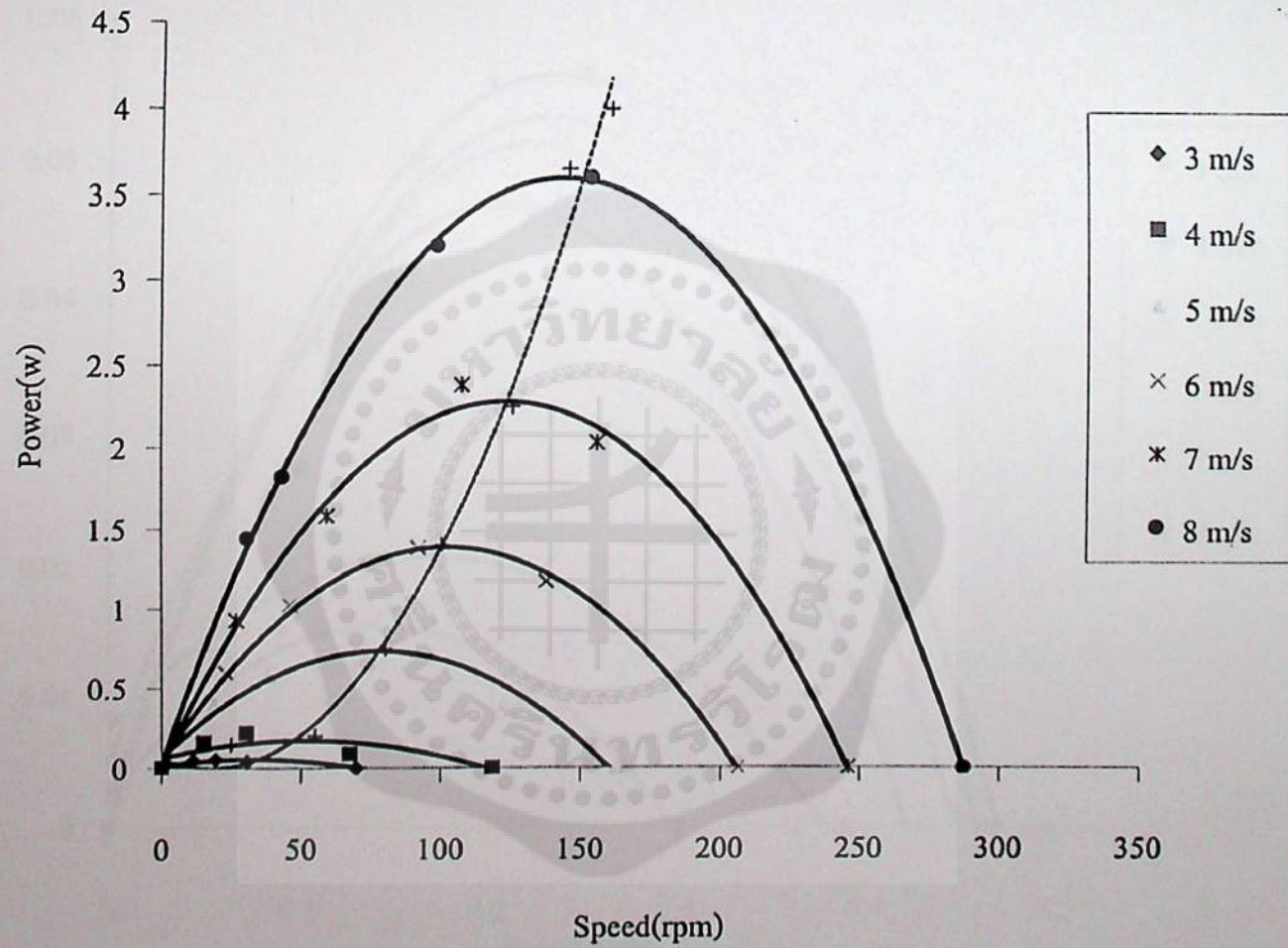
รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) กับ (N) ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.6$



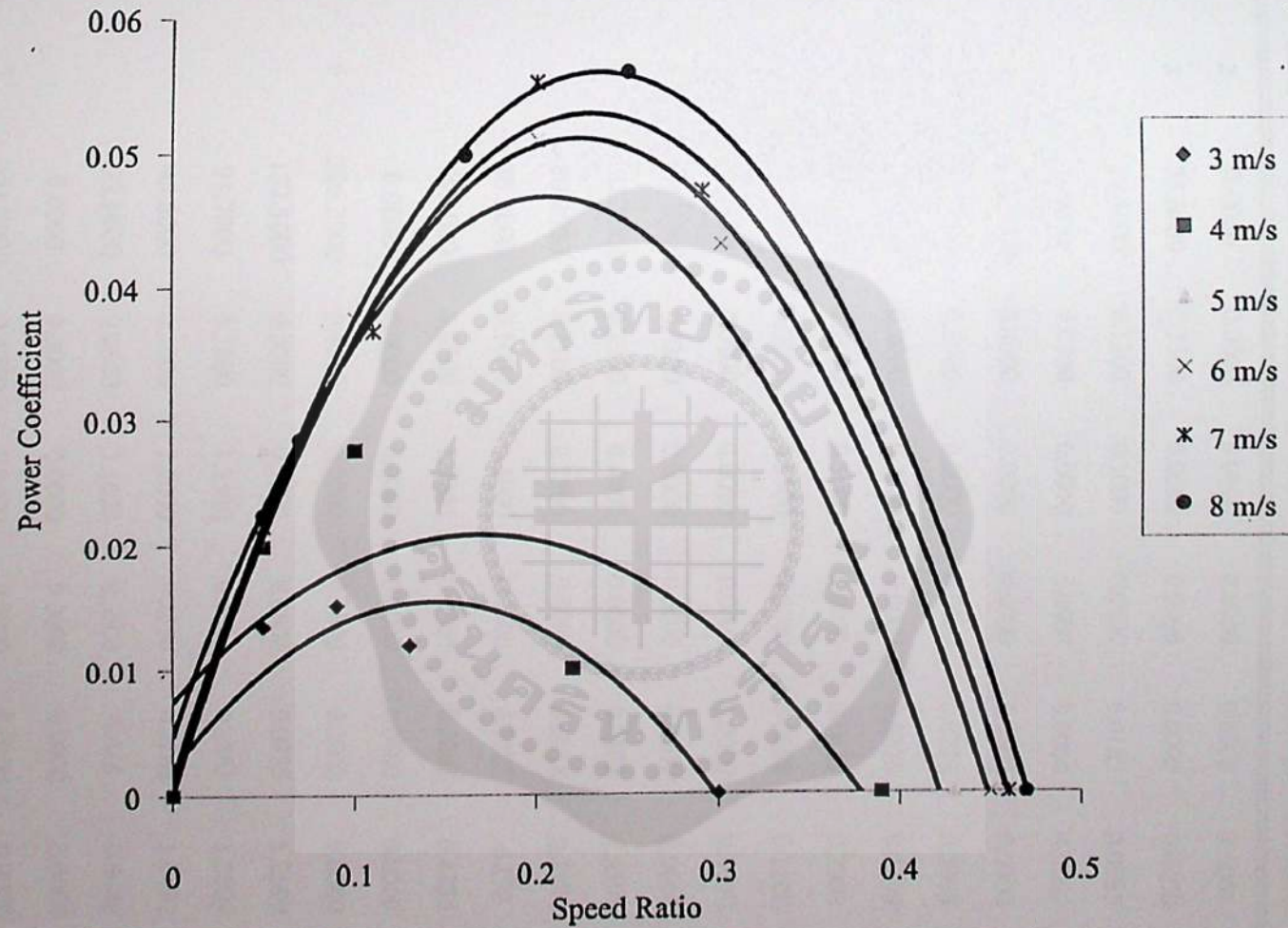
รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Power Coefficient กับ Speed Ratio ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.6$

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการทดลองและการคำนวณของกังหันลมชนิด 3 ใบ $a/r = 0.7$

V (m/s)	N (rpm)	$\lambda =$ $2\pi rN/60V$	F_1 (N)	F_2 (N)	T = $(F_1 - F_2)r$	P = $2\pi TN/60$	$C_p =$ $2P/\rho A V^3$
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	69.7000	0.3000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	30.8000	0.1300	0.1000	0.0000	0.0125	0.0403	0.0119
	19.5000	0.0900	0.2000	0.0000	0.0250	0.0511	0.0151
	11.5000	0.0500	0.3000	0.0000	0.0375	0.0452	0.0134
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	118.7000	0.3900	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	67.5000	0.2200	0.1000	0.0000	0.0125	0.0884	0.0110
	30.6000	0.1000	0.5500	0.0000	0.0688	0.2203	0.0275
	15.3000	0.0500	0.8000	0.0000	0.0100	0.1602	0.0199
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	162.9000	0.4300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	122.2000	0.3200	0.2500	0.0000	0.0313	0.3999	0.0255
	80.2000	0.2100	0.7500	0.0000	0.0938	0.7874	0.0502
	38.2000	0.1000	1.3000	0.1500	0.1438	0.5750	0.0367
	19.1000	0.0500	1.8000	0.2000	0.2000	0.4000	0.0255
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	206.3000	0.4500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	137.5000	0.3000	0.6500	0.0000	0.0813	1.1699	0.0432
	91.7000	0.2000	1.2000	0.0500	0.1438	1.3809	0.0510
	45.8000	0.1000	0.9500	0.2500	0.2125	1.0192	0.0376
	22.9000	0.0500	2.4000	0.4000	0.2500	0.5995	0.0221
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	246.0000	0.4600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	155.1000	0.2900	1.000	0.0000	0.1250	2.0303	0.0472
	106.9000	0.2000	1.9000	0.2000	0.2125	2.3788	0.0553
	58.8000	0.1100	2.4000	0.3500	0.2563	1.5779	0.0367



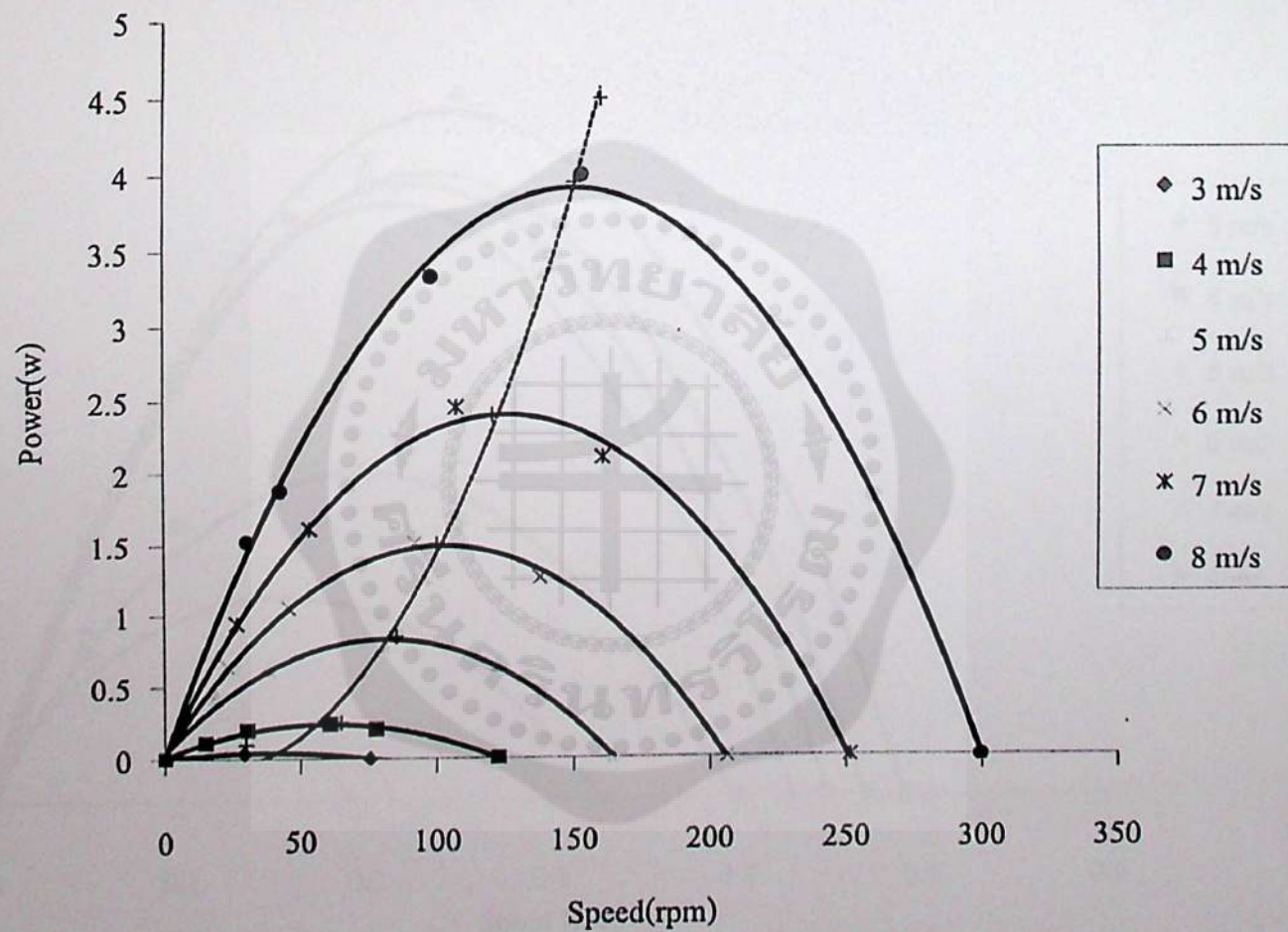
รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) กับ (N) ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.7$



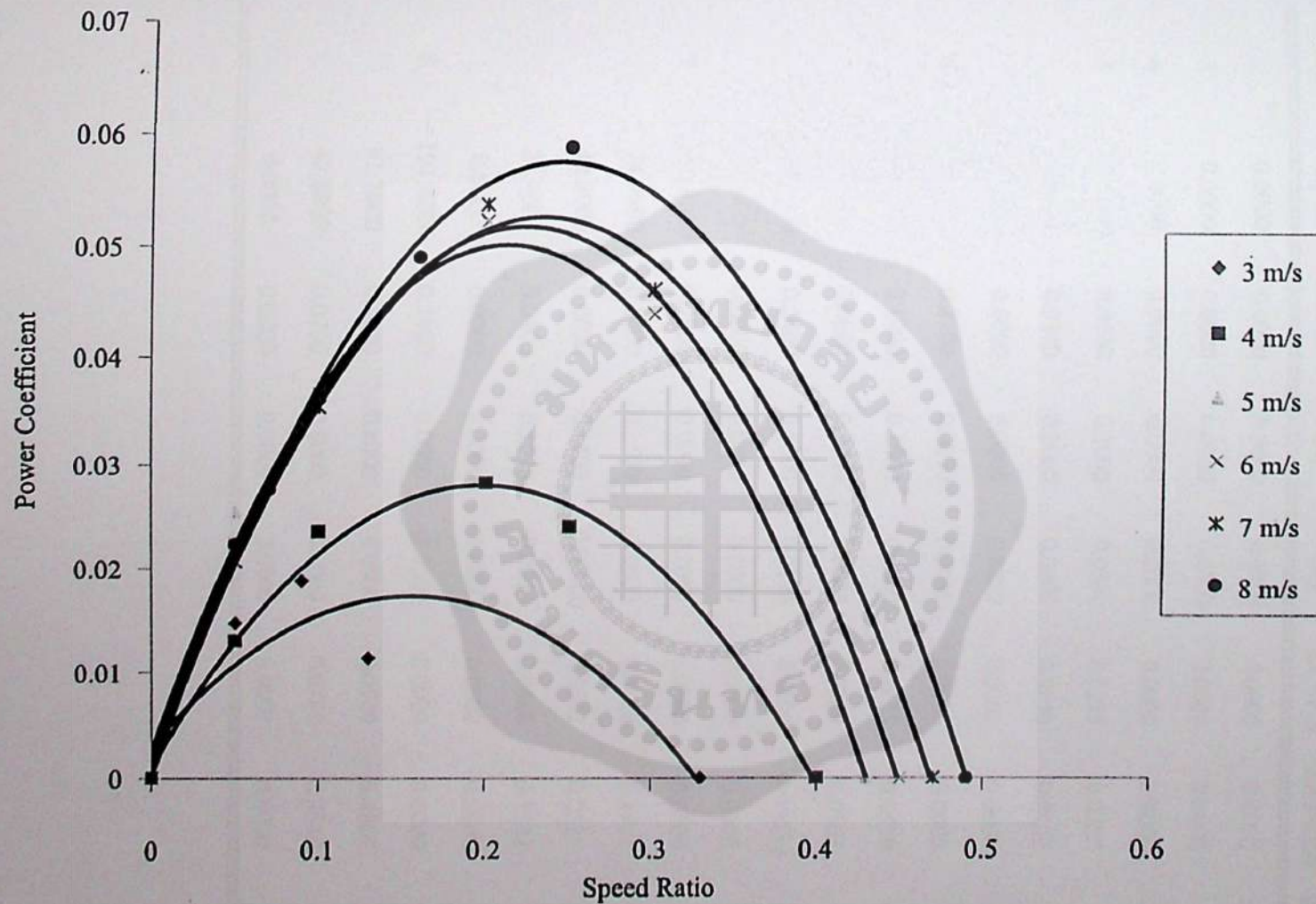
รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Power Coefficient กับ Speed Ratio ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.7$

ตารางที่ 4.14 แสดงผลการทดลองและการคำนวณของกังหันลมชนิด 3 ใบ $a/r = 0.8$

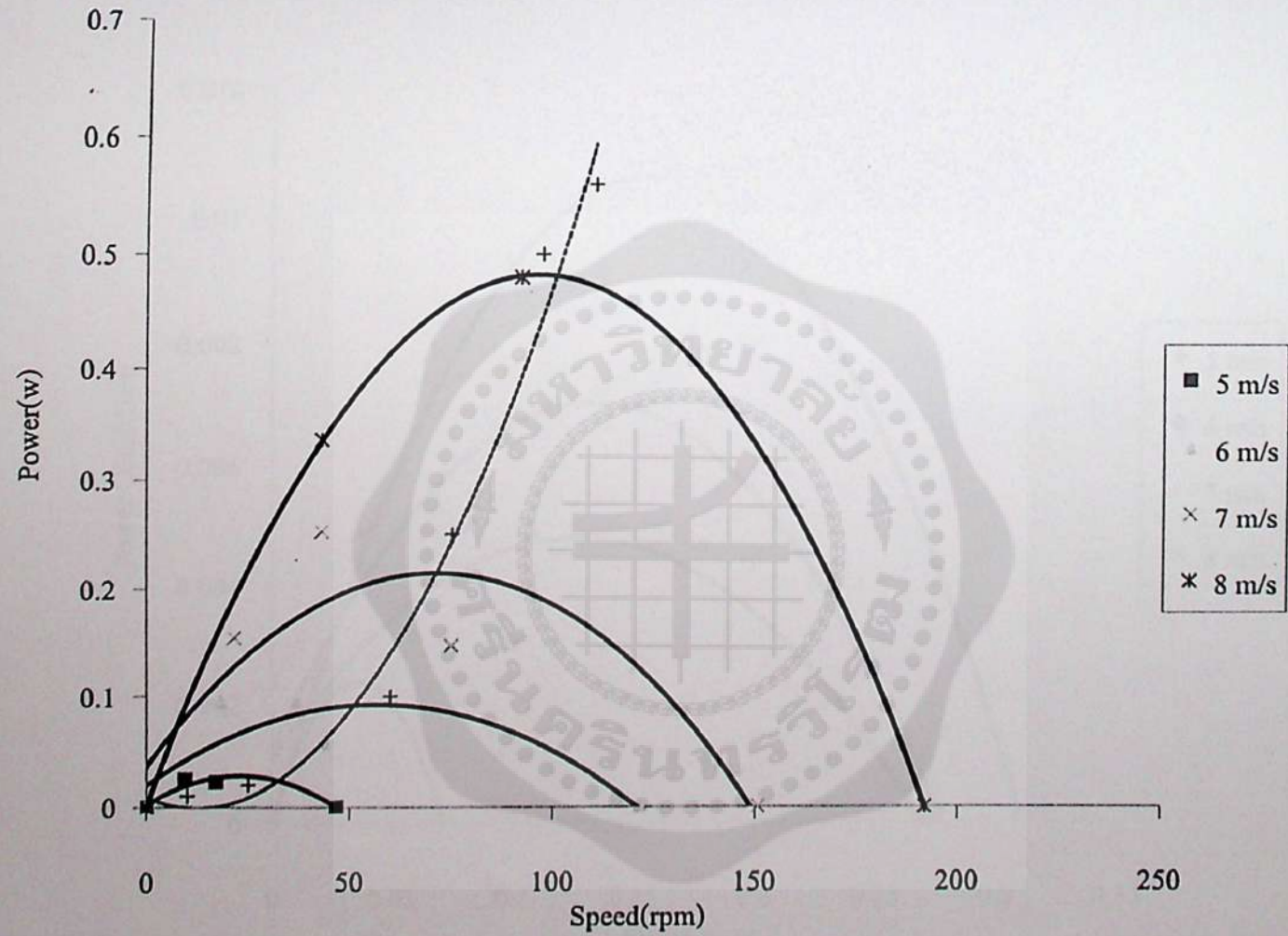
V	N	λ	=	F_1	F_2	T =	P =	$C_p =$
(m/s)	(rpm)	$2rN/60V$		(N)	(N)	$(F_1 - F_2)r$	$2\pi TN/60$	$2P/\rho AV^3$
2	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	75.6000	0.3300		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	29.4000	0.1300		0.1000	0.0000	0.0125	0.0385	0.0114
	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	122.5000	0.4000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	77.9000	0.2500		0.2000	0.0000	0.0250	0.2039	0.0240
	61.1000	0.2000		0.3000	0.0000	0.0375	0.2399	0.0289
	30.6000	0.1000		0.5000	0.0000	0.0625	0.2003	0.0236
	15.3000	0.0500		0.5500	0.0000	0.0688	0.1102	0.0130
	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	164.8000	0.4300		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	122.2000	0.3200		0.4000	0.0000	0.0500	0.6398	0.0386
	80.2000	0.2100		0.7500	0.0000	0.0938	0.7874	0.0475
	38.2000	0.1000		1.3000	0.0500	0.1523	6250	0.0377
	19.1000	0.0500		1.8000	0.1500	0.2063	0.4233	0.0255
	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	206.3000	0.4500		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	137.5000	0.3000		0.7000	0.0000	0.0875	1.2599	0.0439
	91.7000	0.2000		1.3500	0.1000	0.1563	1.5009	0.0523
	45.8000	0.1000		2.0000	0.2500	0.2188	1.0492	0.0366
	22.9000	0.0500		2.5000	0.3500	0.688	0.6448	0.0225
	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	251.3000	0.4700		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	160.4000	0.3000		1.0000	0.0000	0.1250	2.0996	0.0461
	106.9000	0.2000		1.9500	0.2000	0.2188	2.4494	0.0538
	53.5000	0.1000		2.7000	0.4000	0.2875	1.6107	0.0354
	26.7000	0.0500		3.3000	0.6000	0.3375	0.9437	0.0207



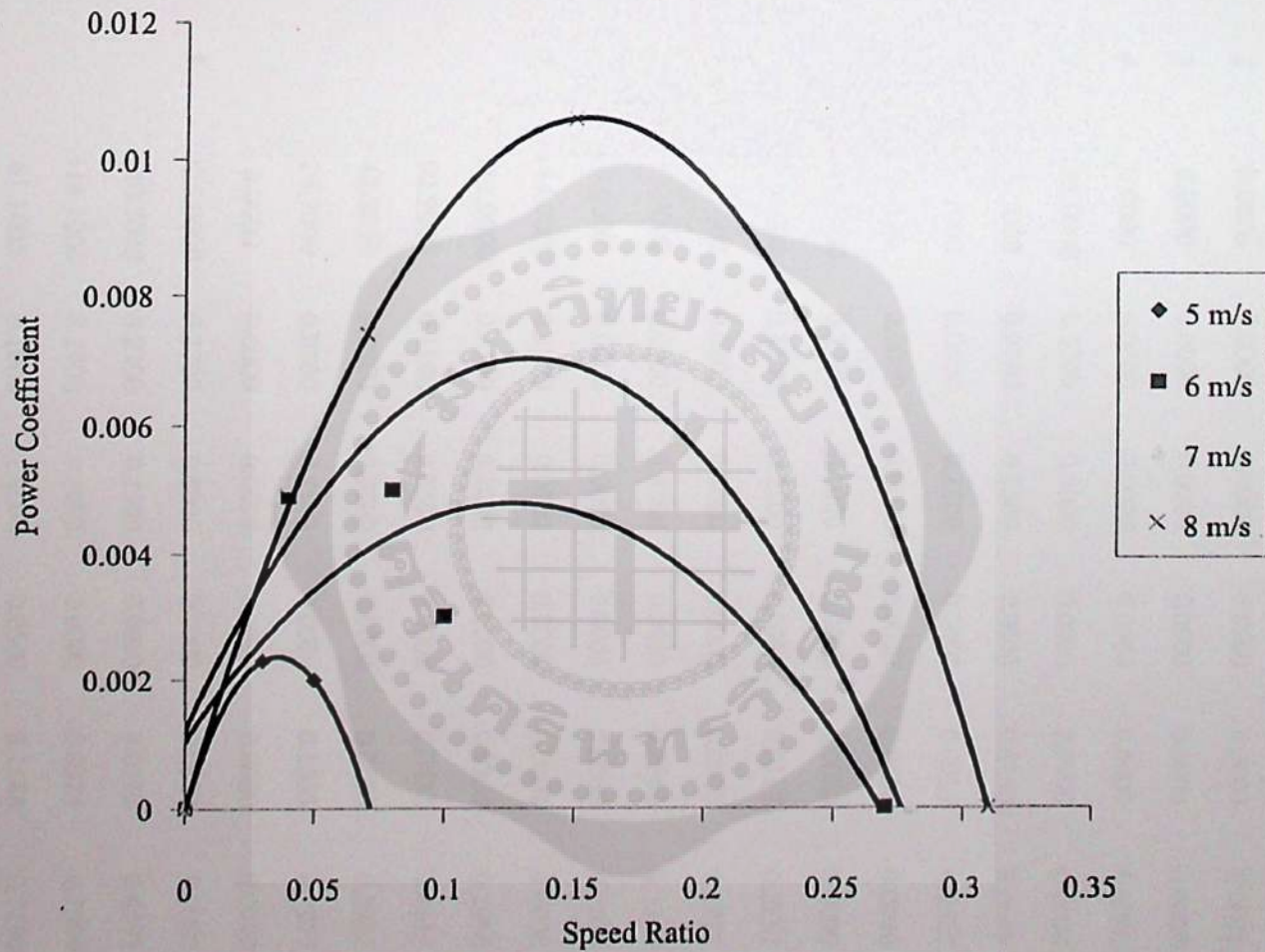
รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) กับ (N) ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.8$



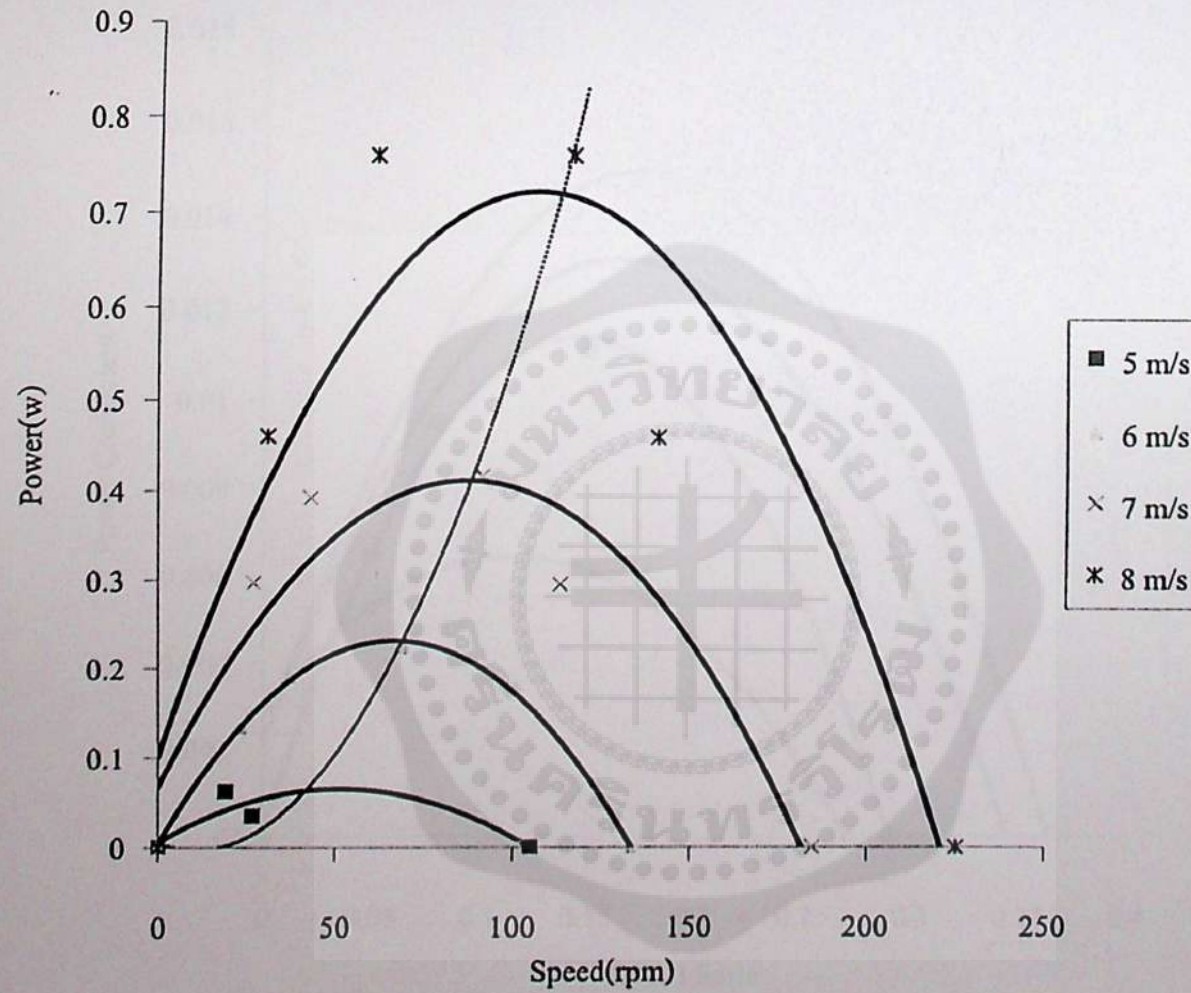
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Power Coefficient กับ Speed Ratio ของใบพัด 3 ใบ $a/r = 0.8$



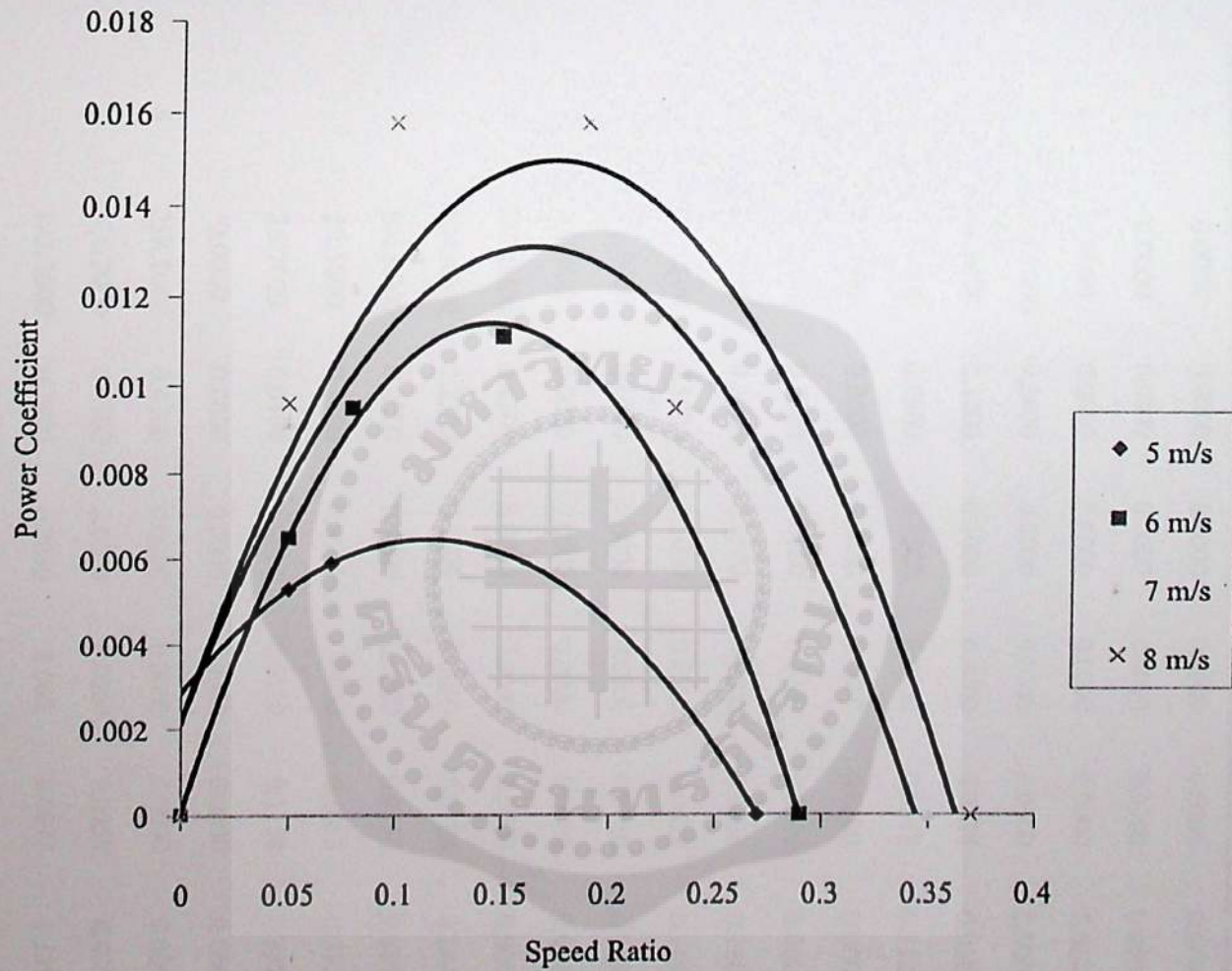
รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.2$



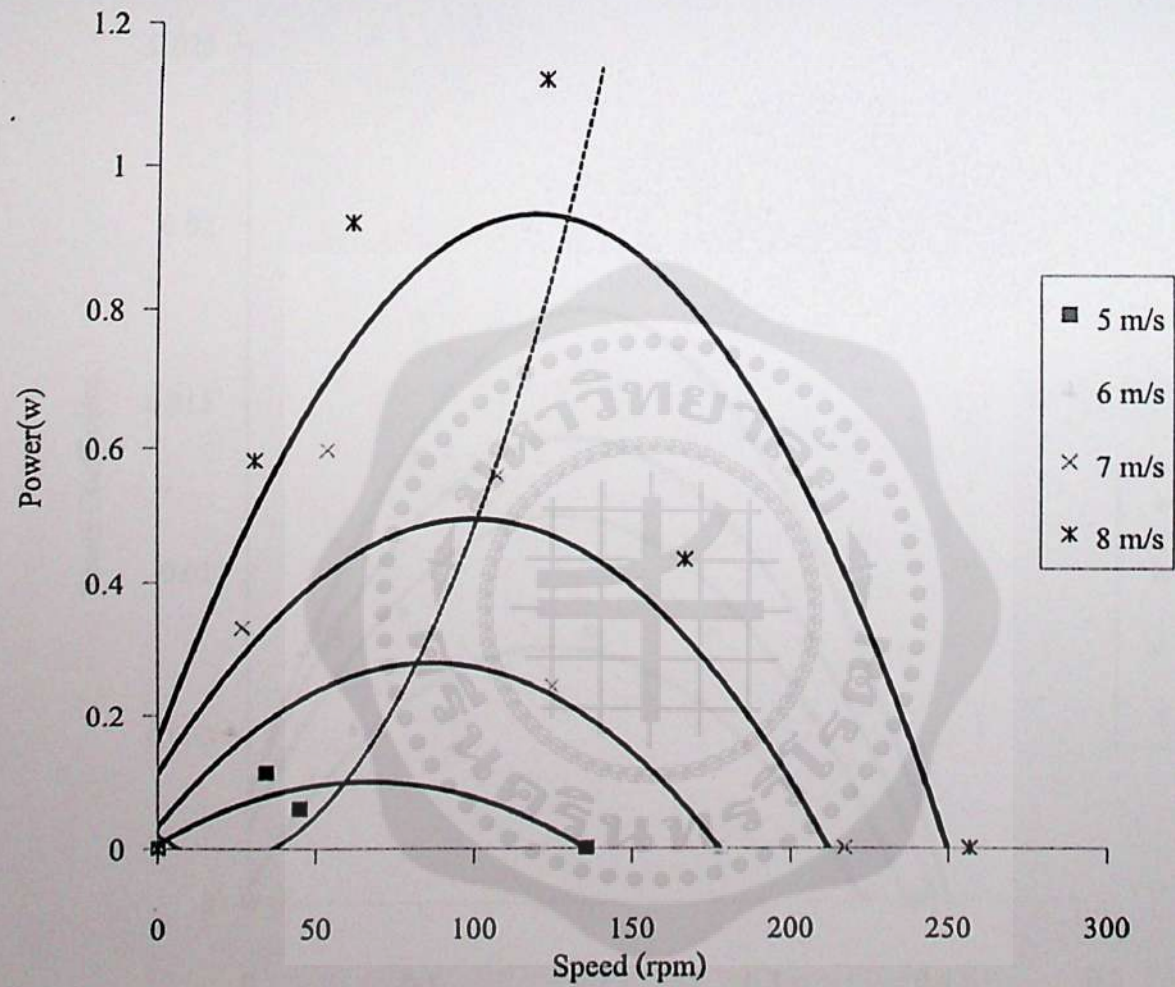
รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Power Coefficient กับ Speed Ratio ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.2$



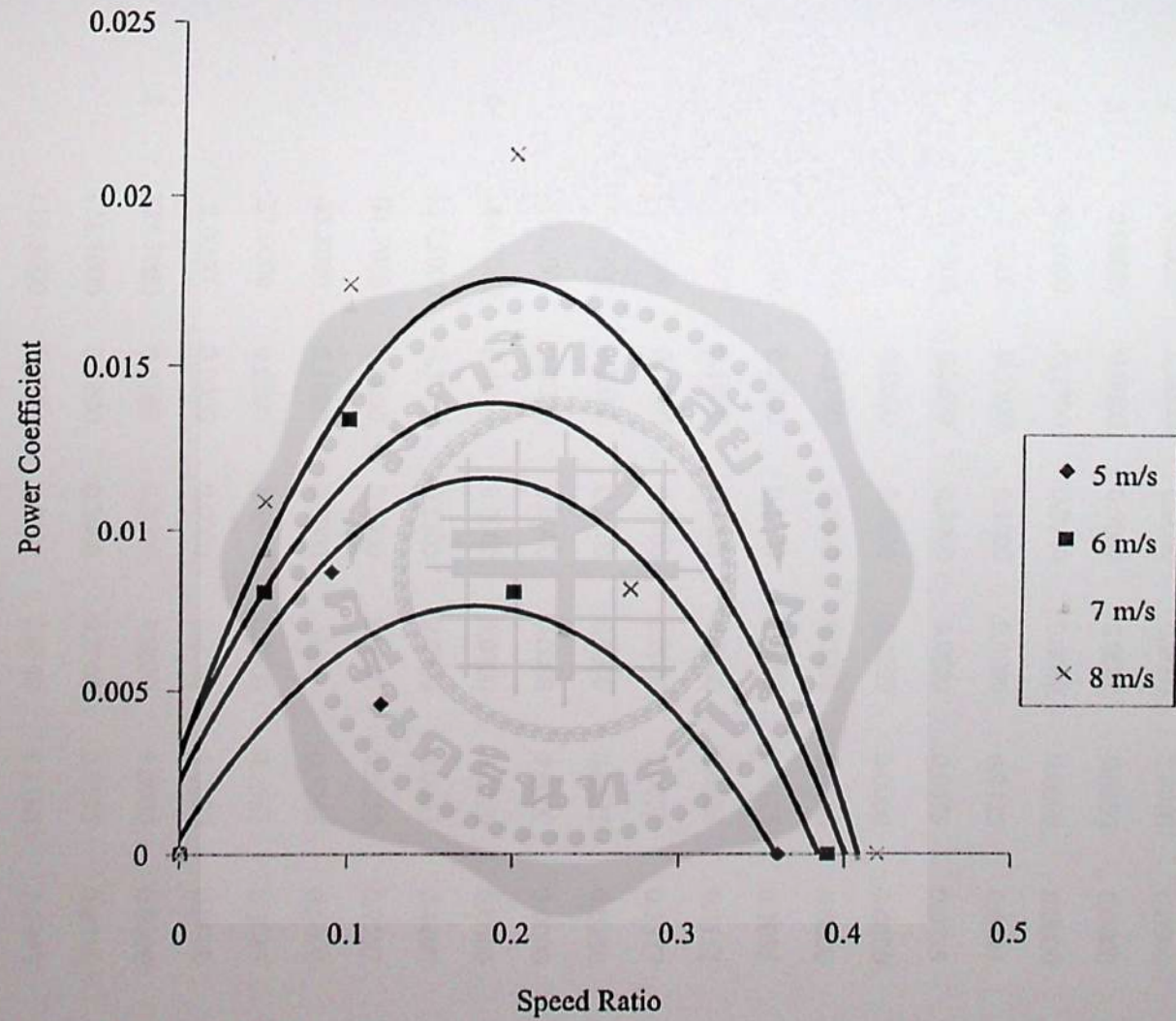
รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.3$



รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Power Coefficient กับ Speed Ratio ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.3$



รูปที่ 4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.4$



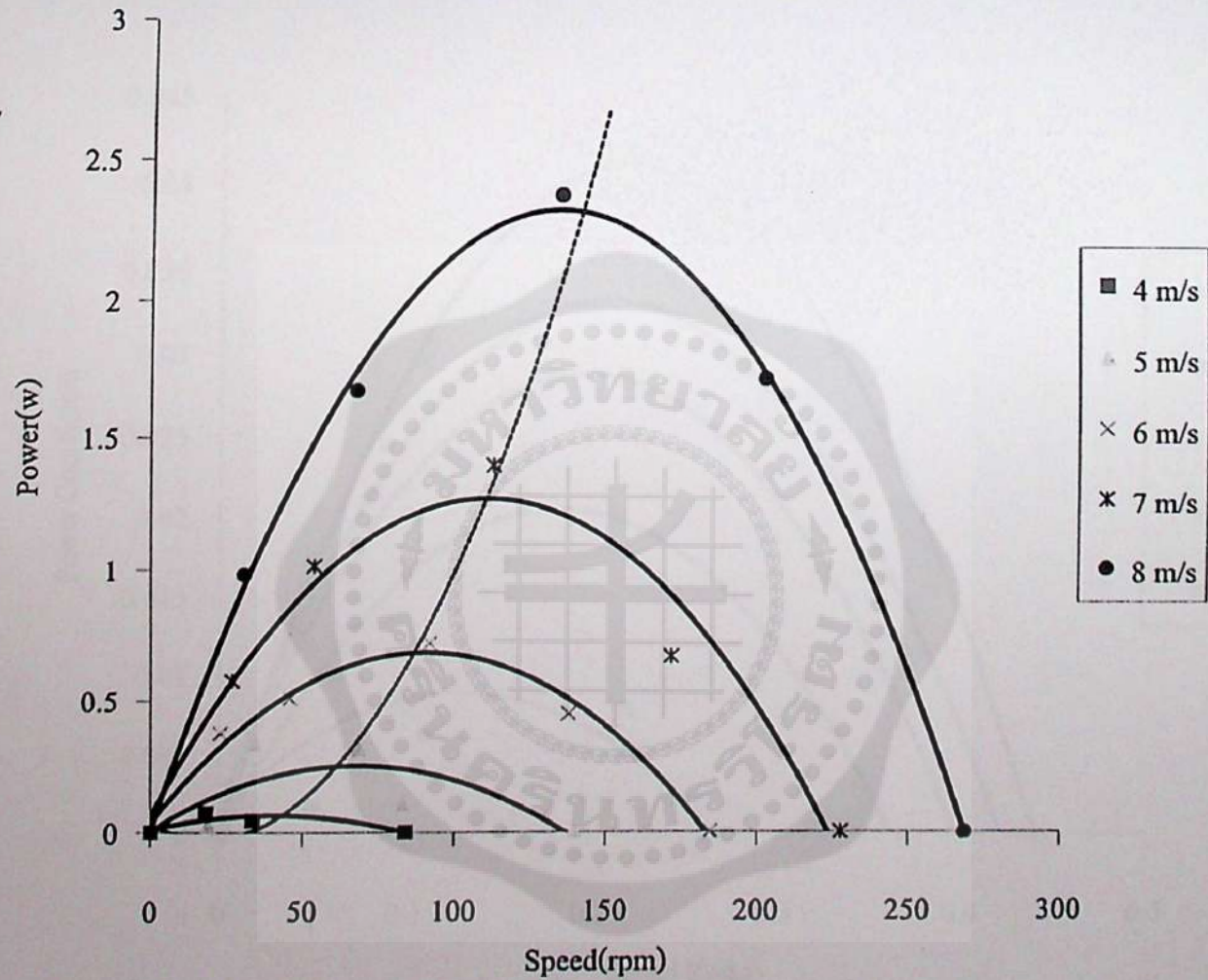
รูปที่ 4.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Power Coefficient กับ Speed Ratio ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.4$

ตารางที่ 4.18 แสดงผลการทดลองและการคำนวณของกังหันลมชนิด 4 ใบ $a/r = 0.5$

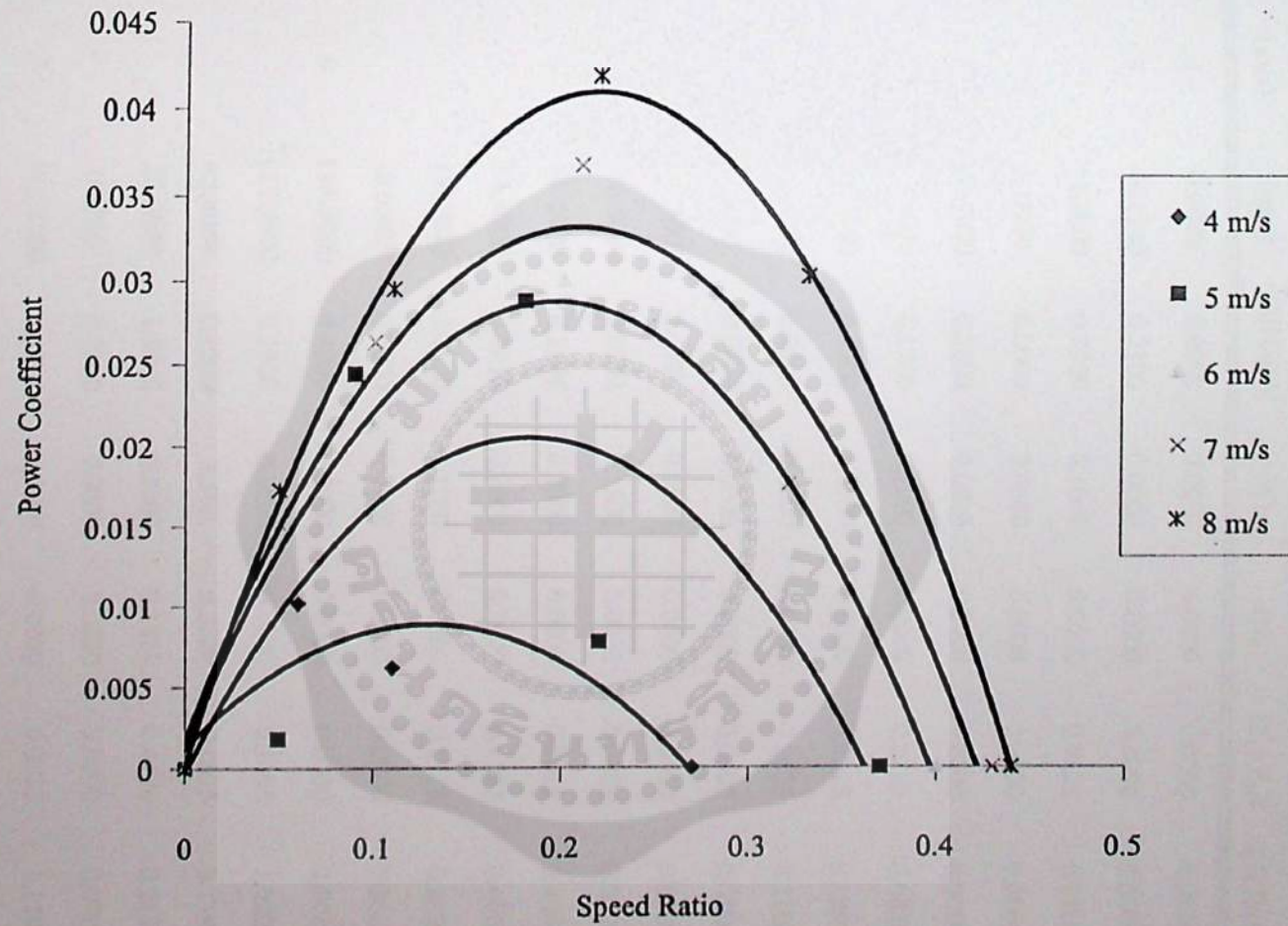
V (m/s)	N (rpm)	$\lambda =$ $2\pi rN/60V$	F_1 (N)	F_2 (N)	T = $(F_1 - F_2)r$	P = $2\pi TN/60$	$C_p =$ $2P/\rho AV^3$
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	84.1000	0.2700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	33.7000	0.1100	0.1000	0.0000	0.0125	0.0441	0.0062
	18.3000	0.0600	0.3000	0.0000	0.0375	0.0719	0.0102
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	139.7000	0.3700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	82.9000	0.2200	0.1000	0.0000	0.0125	0.1085	0.0078
	68.8000	0.1800	0.3500	0.0000	0.0438	0.3152	0.0288
	34.4000	0.0900	0.7500	0.0000	0.0938	0.3377	0.0244
	19.1000	0.0500	0.1000	0.0000	0.0125	0.0250	0.0018
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	184.7000	0.4000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	137.5000	0.3000	0.2500	0.0000	0.0313	0.4499	0.0188
	91.7000	0.2000	0.6000	0.0000	0.0750	0.7202	0.0301
	45.8000	0.1000	0.9000	0.05	0.1068	0.5098	0.0213
	22.9000	0.0500	1.4500	0.2000	0.1563	0.3747	0.0157
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	227.7000	0.4300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	171.1000	0.3200	0.3000	0.0000	0.0375	0.6719	0.0177
	112.3000	0.2100	1.0000	0.0500	0.1188	1.3965	0.0368
	53.5000	0.1000	1.7000	0.2500	0.1813	0.10155	0.0268
	26.7000	0.0500	2.000	0.3500	0.2063	0.5767	0.0152
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	268.5000	0.4400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	201.7000	0.3300	0.6500	0.0000	0.0813	1.7162	0.0303

V	N	λ	=	F_1	F_2	T=	P=	C_p =
(m/s)	(rpm)	$2\pi rN/60V$		(N)	(N)	$(F_1 - F_2)r$	$2\pi TN/60$	$2P/\rho AV^3$
8	134.5000	0.2200		1.5500	0.2000	0.1688	2.3768	0.0419
	67.2000	0.1100		2.3000	0.4000	0.2378	01.6713	0.0295
	30.6000	0.0500		3.000	0.5500	0.3063	0.9814	0.0173
	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000





รูปที่ 4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) และ (N) ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.5$



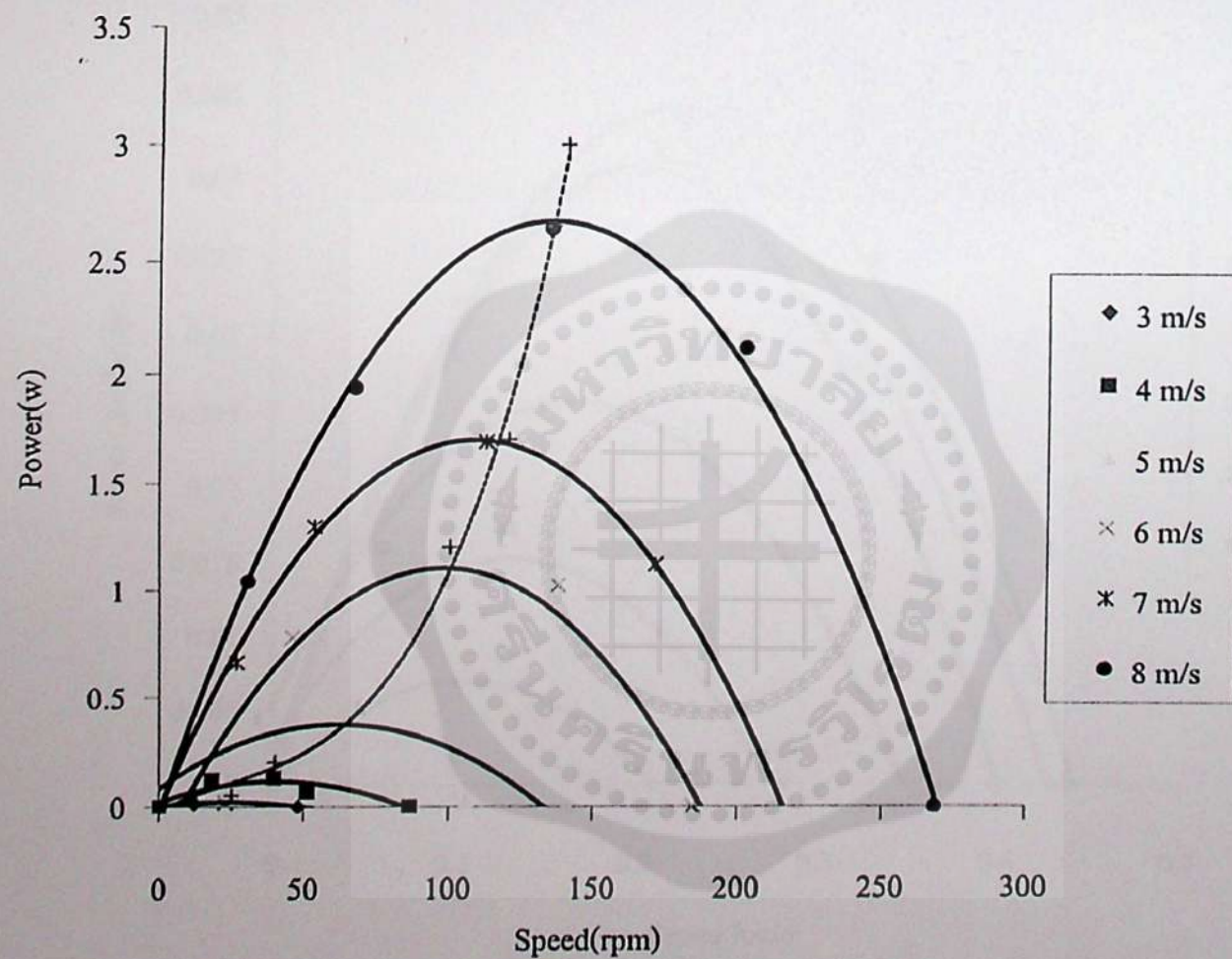
รูปที่ 4.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Power Coefficient กับ Speed Ratio ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.5$

ตารางที่ 4.19 แสดงผลการทดลองและการคำนวณของกังหันลมชนิด 4 ใบ $a/r=0.6$

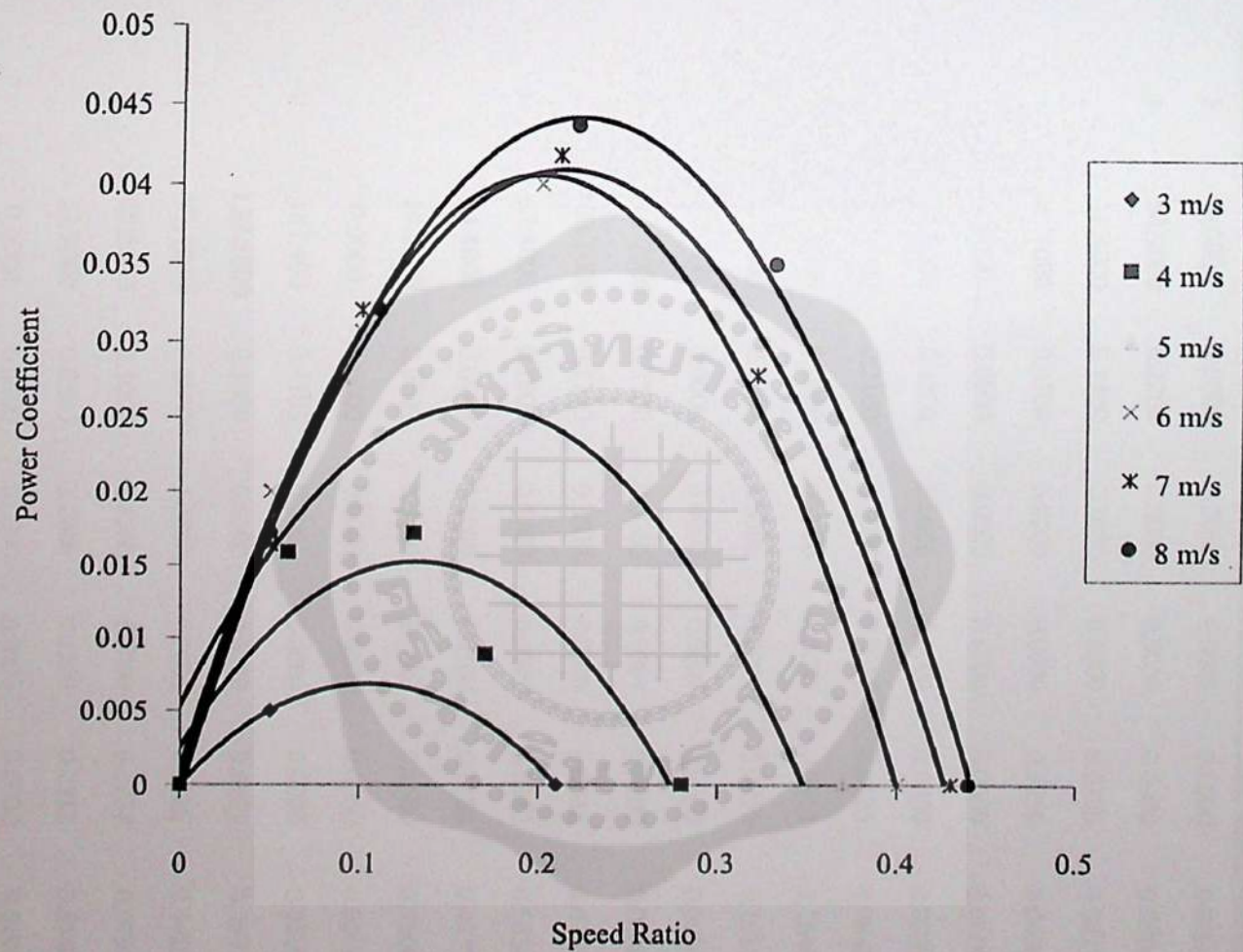
V	N	$\lambda =$	F_1	F_2	$T =$	$P =$	$C_p =$
(m/s)	(rpm)	$2rN/60V$	(N)	(N)	$(F_1 - F_2)r$	$2\pi TN/60$	$2P/\rho AV^3$
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	48.1000	0.2100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	12.2000	0.0500	0.1000	0.0000	0.0125	0.0160	0.0050
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	86.7000	0.2800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	51.4000	0.1700	0.1000	0.0000	0.0125	0.0673	0.0089
	39.7000	0.1300	0.2500	0.0000	0.0313	0.1299	0.0172
	18.3000	0.0600	0.5000	0.0000	0.0625	0.1198	0.0159
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	141.3000	0.3700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	106.0000	0.2800	0.1500	0.0000	0.0188	0.0208	0.0014
	68.8000	0.1800	0.5000	0.0000	0.0625	0.4503	0.0275
	34.4000	0.0900	0.9000	0.0000	0.1125	0.4053	0.0275
	19.1000	0.0500	1.1000	0.0500	0.1313	0.2625	0.0178
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	184.7000	0.4000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	137.5000	0.3000	0.3500	0.0000	0.1063	1.0202	0.0400
	45.8000	0.1000	1.500	0.2000	0.1625	0.7794	0.0306
	22.9000	1.8000	0.3000	0.1875	0.4496	0.0176	0.0500
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	171.1000	0.3200	0.5000	0.0000	0.0625	1.1198	0.0277
	112.3000	0.2100	1.2500	0.1000	0.1438	1.6905	0.0418
	53.5000	0.1000	2.2000	0.3500	0.2313	1.2956	0.0320
	26.7000	0.0500	2.4000	0.5000	0.2375	0.6641	0.0164
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	368.5000	0.4400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	201.5000	0.3300	0.8000	0.0000	0.1000	2.1122	0.0349

V (m/s)	N (rpm)	$\lambda =$ $2\pi N/60V$	F_1 (N)	F_2 (N)	$T =$ $(F_1 - F_2)r$	$P =$ $2\pi TN/60$	$C_p =$ $2P/\rho A V^3$
8	134.5000	0.2200	1.7500	0.2500	0.1875	2.6409	0.0437
	67.2000	0.1100	2.7000	0.5000	0.2750	1.9352	0.0320
	30.6000	0.0500	3.3000	0.7000	0.3250	1.0414	0.0172
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000





รูปที่ 4.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) กับ (N) ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.6$

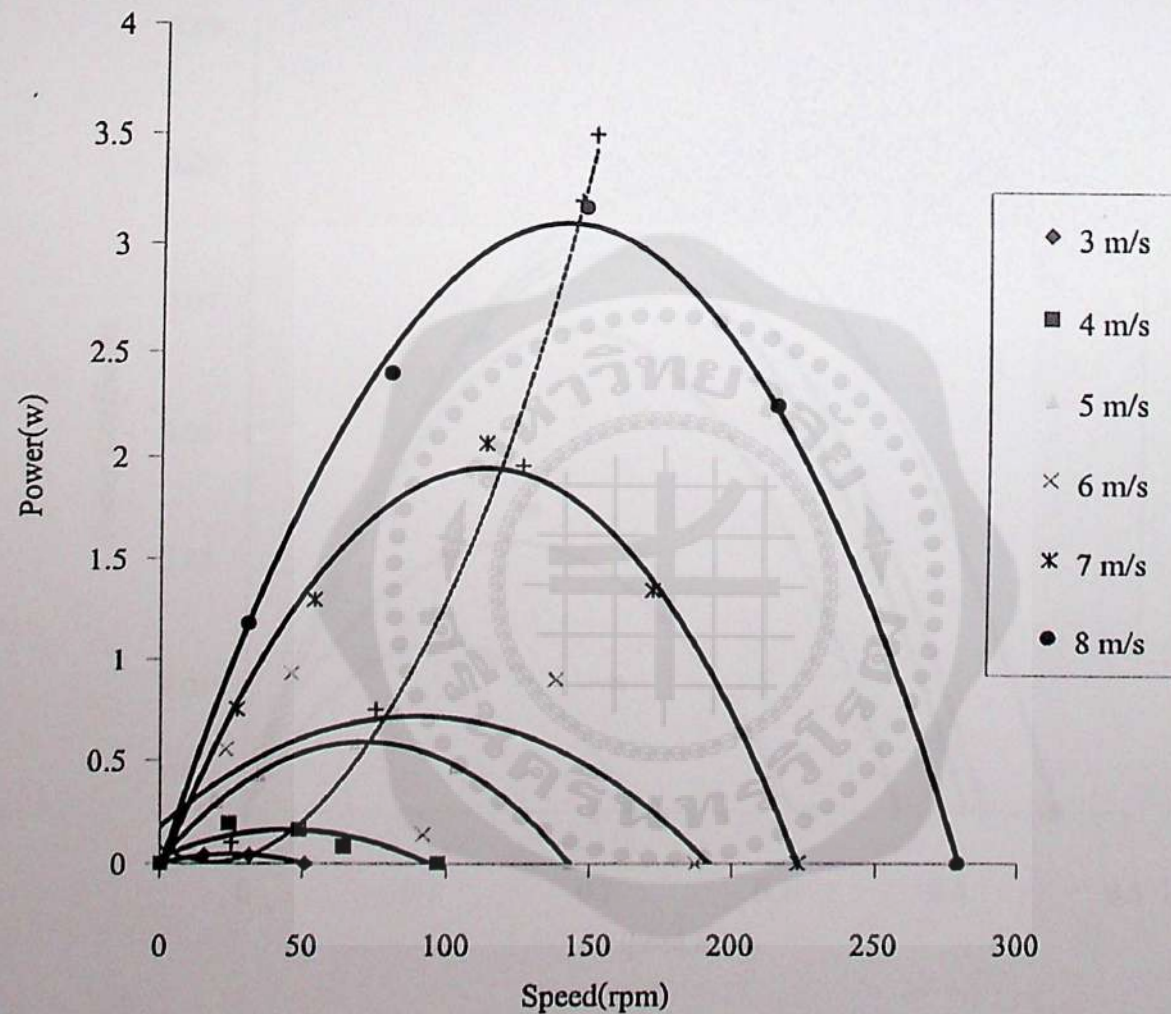


รูปที่ 4.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Power Coefficient กับ Speed Ratio ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.6$

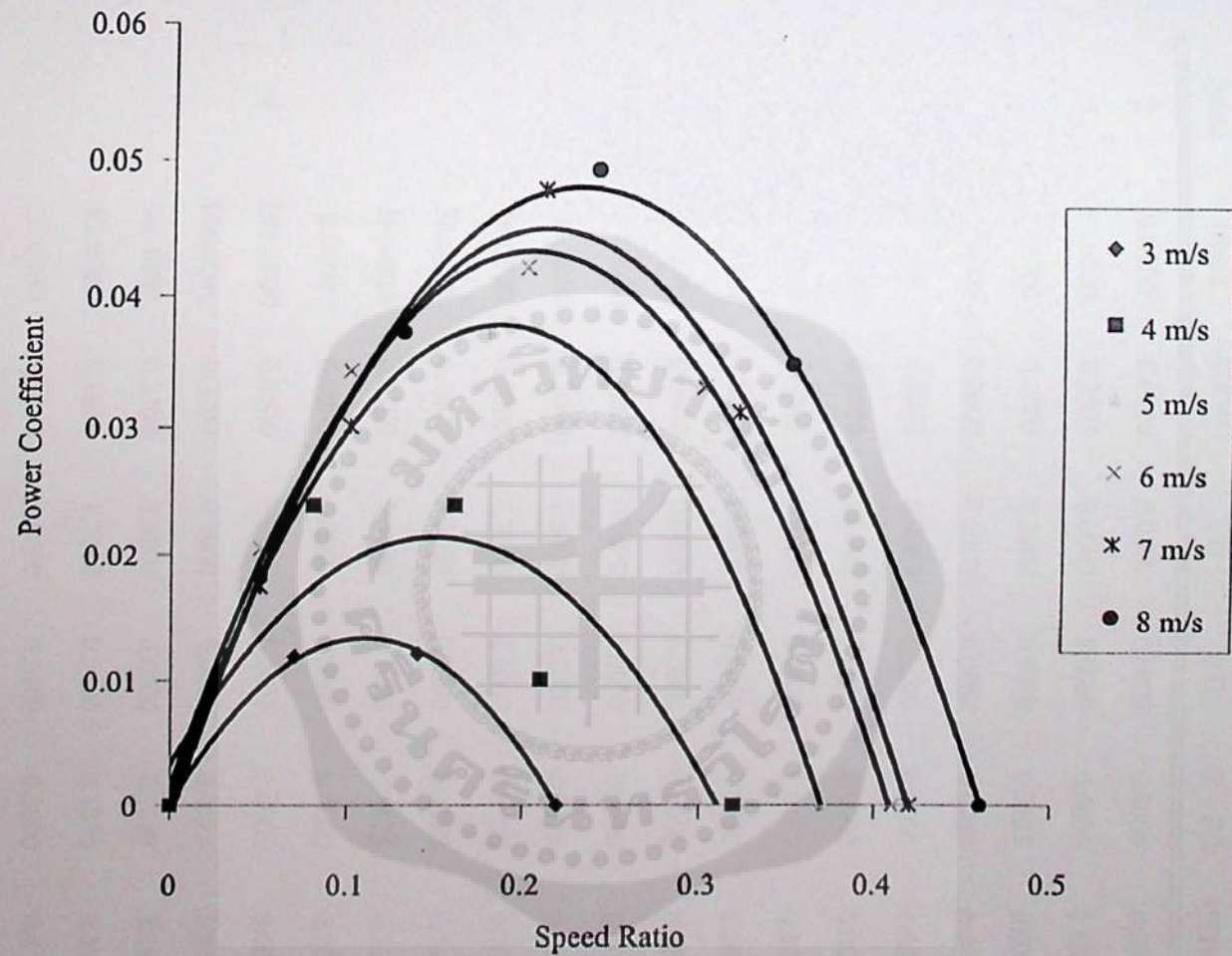
ตารางที่ 4.20 แสดงผลการทดลองและการคำนวณของกังหันลมชนิด 4 ใบ $a/r = 0.7$

V (m/s)	N (rpm)	$\lambda =$ $2\pi N/60V$	F_1 (N)	F_2 (N)	$T =$ $(F_1 - F_2)r$	$P =$ $2\pi TN/60$	$C_p =$ $2P/\rho A V^3$
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	50.9000	0.2200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	31.4000	0.1400	0.1000	0.0000	0.0125	0.0411	0.0121
	15.5000	0.0700	0.2000	0.0000	0.0250	0.0406	0.0119
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	97.0000	0.3200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	64.4000	0.2100	0.1000	0.0000	0.0125	0.0843	0.0101
	48.9000	0.1600	0.2500	0.0000	0.0313	0.1646	0.0239
	24.2000	0.0800	0.6000	0.0000	0.0750	0.1916	0.0239
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	143.2000	0.3700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	103.1000	0.2700	0.3500	0.0000	0.0438	0.4730	0.0302
	68.8000	0.1800	0.6500	0.0000	0.0813	0.5854	0.0374
	34.4000	0.0900	1.0000	0.0500	0.1188	0.4279	0.0274
	19.1000	0.0500	1.3000	0.1000	0.1500	0.3000	0.0191
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	187.400	0.4100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	137.5000	0.3000	0.5000	0.0000	0.0623	0.8971	0.0331
	91.7000	0.2000	1.0500	0.1000	0.1188	0.1408	0.0421
	45.8000	0.1000	1.8500	0.3000	0.1938	0.9293	0.0343
	22.9000	0.0500	2.2000	0.3500	0.2313	0.5546	0.0205
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	223.1000	0.4200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	171.1000	0.3200	0.6000	0.0000	0.0750	1.3428	0.0312
	112.3000	0.2100	1.5000	0.1000	0.1750	2.0580	0.0479
	53.5000	0.1000	2.2000	0.3500	0.2313	1.2956	0.0301

[illegible]



รูปที่ 4.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) กับ (N) ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.7$



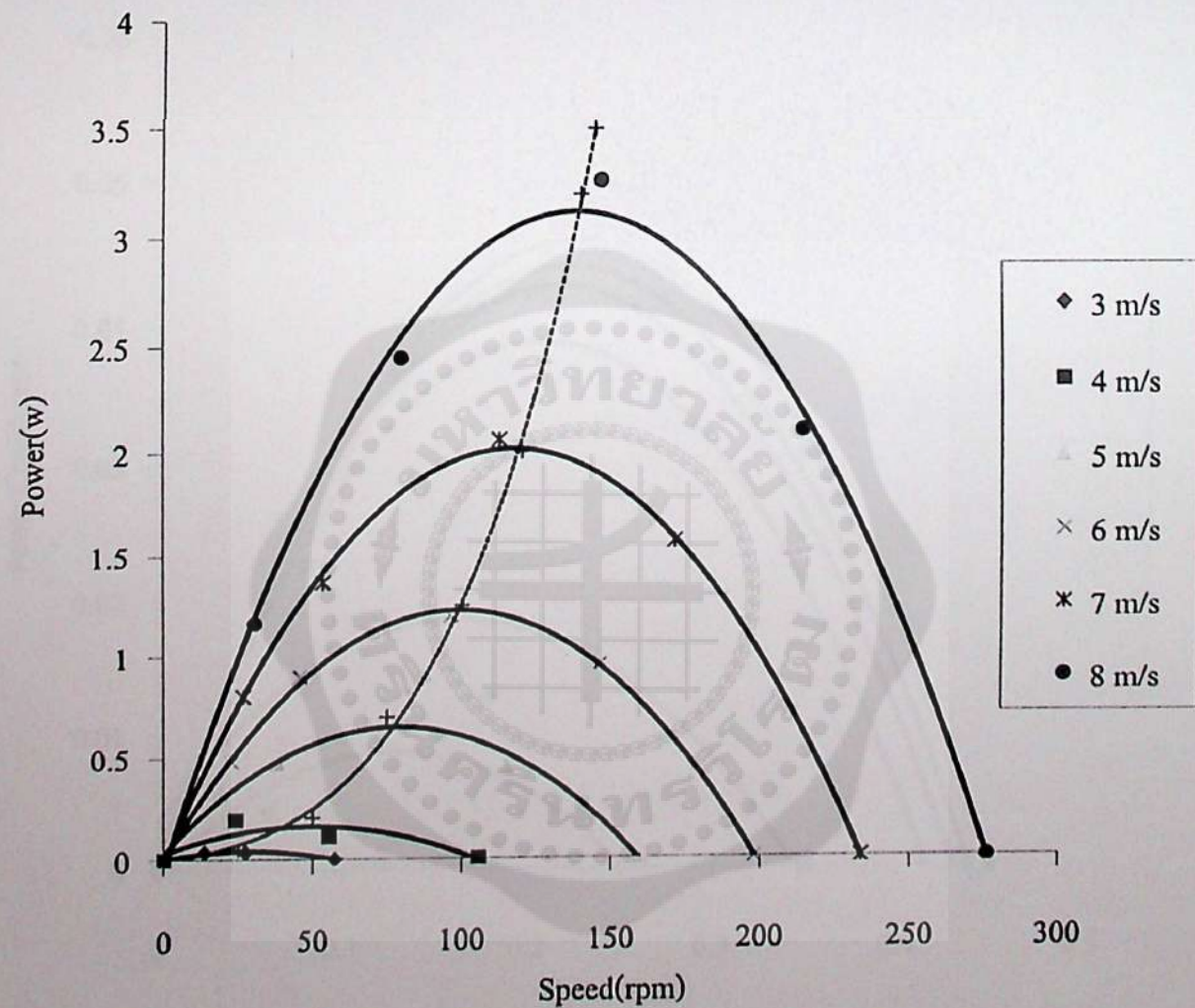
รูปที่ 4.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Power Coefficient กับ Speed Ratio ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.7$

ตารางที่ 4.21 แสดงผลการทดลองและการคำนวณของกังหันลมชนิด 4 ใบ $a/r = 0.8$

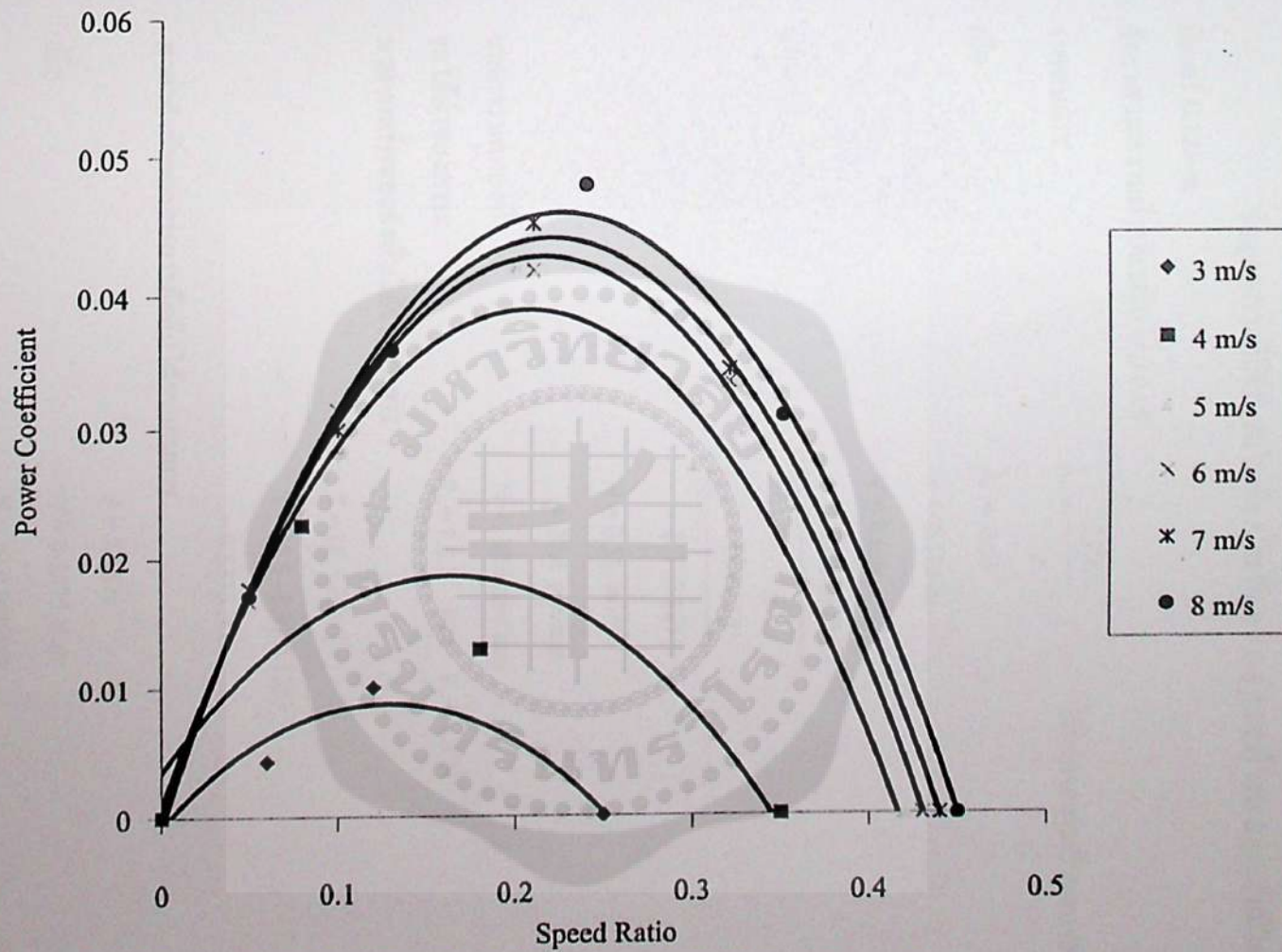
V (m/s)	N (rpm)	$\lambda =$ $2\pi N/60V$	F_1 (N)	F_2 (N)	T = $(F_1 - F_2)r$	P = $2\pi TN/60$	$C_p =$ $2P/\rho A V^3$
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	57.6000	0.2500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	27.5000	0.1200	0.1000	0.0000	0.0125	0.0359	0.0100
	13.8000	0.0600	0.0200	0.0000	0.0250	0.0361	0.0100
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	105.9000	0.3500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	55.8000	0.1800	0.1500	0.0000	0.0187	0.1096	0.0129
	24.4000	0.0800	0.6000	0.0000	0.0750	0.1916	0.0226
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	160.6000	0.4200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	114.6000	0.3000	0.3000	0.0000	0.0375	0.4500	0.0271
	76.4000	0.2000	0.7000	0.0000	0.8750	0.7000	0.0422
	38.2000	0.1000	0.1000	0.0500	0.1188	0.4750	0.0286
	19.1000	0.0500	1.4000	0.1000	0.1625	0.3250	0.0173
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	198.1000	0.4300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	146.0000	0.3200	0.5000	0.0000	0.0625	0.9601	0.0335
	96.3000	0.2100	1.0000	0.0500	0.1188	1.1975	0.0418
	45.8000	0.1000	1.7000	0.2000	0.1875	0.8993	0.0314
	22.9000	0.0500	1.9000	0.3000	0.2000	0.4796	0.0167
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	233.7000	0.4400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	171.1000	0.3200	0.7000	0.0000	0.0875	1.5678	0.0344
	112.3000	0.2100	1.5000	0.1000	0.1750	2.0580	0.0452
	53.5000	0.1000	2.3000	0.3500	0.2438	1.3656	0.0299
	26.7000	0.0500	2.8000	0.5000	0.2875	0.8039	0.0177

V (m/s)	N (rpm)	$\lambda = \frac{2\pi r N}{60 V}$	F_1 (N)	F_2 (N)	T = $(F_1 - F_2)r$	P = $\frac{2\pi T N}{60}$	$C_p = \frac{2P}{\rho A V^3}$
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	276.2000	0.4500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	213.9000	0.3500	0.7500	0.0000	0.0938	2.0999	0.0309
	146.7000	0.2400	1.9000	0.2000	0.2125	3.2645	0.0480
	79.5000	0.1300	2.8000	0.4500	0.2938	2.4455	0.1359
	30.6000	0.0500	3.6000	0.7000	0.3625	1.1616	0.0171
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000





รูปที่ 4.41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (P) กับ (N) ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.8$



รูปที่ 4.42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Power Coefficient กับ Speed ratio ของใบพัด 4 ใบ $a/r = 0.8$

ตัวอย่างการคำนวณการทดลองชุดทดสอบก้านลมนแบบซาโวเนียส ชนิดมีช่องว่างตรงกลาง

ข้อมูลตารางที่มีจำนวนใบพัด 2 ใบ ที่ $a/r = 0.8$ ความเร็วลม 8 m/s รัศมีโคนโม

มิเตอร์ 0.125 m

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) 0.05

จากสมการ

$$\lambda = \frac{2\pi r N}{V}$$

ใช้หาค่าความเร็วรอบ (N)

เมื่อ

$$\lambda = 0.05$$

$$r = 0.125 \text{ m}$$

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

แทนค่า

$$0.05 = \frac{2\pi(0.125)N}{8}$$

$$N = \frac{0.05 \times 8}{2\pi(0.125)}$$

$$N = 0.51 \text{ rev/s}$$

$$= 30.6 \text{ rev/min}$$

จากการทดลองที่

$$N = 30.6 \text{ rev/min}$$

จะได้ค่าของภาระ

$$F_1 = 5.6 \text{ N} \text{ และ } F_2 = 1.3 \text{ N}$$

หาค่าทอร์กของก้านได้จากสมการ

$$T = (F_1 - F_2)r$$

$$T = (5.6 - 1.3)(0.125)$$

$$= 0.5375 \text{ N.m}$$

หาค่ากำลังของสมการก้านได้จากสมการ

$$P = 2\pi TN$$

เมื่อ

$$T = 0.5375 \text{ N.m}$$

$$N = 30.6 \text{ rev/min}$$

$$P = 2\pi(0.5375)(30.6)$$

$$= 1.72237 \text{ W}$$

หาค่า C_p ของก้านได้จากสมการ

เมื่อ

$$C_p = \frac{2P}{\rho A V^3}$$

$$P = 1.72237 \text{ W}$$

$$\rho = 1.18 \text{ kg/m}^3$$

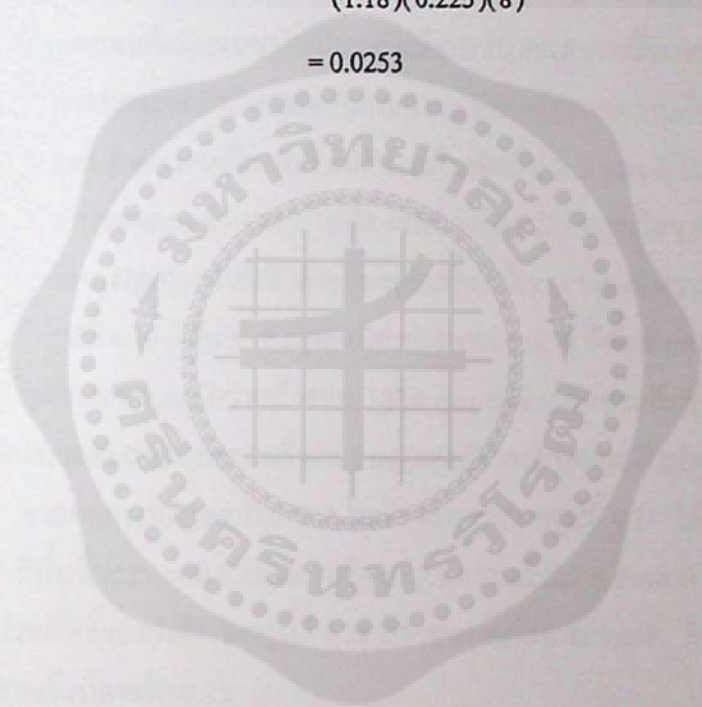
$$A = 0.225 \text{ m}^2$$

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

แทนค่า

$$C_p = \frac{2(1.72237)}{(1.18)(0.225)(8)^3}$$

$$= 0.0253$$



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

สรุปผลการทดลอง

ชุดทดสอบกังหันลมชาโวนีเยสชนิดมีช่องว่างตรงกลางเป็นการทดสอบกังหันลมในแนวตั้ง โดยจะการกำหนดระยะรัศมีของกังหันตามค่า a/r มีการกำหนดความเร็วลมที่ความเร็วลมต่างๆ คือ 2,3,4,5,6,7 และ 8 m/s และมีการเปลี่ยนจำนวนใบพัดเป็น 2,3 และ 4 ใบตามลำดับ

จากการทดลอง จำนวน 2 ใบพัด จะพบว่าที่ความเร็วรอบใดๆ กำลังจะไม่แปรผันตามความเร็วรอบ แต่ค่าสูงสุดของกำลังที่ได้จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ประทะลม a/r ความเร็วรอบของกังหันและความเร็วลม จากรูปที่ 4.13 ได้ค่ากำลังสูงสุดมีค่าประมาณ 6.00W ที่พื้นที่ประทะลม 0.225 m^2 หรือ $a/r = 0.8$ ความเร็วลม 8.0 m/s ความเร็วรอบ 180.0 rpm ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของกำลัง จากรูปที่ 4.14 มีค่าสูงสุดประมาณ 0.084 ที่ความเร็วลม 8 m/s และอัตราส่วนความเร็วปลายใบ 0.3

จากผลการทดลอง จำนวน 3 ใบพัด จะพบว่าจากรูปที่ 4.27 ได้ค่ากำลังสูงสุดมีค่าประมาณ 3.90 W ที่พื้นที่ประทะลม 0.225 m^2 หรือ $a/r = 0.8$ ความเร็วลม 8.0 m/s ความเร็วรอบ 150.0 rpm ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของกำลัง จากรูปที่ 4.28 มีค่าสูงสุดประมาณ 0.058 ที่ความเร็วลม 8 m/s และอัตราส่วนความเร็วปลายใบ 0.25

จากการทดลอง จำนวน 4 ใบพัด จะพบว่าจากรูปที่ 4.41 ได้ค่ากำลังสูงสุดประมาณ 3.10 W ที่พื้นที่ประทะลม 0.225 m^2 หรือ $a/r = 0.8$ ความเร็วลม 8.0 m/s ความเร็วรอบ 140.0 rpm ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของกำลัง จากรูปที่ 4.42 มีค่าสูงสุดประมาณ 0.048 ที่ความเร็วลม 8.0 m/s และอัตราส่วนความเร็วปลายใบ 0.24

ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบค่า P และ C_p สูงสุดที่จำนวนใบพัด 2, 3 และ 4 ใบ

จำนวนใบ พัด (ใบ)	a/r	V (m/s)	N (rpm)	P (R)	λ	C_p
2	0.8	8	180.0	6.00	0.30	0.084
3	0.8	8	150.0	3.90	0.25	0.058
4	0.8	8	140.0	3.10	0.24	0.048

ข้อเสนอแนะ

จากการทำโครงการนี้เป็นเพียงก้าวหนึ่งในการสร้างกังหันลมในแนวตั้ง (ซาโวนีเยส) ชนิดมีช่องว่างตรงกลาง จากการทำโครงการนี้ผู้จัดทำมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. ควรมีการเผยแพร่รูปแบบกังหันชนิดนี้ให้กว้างขวางยิ่งขึ้น เพื่อจะได้นำกังหันไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ
2. ควรสร้างกังหันให้สามารถให้กับพลังงานในแบบอื่นเช่น พลังงานน้ำ เป็นต้น
3. ควรมีการศึกษาหารายละเอียดเกี่ยวกับเทคนิคในการรับลมแบบอื่นๆ ของใบพัดกังหันให้มีสมรรถนะสูงยิ่งขึ้นไป

บรรณานุกรม

1. ก่อเกียรติ ศรีบัณฑิตมงคล, เครื่องจัดเก็บอัตโนมัติ, โครงการงานวิศวกรรมศาสตร์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
2. เฉลิมพล ดันติปาสิทธิ์, ที่จอดรถสองชั้น, โครงการงานวิศวกรรมศาสตร์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
3. จำรูญ ดันติพิศาลกุล, กลศาสตร์ของแข็ง : ศูนย์ส่งเสริมกรุงเทพ ฯ.
4. ชนะ กสิภาร, ความแข็งแรงของวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าพระนครเหนือ :
โรงพิมพ์ ห้างหุ้นส่วนจำกัด ชวนพิมพ์ , 2528.
5. ตารางเหล็กสำหรับผู้รับเหมาก่อสร้างและวิศวกร : Tee Group of Engineers
6. ผศ.มนตรี พิรุณเกษตร , กลศาสตร์ของวัสดุ มหาลัยเกษตรศาสตร์ : โรงพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัด
สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.
7. รศ.สมาน เจริญกิจพูนผล และมนตรี พิรุณเกษตร , กลศาสตร์ของไหลฉบับเสริมประสบการณ์
บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด.
8. ดร.วรวิทย์ อึ้งภากรณ์ , และชาญ ถนัดงาน , การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 2
กรุงเทพมหานคร บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด.
9. Ferdinand P.Beer and E.Russell ,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 & sana.





ตารางภาคผนวกที่ 1.1 แสดงคุณสมบัติของโลหะ

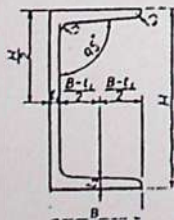
Metal	Modulus of Elasticity, E		Modulus of Rigidity, G		Poisson's Ratio, ν	Unit Weight, w (lb/in. ³)	Density, ρ (Mg/m ³)	Coefficient of Thermal Expansion, α		Thermal Conductivity		Specific Heat	
	Mpsi	GPa	Mpsi	GPa				10 ⁻⁶ /°F	10 ⁻⁶ /°C	Btu/h-ft-°F	W/m-°C	Btu/lbm-°F	J/kg-°C
Aluminum alloy	10.4 ^a	72	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.

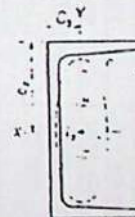
^bSee Appendix C-3 for more detailed elastic properties of cast irons.

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

ตารางภาคผนวกที่ 1.2 แสดงคุณสมบัติของเหล็กราง



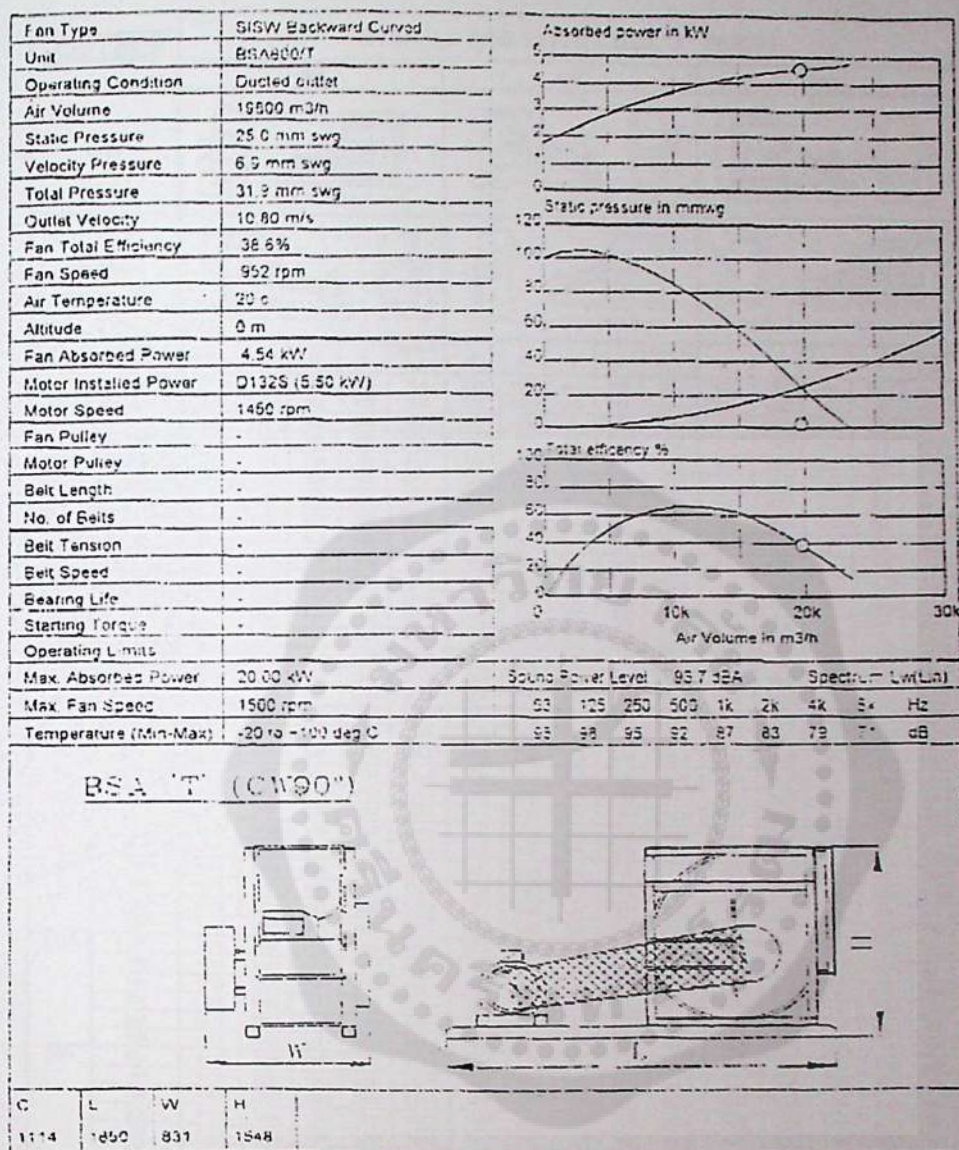
Geometrical moment of inertia $I = ar^2$
 Radius of gyration of area $i = \sqrt{I/a}$
 Modulus of section $Z = I/e$
 (a : sectional area)



Channel JIS G 3192

Standard Sectional Dimension mm					Reference									
HxB	t1	t2	r1	r2	Sectional Area cm ²	Unit Weight kg/m	Position of Centre of Gravity cm		Geometrical Moment of Inertia cm ⁴		Radius of Gyration of Area cm		Modulus of Section cm ³	
							Cx	Cy	Ix	Iy	ix	iy	Zx	Zy
75 x 40	5	7	8	4	8.818	6.92	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	9.36	0	1.54	188	26.0	3.97	1.48	37.6	7.52
125 x 65	6	8	8	4	17.11	13.4	0	1.90	424	61.8	4.98	1.90	67.8	13.4
150 x 75	6.5	10	10	5	23.71	18.6	0	2.28	861	117	6.03	2.22	115	22.4
150 x 75	9	12.5	15	7.5	30.59	24.0	0	2.31	1050	147	5.86	2.19	140	28.3
180 x 75	7	10.5	11	5.5	27.20	21.4	0	2.13	1380	131	7.12	2.19	153	24.3
200 x 80	7.5	11	12	6	31.33	24.6	0	2.21	1950	168	7.88	2.32	195	29.1
200 x 90	8	13.5	14	7	38.65	30.3	0	2.74	2490	277	8.02	2.68	249	44.2
250 x 90	9	13	14	7	44.07	34.6	0	2.40	4180	294	9.74	2.58	334	44.5
250 x 90	11	14.5	17	8.5	51.17	40.2	0	2.40	4680	329	9.56	2.54	374	49.9
300 x 90	9	13	14	7	48.57	38.1	0	2.22	6440	309	11.5	2.52	429	45.7
300 x 90	10	15.5	19	9.5	55.74	43.8	0	2.34	7410	360	11.5	2.54	494	54.1
300 x 90	12	16	19	9.5	61.90	48.6	0	2.28	7870	379	11.3	2.48	525	56.4
380 x 100	10.5	16	18	9	69.39	54.5	0	2.41	14500	535	14.5	2.78	763	70.5
380 x 100	13	16.5	18	9	78.96	62.0	0	2.33	15600	565	14.1	2.67	823	73.6
380 x 100	13	20	24	12	85.71	67.3	0	2.54	17600	655	14.3	2.76	926	87.8

ตารางภาคผนวกที่ 1.3 แสดงชนิดของพัดลม



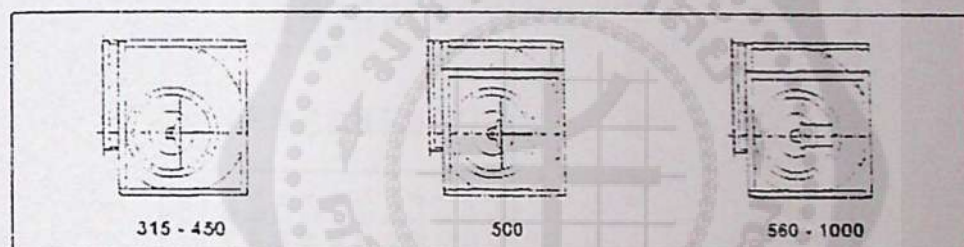
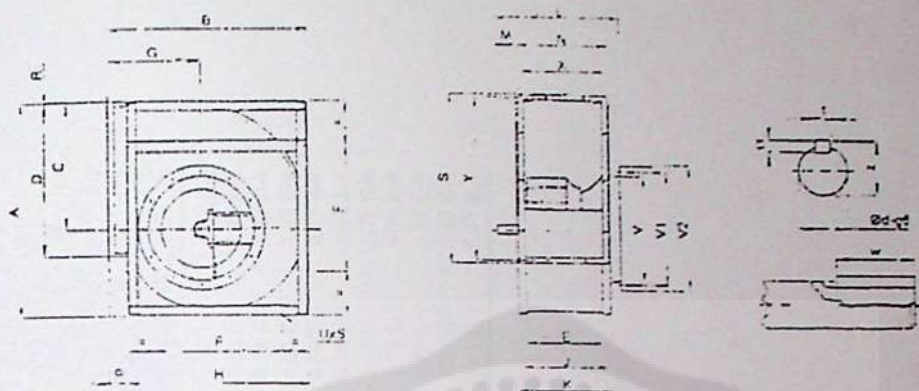
ตารางภาคผนวกที่ 1.4 แสดงการติดตั้งสำหรับพัดลมรุ่นต่าง ๆ

KAWASAKI		OVERALL DIMENSION - BSA "T" SERIES														
		90°					270°					360°				
CW																
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	525	1020	450	618	39.0	524	1020	450	618	39.0	532	1000	460	558	38.2
	132	615	1100	480	618	39.4	635	1100	480	618	39.4	578	1150	490	568	38.8
355	132	655	1180	498	684	50.0	663	1180	498	684	50.0	613	1250	498	618	50.4
	160	731	1300	498	684	50.2	742	1300	498	684	50.8	675	1400	498	618	51.1
400	132	703	1250	534	778	61.0	739	1250	534	778	61.0	698	1300	536	690	61.5
	160	768	1350	534	778	61.5	768	1350	534	778	61.5	717	1450	536	690	62.0
450	132	752	1300	573	867	65.9	800	1300	573	867	66.7	754	1400	573	706	66.4
	160	818	1450	573	867	66.7	854	1450	573	867	67.7	754	1550	573	706	67.2
500	120	864	1500	617	968	87.5	911	1500	617	968	87.5	811	1650	617	630	86.7
	160	929	1600	674	1080	111.3	967	1600	674	1080	111.3	870	1750	674	642	112.4
560	160	999	1700	708	1207	130.4	1025	1700	728	1227	130.4	949	1900	728	1048	132.0
	180	1078	1850	787	1382	221.5	1185	1850	787	1382	221.5	1011	2000	787	1200	223.3
710	180	1119	1950	787	1382	223.7	1201	1950	787	1382	223.7	1090	2100	787	1200	224.5
	200	1183	2000	787	1382	223.3	1234	2000	787	1382	223.3	1090	2200	787	1200	225.8
800	100	1051	1700	840	1548	261.3	1133	1700	840	1548	261.3	1003	1900	840	1334	262.6
	112	1074	1750	840	1548	261.9	1203	1750	840	1548	261.9	1022	1950	840	1334	264.4
1000	132	1113	1650	840	1548	263.1	1234	1650	840	1548	263.1	1054	2050	840	1334	265.8
	150	1170	1750	840	1548	264.4	1279	1750	840	1548	264.4	1108	2200	840	1334	267.4
1200	180	1212	2050	840	1548	265.8	1314	2050	840	1548	265.8	1143	2300	840	1334	268.7
	200	1255	2150	840	1548	266.8	1348	2150	840	1548	266.8	1182	2400	840	1334	269.2
1400	112	1166	1900	918	1728	320.3	1239	1900	918	1728	320.3	1130	2150	918	1468	323.8
	132	1223	2000	918	1728	321.7	1269	2000	918	1728	321.7	1162	2250	918	1468	324.8
1600	150	1278	2150	918	1728	323.6	1417	2150	918	1728	323.6	1210	2350	918	1468	325.9
	180	1320	2200	918	1728	324.2	1445	2200	918	1728	324.2	1248	2400	918	1468	327.3
2000	200	1351	2300	918	1728	325.4	1479	2300	918	1728	325.4	1282	2550	918	1468	328.1
	132	1318	2150	966	1890	371.4	1468	2150	966	1890	371.4	1250	2400	966	1820	374.5
2500	160	1378	2250	966	1890	372.7	1532	2250	966	1890	372.7	1305	2580	966	1820	376.4
	180	1418	2350	966	1890	373.9	1563	2350	966	1890	373.9	1339	2600	966	1820	377.0
3000	200	1457	2450	966	1890	375.1	1596	2450	966	1890	375.1	1375	2700	966	1820	378.2
	132	1425	2300	1151	2133	669.0	1617	2300	1151	2133	669.0	1340	2650	1151	1825	678.4
3500	150	1479	2450	1151	2133	673.1	1658	2450	1151	2133	673.1	1409	2750	1151	1825	681.1
	180	1518	2550	1151	2133	675.7	1688	2550	1151	2133	675.7	1440	2850	1151	1825	683.8
4000	200	1559	2650	1151	2133	678.4	1721	2650	1151	2133	678.4	1478	2950	1151	1825	686.5
	225	1611	2750	1151	2133	681.1	1753	2750	1151	2133	681.1	1522	3050	1151	1825	689.1
4500	250	1664	2850	1151	2133	683.8	1806	2850	1151	2133	683.8	1569	3150	1151	1825	691.8
	132	1578	2550	1289	2365	875.9	1807	2550	1289	2365	875.9	1510	2900	1289	2030	855.3
5000	160	1630	2650	1289	2365	885.8	1847	2650	1289	2365	885.8	1554	3000	1289	2030	866.9
	180	1659	2750	1289	2365	891.3	1876	2750	1289	2365	891.3	1587	3100	1289	2030	869.6
5500	200	1708	2850	1289	2365	893.9	1907	2850	1289	2365	893.9	1620	3200	1289	2030	893.3
	225	1754	2950	1289	2365	898.6	1948	2950	1289	2365	898.6	1664	3300	1289	2030	896.0
6000	250	1810	3050	1289	2365	899.3	1987	3050	1289	2365	899.3	1708	3400	1289	2030	899.7
	132	1778	2900	1395	2668	1164	2032	2900	1395	2668	1164	1710	3300	1395	2270	1175
6500	150	1813	3000	1395	2668	1167	2059	3000	1395	2668	1167	1742	3400	1395	2270	1178
	200	1861	3060	1395	2668	1169	2083	3060	1395	2668	1169	1773	3500	1395	2270	1180
7000	225	1898	3100	1395	2668	1172	2106	3100	1395	2668	1172	1817	3600	1395	2270	1183
	250	1949	3200	1395	2668	1175	2165	3200	1395	2668	1175	1861	3700	1395	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 1.5 แสดงขนาดของพัดลมรุ่นต่าง ๆ

BSA 315-1000 'T'



Model	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	Ød	UxS		
315	575	518	340	424	204	250	235	480	254	254	430	75	260	35	2	450	315	356	395	224	434	6	7	40	32	30	13x18
355	654	578	393	452	228	355	280	548	298	302	486	75	284	30	6	506	355	395	435	258	482	10	8	40	32	35	13x18
400	736	650	452	506	256	355	290	612	296	328	506	90	312	35	6	552	400	436	480	286	536	10	8	50	38	35	13x18
450	827	725	495	569	288	530	322	691	328	368	543	95	344	45	6	624	450	487	520	318	598	12	8	50	43	40	13x18
500	915	800	536	638	322	530	352	750	382	402	567	105	378	50	6	694	500	541	582	352	638	12	8	70	43	40	13x18
560	1030	892	602	714	350	530	390	844	410	480	644	114	416	48	7	770	560	605	648	390	744	14	8	70	53.5	50	13x18
630	1157	998	679	800	404	530	424	945	454	504	708	124	480	53	7	850	630	674	716	434	832	14	8	80	53.5	50	13x18
710	1302	1170	768	898	452	630	464	1057	502	552	757	134	500	63	7	954	710	751	792	482	928	14	8	90	53.5	50	17x22
800	1465	1254	852	1000	506	710	540	1150	556	606	810	134	562	74	7	1062	800	837	888	536	1036	14	9	90	53.5	50	17x22
900	1643	1428	971	1120	583	800	604	1315	616	668	886	145	624	85	7	1185	900	934	988	596	1180	16	11	90	64	50	17x22
1000	1810	1542	1069	1266	636	900	658	1450	652	716	954	145	684	90	8	1322	1000	1043	1098	652	1288	16	11	90	64	50	17x22

All Dimensions in mm

ตารางภาคผนวกที่ 1.6 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:

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

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

ตารางภาคผนวกที่ 1.7 แสดงการรับภาระของรอยเชื่อม

PLATE THICKNESS (t)	STRENGTH DESIGN	RIGIDITY DESIGN	
	FULL STRENGTH WELD ($a = 3/4$ in)	50% OF FULL STRENGTH WELD ($a = 3/8$ in)	33% OF FULL STRENGTH WELD ($a = 1/4$ in)
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 minimum

ตารางภาคผนวกที่ 1.8 แสดงขนาดของรอยเชื่อม

THICKNESS OF THICKER PLATE JOINED	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 1.9 แสดงค่าตัวประกอบ C_G, C_S, C_L

	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)	1	0.7 to 0.9	1
(0.4 in. or 10 mm) < diameter < (2 in. or 50 mm) ^b	0.9	0.7 to 0.9	0.9
C_S (surface factor)	See Fig. 8.13		
b. 10^3 -cycle strength ^c	$0.9S_u$	$0.75S_u$	$0.9S_{us}$ ^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 10^3 or 5×10^3 -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_u or S_{us} should pertain to sizes reasonably close to those involved.

^d $S_{us} = 0.8S_u$ for steel; $S_{us} = 0.75S_u$ for other ductile metals.

ตารางขนาดหน้า 1.10 แสดงคุณสมบัติของเบร้ง

จำนวน d mm	O.D. dia D mm	ขนาดหน้า 1.10										ขนาดหน้า 22				ขนาดหน้า 32			
		ความหนา B mm	Self-aligning Ball Bearing		Single-Row Deep-Groove Ball Bearing		Angular Contact Small Angle Ball Bearing		Angular Contact Steep Angle Ball Bearing		Cylindrical Roller Bearing		ความหนา B mm	Spherical Roller Bearing		ความหนา B mm	Double-Row Non-Filling Notch Ball Bearing		
			C ₀	C	C ₀	C	C ₀	C	C ₀	C	C ₀	C		C ₀	C		C ₀	C	
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	21	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	62.10	66.73	
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	69.86	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	85.44	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 1.11 แสดงคุณสมบัติของสกรูและน็อต

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

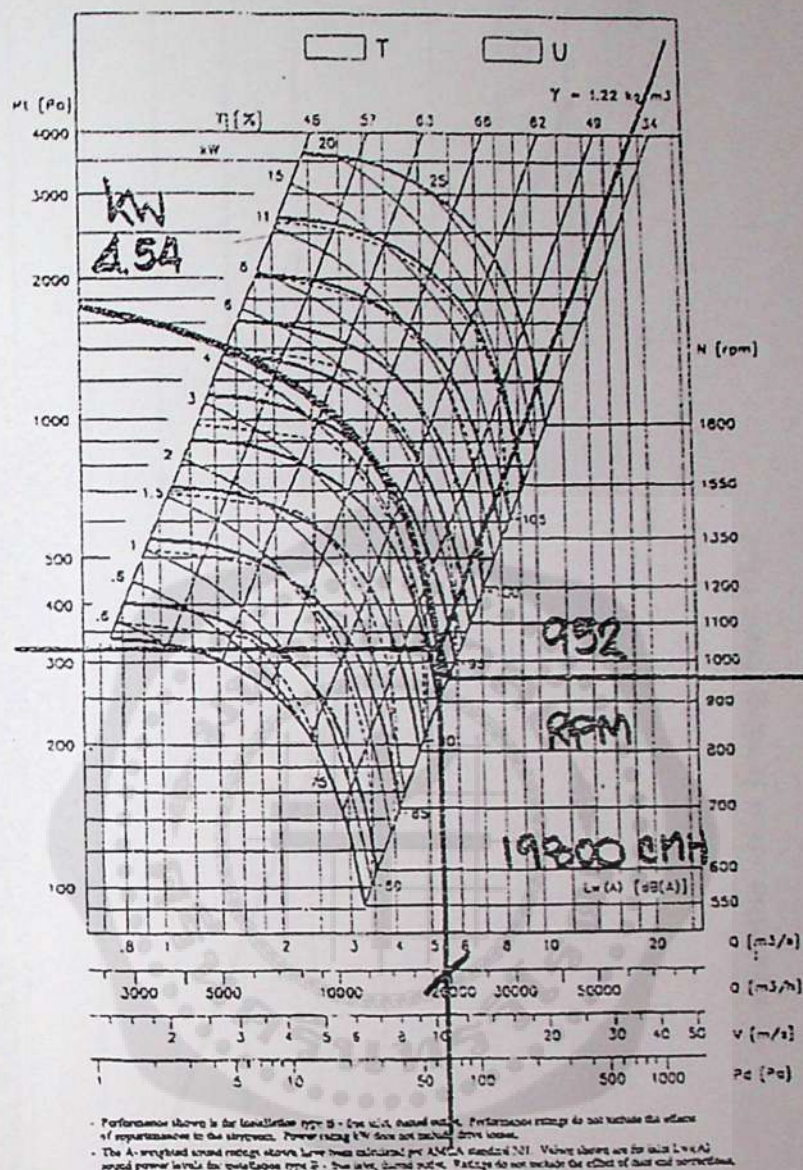
^aProof load (strength) corresponds to permanent deformation not over 0.0025 mm measured on actual bolts.

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

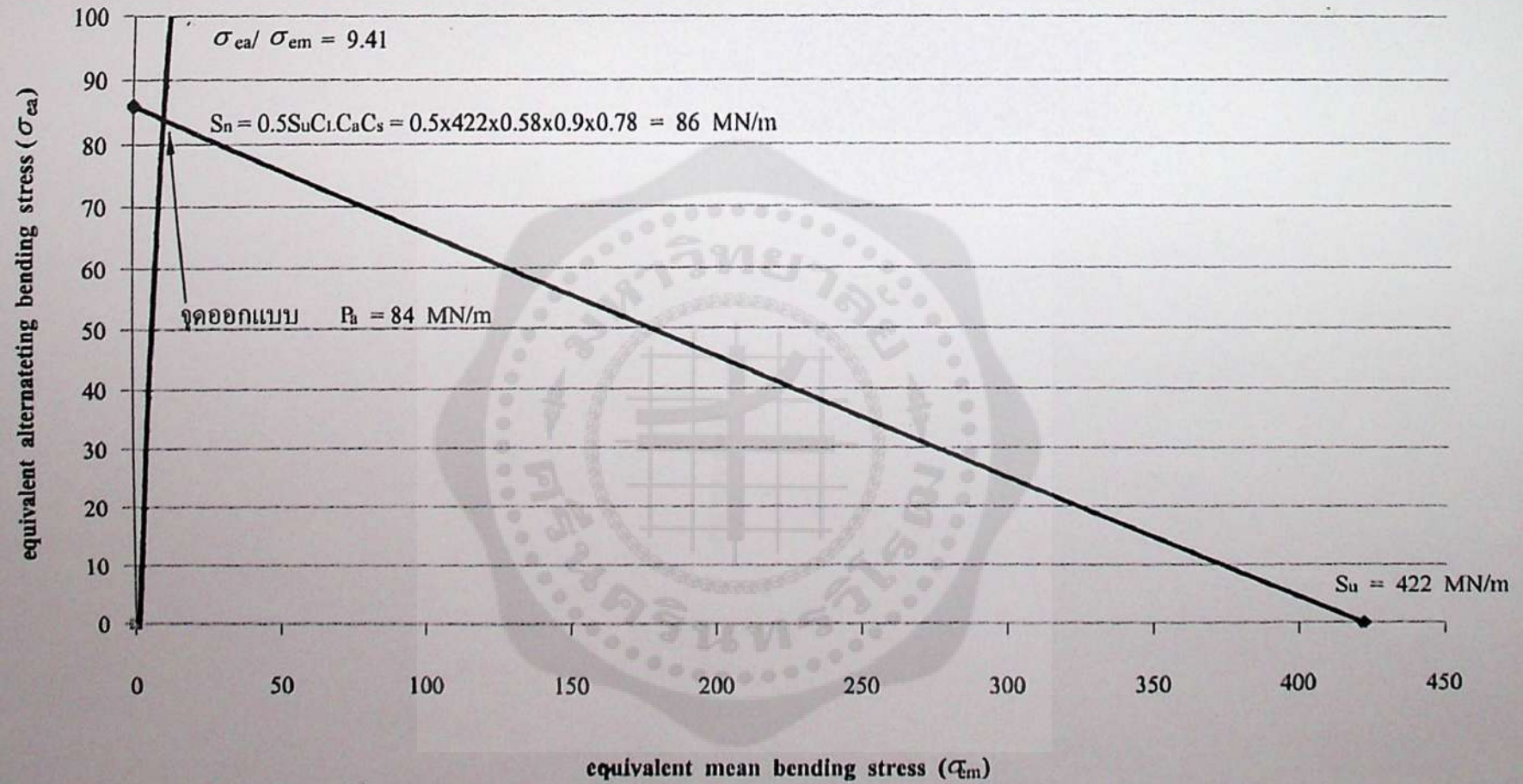
Source: Society of Automotive Engineers standard J1199 (1979).

ตารางภาคผนวกที่ 1.12 แสดงการเลือกขนาดของน็อต

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่างรู		ระยะพิตช์ P	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ d_2, D_2	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งกลางน้อย		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
16.00	14.00	2.00	12.701	11.546	11.835	115.000
		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
30.00	27.00	3.00	25.051	23.319	23.752	459.000
		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
48.00	45.00	4.50	42.077	39.479	40.129	1300.000
		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 แสดงการหาคุณสมบัติของพัดลม



รูปภาคผนวกที่ 1.3 แสดงการหาจุดออกแบบของเพลลา



ภาคผนวกที่ 2



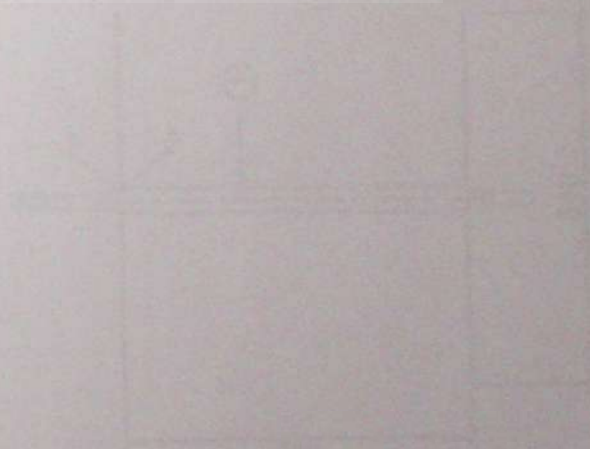
รูปภาคผนวกที่ 2.1 แสดงการปรับความเร็วรอบของกังหันเพื่อหาค่าการกระทำ

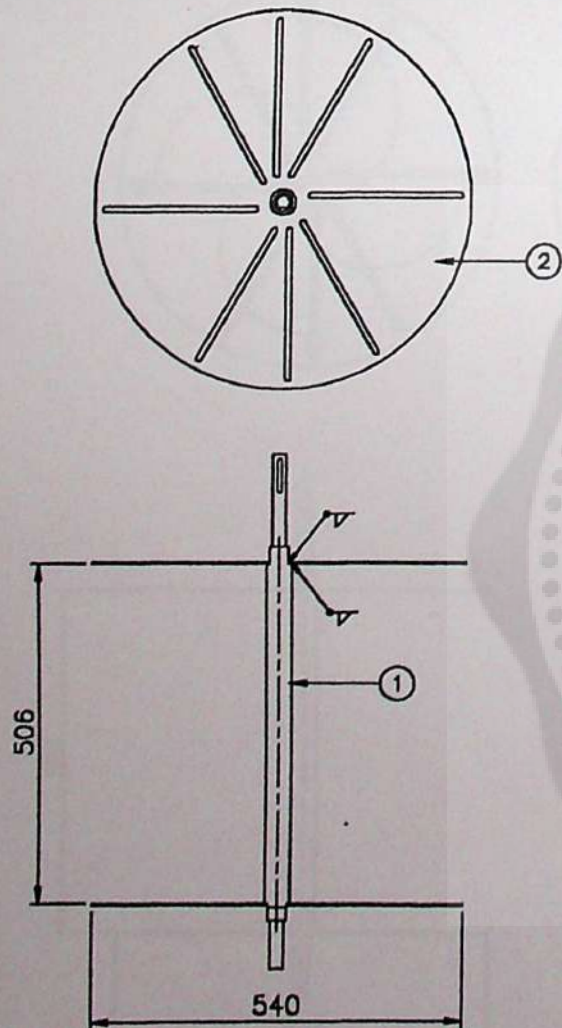


รูปภาพผนวกที่ 2.2 แสดงการติดตั้งกังหันเข้ากับตัวแทน

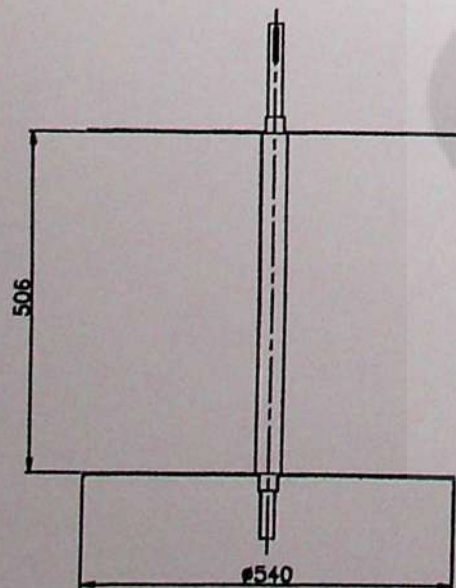
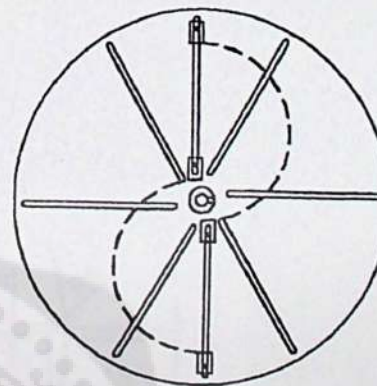
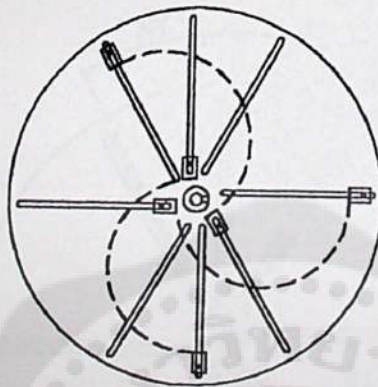
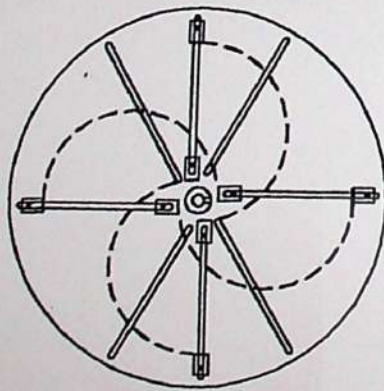


รูปภาคผนวกที่ 2.3 แสดงกังหันพร้อมกับแท่น และไดนาโมมิเตอร์

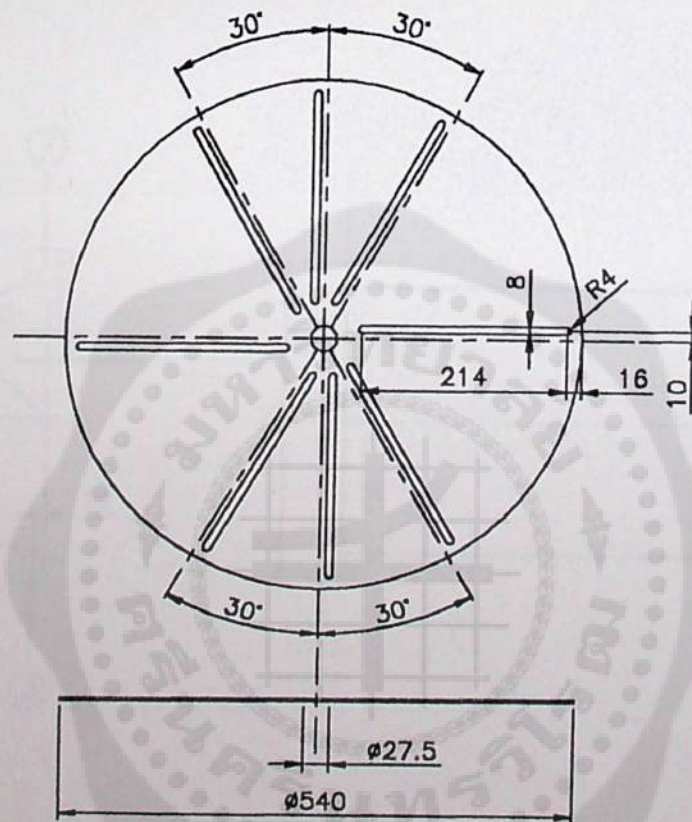




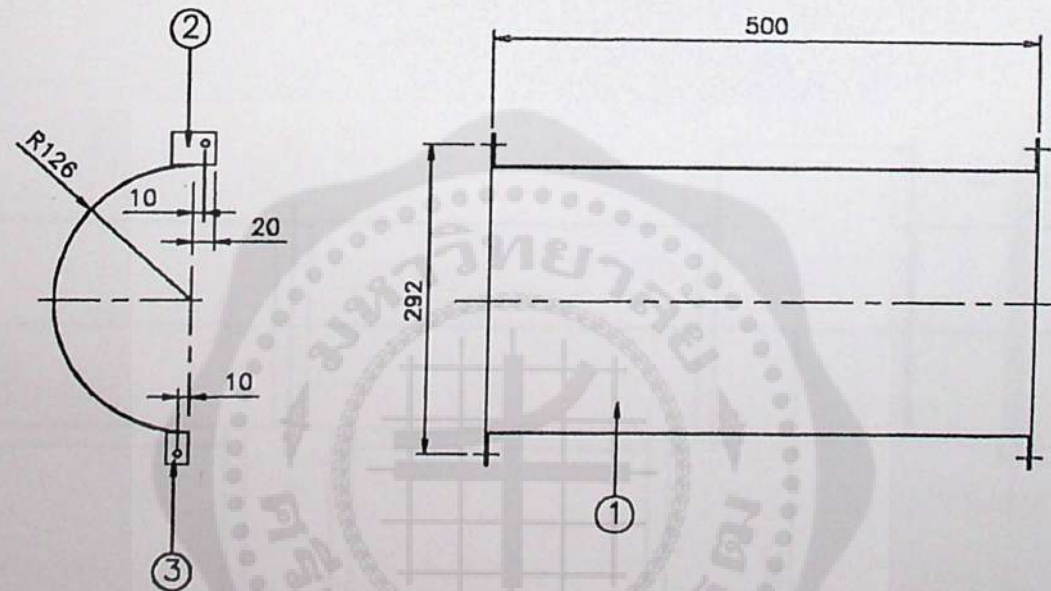
2.	2	SPHC 13.2		JIS	
1.	1	Rotor shaft, SC20B-D Dalmeter 35 mm		JIS	
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, วัสดุ, ขนาด		มาตรฐาน	
ผู้เขียน นาย	ผู้ตรวจ นาย	ผู้อนุมัติ อ.บัญชา คังตระกูล	ชื่อแฟ้ม	วันที่ 19/12/1999	มาตราส่วน 1:11
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์			การศึกษาสมรรถนะของกังหันลมชาโงเนียส		
			หมายเลขแบบ ME2000-001	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่



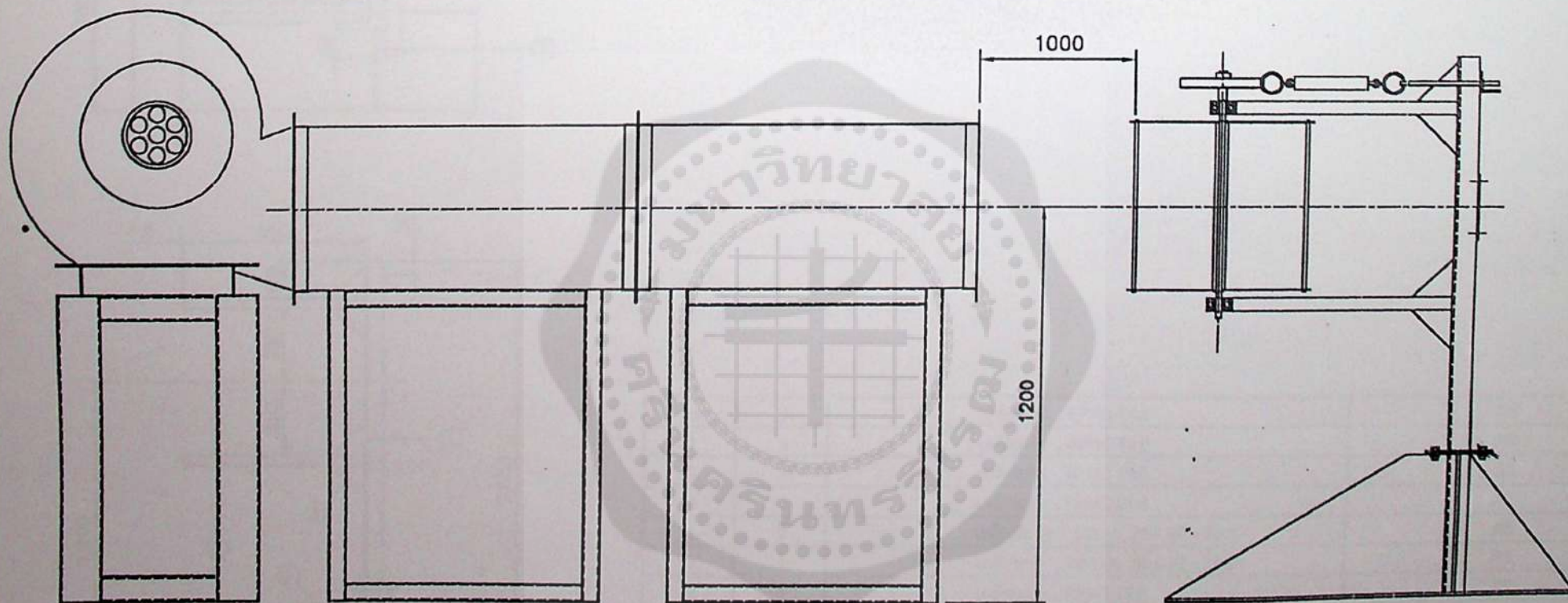
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, วัสดุ, ขนาด			มาตรฐาน	
ผู้เขียน นาย	ผู้ตรวจ นาย	ผู้อนุมัติ อ.ปัญญา หังตระกูล	ชื่อแฟ้ม	วันที่ 19/12/1999	มาตราส่วน 1:11	
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์			การศึกษามรรณนะของกังหันลมชาโวเนียด			
			หมายเลขแบบ ME2000-000		แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่



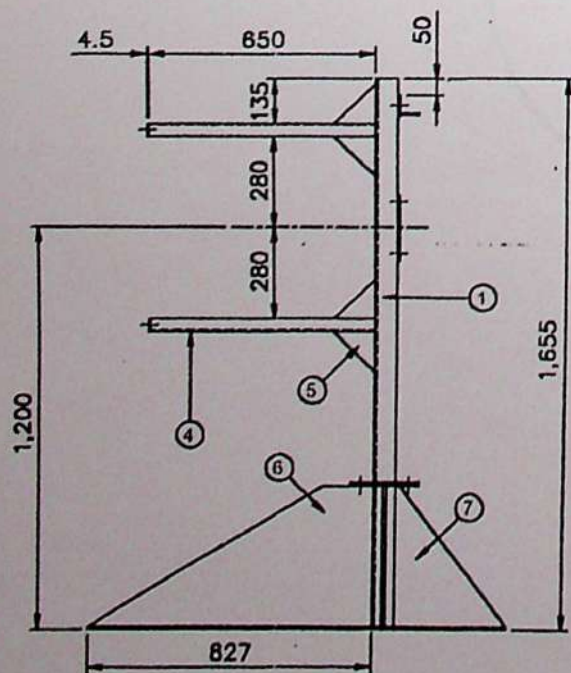
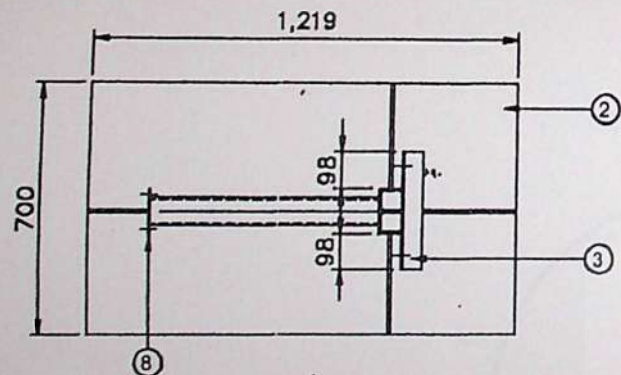
1.	2	SPHC 13.2			JIS	
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, วัสดุ, ขนาด			มาตรฐาน	
ผู้เขียน นาย		ผู้ตรวจ นาย	ผู้อนุมัติ อ.บัญชา กังตระกูล	ชื่อเพิ่ม	วันที่ 19/12/1999	มาตราส่วน 1:8
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์				การศึกษามรรณะของกังหันลมชาโวเนียส		
				หมายเลขแบบ ME2000-001-001		แก้ไขครั้งที่



3.	2	SPHC 11.6			JIS
2.	2	SPHC 11.6			JIS
1.	1	SPHC 11.6			JIS
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, วัสดุ, ขนาด			มาตรฐาน
ผู้เขียน นาย	ผู้ตรวจ นาย	ผู้อนุมัติ อ.บัญชา คังตระกูล	ชื่อแฟ้ม	วันที่ 19/12/1999	มาตราส่วน 1:7
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์			การศึกษามรรณนะของกังหันลมชาโวเนียด		
			หมายเลขแบบ ME2000-002	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่

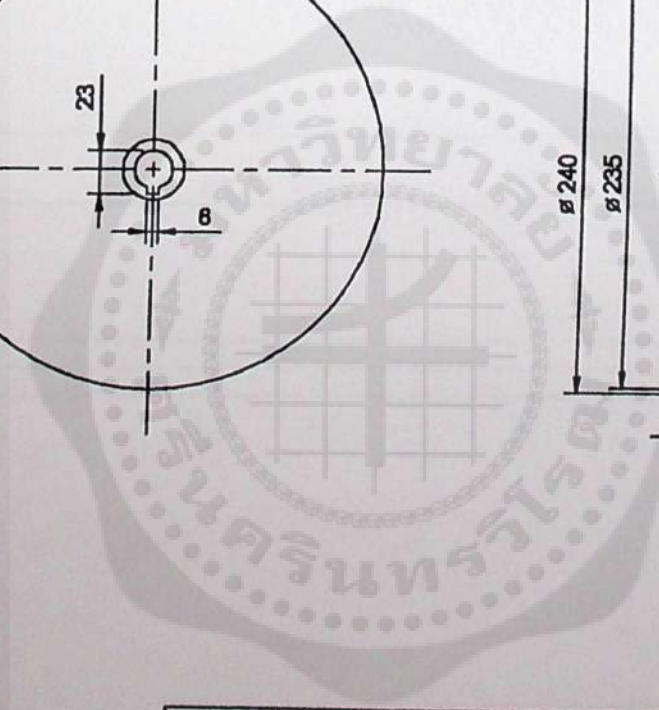


ผู้เขียน นายเหมันต์	ผู้ตรวจ นายอดิเรก	ผู้อนุมัติ อ.บัญชา คังตระกูล	ชื่อแฟ้ม	วันที่ 19/12/1999	มาตราส่วน 1:18
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์			การศึกษามรรคนะของกังหันลมชาโวเนียส		
			หมายเลขแบบ MF1999-001	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่ 1



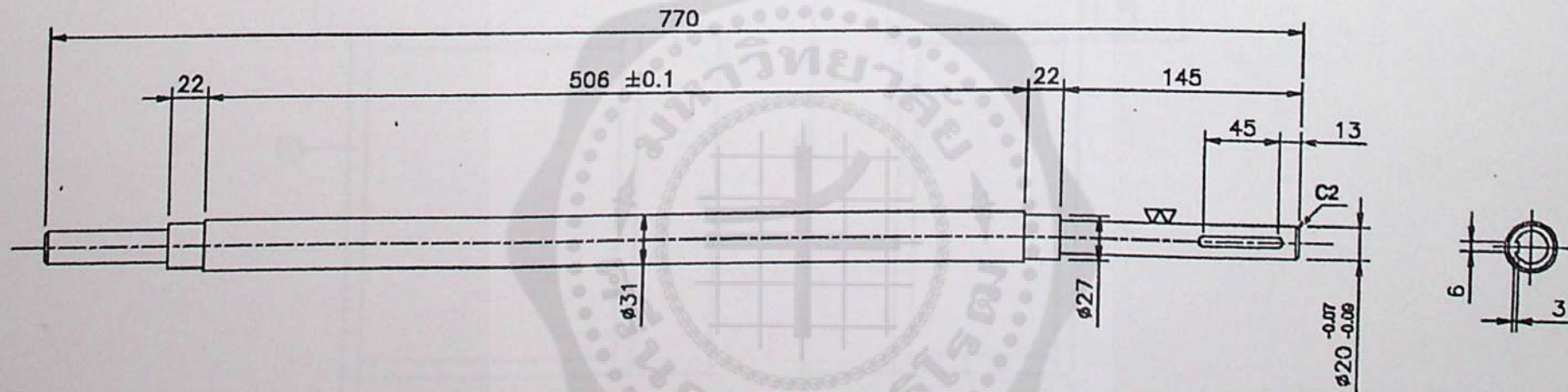
8.	2	เหล็กแผ่น , SPHC T4.5	JIS
7.	3	เหล็กแผ่น , SPHC T9.0	JIS
6.	1	เหล็กแผ่น , SPHC T9.0	JIS
5.	4	เหล็กแผ่น , SPHC T4.5	JIS
4.	2	เหล็กตัว U , STKU , 75 x 40 x T5.0	JIS
3.	1	เหล็กฉาก , SS41A , 50 x 50 x T6.0	JIS
2.	1	เหล็กแผ่น , SPHC T9.0	JIS
1.	1	เหล็กตัว U , STKU , 125 x 65 x T7.0	JIS
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ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

ผู้เขียน นายเหม็นด์	ผู้ตรวจ นายสุวิทย์	ผู้อนุมัติ อ.บัญชา คงตระกูล	ชื่อแฟ้ม	วันที่ 19/12/1999	มาตราส่วน 1:22
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์			การศึกษาสมรรถนะของกังหันลมชาโวนีเยส		
			หมายเลขแบบ ME1999-004	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่

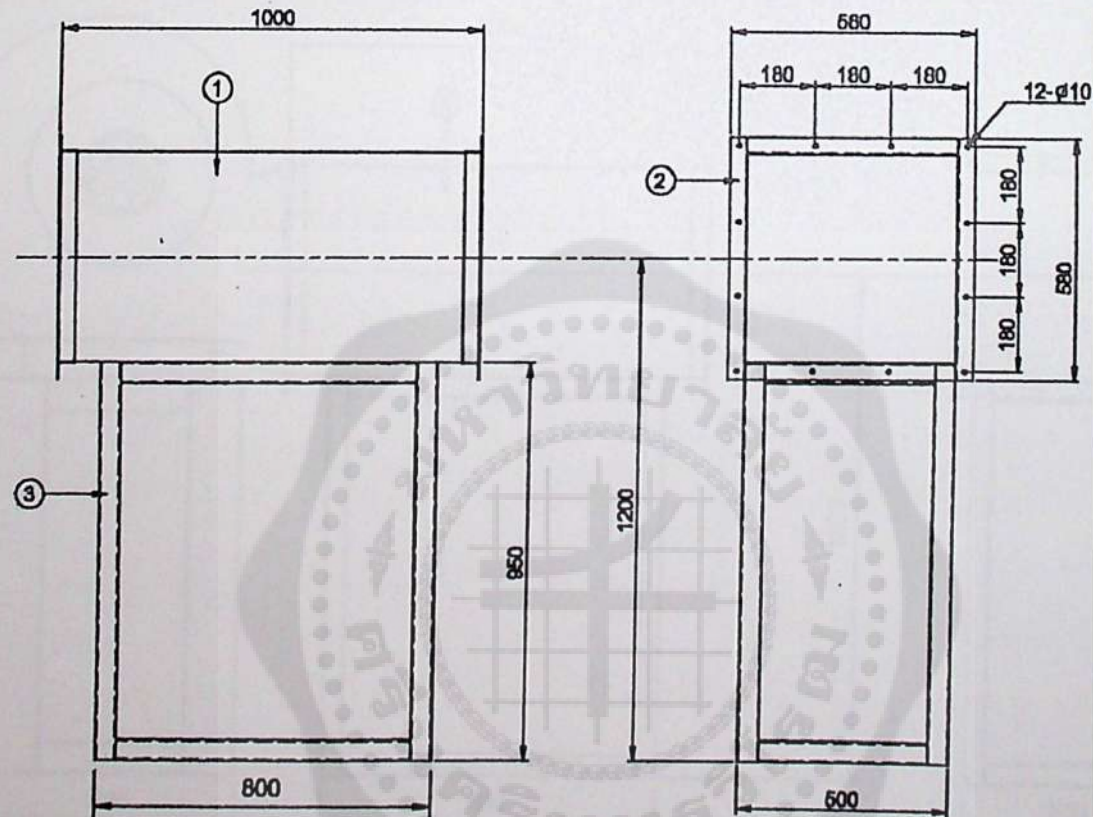


1.	1	Pulley dynamometer, cast iron FG20			JIS	
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, วัสดุ, ขนาด			มาตรฐาน	
ผู้เขียน นายเหลนัท	ผู้ตรวจ นายเหลนัท	ผู้อนุมัติ อ.ปัญญา คงตระกูล	ชื่อแท้ม	วันที่ 19/12/1990	มาตราส่วน 1:4	
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์			การศึกษาดมรรถนะของกังหันลมชาโวนีเยส			
			หมายเลขแบบ ME1990-005	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่	

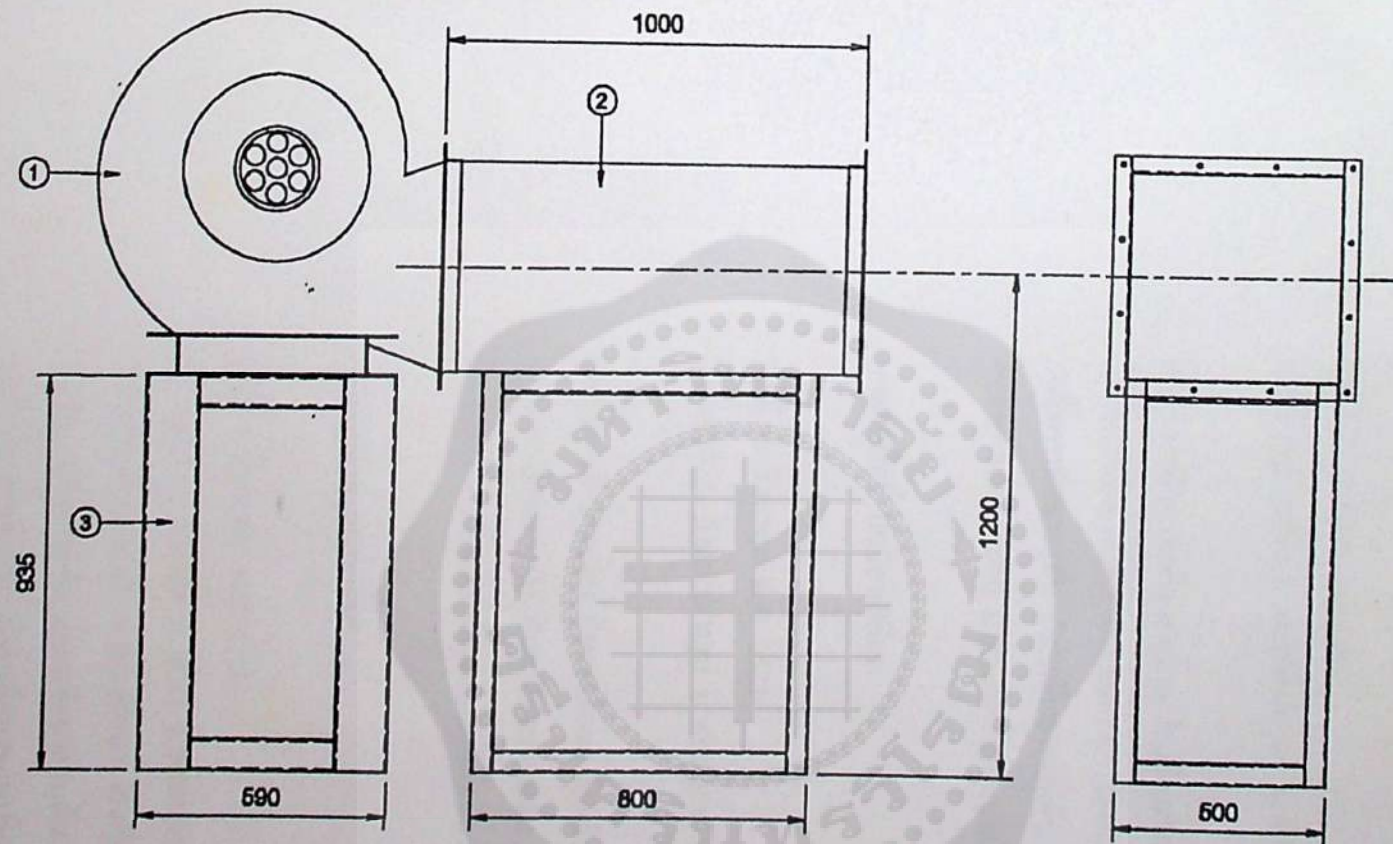
▽(▽▽)



1.	1	Rotor shaft, SC20B-D 35				JIS	
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, วัสดุ, ขนาด				มาตรฐาน	
ผู้เขียน นายเทวินท์		ผู้ตรวจ นายเทวินท์	ผู้อนุมัติ อ.ปัทมา คงตระกูล		ชื่อแท้ม	วันที่ 19/12/1999	มาตราส่วน 1:4
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์					การศึกษาสมรรถนะของกังหันลมชาโงเนียต		
					หมายเลขแบบ ME1999-008		แก้ไขครั้งที่



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 นายเหม็นต์		ผู้ตรวจ นายอดิเทพ	ผู้อนุมัติ อ.บัญชา คงตระกูล	ชื่อแท้ม	วันที่ 19/12/1990	มาตราส่วน 1:18
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์				การศึกษาศมรรถนะของกังหันลมชาโงเนียบต		
				หมายเลขแบบ ME1990-003	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่



3.	1	Blower stand			
2.	2	Square pipe			
1.	1	Blower, 5 HP, 380 Volt			
คำค้น	จำนวน	ชื่อ, วัสดุ, ขนาด			
ผู้เขียน นายเหว้นต์	ผู้ตรวจ นายอดิเรก	ผู้อนุมัติ อ.ปัญญา คงตระกูล	ชื่อพื้นที่	วันที่ 19/12/1999	มาตราส่วน 1:18
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์			การศึกษาศมรรถนะของกังหันลมชาโงเนียต		
			หมายเลขแบบ ME1890-002	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่

ประวัติผู้จัดทำโครงการนิทรรศการ

1. ชื่อ นายจักรินทร์ ภาพจิตรศิลป์
ประวัติ
เกิด วันที่ 30 เมษายน พ.ศ. 2521
ที่อยู่ปัจจุบัน 148/2 หมู่ 1 ซอย 3 ถ. พิชัยพัฒนา ต. พิชัย อ. เมือง จ. ลำปาง 52000
ประวัติการศึกษา
พ. ศ. 2527 สำเร็จการศึกษาระดับอนุบาล โรงเรียนอัสสัมชัญ ลำปาง
พ.ศ. 2533 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา โรงเรียนอัสสัมชัญ ลำปาง
พ.ศ. 2536 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนมัธยมวิทยา ลำปาง
พ.ศ. 2539 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนบุญวาทย์วิทยาลัย
2. ชื่อ นายเศกสิทธิ์ ปกป้องเสถียร
ประวัติ
เกิด วันที่ 16 สิงหาคม พ.ศ. 2521
ที่อยู่ปัจจุบัน 19 หมู่ 6 ต. คำแหง อ. พยุห์ จ. ศรีสะเกษ 33230
ประวัติการศึกษา
พ.ศ. 2533 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา โรงเรียนบ้านอะลองหัวขัว
พ.ศ. 2536 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนศรีสะเกษวิทยาลัย
พ.ศ. 2539 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนศรีสะเกษวิทยาลัย
3. ชื่อ นายสุรเชษฐ์ กลมเกลี้ยง
ประวัติ
เกิด วันที่ 1 ธันวาคม พ.ศ. 2520
ที่อยู่ปัจจุบัน 67 หมู่ 7 ต. หัวเวียง อ. เสนา จ. พระนครศรีอยุธยา 13110
พ.ศ. 2533 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา โรงเรียนราษฎร์บำรุงศิลป์
พ.ศ. 2536 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนราษฎร์บำรุงศิลป์
พ.ศ. 2539 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนอยุธยาวิทยาลัย