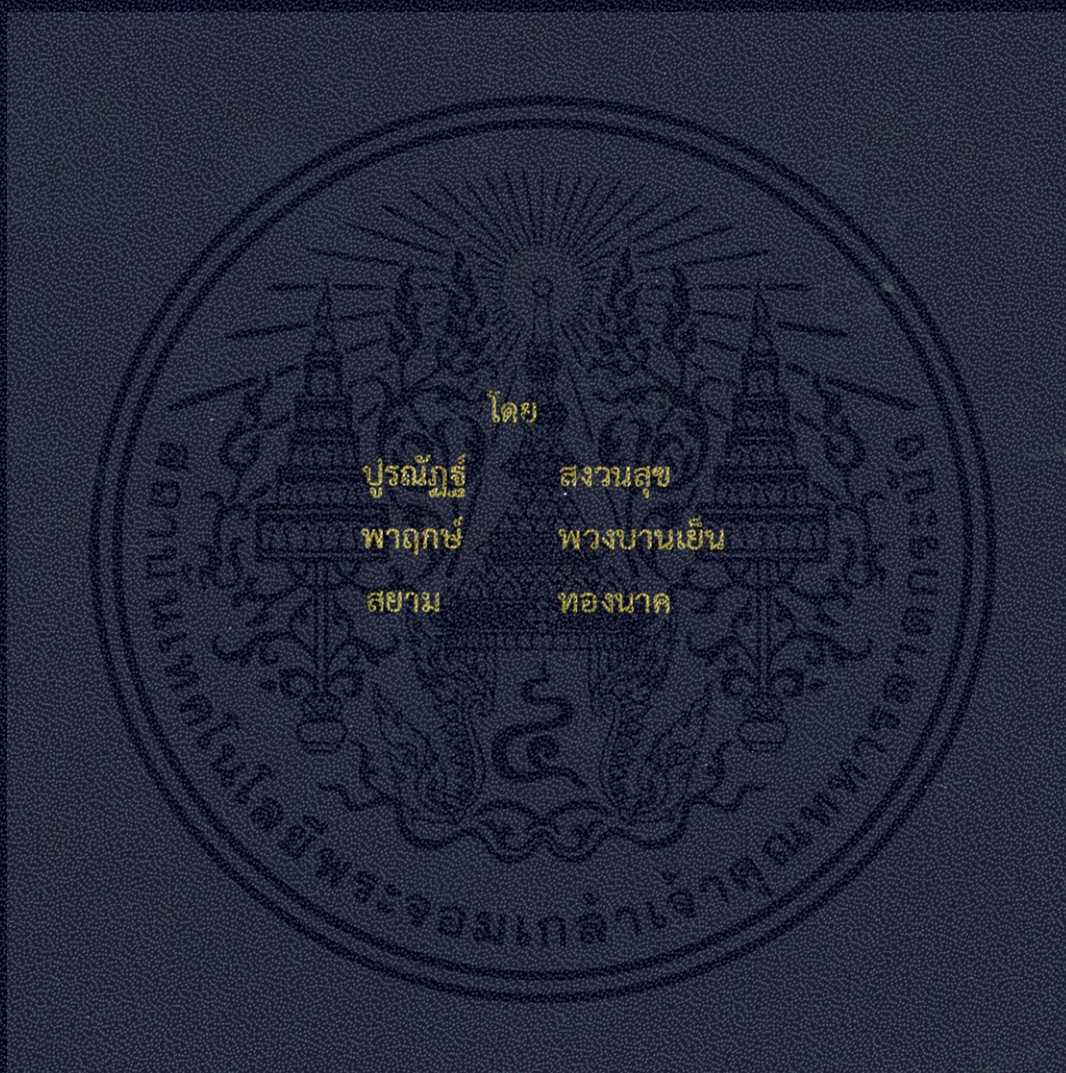


ศูนย์ทดแทนพลังงานเพื่ออนาคต : การพิสูจน์และสร้างระบบบริหารจัดการพลังงานลม
FUTURE RENEWABLE CENTER : Verification and Implementation of Wind
Energy System



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

ศูนย์ทดแทนพลังงานเพื่ออนาคต: การพิสูจน์และสร้างระบบบริหารจัดการพลังงานลม
FUTURE RENEWABLE CENTER : Verification and Implementation of Wind
Energy System



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าคณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ **ปีการศึกษา 2556** นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FUTURE RENEWABLE CENTER : Verification and Implementation
of Wind Energy System



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2013

ปีการศึกษา 2556

ศูนย์ทดแทนพลังงานเพื่ออนาคต: การพิสูจน์และสร้างระบบบริหารจัดการพลังงานลม
FUTURE RENEWABLE CENTER : Verification and Implementation of Wind
Energy System



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. ชาย ชมภูอินไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ศูนย์พลังงานทดแทนเพื่ออนาคต ศูนย์ทดแทนพลังงานเพื่ออนาคต: การพิสูจน์และสร้างระบบบริหารจัดการพลังงานลม

ผู้จัดทำ



1. นาย ปุณณัฐ สวงสุข
2. นาย พากษ์ พวงบานเย็น
3. นาย สยาม ทองนาค

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาย ชมภูอินไหว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์ทดแทนพลังงานเพื่ออนาคต: การพิสูจน์และสร้างระบบบริหารจัดการพลังงานลม

นาย ปุรณัฐ สวงนสุข
นาย พาทักษ์ พวงบานเย็น
นาย สยาม ทองนาค
ผศ.ดร. ชาย ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอการเลือกกังหันลมแบบต่างๆ เพื่อนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการ Future Renewable Center โดยได้ทำการเปรียบเทียบกังหันลม ทั้งแบบแนวนอนและแนวตั้ง ในพิกัดกำลัง 10kW เพื่อการเลือกกังหันลมจากท้องตลาด ไม่ว่าจะเป็นการเปรียบเทียบเทคโนโลยี, ราคา และประสิทธิภาพของใบพัดกังหันลมแนวนอน ระหว่างใบพัดธรรมดา 3 ใบ กับใบพัดนาเกลือ ว่าใบพัดจำนวนเท่าใด ที่เหมาะสมสำหรับความเร็วลมในประเทศไทย ทั้งยังทำการศึกษารูปแบบ Airfoil ของใบพัดกังหันลม และเสา ที่เหมาะสมกับพื้นที่ในการติดตั้งของโครงการ Future Renewable Center อีกด้วย

FUTURE RENEWABLE CENTER : Verification and Implementation of Wind Energy System

Mr. PHURANAT SANGUANSUK
Mr. PALERCK PUANGBANYEN
Mr. SIAM THONGNAK
Asst.Prof. Dr.Chai Chompoo-inwai Supervisor
Year 2013

ABSTRACT

The objective of this thesis is to present the method of choosing wind turbine's technology for using in Future Renewable Center. This thesis compares two types of wind turbine at 10kW, both Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) and Vertical Axis Wind Turbine (VAWT). The factors that we use for considering the wind turbines from each company are technology, price and power curve. We study the efficiency of Horizontal Wind Turbine between Three Blade and Windmill's Blade to confirm what number of blades is suitable for wind speed in Thailand. Moreover, we compare the series of Airfoil of wind turbine blades , and choose tower and foundation that suitable for the area in Future Renewable Center.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ โดยได้รับความอนุเคราะห์อย่างยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาย ชมภูอินทไหว ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ความกรุณาให้คำปรึกษา ข้อคิดเห็นและคำแนะนำ ตลอดทั้งตรวจสอบแก้ไขเนื้อหา รูปแบบ ข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้องมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ที่ได้รับ จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการทำโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ลมและความเร็วลม	6
2.2 นิยามพลังงานลม	7
2.3 การวิเคราะห์ความเร็วลมโดยใช้แบบจำลองทางสถิติ	7
2.4 หลักการทำงานของกังหันลม	8
2.5 ประเภทของกังหันลม	12
2.5.1 กังหันลมแนวแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine)	12
2.5.2 กังหันลมแนวแกนนอน (Horizontal Axis Wind Turbine)	14
2.6 ชนิดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอน	15
2.6.1 กังหันลมแบบความเร็วคงที่ (fixed speed turbine)	15
2.6.2 กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ (variable speed)	15
2.7 ข้อดี ข้อเสียของกังหันลมแกนตั้ง และกังหันแกนนอน	17
2.8 ส่วนประกอบของระบบกังหันลมขนาดใหญ่สำหรับผลิตไฟฟ้า	18
2.9 ผลกระทบของการใช้กังหันลม	20
2.10 ขนาดของกังหันลม	21
2.11 ชนิดของดินและดินที่เหมาะสมกับติดตั้งสิ่งปลูกสร้าง	24
2.11.1 ประเภทของดินแบ่งตามสภาพพื้นที่	24
2.11.2 ประเภทของดิน แบ่งตามความลึกของดิน	24
2.11.3 ประเภทของดิน แบ่งตามวัสดุที่เป็นองค์ประกอบในดิน	25
2.11.4 ประเภทของดินแบ่งตามพัฒนาการ	26
2.11.5 ประเภทของดิน แบ่งตามเนื้อดิน (ดินร่วน-ดินเหนียว-ดินทราย)	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.12 ทฤษฎีเรื่อง Bending moment	27
2.12.1 การทดสอบแรงดัดโค้ง	27
2.12.2 พฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงดัด	27
2.12.3 Bending Strength	28
2.12.4 หลักการในการทดสอบการดัดโค้ง	28
2.12.5 การพิจารณาว่าขึ้นทดสอบผ่านการทดสอบการดัดโค้ง	29
2.13 ชนิดของเส้ำกึ่งหันทลม	30
2.13.1 เสาโมโนโพล (Monopole Towers)	30
2.13.2 เสาแลคติก (Lattice Towers)	31
2.13.3 เสากริด-ไว (Guyed-Wire Towers)	31
2.14 Reynold Number	32
2.15 ประสิทธิภาพในด้านอากาศพลศาสตร์ของกึ่งหันทลมแนวนอน	34
2.15.1 ทฤษฎีโมเมนตัมตามแกนหน้าที่ของกึ่งหันท	35
2.15.2 ทฤษฎีโมเมนตัมของร่องอากาศที่หมุน	37
2.15.3 ทฤษฎีองค์ประกอบของใบพัด	40
2.15.4 ทฤษฎีสตรีป	42
2.16 ทฤษฎี Betz	45
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	48
3.1 Flow chart การทำงาน	48
3.2 การทำงานของกึ่งหันทลม 3 เฟส	50
3.3 ระบบควบคุมกึ่งหันทลม	50
3.4 การเลือกจำนวนใบพัด	51
3.5 ข้อดี ข้อเสียระหว่างใบพัดแบบทั่วไปของกึ่งหันทลมแนวนอน กับใบพัดของกึ่งหันทลมแบบ	51
นาเกลื่อ	51
3.6 ขั้นตอนการเลือกเทคโนโลยีของกึ่งหันทลมในท้องตลาดให้เหมาะสมกับการติดตั้งใน	52
ประเทศไทย	52
3.7 ความสำคัญในการเลือกใช้ใบพัดของกึ่งหันทลม	56
3.8 การเลือกรูปแบบ Airfoil จากค่า Reynolds Number	57
3.9 ปัจจัยการสูญเสียที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ทางพลังงาน	59
3.10 การคำนวณแรงลมที่กระทำต่อกึ่งหันทลม	62
3.10.1 การคำนวณแรงลม	63
3.10.2 การคำนวณแรงลมโดยวิธีแรงสถิตตามข้อกำหนดของ Uniform Building	64
Code, UBC-1994	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 สรุปผลการดำเนินงาน	68
4.1 เปรียบเทียบเทคโนโลยีและประสิทธิภาพของกังหันลมที่นำมาใช้ในโครงการ	68
4.2 การคำนวณ Bending Moment	73
4.3 ออกแบบฐานราก	79
4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพใบพัดใน Airfoil แบบต่างๆ	82
บทที่ 5 สรุป	94
เอกสารอ้างอิง	97
ภาคผนวก	100
ภาคผนวก ก ข้อมูลดิน	101
ภาคผนวก ข ข้อมูลอุปกรณ์	107
ภาคผนวก ค ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม	119
ภาคผนวก ง บทความวิชาการ	145
ประวัติผู้เขียน	150

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 อะนิโมมิเตอร์	6
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับระดับความสูง และกับกำลังงานต่อพื้นที่	8
2.3 การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในอุดมคติของกังหันลม	9
2.4 การเปลี่ยนรูปพลังงานในระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า	12
2.5 ชนิดของกังหันลมแนวตั้ง	13
2.6 กังหันลมแบบซาโวเนียสโรเตอร์, กังหันลมแบบดาเรียสโรเตอร์, และกังหันลมแบบ H-rotor	13
2.7 กังหันลมชนิด Helix Wind	14
2.8 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอน	14
2.9 ชนิดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอน	16
2.10 ส่วนประกอบสำคัญของกังหันลมแนวแกนนอน	18
2.11 ส่วนประกอบสำคัญของกังหันลมแนวแกนตั้ง	19
2.12 กังหันลมขนาด 200W	21
2.13 กังหันลมขนาด 300W	21
2.14 กังหันลมขนาด 500W	22
2.15 กังหันลมขนาด 1kW	22
2.16 กังหันลมขนาด 2kW	22
2.17 กังหันลมขนาด 5kW	22
2.18 กังหันลมขนาด 10kW	23
2.19 กังหันลมขนาด 20kW	23
2.20 ลักษณะของดินลิก-ลิกมากเปรียบเทียบกับดินตื้นมาก	25
2.21 ลักษณะดินอินทรีย์เปรียบเทียบกับดินอินทรีย์	25
2.22 การเปรียบเทียบระหว่าง ดินมีการพัฒนาน้อยกับดินมีพัฒนาการมาก	26
2.23 ลักษณะของ ดินเหนียว, ดินร่วน และดินทราย	26
2.24 วัสดุในทางวิศวกรรมที่ใช้ในการทดสอบแรงตัดโค้ง	27
2.25 พฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงตัด	28
2.26 หลังการทดสอบแรงตัดโค้ง	29
2.27 ลักษณะการแตกของวัสดุ	29
2.28 Monopole Towers	30
2.29 Lattice Towers	31
2.30 Guyed-wire Towers	32
2.31 ลักษณะการเคลื่อนที่ของของไหล ที่ค่า Reynolds Number ต่างๆ	33
2.32 การควบคุมปริมาณของกังหันลม	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.33 Flow Diagram ของกังหันลม	38
2.34 แสดงองค์ประกอบของใบพัดโรเตอร์	38
2.35 รูปโคเนของใบพัด	40
2.36 รูปของไดอะแกรมความเร็ว	41
2.37 ขนาดรูปร่างและมุมบิดของใบพัด	45
2.38 เอลิเมนต์ของใบพัด	45
2.39 มุมต่างๆ	46
2.40 แรงที่เกิดขึ้นกับใบพัด	46
2.41 ทิศทางมุม และพื้นที่เล็กๆบนใบพัด	47
3.1 Flow chart การทำงาน	49
3.2 ระบบควบคุมการทำงานของกังหัน 3 เฟส	50
3.3 วงจรเรกติไฟายเออร์ของระบบควบคุมกังหัน	51
3.4 ตัวอย่างกังหันลมนานาเกลือ เพื่อการสูบน้ำ	52
3.5 Power Curve ของกังหันลมแนวนอนของเทคโนโลยีบริษัทที่ 1	54
3.6 ตัวอย่างของกังหันลมแนวนอนขนาด 10kW ของเทคโนโลยีบริษัทที่ 1	55
3.7 Power Curve ของกังหันลมแนวนอนขนาด 10kW ของเทคโนโลยีบริษัทที่ 1	56
3.8 ตัวอย่างของกังหันลมแนวนอนขนาด 10kW ของเทคโนโลยีบริษัทที่ 1	56
3.9 ลมไหลเข้าปะทะ และไหลออกจากโรเตอร์	60
3.10 การเกิดการหมุนวนทางด้านหลังของโรเตอร์	60
3.11 ลมที่ไหลออกที่ปลายใบ	61
3.12 ค่าสัมประสิทธิ์พลังงาน	61
3.13 แนะนำการเลือกใช้ Tip speed ratio	62
3.14 พฤติกรรมของแรงลมที่กระทำต่ออาคาร	63
3.15 แรงลมที่กระทำต่อหลังคารูปจั่ว	66
3.16 ค่าแรงลมตาม พ.ร.บ.ควบคุมอาคาร พ.ศ.2522	67
4.1 การเปรียบเทียบ Power Curve ของเทคโนโลยีในแต่ละบริษัท	68
4.2 Power Curve ของเทคโนโลยีบริษัทที่ 2	69
4.3 เพอร์เซ็นต์ Cf ของเทคโนโลยีบริษัทที่ 2	69
4.4 Power Curve ของเทคโนโลยีบริษัทที่ 2	70
4.5 เพอร์เซ็นต์ Cf ของเทคโนโลยีบริษัทที่ 2	71
4.6 Power Curve ของ Purpose	71
4.7 เพอร์เซ็นต์ Cf ของ Purpose	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 แผนที่ความเร็วลมอ้างอิง	74
4.9 การคำนวณ Bending Moment ที่ จุด X	75
4.10 Bending moment diagram	76
4.11 Free body Diagram	77
4.12 วิถีจักรของ Fatigue load	77
4.13 แรงลมที่กระทำต่อกังหันลมและการวางฐานราก	80
4.14 ตัวอย่างการโปรแกรมใบพัดจาก XFOIL6.99 โดย Airfoil NREL's s822 ที่ $Re = 50,000$	82
4.15 ตัวอย่างการโปรแกรมใบพัดจาก XFOIL6.99 โดย Airfoil NREL's s822 ที่ $Re = 100,000$	83
4.16 ตัวอย่างการโปรแกรมใบพัดจาก XFOIL6.99 โดย Airfoil NREL's s822 ที่ $Re = 200,000$	83
4.17 ตัวอย่างการโปรแกรมใบพัดจาก XFOIL6.99 โดย Airfoil NREL's s822 ที่ $Re = 600,000$	84
4.18 ตัวอย่างการโปรแกรมใบพัดจาก XFOIL6.99 โดย Airfoil NREL's s822 ที่ $Re = 800,000$	84
4.19 ตัวอย่างการโปรแกรมใบพัดจาก XFOIL6.99 โดย Airfoil NREL's s822 ที่ $Re = 1,000,000$	85
4.20 กราฟความสัมพันธ์ของค่า Cl/α ที่ช่วง Reynolds Number ต่างๆ	86
4.21 กราฟความสัมพันธ์ของค่า Cl/Cd ที่ช่วง Reynolds Number ต่างๆ	86
4.22 กราฟความสัมพันธ์ของค่า Cl/α ที่ช่วง Reynolds Number ต่างๆ	87
4.23 กราฟความสัมพันธ์ของค่า Cl/Cd ที่ช่วง Reynolds Number ต่างๆ	87
4.24 กราฟความสัมพันธ์ของค่า Cl/α ที่ช่วง Reynolds Number ต่างๆ	88
4.25 กราฟความสัมพันธ์ของค่า Cl/Cd ที่ช่วง Reynolds Number ต่างๆ	88
4.26 กราฟความสัมพันธ์ของค่า Cl/α ที่ช่วง Reynolds Number ต่างๆ	89
4.27 กราฟความสัมพันธ์ของค่า Cl/Cd ที่ช่วง Reynolds Number ต่างๆ	89
4.28 การป้อนค่าเบื้องต้น สำหรับการออกแบบใบพัดจากโปรแกรม GRID3.97	90
4.29 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม GRID3.97	90
ก-1 แผนที่ตั้งโครงการ-1	102
ข-1 Specification ของ SS400	108
ข-2 ข้อมูล DAT file ของ Airfoil ที่นำมาใช้ในการศึกษา ของ NREL's s820	109
ข-3 ข้อมูล DAT file ของ Airfoil ที่นำมาใช้ในการศึกษา ของ NREL's s821	111
ข-4 ข้อมูล DAT file ของ Airfoil ที่นำมาใช้ในการศึกษา ของ NREL's s822	113
ข-5 ข้อมูล DAT file ของ Airfoil ที่นำมาใช้ในการศึกษา ของ NREL's s823	115

เอกสาร-1 ชนิดของกังหันลมแนวตั้งรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ 146

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง-2	กังหันลมชนิด Helix Wind	147
ง-3	ตัวอย่างการโปรแกรมใบพัดจาก XFOIL6.99 โดย Airfoil	149
ง-4	กราฟความสัมพันธ์ของค่า Cl/α ที่ช่วง Reynolds Number ต่างๆ	149



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินโครงการ	3
2.1 การแยกประเภทความเร็วลมของ Beaufort Scale	7
2.2 ข้อดี ข้อเสียของกังหันลมแกนตั้ง	17
2.3 ข้อดี ข้อเสียของกังหันลมแกนนอน	17
2.4 การแบ่งชนิดของกังหันลมตามขนาด	24
3.1 NREL's S-Series Airfoil Families	58
3.2 NREL's S-Series Airfoil	59
3.3 ค่าสัมประสิทธิ์ C_e	64
3.4 ค่าสัมประสิทธิ์ C_q	65
3.5 ค่าสัมประสิทธิ์ความสำคัญของอาคาร	66
3.6 แรงแลมตามพระราชบัญญัติควบคุมอาหาร พ.ศ.2522	67
4.1 เปรียบเทียบ Dimension ของกังหันลมที่เลือกเทคโนโลยี กับที่ออกแบบเอง	69
4.2 เปรียบเทียบ specification และ $\%C_f$ ของกังหันลมที่เลือกเทคโนโลยี กับที่ออกแบบเอง	72
4.3 ตารางเปรียบเทียบ Dimension กังหันลม	73
4.4 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม GRID3.97 ประกอบด้วยค่าความกว้างของ Airfoil และค่ามุมบิดที่ตำแหน่งต่างๆ	91
ก-1 Boring Log BH-1.1	103
ก-2 Boring Log BH-1.12	104
ก-3 Summary of Result BH-1.1	105
ก-4 สรุปผลโครงการ-1.	106
ข-1 Specification ของกังหันลมแนวนอน 10kW เทคโนโลยีที่ 1	117
ข-2 Specification ของกังหันลมแนวนอน 10kW เทคโนโลยีที่ 2	118
ค-1 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม xfoil ในการคำนวณ Airfoil S822 ที่ Reynolds Number=50,000	120
ค-2 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม xfoil ในการคำนวณ Airfoil S822 ที่ Reynolds Number=100,000	123
ค-3 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม xfoil ในการคำนวณ Airfoil S822 ที่ Reynolds Number=200,000	127

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค-4 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม xfoil ในการคำนวณ Airfoil S822 ที่ Reynolds Number=600,000	131
ค-5 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม xfoil ในการคำนวณ Airfoil S822 ที่ Reynolds Number=800,000	135
ค-6 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม xfoil ในการคำนวณ Airfoil S822 ที่ Reynolds Number=1,000,000	140
ง-1 เปรียบเทียบ specification ของกังหันลม	148



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันเมื่ออัตราการเติบโตทางเศรษฐกิจ การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร ทำให้การใช้พลังงานในรูปแบบต่างๆ มีความต้องการสูงขึ้นเรื่อยๆ เพราะพลังงานมีความจำเป็นต่อชีวิตประจำวัน พลังงานไฟฟ้าก็เป็นปัจจัยหนึ่งในปัจจุบันที่มีความต้องการอย่างมาก วิกฤตการณ์และทางออกด้านพลังงานได้ก่อตัวและทวีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น ทั้งจากการขาดแคลนแหล่งพลังงานและผลกระทบต่อการใช้พลังงานที่มีต่อสภาวะสิ่งแวดล้อมโลกต่างตระหนักถึงวิกฤตการณ์นี้ และพยายามคิดค้นเพื่อหาทางออก หนทางหนึ่งในการแก้ไขวิกฤตการณ์ดังกล่าวคือ การใช้พลังงานทดแทนและพลังงานหมุนเวียน

เนื่องจากในปัจจุบันประเทศไทยได้ให้ความสำคัญในการพัฒนาด้านพลังงานทดแทนและพลังงานหมุนเวียนมากขึ้น เพื่อทดแทนการนำเข้าของเชื้อเพลิงจำพวก น้ำมัน, ถ่านหิน, และก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น จากต่างประเทศที่นับวันยังมีราคาแพงขึ้น กระทรวงพลังงานได้ส่งเสริมพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตพลังงานทดแทนต่างๆ และพลังงานลมเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งในการสนับสนุนพัฒนาเพื่อเพิ่มความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศ เทคโนโลยีกังหันลมจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ

ดังนั้นพลังงานทดแทนและพลังงานหมุนเวียนเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง พลังงานลมก็เป็นพลังงานหนึ่งที่เป็นนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ ดังนั้นพลังงานลมจึงเป็นพลังงานที่น่าสนใจสำหรับการนำมาใช้ในประเทศไทยที่ยังไม่ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย แต่เริ่มมีการนำมาใช้ในชุมชนที่ห่างไกล หรือบนเกาะ ดังนั้นการศึกษาเทคโนโลยีกังหันลมจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการนำมาใช้ในอนาคต การจัดทำโครงการ Future Renewable Center จึงได้ทำการศึกษาด้านพลังงานทดแทนเพื่อการประยุกต์ใช้พลังงานทดแทน คือ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานน้ำ กับประเทศไทย ให้มีการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต คณะผู้ศึกษาจึงเกิดแนวคิดที่จะทำโครงการเกี่ยวกับการศึกษาเรื่องของการบริหารจัดการเกี่ยวกับกังหันลมขนาดเล็กที่มีอยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากมีความเหมาะสมกับความเร็วลมในประเทศไทย ทั้งทางด้านกรอกแบบ การติดตั้ง และศึกษาผลกระทบทั้งระยะยาวและระยะสั้น รวมถึงการเก็บข้อมูลความเร็วลม เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าในการลงทุนด้านพลังงานลมในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำโครงการ

1. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลของการทำงานของกังหันลมขนาดเล็กที่เหมาะสมในการใช้งานกับความเร็วลมของประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผล ประสิทธิภาพของกังหันลมขนาดเล็ก ทั้งแนวตั้ง แนวนอน และแบบใบพัดนาเกลือ

3. เพื่อทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกังหันลม เช่น คุณลักษณะของกังหันลม เทคโนโลยีของกังหันลม และทำการเลือกเสาและชนิดของเสาของกังหันลม โดยใช้ความรู้ด้าน Bending Moment, การเลือกฐานราก การเลือกใบพัดโดยศึกษา Airfoil ให้เหมาะสมกับพื้นที่การใช้งาน ในโครงการ Future Renewable Center

4. เพื่อเป็นการสนับสนุน และส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนในประเทศไทย มากยิ่งขึ้น และเป็นแบบอย่างเพื่อการศึกษา ในการลงทุนด้านพลังงานลม

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

ทำการศึกษาค้นหาข้อมูลของกังหันลมชนิดต่างๆ ศึกษาปัจจัยต่างๆของกังหันลมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและมีความเหมาะสมกับโครงการ ศึกษาถึงเทคโนโลยีของกังหันลม 10kW เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกซื้อมาใช้ในโครงการ Future Renewable Center เพื่อใช้เปรียบเทียบกับกังหันลมที่ผลิตขึ้นเองในโครงการ Future Renewable Center ในแง่ของประสิทธิภาพ ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกังหันลมขนาดเล็ก (Small Wind Turbine) ทั้งแบบกังหันลมแนวนอน (HAWT) และกังหันลมแบบแนวตั้ง (VAWT) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของใบพัดชนิด 3 ใบ และใบพัดนาเกลือ ทำการเลือกใบพัดโดยศึกษา Airfoil ทำการเลือกเสาโดยใช้ความรู้เรื่อง Bending Moment การเลือกฐานรากโดยการคำนวณและออกแบบฐานราก วิเคราะห์ความเหมาะสมกับการใช้งาน และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ในการใช้กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กในประเทศไทย

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับกังหันลม
2. วิเคราะห์คุณลักษณะของกังหันลมแต่ละประเภท
3. ศึกษาข้อมูลต่างๆของกังหันลม ไม่ว่าจะเป็นด้านเทคโนโลยี ความน่าเชื่อถือ ความคุ้มค่าทางด้านราคา เทียบกับ Power Curve ที่กังหันลมสามารถทำได้
4. ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างกังหันลมแนวตั้ง และแนวนอน ในเรื่องเทคโนโลยี กำลังการผลิตที่ได้ และความคุ้มค่าในการลงทุน
5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของใบพัดของกังหันลมแนวนอน เทียบกับใบพัดนาเกลือ
6. ศึกษาใบพัด ทำการเลือกใบพัดโดยศึกษา Airfoil
7. ศึกษาเรื่อง Bending Moment เพื่อเลือกเสาของกังหันลม
8. ศึกษา เลือกฐานรากโดยการคำนวณและออกแบบฐานราก

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

เนื้อหาการดำเนินงาน	มิถุนายน	กรกฎาคม	สิงหาคม	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม
- ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกังหันลม										
- ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เช่น พลังงานและความเร็วลมในประเทศไทย, เทคโนโลยีกังหันลม, ใบพัดลักษณะต่างๆ, เสากังหันลมที่เหมาะสม										
- ศึกษาข้อมูลต่างๆของกังหันลม ไม่ว่าจะเป็นด้านเทคโนโลยี ความน่าเชื่อถือ ความคุ้มค่า ทางด้านราคา เทียบกับ Power Curve ที่กังหันลมสามารถทำได้										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<p>- ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างกังหันลมแนวตั้ง และแนวนอน ในเรื่องเทคโนโลยี กำลังการผลิตที่ได้ และความคุ้มค่าในการลงทุน</p>											
<p>- พิจารณาเลือกกังหันลมตามท้องตลาดขนาด 10 KW ที่มีคุณสมบัติตามต้องการ</p>											
<p>-ศึกษาและรวบรวมข้อมูลสถิติความเร็วลมในพื้นที่ติดตั้งกังหันลม</p>											
<p>- เลือกใบพัดโดยคำนวณ Reynold number และทำการเลือก Airfoil ที่เหมาะสม</p>											
<p>- เตรียมข้อมูลด้าน dimension ของกังหันลม เพื่อคำนวณหา Bending moment มาใช้</p>											

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ในทางอื่นอย่างอื่น หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเลือกเสา, พื้นที่หน้าตัดของ เสา, ออกแบบฐาน ราก									
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้ความรู้เกี่ยวกับระบบการทำงานของกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า, ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกังหันลม รวมถึงการออกแบบและการบริหารจัดการพลังงานให้เหมาะสม
2. ได้รับความรู้ในด้านการเลือกพิจารณากังหันลม ในหลายด้าน นอกเหนือจากปัจจัยด้านราคา ยังต้องคำนึงถึงด้านประสิทธิภาพ เทคโนโลยีที่ใช้ รวมถึงการเลือกใช้ใบพัด, จำนวนใบพัด, เสา, ฐานราก ที่เหมาะสมกับกังหันลม
3. ได้ความรู้เกี่ยวกับพลังงานลม กำลังไฟฟ้าจากกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก
4. สามารถทำการเลือกชนิดของใบพัดที่เหมาะสมกับความเร็วลมในพื้นที่ได้
4. สามารถออกแบบเสาของกังหันลมที่จะติดตั้ง จากหลักการ Bending Moment
5. สามารถออกแบบและทำงานร่วมกันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ที่มีความเหมาะสมกับสภาพภูมิประเทศ, ภูมิอากาศ และสภาพแรงลมของประเทศไทย ในโครงการ Future Renewable Center
6. เพื่อสนับสนุนและผลักดันให้เกิดการนำพลังงานทางเลือกมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพและมากยิ่งขึ้นเรื่อยๆ
7. สามารถช่วยลดต้นทุนในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงต่างๆ มาเป็นพลังงานทดแทนมากยิ่งขึ้น

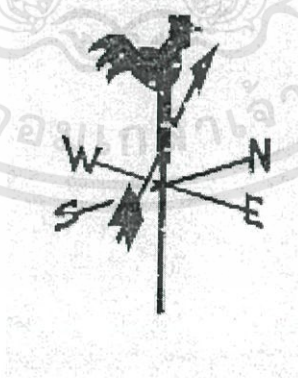
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลมและความเร็วลม [2]

ลมเกิดจากการแทนที่ของอากาศ จากบริเวณที่มีอากาศร้อนจะลอยตัวสูงขึ้น ขณะที่อากาศบริเวณที่อยู่รอบๆที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่ เมื่อมีการเคลื่อนที่ของอากาศที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงและแตกต่างกันของความกดอากาศ อากาศบริเวณที่มีความกดอากาศสูงจะเคลื่อนที่เข้ามายังบริเวณที่มีความกดอากาศต่ำ มวลอากาศที่เคลื่อนที่ที่เราเรียกว่าลม โดยความแตกต่างของอุณหภูมิและความกดอากาศเกิดจาก ดวงอาทิตย์ ซึ่งแผ่รังสีความร้อนมายังโลก ซึ่งแต่ละตำแหน่งบนพื้นโลกจะได้รับความร้อนไม่เท่ากัน การเคลื่อนที่ของมวลอากาศนี้ จะทำให้เกิดพลังงานจลน์ ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้

ปัจจุบันเราสามารถวัดความเร็วลมได้จากเครื่องมือ เรียกว่าอะนิโมมิเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยลูกถ้วยครึ่งวงกลม ทำด้วยอะลูมิเนียม หรือ พลาสติก แต่แบบที่นิยมใช้คือ แบบลูกถ้วย จะประกอบไปด้วยลูกถ้วยครึ่งรูปครึ่งทรงกลม 3 หรือ 4 ใบ ติดอยู่กับเพลาในแนวตั้ง การใช้งานจากการหมุนของลูกถ้วยจะมีผลทำให้เราทราบถึงจำนวนรอบในการหมุน จึงทำให้สามารถหาความเร็วลมได้ซึ่งมีหน่วยเป็นนอต, ไมล์ต่อชั่วโมง, กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยเครื่องมือที่ใช้วัดความเร็วลมนี้อาจมีรูปร่างลักษณะดังในรูปด้านล่าง



รูปที่ 2.1 อะนิโมมิเตอร์ [3]

2.2 นิยามพลังงานลม

พลังงานลมสามารถบอกได้โดยใช้ Beaufort Scale ซึ่งเป็นวิธีเบื้องต้นในการวัดพลังงานลม แต่เทคนิคที่นิยมที่ใช้คือ ลักษณะการกระจายตัวของลมมาใช้มากกว่า โดยจะทำการวัดความเร็วลมในบริเวณที่ต้องการทราบถึงพลังงานเป็นระยะๆ อาจจะทุก 10 นาที หรือทุกชั่วโมง ซึ่งค่าดังกล่าวจะถูกนำมาพล็อตกราฟ แต่อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวยังไม่สามารถนำมาใช้ในการตัดสินใจว่าพื้นที่ดังกล่าวมีพลังงานลมมากน้อยเพียงใด แต่สามารถนำมาตัดสินใจได้ว่า พื้นที่นั้นมีคุณภาพเพียงไรในการใช้พลังงานจากลม

การแยกประเภทความเร็วลมของ Beaufort Scale

ตารางที่ 2.1 การแยกประเภทความเร็วลมของ Beaufort Scale[5]

Beaufort number	Wind speed				Mean wind speed (kt / km/h / mph)	Description	Wave height		Sea conditions	Land conditions
	kt	km/h	mph	m/s			m	ft		
0	0	0	0	0-0.2	0 / 0 / 0	Calm	0	0	Flat	Calm. Smoke rises vertically.
1	1-3	1-6	1-3	0.3-1.5	02 / 04 / 2	Light air	0.1	0.33	Ripples without crests.	Wind motion visible in smoke.
2	4-6	7-11	4-7	1.6-3.3	05 / 09 / 6	Light breeze	0.2	0.66	Small wavelets. Crests of glassy appearance, not breaking	Wind felt on exposed skin. Leaves rustle.
3	7-10	12-19	8-12	3.4-5.4	9 / 17 / 11	Gentle breeze	0.6	2	Large wavelets. Crests begin to break; scattered whitecaps	Leaves and smaller twigs in constant motion.
4	11-16	20-29	13-18	5.5-7.9	13 / 24 / 15	Moderate breeze	1	3.3	Small waves.	Dust and loose paper raised. Small branches begin to move.
5	17-21	30-39	19-24	8.0-10.7	19 / 35 / 22	Fresh breeze	2	6.6	Moderate (1.2 m) longer waves. Some foam and spray.	Smaller trees sway.
6	22-27	40-50	25-31	10.8-13.8	24 / 44 / 27	Strong breeze	3	9.9	Large waves with foam crests and some spray.	Large branches in motion. Whistling heard in overhead wires. Umbrella use becomes difficult.
7	28-33	51-62	32-38	13.9-17.1	30 / 56 / 35	Near gale	4	13.1	Sea heaps up and foam begins to streak.	Whole trees in motion. Effort to walk against the wind.
8	34-40	63-75	39-46	17.2-20.7	37 / 68 / 42	Gale	5.5	18	Moderately high waves with breaking crests forming spindrift. Streaks of foam.	Twigs broken from trees. Cars veer on road.
9	41-47	76-87	47-54	20.8-24.4	44 / 81 / 50	Strong gale	7	23	High waves (2.75 m) with dense foam. Wave crests start to roll over. Considerable spray.	Light structure damage.
10	48-55	88-102	55-63	24.5-28.4	52 / 96 / 60	Storm	9	29.5	Very high waves. The sea surface is white and there is considerable tumbling. Visibility is reduced.	Trees uprooted. Considerable structural damage.
11	56-63	103-117	64-72	28.5-32.6	60 / 111 / 69	Violent storm	11.5	37.7	Exceptionally high waves.	Widespread structural damage.
12	>63	>117	>72	>32.7	N/A	Hurricane	14+	46+	Huge waves. Air filled with foam and spray. Sea completely white with driving spray. Visibility very greatly reduced.	Massive and widespread damage to structures.

2.3 การวิเคราะห์ความเร็วลมโดยใช้แบบจำลองทางสถิติ(Statistic models for wind data analysis)[1]

การวิเคราะห์ความเร็วลมโดยใช้แบบจำลองทางสถิติ มี 2 วิธีหลักที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ

-Weibull Distribution เป็นวิธีที่ความถูกต้อง แม่นยำสูง เพราะมีตัวแปรที่แปรเปลี่ยนค่า 2 ตัว คือ k และ c ทำให้มีความยืดหยุ่นในการคำนวณ

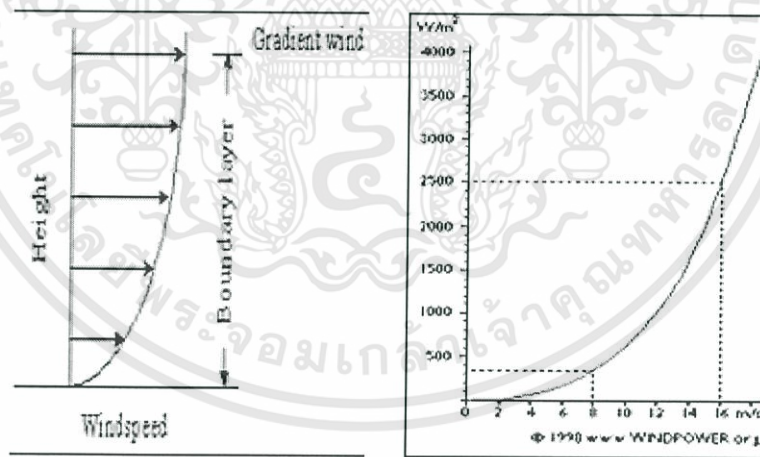
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Rayleigh Distribution เป็นกรณีพิเศษของ Weibull Distribution มีการใช้
ง่าย ที่ง่ายเนื่องจากมีการกำหนดค่าตัวแปร k เท่ากับ 2 เปลี่ยนแปลงเฉพาะค่า c

โดยข้อมูลความเร็วลมที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธี ควรเป็นข้อมูลที่มีการเก็บ
ในระยะเวลาที่นานเป็นปี หรือมากกว่า และมีความละเอียดของข้อมูลที่ไม่น้อยจนเกินไป ซึ่ง
ระยะเวลาและความละเอียดของการเก็บข้อมูลจะส่งผลต่อความถูกต้อง ของการวิเคราะห์ด้วย

2.4 หลักการทำงานของกังหันลม [22]

ลมที่เกิดขึ้นถูกใช้ประโยชน์จากส่วนที่อยู่ใกล้ผิวโลกหรือที่เรียกว่าลมผิวพื้น ซึ่ง
หมายถึงลมที่พัดในบริเวณผิวพื้นโลกภายใต้ความสูงประมาณ 1 กิโลเมตรเหนือพื้นดิน เป็นบริเวณที่มี
การผสมผสานของอากาศกับอนุภาคอื่นๆ และมีแรงเสียดทานในระดับต่ำ โดยเริ่มต้นที่ระดับความสูง
มากกว่า 10 เมตรขึ้นไปแรงเสียดทานจะลดลง ทำให้ความเร็วลมจะเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.2
จนกระทั่งที่ระดับความสูงใกล้ 1 กิโลเมตรเกือบไม่มีแรงเสียดทาน ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลง
ขึ้นอยู่กับระดับความสูง และสภาพภูมิประเทศ เช่นเดียวกันกับทิศทางของลม จากประสบการณ์ที่
ผ่านมาพบว่ากังหันลมจะทำงานได้ดีหรือไม่นั้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปรทั้งสองนี้ ที่ความเร็วลมเท่าๆ กัน
แต่มีทิศทางลมที่แตกต่างกัน เมื่อลมเคลื่อนที่พุ่งเข้าหาแกนหมุนของกังหันลมแล้วจะส่งผลต่อแรงบิด
ของกังหันลมเป็นอย่างมาก ผลคือแรงลัพท์ที่ได้ออกมาจากกังหันลมแตกต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุป
ได้ว่าปัจจัยเบื้องต้นที่เป็นตัวกำหนดในการใช้พลังงานลมคือความเร็วและทิศทางของลมนั่นเอง



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับระดับความสูง และกับกำลังงานต่อพื้นที่ [22]

พลังงานที่ได้รับจากกังหันลมจะมีเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความเร็วลม แต่
ความสัมพันธ์นี้ ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงที่ความเร็วลมต่ำในช่วง 1-3 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะยังไม่
ทำงานจึงยังไม่สามารถผลิตไฟฟ้าออกมาได้ ที่ความเร็วลมระหว่าง 2.5-5 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะ
เริ่มทำงานเรียกช่วงนี้ว่าช่วงเริ่มความเร็วลม (cut in wind speed) และที่ความเร็วลมช่วงประมาณ
12-15 เมตรต่อวินาที เป็นช่วงที่เรียกว่าช่วงความเร็วลม (nominal หรือ rate wind speed) ซึ่งเป็น
ช่วงที่กังหันลมทำงานอยู่บนพิกัดกำลังสูงสุดของตัวเอง ในช่วงที่ความเร็วลมไต่ระดับไปสู่ช่วง
เอก ความเร็วลม เป็นการดำเนินงานของกังหันลมด้วยประสิทธิภาพสูงสุด (maximum rotor efficiency) ดัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

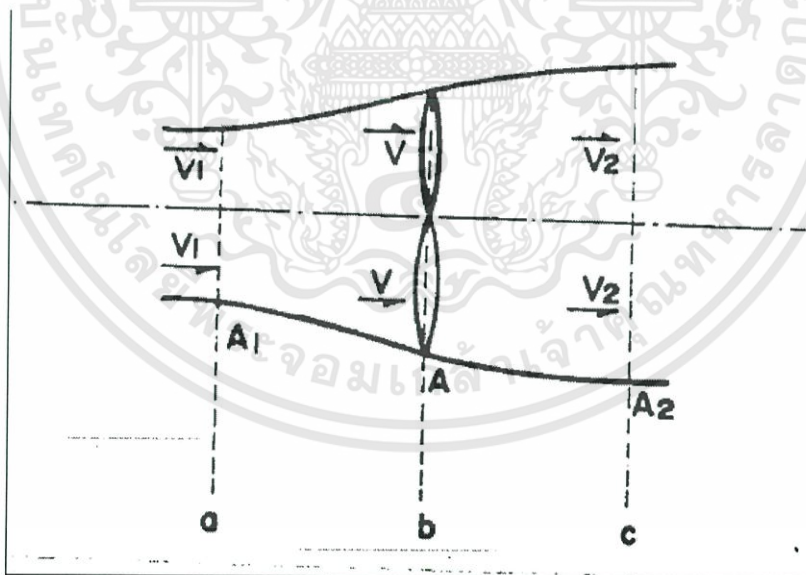
แสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับอัตราการกระตุ้นความเร็ว (tip speed ratio) และในช่วงเลยความเร็วลม (cut out wind speed) เป็นช่วงที่ความเร็วลมสูงกว่า 25 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะหยุดทำงานเนื่องจากความเร็วลมสูงเกินไปซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อกลไกของกังหันลมได้ การเปลี่ยนรูปพลังงานจลน์ของกระแสลมให้อยู่ในรูปของพลังงานกล อุปกรณ์ดังกล่าวนี้เรียกว่ากังหันลม พิจารณากระแสลมที่มีความหนาแน่นและมีความเร็วลม v พัดผ่านพื้นที่หน้าตัด A ในช่วงหนึ่งหน่วยเวลา P จะมีกำลังลม ที่ได้จากพลังงานจลน์ ดังนี้

$$P = \frac{1}{2}(\rho Av)v^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2.1)$$

กังหันลมจะทำหน้าที่สกัดกำลังงานที่มีอยู่ในกระแสลมมาใช้ประโยชน์ได้เพียงบางส่วนเท่านั้น กำหนดให้ C_p เป็นสัมประสิทธิ์กำลังงาน (Power Coefficient) ซึ่ง C_p จะเป็นตัวบ่งชี้สัดส่วนของกำลังงานที่กังหันจะสามารถสกัดได้จากกระแสลม ถ้า P แทนกำลังงานที่ได้จากกังหันลม ดังนั้น

$$P = C_p P_1 = \frac{1}{2}C_p \rho Av^3 \quad (2.2)$$

พิจารณากังหันลมที่พื้นที่หน้าตัดรับลม A ตั้งรับกระแสลมซึ่งมีความเร็วลม v ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในอุทกคติของกังหันลม [22]

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.3 ณ พื้นที่หน้าตัด A_1 , A และ A_2 ของตำแหน่ง a, b, และ c มีค่าความเร็วลม v_1 , v และ v_2 ตามลำดับ จะพบว่า

$$P_T = \frac{1}{4} \rho v (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.3)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของพลังงานได้

$$C_p = \frac{P_T}{P} = \frac{(v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)}{2v_1^3} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2}\right) \quad (2.4)$$

และสามารถเขียนความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ต่อเนื่อง (Continuity Equations) ได้ดังนี้

$$A_1 v_1 = A v = A_2 v_2 \quad (2.5)$$

การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของกระแสลม ณ หน่วยเวลา t

$$P = \frac{1}{2} \rho A v (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.6)$$

และปริมาณการเปลี่ยนแปลงของกระแสลมที่มีต่อกังหัน โดยแรง F

$$F = \rho A v (v_1 - v_2) \quad (2.7)$$

คิดเป็นกำลังงาน

$$P = Fv = \rho A v P v^2 (v_1 - v_2) \quad (2.8)$$

ดังนั้น

$$\rho A v^2 (v_1 - v_2) = \frac{1}{2} \rho A v (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.9)$$

และ

$$v = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) \quad (2.10)$$

Betz Coefficient Betz เสนอแนวทางการหาค่าสูงสุดของการสกัดกำลังงานจากกระแสลมให้ได้สูงสุด โดยพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของความเร็วลม v_1 และ v_2 ถ้ากำหนดให้ $v_2 = d \cdot v_1$

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} \rho A \left\{ \frac{1}{2} (v_1 - dv_1) \right\} (v_1^2 - d^2 v_1^2) \\ &= \frac{1}{4} \rho A v_1^3 (1+d)(1-d) \end{aligned} \quad (2.11)$$

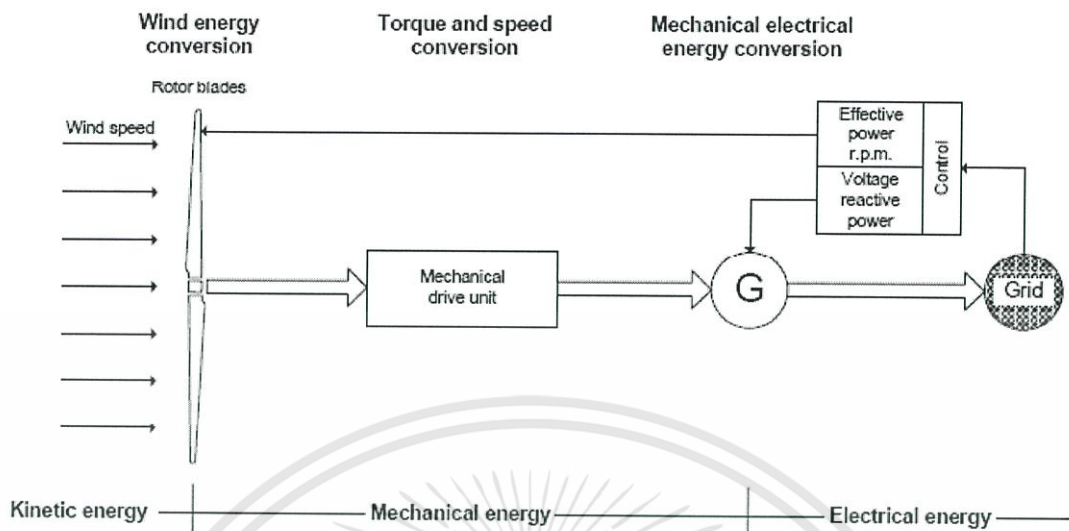
ค่า P มีค่าสูงสุดเมื่อ $\frac{\partial P}{\partial d} = 0$ และ ณ จุดนี้พบว่า $d = \frac{1}{3}$
ดังนั้น

$$\begin{aligned} P_{\max} &= \frac{1}{4} \rho A v_1^3 \left(1 + \frac{1}{3}\right) \left(1 - \frac{1}{9}\right) \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{16}{27}\right) \rho A v_1^3 \end{aligned} \quad (2.12)$$

ค่า $\left(\frac{16}{27}\right)$ ก็คือค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด $C_{p,\max}$ เรียกว่า Betz Coefficient ซึ่งในความจริงแล้วค่า C_p ที่ได้จริงของระบบที่ดีจะมีค่าประมาณ 0.4-0.5 เนื่องจากค่าความสูญเสียอื่นๆ โดยเราสามารถหาค่าประสิทธิภาพของระบบได้จาก

$$\text{eff} = \frac{P_T}{P_{id}} = \frac{P_T}{P_o C_{p,Betz}} = \frac{P_T}{\frac{1}{2} \rho v_1^3 C_{p,Betz}} = \frac{C_p}{C_{p,Betz}}$$

สำหรับหลักการทั่วไปในการนำพลังงานลมมาใช้คือ เมื่อมีลมพัดมาปะทะกับใบพัดของกังหันลม กังหันลมจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานลมที่อยู่ในรูปของพลังงานจลน์ไปเป็นพลังงานกล โดยการหมุนของใบพัด แรงจากการหมุนของใบพัดนี้จะถูกส่งผ่านแกนหมุนทำให้เฟืองเกียร์ที่ติดอยู่กับแกนหมุนเกิดการหมุนตามไปด้วยพลังงานกลที่ได้จากการหมุนของเฟืองเกียร์นี้เองที่ถูกประยุกต์ใช้ประโยชน์ตามความต้องการ เช่นในกรณีที่ต้องการใช้กังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้าจะต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าไป ซึ่งเมื่อเฟืองเกียร์ของกังหันลมเกิดการหมุนจะไปขับเคลื่อนให้แกนหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนตามไปด้วย ด้วยหลักการนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ส่วนในกรณีของการใช้กังหันลมในการสูบน้ำหรือสีข้าวสามารถนำเอาพลังงานกลจากการหมุนของเฟืองเกียร์นี้ไปประยุกต์ใช้ได้โดยตรง



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนรูปพลังงานในระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า [23]

2.5 ประเภทของกังหันลม [6]

กังหันลมสามารถแบ่งออกตามลักษณะการจัดวางแกนของใบพัดได้เป็น 2 ประเภท

2.5.1 กังหันลมแนวแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine)

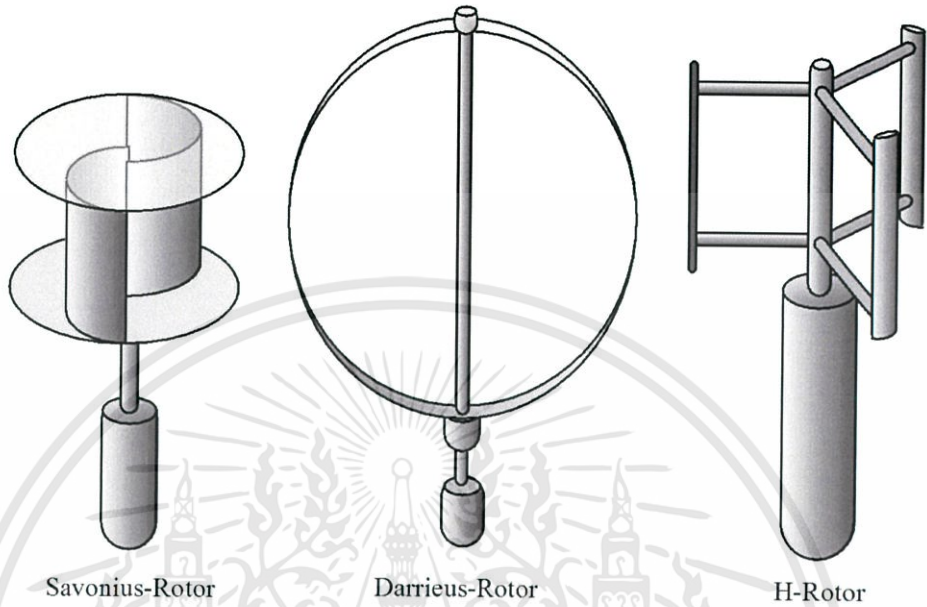
เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนและใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบทำให้สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง กังหันลมแบบแกนตั้งมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานต่ำ มีข้อจำกัดในการขยายให้มีขนาดใหญ่และการยกชุดใบพัดเพื่อรับแรงลมปัจจุบันมีการใช้งาน กังหันลมแบบนี้น้อยมาก ปัจจุบันกังหันลมแกนตั้งมี 3 รูปแบบหลักๆ คือแบบ Savonius Rotor (รูปตัว S) , แบบ Darrieus Rotor (รูปตัว O) และแบบ H-rotor

- แบบซาโวเนียสโรเตอร์ (Savonius Rotor) จะมีหลักการคล้ายๆกันกับ anemometer ซึ่งให้หลักการของแรงลาก โดยมีใบพัดเป็นรูปครึ่งวงกลม 2 อันติดกัน และมีรอยต่อเหลือไว้ เพื่อให้ลมพัดจากใบหนึ่งถึงอีกใบหนึ่งได้ โดยค่า C_p สูงสุดที่ทำได้มีค่า 0.25 ข้อดีคือสามารถหมุนได้ที่ความเร็วที่ต่ำ ส่วนข้อเสียคือประสิทธิภาพต่ำ และไม่เป็นที่นิยมใช้ในระบบขนาดใหญ่

- แบบดาเรียสโรเตอร์ (Darrieus Rotor) ถูกพัฒนาขึ้นโดยชาวฝรั่งเศส ชื่อ George Darrieus ในปี 1929 กังหันแบบนี้จะมีใบพัด 2-3 ใบ และใช้หลักการในการลาก โดยกังหันชนิดนี้มีประสิทธิภาพดีกว่าแบบ Savonius Rotor แต่ประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบกับ Horizontal Rotor ในปัจจุบันแล้ว แบบนี้จะให้พลังงานแค่ 75% ของแบบ Horizontal Rotor และยังไม่สามารถเริ่มหมุนได้ด้วยตัวเอง เป็นมีระบบเริ่มต้นต่อพ่วง

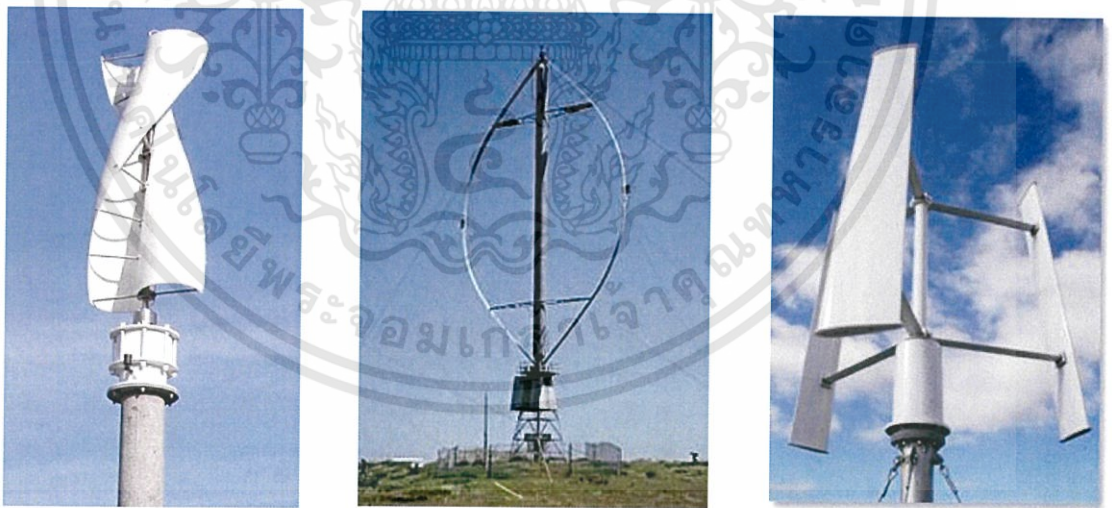
- แบบ H-rotor หรือ Heidelberg ถูกพัฒนาโดยบริษัท Heidelberg Motor โดยการใช้ permanent magnet generator ใส่ในโครงสร้างของกังหัน กังหันชนิดนี้มีหลักการแบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดียวกับแบบ Darrieus Rotor แต่มีข้อดีตรงที่ไม่จำเป็นต้องใช้ Gearbox และมีความทนทานต่อสภาพอากาศ



© 1984-2004 Quaschning / Hesse Verlag
"Regenerative Energiesysteme"

รูปที่ 2.5 ชนิดของกังหันลมแนวตั้ง



รูปที่ 2.6 กังหันลมแบบซาโวเนียสโรเตอร์,กังหันลมแบบดาเรียสโรเตอร์ และกังหันลมแบบ H-rotor

[6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัจจุบันยังมีกังหันลมชนิด Helix Wind ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีกังหันลมแนวตั้งสมัยใหม่ โดยอาศัยหลักการเช่นเดียวกับซาโวเนียสโรเตอร์ อาศัยหลักการของเกลียวของการหมุน ของใบ และยังสามารถประกอบ หรือ ติดตั้งได้ง่าย เหมือนกังหันลมแนวนอน แต่ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าถึง 60%



รูปที่ 2.7 กังหันลมชนิด Helix Wind

2.5.2 กังหันลมแนวแกนนอน (Horizontal Axis Wind Turbine)

เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับ ทิศทางของลมโดยมีใบพัดเป็นตัวตั้งฉากกับแรงลม มีอุปกรณ์ควบคุมกังหันให้หันไปตามทิศทางของกระแสลม เรียกว่า หางเสือ และมีอุปกรณ์ป้องกันกังหันชำรุดเสียหายขณะเกิดลมพัดแรง เช่น ลมพายุและตั้งอยู่บนเสาที่แข็งแรง กังหันลมแบบแกนนอน ได้แก่ กังหันลมวินด์มิลล์ (Windmills) กังหันลมใบเสื่อลำแพน นิยมใช้กับ เครื่องสูบน้ำ กังหันลมแบบกังล้อจักรยาน กังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้าแบบพรอบเพลลเลอร์ (Propeller)



รูปที่ 2.8 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอน

2.6 ชนิดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอน [6]

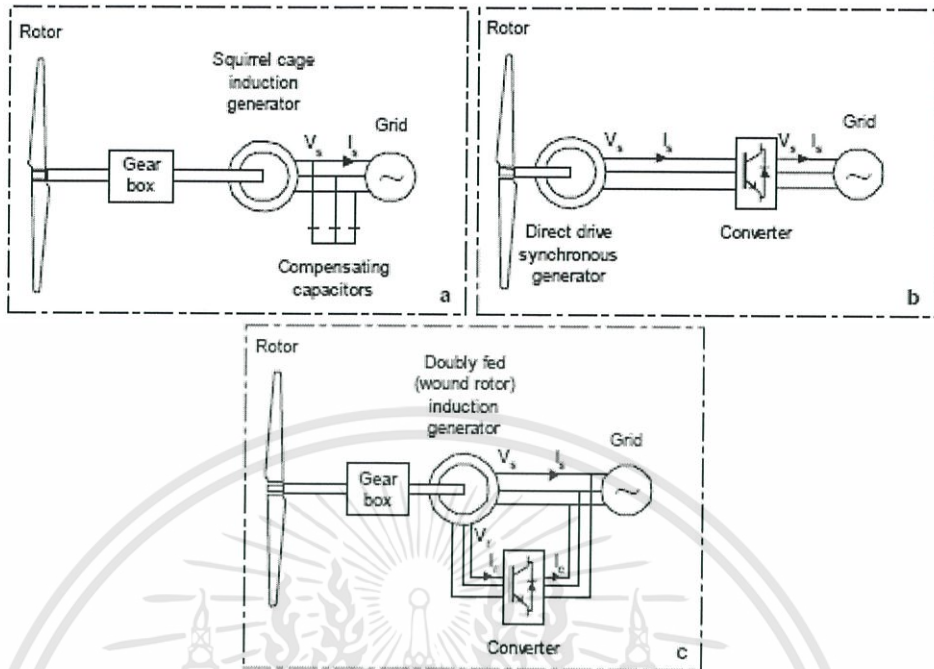
แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

2.6.1 กังหันลมแบบความเร็วคงที่ (fixed speed turbine)

กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วยใบพัด กล่อง เกียร์ ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ (squirrel cage induction generator) ชุดสเตเตอร์ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเชื่อมเข้ากับระบบสายส่งไฟฟ้า ในความเป็นจริงแล้วกังหันลมแบบนี้มีค่าสลิปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator slip) ไม่คงที่ซึ่งจะขึ้นอยู่กับภาระเปลี่ยนแปลง ของกำลังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (คิระ หงษ์นภา, 2544) อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงนี้มีค่าน้อยมาก เพียง 1 - 2 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเรียกกังหันลมแบบนี้ว่าเป็นแบบความเร็วคงที่ (fix speed turbine) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ มักจะดึงพลังงาน (reactive power) จากสายส่งมาใช้ โดยเฉพาะในที่ที่มีระบบสายส่งที่ไม่เสถียรภาพ สำหรับเหตุการณ์ลักษณะดังกล่าวสามารถแก้ไขโดยการชดเชยพลังงาน จากตัวเก็บประจุซึ่งติดตั้งอยู่ภายในตัวกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดนี้

2.6.2 กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ (variable speed)

กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วยใบพัด กล่อง เกียร์ เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสสลับแบบเหนี่ยวนำแบบดับเบิ้ลเฟ็ด (doubly fed induction generator) เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ชุดสเตเตอร์ต่อเชื่อมเข้ากับระบบสายส่งไฟฟ้า กังหันลมชนิดนี้ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงได้โดยเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงสามารถปรับความเร็วรอบ และความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตออกมาได้ กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ชนิดต่อตรง (variable speed with direct drive) กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วยใบพัดเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสโดยตรง และมีเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า สำหรับการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 2.9 ชนิดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอน [6]

- a) Fixed speed with directly grid-couple (asynchronous) squirrel cage induction generator
- b) Variable speed based on a direct drive and synchronous generator
- c) Variable speed with doubly fed induction generator

2.7 ข้อดี ข้อเสียของกังหันลมแกนตั้ง และกังหันแกนนอน [4]

1. ข้อดี ข้อเสียของกังหันลมแกนตั้ง

ตารางที่ 2.2 ข้อดี ข้อเสียของกังหันลมแกนตั้ง [4]

ข้อดี	ข้อเสีย
<ol style="list-style-type: none"> 1. รับลมได้รอบด้านทุกทิศทาง 2. ติดตั้งอยู่ในระดับต่ำได้ 3. ติดตั้งง่าย สามารถติดตั้ง Gear และ Generator บนพื้นดินได้ 4. ส่งเสียงรบกวนน้อยกว่ากังหันลมแนวแกนนอน 5. บำรุงรักษาได้ง่ายและสะดวก 6. น้ำหนักตกลงบนฐานสมดุลกว่า 7. ระบบการผลิต ส่งกำลัง ทำได้ง่าย ราคาถูก 8. เพิ่มแผนการหมุนได้ไม่จำกัด 9. ทนทานต่อสภาพอากาศที่เลวร้าย 10. สามารถนำไปใช้ในบางพื้นที่ที่ใช้งานรูปแบบพิเศษได้ เช่น บนเรือ 11. เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่ากังหันลมแบบแนวนอน 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ไม่สามารถรับลมไม่ทุกใบ 2. เกิดแรงต้านการหมุน 3. ราคาแพงกว่ากังหันลมแบบแนวนอนในขณะที่ประสิทธิภาพต่ำกว่า

2. ข้อดี ข้อเสียของกังหันลมแกนนอน

ตารางที่ 2.3 ข้อดี ข้อเสียของกังหันลมแกนนอน [4]

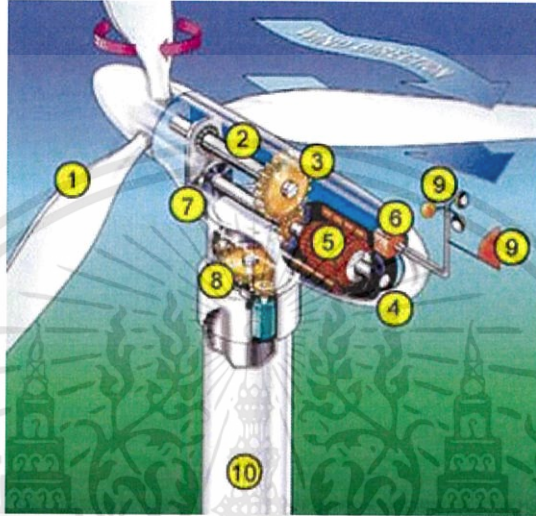
ข้อดี	ข้อเสีย
<ol style="list-style-type: none"> 1. มีพื้นที่รับลมมากกว่าเมื่อน้ำหนักเท่ากัน 2. มีประสิทธิภาพสูงกว่ากังหันลมแนวตั้ง 3. มีแรงบิดสูง 4. รอบจัดกว่าเมื่อความเร็วเท่ากัน ความเร็วคงที่กว่า 5. ราคาถูกกว่ากังหันลมแบบแนวตั้งในสเปคเท่ากัน 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ต้องติดตั้งบนเสาที่มีความสูงมาก 2. มีปัญหาในการประกอบใบพัดกับฐาน 3. ไม่สามารถรับลมได้รอบด้านเหมือนกังหันลมแนวตั้ง จึงต้องมีชุดควบคุมให้กังหันลมหันหน้าเข้ารับแรงลมได้ทุกทิศทางในแนวนอนตลอดเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 ส่วนประกอบของระบบกังหันลมขนาดใหญ่สำหรับผลิตไฟฟ้า [6]

ส่วนประกอบสำคัญของระบบกังหันลมต่างๆ ไปอาจแบ่งได้ดังนี้

1. กังหันลมแนวแกนนอน



รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบสำคัญของกังหันลมแนวแกนนอน [6]

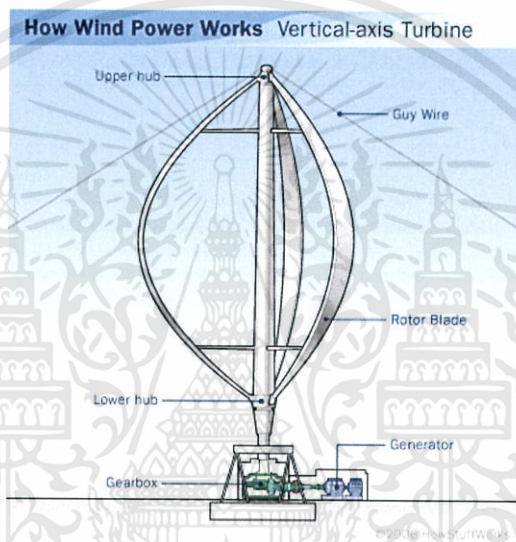
- 1.) Blades ใบพัด เป็นตัวรับพลังลมและเปลี่ยนให้เป็นพลังงานกล ซึ่งยึดติดกับชุดแกนหมุนและส่งแรงจากแกนหมุนไปยังเพลาแกนหมุน
- 2.) Shaft เพลาแกนหมุน ซึ่งรับแรงจากแกนหมุนใบพัด และส่งผ่านระบบกำลัง เพื่อหมุนและปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพลาแกนหมุนแบ่งเป็นเพลาแกนหมุนความเร็วต่ำ (Low-speed shaft) ซึ่งอยู่ในตำแหน่งที่ 2 ดังรูป ส่วนเพลาแกนหมุนความเร็วสูง (High-speed shaft) จะอยู่ในตำแหน่งถัดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ตำแหน่งที่ 5 ดังรูป)
- 3.) Gear Box ห้องส่งกำลัง ซึ่งเป็นระบบปรับเปลี่ยนและควบคุมความเร็วในการหมุนระหว่างเพลาแกนหมุนกับเพลา ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 4.) Nacelle ห้องเครื่อง ซึ่งมีขนาดใหญ่และมีความสำคัญต่อกังหันลม ใช้บรรจุระบบต่างๆ ของกังหันลม เช่น ระบบ เกียร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เบรก และระบบควบคุม
- 5.) Generator เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า
- 6.) Controller ระบบควบคุมไฟฟ้า ซึ่งใช้ระบบคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมการทำงาน และจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ ระบบ
- 7.) Brake ระบบเบรก เป็นระบบกลไกเพื่อใช้ควบคุมการหยุดหมุนของใบพัดและเพลาแกนหมุนของกังหัน เมื่อได้รับความเร็วลมเกินความสามารถของกังหันที่จะรับได้ และในระหว่างการซ่อมบำรุงรักษา

8.) Yaw Control แกนคอหมุนรับทิศทางลม เป็นตัวควบคุมการหมุนห้องเครื่อง เพื่อให้ใบพัดรับทิศทางลมโดยระบบ อิเลคทรอนิกส์ ที่เชื่อมต่อให้มีความสัมพันธ์ กับทางเสีรับทิศทางลมที่อยู่ด้านบนของเครื่อง

9.) Wind Vane เครื่องวัดความเร็วลมและทิศทางลม ซึ่งเชื่อมต่อสายสัญญาณเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อเป็นตัวชี้ขนาดของความเร็วและทิศทางของลม เพื่อที่คอมพิวเตอร์จะได้ควบคุมกลไกอื่นๆ ได้ถูกต้อง

10.) Tower เสากังหันลม เป็นตัวแบกรับส่วนที่เป็นตัวเครื่องที่อยู่ข้างบน

2. กังหันลมแนวแกนตั้ง



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบสำคัญของกังหันลมแนวแกนตั้ง [9]

กังหันลมแนวแกนตั้งต่างจากกังหันลมแนวแกนนอนตรงที่ ไม่จำเป็นต้องมี yaw control หรือส่วนควบคุมการหันรับลม และเสา ส่วนประกอบอื่นๆ จะคล้ายคลึงกับกังหันลมแนวแกนนอน

- 1.) Rotor Blade ใบพัดโรเตอร์ เป็นตัวรับพลังงานลม สามารถรับพลังงานลมได้ทุกทิศทาง
- 2.) Upper hub, Lower hub ส่วนยึด Rotor Blade
- 3.) Gear Box ห้องส่งกำลัง ซึ่งเป็นระบบปรับเปลี่ยนและควบคุมความเร็วในการหมุนระหว่างเพลลา
- 4.) Generator เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า

2.9 ผลกระทบของการใช้กังหันลม [7]

ปัจจุบันมีการใช้งานกังหันลมผลิตไฟฟ้ากันมากมายในหลายประเทศ แม้จะมีข้อดีหลายอย่างไม่ว่าจะเป็นเรื่องของพลังงานที่ได้มาเป็นพลังงานสะอาดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่ก็ยังส่งผลกระทบข้างเคียงหลายๆปัจจัยซึ่งผลกระทบข้างเคียงอื่นๆอาจมีดังต่อไปนี้

- ขนาดพื้นที่ที่ต้องใช้ในการติดตั้ง กังหันลมจะต้องติดตั้งอยู่ห่างกันห่างถึงสิบเท่าของความสูงกังหัน เพื่อที่กระแสลม จะได้ลดความปั่นป่วนหลังจากที่ผ่านกังหันลมตัวอื่นมา อย่างไรก็ตามพื้นที่ที่ติดตั้งจริงของกังหัน ลมจะใช้เพียง 1 เปอร์เซ็นต์ ของพื้นที่ทั้งหมด ซึ่งจะเป็นส่วนของเสาและฐานรากและเส้นทาง สำหรับการเข้าไปติดตั้งและดูแลรักษา กังหันลมขนาดใหญ่ที่มีความสูงของเสา กังหันมาก จะต้อง ติดตั้งอยู่ห่างกันเป็นระยะทางไกล ตัวอย่างเช่น กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดระดับเมกะวัตต์ ต้องการระยะห่างระหว่างกันถึง 0.5 - 1 กิโลเมตร ดังนั้นเมื่อพิจารณาโดยละเอียด แล้วจะพบว่า การติดตั้งกังหันลมจะไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้ประโยชน์จากพื้นที่ต่างๆ อาทิเช่น พื้นที่ทางการเกษตร พื้นที่อุตสาหกรรม หรือแม้แต่พื้นที่ป่าธรรมชาติ ประชาชนในพื้นที่ดังกล่าวยังคงสามารถ ใช้ประโยชน์จากที่ดินได้อย่างปกติ

- ทัศนวิสัย สำหรับผลกระทบทางด้านสายตาหรือการมองเห็นของระบบกังหันลมผลิต ไฟฟ้า นั้น ยังไม่ได้มีการประเมินผลออกมาอย่างชัดเจน กังหันลมขนาดใหญ่จะมีความสูงมากกว่า 50 เมตรขึ้นไป ทำให้สามารถมองเห็นได้จากระยะไกล กังหันลมที่ติดตั้งอยู่ตามทุ่งหญ้า สร้าง ความสวยงาม สร้างจินตนาการ และความคิดต่างๆ ให้กับผู้พบเห็น กังหันลมสามารถใช้เป็นสื่อ การเรียนรู้ หลักการทางอากาศพลศาสตร์ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญต่อเทคโนโลยีการบินหรืออวกาศ ยานได้

- เสียงรบกวน เสียงของกังหันลมเกิดจากการหมุนของปลายใบพัดตัดกับอากาศจากการที่ ใบพัดหมุนผ่านเสา กังหัน จากความปั่นป่วนของลมบริเวณใบกังหันลม และจากตัวเครื่องจักรกล ภายในตัวกังหันลม โดยเฉพาะส่วนของเกียร์ เสียงดังของกังหันลมผลิตไฟฟ้าเป็นตัวแปรที่สำคัญ ประการหนึ่งที่แสดงถึงประสิทธิภาพของกังหันลม ดังนั้นทางบริษัทผู้ผลิตกังหันลมจึงพยายาม พัฒนาเทคโนโลยีต่างๆเพื่อลดผลกระทบจากเสียงของกังหันลมในช่วงห้าปีที่ผ่านมา ระดับของเสียงในบริเวณอาคาร บ้านเรือน หรือที่พักอาศัยที่จะเป็นอันตรายต่อมนุษย์อยู่ที่ไม่เกิน 40 เดซิเบล ที่ระยะห่างไม่เกิน 250 เมตร ดังนั้นการติดตั้งกังหันลมหากต้องการหลีกเลี่ยง ปัญหา ดังกล่าว ก็ สามารถทำได้โดยการเพิ่มระยะห่างจากเขตที่พักอาศัยของมนุษย์ให้มากขึ้น

- นก มีผลการศึกษาจากหลายแห่งที่ขัดแย้งกัน สำหรับสาเหตุการตายของนกจากการบินชนกังหันลมที่กำลังหมุนอยู่ แต่หากพิจารณาแล้วความถี่ของเหตุการณ์ดังกล่าวอาจจะเกิดขึ้นได้ ไกล่เคียงหรือน้อยกว่าการที่นกบินชนรถ หน้าต่างของอาคาร หรือสายไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งเหตุการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นอยู่เสมอๆ ยกเว้นในบางกรณีจำนวนการตายของนกในพื้นที่ติดตั้งกังหันลมอาจสูง อันเนื่องมาจาก มีฝูงนกที่อพยพย้ายถิ่นฐานในบางฤดูการผ่านพื้นที่ดังกล่าวในเวลาากลางคืน หรือ พื้นที่นั้นเป็นแหล่งหาอาหารของนกนกล่าบางชนิดนอกจากนี้แล้วจากการศึกษาของผู้เชี่ยวชาญบางคนพบว่าในบริเวณพื้นที่ติดตั้งกังหันลม กลับมีอัตราการผสมพันธุ์ ของเกสรดอกไม้ที่สูงมาก เนื่องจากการปั่นป่วนของกระแสลมในบริเวณนั้น

- คลื่นสนามแม่เหล็กรบกวน สัญญาณโทรทัศน์ คลื่นวิทยุ และเรดาร์ สามารถถูกรบกวนได้จาก การหมุนของกังหันลม ซึ่งสร้างคลื่นรบกวนสัญญาณเหล่านั้น สัญญาณเรดาร์ซึ่งมีความสำคัญ ทางด้านการทหารพบว่าจะไม่มีரியงานของการถูกรบกวนจากกังหันลมอย่างชัดเจน ซึ่งไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในความเป็นจริงแล้วในปัจจุบันพบว่ากังหันลมได้รับการยอมรับจากทางการทหาร และมีพื้นที่ทางการทหารหลายแห่ง โดยเฉพาะสนามบินที่มีกังหันลมติดตั้งอยู่ในบริเวณใกล้เคียง ซึ่งก็ไม่พบว่ามีควมผิดปกติใดๆ กับระบบเรดาร์

- ความยั่งยืน ปัจจุบันกระแสของความยั่งยืน (sustainable) และเทคโนโลยีที่ปลอดภัย มลพิษ(zero-emission technology) กำลังเป็นที่สนใจของนักวิทยาศาสตร์ นักวิจัย หรือแม้แต่ นักการเมือง การทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าไม่ก่อให้เกิดมลพิษ สามารถใช้เป็นเทคโนโลยีหนึ่ง เพื่อการผลิตไฟฟ้าทดแทนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล และนิวเคลียร์ ดังนั้นเทคโนโลยีกังหันลมจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการพัฒนาอย่างยั่งยืน

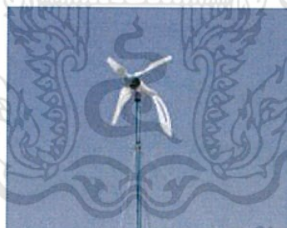
2.10 ขนาดของกังหันลม [6]

ขนาดของกังหันลมที่นิยมใช้กันจริงในปัจจุบัน มีดังนี้



รูปที่ 2.12 กังหันลมขนาด 200W [6]

กังหันลมขนาด 200W เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.1 เมตร เริ่มหมุน ที่ความเร็วลม 2.5 m/s (ความเร็วลมที่ต้องการ 6 m/s) กำลังไฟฟ้าสูงสุด 250W ผลิตไฟฟ้ากระแสตรง 12 และ 24 Volt



รูปที่ 2.13 กังหันลมขนาด 300W [6]

กังหันลมขนาด 300W เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 เมตร เริ่มหมุน ที่ความเร็วลม 2.5 m/s (ความเร็วลมที่ต้องการ 7 m/s) กำลังไฟฟ้าสูงสุด 400W ผลิตไฟฟ้ากระแสตรง 24 Volt



รูปที่ 2.14 กังหันลมขนาด 500W [6]

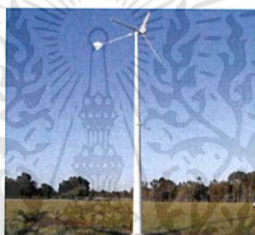
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กังหันลมขนาด 500W เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 เมตร เริ่มหมุน ที่ความเร็วลม 2.5 m/s (ความเร็วลมที่ต้องการ 8 m/s) กำลังไฟฟ้าสูงสุด 700W ผลิตไฟฟ้ากระแสตรง 24 และ 36 Volt



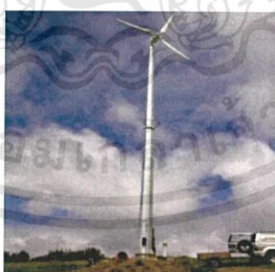
รูปที่ 2.15 กังหันลมขนาด 1kW [6]

กังหันลมขนาด 1kW เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.7 เมตร เริ่มหมุนที่ ความเร็วลม 2.5 m/s (ความเร็วลมที่ต้องการ 9 m/s) กำลังไฟฟ้า สูงสุด 1.3kW ผลิตไฟฟ้ากระแสตรง 48 Volt



รูปที่ 2.16 กังหันลมขนาด 2kW [6]

กังหันลมขนาด 2kW เส้นผ่าศูนย์กลาง 3.1 เมตร เริ่มหมุนที่ความเร็วลม 2.5 m/s (ความเร็วลมที่ต้องการ 9 m/s) กำลังไฟฟ้าสูงสุด 2.5kW ผลิตไฟฟ้ากระแสตรง 120 และ 240 Volt



รูปที่ 2.17 กังหันลมขนาด 5kW [6]

กังหันลมขนาด 5kW เส้นผ่าศูนย์กลาง 6.4 เมตร เริ่มหมุนที่ ความเร็วลม 2.5 m/s (ความเร็วลมที่ต้องการ 10 m/s) กำลังไฟฟ้าสูงสุด 6kW ผลิตไฟฟ้ากระแสตรง 240 Volt



รูปที่ 2.18 กังหันลมขนาด 10kW [6]

กังหันลมขนาด 10kW เส้นผ่าศูนย์กลาง 8 เมตร เริ่มหมุนที่ ความเร็วลม 2.5 m/s (ความเร็วลมที่ต้องการ 10 m/s) กำลังไฟฟ้าสูงสุด 12kW ผลิตไฟฟ้ากระแสตรง 240 และ 360 Volt



รูปที่ 2.19 กังหันลมขนาด 20kW [6]

กังหันลมขนาด 20kW เส้นผ่าศูนย์กลาง 8 เมตร เริ่มหมุนที่ ความเร็วลม 2.5 m/s (ความเร็วลมที่ต้องการ 12 m/s) กำลังไฟฟ้าสูงสุด 25kW ผลิตไฟฟ้ากระแสตรง 420 Volt

หมายเหตุ

- ระบบจะทำการตัดต่ออัตโนมัติเมื่อความเร็วลมสูงเกินกว่าที่กำหนด
- ขนาดตั้งแต่ 3kW ขึ้นไป ประกอบด้วยระบบควบคุม ขับเคลื่อนอัตโนมัติเพื่อปรับทิศทางรับ

กระแสลม

สามารถเขียนตารางแบ่งชนิดของกังหันลมตามขนาดได้ดังนี้

ตารางที่ 2.4 การแบ่งชนิดของกังหันลมตามขนาด [6]

ขนาดของกังหันลม	ขนาดกำลังผลิต (kW)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (m)	พื้นที่กวาด (m ²)
ขนาดจิ๋ว (Micro Wind Turbine)	< 1.5	< 3	< 7
ขนาดเล็ก (Small Wind Turbine)	1.5-2.0	3-10	7-80
ขนาดกลาง (Medium Wind Turbine)	20-200	10-25	80 - 500
ขนาดใหญ่ (Large Wind Turbine)	200-1,500	25-70	500-3,850
ขนาดใหญ่มาก (Very Large Wind Turbine)	> 1,500	> 70	> 3,850

2.11 ชนิดของดินและดินที่เหมาะสมกับติดตั้งสิ่งปลูกสร้าง [24]

2.11.1 ประเภทของดินแบ่งตามสภาพพื้นที่

- ดินที่ลุ่ม หรือที่เรียกกันว่า ดินนา คือ ดินที่เกิดในบริเวณพื้นที่ต่ำ สภาพพื้นที่ราบเรียบถึงค่อนข้างราบ ส่วนใหญ่พบเป็นบริเวณกว้างในภาคกลางและตามที่ราบลุ่มแม่น้ำต่างๆ ส่วนใหญ่ใช้ประโยชน์ในการทำนา และมักมีน้ำท่วมขังในพื้นที่ในช่วงฤดูฝน

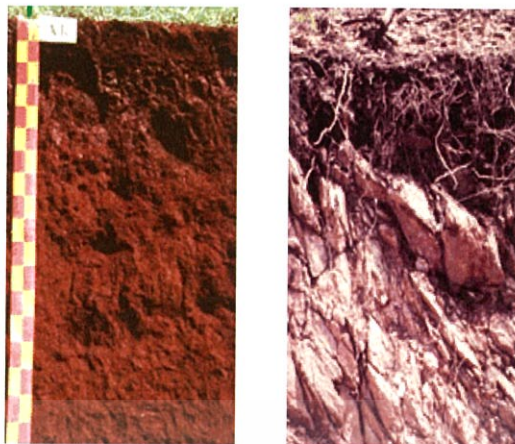
- ดินที่ดอน หรือ ดินไร่ คือ ดินที่พบอยู่ในบริเวณพื้นที่ที่มีความลาดชัน สภาพพื้นที่อาจเป็นที่ราบ ที่ลาดเชิงเขา หรือเป็นลูกคลื่น มีการระบายน้ำดี โดยทั่วไปจะไม่มีน้ำขังน้ำเมื่อฝนตก พบอยู่ทั่วไปในภูมิภาคต่างๆ ส่วนใหญ่ใช้ประโยชน์ในการปลูกพืชไร่ ไม้ผล หรือไม้ยืนต้นอื่นๆ

2.11.2 ประเภทของดิน แบ่งตามความลึกของดิน

ความลึกของดิน (effective soil depth) หมายถึงความหนาของดินนับจากชั้นผิวดินจนถึงชั้นดินที่ขัดขวางต่อการเจริญเติบโตหรือการขนถ่ายของรากพืช เช่น ชั้นหินพื้น ชั้นดาน ชั้นเศษหิน ชั้นกรวด หรือชั้นลูกรัง เป็นต้น ซึ่งมีผลทำให้รากพืชชะงักงัน ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ตามปกติ โดยทั่วไปดินที่มีความเหมาะสมสำหรับการเพาะปลูกควรมีความลึกไม่น้อยกว่า 1 เมตร ขึ้นไป

- ดินตื้นมาก คือ ดินที่มีความหนาไม่เกิน 25 เซนติเมตร นับจากผิวหน้าดินลงไป
- ดินตื้น คือ ดินที่มีความหนาตั้งแต่ 25-50 เซนติเมตร นับจากผิวหน้าดิน
- ดินลึกปานกลาง คือ ดินที่มีหนาดั้งแต่ 50-100 เซนติเมตร นับจากผิวหน้าดิน
- ดินลึก-ลึกมาก คือ ดินที่มีความหนามากกว่า 100 เซนติเมตร นับจากผิวหน้าดินลงไป

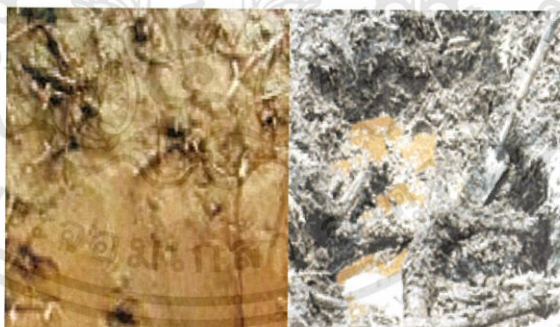
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 ลักษณะของดินลึก-ลึกมากเปรียบเทียบกับดินตื้นมาก [24]

2.11.3 ประเภทของดิน แบ่งตามวัสดุที่เป็นองค์ประกอบในดิน

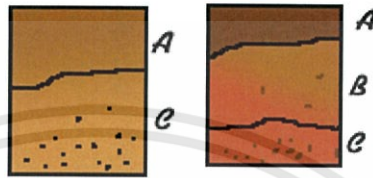
- ดินอนินทรีย์ ดินที่พบอยู่ทั่วไป ไปมักจะเป็น ดินอนินทรีย์ (mineral soils) คือเป็นดินที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นอนินทรีย์สารที่ได้มาจากการผุพังสลายตัวของหิน แร่ ผสมคลุกเคล้าอยู่กับอินทรีย์วัตถุ ปกคลุมพื้นผิวโลกอยู่เป็นชั้นบางๆ
- ดินอินทรีย์ ดินที่เกิดในสภาพป่าพรุ หรือสภาพที่มีน้ำแช่ขังเป็นระยะเวลายาวนาน มีพีชีชอบน้ำชั้นอยู่ ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อกระบวนการย่อยสลายเศษซากอินทรีย์ต่างๆ ทำให้เกิดการทับถม และสะสมเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนเกิดเป็นชั้นดินอินทรีย์ หรือชั้น O_2 ขึ้น และเมื่อมีการทับถมมากขึ้นเรื่อย ดินนี้จะกลายเป็นดินอินทรีย์ในที่สุด



รูปที่ 2.21 ลักษณะดินอนินทรีย์เปรียบเทียบกับดินอินทรีย์ [24]

2.11.4 ประเภทของดินแบ่งตามพัฒนาการ

- ดินมีพัฒนาการน้อย หมายถึง ดินที่ประกอบด้วยชั้นดินบน (A) และชั้นวัตถุต้นกำเนิดดิน (C)
- ดินมีพัฒนาการมาก ดินที่ประกอบด้วยชั้นดินบน (A) ชั้นดินล่างที่แสดงการเปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นผลจากกระบวนการทางดิน (B) และชั้นวัตถุต้นกำเนิดดิน (C)



รูปที่ 2.22 การเปรียบเทียบระหว่าง ดินมีการพัฒนาน้อยกับดินมีพัฒนาการมาก [24]

2.11.5 ประเภทของดิน แบ่งตามเนื้อดิน (ดินร่วน-ดินเหนียว-ดินทราย)

- ดินเหนียว เป็นดินที่มีเนื้อละเอียด ในสภาพดินแห้งจะแตกออกเป็นก้อนแข็งมาก เมื่อเปียกน้ำแล้วจะมีความยืดหยุ่น สามารถปั้นเป็นก้อนหรือคลึงเป็นเส้นยาวได้ เหนียวเหนอะหนะติดมือ เป็นดินที่มีการระบายน้ำและอากาศไม่ดี แต่สามารถอุ้มน้ำ ดูดยิด และแลกเปลี่ยนธาตุอาหารพืชได้ดี เหมาะที่จะใช้ทำนาปลูกข้าวเพราะเก็บน้ำได้นาน
- ดินร่วน เป็นดินที่เนื้อดินค่อนข้างละเอียดนุ่มมือในสภาพดินแห้งจะจับกันเป็นก้อนแข็งพอประมาณ ในสภาพดินชื้นจะยืดหยุ่นได้บ้าง เมื่อสัมผัสหรือคลึงดินจะรู้สึกนุ่มมือแต่อาจจะรู้สึกสากมืออยู่บ้างเล็กน้อย เมื่อกำดินให้แน่นในฝ่ามือแล้วคลายมือออก ดินจะจับกันเป็นก้อนไม่แตกออกจากกัน เป็นดินที่มีการระบายน้ำได้ดีปานกลาง จัดเป็นเนื้อดินที่มีความเหมาะสมสำหรับการเพาะปลูก
- ดินทราย เป็นดินที่มีอนุภาคขนาดทรายเป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่าร้อยละ 85 เนื้อดินมีการเกาะตัวกันหลวมๆ มองเห็นเป็นเม็ดเดี่ยวๆ ได้ ถ้าสัมผัสดินที่อยู่ในสภาพแห้งจะรู้สึกสากมือ เมื่อลองกำดินที่แห้งนี้ไว้ในอุ้งมือแล้วคลายมือออกดินก็จะแตกออกจากกันได้ แต่ถ้ากำดินที่อยู่ในสภาพชื้นจะสามารถทำให้เป็นก้อนหลวมๆ ได้ แต่พอสัมผัสจะแตกออกจากกันทันที



รูปที่ 2.23 ลักษณะของ ดินเหนียว, ดินร่วน และดินทราย [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

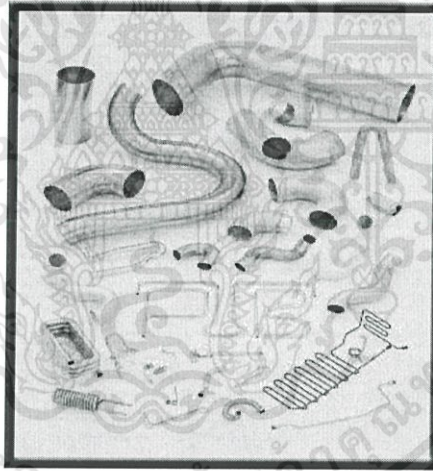
ลักษณะดินในพื้นที่ติดตั้งกังหันลมนั้น จะเป็นดินที่มีลักษณะเหนียว ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะสร้างสิ่งปลูกสร้าง

2.12 ทฤษฎีเรื่อง Bending moment [25]

โมเมนต์ดัด มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการออกแบบโครงสร้าง ไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างไม้ โครงสร้างเหล็ก หรือโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น ในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โมเมนต์ดัดจะเป็นตัวกำหนดขนาดหน้าตัดของคานและปริมาณเหล็กเสริม ในการศึกษาเรื่องการหาค่าโมเมนต์ดัด จำเป็นจะต้องรู้ถึงชนิดและพฤติกรรมของคานเมื่อรับน้ำหนักด้วย เพื่อการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง วัสดุที่ใช้งานท่อโค้ง หรือ โลหะแผ่นดัดขึ้นรูป ในงานวิศวกรรมจะต้องมีคุณสมบัติที่สามารถดัดโค้งได้ จึงสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้

2.12.1 การทดสอบแรงดัดโค้ง

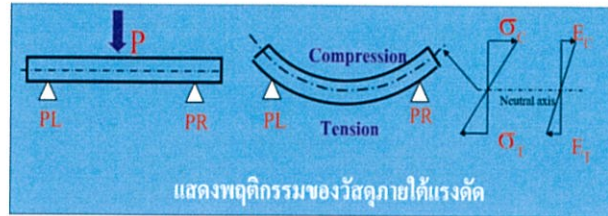
เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการแปรรูปของวัสดุเมื่อได้รับแรงดัดโค้ง ด้วยรัศมีความโค้งที่กำหนด จนได้มุมตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐานการทดสอบ จากนั้นจะพิจารณาดูว่าที่ผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบตรงบริเวณที่ทำการดัดโค้งเกิดรอยแตกขึ้นหรือไม่



รูปที่ 2.24 วัสดุในทางวิศวกรรมที่ใช้ในการทดสอบแรงดัดโค้ง [25]

2.12.2 พฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงดัด

เมื่อวัสดุได้รับแรง ไม่ว่าจะเป็นแรงในแนวตั้งฉาก หรือตามแนวแกนเส้นศูนย์กลางของชิ้นงาน ทำให้เกิด แรงดึงและแรงกด ในฝั่งตรงกันข้ามกัน แล้วเป็นผลให้ ชิ้นงานเกิดการโก่งงอ จะเรียกว่า วัสดุอยู่ภายใต้แรงดัด (Bending)



รูปที่ 2.25 พฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงดัด [25]

2.12.3 Bending Strength

การดัดจะทำให้เกิด Bending Moment, M ซึ่งเป็นผลรวมของแรงที่กระทำต่อจุดรองรับ PL หรือ PR แรงที่ทำให้เกิด M จะเรียกว่า Bending Stress, σ ในช่วงยืดหยุ่น จะเท่ากับ

$$\sigma = \frac{Mc}{I}$$

เมื่อ M คือ Bending Moment

c คือ ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของแกน

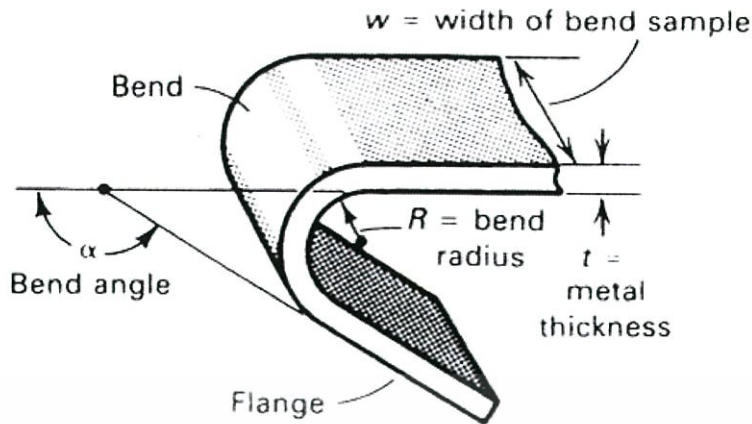
I คือ โมเมนต์ความเฉื่อย

2.12.4 หลักการในการทดสอบการดัดโค้ง

1. ใช้วิธีใดก็ได้ในการดัดชิ้นวัสดุทดสอบ
2. ชิ้นทดสอบอาจมีหน้าตัดเป็นวงกลม, สี่เหลี่ยม หรือรูปทรงหลายเหลี่ยม
3. ดัดให้ได้รัศมีความโค้ง (Bend radius, R) หรือให้ได้มุม (Bend angle, α)

ตามที่กำหนด

4. ทิศทางของแรงที่ใช้ในการดัดโค้งต้องคงที่
5. การให้แรงในการดัดโค้งต้องเป็นไปอย่างช้าๆ เพื่อป้องกันการเกิดการเคลื่อนที่ของชิ้นทดสอบในแนวข้าง

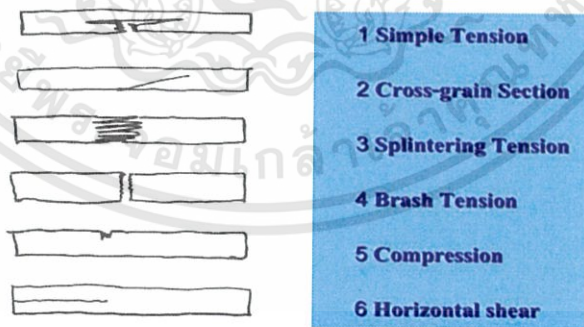


รูปที่ 2.26 หลังการทดสอบแรงดัดโค้ง [25]

2.12.5 การพิจารณาว่าขึ้นทดสอบผ่านการทดสอบการดัดโค้ง

พิจารณาจาก

- การตรวจสอบดูที่ผิวด้านนอกของขึ้นทดสอบว่าไม่มีรอยแตก การตรวจสอบอาจทำได้โดยการตรวจสอบด้วยตาเปล่า หรืออาจใช้กล้องที่มีกำลังขยายไม่เกิน 20 เท่า (ปกติจะกำหนดให้ใช้ตาเปล่า)
- ลักษณะการแตกหัก หรือเสียหาย ของวัสดุว่าแตกแบบเหนียวหรือเปราะ
- รอยแตกของวัสดุที่เปราะ เช่น ไม้ คอนกรีต และเหล็กหล่อจะแตกในทันที (Rupture) และด้านที่รับแรงดึงจะแตกก่อน ลักษณะการแตกของไม้ จะมีได้หลายลักษณะดังนี้



รูปที่ 2.27 ลักษณะการแตกของวัสดุ [25]

2.13 ชนิดของเสากังหันลม [26]

ในโครงการ Future Center ทางคณะผู้ศึกษาได้เลือกพื้นที่ติดตั้งกังหันลมที่เหมาะสม โดยใช้การติดตั้งเสาของกังหัน ลมนั้นจะต้องคำนึงถึง สภาพลมในพื้นที่ติดตั้ง ความสามารถในการรับแรงกดของดิน พื้นที่ติดตั้งมีความยาว 400 เมตร ต่อ กังหันลม 4 ชุด ซึ่งห่างกันชุดละ 100 เมตร ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเลือกเสาของกังหันลม ทางคณะผู้ศึกษาได้ทำการเลือกเสามา 3 ชนิด ดังนี้

2.13.1 เสาโมโนโพล (Monopole Towers)

ถ้าจะกล่าวถึงเสาที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ เสาโมโนโพล ซึ่งเหมาะสมกับกังหันลมขนาดเล็ก เสาโมโนโพลจะประกอบไปด้วยท่อเหล็กแบบเดี่ยว (single steel pipe) ที่ออกแบบมา ซึ่งต้องมีรากฐานที่สำคัญ เสาโมโนโพลมักจะนิยมใช้กันมากในกังหันลมที่สูง 140 ฟุต

ข้อดีของเสาโมโนโพล

- มีความสวยงาม มักจะเคลือบผงสีขาว (powder coated white) หรือ เคลือบด้วยสีเงินชุบสังกะสี
- การออกแบบเพื่อให้เสามั่นคงและบาง ทำให้เสาโมโนโพลเป็นตัวเลือกที่ดี
- ฐานที่มีขนาดเล็ก ทำให้เสาโมโนโพลใช้พื้นที่น้อย สร้างแรงสั่นสะเทือนน้อย และมีความน่าเชื่อถือ

ข้อเสียของเสาโมโนโพล

- มีราคาแพง
- จำเป็นต้องใช้บันจันในการซ่อมบำรุงกังหันลม



รูปที่ 2.28 Monopole Towers [26]

2.13.2 เสาแลคติก (Lattice Towers)

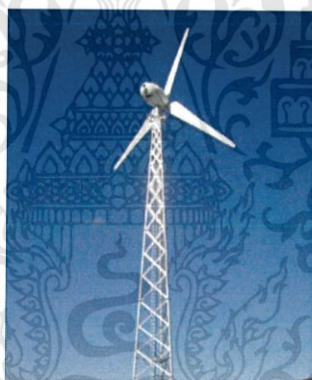
เสาแลคติกผลิตขึ้นโดยใช้การเชื่อมแผ่นเหล็ก มักนิยมใช้ใน ช่วงความสูงที่ 100-140 ฟุต

ข้อดีของเสาแลคติก

- เป็นทางเลือกที่เหมาะสม ตั้งแต่เสาแลคติกผลิตขึ้นโดยเนื้อวัสดุครึ่งหนึ่งเป็นแบบ เสาโมโนโพล
- มีน้ำหนักที่ดี โปร่งใส เมื่อมองจากระยะไกล
- ส่วนต่างๆ ของเสา สามารถวางซ้อนกันได้ เพื่อให้การขนส่งสะดวกสบาย

ข้อเสียของเสาแลคติก

- ไม่สวยงามจึงไม่เป็นที่ดึงดูดใจ
- ต้องการการป้องกันเพื่อรักษาสภาพของจุดเชื่อมต่อทั้งหมดของเสาตลอดเวลา
- การประกอบเสามีความยากลำบากมาก ทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูง
- ฐานมีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับเสาโมโนโพล



รูปที่ 2.29 Lattice Towers [26]

2.13.3 เสากริด-ไว (Guyed-Wire Towers)

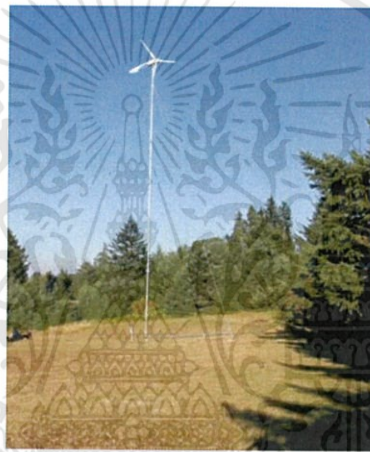
เสากริด-ไวประกอบด้วยท่อเหล็กขนาดเล็ก ปกติจะใช้กับกังหันลมที่มีกำลังผลิต 500 วัตต์ ไปจนถึง 10 กิโลวัตต์ ใช้กับกังหันลมที่มีขนาดความสูง 120 ฟุต เสากริด-ไว มักจะติดตั้งในแบบ ลักษณะที่เอียงขึ้น

ข้อดีของเสากริด-ไว

- มีราคาต่ำ
- ติดตั้งได้ง่าย และสามารถสร้างได้มือ
- ไม่จำเป็นต้องใช้ปั้นจั่นในการติดตั้ง
- เมื่อต้องการซ่อมบำรุงกังหันลม สามารถถอดตัวเสาได้โดยการใช้เครื่องมือ

ข้อเสียของเสากริด-ไว

- ฐานมีขนาดใหญ่เนื่องจากสายที่ใช้ในการยึดขยายตัวเสาออก ทำให้ใช้พื้นที่มากกว่าเสาโมโนโพล



รูปที่ 2.30 Guyed-wire Towers [26]

2.14 Reynold Number [27]

ในกลศาสตร์ของไหล, เรย์โนลด์นัมเบอร์(Re) เป็นจำนวนที่ไม่มีมิติ ที่เป็นการหาอัตราส่วนของแรงเฉื่อย ต่อแรงของความหนืด ซึ่งเป็นตัวเลขสำคัญสำหรับการกำหนดเงื่อนไขการไหล

$$\text{Reynold Number} : Re = \frac{\text{แรงเฉื่อย}}{\text{แรงหนืด}} = \frac{\text{inertial forces}}{\text{viscous forces}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวคิดได้รับการแนะนำโดย เซอร์ จอร์จ กาเบรียล สโตร์ก (Sir George Gabriel Stokes) ในปี 1851 ซึ่งเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re) ถูกนำมาใช้ในปี 1883 โดย ออสบอร์น เรย์โนลด์ (Osborne Reynolds) (1842-1912)

เรย์โนลด์นัมเบอร์ใช้ในการอธิบายแบ่งลักษณะการไหลของของเหลวที่แตกต่างกัน เช่นแบบราบเรียบ (laminar flow) หรือไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) กรณีเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการไหลที่มีค่าต่ำ แสดงว่าแรงของความหนืดจะมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนไหวของของเหลว ทำให้การไหลมีลักษณะราบเรียบ (laminar) ถ้าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการไหลที่มีค่าสูง แสดงว่าแรงของความเฉื่อยจะมีอิทธิพลต่อการไหล ทำให้การไหลเป็นแบบปั่นป่วน (turbulent) และจะผลิตการหมุนวนแบบก้นหอย (vortices) ซึ่งทำให้การไหลไม่เสถียร

ซึ่งสามารถคำนวณค่า Reynold Number ได้ในสมการ ดังนี้

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} = \frac{v l}{\nu}$$

โดย

v คือ ความเร็วของไหล (m/s)

l คือ ลักษณะความยาวของแต่ละวัสดุ หรือความกว้างของคอร์ดของ airfoil (m)

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

μ คือ ความหนืดของของไหลแบบไดนามิก ($Pa \cdot s$ หรือ $N \cdot s/m^2$ หรือ $kg/m \cdot s$)

ν คือ ความหนืดของของไหลแบบคิเนมาติก, ($\nu = \mu/\rho$), (m^2/s)

$Re \ll 1$



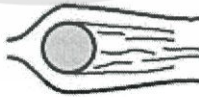
$Re \sim 10$



$Re > \sim 90$



$Re \sim 10^4 \sim 10^5$



$Re > \sim 10^5$



รูปที่ 2.31 ลักษณะการเคลื่อนที่ของของไหล ที่ค่า Reynolds Number ต่างๆ [28]

2.15 ประสิทธิภาพในด้านอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมแนวนอน [29]

ชนิดของใบพัดของกังหันลมสามารถพิจารณาเหมือนกรณีใบพัดของเครื่องบิน ขับเคลื่อนด้วยพลังงานจากลมและแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานกล ต่างจากใบพัดที่ขับพลังงานไปสู่รูปของพลังงานลม 2 อย่างนี้มีทฤษฎีในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพที่คล้ายคลึงกัน การวิเคราะห์ให้ใบพัดลมแบ่งเป็น 2 วิธี วิธีแรกวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีโมเมนตัม วิธีที่ 2 วิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของใบพัด

วิธีวิเคราะห์โมเมนตัมมีพื้นฐานคือวิเคราะห์แรงกระทำบนโรเตอร์ วิธีนี้มีประโยชน์มากสำหรับการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพ ความเร็วลม แบบอุดมคติ แต่มันจะไม่ใช้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับรูปใบพัด

วิธีวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบใบพัดตรงข้ามกับวิธีแรก เพราะสนใจกำลังที่ผลิตโดยใบพัดซึ่งก่อให้เกิดการหมุน แต่ก็หยุดชะงักเนื่องจากขาดความรู้ด้านอากาศพลศาสตร์และปัจจัยที่แทรกแซงในใบพัด

ทฤษฎีใบพัดสมัยใหม่ได้พัฒนาจากแนวคิดที่ว่ากระแสลมทำให้ใบพัดหมุน ทฤษฎีที่ว่ากระแสลมถูกนำมาใช้ขับเคลื่อนและสร้างอัตราเร็วเร็วถูกนำมาใช้วิเคราะห์อัตราเร็ว การจ่ายไฟไหลเวียน หรือใช้วิเคราะห์กำลังสูญเสียสูงสุด ทฤษฎีดังกล่าวมีดังนี้ ทฤษฎีกระแสลม ทฤษฎีการตัดแปลงโครงสร้างใบพัด ทฤษฎีสตรีป

ทฤษฎีนี้ถูกใช้บ่อยในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของใบพัดลมและโรเตอร์ของเฮลิคอปเตอร์แม้ว่าจะมีวิธีอื่นที่ใช้วิเคราะห์ก็ตาม

ทฤษฎีสตรีปเหมาะกับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องจักรกังหันลม อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองได้แสดงว่าข้อมูลผลการทดลองขึ้นอยู่กับ ช่วงของเรย์โนลด์นัมเบอร์ ซึ่งกระแสลมที่ปั่นป่วนค่อนข้างที่จะมีผลต่อหลักอากาศพลศาสตร์ เหตุผลหนึ่งที่ทำให้ทฤษฎีสตรีปเป็นที่เชื่อถือคือ ร่องอากาศของใบพัดขยายมากกว่าที่คาด ที่อัตราความเร็วสูงสุด ใบพัดและโรเตอร์ของเฮลิคอปเตอร์ จะถูกสังเกต ที่กระแสลมความเร็วสูง ตำแหน่งของร่องอากาศจะเข้าไปใกล้จุดสูงสุดและเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรงระหว่างกระแสลมสูงสุดและกระแสที่ไหลในใบพัด ผลลัพธ์ของการส่งจ่ายแบบ Radial ถูกพบว่าต่างจากการส่งจ่ายแบบ Force ซึ่งเราคาดการณได้โดยใช้ทฤษฎีสตรีป เนื่องจากกังหันลมส่วนมากทำงานที่อัตราส่วนความเร็วลมสูง อย่างไรก็ตามระหว่างที่ร่องอากาศมีการขยาย กระแสลมสูงสุดเคลื่อนที่ออกและไม่เกิดปฏิกิริยาที่รุนแรง จากตำแหน่งภายนอก กระแสลมสูงสุดสร้างความเร็วซึ่งไปลด local angle ยิ่งไปกว่านั้นความเร็วยังมีขนาดที่ต่ำกว่ากระแสลมภายในที่ตำแหน่งของร่องอากาศ

การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีสตรีปต้องการการดัดแปลงบางอย่าง เนื่องจากรูปแบบการไหลของกระแสลม แม้บางครั้งจะขาดกระแสลมสูงสุด การไหลของกระแสลมจะมีความสัมพันธ์กับการหมุน

ของใบพัดซึ่งใกล้กับยอดใบพัด จึงเรียกว่า tip loss ซึ่งสามารถแก้ได้หลายวิธี วิธีที่ง่ายคือลดรัศมีสูงสุดของโรเตอร์เป็นส่วนๆจากรัศมีแท้จริง ที่ 97% ของรัศมีแท้จริง

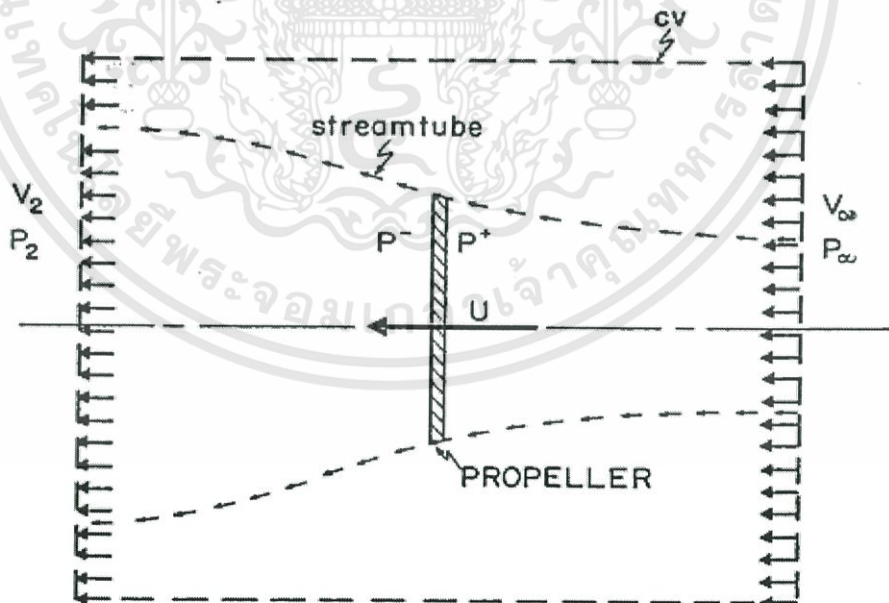
พื้นฐานการพัฒนาทฤษฎีสตรีปจะแสดงในบทนี้ พร้อมกับแบบจำลอง tip loss และเปรียบเทียบโดยใช้โมเดลต่างๆกัน

2.15.1 ทฤษฎีโมเมนตัมตามแกน

หน้าที่ของกังหันลมคือดึงพลังงานจากอากาศและสร้างกำลังทางกลซึ่งจะเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานอีกรูปแบบในภายหลัง การสูญเสียพลังงาน ,การดึงพลังงาน เป็นลักษณะของการหมุนรอบของกระแสลมที่เกี่ยวข้องกับใบพัดลมและแรงเสียดทาน การประเมินครั้งแรกได้บ่งบอกถึงกำลังขาออกของกังหันลม เกิดสมมติฐานดังนี้

1. ใบพัดทำงานโดยไม่มีแรงเสียดทาน
2. กระแสลมที่ซบกลับไปสู่ใบพัดเป็นตัวแยกการไหลของลมผ่านจานโรเตอร์จากภายนอก
3. ความดันสถิตภายในและภายนอกของกระแสลมที่ซบกลับสู่ใบพัดอยู่ไกลจากด้านหน้าและด้านหลังของโรเตอร์เท่าๆกัน กับของ ความดันสถิตที่ทำให้กระแสไม่ถูกรบกวน ($P_2 = P_\infty$)
4. โหลดแรงขับสม่ำเสมอมากกว่าจานโรเตอร์
5. ไม่มีการหมุนที่ถูกแจ้งให้ทราบโดยจานโรเตอร์

เมื่อนำทฤษฎีโมเมนตัมมาประยุกต์กับส่วนควบคุมในรูป 2.32 ซึ่งมีการหมุนตามและหมุนทวนเข็มนาฬิกาในระนาบของส่วนควบคุมซึ่งไกลจากการย้ายระนาบกังหันลม จะได้ดังนี้



รูปที่ 2.32 การควบคุมปริมาณของกังหันลม [29]

$-T =$ โมเมนตัมของฟลักซ์ออก $-$ โมเมนตัมของฟลักซ์ที่เข้า

$$T = \dot{m}(v_\infty - v_2) = \rho AU(v_\infty - v_2) \quad (2.1.1)$$

จากเงื่อนไขความดัน จะสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$T = A(p^+ - p^-) \quad (2.1.2)$$

นำมาประยุกต์กับสมการเบอร์นูลลี คิดแบบตามเข็ม

$$\frac{1}{2} \rho v_\infty^2 + p_\infty = \frac{1}{2} \rho U^2 + p^+ \quad (2.1.3)$$

และทวนเข็ม

$$\frac{1}{2} \rho v_\infty^2 + p_\infty = \frac{1}{2} \rho U^2 + p^- \quad (2.1.4)$$

นำสองสมการมาลบกัน

$$p^+ - p^- = \frac{1}{2} \rho (v_\infty^2 - v_2^2)$$

แทนในสมการที่ 2.1.2

$$T = \frac{1}{2} \rho A (v_\infty^2 - v_2^2) \quad (2.1.5)$$

จับสมการ 2.1.5 มาเท่ากับ 2.1.1

$$\frac{1}{2} \rho A (v_\infty^2 - v_2^2) = \rho A v (v_\infty - v_2)$$

หรือ

$$U = \frac{v_\infty + v_2}{2} \quad (2.1.6)$$

จะได้ผลลัพธ์คือ ความเร็วที่ผ่านกังหันลมคือความเร็วเฉลี่ยของความเร็วลม และความเร็วร่อนอากาศท้ายเครื่องยนต์ จากนั้นนิยามความเหนี่ยวนำในแกน เป็น a ดังนี้

$$U \equiv v_\infty (1 - a)$$

จากสมการ 2.1.6

$$v_\infty (1 - a) = \frac{v_\infty + v_2}{2}$$

จากนั้น ร่องอากาศจะสามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$v_2 = v_\infty (1 - 2a)$$

ความเร็วของร่องอากาศจะเป็น 2 เท่าของความเร็วเหนี่ยวนำบนระนาบของโรเตอร์ จึงสรุปได้ว่าระบบการสร้างกระแสลมของกังหันและการคำนวณความเร็วเหนี่ยวนำโดยใช้ หลักของ บีโธ ซาร์วาร์ต ให้เป็นประโยชน์

ดังนั้น

$$a = 1 - \frac{v_\infty + v_2}{2v_\infty} \quad (2.1.7)$$

ซึ่งอธิบายได้ว่าโรเตอร์ดูดซับพลังงานทั้งหมด เช่น $v_2 = 0$ ให้ a มีค่าสูงสุดที่ $\frac{1}{2}$ เพราะกำลังเกิดจากอัตราเร็วของสสารที่ไหลและเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ จะได้ P เท่ากับ

$$P = \dot{m} \Delta K.E. = \rho A U \left(\frac{v_\infty^2}{2} - \frac{v_2^2}{2} \right) = \frac{1}{2} \rho A v_\infty^3 4a(1-a)^2$$

หรือ

$$P = 2\rho A v_\infty^3 a(1-a)^2 \quad (2.1.8)$$

จะหาค่าสูงสุดได้เมื่อ $\frac{\partial P}{\partial a} = 0$

$$\frac{\partial P}{\partial a} = 2\rho A v_\infty^3 (1-4a+3a^2) = 0$$

หรือ

$$a = 1 \text{ หรือ } \frac{1}{3}$$

กำลังสูงสุดจะเกิดเมื่อ $a = \frac{1}{3}$ ดังนั้น

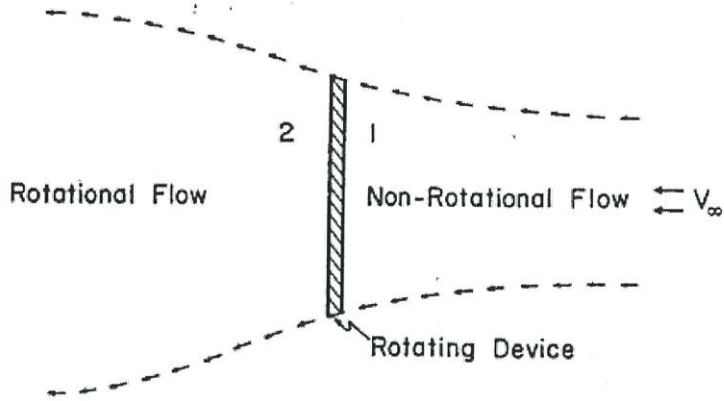
$$P_{\max} = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho A v_\infty^3 \right)$$

ค่าสัมประสิทธิ์กำลังจะมีค่าประมาณ 0.539

หมายเหตุ $C_p \equiv \frac{\text{Power}}{\frac{1}{2} \rho A v_\infty^3}$

2.15.2 ทฤษฎีโมเมนตัมของร่องอากาศที่หมุน

สมมติฐานแรกของทฤษฎีโมเมนตัมแนวแกนจะพิจารณาในกรณีที่ไม่มีกรหมุน มันสามารถพัฒนาได้ง่ายและมีประโยชน์ ถ้าเราพิจารณาที่ความเร็วเชิงมุม ซึ่งสัมพันธ์กับกระแสลมที่ไหลไปยังปลายใบ ซึ่งจะมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความเร็วเชิงมุม ในโรเตอร์ สมมติฐานนี้ใช้ทฤษฎีโมเมนตัมแนวแกนช่วยประเมิน ซึ่งความดันรองอากาศจะมีค่าเท่ากับความดันกระแสลมอิสระ



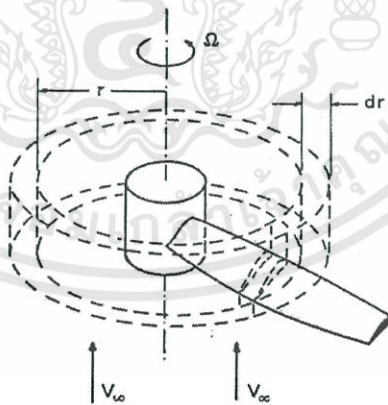
รูปที่ 2.33 Flow Diagram ของกังหัน [29]

เขียนสมการพลังงานเพื่ออธิบายรูป 2.2.1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพลังงานจลน์หมุนลดกำลังที่ถูกดึงมา

$$K.E_{\text{translational}(1)} = \text{Power Extracted} + K.E_{\text{translational}(2)} + K.E_{\text{rotational}(2)}$$

กำลังมีค่าเท่ากับผลผลิตที่ได้จากทอร์คของโรเตอร์, Q และความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์, Ω เพื่อที่จะได้รับกำลังซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องมีความเร็วเชิงมุมที่สูงและทอร์คที่ต่ำ เนื่องจากทอร์คที่สูงจะส่งผลต่อพลังงานในการหมุนของช่องอากาศ และตัวแปรเหนี่ยวนำเชิงมุมสามารถแสดงได้ดังนี้

$$a' = \frac{\text{angular velocity of the wind at the rotor}}{\text{twice the angular velocity of the rotor}} = \frac{\omega}{2\Omega} \tag{2.2.1}$$



รูปที่ 2.34 แสดงองค์ประกอบของใบพัดโรเตอร์ [29]

การใช้แหวนเชิงมุมดังรูป 2.34 และการเขียนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณควบคุมของโมเมนต์และโมเมนต์ของโมเมนต์ จะได้

$$dT = \rho U 2\pi r_L dr_L (v_\infty - v_2)$$

เมื่อ

$$r_L = r \cos\psi$$

$$dr_L = dr \cos\psi$$

$$\varphi = \text{coning angle}$$

จะได้ว่า

$$(v_\infty - v_2) = 2av_\infty$$

$$dT = 4\pi r_L \rho v_\infty^2 a(1-a) dr_L \quad (2.2.2)$$

โมเมนต์ของสมการโมเมนต์จะเป็น

$$\begin{aligned} dQ &= d \dot{m}(v_1 r) = 2\pi r_L \rho U r_L^2 \omega dr_L \\ &= 4\pi r_L^3 \rho v_\infty (1-a) a' \Omega dr_L \end{aligned} \quad (2.2.3)$$

ให้ $dP = \Omega dQ$

$$P = \int_0^R \Omega dQ$$

ดังนั้น แทนสมการ 2.2.3 ลงในสมการอินทิเกรตเพื่อหาค่า

$$P = \int_0^{R \cos\psi} 4\pi \rho v_\infty \Omega^2 (1-a) a' r_L^3 dr_L$$

ให้ $x_L \equiv \frac{r_L \Omega}{v_\infty}$ เป็นอัตราเร็วสูงสุด (Tip Speed Ratio) (2.2.4)

และ $x_\psi \equiv \frac{R \Omega \cos\psi}{v_\infty}$ เมื่อ R คือรัศมีของโรเตอร์ (2.2.5)

จะได้

$$P = \rho A v_\infty^3 \frac{4 \cos^2 \phi}{x_\psi^2} \int_0^{x_\psi} (1-a) a' x_L^3 dx_L \quad (2.2.6)$$

ขณะที่ $A = \pi R^2$ สัมประสิทธิ์กำลังจะได้

$$C_p = \frac{8}{x_\psi^2} \cos^2 \psi \int_0^{x_\psi} x_L^3 a'(1-a) dx_L \quad (2.2.7)$$

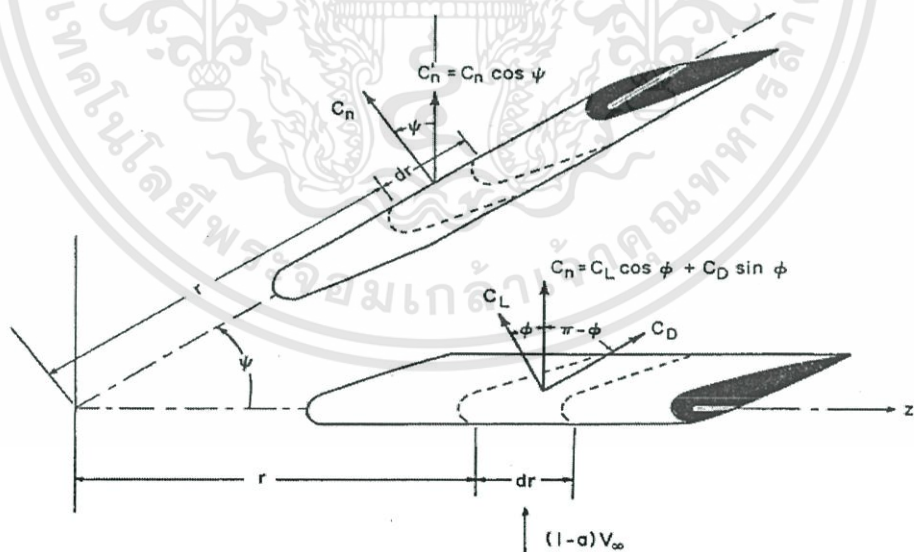
2.15.3 ทฤษฎีองค์ประกอบของใบพัด

กำลังที่ได้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของใบพัดที่แตกต่างกันไป ความยาวใบพัด ทอร์กและ โหลดแรงขับ ของโรเตอร์จะสามารถใช้วิเคราะห์ได้ สมมติฐานเบื้องต้นคือ ไม่มีการแทรกแซงระหว่างองค์ประกอบของใบพัดที่ต่อเนื่องกันและแรงที่กระทำต่อใบพัดระหว่างการยกและลาก

ในความเป็นจริงของกังหันลม ใบพัดอาจทำขึ้นมาให้เข้ากับโคนของมัน มิฉะนั้น สัมประสิทธิ์ของแรงจะแสดงได้ดังรูปที่ 2.35 โดยที่โคนส่งผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์แรงเท่านั้น สัมประสิทธิ์แรงในโคนจะแสดงได้ดังนี้

$$C_n' = C_L \cos \phi \cos \psi + C_D \sin \phi \cos \psi$$

$$C_t' = C_L \sin \phi - C_D \cos \phi$$



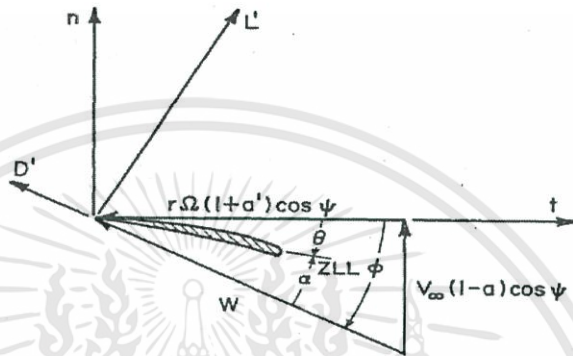
รูปที่ 2.35 รูปโคนของใบพัด [29]

และรัศมีจะส่งผลกระทบต่อ ψ ดังนี้

$$r_L = r \cos \psi$$

$$dr_L = dr \cos \psi$$

การใช้ความเร็ววิเคราะห์จากทฤษฎีโมเมนตัมและการประยุกต์เข้ากับองค์ประกอบของใบพัด จะแสดงไดอะแกรมของความเร็วได้ ดังรูป 2.35



รูปที่ 2.36 รูปของไดอะแกรมความเร็ว [29]

จากรูป 2.36 จะเห็นว่า

$$\tan \phi = \frac{1-a}{1+a'} \frac{V_\infty \cos \psi}{r_L \Omega}$$

$$\alpha = \phi - \theta$$

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

$$C_n' = C_n \cos \psi$$

$$C_t = C_L \sin \phi - C_D \cos \phi$$

เมื่อคิดเรื่ององค์ประกอบใบพัด จะได้

$$dT = Bc \frac{1}{2} \rho W^2 C_n' \frac{dr_L}{\cos \psi} \quad (2.3.1)$$

โดย B คือ จำนวนใบพัด

c คือ คอร์ด

ทอร์กที่กระทำต่อใบพัดจะเป็นดังนี้

$$dQ_{blade\ element} = r_L Bc \left(\frac{1}{2} \rho W^2 \right) C_t \frac{dr_L}{\cos \psi} \quad (2.3.2)$$

2.15.4 ทฤษฎีสตริป

เป็นการใช้ประโยชน์จากโมเมนตัมแนวแกนและทฤษฎีองค์ประกอบของใบพัด ความสัมพันธ์นี้ถูกนำมาพัฒนาเรื่องประสิทธิภาพของกังหันลม

จากทฤษฎีโมเมนตัม สมการ 2.2.2 เท่ากับ สมการ 2.3.1 จากทฤษฎีองค์ประกอบ กังหันลมจะได้รัศมีวงแหวนดังนี้ r_L

หรือ

$$dT_{momentum} = dT_{blade\ element}$$

$$4\pi r_L \rho V_\infty^2 a(1-a) dr_L = Bc \frac{1}{2} \rho W^2 C'_n \frac{dr_L}{\cos \psi} \quad (2.4.1)$$

ดังนั้น

$$(1-a)(2a) = \frac{\sigma_L}{4} \frac{W^2}{V_\infty^2} \frac{C'_n}{\cos \psi}$$

ซึ่ง

$$\sigma_L = \frac{Bc}{\pi r_L} \quad (2.4.2)$$

และ

$$\sigma_m = \frac{Bc}{\pi R \cos \psi} \quad (2.4.3)$$

จากรูป 2.3.2 จะเขียนได้

$$\sin \phi = \frac{(1-a)V_\infty \cos \psi}{W}$$

แทนในสมการ 2.4.1 สำหรับความเร็ว ω

$$2a(1-a) = \frac{\sigma_L C'_n (1-a)^2 \cos^2 \psi}{4 \sin^2 \phi \cos \phi}$$

หรือ

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma_L C_n \cos^2 \psi}{8 \sin^2 \phi} \quad (2.4.4)$$

สมการ 2.4.4 มีความสัมพันธ์กับเงื่อนไขการไหลแนวแกนของใบพัดตามหลักคณิตศาสตร์ พิจารณาโมเมนต์ของโมเมนต์ม นอกจากนั้นเรายังพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างการไหลแบบหมุนและทฤษฎีองค์ประกอบของโมเมนต์

$$dQ_{\text{angular momentum}} = dQ_{\text{blade element}}$$

หรือ

$$4\pi r_L^2 \rho V_\infty (1-a) a' \Omega r_L dr = r_L B c \rho \frac{1}{2} W^2 C_t \frac{dr}{\cos \psi}$$

หรือ

$$\cos \psi V_\infty (1-a) 2a' \Omega r_L = \frac{1}{4} \sigma_L C_t W^2 \quad (2.4.5)$$

จากรูป 2.3.2

$$\sin \phi = \frac{(1-a) V_\infty \cos \psi}{\omega}$$

$$\cos \phi = (1+a') \frac{r_L \Omega}{\omega}$$

แทนในสมการที่ 2.4.5

$$\frac{2a'}{1+a'} \sin \phi \cos \phi = \frac{\sigma_L C_t}{4}$$

หรือ

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{\sigma_L C_t}{8 \sin \phi \cos \phi} \quad (2.4.6)$$

สมการ 2.4.4 และ 2.4.6 โดยมีตัวแปรบวบนแนวแกนกับตัวแปรบวบเชิงมุม ซึ่งประกอบด้วยเทอมที่มีตัวแปรเกี่ยวกับการลาก ตั้งสมมติฐานได้ว่าตัวแปรการลากใช้จำนวน a และ a' บนพื้นฐานที่ว่ามีการต้านของลมระหว่างการลาก ซึ่งส่งผลต่อการไหลเหนี่ยวนำ กังนั้น C_n และ C_t จะใช้ในการคำนวณ a และ a' อธิบายได้ว่า

$$\begin{aligned}C_n'' &= C_L \cos \phi \\C_t'' &= C_L \sin \phi\end{aligned}$$

จากสมการ 2.4.4 จะได้

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma_L C_L \cos^2 \psi \cos \phi}{8 \sin^2 \phi} \quad (2.4.7)$$

จากสมการ 2.4.6 จะได้

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{\sigma_L C_L}{8 \cos \phi} \quad (2.4.8)$$

จากการใช้ความสัมพันธ์ a และ a' สามารถหาได้โดยให้องค์ประกอบต่างๆ โดยทำตามวิธีวนซ้ำดังนี้

1. กำหนด a และ a'
2. คำนวณ $\phi: \phi = \tan^{-1}[(1-a) \cos \psi / (1+a')x]$
3. คำนวณ $\alpha: \alpha = \phi - \theta$
4. คำนวณ C_L, C_D, C_t, C_n
5. คำนวณ a และ a' ; จากสมการ 2.4.7 และ สมการ 2.4.8
6. เปรียบเทียบค่าที่คำนวณก่อนหน้านี้ของ a และ a' ถ้าเท่ากัน, หยุด
7. กลับไปที่ข้อ 2

การหา a และ a' ด้วยวิธีวนซ้ำนี้ เราจะสามารถคำนวณ C_n และ C_t และยังสามารถหาทอร์ก โหลดแรงขับ และกำลังจากสมการนี้ได้

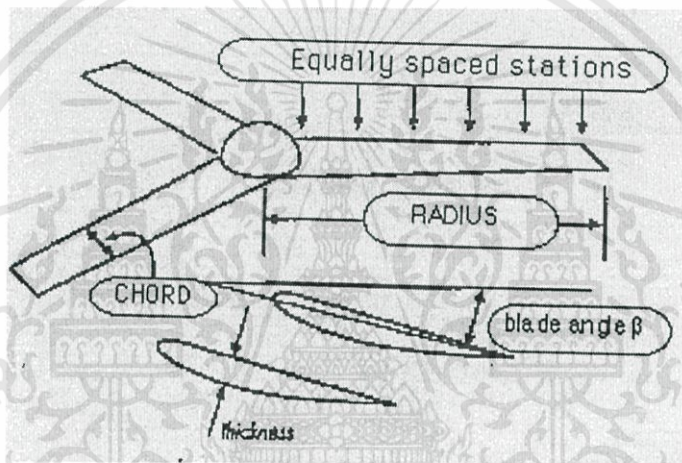
$$\begin{aligned}Q &= \frac{1}{2} \frac{\rho V_\infty^2 \pi R^3 \cos^3 \psi}{x_\psi^2} \int_0^{x_\psi} \sigma_m \left(\frac{W}{V_\infty}\right)^2 C_t x_L dx_L \\T &= \frac{1}{2} \frac{\rho V_\infty^2 \pi R^2 \cos^2 \psi}{x_\psi} \int_0^{x_\psi} \sigma_m \left(\frac{W}{V_\infty}\right)^2 C_n dx_L \\C_p &= \frac{8}{x_\psi^2} \int_0^{x_\psi} x_L^3 a'(1-a) dx_L\end{aligned}$$

สมการด้านบนจะไม่รวม Tip loss และผลกระทบจากการรบกวนของใบพัด การดัดแปลงการคำนวณที่มองถึงผลกระทบดังกล่าวเป็นสิ่งที่ดี โดยนับเป็นส่วนที่พัฒนาตามลำดับของบทนี้

2.16 ทฤษฎี Betz [30]

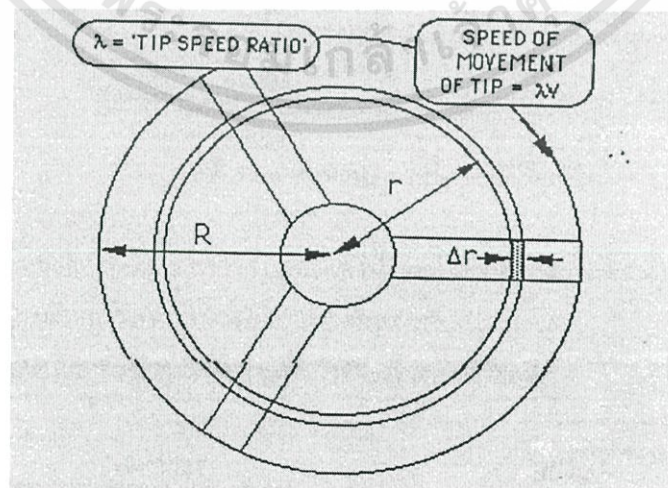
มีที่มาจากสถาบัน CAT หรือ Centre for Alternative Technology Wind Power Course ซึ่งมี Hugh Piggott เป็นผู้วิจัย โดยได้ศึกษาถึงหลักการเดิมของ Betz ที่ได้คิดเอาไว้เพื่อนำมาออกแบบใบพัด

ในการออกแบบใบพัดในขั้นแรก เราจะต้องกำหนดขนาดความกว้างของใบพัด และขนาดของมุมบิดของใบในแต่ละจุดตามความยาวของใบก่อน



รูปที่ 2.37 ขนาดรูปร่างและมุมบิดของใบพัด [30]

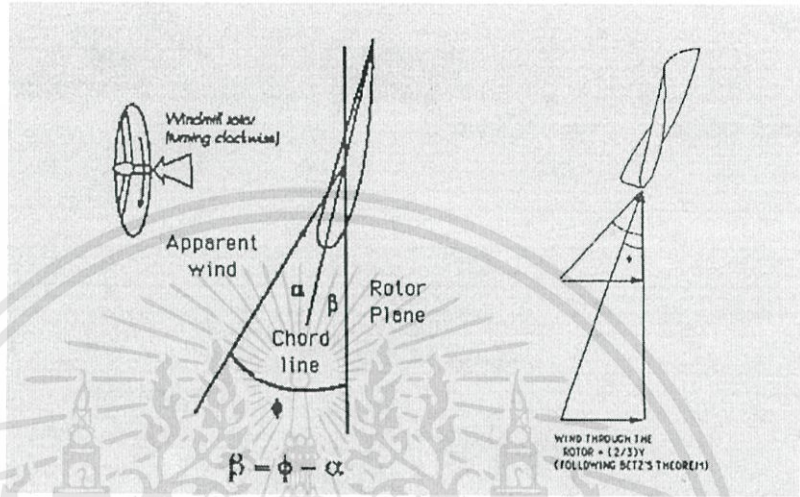
โดยกระบวนการคำนวณแรงและออกแบบรูปร่างที่ดีที่สุดนั้น จะอาศัยการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ และพิจารณาในแต่ละเอลิเมนต์นั้น



รูปที่ 2.38 เอลิเมนต์ของใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบกังหันลมนี้ ค่ามุมปะทะหรือ α จะขึ้นอยู่กับมุมของลมที่เข้ามาปะทะ ϕ และขนาดมุมบิดของใบพัด β ดังนั้นเราจึงได้ควบคุมมุมปะทะ ตลอดความยาวของใบพัด เพื่อที่จะได้สามารถควบคุมแรงยกและแรงต้านที่เกิดขึ้นกับใบพัดได้ ซึ่งในการออกแบบได้ใช้หลักการของ Betz โดยเลือกมุมปะทะที่ให้แรงยกสูง และมีแรงต้านต่ำ หรือที่อัตราส่วนแรงยกส่วนแรงต้านที่สูง

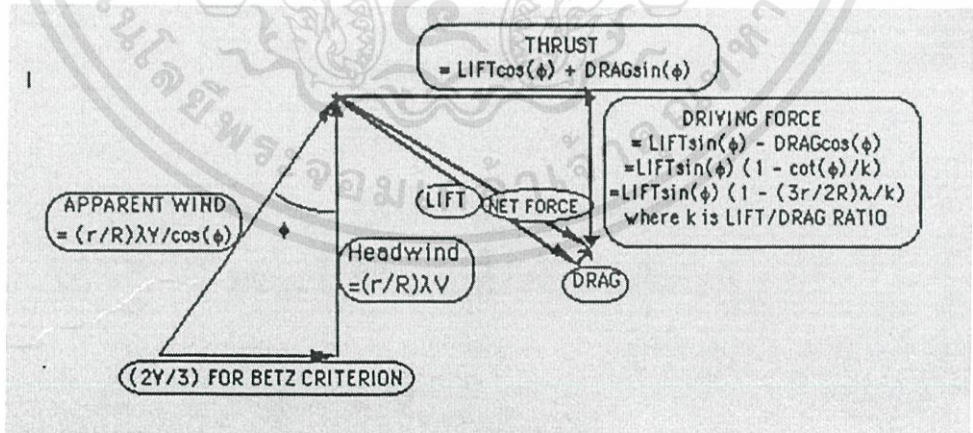


รูปที่ 2.39 มุมต่างๆ [30]

เราสามารถคำนวณหาค่ามุมต่างๆได้ดังนี้

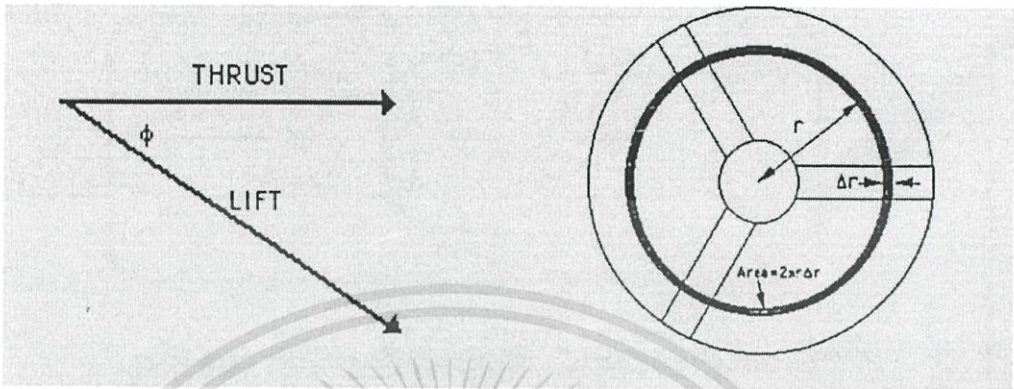
$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{2R}{3r\lambda}\right)$$

$$\beta = \phi - \alpha$$



รูปที่ 2.40 แรงที่เกิดขึ้นกับใบพัด [30]

จากหลักการของ Betz กล่าวว่า ลมที่เข้าปะทะในแต่ละจุดบนพื้นที่ของใบพัด ในขณะที่หมุนอยู่นั้น เมื่อออกจากใบพัดแล้วความเร็วของลมจะลดลงเหลือประมาณ 1/3 ของความเร็วก่อนเข้าปะทะสาเหตุอันเนื่องมาจากพลังงานส่วนหนึ่งสูญเสียไปกับการหมุน



รูปที่ 2.41 ทิศทางลม และพื้นที่เล็กๆบนใบพัด [30]

แรงผลึก

$$Thrust = Lift \times \cos \phi$$

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

จัดรูปใหม่ได้

$$Lift = C_L \left(\frac{\rho}{2} \right) BC(\Delta r) (V_{apparent})^2$$

$$= C_L \left(\frac{\rho}{2} \right) BC(\Delta r) \left(\frac{\lambda V (r/R)}{\cos \phi} \right)^2$$

เราจะสามารถหาความกว้างของใบพัดได้ดังนี้

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

ในขณะที่

C_L = สัมประสิทธิ์แรงยก

B = จำนวนของใบพัด

C = ขนาดความกว้างของใบพัด

$BC(\Delta r)$ = ขนาดพื้นที่ของใบพัดที่เกิดแรงยกในรัศมี r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

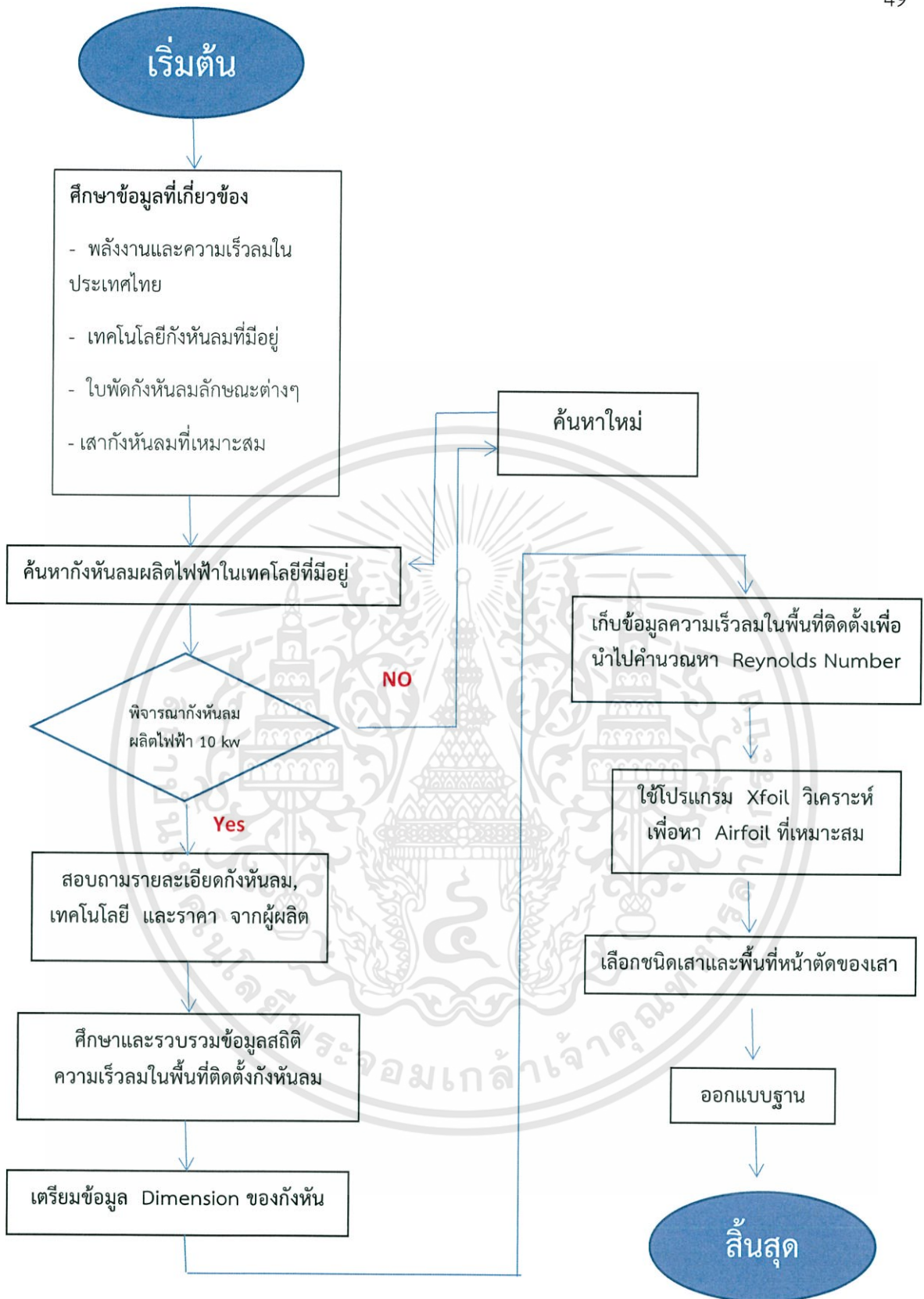
ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 Flow chart การทำงาน

ขั้นตอนการออกแบบระบบการจัดการพลังงานในเรื่องพลังงานลมและเทคโนโลยี
กังหันลมเพื่อออกแบบติดตั้งกังหันลมในโครงการ Future Renewable Center



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

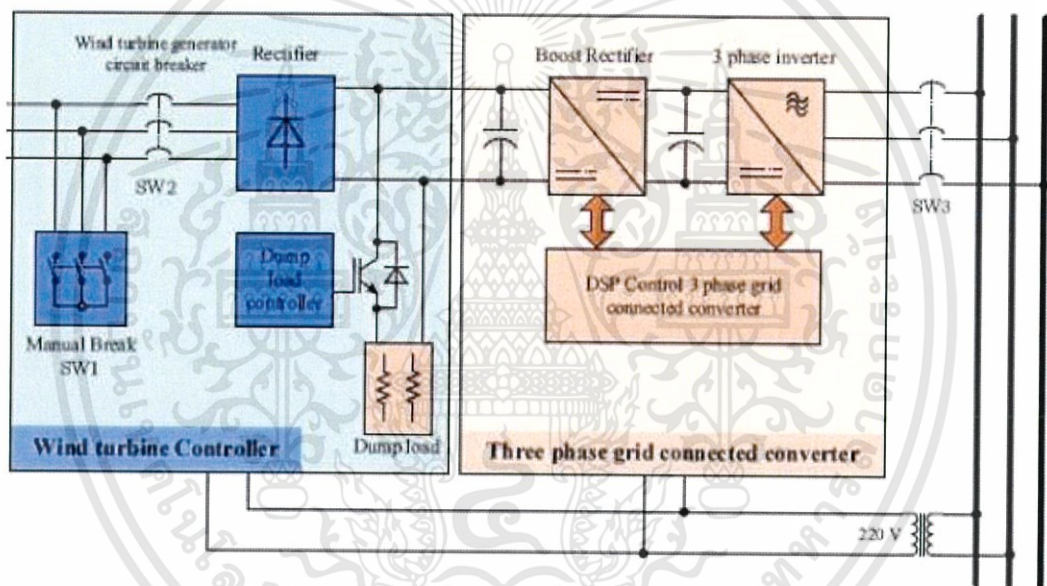


รูปที่ 3.1 Flow chart การทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทำงานของกังหันลม 3 เฟส [12]

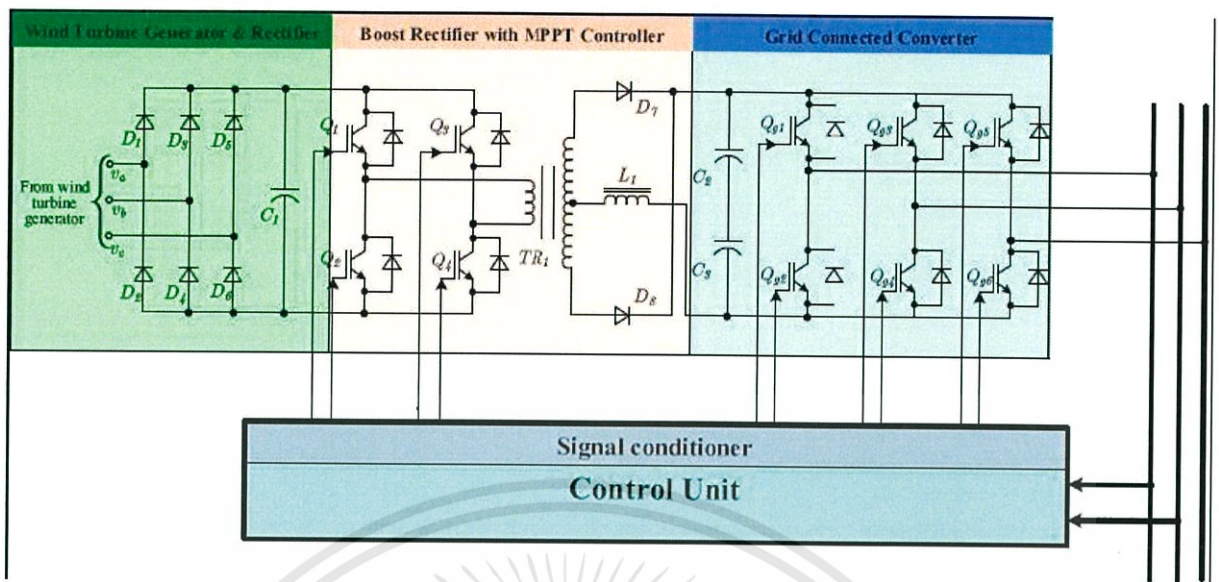
ระบบควบคุมการทำงานของกังหัน 3 เฟส ขนาด 10 กิโลวัตต์ที่ออกแบบกังหันลม ขนาด 10 กิโลวัตต์ ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เฟสแบบแม่เหล็กถาวร ซึ่งต่ออยู่กับระบบควบคุมกังหันลม ประกอบด้วย Manual Break เป็นสวิตช์ตัวที่ 1 ซึ่งใช้ในการลัดวงจรในขณะที่ทำการเบรกกังหันลม ถัดมาเป็นตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์ทำหน้าที่ตัดต่อวงจรระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบควบคุม เป็นสวิตช์ตัวที่ 2 ถัดมาเป็นตัววงจรเรกติไฟเออร์ 3 เฟส ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และจะมีวงจร Dump load เพื่อควบคุมพลังงานในขณะที่กังหันลมผลิตพลังงานเกินพิกัด ระบบควบคุมนั้นจะเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย 3 เฟส โดยจะรับไฟฟ้ากระแสตรงจากวงจรเรกติไฟเออร์ มาเพื่อขยายระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยวงจร Boost Rectifier จากนั้นจะส่งต่อไปยัง อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีขนาดแรงดันและความถี่เท่ากับระบบจำหน่าย



รูปที่ 3.2 ระบบควบคุมการทำงานของกังหัน 3 เฟส [12]

3.3 ระบบควบคุมกังหันลม [12]

วงจรเรกติไฟเออร์ 3 เฟสใช้ไดโอด 6 ตัวมาต่อเป็นวงจรบริดจ์ 3 เฟสและใช้ตัวเก็บประจุช่วยในการกรองแรงดัน โดยส่วนถัดมาของรูปเป็นวงจรขยายระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแปลงแรงดันกระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่คงที่และทำการขยายระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้สูงขึ้นโดยใช้หม้อแปลงความถี่สูง และแรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลง จะถูกแปลงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ไดโอด และใช้อินเตอร์เตอร์ ช่วยในการกรองกระแส ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ถูกยกให้มีระดับแรงดันที่สูงขึ้นจะถูกส่งต่อไปยังอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสเพื่อแปลงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีแรงดันและความถี่ที่คงที่ที่ก่อนที่จะทำการเชื่อมต่อกับระบบ



รูปที่ 3.3 วงจรเรกติไฟเออร์ของระบบควบคุมกังหัน [12]

3.4 การเลือกจำนวนใบพัด

โดยทั่วไปกฎของการหาจำนวนใบพัดที่เหมาะสมสำหรับกังหันลมขึ้นอยู่กับตัวแปรต่อไปนี้เป็นที่นิยมใช้กัน แต่การหมุนก็ยังไม่ราบรื่นนัก กังหันแบบสามใบให้การหมุนของแกนกังหันที่ราบรื่น แต่ก็มึนน้ำหนักรวม ทำให้ต้องการโครงสร้างรองรับที่แข็งแรง ซึ่งส่งผลถึงงบประมาณการลงทุน อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบสามใบพัดเป็นที่นิยมและมีส่วนแบ่งทางการตลาดสูงกว่า นอกจากนี้ยังมีข้อดีมากกว่าแบบสองใบพัดอีก คือ ให้ความสวยงามมากกว่าในด้านของรูปลักษณ์ และมีเสียงดังรบกวนน้อยกว่า

จำนวนใบพัดต่ำสุดที่ควรจะมีของกังหันลม คือ หนึ่งใบ ซึ่งมีข้อดีคือลดน้ำหนักของใบพัดลง อย่างไรก็ตามการหมุนของกังหันแบบใบเดียวไม่ดีเท่าที่ควร กังหันลมแบบสองใบเป็นแบบหนึ่งที่ยอมรับกัน แต่การหมุนก็ยังไม่ราบรื่นนัก กังหันแบบสามใบให้การหมุนของแกนกังหันที่ราบรื่น แต่ก็มึนน้ำหนักรวม ทำให้ต้องการโครงสร้างรองรับที่แข็งแรง ซึ่งส่งผลถึงงบประมาณการลงทุน อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบสามใบพัดเป็นที่นิยมและมีส่วนแบ่งทางการตลาดสูงกว่า นอกจากนี้ยังมีข้อดีมากกว่าแบบสองใบพัดอีก คือ ให้ความสวยงามมากกว่าในด้านของรูปลักษณ์ และมีเสียงดังรบกวนน้อยกว่า

3.5 ข้อดี ข้อเสียระหว่างใบพัดแบบทั่วไปของกังหันลมแนวอน กับใบพัดของกังหันลมแบบนาเกลื้อ

กังหันใบพัดนาเกลื้อนั้น เป็นสิ่งที่เข้ามาตั้งแต่ในอดีต เพื่อใช้ในการเกษตรกรรม การดำเนินชีวิต ใช้ในการสูบน้ำ เพื่อการอุปโภค บริโภค นับว่าเป็นเทคโนโลยีที่อยู่คู่กับวิถีชีวิตไทยมาช้านาน แต่ในปัจจุบัน กังหันลมถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เพื่อใช้ในการผลิตพลังงานในลักษณะต่างๆ โดยแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ กังหันลมแนวอน และกังหันลมแนวตั้ง ซึ่งทางคณะผู้ศึกษาได้ศึกษาข้อมูล เพื่อเปรียบเทียบว่า ใบพัดของกังหันลมแนวอนนั้น หากเรานำใบพัดนาเกลื้อที่เราใช้ในอดีต มาติดตั้งแทน จะสามารถให้ประสิทธิภาพที่เทียบเท่า หรือดีกว่า ใบพัด 3 ใบ ที่นิยมใช้กันทั่วไป ของกังหันลมแนวอนหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากข้อมูลที่ได้ศึกษามานั้น ใบพัดของกังหันลมแบบใบพัดนาเกลือ จะทำงานได้ดี ในความเร็วลมต่ำ ซึ่งเหมาะสมกับลักษณะความเร็วลมเฉลี่ยของประเทศไทย ซึ่งนี่ถือเป็นข้อดีของ กังหันแบบใบพัดนาเกลือ แต่ข้อเสียอย่างยิ่งของกังหันลมใบพัดนาเกลือ นั้น คือเมื่อเกิดลมพายุ หรือ ช่วงที่ฝนตก เกิดลมแรง เพราะการติดตั้งกังหันลมนั้นต้องติดตั้งอยู่ในที่สูง ใบพัดของกังหันลมแบบนาเกลือ มีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายได้สูงมาก จากการที่ใบพัดนาเกลือ นั้น มีลักษณะเป็นผ้าเพื่อเอามารับลม ใบพัดนาเกลือ นั้นจึงยังมีข้อบกพร่อง ในด้านความปลอดภัยที่อาจจะเกิดขึ้นได้ ดังนั้น ทางคณะผู้ศึกษาจึงเห็นว่า ใบพัดของกังหันลม 3 ใบ ยังมีความเหมาะสม และปลอดภัยกว่ากังหันลมแบบ ใบพัดนาเกลือ



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างกังหันลมนาเกลือ เพื่อการสูบน้ำ [16]

3.6 ขั้นตอนการเลือกเทคโนโลยีของกังหันลมในท้องตลาดให้เหมาะสมกับการติดตั้งในประเทศไทย

ขั้นตอนแรกที่เราจำเป็นต้องตัดสินใจ คือการเลือกพิกัดกำลังของกังหันลมที่เราจะนำมาใช้ ซึ่งทางผู้ศึกษาได้ทำการเลือกพิกัดกำลังของกังหันลมที่ 10kW มาใช้ เพราะขนาดพิกัดกำลัง 10kW นั้น เป็นพิกัดที่เหมาะสมที่ความเร็วลมเฉลี่ยในประเทศไทยสามารถที่จะผลิตได้ และเป็นกำลังที่เพียงพอในการจ่ายไฟให้แก่ผู้อยู่อาศัย ได้อย่างไม่น้อยจนเกินไป ซึ่งหากเราเลือกใช้พิกัดกังหันลมที่มากขึ้นนั้น ต้นทุนของกังหันลมก็จะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน และเราไม่สามารถรับประกันว่า ความเร็วลมในประเทศไทยนั้นสามารถให้กำลังได้ถึงที่พิกัดที่มากขึ้นอีกด้วย

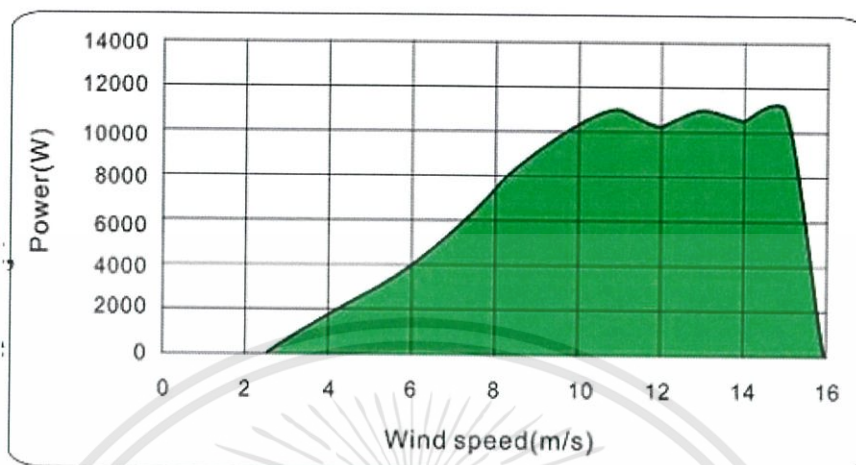
ขั้นตอนต่อไปนั้นจะเป็นในส่วนของเรื่องการเลือกเทคโนโลยีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากความเร็วลมในประเทศไทยนั้น มีค่าเฉลี่ยไม่สูงมาก เมื่อเทียบกับประเทศในฝั่งตะวันตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นคณะผู้ศึกษาจึงได้เลือกใช้เทคโนโลยีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบ PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) ซึ่งข้อดีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG นั้นคือการทำงานได้ง่าย (ให้แรงบิดเริ่มต้นสูง ทำให้ได้กำลังที่ต่อเนื่อง จึงไม่จำเป็นต้องใช้การ soft start) และไม่มีเกียร์บ็อก (ลดเรื่องค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง การสูญเสียกำลังที่เกียร์บ็อก และเสียงดังที่เกิดขึ้น) ซึ่งเหมาะที่จะใช้กับประเทศที่มีความเร็วลมไม่มาก อย่างประเทศไทย จากนั้นเราจึงได้ทำการเลือกหาเทคโนโลยีของบริษัทที่จำหน่ายกังหันลมทั้งในแนวตั้งและแนวนอน และมีคุณสมบัติตามที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น โดยกำหนดขนาดของใบพัดไว้ที่ เส้นผ่านศูนย์กลาง 8m เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคโนโลยีกังหันลม กับกังหันลมที่ออกแบบเอง และสุดท้ายเมื่อได้เทคโนโลยีของบริษัทที่ตรงความต้องการแล้ว จึงนำ Power Curve ของแต่ละบริษัทที่หามาได้ มาเปรียบเทียบค่า $\% C_F$ เพื่อทำการพิจารณาว่าเหมาะสมกับความเร็วลมในประเทศไทยหรือไม่ เนื่องจากว่าในขนาด 10KW กังหันลมแนวนอนจะมีราคาที่สูงกว่าและประสิทธิภาพในการผลิตกำลังไฟฟ้าที่สูงกว่า ดังนั้นจึงเลือกใช้กังหันลมแนวนอนในโครงการครั้งนี้แทนที่จะใช้กังหันลมแนวตั้ง

โดยคณะผู้ศึกษาได้เลือกบริษัท เทคโนโลยีที่ 1 และ เทคโนโลยีที่ 2 ซึ่งมีค่า $\% C_F$ อยู่ในช่วงที่รับได้ (แต่อย่างน้อยกว่า 25%)



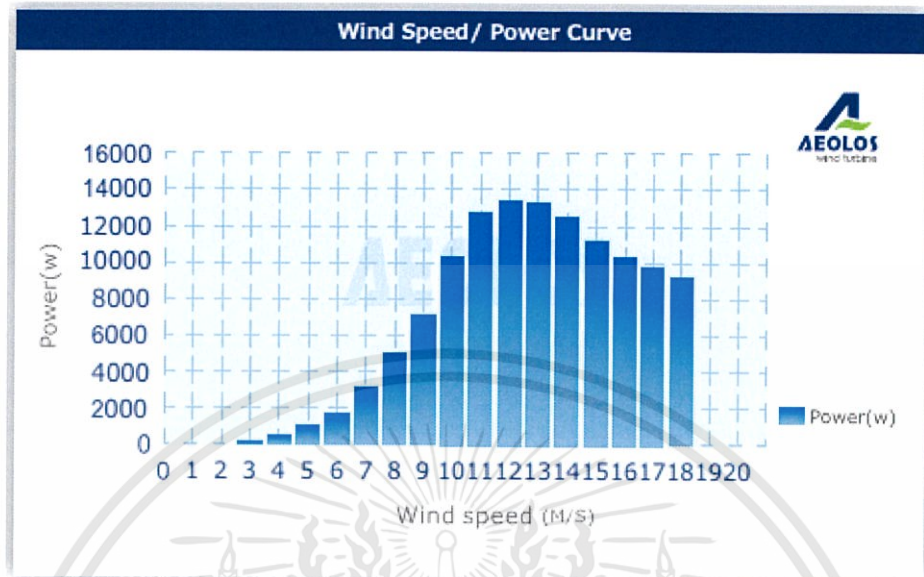


รูปที่ 3.5 Power Curve ของกังหันลมแนวนอนบริษัท เทคโนโลยีที่ 1 [20]



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างของกังหันลมแนวนอนขนาด 10kW เทคโนโลยีที่ 1 [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 Power Curve ของกังหันลมแนวนอนขนาด 10kW เทคโนโลยีที่ 2 [31]



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างของกังหันลมแนวนอนขนาด 10kW เทคโนโลยีที่ 2 [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 ความสำคัญในการเลือกใช้ใบพัดของกังหันลม

ในการผลิตพลังงานของกังหันลมนั้น องค์ประกอบต่างๆล้วนแต่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของพลังงานที่ได้จากกังหันลม ไม่ว่าจะเป็น ความสูง ณ จุดติดตั้ง ,ความเร็วลมในพื้นที่, เทคโนโลยีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และปัจจัยต่างๆอีกมากมาย ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการเลือกใบพัดของกังหันลม ซึ่งส่วนของใบพัดนั้น เป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกังหันลม เพราะจากสมการ

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \times C_p$$

เมื่อ P คือ กำลังที่จากกังหันลม (W)

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

A คือ พื้นที่กวาดของใบกังหัน (m^2)

v คือ ความเร็วลม

C_p คือ สัมประสิทธิ์สมรรถนะของกังหันลม

ในการเลือกใช้กังหันลมนั้น เมื่อเราเลือกพิกัดกำลังที่เราต้องการใช้งาน เลือกใบพัดที่เหมาะสมแล้วนั้น ตัวแปรอีกอย่างที่สามารถเพิ่มค่าได้ คือตัวแปร C_p จากสมการ ซึ่งในการออกแบบกังหันลมนั้นค่าตัวแปรนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย รวมไปถึงลักษณะใบพัด(Airfoil) ที่เรานำมาใช้ด้วย เรามีความจำเป็นอย่างมาก ที่ต้องทำการเลือกลักษณะของใบพัดที่จะนำมาใช้ เพราะความเร็วลมของแต่ละประเทศที่แตกต่างกัน ก็ส่งผลต่อค่า C_p หากเราใช้ลักษณะใบพัดที่เหมาะสมกับความเร็วลมต่ำไปใช้ในพื้นที่ติดตั้งที่มีความเร็วลมสูง ก็จะทำให้ใบพัดแสดงประสิทธิภาพมาได้ไม่เต็มที่ ได้ประสิทธิภาพต่ำกว่าที่ควร

ดังนั้นการเลือกใบพัดของกังหันลมให้เหมาะสมกับสภาพความเร็วลมในพื้นที่ที่ติดตั้งนั้น มีความสำคัญอย่างมาก เพราะไม่ใช่เพียงแต่เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกังหันลม แต่ยังมี ความเกี่ยวข้องในเรื่องของความปลอดภัยอีกด้วย

3.8 การเลือกรูปแบบ Airfoil จากค่า Reynolds Number

การหาค่า Reynold Number ที่เหมาะสมนั้น เราจะใช้ค่า ความเร็วลมเฉลี่ยในพื้นที่เป็นตัวอ้างอิง โดยความเร็วลมเฉลี่ยที่ได้คือ 4.3 m/s และออกแบบความกว้างของใบไว้ที่ 0.717 เมตร จะได้ค่า Reynold Number ประมาณ 220,000 จึงทำการเลือก Airfoil ที่เหมาะสมในช่วงค่า Reynold Number อยู่ระหว่าง 50,000-1,000,000 มาทำการเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพของใบพัดเพื่อหาใบพัดที่เหมาะสมที่สุด ในขั้นตอนนี้ต่อไป

ในการเลือก Airfoil นั้น คณะผู้ศึกษาได้ใช้ มาตรฐานของ NREL (National Renewable Energy Laboratory) ซึ่งได้พัฒนารูปแบบ Airfoil ต่อยอดมาจาก มาตรฐานของ NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) ให้เหมาะสมกับการใช้งาน ในรูปแบบใบพัด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของกังหันลม โดยในช่วงค่า Reynold Number ที่ได้นั้น ได้ทำการเลือกรุ่น Airfoil ที่เหมาะสมคือ s820, s821, s822 และ s823 จากตารางต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 NREL's S-Series Airfoil Families [32]

NREL's S-Series Airfoil Families				
Rotor Diameter	Category	Root	Primary	Tip
1–3 m	Thick	S835	S833	S834
3–10 m	Thick	S823	-	S822
10–20 m	Thin	S804	S801	S802
	Thin	S804	S801	S803
	Thin	S807	S805	S806
	Thin	S807	S805A	S806A
	Thin	S808	S805A	S806A
	Thick	S821	S819	S820
20–30 m	Thick	S811	S809	S810
	Thick	S814	S812	S813
	Thick	S815	S812	S813
20–40 m	-	S814	S825	S826
	-	S815	S825	S826
	-	-	-	S829
30–50 m	Thick	S818	S816	S817
40–50 m	Thick	S818	S830	S831
	Thick	S818	S830	S832
	Thick	S818	S827	S828

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเลือกใช้ Airfoil NREL's s822 และ s823 โดยยึดจาก Rotor Diameter ซึ่งเท่ากับ 8 ดังตารางที่ 3.3 และเลือกใช้ Airfoil NREL's s820 และ s821 เพิ่มเติม เนื่องจากมีค่า Reynold Number ที่ใช้งาน เหมาะกับค่า Reynold Number ในพื้นที่ของประเทศไทย ดังตารางที่ 3.4

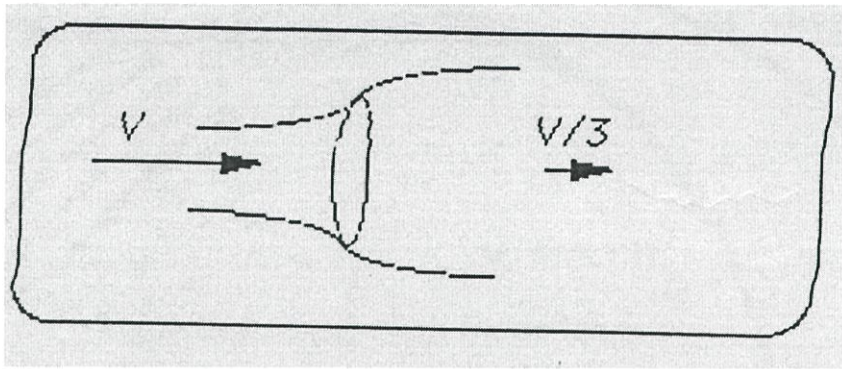
ตารางที่ 3.2 NREL's S-Series Airfoil [32]

Airfoil	Location	Thickness	Rotor Diam.	Design Re	$C_{l,max}$		Comments
					Smooth	Rough	
S820	tip	16.0%	10–20 m	1.3E+6	1.10	1.06	Restrained max lift coef.
S821	root	24.0%	10–20 m	8.0E+5	1.40	1.35	Restrained max lift coef.
S822	tip	16.0%	2–10 m	6.0E+5	1.00	0.98	Restrained max lift coef.
S823	root	21.0%	2–10 m	4.0E+5	1.20	1.16	Restrained max lift coef.

3.9 ปัจจัยการสูญเสียที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ทางพลังงาน [30]

ปัจจัยที่ 1

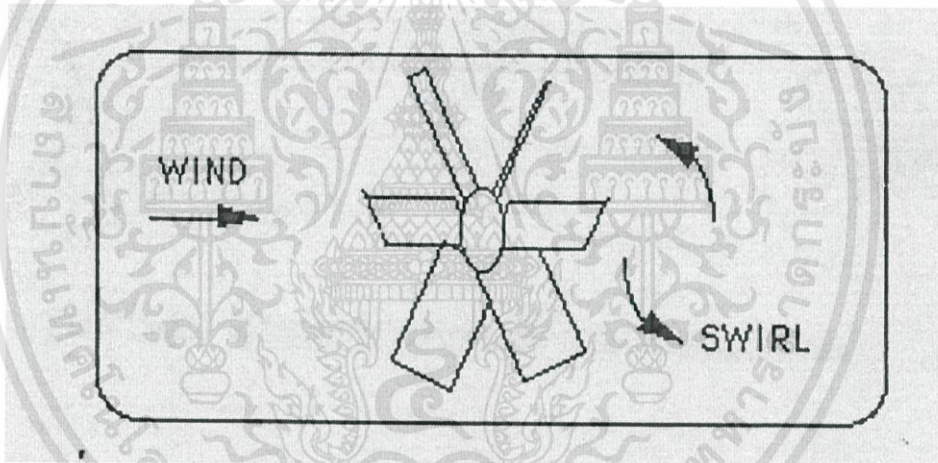
ลมที่ไหลออกไปทางด้านข้าง รอบๆของโรเตอร์ ซึ่งตามหลักการของ Betz ได้กล่าวไว้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ทางพลังงานมีค่าสูงสุดที่ 59.3% โดยลมที่ไหลออกทางด้านหลังจะมีความเร็วเท่ากับหนึ่งในสามของความเร็วลมที่ทางเข้า



รูปที่ 3.9 ลมไหลเข้าปะทะ และไหลออกจากโรเตอร์ [30]

ปัจจัยที่ 2

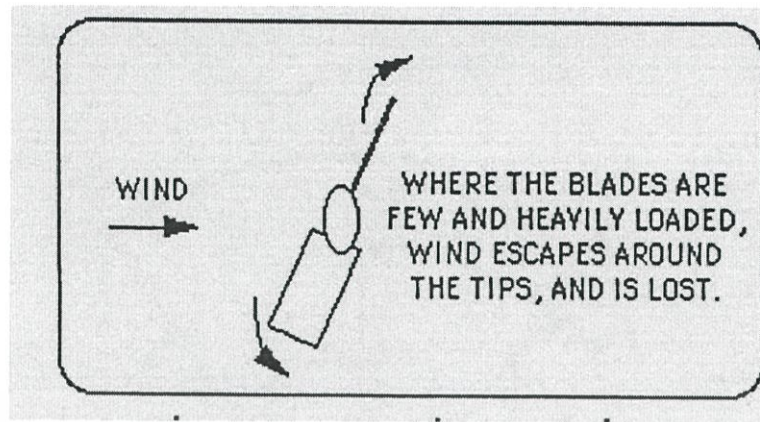
การสูญเสียอันเนื่องมาจากการหมุนวน ซึ่งมักจะเกิดกับโรเตอร์ที่มีแรงบิดสูงๆ และมีอัตราส่วนความเร็วสูงสุด (Tip Speed Ratio) ต่ำ



รูปที่ 3.10 การเกิดการหมุนวนทางด้านหลังของโรเตอร์ [30]

ปัจจัยที่ 3

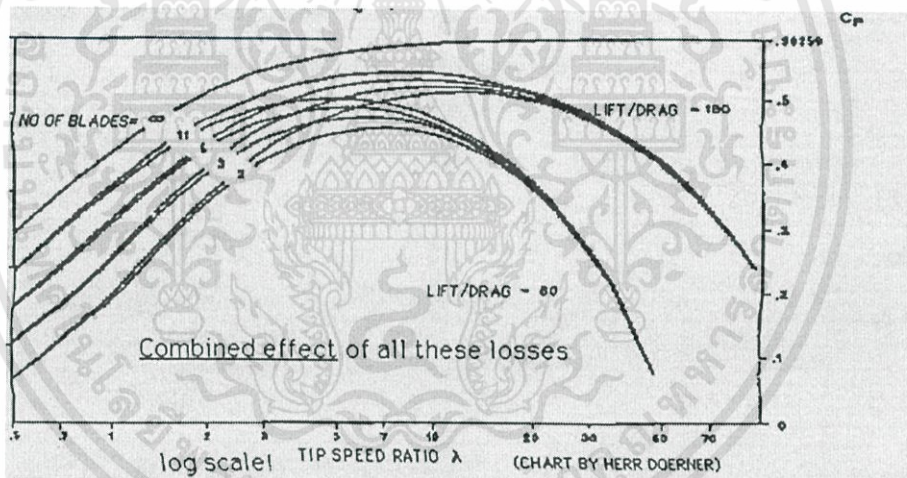
สำหรับกังหันลมที่มีจำนวนใบพัดน้อย จะเกิดแรงผลึกที่สูง ซึ่งในขณะที่ลมไหลมากระทบกับใบพัดนั้น ลมจะไหลออกไปตามแนวรัศมีของใบ แล้วไหลออกที่ปลายใบ ซึ่งเราจะเรียกการสูญเสียในลักษณะนี้ว่า การสูญเสียที่ปลายใบ (Tip Loss)



รูปที่ 3.11 ลมที่ไหลออกที่ปลายใบ [30]

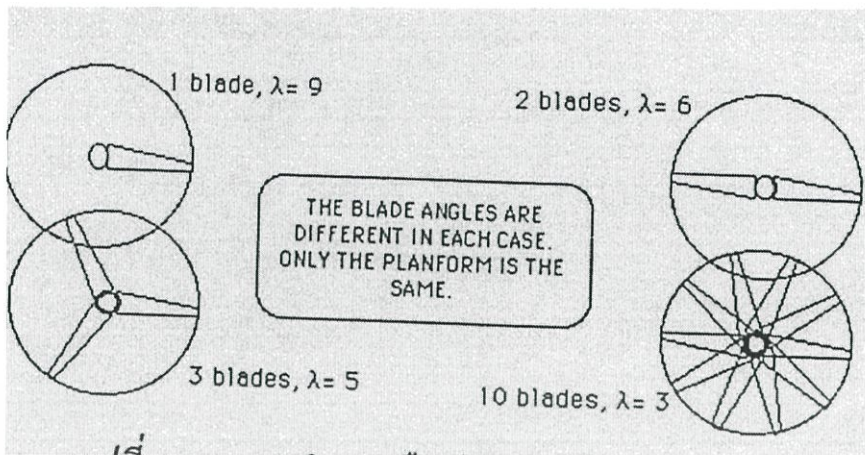
ปัจจัยที่ 4

การสูญเสียที่เนื่องมาจากแรงต้าน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนแรงยกต่อแรงต้าน โดยจะมีผลอย่างมากกับโรเตอร์ที่มีค่าอัตราส่วนความเร็วปลายที่สูงๆ



รูปที่ 3.12 ค่าสัมประสิทธิ์พลังงาน [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



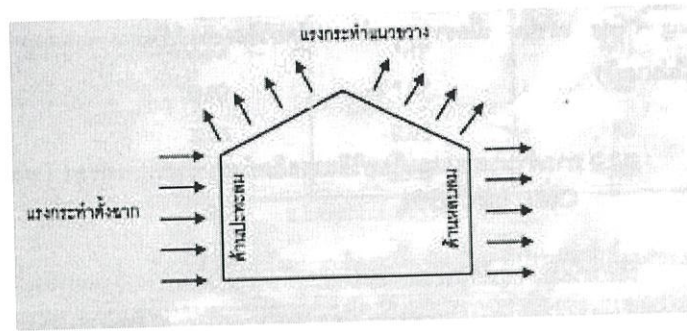
รูปที่ 3.13 แนะนำการเลือกใช้ Tip speed ratio [30]

3.10 การคำนวณแรงลมที่กระทำต่อกังหันลม [33]

แรงกระทำทางด้านข้างเนื่องจากแรงลมมีความสำคัญต่อการออกแบบอาคารสูง ซึ่งทำให้การออกแบบอาคารลักษณะนี้แตกต่างไปจากการออกแบบอาคารทั่วไป ปัจจุบันนี้ วิวัฒนาการทางด้านกำลังของวัสดุสูงขึ้นเรื่อยๆ ทำให้การออกแบบได้ขนาดองค์อาคารที่เล็กลงและมีน้ำหนักที่เบา ลงเป็นผลให้โครงสร้างอาคารมีโอกาสเกิดการโก่งตัวทางด้านข้างเนื่องจากแรงลมมากขึ้น แรงลมในระดับรุนแรงจึงจัดเป็นภัยธรรมชาติต่ออาคารสูงชนิดหนึ่ง พฤติกรรมของแรงลมมีความซับซ้อน เนื่องจากมีความไม่แน่นอนมาก ซึ่งต่างจากน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ และมีลักษณะเป็นแบบน้ำหนักบรรทุกทุกจลน์ (dynamic loading) ซึ่งมีขนาดและทิศทางของแรงกระทำที่ไม่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของ

- ก) ภูมิประเทศ (topography) เช่น ท่วมโล่ง ป่าไม้ ภูเขา สวนผัก เป็นต้น
- ข) แบบอาคาร (building type) เช่น รูปปร่าง ขนาดของอาคาร ความสูง พื้นผิวอาคาร ช่องเปิดของอาคาร เป็นต้น
- ค) ธรรมชาติของการไหลเวียนของอากาศ (nature of airflow) เช่น ความหนาแน่นของอากาศ ทิศทางของลม ความเร็วของลม ความคงที่ของลมที่พัดมา เป็นต้น

เมื่อลมพัดมาปะทะโครงสร้างอาคาร ลักษณะของอาคารซึ่งประกอบด้วยขนาด รูปปร่าง ความหยาบของพื้นผิวและช่องเปิด จะมีผลต่อขนาดของแรงดันที่กระจายบนตัวอาคาร โครงสร้างอาคารจะถูกกระทำด้วยแรงกระทำตั้งฉากและแรงกระทำแนวขวาง แรงกระทำตั้งฉากกระทำในทิศทางการพัดของลม โดยก่อให้เกิดแรงอัดที่ด้านปะทะลม (windward face) และจะมีแรงดูดที่ด้านหลบลม (leeward face) สำหรับแรงกระทำแนวขวางนั้นเกิดในลักษณะคล้ายคลึงกับการยกของตัวปีกเครื่องบินกระทำในทิศทางตั้งฉากกับแนวหลังคา ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 พฤติกรรมของแรงลมที่กระทำต่ออาคาร [33]

3.10.1 การคำนวณแรงลม

การคำนวณแรงลมมี 2 วิธีคือ

ก) วิธีแรงสถิตย์ (Static Approach)

สำหรับวิธีการนี้ จะสมมติให้โครงสร้างอาคารเป็นวัตถุรูปทรงแข็งเกร็ง (rigid body) ภายใต้แรงลมที่มากกระทำ ซึ่งใช้สำหรับอาคารสูงทั่วไปที่ไม่อ่อนไหวต่อการสั่นภายใต้แรงลม ข้อกำหนดของ Uniform Building Code, UBC-1994 ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ออกแบบในประเทศสหรัฐอเมริกา กำหนดให้ใช้สำหรับอาคารที่มีความสูงไม่เกิน 122 เมตร และมีอัตราส่วนของความสูงต่อความกว้างไม่เกิน 5

ข) วิธีแรงจลน์ (Dynamic Method)

สำหรับโครงสร้างอาคารที่บอบบางหรือสูงเป็นพิเศษ หรือตั้งอยู่ในเขตที่มีความเสี่ยงต่อพายุลมมาก แรงลมที่กระทำต่ออาคารอาจจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงปฏิกริยาทางจลน์ (dynamic interaction) ระหว่างการโยกไหวตัวของอาคารและการพัดกระโรยของแรงลมได้ วิธีการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างอาคารเพื่อใช้ในการออกแบบที่ให้ผลดีที่สุดคือการทดสอบแบบจำลองของอาคารและสภาพแวดล้อมจำลองด้วยอุโมงค์ลม (wind tunnel test) แต่วิธีการทดสอบนี้เป็นขบวนการที่ซับซ้อน ต้องใช้ผู้ชำนาญการในเรื่องนี้โดยเฉพาะและมีค่าใช้จ่ายสูง จึงเหมาะสำหรับโครงการขนาดใหญ่สำหรับการออกแบบอาคารที่ไม่สามารถทำการทดสอบด้วยวิธีนี้ได้ อาจใช้วิธีการคำนวณแรงลมตามหลักแรงจลน์ ซึ่งจะเป็นวิธีที่อยู่ระหว่างวิธีแรงสถิตย์และวิธีการทดสอบด้วยอุโมงค์ลม ดังเช่นวิธีการซึ่งพัฒนาโดย Davenport (1967) และได้มีระบุอยู่ในข้อกำหนดของ National Building Code of Canada, NBCC ในปัจจุบัน

สำหรับในที่นี้จะพิจารณาถึงการออกแบบอาคารสูงทั่วไปตามข้อกำหนดของ Uniform Building Code เท่านั้น เนื่องจากการคำนวณโดยวิธีแรงจลน์เป็นการออกแบบอาคารพิเศษซึ่งมีจำนวนไม่มากนัก

3.10.2 การคำนวณแรงลมโดยวิธีแรงสถิตตามข้อกำหนดของ Uniform Building Code, UBC-1994

วิธีการนี้เป็นการคำนวณแรงลมโดยการพิจารณาผลกระทบของการพัดกระโรยของ

แรงลม รูปร่าง ความสูงของอาคาร ความแตกต่างระหว่างภูมิภาคที่อาคารตั้งอยู่ ซึ่งมีสิ่งกีดขวางทางลมต่างๆกัน และความสำคัญของแต่ละอาคารด้วย

แรงดันลมที่ใช้ออกแบบอาคารคำนวณได้จาก

$$P = C_e C_q q I_w$$

โดยที่

P คือ แรงดันบนอาคาร, กิโลกรัม/ตารางเมตร

C_e คือ สัมประสิทธิ์ซึ่งคำนึงถึงความสูง ภูมิภาคที่อาคารตั้งรวมทั้งลักษณะการพัดกระโชกของแรง มีค่าตามตารางที่ 3.5

C_q คือ สัมประสิทธิ์แรงดันลม มีค่าตารางที่ 3.6

q_s คือ แรงดันลมมีค่าเท่ากับ $0.004826 v^2$, กิโลกรัม/ตารางเมตร เมื่อ v เป็นความเร็วลมซึ่งวัดที่ความสูงมาตรฐาน 10 เมตร จากพื้นดิน โดยวัดเป็นค่าเฉลี่ยในช่วงคาบเวลา 50 ปี, กิโลเมตร/ชั่วโมง

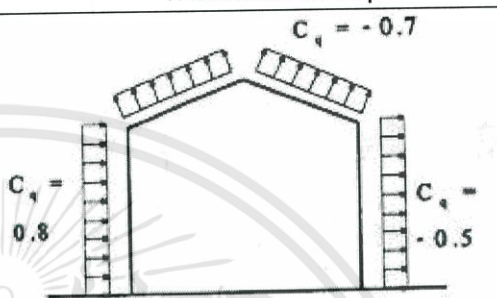
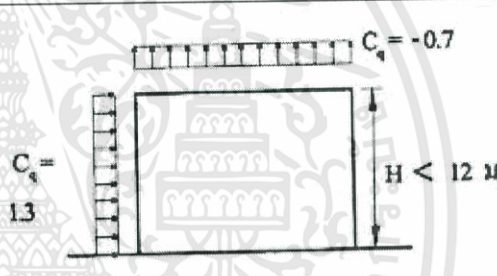
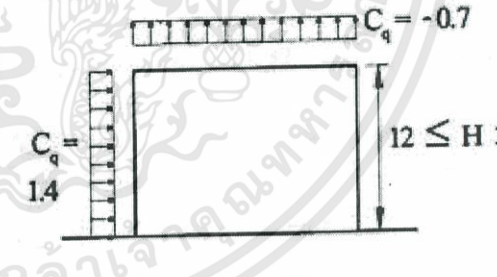
I_w คือ สัมประสิทธิ์ความสำคัญของอาคารมีค่าตามตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์ C_e [33]

ความสูงจากพื้นดิน (เมตร)	ภูมิภาค D	ภูมิภาค C	ภูมิภาค B
0-4.5	1.39	1.06	0.62
6	1.45	1.13	0.67
7.5	1.50	1.19	0.72
9	1.54	1.23	0.76
12	1.62	1.31	0.84
18	1.73	1.43	0.95
24	1.81	1.53	1.04
30	1.88	1.61	1.13
36	1.93	1.67	1.20
48	2.02	1.79	1.31
60	2.10	1.87	1.42
90	2.23	2.05	1.63
120	2.34	2.19	1.80

- 1) ลักษณะภูมิประเทศ D ได้แก่ ที่ราบติดชายฝั่งทะเลหรือแม่น้ำ จัดเป็นภูมิประเทศที่เสี่ยงต่อแรงลม
- 2) ลักษณะภูมิประเทศ C ได้แก่ ที่ราบและทุ่งโล่งทั่วไป จัดเป็นภูมิประเทศที่เสี่ยงต่อแรงลมเช่นกัน
- 3) ลักษณะภูมิประเทศ B ได้แก่ พื้นที่ซึ่งมีสิ่งกีดขวางด้วยอาคาร, ป่าไม้สูงตั้งแต่ 6 เมตร ขึ้นไป

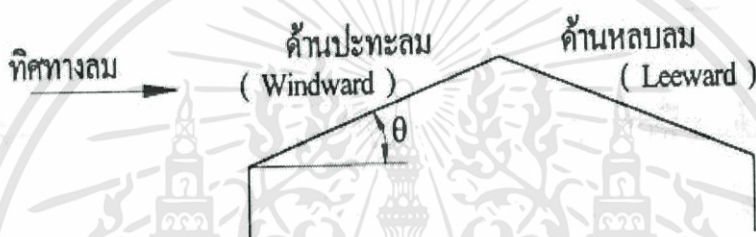
ตารางที่ 3.4 ค่าสัมประสิทธิ์ C_q [33]

วิธีที่ใช้	ประเภทอาคาร	ค่าสัมประสิทธิ์ C_q
วิธีที่ 1 Normal Force Method	โครงอาคารรูปจั่ว และอาคารทั่วไปที่สูง เกิน 60 เมตร	
วิธีที่ 2 Projected Area Method	อาคารทั่วไปที่มี ความสูงน้อยกว่า 12 เมตร ยกเว้นโครง อาคารรูปจั่ว	
	อาคารทั่วไปที่มี ความสูงระหว่าง 12- 60 เมตร ยกเว้น โครงอาคารรูปจั่ว	

วิธีที่ 1 ใช้สำหรับ การออกแบบโครงสร้างข้อแข็งรูปจั่วและอาคารทั่วไปที่สูงตั้งแต่ 60 เมตร ขึ้นไปแรงดันลมจะสมมติว่ากระทำในทิศทางตั้งฉากกับผิวภายนอกอาคารทุกด้าน สำหรับการคำนวณค่า C_e ในกรณีของแรงดันลมที่กระทำบนหลังคารูปจั่ว ให้คำนวณที่ระดับความสูงเฉลี่ยของหลังคา

สำหรับวิธีที่ 2 ใช้สำหรับการออกแบบโครงสร้างที่มีความสูงน้อยกว่า 60 เมตร ยกเว้นโครงอาคารรูปจั่ว แรงดันลมในทิศทางด้านข้างจะสมมติว่ากระทำเต็มพื้นที่ฉายตกกระทบบน (projected area) ในแนวตั้งของโครงสร้าง และแรงดันลมในแนวตั้งจะสมมติว่ากระทำเต็มพื้นที่ฉายตกกระทบบนแนวราบของอาคาร

สำหรับแรงดันลมที่กระทำต่อโครงหลังคารูปจั่ว มีขนาดและทิศทางขึ้นกับมุมที่หลังคาทำกับแนวราบดังแสดงในรูป 3.15



รูปที่ 3.15 แรงลมที่กระทำต่อหลังคารูปจั่ว [33]

ตารางที่ 3.5 ค่าสัมประสิทธิ์ความสำคัญของอาคาร [33]

ประเภท	ความสำคัญของอาคาร	I_w
1	อาคารที่จำเป็นต่อสาธารณะชน	1.15
2	อาคารที่เก็บวัตถุมีพิษภัย	1.15
3	อาคารที่มีการใช้งานเป็นพิเศษ	1.00
4	อาคารใช้งานทั่วไป	1.00
5	อาคารอื่นๆ	1.00

ประเภทที่ 1 (Essential Facilities) ได้แก่ อาคารที่มีความจำเป็นต้องใช้ในกรณีฉุกเฉิน ได้แก่ สถานีตำรวจ สถานีดับเพลิง อาคารที่จอดรถสำหรับรถฉุกเฉิน และเครื่องบินฉุกเฉิน หอสูงควบคุมระบบการบิน อาคารที่ทำการของรัฐบาล โรงไฟฟ้า เป็นต้น

ประเภทที่ 2 (Hazardous Facilities) ได้แก่ คลังเก็บสารเคมีที่เป็นพิษ คลังแสงอาวุธ คลังเก็บวัตถุระเบิด ซึ่งอาจมีการระเบิดที่รุนแรงได้ เป็นต้น

ประเภทที่ 3 (Special Occupancy Structures) ได้แก่ อาคารที่จุคนจำนวนมาก เช่น โรงเรียน มหาวิทยาลัย เป็นต้น

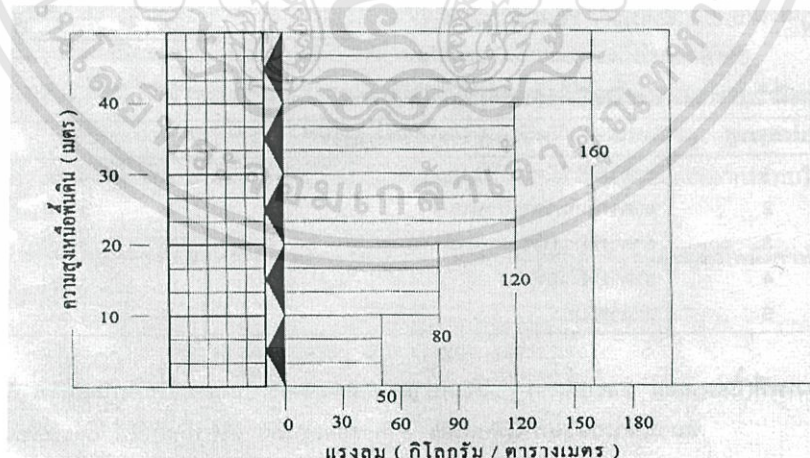
ประเภทที่ 4 (Standard Occupancy Structures) ได้แก่ อาคารทั่วไปที่มีได้อยู่ในประเภทที่ 1-3 รวมทั้งหอสถูป (Tower)

ประเภทที่ 5 (Miscellaneous Structures) ได้แก่ อาคารอื่นๆ ยกเว้นหอสถูป

นอกจากการคำนวณแรงลมโดยวิธีแรงสถิตย์ตามข้อกำหนดของ UBC นี้ในกรณีที่ไม่ มีข้อมูลของแรงลมที่เชื่อถือได้ อาจใช้หน่วยแรงลมตามกฎหมายกระทรวงฉบับที่ 6 ออกตามความใน พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522 ได้ ดังแสดงในตารางที่ 3.8 และรูปที่ 3.16

ตารางที่ 3.6 แรงลมตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522 [33]

ประเภทและส่วนต่างๆของอาคาร	หน่วยแรงลม (กิโลกรัม/ตารางเมตร)
ส่วนของอาคารที่สูงไม่เกิน 10 เมตร	50
ส่วนของอาคารสูงน้อยกว่า 10 เมตร แต่ไม่เกิน 20 เมตร	80
ส่วนของอาคารสูงน้อยกว่า 20 เมตร แต่ไม่เกิน 40 เมตร	120
ส่วนของอาคารที่สูงเกิน 40 เมตร (H คือ ความสูงอาคาร)	160



รูปที่ 3.16 ค่าแรงลมตาม พ.ร.บ.ควบคุมอาคาร พ.ศ.2522 [33]

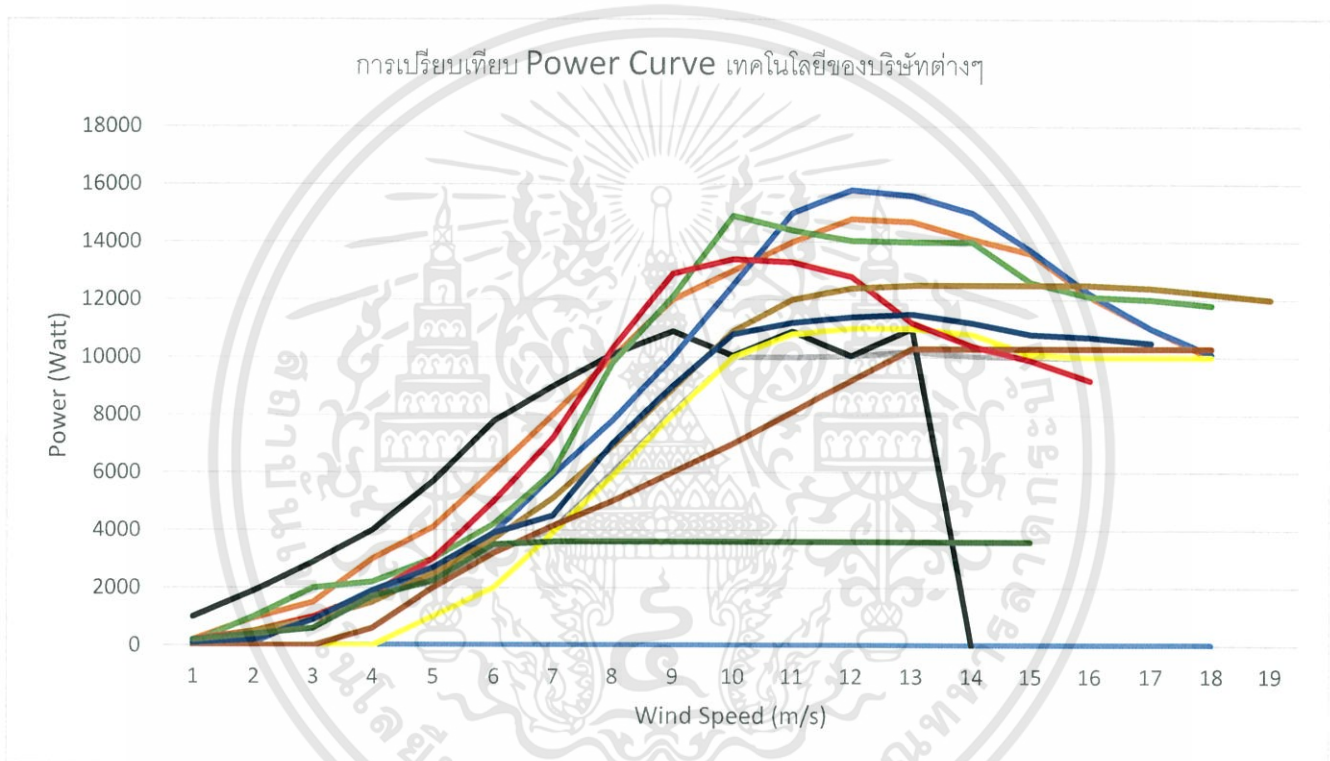
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

สรุปผลการดำเนินงาน

4.1 เปรียบเทียบเทคโนโลยีและประสิทธิภาพของกังหันลมที่จะนำมาใช้ในโครงการ

จากการสอบถาม เพื่อหาเทคโนโลยีที่แต่ละบริษัทใช้ ทางเราได้ทำการนำ Power Curve ของแต่ละบริษัทมาเปรียบเทียบ เพื่อหาว่าเทคโนโลยีของบริษัทใด ที่มีค่า $\% C_F$ เหมาะสมกับการนำมาใช้ในพื้นที่ของโครงการ



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบ Power Curve ของเทคโนโลยีในแต่ละบริษัท

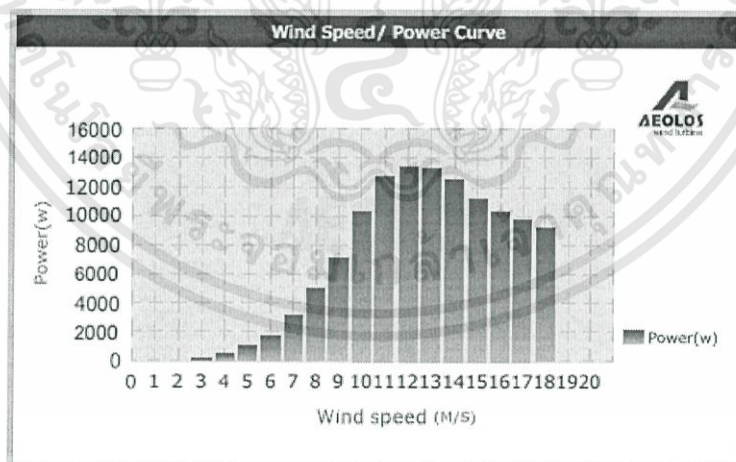
จาก Power Curve ที่ได้แสดงในรูปที่ เราได้ทำการหา $\% C_F$ ของเทคโนโลยีกังหันลมแต่ละบริษัท และได้ทำการเลือก เทคโนโลยีที่ 1 (สีดำ) และเทคโนโลยีที่ 2 (สีแดง) ซึ่งมี $\% C_F$ สูง มีเทคโนโลยีที่ตรงตามความต้องการและมีค่ากำลังการผลิตที่ได้สูงในช่วงความเร็วลมที่สนใจ ซึ่งมีขั้นตอนการหา $\% C_F$ ไว้ดังนี้

หลังจากที่เราได้ทำการเลือกบริษัทที่มีเทคโนโลยีและประสิทธิภาพตรงตามที่ต้องการ เราจะนำเทคโนโลยีกังหันลมเหล่านั้น มาเปรียบเทียบกับกังหันลมที่ ทางกลุ่ม Future Renewable Center ได้ออกแบบเอง เพื่อศึกษาว่า เทคโนโลยีใดให้ประสิทธิภาพได้ดีกว่ากันในพื้นที่ความเร็วลมที่ติดตั้ง เมื่อเทียบกับกังหันลมที่ออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เหมาะสมกับความเร็วลมต่ำแบบในประเทศไทย

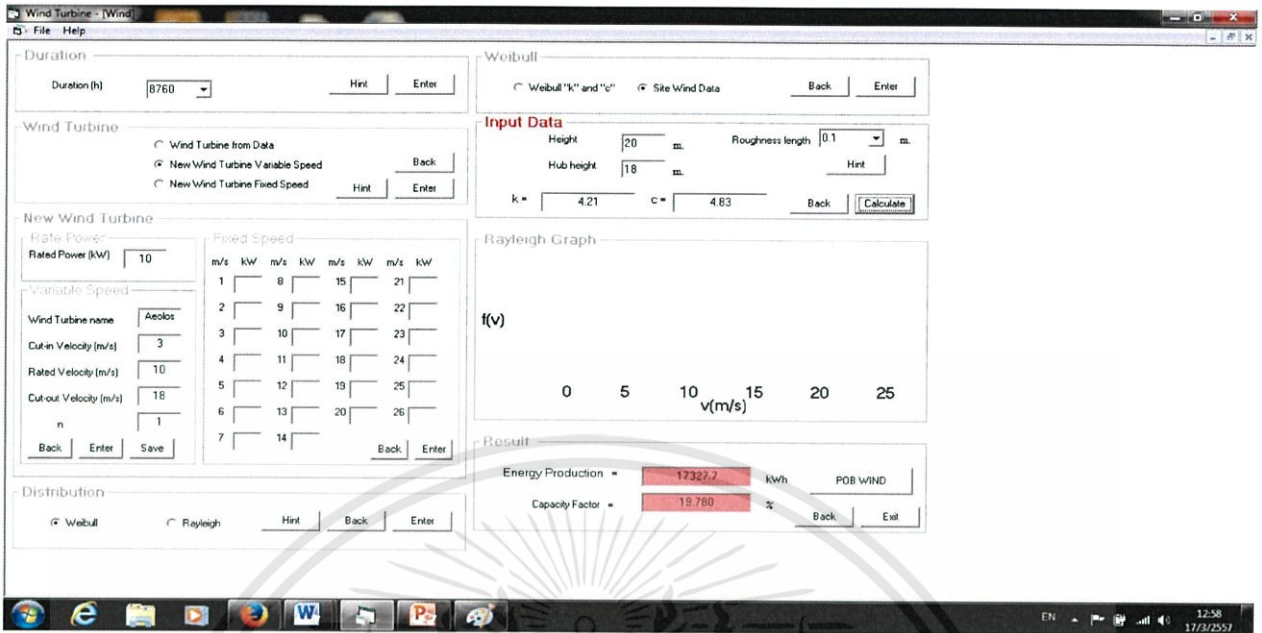
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบ Dimension ของกังหันลมที่เลือกเทคโนโลยี กับที่ออกแบบเอง

ITEM	MODEL							
	Wind turbine				Blade			
	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Weight (kg)	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Weight (kg)
เทคโนโลยีที่ 1	710	1340	620	650	380	4040	520	105
เทคโนโลยีที่ 2	720	2120	990	550	505	4020	390	140
Purpose	1200	600	1200	500				

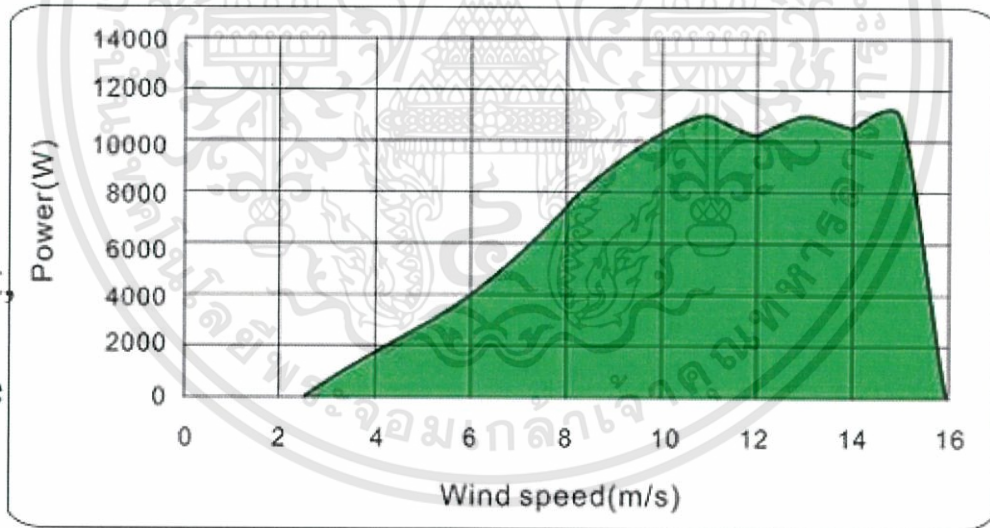
ในขั้นตอนแรกนั้น ทำการเปรียบเทียบลักษณะความกว้าง ยาว สูง และน้ำหนักของกังหันลม(เฉพาะส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า)ในเทคโนโลยีที่เลือกกับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้ออกแบบเอง จะเห็นว่าน้ำหนักจะมีความใกล้เคียงกัน แต่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบเองนั้น จะออกแบบไว้มีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งไม่ได้รูปร่างเล็กเหมือนกังหันลมตามท้องตลาด



รูปที่ 4.2 Power Curve ของเทคโนโลยีที่ 2[31]



รูปที่ 4.3 เปอร์เซนต์ Cf ของเทคโนโลยีที่ 2



รูปที่ 4.4 Power Curve ของเทคโนโลยีที่ 1 [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

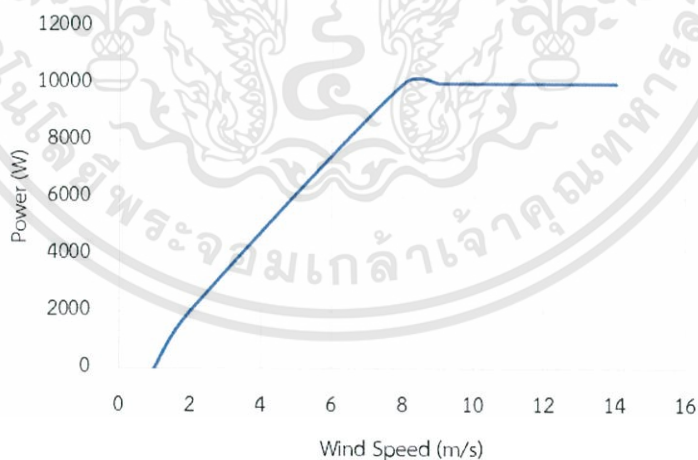
Duration: Duration: 3760

Wind Turbine: Wind Turbine from Data New Wind Turbine Variable Speed New Wind Turbine Fixed Speed

New Wind Turbine: Rated Power (kW): 21

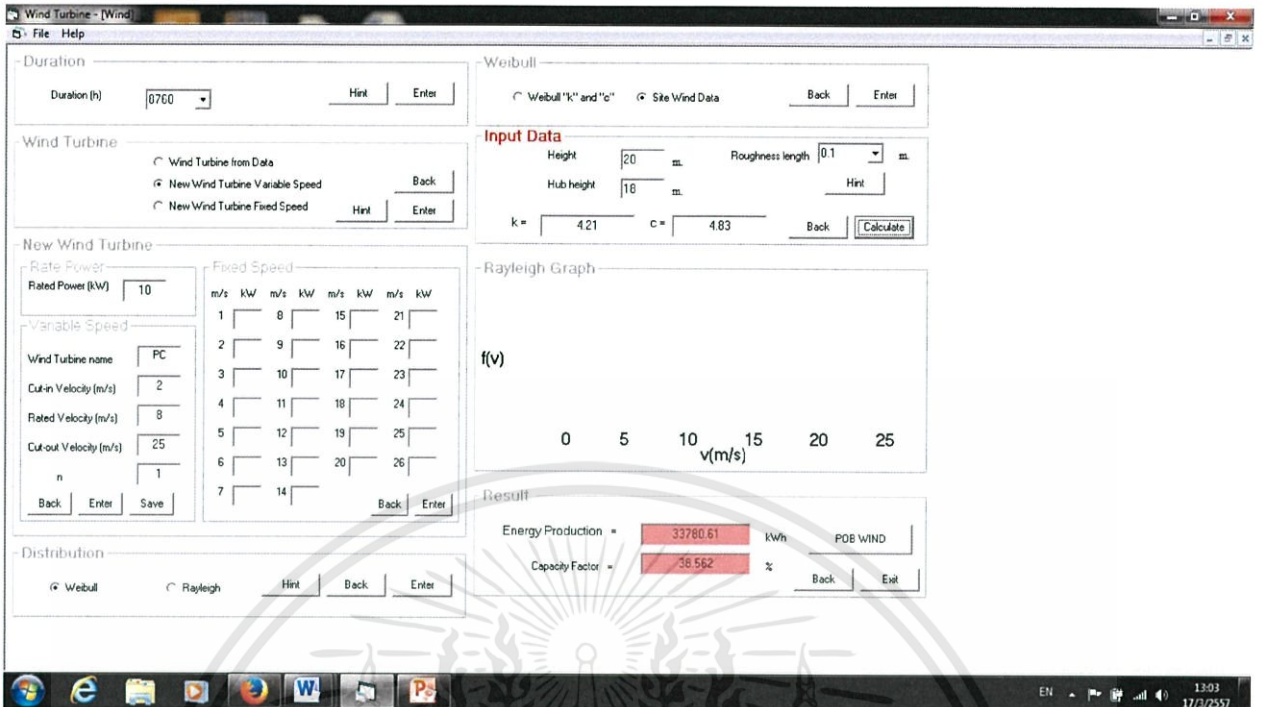
Input Data: Height: 50 m, Roughness length: 3.1 m, Hub height: 18 m, k = 4.21, c = 4.03

Rayleigh Graph: Energy Production: 21.48 GWh, Capacity Factor: 24.4%



รูปที่ 4.6 Power Curve ของ Purpose

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 เปอร์เซนต์ Cf ของ Purpose

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบ specification และ %Cf ของกังหันลมที่เลือกเทคโนโลยี กับที่ออกแบบเอง

เทคโนโลยี	เทคโนโลยีที่ 1	เทคโนโลยีที่ 2	Purpose
Specification			
Power Output	10kW	10kW	10kW
เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด	8 m	8 m	10 m
Cut-in Speed	2.5 m/s	3 m/s	2 m/s
Rated Speed	10 m/s	10 m/s	8 m/s
Cut-out Speed	16 m/s	ไม่ได้ระบุไว้	25 m/s
Rotor Speed	180 rpm	180 rpm	120 rpm
Generator Type	PMSG	PMSG	PMSG
%Cf	24.47%	19.78%	38.56%

จากตารางที่ 4.2 นั้น เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่กังหันลมแต่ละตัวจะทำได้ โดยอ้างอิงจาก Power Curve และความเร็วลมในพื้นที่ติดตั้ง จะเห็นได้ว่า กังหันลมที่ออกแบบเองนั้น ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด และยังมีความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต่ำกว่าอีกด้วย เมื่อเทียบกับตัวที่ให้ประสิทธิภาพ ที่ดีที่สุดในเทคโนโลยีที่เลือก มีค่า $\%C_f$ ที่ต่างกันถึง 13.09% จึงอาจสรุปได้ว่า เทคโนโลยีกังหันลมโดยทั่วไป อาจไม่ได้ออกแบบมาเพื่อรองรับพื้นที่ความเร็วลมต่ำ ซึ่งการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบระหว่างกังหันลมโดยทั่วไป และกังหันลมที่ออกแบบเองนั้น ยังต้องอาศัยการเก็บค่าข้อมูลจริงในอนาคตต่อไป

4.2 การคำนวณ Bending Moment

Dimension ของกังหันลมที่จะนำมาใช้ในการเลือกเสาที่จะนำมาใช้กับกังหันลมนั้น ข้อมูลที่จำเป็นก็คือขนาดน้ำหนักของส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งได้แสดงไว้ในตาราง ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ตารางเปรียบเทียบ Dimension กังหันลม

ITEM	MODEL							
	เทคโนโลยีที่ 2				เทคโนโลยีที่ 1			
	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Weight (kg)	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Weight (kg)
Wind Turbine	720	2,120	990	550	710	1,340	620	650
Blade	505	4,020	390	140	380	4,040	520	105

เสาสูง 18 เมตร เสา กังหันลม ต้องรับแรง ดังนี้

- น้ำหนักของอุปกรณ์

1.1 เทคโนโลยีที่ 2

- ใบพัด ใบละ 140 กิโลกรัม 3 ใบ 420 กิโลกรัม
- น้ำหนักกังหันลม 550 กิโลกรัม

รวมน้ำหนัก 970 กิโลกรัม

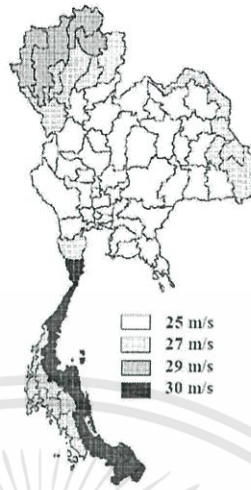
1.2 เทคโนโลยีที่ 1

- ใบพัด ใบละ 105 กิโลกรัม 3 ใบ 315 กิโลกรัม
- น้ำหนักกังหันลม 650 กิโลกรัม

รวมทั้งหมด 965 กิโลกรัม

ดังนั้นทำการเลือกเสาที่มีน้ำหนักมากกว่า จึงเลือก เทคโนโลยีที่ 2 มาทำการคำนวณค่า Bending Moment สมมุติ CG อยู่ที่ระยะ 50 เซนติเมตร จากจุดศูนย์กลางเสาในแนวแกนเพลลา

- แรงที่กระทำจากลม



รูปที่ 4.8 แผนที่ความเร็วลมอ้างอิง [34]

ที่มา

แผนที่ความเร็วลมอ้างอิงสำหรับการออกแบบอาคารของประเทศไทย (นเรศ ลิ้ม
สัมพันธ์เจริญ, 2550)

จากรูปที่ 4.7 คิดที่ลม 25 เมตร/วินาที

คำนวณแรงลมโดยวิธีแรงสถิตย์ตามข้อกำหนดของ Uniform Building Code,
UBC-1994

จาก

$$P = C_e C_q q_s I_w$$

$$P = 1.43 \times 1.4 \times 0.004826 \times \left(\frac{18}{5} \times 25\right)^2 \times 1$$

$$P = 78.2594 \text{ กิโลกรัม/ตารางเมตร}$$

นำค่า P ที่ได้ไปคูณกับพื้นที่กั้นหันลม

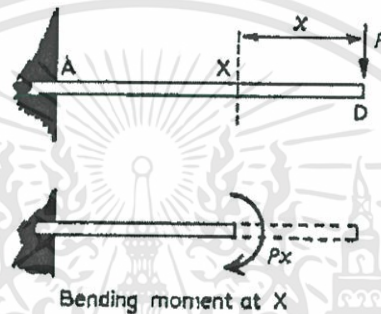
$$P = 78.2594 \times 3 \times 4 \times 0.739$$

$$P = 694.0044 \text{ กิโลกรัม}$$

ดังนั้นจึงคิดแรงลมที่กระทำต่อกังหันลมเป็น 700 กิโลกรัม

- ระยะจากคอกถึงหาง ตามแนวตั้งที่ 50 เซนติเมตร
- ฐานราก
- ดินรับแรงกดได้ 4,000 กิโลกรัม/ตารางเมตร
- ออกแบบเสากังหันลม

จากรูป



รูปที่ 4.9 การคำนวณ Bending Moment ที่ จุด X [19]

Bending Moment ที่ X

$$P(x) = Px$$

- 1.) ค่าของ Bending Moment ที่เกิดจากน้ำหนักของอุปกรณ์ที่ยอดเสาของใบ 8 เมตร เยื้องศูนย์กลางจากจุด CG อยู่ที่ระยะ 0.5 เมตร เมื่อ $P = 970.0$ กิโลกรัม, $X = 0.50$ เมตร ดังนั้น Bending Moment = Px

$$= 970.0 \times 0.50$$

$$= 485.00 \text{ kg-m.}$$

- 2.) ค่าของ Bending Moment ที่เกิดจากแรงที่กระทำจากลม เมื่อ ลมมีความเร็ว 25 เมตร/วินาที ได้แรงกระทำตามแนวแกนที่ 700 กิโลกรัม

- a. หา Bending Moment ที่ $X = 0$, ที่ปลายเสา

$$\text{ดังนั้น Bending Moment} = Px$$

$$= 700.0 \times 0.0$$

$$= 0 \text{ kg-m}$$

- b. หา Bending Moment ที่ $X = 9.00$, ที่กลางเสา

$$\text{ดังนั้น Bending Moment} = Px$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 700.0 \times 9.00$$

$$= 6,300.00 \text{ kg-m}$$

c. หา Bending Moment ที่ $X = 18.00$, ที่โคนเสา

ดังนั้น Bending Moment = Px

$$= 700.0 \times 18.00$$

$$= 12,600.00 \text{ kg-m}$$

3.) ค่า Bending Moment สูงสุดที่ตำแหน่งต่างๆ

a. ค่า Bending Moment สูงสุดที่ปลายเสา $X = 0$

$$= M_{\text{ลม}} + M_{\text{อุปกรณ์}}$$

$$= 0.0 + 485.0$$

$$= 485.00 \text{ kg-m}$$

b. ค่า Bending Moment สูงสุดที่กลางเสา $X = 9$

$$= M_{\text{ลม}} + M_{\text{อุปกรณ์}}$$

$$= 6,300.0 + 485.0$$

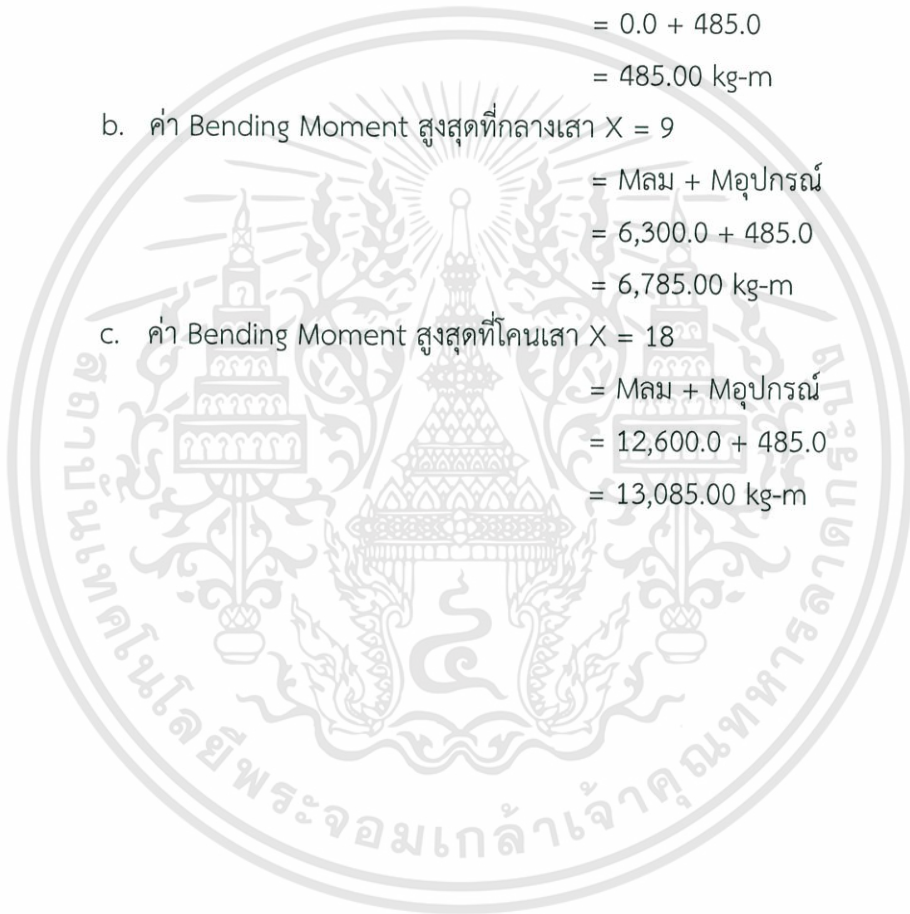
$$= 6,785.00 \text{ kg-m}$$

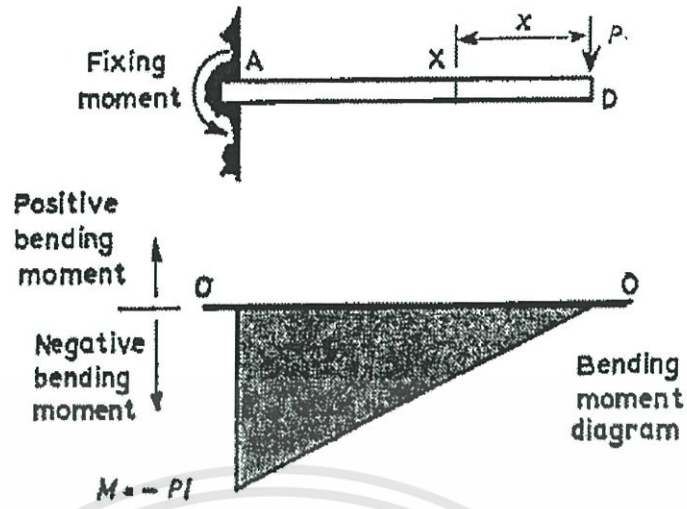
c. ค่า Bending Moment สูงสุดที่โคนเสา $X = 18$

$$= M_{\text{ลม}} + M_{\text{อุปกรณ์}}$$

$$= 12,600.0 + 485.0$$

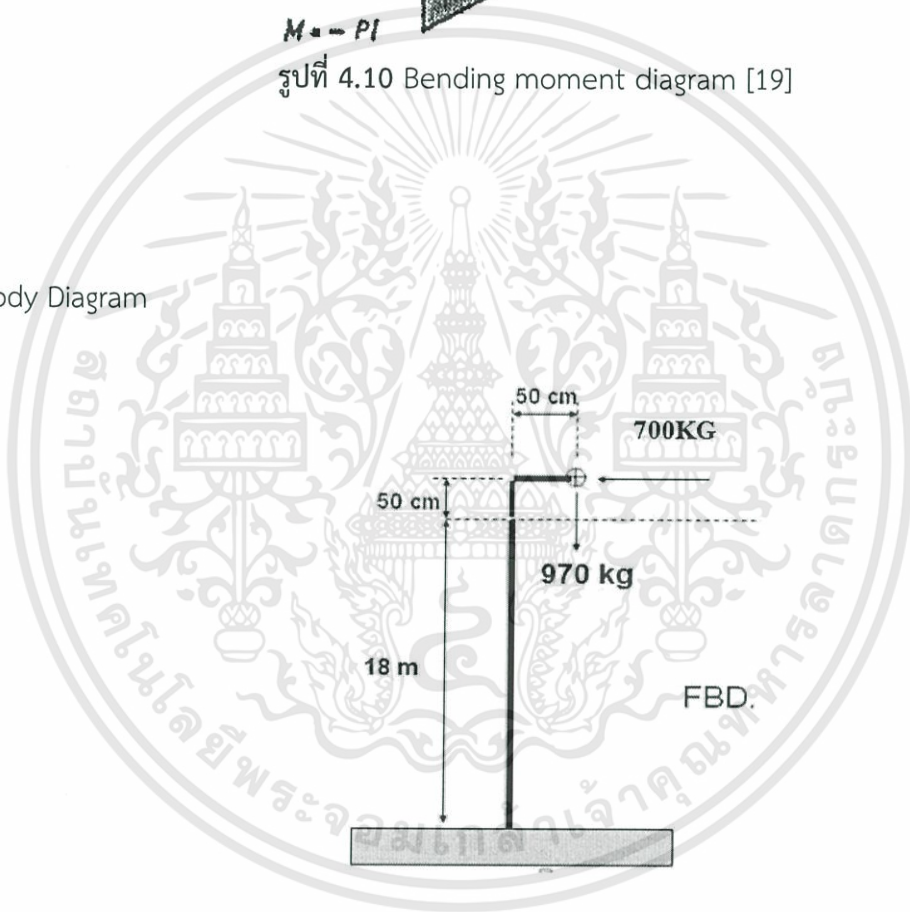
$$= 13,085.00 \text{ kg-m}$$





รูปที่ 4.10 Bending moment diagram [19]

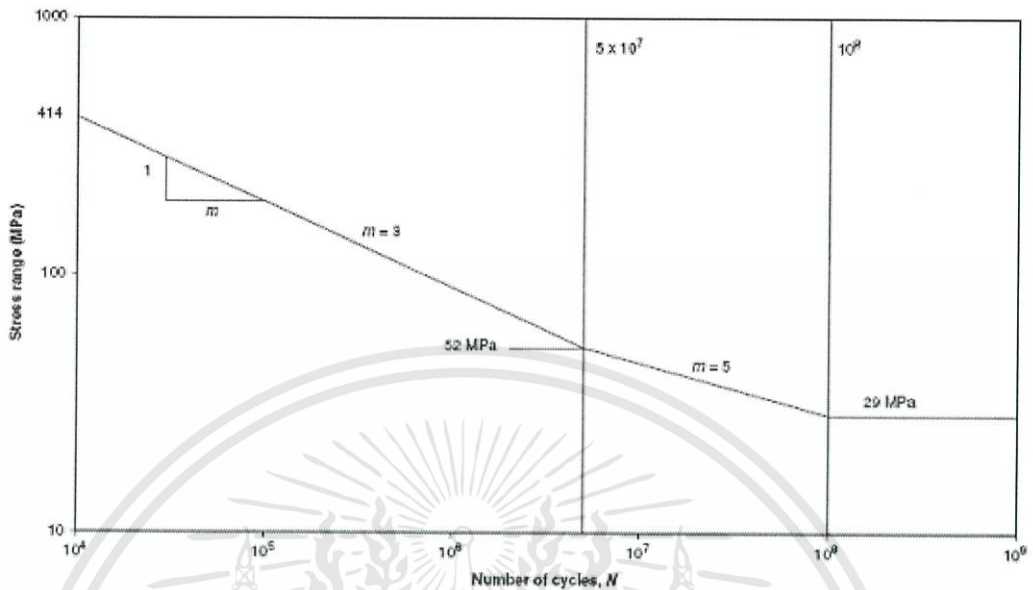
Free Body Diagram



รูปที่ 4.11 Free body Diagram [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้ค่า Max Bending Moment มาแล้ว ต่อไปก็จะหาค่า หน้าตัดของเสา เพื่อคำนวณหา
ค่า โมเมนต์



รูปที่ 4.12 วัฏจักรของ Fatigue load [19]

ความเฉื่อย (Moment of Inertia) และค่าความเค้น (Stress) ของเสา เลือกใช้เหล็ก
SS400 Prove Tensile ไม่ต่ำกว่า 400 n/mm^2 ทำให้เหลือค่าออกแบบอยู่ที่ 29 n/mm^2 ดังรูป
4.11

ออกแบบหน้าตัดท่อเหล็กที่โคนเสาทั้งหันลม เมื่อ $F_y = 4,000$ กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

ใช้ $F_s = 0.65F_y$

$$= 0.65 \times 4,000.00$$

$$= 2,600.00 \text{ กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร}$$

Max Moment ที่โคนเสา

$$= 13,085.00 \text{ กิโลกรัม/เมตร} = 1,308,500.00 \text{ กิโลกรัม/เซนติเมตร}$$

คำนวณหา ค่าความเค้น (Stress) ที่ผิวท่อ

จาก
$$F_s = M \frac{Y}{I}$$

เมื่อ

 M = Max Moment ที่โคนเสา Y = รัศมีของท่อเหล็ก I = โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia)

กรณีที่ 1 ใช้ท่อหนา 9 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร คำนวณคุณสมบัติเหล็กจาก

$$\text{Moment of Inertia} = I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$$

จะได้ว่า $I = 8,717.5928 \text{ cm}^4$ แล้วแทนค่าในสูตร

$$F_s = M \frac{Y}{I}$$

$$F_s = 1,308,500 \times \frac{15}{8,717.5928}$$

$$F_s = 2,251.4816 \text{ ksc}$$

ซึ่งเมื่อนำค่าที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับว่า 2,251.4816 น้อยกว่า 2,600 สามารถนำท่อเหล็กมาใช้ได้

กรณีที่ 2 ใช้ท่อหนา 12 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร คำนวณคุณสมบัติเหล็กจาก

$$\text{Moment of Inertia} = I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$$

จะได้ว่า $I = 11,276.4377 \text{ cm}^4$ แล้วแทนค่าในสูตร

$$F_s = M \frac{Y}{I}$$

$$F_s = 1,308,500 \times \frac{15}{11,276.4377}$$

$$F_s = 1,740.5763 \text{ ksc}$$

ซึ่งเมื่อนำค่าที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับว่า 1,740.5763 น้อยกว่า 2,600 สามารถนำท่อเหล็กมาใช้ได้

ดังนั้นจะเห็น ทั้ง 2 กรณี สามารถนำท่อเหล็กมาใช้ได้ เลือกท่อเหล็กในกรณีที่ 1 กับ 2 เลือก ถ้าเลือกกรณีที่ 2 จะมีราคาที่สูงกว่ากรณีที่ 1 จึงเลือกกรณีที่ 1 เนื่องจากสามารถเพิ่มความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปลอดภัยได้ด้วยการเพิ่มความหนาของท่อเหล็ก ซึ่งใช้เหล็กครึ่งบน 12 นิ้ว ครึ่งล่าง 14 นิ้ว ทั้งยังมีความคุ้มทุนมากกว่ากรณีที่ 2

ในโครงการ Future Center นั้น คณะผู้ศึกษาได้ เลือกใช้วัสดุในโครงสร้างเสาเป็นชนิด ss400 เนื่องจาก ss400 เป็นที่นิยมใช้ในการรีดเหล็กของโครงสร้างเหล็กทั่วไป จัดจำหน่ายในหลากหลายรูปแบบ เช่น แบบจาน ,แบบแผ่น ,แบบแบน ,แบบบาร์ ,แบบท่อน และอื่นๆ มีราคาถูก มีความสามารถในการเชื่อม และการแปรรูปที่ดีเยี่ยม

4.3 ออกแบบฐานราก

1. ออกแบบรากฐานที่ใช้งานดังนี้
 - ความกว้าง 3.00 เมตร
 - ความยาว 3.00 เมตร
 - ความหนา 0.30 เมตร
 - จุดดินลึก 1.50 เมตร
2. ตรวจสอบ ความสามารถการรับแรงลม จากผลรวมของโมเมนต์รอบจุด A = 0 เมื่อ
 - H1 18.50 เมตร
 - H2 1.20 เมตร
 - H3 0.30 เมตร
 - D 3.00 เมตร
 - P_x คือ แรงลมสูงสุดที่ฐานรากสามารถรับได้ก่อนเกิดการหมุนหรือล้ม
 - น้ำหนักคอนกรีต 2,400 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
 - น้ำหนักดิน 1,730 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

แทนค่า

$$P_x (18.50+1.20+0.30) = 3.00/2(\text{น้ำหนักคอนกรีตฐาน}) + 3.00/2(\text{น้ำหนักดิน})$$

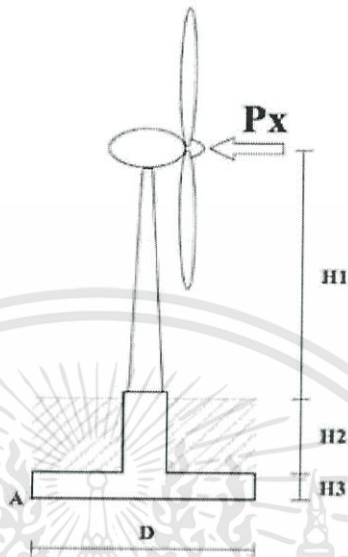
$$P_x(20) = (3.00 \times 3.00 \times 0.30 \times 2,400) + (3.00 \times 3.00 \times 1.20 \times 1,730)$$

$$P_x(20) = 9,720.00 + 28,026.00$$

$$P_x = 37,746 / 20$$

$$= 1,887.3 \text{ กิโลกรัม}$$

ซึ่งเมื่อนำค่ามาเปรียบเทียบกับน้ำหนักรวมของกังหันแล้วจะพบว่า ค่าที่คำนวณมาได้คือ 1,887.3 กิโลกรัม จะมากกว่า แรงลมที่กระทำต่อกังหันลม ซึ่งมีค่า 700 กิโลกรัม ดังนั้นฐานรากนี้ สามารถ รับแรงลมปลอดภัยได้



รูปที่ 4.13 แรงลมที่กระทำต่อกังหันลมและการวางฐานราก [19]

3. ตรวจสอบความสามารถรับแรงกดของพื้นดิน

จาก

$$\text{Max Stress} = \frac{P}{A} + M \frac{Y}{I}$$

เมื่อ

P = น้ำหนักที่กดทับบนฐานราก (น้ำหนักคอนกรีต + น้ำหนักดิน + น้ำหนักเสา + น้ำหนักกังหันลม)

A = พื้นที่ของฐานราก

M = ค่าโมเมนต์สูงสุดที่เกิดจากลม

Y = ระยะที่จุดศูนย์กลางของฐานราก

I = โมเมนต์ความเฉื่อย = $D^4 / 12$ เมื่อ D คือ ขนาดของฐานราก

แทนค่าในสูตร

$$\text{Max Stress ดิน} = \frac{P}{A} + M \frac{Y}{I}$$

จะได้ว่า

$$\text{Max Stress ดิน} = (\text{น้ำหนักคอนกรีต} + \text{น้ำหนักดิน} + \text{น้ำหนักเสา} + \text{น้ำหนักกั้นหลุม}) / (3.00 \times 3.00) + (700.00 \times 20) / (3.00 \times 3.00 \times 3.00 \times 3.00 / 12) \text{ กิโลกรัม/ตารางเมตร}$$

$$\text{Max Stress ดิน} = (9,720.00 + 28,026.00 + 5,000.00 + 970.00) / 4 + 5,250.00 \text{ กิโลกรัม/ตารางเมตร}$$

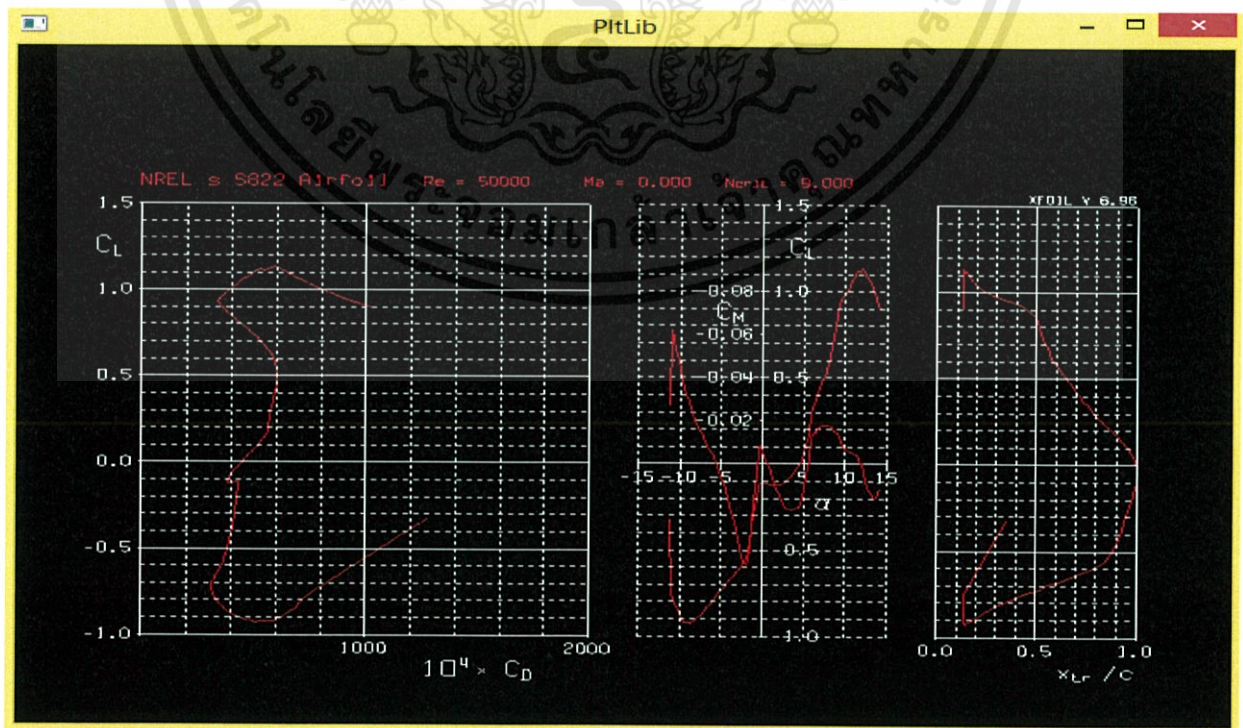
$$\text{Max Stress ดิน} = 14,572 / 3 + 2,074.0741 \text{ กิโลกรัม/ตารางเมตร}$$

$$\text{Max Stress ดิน} = 6,931.4074 \text{ กิโลกรัม/ตารางเมตร}$$

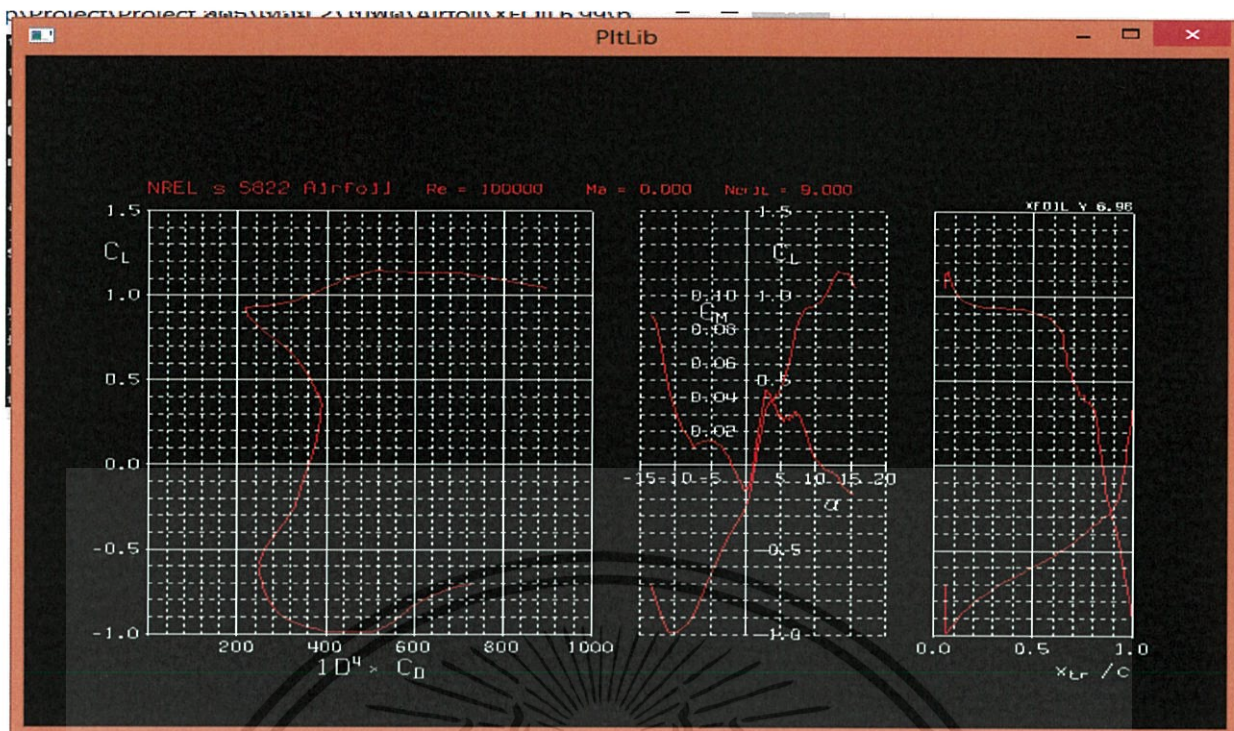
ดังนั้นการออกแบบรากฐานนี้ไม่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งกั้นหลุม เนื่องจากค่า Max Stress ดิน ที่คำนวณมีค่ามากกว่าดินในพื้นที่ติดตั้ง ซึ่งสามารถรับแรงกดได้เพียง 4,000 กิโลกรัม/ตารางเมตร จึงจำเป็นต้องใช้วิธีอื่นในการติดตั้งกั้นหลุม คือ การตอกเสาเข็มให้ลึกไปจนถึงชั้นดินทราย(ที่ความลึกประมาณ 25 เมตร) หรือการเสริมความแข็งแรงของหน้าดินในพื้นที่ติดตั้ง

4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพใบพัดใน Airfoil แบบต่างๆ

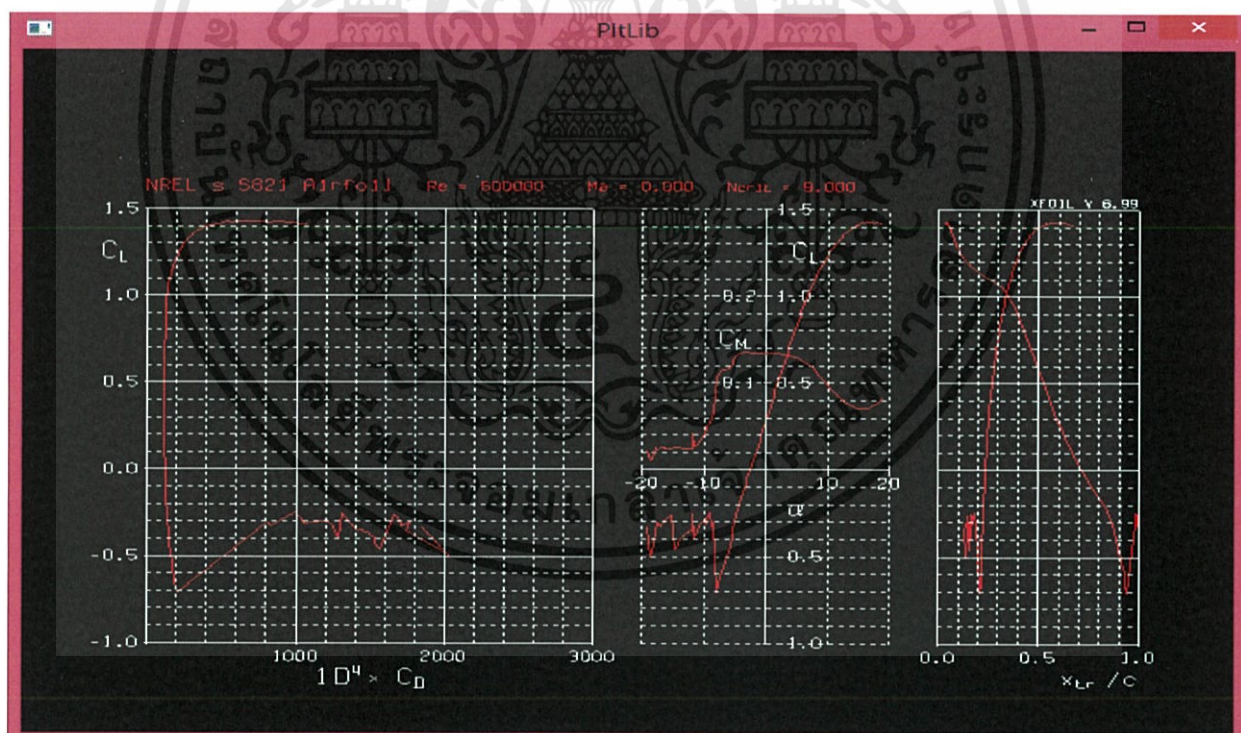
ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ Airfoil แต่ละตัวนั้น คณะผู้ศึกษาได้ใช้โปรแกรม XFOIL6.99 กับโปรแกรม GRID3.97 ในการวิเคราะห์และออกแบบค่าต่างๆ ที่ต้องใช้ในการพิจารณา เช่นค่า C_l/C_d , C_l/α ค่า Chord Width และค่ามุมบิด ซึ่งในการเริ่มต้นนั้น เราจำนำผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม XFOIL6.99 ใน Airfoil รุ่นต่างๆ ที่ค่า Reynolds Number = 50,000 ,100,000 ,200,000 ,600,000 ,800,000 ,1,000,000 ซึ่งจะนำกราฟที่ได้ในแต่ละ Airfoil นั้น มาเปรียบเทียบเพื่อศึกษาว่า Airfoil รุ่นใด เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับช่วงความเร็วลมของประเทศไทย



รูปที่ 4.14 ตัวอย่างการโปรแกรมใบพัดจาก XFOIL6.99 โดย Airfoil NREL's s822 ที่ $Re = 50,000$ ค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดย บริษัท อีเอสซี เทคโนโลยี จำกัด ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

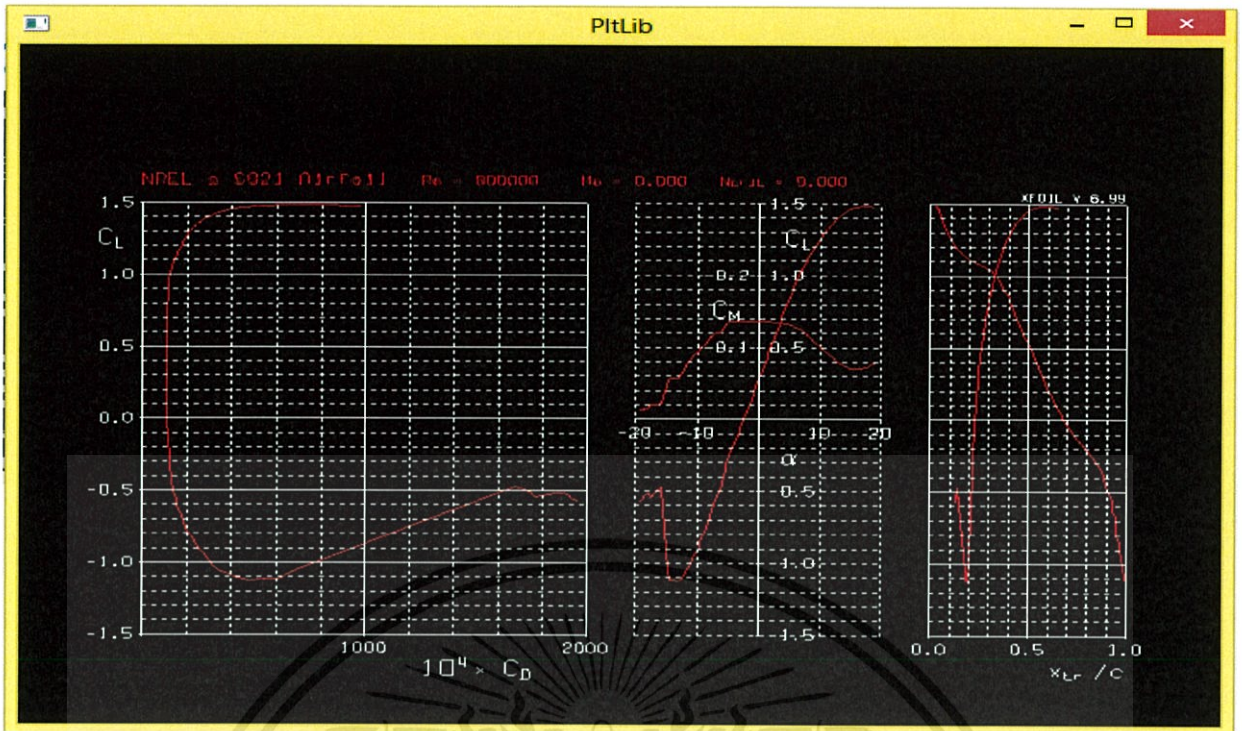


รูปที่ 4.15 ตัวอย่างการโปรแกรมใบพัดจาก XFOIL6.99 โดย Airfoil NREL's s822 ที่ $Re = 100,000$

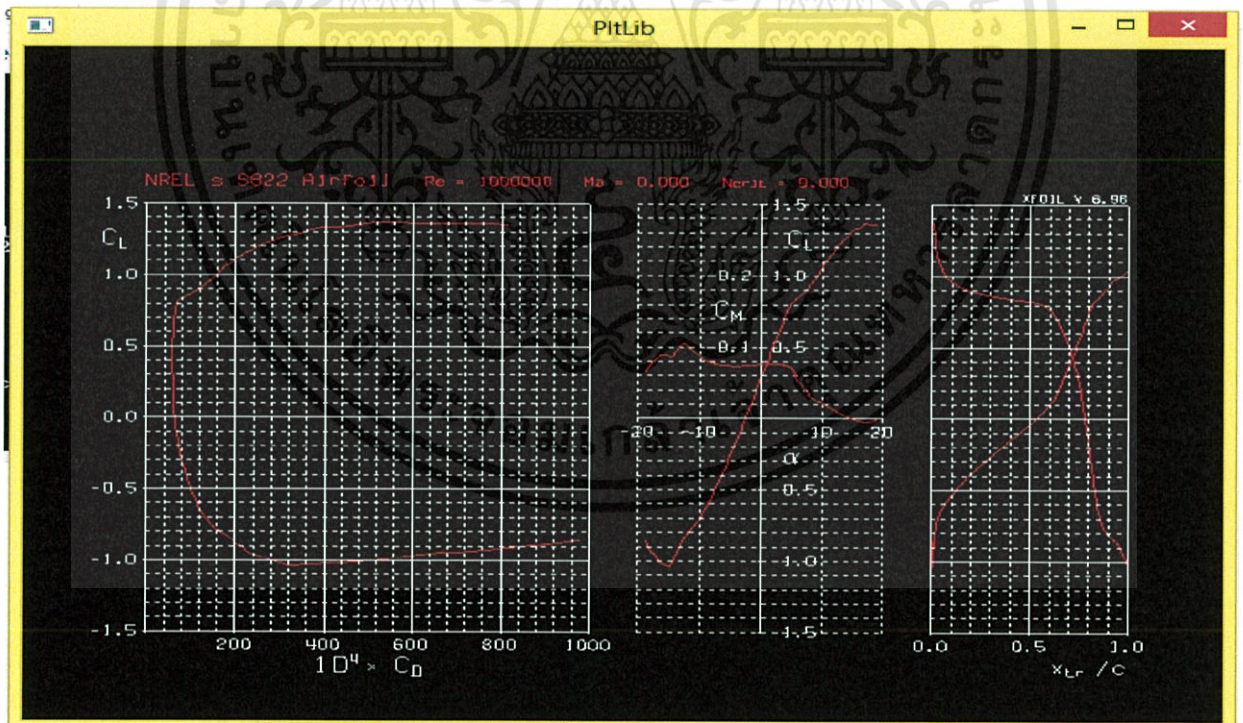


รูปที่ 4.16 ตัวอย่างการโปรแกรมใบพัดจาก XFOIL6.99 โดย Airfoil NREL's s822 ที่ $Re = 200,000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

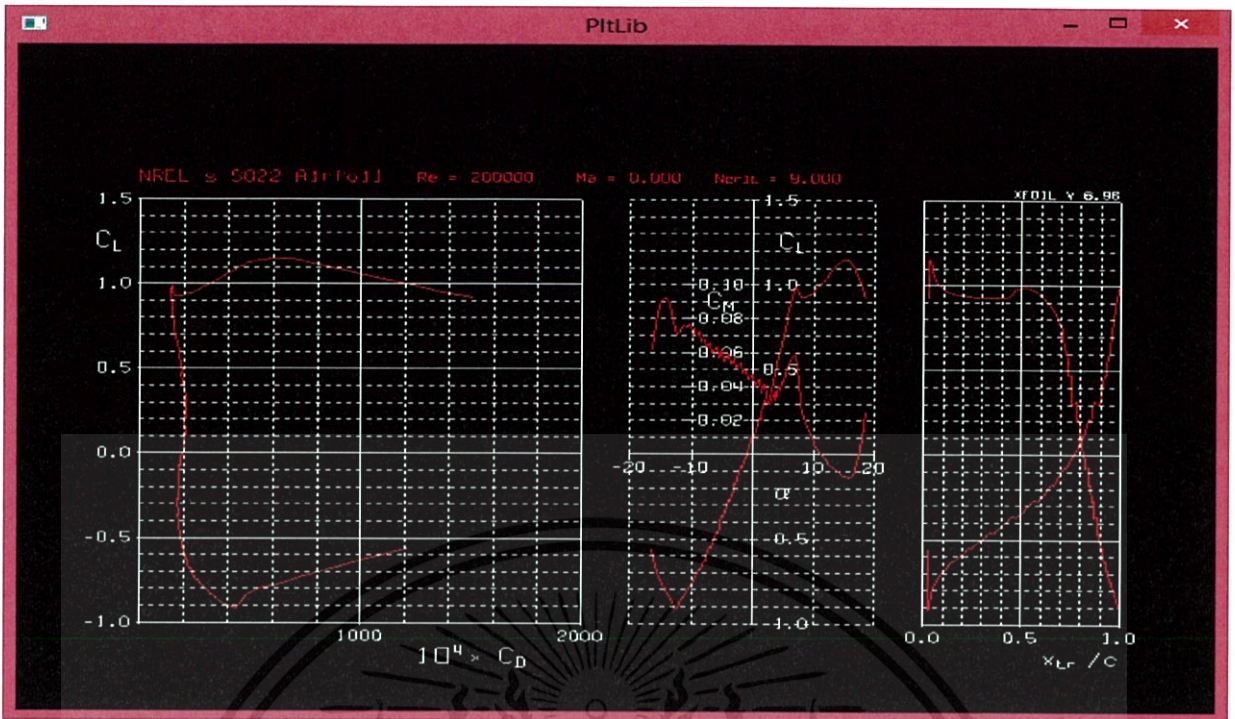


รูปที่ 4.17 ตัวอย่างการโปรแกรมใบพัดจาก XFOIL6.99 โดย Airfoil NREL's s822 ที่ $Re = 600,000$



รูปที่ 4.18 ตัวอย่างการโปรแกรมใบพัดจาก XFOIL6.99 โดย Airfoil NREL's s822 ที่ $Re = 800,000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

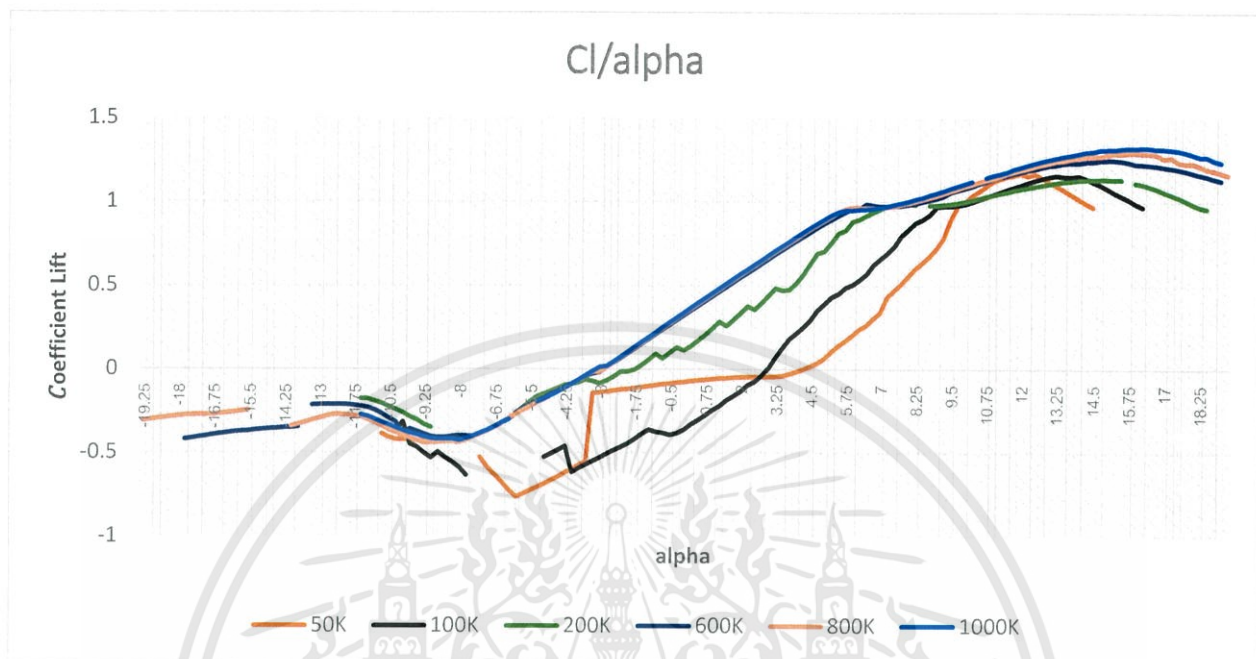


รูปที่ 4.19 ตัวอย่างการโปรแกรมไบพัดจาก XFOIL6.99 โดย Airfoil NREL's s822 ที่ $Re = 1,000,000$

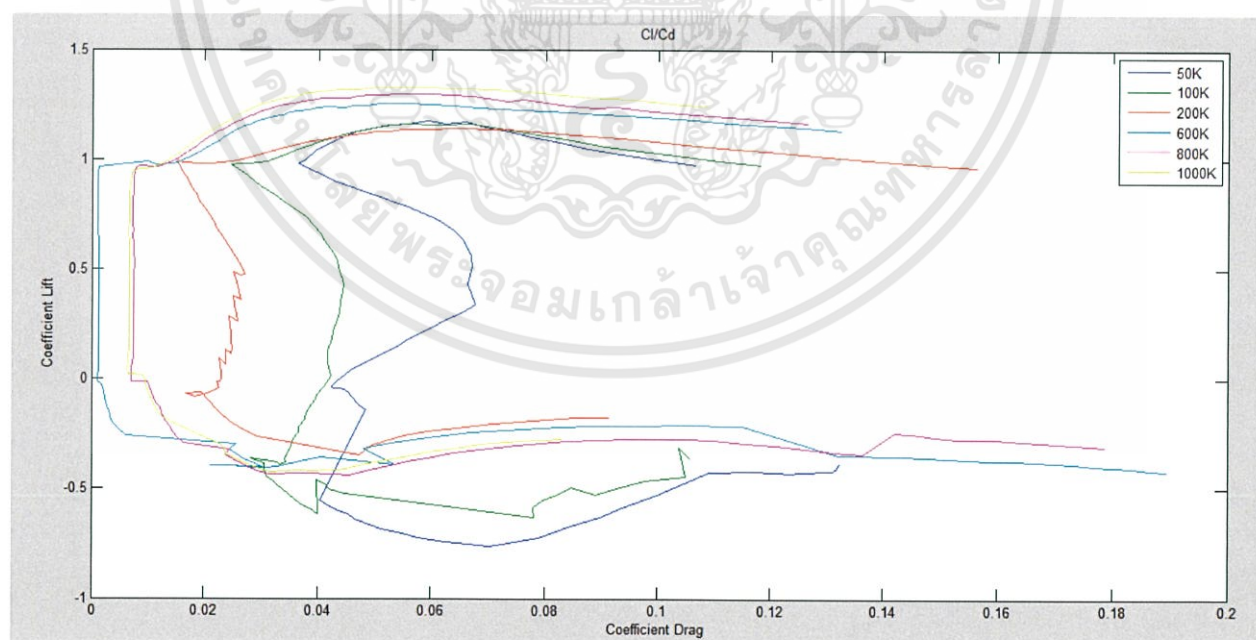
จากตัวอย่างการใช้โปรแกรม XFOIL6.99 ในข้างต้นนั้น เมื่อได้กราฟที่ต้องการ ในแต่ละค่า Reynolds Number ขั้นตอนต่อไปคือการนำกราฟที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับ Airfoil ในรุ่นต่างๆ โดยตัวแปรที่จะใช้พิจารณานั้น คือค่า C_l/C_d และ C_l/α การที่จะระบุว่า Airfoil นั้นเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในพื้นที่ยกตัวหรือไม่นั้น เราจะดูถึงลักษณะของกราฟ ในแต่ละช่วงของค่า Reynolds Number ว่า แต่ละค่าของกราฟ C_l/C_d และ C_l/α มีรูปแบบกราฟที่มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันตลอดทั้งช่วงที่พิจารณาหรือไม่ หากรูปแบบกราฟไม่ได้มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันตลอดช่วง Reynolds Number ที่เราพิจารณา จะถือว่า Airfoil ตัวนั้น อาจจะไม่ทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ในช่วงความเร็วลมในประเทศไทย และเราจะพิจารณาเพิ่มเติม ในส่วนของกราฟ C_l/α ซึ่งกราฟนี้จะบอกถึงความสัมพันธ์ประสิทธิภาพในการยก ต่อมุมแอตทัก (Angle of Attack, AOA) หลังจากเราตัดกราฟที่มีแนวโน้มไม่สัมพันธ์กันทิ้งไป เราจะทำการเปรียบเทียบกราฟที่เหลืออยู่ และเลือกกราฟที่ให้ค่า C_l ได้มากที่สุด และกราฟมีลักษณะแนวโน้มความสัมพันธ์ที่เหมาะสมกับช่วงค่า Reynolds Number ที่ใช้งานมากที่สุดนั่นเอง

กราฟแสดงการเปรียบเทียบของ Airfoil รุ่นที่ได้ทำการศึกษา

Airfoil NREL's s820



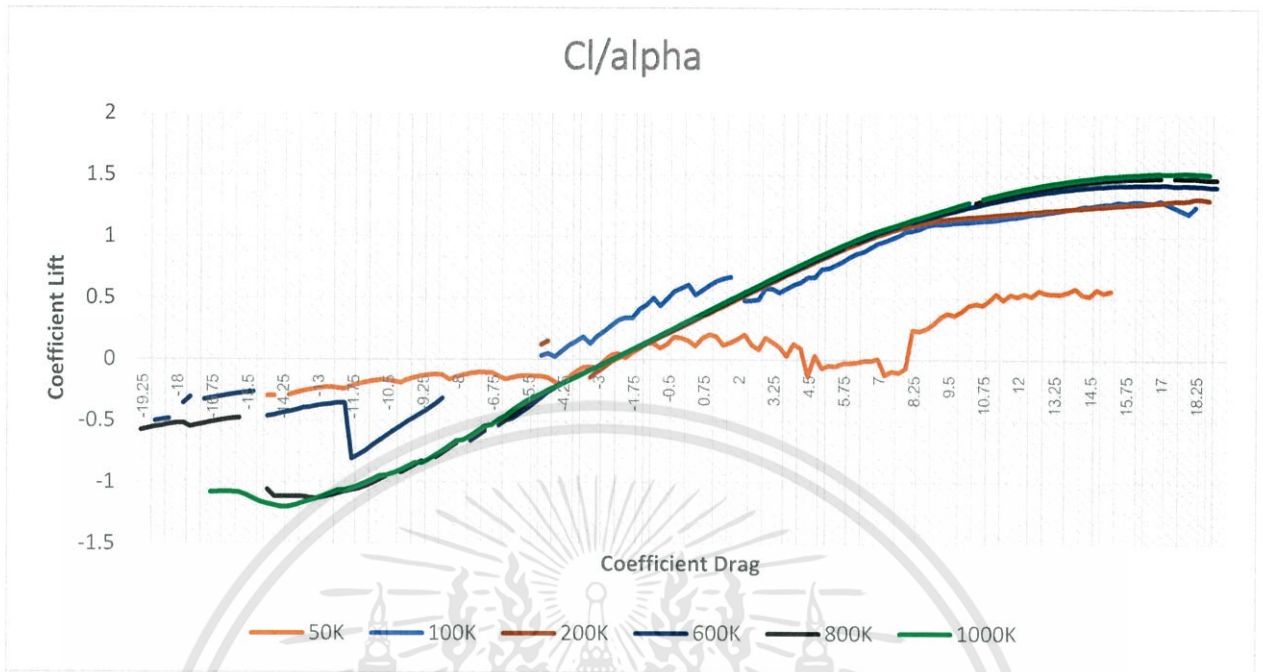
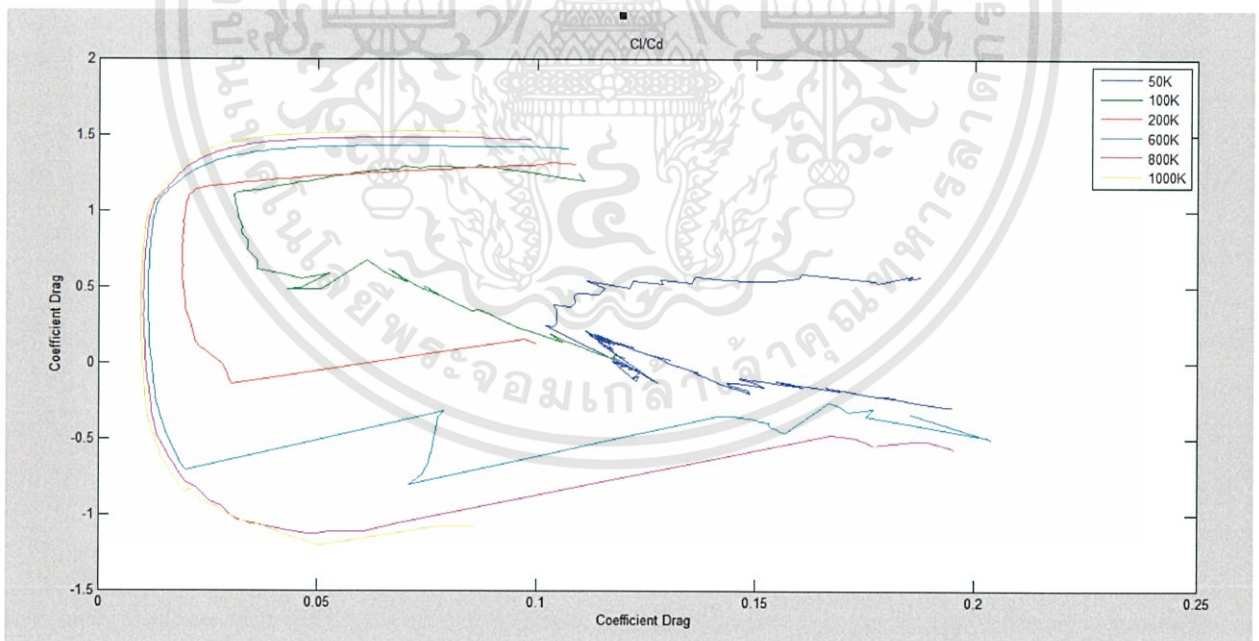
รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ของค่า Cl/α ที่ช่วง Reynolds Number ต่างๆ



รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ของค่า Cl/Cd ที่ช่วง Reynolds Number ต่างๆ

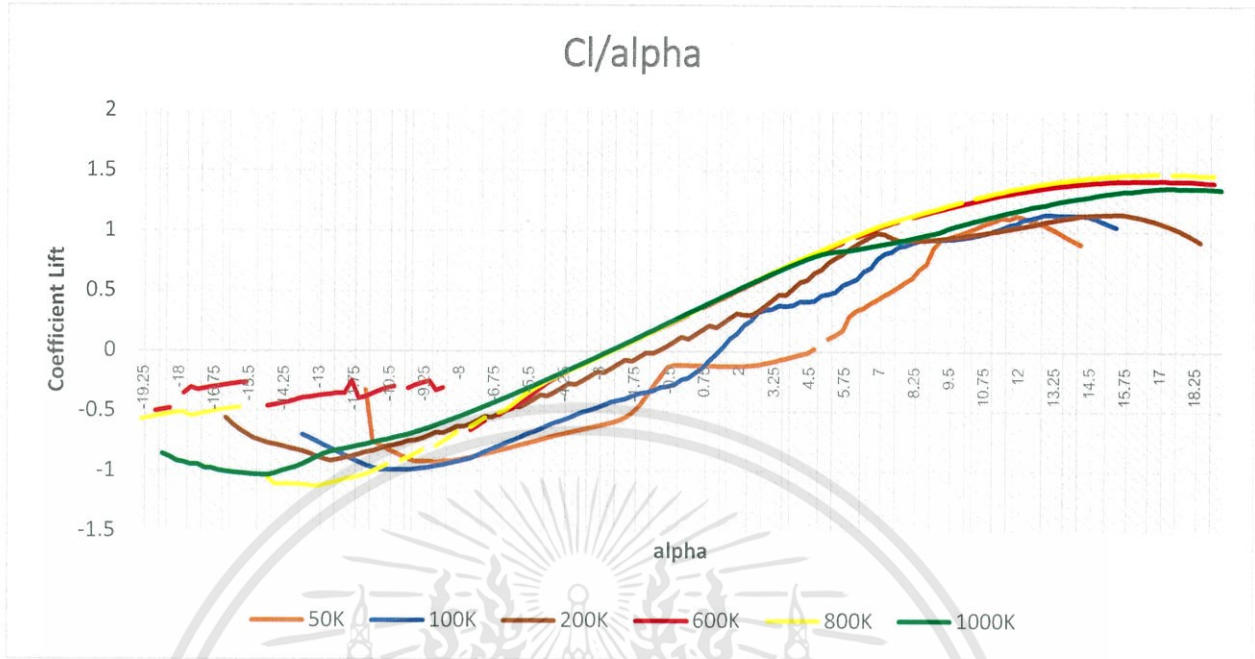
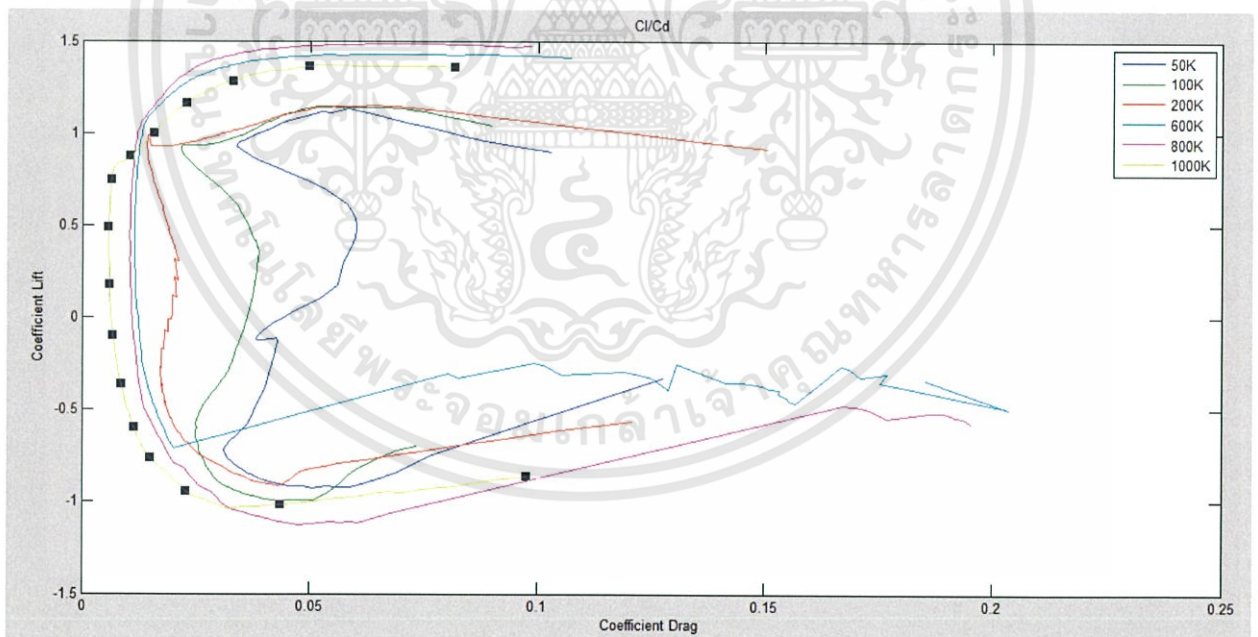
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Airfoil NREL's s821

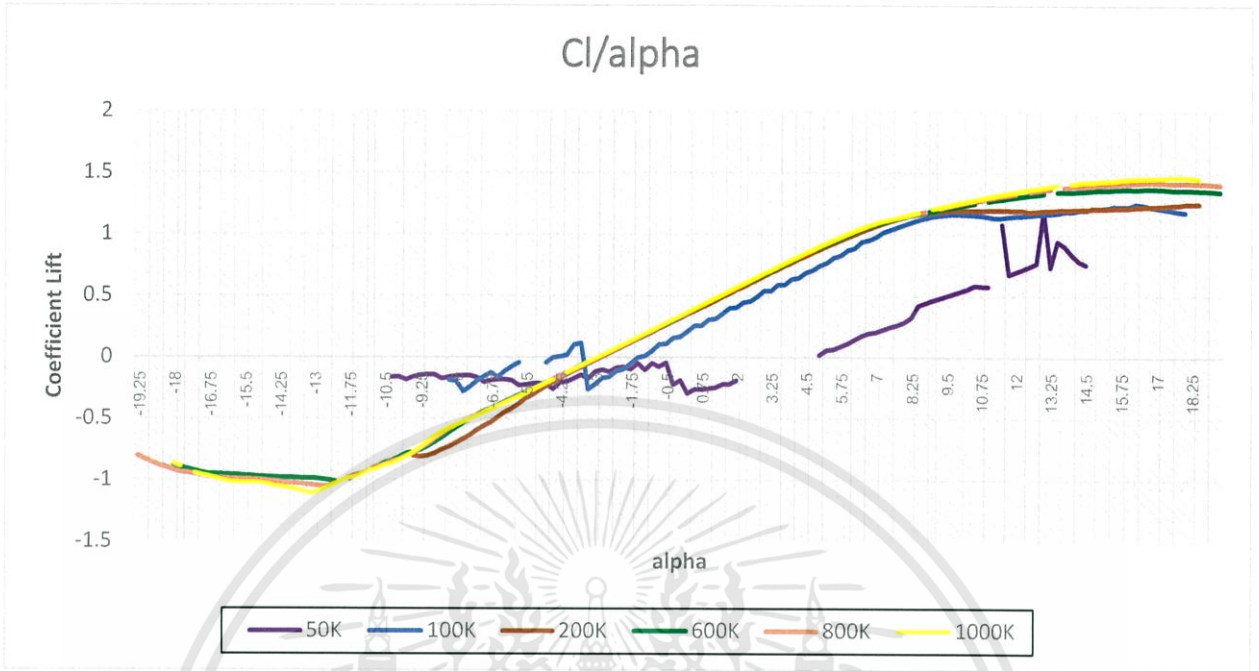
รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ของค่า Cl/α ที่ช่วง Reynolds Number ต่างๆรูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ของค่า Cl/Cd ที่ช่วง Reynolds Number ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

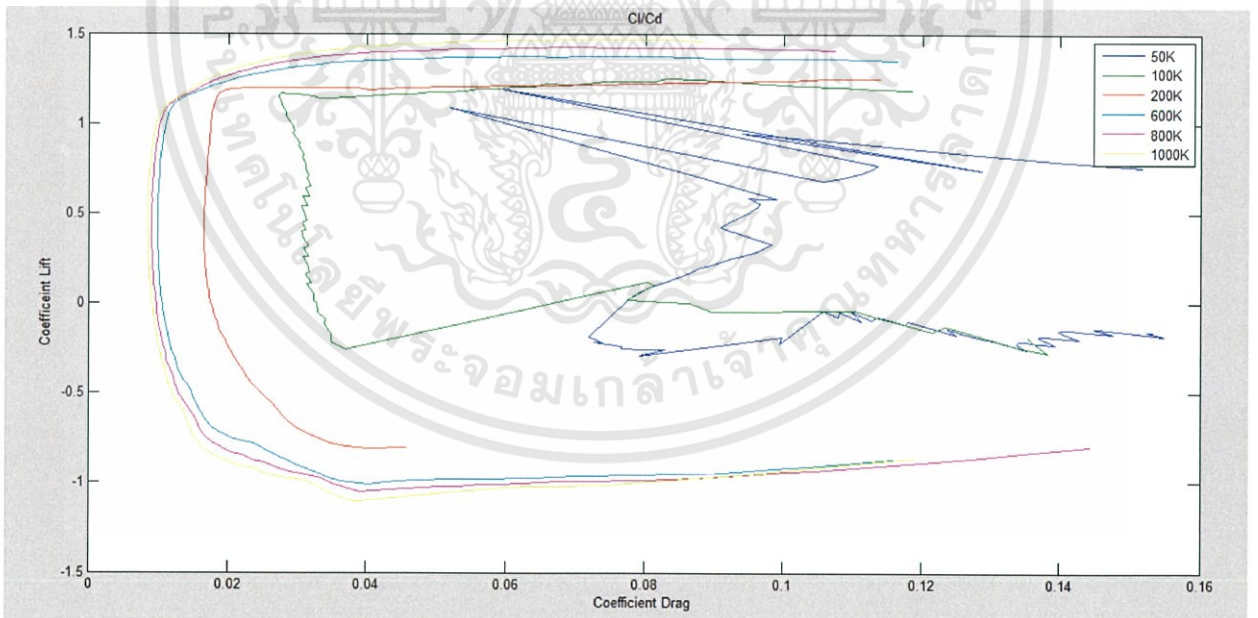
Airfoil NREL's s822

รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ของค่า Cl/α ที่ช่วง Reynolds Number ต่างๆรูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ของค่า Cl/Cd ที่ช่วง Reynolds Number ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ของค่า Cl/α ที่ช่วง Reynolds Number ต่างๆ



รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ของค่า Cl/Cd ที่ช่วง Reynolds Number ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟการเปรียบเทียบค่า C_l/C_d และ C_l/α จะเห็นว่าที่กราฟ C_l/C_d ของ Airfoil NREL's s821 และ s823 มีลักษณะแนวโน้มของกราฟที่ไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน แต่ Airfoil NREL's s820 และ s822 นั้นมีกราฟที่สามารถนำมาพิจารณาในขั้นตอนต่อไปได้ ที่กราฟ C_l/α ที่ s820 นั้น เส้นกราฟที่ค่า Reynolds Number ที่ 50,000 มีค่า C_l ที่ต่ำกว่า กราฟของ s822 และกราฟของ s820 ยังมีความต่อเนื่องไม่คงที่เท่าของ s822 อีกด้วย ดังนั้น ในการเลือก Airfoil ที่จะนำมาใช้กับกังหันลมที่ออกแบบเอง ทางคณะผู้ศึกษามีความเห็นว่ s822 มีความเหมาะสม เพราะจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม XFOIL6.99 ได้ให้ค่าที่เหมาะสมกว่า Airfoil รุ่นอื่นๆ เมื่อพิจารณาจากช่วงค่า Reynolds Number ที่ใช้งาน หลังจากทำการเลือก Airfoil แล้ว จากนั้นจะทำการออกแบบใบพัดในขั้นต้น โดยใช้โปรแกรม GRID 3.97

โปรแกรมออกแบบใบพัด สำหรับ กังหันลมแนวราบ	
กรณารอกข้อมูลดังต่อไปนี้ค่าสำคัญ	
1.ช่วงความเร็วลมที่ทานต้องการ ใช้งาน (ตั้งแต่ 2.0 - 11.0)	10.00 เมตร/วินาที
2.กำลังของกังหันลมที่ทานต้องการ	10,500 วัตต์/ชั่วโมง
3.ประสิทธิภาพของกังหันลม (1% -59.3%)	35.00 %
4.ความเร็วรอบเพลลา ของกังหัน	180.0 รอบ/นาที
5.จำนวนใบพัด	3 ใบ
6.มุมปะทะของใบพัด (ควรใช้ 0.0-15.0 องศา)	9.25 องศา
7.ค่าสัมประสิทธิ์การยกตัวของ ใบพัด (ดูจาก กราฟ)	1.030

รูปที่ 4.28 การป้อนค่าเบื้องต้น สำหรับการออกแบบใบพัดจากโปรแกรม GRID3.97 [19]

ผลการคำนวณ	
1.เส้นค่าศูนย์กลางของกังหันลม	8.00 เมตร
2.อัตราส่วนความเร็วปลายใบ TSR	7.54
3.แรงบิด	56.83 กก.-เมตร

รูปที่ 4.29 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม GRID3.97 [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม GRID3.97 ประกอบด้วยค่าความกว้างของ Airfoil และค่ามุมบิดที่ตำแหน่งต่างๆ [19]

ขนาดและรูปร่างของใบพัด				
ที่	รัศมี จาก ศก. ม.	มุมบิด ของใบพัด		ความกว้าง ใบพัด ม.
		เรเดียน	องศา	
1	0.0800	1.187	68.01	0.310
2	0.1600	0.984	56.40	0.542
3	0.2400	0.813	46.58	0.670
4	0.3200	0.674	38.60	0.717
5	0.4000	0.562	32.22	0.715
6	0.4800	0.473	27.13	0.688
7	0.5600	0.402	23.02	0.651
8	0.6400	0.343	19.67	0.610
9	0.7200	0.295	16.90	0.570
10	0.8000	0.255	14.59	0.533
11	0.8800	0.221	12.64	0.499
12	0.9600	0.191	10.97	0.467
13	1.0400	0.166	9.53	0.439
14	1.1200	0.144	8.27	0.414
15	1.2000	0.125	7.17	0.391
16	1.2800	0.108	6.19	0.370
17	1.3600	0.093	5.32	0.351
18	1.4400	0.079	4.54	0.334
19	1.5200	0.067	3.84	0.318
20	1.6000	0.056	3.21	0.304
21	1.6800	0.046	2.63	0.291
22	1.7600	0.037	2.11	0.278
23	1.8400	0.028	1.63	0.267

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

24	1.9200	0.021	1.18	0.257
25	2.0000	0.014	0.78	0.247
26	2.0800	0.007	0.40	0.238
27	2.1600	0.001	0.05	0.230
28	2.2400	-0.005	-0.28	0.222
29	2.3200	-0.010	-0.58	0.215
30	2.4000	-0.015	-0.87	0.208
31	2.4800	-0.020	-1.14	0.201
32	2.5600	-0.024	-1.39	0.195
33	2.6400	-0.028	-1.62	0.190
34	2.7200	-0.032	-1.84	0.184
35	2.8000	-0.036	-2.05	0.179
36	2.8800	-0.039	-2.25	0.174
37	2.9600	-0.043	-2.44	0.170
38	3.0400	-0.046	-2.62	0.165
39	3.1200	-0.049	-2.78	0.161
40	3.2000	-0.051	-2.95	0.157
41	3.2800	-0.054	-3.10	0.154
42	3.3600	-0.057	-3.24	0.150
43	3.4400	-0.059	-3.38	0.147
44	3.5200	-0.061	-3.51	0.143
45	3.6000	-0.064	-3.64	0.140
46	3.6800	-0.066	-3.76	0.137
47	3.7600	-0.068	-3.88	0.134
48	3.8400	-0.070	-3.99	0.132
49	3.9200	-0.071	-4.10	0.129
50	4.0000	-0.073	-4.20	0.126

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการโปรแกรม GRID3.97 นั้นอ้างอิงมาจากการใช้ ทฤษฎี Betz เริ่มต้นโดยการป้อนค่า Specification ของกังหันลมที่เราได้ทำการเลือก จากนั้นคำนวณหามุมปะทะ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของใบพัด(Angle of Attack) โดยการนำค่า C_l กับ C_d ที่แต่ละองศา และ Reynolds Number มาเฉลี่ยกัน เพื่อหาว่ามุมปะทะที่เท่าไร จึงจะมีค่า C_l/C_d สูงที่สุด(แรงยกมาก แรงต้านน้อย) ซึ่งจะได้มุมปะทะเป็น 9.25 องศา $C_l/C_d = 46.96$ $C_l = 1.03$ และ $C_d = 0.02$ ดังรูปที่ หลังจากนั้น ผลลัพธ์ที่ได้จากตารางที่ 4.4 จะประกอบไปด้วยค่าของมุมบิด และความกว้างของ Airfoil ที่ระยะจากโคนใบจนถึงปลายใบ ซึ่งสามารถใช้ในการอ้างอิงในการออกแบบได้



บทที่ 5

สรุป

สรุป

โครงการ Future Renewable Center เป็นโครงการศึกษาและพัฒนาด้านพลังงานทดแทนเพื่อให้เกิดความยั่งยืนทางด้านพลังงานของประเทศไทย การศึกษานี้จะเป็นต้นแบบและแนวทางสำหรับผู้สนใจเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในด้านพลังงานทดแทนต่อไป

จากการศึกษาพื้นที่ความเร็วลมของโครงการ Future Renewable Center ในด้านของพลังงานลม เมื่อปีที่แล้ว ทำให้ทราบว่าในพื้นที่ที่ทำการศึกษานั้น มีค่าความเร็วลมเฉลี่ย 4.3 เมตรต่อวินาที เริ่มต้นนั้นได้ทำการเปรียบเทียบเทคโนโลยีของกังหันลม ในแบบแนวตั้งและแบบแนวนอน ซึ่งพบว่ากังหันลมในแบบแนวตั้งในเทคโนโลยีที่ศึกษานั้น ยังมีราคาที่สูง และให้ประสิทธิภาพได้น้อย เมื่อเทียบกับกังหันลมแนวนอน ที่พิกัดกำลัง 10kW ด้วยกัน จากนั้นเราจึงทำการศึกษาถึงจำนวนใบพัดของกังหันลมว่า ใบพัดของกังหันลมแนวนอนแบบ 3 ใบ เทียบกับใบพัดแบบนาเกลื้อที่มีใบพัดหลายใบแล้ว จะให้ประสิทธิภาพที่แตกต่างกันอย่างไร ทางคณะผู้ศึกษาได้ให้ข้อสรุปว่า ใบพัดของกังหันลมแบบใบพัดนาเกลื้อ จะทำงานได้ดีในความเร็วลมต่ำ ซึ่งเหมาะสมกับลักษณะความเร็วลมเฉลี่ยของประเทศไทย ซึ่งนี่ถือเป็นข้อดีของกังหันแบบใบพัดนาเกลื้อ แต่ข้อเสียอย่างหนึ่งของกังหันลมใบพัดนาเกลื้อนั้น คือเมื่อเกิดลมพายุ หรือช่วงที่ฝนตก เกิดลมแรง เพราะการติดตั้งกังหันลมนั้นต้องติดตั้งอยู่ในที่สูง ใบพัดของกังหันลมแบบนาเกลื้อ มีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายได้สูงมาก จากการที่ใบพัดนาเกลื้อนั้น มีลักษณะเป็นผ้าเพื่อเอามารับลม ใบพัดนาเกลื้อนั้นจึงยังมีข้อบกพร่อง ในด้านความปลอดภัยที่อาจจะเกิดขึ้นได้ ดังนั้น ทางคณะผู้ศึกษาจึงเห็นว่า ใบพัดของกังหันลม 3 ใบ ยังมีความเหมาะสม และปลอดภัยกว่ากังหันลมแบบใบพัดนาเกลื้อ หลังจากได้ทำการระบุเทคโนโลยีและเลือกจำนวนใบพัดที่แน่นอนแล้ว ก็ได้้นำข้อมูล Power Curve ของบริษัทกังหันลมที่ได้หามา และนำค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่ได้ไปวิเคราะห์ค่า $\% C_F$ เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ซึ่งได้ผลดังนี้ กังหันลมเทคโนโลยีที่ 2 มีค่า $\% C_F = 19.78\%$ กังหันลมเทคโนโลยีที่ 1 มีค่า $\% C_F = 24.47\%$ กังหันลมที่ทำการออกแบบเอง มีค่า $\% C_F = 38.56\%$ ทางคณะผู้ศึกษาจึงเห็นว่า กังหันลมขนาด 10kW ในเทคโนโลยีที่ศึกษามานั้น แม้จะเป็นกังหันลมขนาดเล็ก (Small Wind turbine) ก็ยังให้ประสิทธิภาพได้ไม่เต็มที่ในพื้นที่ความเร็วลมของโครงการ Future Renewable Center เมื่อเทียบกับกังหันลมที่ได้ทำการออกแบบเอง

หลังจากขั้นตอนการเลือกเทคโนโลยีและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกังหันลม ก็ จะทำการออกแบบส่วนต่างๆ ของกังหันลมทั้งหมด ได้แก่ ใบพัด และเสา ในส่วนของใบพัดนั้น จากการศึกษาและวิเคราะห์ผล Airfoil ในรุ่นต่างๆ ทางคณะผู้ศึกษาได้ทำการเลือกรุ่น Airfoil NREL's s822 ซึ่งให้ประสิทธิภาพได้สูงที่สุดในพื้นที่ความเร็วลมเฉลี่ยของโครงการเมื่อเทียบกับ Airfoil ที่อยู่

ในช่วง Reynolds Number ที่ใช้งานคือ 50,000-1,000,000 โดยทำการออกแบบจากโปรแกรม XFOIL6.99 และทำการออกแบบถึงความกว้างยาว และมุมบิดของใบพัด โปรแกรม GRID3.97

จากการศึกษา ทางคณะผู้ศึกษาได้เห็นว่าเสาแบบ Monopole เหมาะสมสำหรับการติดตั้งกังหันลมในพื้นที่ เนื่องจากเสาแบบ Monopole มีฐานเล็ก ทำให้ใช้พื้นที่น้อย จึงสร้างแรงสั่นสะเทือนน้อย และมีความสวยงาม วัสดุที่ใช้ทำเสาเป็น ss400 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร หนา 9 มิลลิเมตร (หากต้องการเพิ่มความปลอดภัยอาจพิจารณาใช้ความหนา 12 มิลลิเมตร) โดยฐานรากมีความกว้าง 3 เมตร ยาว 3 เมตร หนา 0.3 เมตร ขุดดินลึก 1.50 เมตร แต่เนื่องจากดินในพื้นที่ไม่เหมาะสมกับการสร้างสิ่งปลูกสร้างที่มีน้ำหนักมาก ทางคณะผู้ศึกษาจึงเห็นว่าอาจจะจำเป็นต้องมีการตอกเสาเข็มให้ลึกจนถึงชั้นดินทราย (ลึก 25 เมตร) หรือการเสริมความแข็งแรงของหน้าดินโดยวิธีอื่นๆ

ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นจะแบ่งเป็น 3 ส่วนคือส่วนของการเลือกเทคโนโลยี ส่วนของการออกแบบใบพัด และส่วนของการออกแบบเสา โดยในส่วนของการเลือกเทคโนโลยีที่จะนำมาใช้ ปัญหาที่อาจเกิดขึ้น เช่นในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในทางปฏิบัติ เราจำเป็นที่จะต้องควบคุมตัวแปรต่างๆ ให้มีค่าคงที่ เพื่อให้เหลือแต่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมในแต่ละตัวเป็นตัวเปรียบเทียบกันเพียงอย่างเดียว ดังนั้นเราจึงไม่อาจใช้รูปแบบใบพัดที่แตกต่างกันไปได้(รูปแบบ Airfoil, มุมบิด, ความกว้างของใบพัด ที่แตกต่างกัน) อาจต้องแก้ไขโดยการสั่งซื้อใบพัดจากบริษัทใดบริษัทหนึ่ง มาเป็นตัวอ้างอิงเพียงตัวอย่างเดียว เพื่อให้ได้ผลลัพธ์จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่เที่ยงตรงยิ่งขึ้น โดยทางคณะผู้ศึกษาเห็นว่าอาจใช้ใบพัดของเทคโนโลยีที่ 2 ได้ เนื่องจากมีรูปร่างใกล้เคียงกับ NREL's Airfoil s822 ที่ทางคณะผู้ศึกษาได้ทำการวิเคราะห์เอาไว้ (ไม่อาจยืนยันได้อย่างชัดเจน เนื่องจากทางบริษัทปิดข้อมูลเทคโนโลยีทางด้านใบพัด เอาไว้เป็นความลับ)

ปัญหาในส่วนของการออกแบบใบพัด เนื่องจากการออกแบบใบพัดนั้นมีค่าตัวแปรที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา นั่นคือค่าความเร็วลม ทางคณะผู้ศึกษาก็ได้มีการออกแบบใบพัดโดยคำนึงถึงช่วงความเร็วลมที่มีค่า Reynolds Number 50,000-1,000,000 เอาไว้แล้ว แต่หากนำเอาใบพัดนี้ไปใช้ในพื้นที่ ที่มีความเร็วลมต่างออกไปจากพื้นที่ ที่ศึกษา การวิเคราะห์ที่ทางคณะผู้ศึกษาได้ทำนั้น ก็อาจจะให้ผลลัพธ์ไม่ตรงตามที่ระบุไว้ ดังนั้นการออกแบบใบพัดจึงมีขอบเขตเพียงแค่ช่วงการใช้งานของ Reynolds Number ที่ 50,000-1,000,000 เท่านั้น

ปัญหาในส่วนของการออกแบบเสา แบ่งออกเป็น 2 ปัญหา คือ ปัญหาเรื่องดินในพื้นที่การติดตั้ง และปัญหาพิเศษที่อาจเกิดขึ้นได้ เริ่มด้วยปัญหาเรื่องดินในพื้นที่การติดตั้งซึ่งไม่เหมาะสมกับการสร้างสิ่งปลูกสร้าง อาจจะต้องปรึกษาในส่วนของโยธา เพื่อขอความเห็นว่าจะมีการป้องกันอย่างไรในระยะยาว ส่วนในปัญหาพิเศษที่อาจเกิดขึ้นได้นั้น เช่นกรณีมีลมพายุเข้า หรือกรณีที่ใบพัดเสียหายชำรุดทำให้ใบหักเหลือเพียง 2 ใบ และอื่นๆ กรณีพวกนี้จำเป็นต้องมีการคิดคำนวณโดยละเอียดและรอบคอบ อาจจำเป็นต้องมีการปรึกษาทางผู้ก่อสร้างถึงปัญหาที่อาจเกิดขึ้นเหล่านี้ด้วย เพื่อออกแบบไว้รองรับปัญหาที่ไม่คาดคิดต่างๆ

เนื่องจากพบว่าพื้นที่ตั้งโครงการ Future Renewable Center มีความเร็วเฉลี่ยในระดับปานกลางทำให้การผลิตกำลังไฟฟ้าจากกังหันลมได้ไม่เต็มพิกัดแต่เนื่องจากการศึกษานี้เป็นการศึกษาเพื่อขยายผลต่อเนื่อง สู้พื้นที่ต่างๆในประเทศซึ่งพบว่ามีหลายแห่งที่มีความเร็วลมสูง เช่น ทางภาคใต้ ชายฝั่งทะเลหรือบนภูเขาสูง บางแห่งที่ไฟฟ้ายังเข้าไม่ถึง การนำเอากังหันลมไปใช้จึงสามารถให้ประโยชน์ได้สูงมาก อาจนำไปติดตั้งบนอาคารสูงซึ่งช่วยประหยัดต้นทุนเนื่องจากไม่ต้องใช้เสาสูง พร้อมด้วยความเร็วลมแปรผันตามความสูงก็จะช่วยให้อาคารประหยัดค่าไฟฟ้าได้สูงขึ้น อีกทั้งยังช่วยประเทศชาติประหยัดพลังงานดังที่ได้อธิบายไว้ในปัจจุบัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] วิกันดา ศรีเดช และ ทวิช จิตรสมบูรณ์, “ความคลาดเคลื่อนเชิงสถิติในการประเมินงานรายปีของกังหันลม”, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2552.
- [2] โครงการสร้างสรรค์ปัญญา พัฒนาเขียนอ่านสืบสานสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, การวัดความเร็วลมและทิศทางของลม [ออนไลน์] แหล่งที่มา
<http://kanchanapisek.or.th/kp6/New/sub/book/book.php?book=2&chap=4&page=t2-4-infodetail03.html>
- [3] มาริน, ลม[ออนไลน์] แหล่งที่มา
<http://www.marine.tmd.go.th/thai/windhtml/windhtml.html>
- [4] เซาวลิต พิทักษ์วงษ์, “การออกแบบและควบคุมการทำงานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมขนาดเล็ก,” ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.
- [5] วิทเฟรนด์ชิพ, โบฟอร์ท[ออนไลน์] แหล่งที่มา
<http://withfriendship.com/user/boss/beaufort-scale.php>
- [6] รีเจียน เอนเนอร์จี, เทคโนโลยีพลังงานลม[ออนไลน์] แหล่งที่มา
<http://www.region1.energy.go.th/0gkramrukanghanrom/wind/4.pdf>
- [7] รีเจียน เอนเนอร์จี, ผลกระทบของการใช้กังหัน[ออนไลน์] แหล่งที่มา
<http://www.region1.energy.go.th/0gkramrukanghanrom/wind/8.pdf>
- [8] ฟรีเอนเนอร์จี, กังหันลมแนวตั้ง[ออนไลน์] แหล่งที่มา
<http://freeenergy.tarad.com/product-th-681501-3225569-%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%AB%E0%B8%B1%E0%B8%99%E0%B8%A5%E0%B8%A1%E0%B9%81%E0%B8%99%E0%B8%A7%E0%B8%95%E0%B8%B1%E0%B9%89%E0%B8%87%E0%B8%9C%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B8%95%E0%B9%84%E0%B8%9F%E0%B8%9F%E0%B9%89%E0%B8%B2.html>
- [9] Sciencehowstuffworks, How Wind Power Works [ออนไลน์] แหล่งที่มา
<http://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/wind-power2.html>
- [10] Intechopen, Magnetic Suspension and Self-pitch for Vertical-axis Wind Turbines [ออนไลน์] แหล่งที่มา
<http://www.intechopen.com/books/fundamental-and-advanced-topics-in-wind-power/magnetic-suspension-and-self-pitch-for-vertical-axis-wind-turbines>
- [11] แคนอน, สารนารัฐพลังงานลม [ออนไลน์] แหล่งที่มา
<http://goto.canon.co.th/cleanenergyforgreenworld/th/article/>
- [12] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บังลังก์ เนียมมณี, “โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาระบบควบคุมกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กแบบเชื่อมต่อกังหัน”, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2554.

- [13] สำนักวิชาการพลังงานภาค 1 กระทรวงพลังงาน, **องค์ความรู้กังหันลม** [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.region1.energy.go.th/0gkramrukanghanrom/wind.html>
- [14] นิพนธ์ เกตุจ้อย และ อชิตพล ศศิธรานุวัฒน์, “เทคโนโลยีพลังงานลม”, วิทยาลัยพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยนเรศวร, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์, 1 มิถุนายน 2547.
- [15] ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน, โครงการก่อสร้างอพาร์ทเมนท์สูง 4 ชั้น ขอยุทธศาสตร์ร่วมใจ 2 ตำบลลาดกระบัง อำเภอลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร [ออนไลน์] แหล่งที่มา http://services.dpt.go.th/service_4/other/soil2551/download.asp?pjcode=10110103
- [16] Spiritstudio, **รูปแบบเทคโนโลยีกังหันลม** [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://spiritstu.wordpress.com/%E0%B8%A3%E0%B8%B9%E0%B8%9B%E0%B9%81%E0%B8%9A%E0%B8%9A%E0%B9%80%E0%B8%97%E0%B8%84%E0%B9%82%E0%B8%99%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%A2%E0%B8%B5%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%AB%E0%B8%B1%E0%B8%99%E0%B8%A5/>
- [17] Airfoil Tools, **Airfoil Tools** [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://airfoiltools.com/>
- [18] ไทยวินด์มิลล์, **ใบกังหันลม** [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://thaiwindmill.com/?p=2169>
- [19] ARE101, **Alternative Renewable Energy** [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.are101.org/forum/index.php>
- [20] Hopeful, **H8-10K (10KW Horizontal-Axis Wind Turbine)** [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.hopefulenergy.com/product/h8-10k-10kw-wt.html>
- [21] นายฐานันตร์ หวังมุขิตากุล, นายณรงค์ฤทธิ์ อิทธิสารณชัย และ นายณัฐนันท์ กรุงแก้ว, “กังหันลมนานาเกลือ” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
- [22] สำนักวิชาการพลังงานภาค 1 กระทรวงพลังงาน, **องค์ความรู้กังหันลม** [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.region1.energy.go.th/0gkramrukanghanrom/wind.html>
- [23] ธนิตนนท์ แก้วสง่า, ชีรพงศ์ กำลิ่งกล้า, ชีรพงษ์ โพธิ์วัฒนกุล และ ภิรมศ วิจิตร, “ศูนย์พลังงานทดแทนเพื่ออนาคต: การออกแบบและการบริหารจัดการระบบผลิตไฟฟ้า,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555.
- [24] ความรู้เรื่อง ดิน สำหรับเยาวชน, **ดิน** [ออนไลน์] แหล่งที่มา http://osl101.ldd.go.th/easysoils/s_type.htm
- [25] Dr. Sukangkana Lee, **การทดสอบแรงดัดโค้ง** [ออนไลน์] แหล่งที่มา <https://www.facebook.com/l.php?u=http%3A%2F%2Fweb.eng.ubu.ac.th%2F~ie%2Fmetrial%2F1302423%2F%25E0%25B8%259A%25E0%25B8%2597%25E0%25B8%2597%25E0%25B8%25B5%25E0%25B9%2588%25208%2520Bending.ppt&h=PAQHltBr9>
- [26] TWN Energy, **Does tower type really matter** [ออนไลน์] แหล่งที่มา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<http://twenergy.com/2013/02/does-tower-type-really-matter/>

[27] ปัมอุตสาหกรรม (Industrial Pumps by TSY), เรย์โนลด์นัมเบอร์ [ออนไลน์] แหล่งที่มา

<http://industrialpumps-tsy.blogspot.com/2013/08/reynolds-number.html>

[28] Wikipedia, Reynolds number [ออนไลน์] แหล่งที่มา

http://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds_number

[29] Robert E. Wilson, Peter B.S. Lissaman, Stel N. Walker, AERODYNAMIC

PERFORMANCE OF WIND TURBINE

[30] กฤษดา จันทร์แดง, กวีวุฒิ ตั้งพิบูลธรรม และ อภิชาติ กฤตยกุลเจริญ, “การออกแบบกังหันลม,” **ปริญญาวิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**, 2545.

[31] Aeolos, 10kW Wind Turbine [ออนไลน์] แหล่งที่มา

<http://www.windturbinestar.com/10kwh-aeolos-wind-turbine.html>

[32] NREL, Wind Turbine Airfoils [ออนไลน์] แหล่งที่มา

<http://wind.nrel.gov/airfoils/>

[33] ไพบูลย์ ปัญญาคะโป, “การออกแบบอาคาร”, กรุงเทพฯ, ไลบรารี นาย, 2535.

[34] winddesign5, มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร [ออนไลน์] แหล่งที่มา

<http://winddesign5.blogspot.com/>

[35] Meadinfo, SS400 Structural Steel [ออนไลน์] แหล่งที่มา

<http://www.meadinfo.org/2010/09/jis-g-3101-ss400-steel-properties-spec.html>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

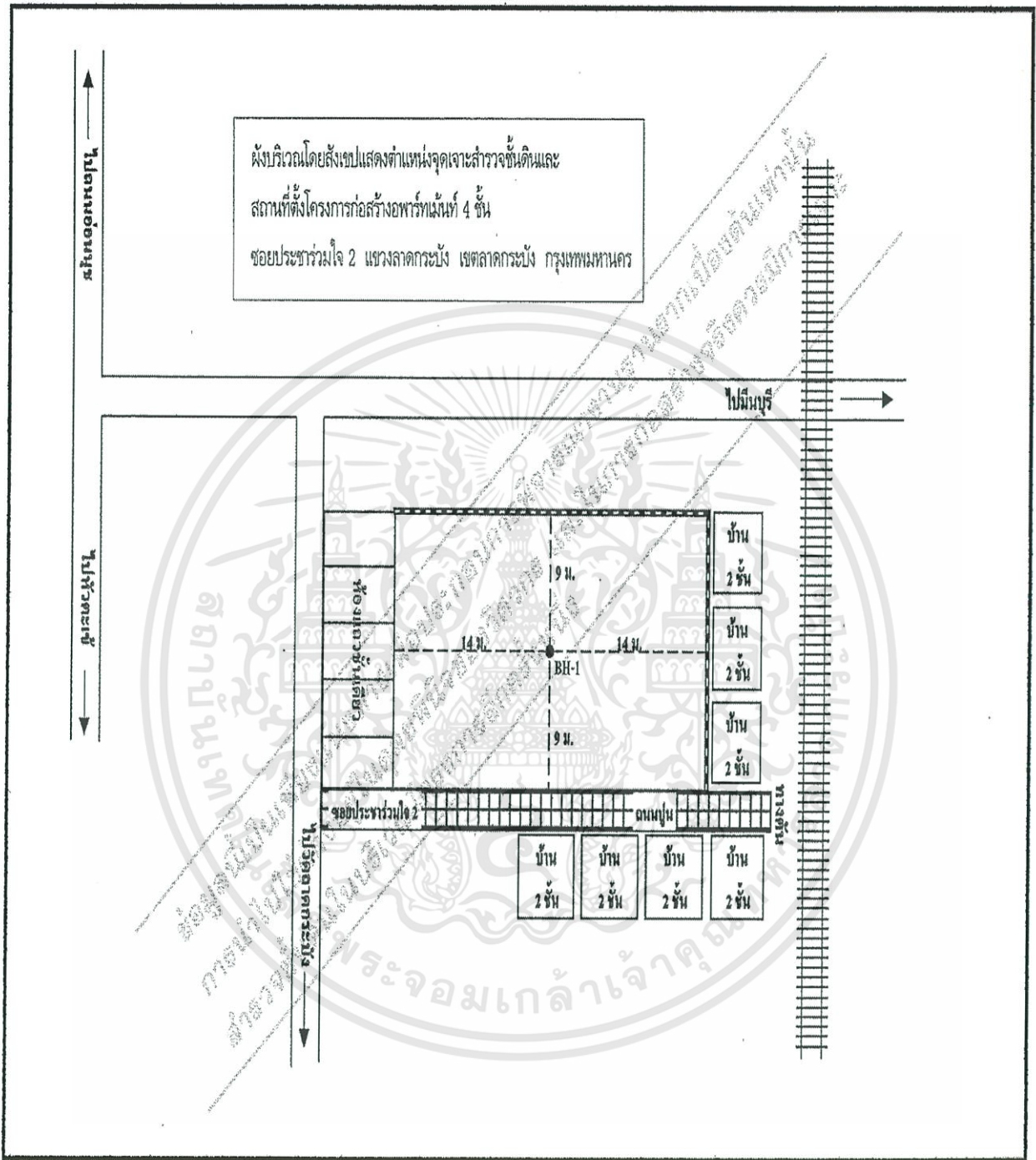


ภาคผนวก ก

ข้อมูลดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

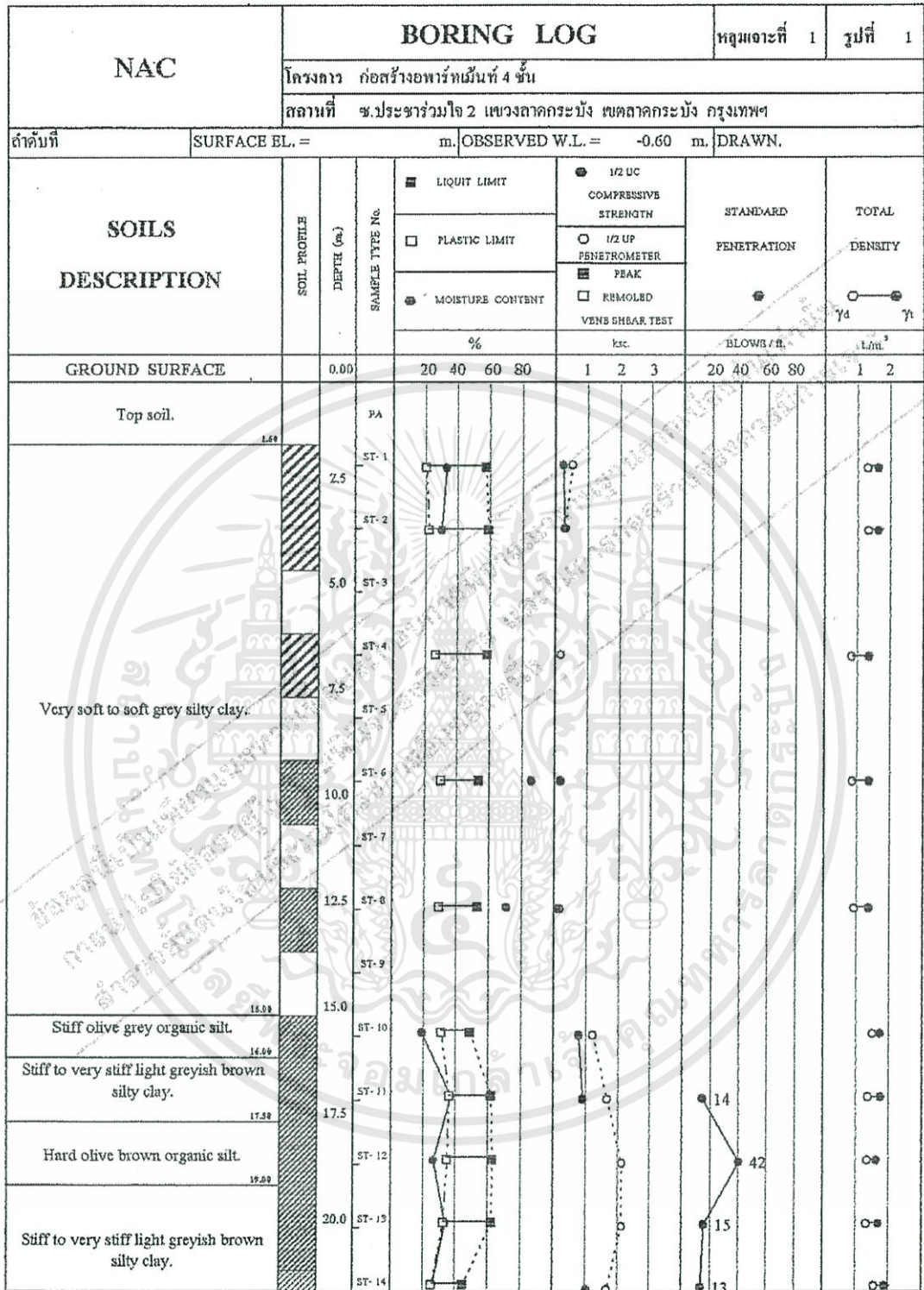
โครงการก่อสร้างอพาร์ทเมนท์สูง 4 ชั้น ซอยประชาร่วมใจ 2 ตำบลลาดกระบัง อำเภอลาดกระบัง
จังหวัดกรุงเทพมหานคร



รูปที่ ก-1 แผนที่ตั้งโครงการ-1

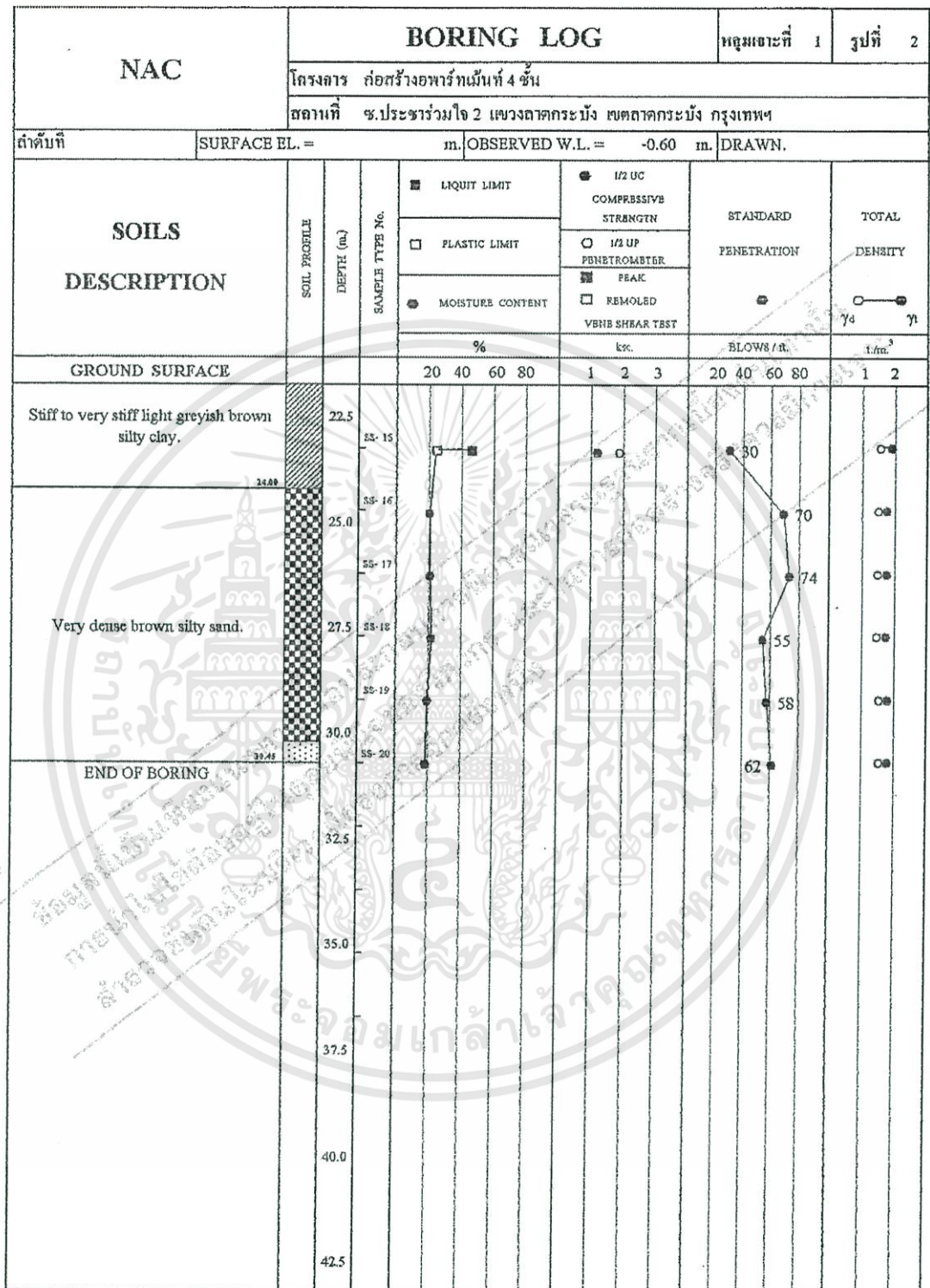
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 Boring Log BH-1.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 Boring Log BH-1.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 Summary of Result BH-1.1

โครงการ		ก่อสร้างอาคารพื้นที่ 4 ชั้น		NAC										ผู้ทดสอบ					
สถานที่		ข.ประจวบ 2 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร		SUMMARY OF RESULT										วิศวกร					
หลุมเจาะที่		BH-1		ระดับน้ำใต้ดิน -0.60 เมตรจากผิวดิน										วันที่ทดสอบ 20-ธ.ค-05					
ระดับปากหลุม		เมตร												วันที่					
DEPTH (ม.)	SAMPLE TYPE	GROUP SYMBOL	ATTERBERG'S LIMITS (%)			MC %	UC ksc.	UP ksc.	UNI WEIGHT t/m ³		SPT blows/ft.	Sp.Gr.	VANE SHEAR STRENGTH ksc.			DIRECT SHEAR TEST		GRAIN SIZE (% Finer)	
			LL	PL	PL				γ _t	γ _d			PS	RS	ST	C	φ	No. 4	No. 200
0.00	1.50	PA																	
1.50	2.00	ST-1	CH	59.25	21.19	38.06	33.74	0.38	1.00	1.73	1.29								
3.00	3.50	ST-2	CH	60.15	23.02	37.13	30.82	0.46	0.50	1.74	1.33								
4.50	5.00	ST-3																	
6.00	6.50	ST-4	CH	59.70	27.40	32.30	102.76	-	0.25	1.35	0.67								
7.50	8.00	ST-5																	
9.00	9.50	ST-6	OH-MH	55.07	31.18	23.89	87.01	0.30	0.25	1.39	0.74								
10.50	11.00	ST-7																	
12.00	12.50	ST-8	OH-MH	54.52	30.43	24.09	72.30	0.11	0.25	1.39	0.81								
13.50	14.00	ST-9																	
15.00	15.50	ST-10	OH-MH	50.25	32.16	18.09	19.71	1.55	2.50	1.87	1.56								
16.50	17.00	ST-11	OH-MH	63.25	37.26	25.99	38.24	1.83	3.50	1.90	1.37	14							
18.00	18.50	ST-12	OH-MH	64.28	35.98	28.30	27.37	-	4.50	1.74	1.37	42							
19.50	20.00	ST-13	OH-MH	64.02	34.09	29.93	34.61	-	4.50	1.80	1.34	15							
21.00	21.50	ST-14	CL	46.05	26.63	19.42	26.76	2.14	3.50	2.07	1.63	13							
22.50	22.95	SS-15	CL	48.50	25.91	22.59	24.40	2.53	4.00	2.07	1.66	30							
24.00	24.45	SS-16	SM	-	NP	-	20.45	-	-	1.90	1.58	70					100.00	37.75	
25.50	25.95	SS-17	SM	-	NP	-	20.94	-	-	1.89	1.56	74					100.00	39.16	
27.00	27.45	SS-18	SM	-	NP	-	22.17	-	-	1.88	1.54	55					100.00	14.96	
28.50	28.95	SS-19	SM	-	NP	-	19.69	-	-	1.95	1.63	58					100.00	24.69	
30.00	30.45	SS-20	SW-SM	-	NP	-	18.73	-	-	1.95	1.64	62					100.00	7.36	
END OF BORING																			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-4 สรุปผลโครงการ-1

CALCULATION OF PILE LOAD CAPACITY							ตารางที่ 4.1	
PROJECT :		โครงการก่อสร้างอพาร์ตเมนต์สูง 4 ชั้น						
LOCATION :		ช.ประชาชนร่วมใจ 2 แขวง/เขตลาดกระบัง กทม.				BORING No. : BH1		
		F.S.= 2.00			F.S.= 2.50			
TYPE	Bored pile	Diameter	Diameter	Diameter	Diameter	Diameter	Diameter	
PILE SIZE , m.		0.35	0.50	0.60	0.35	0.50	0.60	
AREA , sq.m.		0.0963	0.1964	0.2829	0.0963	0.1964	0.2829	
PERIMETER , m.		1.10	1.57	1.89	1.10	1.57	1.89	
1. SKIN FRICTION (tons/m.)								
PILE LENGTH	22.00 m.	54.30	54.30	54.30	54.30	54.30	54.30	
PILE LENGTH	- m.	-	-	-	-	-	-	
PILE LENGTH	m.							
PILE LENGTH	m.							
2. END BEARING (tons/m ²)								
PILE LENGTH	22.00 m.	117.00	117.00	117.00	117.00	117.00	117.00	
PILE LENGTH	- m.	-	-	-	-	-	-	
PILE LENGTH	m.							
PILE LENGTH	m.							
3. ULTIMATE LOAD (tons/pile)								
PILE LENGTH	22.00 m.	70.99	108.31	135.49	70.99	108.31	135.49	
PILE LENGTH	- m.	-	-	-	-	-	-	
PILE LENGTH	m.							
PILE LENGTH	m.							
4. ALLOW. LOAD (tons/pile)								
PILE LENGTH	22.00 m.	35.50	54.16	67.74	28.40	43.32	54.20	
PILE LENGTH	- m.	-	-	-	-	-	-	
PILE LENGTH	m.							
PILE LENGTH	m.							
REMARK :	PILE TOP	0.00 m. (BELOW EXISTING GROUND)						
ต้องให้ความระมัดระวังเรื่อง	GWT.	0.60 m. (BELOW EXISTING GROUND)						
เสถียรภาพของหลุมและเลือก	F.S.	2.0 and 2.50 (SAFETY FACTOR)						
ระบบการเจาะให้เหมาะสม	*							

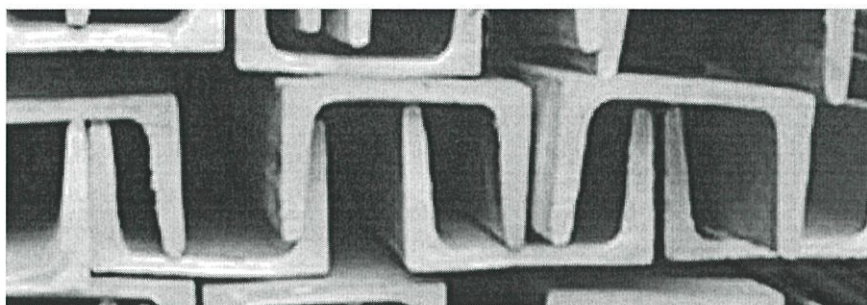
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

ข้อมูลอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-1 Specification ของ SS400

JIS G 3101 SS400 is one of the most commonly used hot rolled general structural steel. Supplied as plates, sheets, flats, bars, sections etc. They are cheap, excelling in weldability & machinability.

SS400 Mechanical Properties

Density (kg/m³) 7860 Young's Modulus (GPa) 190-210 Tensile Strength (MPa) 400 – 510 MPa Yield Strength (MPa) 205-245 MPa Poisson's ratio 0.26

SS400 Hardness

Brinell Hardness (HB) 160

SS400 Equivalents

- DIN Equivalents for JIS SS400
17100 St 44-2
- ASTM Equivalents for JIS SS400
ASTM A36, ASTM A283 Grade D
- EN Equivalents for JIS SS400
EN S275/ BS 43A

SS400 Chemical Composition

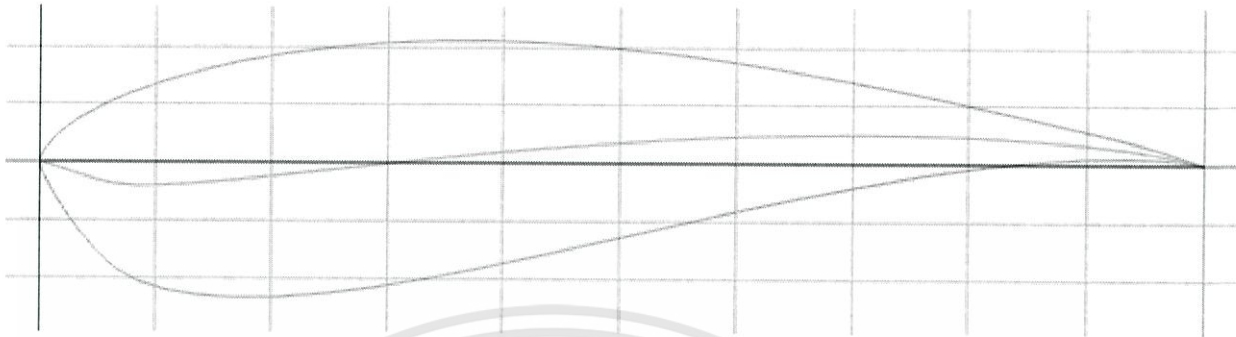
As per JIS G 3101, Carbon (C), Silicon (Si) and Manganese (Mn) content are not controlled. Phosphorus (P) 0.05% Max and Sulphur (S) 0.05% Max have to controlled below these levels.

Melting Point

Melting point of SS400 is 1430 Degree Celsius

ข้อมูล DAT file ของ Airfoil ที่นำมาใช้ในการศึกษา

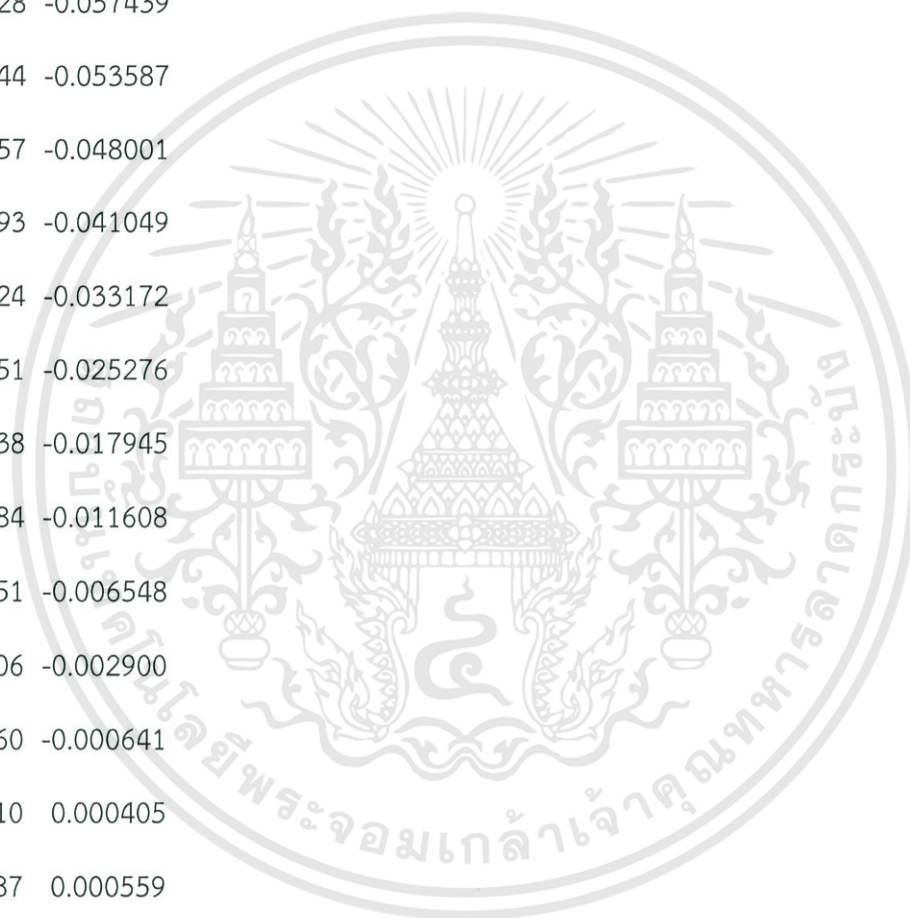
NREL's s820



รูปที่ ข-2 ข้อมูล DAT file ของ Airfoil ที่นำมาใช้ในการศึกษา ของ NREL's s820

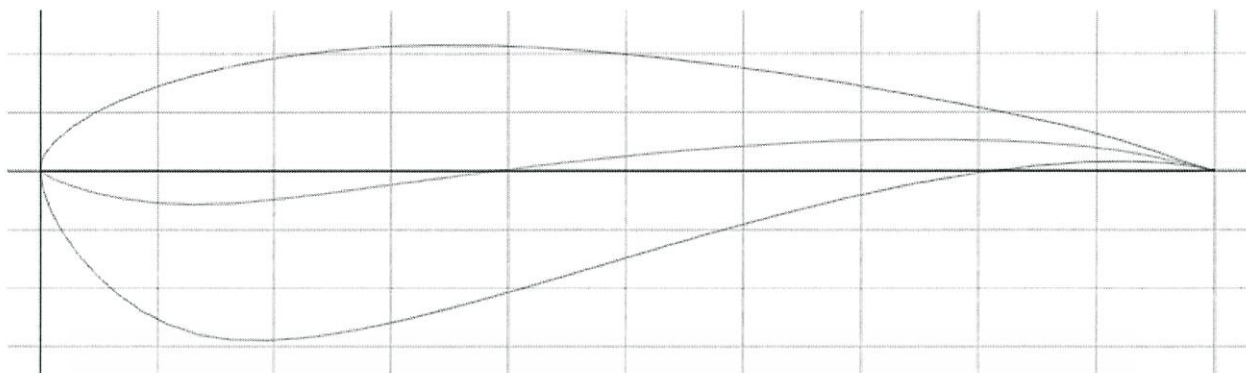
x/c	y/c				
		0.499848	0.100066	-0.000127	0.001407
1.000000	0.000000	0.452681	0.101025	0.000109	0.001293
0.996214	0.000505	0.405512	0.100437	0.000008	-0.000335
0.985214	0.002540	0.358861	0.098462	0.000091	-0.001066
0.967892	0.006537	0.313252	0.095223	0.000286	-0.001719
0.945228	0.012390	0.269179	0.090832	0.000646	-0.002321
0.917963	0.019640	0.227135	0.085402	0.001162	-0.002929
0.886485	0.027777	0.187577	0.079047	0.002460	-0.004090
0.850998	0.036689	0.150957	0.071882	0.002568	-0.004173
0.812173	0.046401	0.117679	0.064007	0.012145	-0.009433
0.770798	0.056654	0.088084	0.055543	0.027631	-0.015109
0.727639	0.067030	0.062503	0.046603	0.048455	-0.020953
0.683412	0.076946	0.041136	0.037327	0.074139	-0.026826
0.638577	0.085468	0.024243	0.027843	0.104315	-0.032597
0.592824	0.092241	0.011711	0.018325	0.138524	-0.038136
0.546545	0.097201	0.003650	0.009309	0.176342	-0.043316

0.217272	-0.048005
0.260834	-0.052072
0.306489	-0.055382
0.353714	-0.057789
0.401939	-0.059126
0.450609	-0.059167
0.499228	-0.057439
0.547944	-0.053587
0.596957	-0.048001
0.645793	-0.041049
0.694524	-0.033172
0.742551	-0.025276
0.789038	-0.017945
0.833084	-0.011608
0.873751	-0.006548
0.910106	-0.002900
0.941260	-0.000641
0.966410	0.000405
0.984887	0.000559
0.996194	0.000246
1.000000	0.000000



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NREL's s821



รูปที่ ข-3 ข้อมูล DAT file ของ Airfoil ที่นำมาใช้ในการศึกษา ของ NREL's s821

x/c	y/c				
		0.431988	0.104359	0.000364	0.005418
1.000000	0.000000	0.382867	0.106477	-0.000040	0.001941
0.996211	0.000979	0.335265	0.106891	-0.000007	-0.000841
0.985369	0.004273	0.289592	0.105457	0.002499	-0.016695
0.968663	0.009953	0.246159	0.101964	0.008996	-0.034096
0.947175	0.017397	0.204936	0.096534	0.018943	-0.052456
0.921468	0.025654	0.166314	0.089543	0.031877	-0.070873
0.891519	0.033883	0.130747	0.081197	0.047652	-0.088744
0.857009	0.041987	0.098642	0.071677	0.065953	-0.105342
0.818334	0.050225	0.070407	0.061141	0.086614	-0.119982
0.776090	0.058556	0.046352	0.049758	0.109606	-0.131602
0.730890	0.066851	0.026874	0.037691	0.135542	-0.139985
0.683359	0.074932	0.012130	0.025117	0.164146	-0.144525
0.634121	0.082589	0.004030	0.014909	0.196445	-0.145040
0.583790	0.089594	0.002683	0.012510	0.232413	-0.142078
0.532956	0.095710	0.002318	0.011776	0.271925	-0.135855
0.482180	0.100704	0.001068	0.008667	0.314875	-0.126633

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.361129 -0.114780

0.410491 -0.100789

0.462665 -0.085271

0.517218 -0.068945

0.573551 -0.052597

0.630881 -0.037031

0.688228 -0.023015

0.744435 -0.011208

0.798205 -0.002094

0.848154 0.004073

0.892896 0.007306

0.931134 0.007903

0.961748 0.006400

0.983628 0.003499

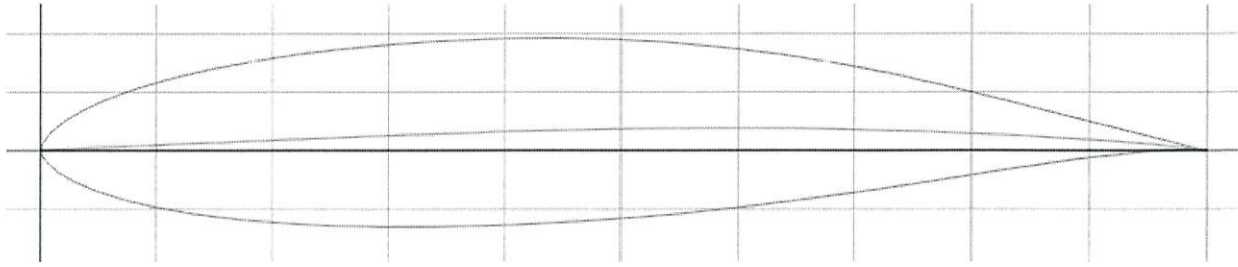
0.996079 0.000922

1.000000 0.000000



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NREL's s822



รูปที่ ข-4 ข้อมูล DAT file ของ Airfoil ที่นำมาใช้ในการศึกษา ของ NREL's s822

x/c	y/c	0.382867	0.106477	0.000007	-0.000841
1.000000	0.000000	0.335265	0.106891	0.002499	-0.016695
0.996211	0.000979	0.289592	0.105457	-0.008996	-0.034096
0.985369	0.004273	0.246159	0.101964	0.018943	-0.052456
0.968663	0.009953	0.204936	0.096534	0.031877	-0.070873
0.947175	0.017397	0.166314	0.089543	0.047652	-0.088744
0.921468	0.025654	0.130747	0.081197	0.065953	-0.105342
0.891519	0.033883	0.098642	0.071677	0.086614	-0.119982
0.857009	0.041987	0.070407	0.061141	0.109606	-0.131602
0.818334	0.050225	0.046352	0.049758	0.135542	-0.139985
0.776090	0.058556	0.026874	0.037691	0.164146	-0.144525
0.730890	0.066851	0.012130	0.025117	0.196445	-0.145040
0.683359	0.074932	0.004030	0.014909	0.232413	-0.142078
0.634121	0.082589	0.002683	0.012510	0.271925	-0.135855
0.583790	0.089594	0.002318	0.011776	0.314875	-0.126633
0.532956	0.095710	0.001068	0.008667	0.361129	-0.114780
0.482180	0.100704	0.000364	0.005418	0.410491	-0.100789
0.431988	0.104359	0.000040	0.001941		

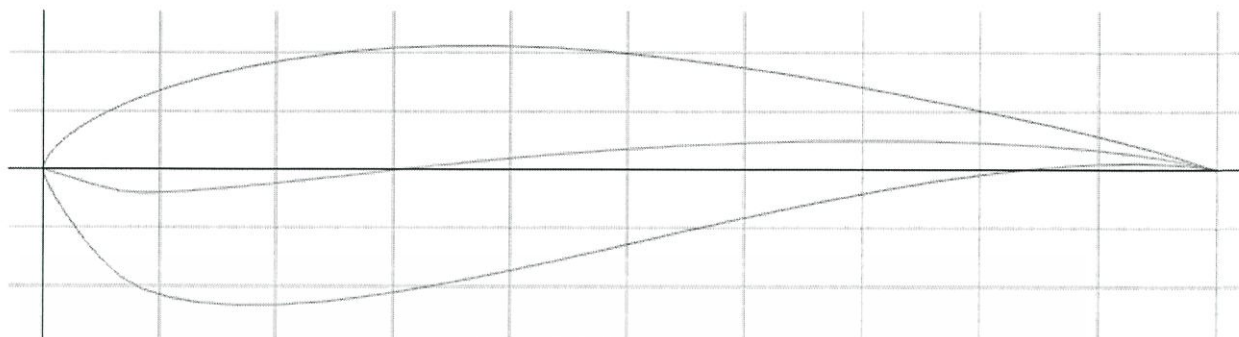
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.462665	-0.085271
0.517218	-0.068945
0.573551	-0.052597
0.630881	-0.037031
0.688228	-0.023015
0.744435	-0.011208
0.798205	-0.002094
0.848154	0.004073
0.892896	0.007306
0.931134	0.007903
0.961748	0.006400
0.983628	0.003499
0.996079	0.000922
1.000000	0.000000



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NREL's s823



รูปที่ ข-5 ข้อมูล DAT file ของ Airfoil ที่นำมาใช้ในการศึกษา ของ NREL's s823

x/c	y/c				
		0.487145	0.100825	0.000533	0.003322
1.000000	0.000000	0.438182	0.104394	0.000235	0.002160
0.996182	0.001021	0.390202	0.106236	0.000026	0.000734
0.985647	0.004487	0.343554	0.106115	0.000174	-0.001931
0.969834	0.009935	0.298349	0.104071	0.000800	-0.004837
0.949208	0.016186	0.255030	0.100219	0.002374	-0.009387
0.923311	0.022860	0.213826	0.094667	0.010193	-0.023971
0.892433	0.030245	0.175150	0.087661	0.021425	-0.041404
0.857144	0.038305	0.139404	0.079378	0.034330	-0.059382
0.818037	0.046896	0.106993	0.069983	0.049121	-0.076692
0.775723	0.055810	0.078238	0.059647	0.065425	-0.091707
0.730810	0.064793	0.053489	0.048562	0.084347	-0.102507
0.683890	0.073566	0.032973	0.036935	0.108058	-0.109780
0.635537	0.081835	0.017013	0.025059	0.136074	-0.114432
0.586291	0.089312	0.005871	0.013252	0.168058	-0.116517
0.536666	0.095725	0.001538	0.006021	0.203782	-0.116043

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.243045	-0.113061
0.285642	-0.107692
0.331343	-0.100136
0.379872	-0.090684
0.430894	-0.079712
0.483993	-0.067673
0.538656	-0.055088
0.594258	-0.042513
0.650057	-0.030520
0.705190	-0.019649
0.758682	-0.010377
0.809471	-0.003071
0.856439	0.002045
0.898460	0.004922
0.934449	0.005687
0.963294	0.004594
0.983900	0.002540
0.996032	0.000732
1.000000	0.000000



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 Specification ของกังหันลมแนวนอน 10kW เทคโนโลยีที่ 1 [20]

Technical Specifications	Off-grid and on-grid
Model	H8-10K
Rated Voltage	240Vdc
Rated Current	42A
Rated Power	10KW
Rotor diameter	8.0m
Blade material	Advanced composite materials
Start-up wind speed	2.5 m/s
Rotation direction (Along wind)	Clockwise
Rated wind speed	10 m/s
Cut-out wind speed	16 m/s
Survival wind speed	45 m/s
Type	Upwind
Angle of elevation	6°
Rated rotating speed	180 rpm
No. of blades	3
Tower height	12 m
Cable length	20 m
Annual yield	24000 kWh
Yaw mechanism	Hydraulic
Yaw mode	Manual/Auto
Efficiency	0.85
Net weight	IT
Protection mode	Yaw/Hydraulic brake/Unloading

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 Specification ของกังหันลมแนวนอน 10kW เทคโนโลยีที่ 2 [20]

Technical Specifications	Off-grid and on-grid
Model	Aeolos-H 10kw
Rated Power	10KW
Maximum Output Power	13kW
Generator	Direct-Drive Permanent Magnet Generator
Rotor diameter	8.0m
Blade material	Glass Fiber
Start-up wind speed	2.5 m/s
Rated wind speed	10 m/s
Survival wind speed	50 m/s
Design Lifetime	20 years
Rated rotating speed	180 rpm
No. of blades	3
Controller	PLC with Touch Screen
Generator Voltage On-Grid	450 VDC
Generator Voltage Off-Grid	350 VDC
Efficiency	0.95
Protection mode	Yaw Control & Electronic Brake
Back-up Power	24V UPS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม XFOIL6.99 ของ Airfoil s822

XFOIL Version 6.96

Calculated polar for: NREL's S822 Airfoil

1 1 Reynolds number fixed Mach number fixed

xtrf = 1.000 (top) 1.000 (bottom)

Mach = 0.000 Re = 0.050 e 6 Ncrit = 9.000

ตารางที่ ค-1 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม xfoil ในการคำนวณ Airfoil S822 ที่ Reynolds Number=50,000

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr	
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
-11.25	-0.3263	0.12745	0.12094	-0.027	1	0.3459	
-11	-0.7535	0.07613	0.06968	-0.0622	1	0.1349	
-10.75	-0.7839	0.07366	0.0672	-0.0579	1	0.1342	
-10.5	-0.8154	0.07132	0.06483	-0.0529	1	0.1335	
-10.25	-0.8458	0.06853	0.06193	-0.0482	1	0.1331	
-10	-0.8737	0.06543	0.05866	-0.0437	1	0.133	
-9.75	-0.8987	0.06221	0.05517	-0.0391	1	0.1335	
-9.5	-0.9198	0.05885	0.05144	-0.0348	1	0.1344	
-9.25	-0.9208	0.05588	0.04837	-0.032	1	0.1382	
-9	-0.9185	0.05371	0.04608	-0.0292	1	0.1443	
-8.75	-0.9301	0.05056	0.04233	-0.0253	1	0.1489	
-8.5	-0.9178	0.04862	0.04051	-0.0235	1	0.1578	
-8.25	-0.9178	0.04572	0.03709	-0.0205	1	0.165	
-8	-0.9079	0.04398	0.03522	-0.0183	1	0.1772	
-7.75	-0.8956	0.04216	0.03336	-0.0164	1	0.1901	
-7.5	-0.8844	0.04046	0.03149	-0.0143	1	0.2057	
-7.25	-0.8723	0.03881	0.02968	-0.0123	1	0.223	
-7	-0.857	0.03763	0.02868	-0.0105	1	0.2431	
-6.75	-0.8439	0.03626	0.02718	-0.0086	1	0.266	
-6.5	-0.8284	0.03527	0.02637	-0.0068	1	0.2908	
-6.25	-0.8136	0.03427	0.02544	-0.0048	1	0.3184	
-6	-0.7984	0.0334	0.02466	-0.0029	1	0.3482	
-5.75	-0.783	0.03265	0.02398	-0.0009	1	0.3801	
-5.5	-0.7676	0.03198	0.02338	0.0012	1	0.4147	
-5.25	-0.7519	0.03152	0.02307	0.0035	1	0.4497	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-5	-0.736	0.03128	0.02301	0.0061	1	0.4848	
-4.75	-0.7208	0.03113	0.02292	0.0087	1	0.5221	
-4.5	-0.7055	0.03139	0.02333	0.0119	1	0.5556	
-4.25	-0.6907	0.03181	0.0238	0.0154	1	0.5885	
-4	-0.6765	0.03229	0.0243	0.019	1	0.6206	
-3.75	-0.663	0.03283	0.02484	0.0229	1	0.6514	
-3.5	-0.6498	0.0334	0.02539	0.0269	1	0.6806	
-3.25	-0.6371	0.03401	0.02595	0.0311	1	0.7089	
-3	-0.6243	0.03458	0.02643	0.0352	1	0.737	
-2.75	-0.6115	0.0351	0.02686	0.0391	1	0.7652	
-2.5	-0.5981	0.03556	0.02722	0.0428	1	0.7936	
-2.25	-0.5786	0.0362	0.02775	0.0456	1	0.8205	
-2	-0.552	0.03687	0.02825	0.0469	1	0.8483	
-1.75	-0.5113	0.03774	0.02893	0.0451	1	0.8759	
-1.5	-0.4519	0.03889	0.02983	0.0392	1	0.9024	
-1.25	-0.3755	0.04018	0.03084	0.0294	1	0.9276	
-1	-0.2888	0.04133	0.03172	0.0169	1	0.9497	
-0.75	-0.2124	0.04212	0.0323	0.0056	1	0.9726	
-0.5	-0.1312	0.0429	0.03288	-0.0074	1	0.9952	
-0.25	-0.114	0.04267	0.03255	-0.0087	1	1	
0	-0.1155	0.04213	0.03195	-0.0064	1	1	
0.25	-0.1168	0.04162	0.03137	-0.004	1	1	
0.5	-0.1181	0.04113	0.03084	-0.0015	1	1	
0.75	-0.1194	0.04066	0.03032	0.001	1	1	
1	-0.1207	0.0402	0.02981	0.0037	1	1	
1.25	-0.1219	0.03975	0.02932	0.0064	1	1	
1.5	-0.123	0.03931	0.02884	0.0091	1	1	
1.75	-0.1237	0.0389	0.02839	0.0118	1	1	
2	-0.1234	0.03855	0.028	0.0144	1	1	
2.25	-0.1216	0.03829	0.0277	0.0167	1	1	
2.5	-0.1174	0.03819	0.02755	0.0187	1	1	
2.75	-0.1095	0.03832	0.02763	0.02	1	1	
3	-0.0986	0.03866	0.02794	0.0207	1	1	
3.25	-0.0856	0.03919	0.02843	0.0211	1	1	
3.5	-0.0715	0.03986	0.02906	0.0212	1	1	
3.75	-0.0566	0.04064	0.02982	0.0211	1	1	
4	-0.0414	0.04153	0.0307	0.0209	1	1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.25	-0.026	0.0425	0.03167	0.0206	1	1	
4.5	-0.0107	0.04357	0.03274	0.0203	1	1	
4.75	0.0223	0.04603	0.03523	0.0165	0.9923	1	
5.25	0.1074	0.05232	0.04163	0.0054	0.9554	1	
5.5	0.1371	0.05393	0.04334	0.0024	0.9309	1	
5.75	0.1745	0.05622	0.04572	-0.0015	0.9022	1	
6	0.2961	0.05721	0.04691	-0.0119	0.789	1	
6.25	0.345	0.0582	0.04802	-0.015	0.7636	1	
6.5	0.3639	0.0588	0.04872	-0.0146	0.7401	1	
6.75	0.406	0.05942	0.04949	-0.0165	0.7179	1	
7	0.4337	0.0599	0.05011	-0.0168	0.6951	1	
7.25	0.4719	0.06013	0.05052	-0.0178	0.6735	1	
7.5	0.5043	0.06021	0.05077	-0.018	0.6508	1	
7.75	0.5413	0.05988	0.05063	-0.0181	0.6284	1	
8	0.5824	0.05894	0.04993	-0.0181	0.6055	1	
8.25	0.6157	0.05806	0.04926	-0.0172	0.5814	1	
8.5	0.6846	0.05387	0.04544	-0.017	0.5595	1	
8.75	0.7292	0.05059	0.04246	-0.015	0.5334	1	
9	0.8629	0.03774	0.03014	-0.0143	0.4983	1	
9.25	0.9283	0.03358	0.02564	-0.013	0.4235	1	
9.5	0.9486	0.03429	0.02583	-0.0105	0.3609	1	
9.75	0.9657	0.03578	0.02688	-0.0084	0.3102	1	
10	0.9834	0.03754	0.02832	-0.0069	0.2698	1	
10.25	1.0054	0.03944	0.02997	-0.0061	0.2358	1	
10.5	1.0291	0.04161	0.03206	-0.0056	0.2085	1	
10.75	1.0568	0.04397	0.0343	-0.0058	0.1854	1	
11	1.0762	0.04654	0.03699	-0.005	0.1691	1	
11.25	1.0936	0.04916	0.03969	-0.0041	0.1557	1	
11.5	1.1182	0.05228	0.04286	-0.0042	0.144	1	
11.75	1.1092	0.05481	0.04581	-0.0002	0.139	1	
12	1.1322	0.05827	0.04927	-0.0004	0.1303	1	
12.25	1.1156	0.06124	0.05266	0.0038	0.1285	1	
12.5	1.0973	0.06451	0.05629	0.0075	0.1269	1	
12.75	1.0771	0.06803	0.06012	0.0107	0.1256	1	
13	1.0537	0.07196	0.06433	0.0132	0.1248	1	
13.25	1.0252	0.07658	0.06922	0.0151	0.1252	1	
13.5	0.9921	0.08201	0.07488	0.016	0.1263	1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13.75	0.9587	0.08827	0.08133	0.0157	0.128	1	
14	0.9256	0.09536	0.08855	0.0141	0.1295	1	
14.25	0.8966	0.10316	0.09642	0.0116	0.1307	1	

XFOIL Version 6.96

Calculated polar for: NREL's S822 Airfoil

1 1 Reynolds number fixed Mach number fixed

xtrf = 1.000 (top) 1.000 (bottom)

Mach = 0.000 Re = 0.100 e 6 Ncrit = 9.000

ตารางที่ ค-2 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม xfoil ในการคำนวณ Airfoil S822 ที่ Reynolds Number=100,000

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-13.5	-0.6989	0.07336	0.06791	-0.0884	1	0.0556
-13.25	-0.7245	0.06903	0.06352	-0.088	1	0.0552
-13	-0.7554	0.06583	0.06023	-0.0862	1	0.0552
-12.75	-0.7839	0.0634	0.05774	-0.0829	1	0.055
-12.5	-0.81	0.06137	0.05564	-0.079	1	0.0546
-12.25	-0.8393	0.05953	0.05371	-0.0745	1	0.0544
-12	-0.8699	0.05812	0.05219	-0.0693	1	0.0546
-11.75	-0.8993	0.05676	0.0507	-0.0638	1	0.0546
-11.5	-0.927	0.05538	0.0492	-0.0578	1	0.0545
-11.25	-0.9516	0.05391	0.04755	-0.0519	1	0.0546
-11	-0.9722	0.05226	0.04565	-0.0466	1	0.0551
-10.75	-0.9895	0.05066	0.04372	-0.0415	1	0.0558
-10.5	-0.9905	0.04721	0.04024	-0.0389	1	0.0579
-10.25	-0.9898	0.04545	0.03838	-0.036	1	0.0598
-10	-0.9893	0.04383	0.0366	-0.0328	1	0.0626
-9.75	-0.9904	0.04227	0.0347	-0.0293	1	0.0661
-9.5	-0.986	0.03998	0.03217	-0.0266	1	0.0694
-9.25	-0.9761	0.03858	0.03077	-0.0245	1	0.0737
-9	-0.969	0.03726	0.02915	-0.0219	1	0.0788
-8.75	-0.9575	0.03556	0.02745	-0.0201	1	0.0846
-8.5	-0.9469	0.03444	0.02616	-0.0179	1	0.0914
-8.25	-0.9343	0.03307	0.02482	-0.0161	1	0.0988

-8	-0.922	0.03198	0.02348	-0.014	1	0.1078
-7.75	-0.9086	0.03089	0.0225	-0.0124	1	0.1183
-7.5	0.8951	0.02982	0.02147	-0.0107	1	0.13
-7.25	-0.8665	0.02901	0.02052	-0.0119	0.9957	0.1493
-7	-0.8402	0.02819	0.0199	-0.0128	0.9919	0.17
-6.75	-0.8177	0.02753	0.01922	-0.0128	0.9884	0.1937
-6.5	-0.7919	0.02698	0.01879	-0.0135	0.9845	0.2207
-6.25	-0.7655	0.02653	0.01844	-0.0143	0.9805	0.2509
-6	-0.7438	0.02603	0.01802	-0.0141	0.9762	0.281
-5.75	-0.7196	0.02567	0.01781	-0.0143	0.9727	0.3137
-5.5	-0.6907	0.02556	0.01785	-0.0153	0.9694	0.3508
-5.25	-0.672	0.02519	0.01758	-0.0143	0.9652	0.3841
-5	-0.6492	0.02498	0.01751	-0.014	0.961	0.4201
-4.75	-0.6225	0.02498	0.01762	-0.0144	0.9575	0.4594
-4.5	-0.5965	0.02511	0.01791	-0.0144	0.9544	0.4977
-4.25	-0.5798	0.02503	0.01795	-0.0127	0.9504	0.5315
-4	-0.557	0.02523	0.01822	-0.012	0.9463	0.5678
-3.75	-0.5299	0.02571	0.01877	-0.0118	0.9429	0.6016
-3.5	-0.5063	0.0262	0.01929	-0.0111	0.9396	0.632
-3.25	-0.4911	0.02642	0.0195	-0.0088	0.9358	0.6588
-3	-0.4704	0.02689	0.02001	-0.0073	0.9319	0.6829
-2.75	-0.4473	0.0275	0.0206	-0.0063	0.929	0.7066
-2.5	-0.4229	0.02825	0.02134	-0.0053	0.9252	0.728
-2.25	-0.4113	0.02852	0.02158	-0.0024	0.9213	0.7484
-2	-0.3955	0.02907	0.02212	0.0001	0.9182	0.7658
-1.75	-0.3733	0.02977	0.02278	0.0016	0.9143	0.7836
-1.5	-0.3519	0.03044	0.02341	0.0031	0.9101	0.8011
-1.25	-0.3433	0.0307	0.02365	0.0065	0.9066	0.8181
-1	-0.3279	0.03108	0.024	0.0089	0.9025	0.8358
-0.75	-0.3001	0.03175	0.02459	0.0091	0.8978	0.8533
-0.5	-0.2914	0.03192	0.02474	0.0126	0.8926	0.8693
-0.25	-0.2756	0.03221	0.02501	0.0148	0.8881	0.8853
0	-0.2369	0.033	0.02572	0.0131	0.8825	0.9007
0.25	-0.2212	0.03312	0.02582	0.0147	0.876	0.9159
0.5	-0.1788	0.03377	0.02642	0.0117	0.8699	0.9291
0.75	-0.1374	0.03439	0.02699	0.0084	0.8626	0.9414
1	-0.0755	0.03526	0.02781	0.0013	0.8561	0.9482

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.25	-0.0188	0.03602	0.02852	-0.005	0.8493	0.9566
1.5	0.04	0.03669	0.02918	-0.012	0.8421	0.9626
1.75	0.1095	0.03737	0.02983	-0.02	0.8373	0.9693
2	0.1497	0.03775	0.03024	-0.0243	0.8278	0.9768
2.25	0.2183	0.03815	0.03065	-0.0322	0.8229	0.9827
2.5	0.2576	0.03851	0.03106	-0.0362	0.8129	0.9906
2.75	0.3271	0.03864	0.03123	-0.0441	0.8082	0.9955
3	0.3452	0.03885	0.03148	-0.0442	0.7971	1
3.25	0.3536	0.03883	0.03147	-0.0419	0.7872	1
3.5	0.3829	0.0386	0.03127	-0.0425	0.7798	1
3.75	0.3783	0.03858	0.03125	-0.038	0.7679	1
4	0.3867	0.03844	0.03113	-0.0353	0.7575	1
4.25	0.4195	0.03805	0.03079	-0.0359	0.7503	1
4.5	0.4166	0.03791	0.03066	-0.0314	0.738	1
4.75	0.4237	0.03772	0.03049	-0.0282	0.7265	1
5	0.4706	0.03698	0.02982	-0.0304	0.7208	1
5.25	0.479	0.03681	0.02968	-0.0274	0.7081	1
5.5	0.4992	0.03655	0.02948	-0.026	0.6962	1
5.75	0.5557	0.03517	0.02822	-0.0288	0.6916	1
6	0.5778	0.03473	0.02787	-0.0275	0.6788	1
6.25	0.6063	0.03403	0.02726	-0.0268	0.6667	1
6.5	0.669	0.03156	0.02497	-0.0295	0.6629	1
6.75	0.6989	0.03039	0.02394	-0.0285	0.6504	1
7	0.775	0.02664	0.02042	-0.0319	0.6473	1
7.25	0.8172	0.02471	0.01863	-0.0321	0.6328	1
7.5	0.8336	0.02405	0.01807	-0.0293	0.6118	1
7.75	0.8758	0.02232	0.01643	-0.0295	0.5873	1
8	0.8869	0.0221	0.01623	-0.0263	0.5533	1
8.25	0.9073	0.02167	0.01569	-0.0242	0.5068	1
8.5	0.9256	0.02168	0.01534	-0.0218	0.4449	1
8.75	0.9316	0.02255	0.01579	-0.0185	0.387	1
9	0.9329	0.02379	0.01663	-0.015	0.3369	1
9.25	0.9339	0.02517	0.01768	-0.0118	0.2932	1
9.5	0.9359	0.02664	0.01887	-0.0089	0.2546	1
9.75	0.9397	0.02815	0.0201	-0.0064	0.2219	1
10	0.9466	0.02963	0.02137	-0.0043	0.1945	1
10.25	0.9558	0.03112	0.02263	-0.0026	0.1719	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.5	0.9669	0.03255	0.02401	-0.0011	0.1521	1
10.75	0.9797	0.03399	0.02534	0.0002	0.1358	1
11	0.9942	0.03546	0.02674	0.0013	0.1215	1
11.25	1.0107	0.03697	0.02823	0.0023	0.1092	1
11.5	1.0312	0.03859	0.02983	0.0028	0.0988	1
11.75	1.0565	0.04031	0.03143	0.0027	0.0892	1
12	1.0692	0.04196	0.03331	0.004	0.0825	1
12.25	1.1026	0.04429	0.03563	0.0032	0.0759	1
12.5	1.1116	0.04623	0.03787	0.0048	0.0715	1
12.75	1.1264	0.04808	0.03974	0.0055	0.067	1
13	1.1469	0.05157	0.04345	0.0056	0.0638	1
13.25	1.1435	0.0542	0.04646	0.008	0.0621	1
13.5	1.1384	0.05687	0.04944	0.0102	0.06	1
13.75	1.1365	0.05948	0.05226	0.0118	0.0579	1
14	1.137	0.06209	0.055	0.0129	0.0559	1
14.25	1.1366	0.06547	0.05853	0.0139	0.0546	1
14.5	1.1314	0.07008	0.06333	0.0147	0.0536	1
14.75	1.1132	0.07514	0.06864	0.0157	0.0532	1
15	1.0908	0.07956	0.07334	0.0165	0.0531	1
15.25	1.0661	0.08447	0.07852	0.0166	0.053	1
15.5	1.0419	0.08998	0.08426	0.0159	0.0531	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XFOIL Version 6.96

Calculated polar for: NREL's S822 Airfoil

1 1 Reynolds number fixed Mach number fixed

xtrf = 1.000 (top) 1.000 (bottom)

Mach = 0.000 Re = 0.200 e 6 Ncrit = 9.000

ตารางที่ ค-3 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม xfoil ในการคำนวณ Airfoil S822 ที่ Reynolds Number=200,000

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-16.25	-0.561	0.12087	0.11706	-0.062	1	0.0271
-16	-0.6131	0.10534	0.10143	-0.0699	1	0.0259
-15.75	-0.6562	0.093	0.08892	-0.077	1	0.0249
-15.5	-0.6937	0.08291	0.07862	-0.0828	1	0.0244
-15.25	-0.7275	0.07441	0.06987	-0.0873	1	0.0237
-15	-0.7462	0.06903	0.06434	-0.0897	1	0.0239
-14.75	-0.7673	0.06367	0.05879	-0.0914	1	0.0238
-14.5	-0.7794	0.06005	0.05504	-0.0922	1	0.0242
-14.25	-0.7932	0.05646	0.05128	-0.0924	1	0.0245
-14	-0.8076	0.05318	0.04785	-0.0919	1	0.0251
-13.75	-0.8209	0.05044	0.04497	-0.0907	1	0.0254
-13.5	-0.836	0.04829	0.0427	-0.0882	1	0.0258
-13.25	-0.8563	0.0469	0.04124	-0.0838	1	0.0258
-13	-0.8812	0.04586	0.04012	-0.0786	1	0.0261
-12.75	-0.9005	0.04463	0.03878	-0.0741	1	0.0263
-12.5	-0.9158	0.04338	0.03743	-0.0701	1	0.0264
-12.25	-0.9053	0.04113	0.03487	-0.0716	0.9964	0.0274
-12	-0.8915	0.03815	0.03187	-0.0726	0.9939	0.0297
-11.75	-0.8778	0.03668	0.03031	-0.0736	0.9895	0.0321
-11.5	-0.8621	0.03527	0.02869	-0.0745	0.9854	0.0347
-11.25	-0.8431	0.03307	0.02641	-0.0756	0.9829	0.0378
-11	-0.8314	0.03201	0.02532	-0.0752	0.9777	0.0408
-10.75	-0.8142	0.03099	0.02409	-0.0754	0.9732	0.0444
-10.5	-0.7937	0.02923	0.02233	-0.0763	0.9704	0.049
-10.25	-0.7836	0.02847	0.02149	-0.0748	0.9648	0.0532
-10	-0.7702	0.02732	0.02027	-0.0739	0.96	0.0583

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-9.75	-0.7486	0.02643	0.01934	-0.0744	0.9568	0.065
-9.5	-0.7431	0.02567	0.01853	-0.0715	0.9509	0.0705
-9.25	-0.7281	0.02497	0.01779	-0.0704	0.946	0.0782
-9	-0.7048	0.02397	0.01681	-0.0709	0.943	0.0892
-8.75	-0.6768	0.02305	0.01587	-0.0722	0.941	0.1032
-8.5	-0.6825	0.02274	0.01555	-0.0666	0.9325	0.1106
-8.25	-0.6585	0.02198	0.01485	-0.0669	0.9294	0.1268
-8	-0.6289	0.0213	0.01417	-0.0682	0.9275	0.1471
-7.75	-0.6304	0.02108	0.014	-0.0633	0.92	0.1586
-7.5	-0.6078	0.02057	0.01351	-0.0631	0.9162	0.1797
-7.25	-0.5786	0.02	0.013	-0.0642	0.9139	0.205
-7	-0.5462	0.01944	0.01253	-0.0658	0.9124	0.2329
-6.75	-0.553	0.01946	0.01258	-0.0597	0.9037	0.2459
-6.5	-0.5257	0.01903	0.01222	-0.0602	0.9006	0.2737
-6.25	-0.493	0.01858	0.01184	-0.0617	0.8988	0.3052
-6	-0.4574	0.01815	0.01147	-0.0638	0.8975	0.3382
-5.75	-0.467	0.01832	0.01168	-0.057	0.888	0.3534
-5.5	-0.4371	0.01799	0.01143	-0.0578	0.8855	0.385
-5.25	-0.4023	0.01765	0.01116	-0.0595	0.8838	0.4186
-5	-0.3658	0.0173	0.01091	-0.0615	0.8826	0.4528
-4.75	-0.3741	0.01756	0.01123	-0.0549	0.8728	0.4705
-4.5	-0.3431	0.01736	0.01112	-0.0557	0.8705	0.5031
-4.25	-0.3077	0.01717	0.011	-0.0573	0.869	0.5359
-4	-0.2709	0.01703	0.0109	-0.059	0.8678	0.5671
-3.75	-0.2768	0.01743	0.01137	-0.0529	0.8578	0.585
-3.5	-0.2441	0.01741	0.01137	-0.0538	0.8557	0.6112
-3.25	-0.2084	0.0174	0.01138	-0.0552	0.8543	0.6338
-3	-0.1721	0.01738	0.01135	-0.0567	0.8531	0.6552
-2.75	-0.178	0.01792	0.01192	-0.0506	0.843	0.6694
-2.5	-0.1445	0.01795	0.01193	-0.0516	0.8409	0.6876
-2.25	-0.1091	0.01799	0.01197	-0.0529	0.8395	0.7037
-2	-0.0733	0.01802	0.01199	-0.0541	0.8383	0.7185
-1.75	-0.0812	0.0187	0.01273	-0.0477	0.8279	0.7294
-1.5	-0.0478	0.01878	0.01281	-0.0485	0.8259	0.7417
-1.25	-0.0126	0.01885	0.01288	-0.0497	0.8246	0.7534
-1	-0.0141	0.01948	0.01352	-0.0446	0.8161	0.7651
-0.75	0.0117	0.01967	0.01371	-0.0441	0.8126	0.7757

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-0.5	0.0447	0.01975	0.01381	-0.0447	0.8108	0.7849
-0.25	0.0813	0.01975	0.0138	-0.0461	0.8095	0.7952
0	0.1179	0.01975	0.0138	-0.0473	0.8085	0.8035
0.25	0.103	0.02056	0.01465	-0.04	0.7969	0.8137
0.5	0.14	0.02046	0.01453	-0.0415	0.7955	0.8236
0.75	0.1771	0.02038	0.01448	-0.0426	0.7944	0.8301
1	0.2161	0.02019	0.01428	-0.0444	0.7934	0.839
1.25	0.1995	0.02099	0.01513	-0.0366	0.7814	0.8491
1.5	0.2381	0.02075	0.01491	-0.0381	0.7802	0.8564
1.75	0.2783	0.02047	0.01465	-0.0399	0.7792	0.8634
2	0.3173	0.02014	0.01434	-0.0414	0.778	0.8705
2.25	0.3055	0.02071	0.01495	-0.0346	0.7661	0.8829
2.5	0.3046	0.02115	0.01544	-0.0294	0.7571	0.893
2.75	0.3365	0.02079	0.01511	-0.0296	0.7538	0.9008
3	0.3792	0.02023	0.01459	-0.0315	0.7524	0.907
3.25	0.4257	0.01957	0.01396	-0.0343	0.7511	0.9132
3.5	0.4736	0.01888	0.01331	-0.0371	0.7498	0.9173
3.75	0.4732	0.01913	0.01363	-0.032	0.7393	0.9299
4	0.5248	0.01836	0.0129	-0.0356	0.7373	0.9338
4.25	0.5795	0.01753	0.01211	-0.0398	0.7353	0.9373
4.5	0.5979	0.01749	0.01215	-0.0381	0.7257	0.9464
4.75	0.6553	0.01662	0.01133	-0.0429	0.7218	0.9483
5	0.6832	0.01632	0.01112	-0.0427	0.7125	0.9563
5.25	0.741	0.01549	0.01031	-0.0477	0.7059	0.9573
5.5	0.7793	0.01514	0.01005	-0.0496	0.6933	0.9617
5.75	0.8136	0.01477	0.00974	-0.0507	0.6796	0.968
6	0.857	0.0144	0.00942	-0.0535	0.6631	0.9711
6.25	0.8948	0.01425	0.00933	-0.0556	0.6423	0.9756
6.5	0.9278	0.01412	0.0092	-0.0566	0.6171	0.982
6.75	0.9612	0.01418	0.00926	-0.058	0.5799	0.9877
7	0.9872	0.0144	0.0093	-0.0581	0.5235	0.9954
7.25	0.9805	0.01471	0.00933	-0.0522	0.4746	1
7.5	0.9494	0.01476	0.00926	-0.0417	0.4554	1
7.75	0.9303	0.01512	0.00942	-0.0337	0.4245	1
8	0.9257	0.01595	0.00999	-0.0289	0.3812	1
8.25	0.9254	0.01696	0.01075	-0.0252	0.3385	1
8.5	0.9272	0.01805	0.01164	-0.022	0.2989	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.75	0.9296	0.01923	0.0126	-0.019	0.2621	1
9	0.934	0.02041	0.01359	-0.0165	0.2275	1
9.25	0.9393	0.02163	0.01464	-0.0141	0.197	1
9.5	0.9453	0.02289	0.01573	-0.012	0.1707	1
9.75	0.9522	0.02415	0.01685	-0.01	0.1481	1
10	0.9594	0.02544	0.01802	-0.0082	0.1302	1
10.25	0.9684	0.02667	0.01919	-0.0065	0.1148	1
10.5	0.9767	0.02799	0.02045	-0.0049	0.1022	1
10.75	0.9853	0.02932	0.02173	-0.0034	0.0913	1
11	0.9964	0.03052	0.02297	-0.0021	0.0818	1
11.25	1.0047	0.03198	0.02441	-0.0006	0.0743	1
11.5	1.0147	0.03331	0.02575	0.0007	0.0678	1
11.75	1.0243	0.03483	0.02729	0.002	0.0623	1
12	1.0352	0.03615	0.02866	0.003	0.0571	1
12.25	1.0456	0.03785	0.03028	0.0042	0.0527	1
12.5	1.0581	0.03916	0.03178	0.0052	0.0495	1
12.75	1.0692	0.04059	0.03325	0.0061	0.0463	1
13	1.085	0.04241	0.03498	0.0068	0.0425	1
13.25	1.0954	0.04387	0.03664	0.0078	0.0408	1
13.5	1.1059	0.04551	0.03842	0.0086	0.0386	1
13.75	1.1154	0.04718	0.04018	0.0094	0.0367	1
14	1.1241	0.04897	0.04197	0.01	0.0348	1
14.25	1.1367	0.05147	0.04461	0.0107	0.0327	1
14.5	1.1406	0.05366	0.04704	0.0115	0.0317	1
14.75	1.1439	0.05606	0.04963	0.0122	0.0304	1
15	1.1455	0.05852	0.05225	0.0127	0.0291	1
15.25	1.1468	0.06099	0.05481	0.013	0.0279	1
15.5	1.15	0.0634	0.05725	0.0132	0.0268	1
15.75	1.1474	0.06796	0.06199	0.0135	0.0256	1
16	1.1386	0.07169	0.06597	0.0134	0.0253	1
16.25	1.1272	0.07599	0.07053	0.0129	0.0249	1
16.5	1.1141	0.08088	0.07568	0.012	0.0246	1
16.75	1.0985	0.08629	0.08134	0.0105	0.0243	1
17	1.0807	0.09237	0.08767	0.0083	0.0241	1
17.25	1.0601	0.09927	0.09481	0.0053	0.0239	1
17.5	1.0384	0.10679	0.10257	0.0015	0.024	1
17.75	1.0134	0.11545	0.11145	-0.0033	0.0241	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18	0.9853	0.12539	0.1216	-0.0093	0.0245	1
18.25	0.9535	0.13694	0.13333	-0.0166	0.025	1
18.5	0.9173	0.15056	0.1471	-0.0252	0.0255	1

XFOIL Version 6.99

Calculated polar for: NREL's S821 Airfoil

1 1 Reynolds number fixed Mach number fixed

xtrf = 1.000 (top) 1.000 (bottom)

Mach = 0.000 Re = 0.600 e 6 Ncrit = 9.000

ตารางที่ ค-4 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม xfoil ในการคำนวณ Airfoil S822 ที่ Reynolds Number=600,000

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-19.25	-0.3379	0.18526	0.18249	-0.021	1	0.1302
-18.75	-0.5	0.20392	0.20068	-0.0115	1	0.1376
-18.5	-0.4895	0.20266	0.19942	-0.012	1	0.1387
-18.25	-0.481	0.20102	0.19777	-0.0126	1	0.1407
-17.75	-0.3544	0.17513	0.17224	-0.0258	1	0.1436
-17.5	-0.305	0.17685	0.17403	-0.023	1	0.1389
-17	-0.3251	0.17117	0.16828	-0.0254	1	0.1443
-16.75	-0.3144	0.17051	0.16763	-0.0251	1	0.1446
-16.5	-0.304	0.16995	0.16707	-0.0249	1	0.145
-16.25	-0.294	0.16944	0.16657	-0.0246	1	0.1454
-16	-0.2844	0.16894	0.16608	-0.0244	1	0.146
-15.75	-0.2757	0.16839	0.16553	-0.0242	1	0.1469
-15.5	-0.2686	0.16767	0.16482	-0.024	1	0.148
-15.25	-0.2637	0.16673	0.16387	-0.024	1	0.1501
-14.75	-0.4616	0.15672	0.15332	-0.026	1	0.1533
-14.5	-0.4514	0.15526	0.15186	-0.0259	1	0.1537
-14.25	-0.4362	0.15481	0.15143	-0.0255	1	0.1539
-14	-0.425	0.1536	0.15023	-0.0254	1	0.1542
-13.75	-0.4106	0.15304	0.14968	-0.025	1	0.1545
-13.5	-0.3926	0.1532	0.14987	-0.0244	1	0.1549
-13.25	-0.387	0.15097	0.14764	-0.0245	1	0.1552
-13	-0.3745	0.15014	0.14682	-0.0242	1	0.1557

-12.75	-0.3665	0.14848	0.14518	-0.0241	1	0.1562
-12.5	-0.361	0.14639	0.14309	-0.0241	1	0.1568
-12.2	-0.3514	0.14455	0.14126	-0.0239	1	0.1581
-12.25	-0.3518	0.14507	0.14179	-0.0239	1	0.1579
-12	-0.3544	0.14154	0.13825	-0.0243	1	0.1592
-11.75	-0.2508	0.13057	0.12744	-0.0415	0.9935	0.1622
-11.5	-0.393	0.12877	0.12541	-0.0271	1	0.1646
-11.25	-0.38	0.12816	0.12483	-0.0265	0.9999	0.165
-11	-0.3546	0.12656	0.12323	-0.0292	0.9987	0.1655
-10.75	-0.3299	0.12503	0.12171	-0.0317	0.9973	0.1661
-10.5	-0.3096	0.1226	0.11928	-0.0346	0.9957	0.167
-10.25	-0.2961	0.11903	0.1157	-0.0379	0.9942	0.1685
-9.75	-0.3116	0.1052	0.10178	-0.0467	0.9916	0.1756
-9.5	-0.2848	0.10367	0.10025	-0.0497	0.9907	0.1761
-9.25	-0.2657	0.10189	0.09848	-0.0513	0.9882	0.1768
-9	-0.2486	0.09943	0.09602	-0.0536	0.9855	0.1778
-8.75	-0.328	0.08249	0.07896	-0.0614	0.9824	0.1878
-8.5	-0.3061	0.08032	0.07678	-0.0645	0.9805	0.1889
-8	-0.7089	0.0202	0.01493	-0.1075	0.9427	0.2118
-7.5	-0.6587	0.01888	0.01359	-0.109	0.9302	0.2135
-7.25	-0.6206	0.01828	0.013	-0.1118	0.9285	0.2145
-7	-0.5814	0.0177	0.0124	-0.1147	0.9272	0.2154
-6.5	-0.5339	0.01662	0.01127	-0.1146	0.9123	0.2171
-6.25	-0.4953	0.01608	0.01071	-0.1171	0.9098	0.218
-6	-0.4761	0.01566	0.01026	-0.116	0.8974	0.2186
-5.75	-0.4339	0.0152	0.00976	-0.1191	0.8932	0.2194
-5.5	-0.3967	0.01482	0.00934	-0.1212	0.8848	0.22
-5.25	-0.3514	0.01426	0.00876	-0.125	0.8772	0.2213
-5	-0.3062	0.01375	0.00826	-0.1287	0.8679	0.223
-4.75	-0.2639	0.01343	0.00791	-0.1317	0.8545	0.2244
-4.5	-0.2289	0.01321	0.00764	-0.1333	0.8381	0.2256
-4.25	-0.1966	0.01303	0.0074	-0.1343	0.8209	0.2267
-4	-0.1665	0.01289	0.00718	-0.1349	0.804	0.2278
-3.5	-0.1105	0.01265	0.0068	-0.1352	0.7718	0.23
-3.25	-0.0831	0.01255	0.00662	-0.1351	0.7567	0.231
-3	-0.0557	0.01248	0.00646	-0.1351	0.7415	0.2321
-2.75	-0.0285	0.01238	0.00631	-0.135	0.7275	0.2329

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-2.5	-0.0009	0.01233	0.00618	-0.1349	0.7146	0.2336
-2.25	0.026	0.01209	0.00592	-0.1348	0.7016	0.2353
-2	0.0535	0.01194	0.00575	-0.1348	0.6896	0.2372
-1.75	0.0811	0.01185	0.00564	-0.1347	0.6768	0.2388
-1.5	0.109	0.01179	0.00556	-0.1347	0.665	0.2404
-1.25	0.1367	0.01175	0.00548	-0.1346	0.6528	0.2419
-1	0.165	0.0117	0.00541	-0.1346	0.6422	0.2434
-0.75	0.1932	0.01167	0.00533	-0.1345	0.631	0.2449
-0.5	0.2214	0.01165	0.00526	-0.1344	0.6208	0.2463
-0.25	0.2498	0.01163	0.0052	-0.1343	0.61	0.2475
0	0.2778	0.01156	0.00509	-0.1343	0.5995	0.2494
0.25	0.3067	0.01143	0.005	-0.1344	0.5896	0.2519
0	0.2778	0.01156	0.00509	-0.1343	0.5995	0.2494
0.75	0.364	0.01139	0.00496	-0.1343	0.5709	0.2561
1	0.3922	0.01141	0.00495	-0.1342	0.5612	0.2583
1.25	0.4206	0.01144	0.00495	-0.1341	0.5522	0.2605
1.5	0.4492	0.01146	0.00495	-0.1339	0.5433	0.2624
1.75	0.4772	0.01147	0.00492	-0.1338	0.5342	0.2653
2	0.5067	0.01141	0.00492	-0.1339	0.5259	0.2684
2.25	0.5346	0.01144	0.00495	-0.1336	0.5161	0.2712
2.5	0.5623	0.0115	0.00499	-0.1334	0.5066	0.274
2.75	0.5902	0.01154	0.00501	-0.1331	0.4969	0.2767
3	0.6169	0.01166	0.00507	-0.1325	0.4872	0.2788
3.25	0.6461	0.0116	0.00507	-0.1325	0.4786	0.2831
3.5	0.6732	0.01167	0.00514	-0.1321	0.4694	0.2866
3.75	0.7011	0.01173	0.00521	-0.1318	0.4611	0.29
4	0.7281	0.01181	0.00528	-0.1313	0.4518	0.2933
4.25	0.754	0.01196	0.00537	-0.1306	0.4428	0.296
4.5	0.7827	0.01194	0.00543	-0.1305	0.4347	0.3012
4.75	0.8081	0.01205	0.00554	-0.1297	0.4258	0.3052
5	0.8343	0.01214	0.00565	-0.1291	0.4178	0.3091
5.25	0.8596	0.01225	0.00575	-0.1282	0.4089	0.3123
5.5	0.8841	0.01238	0.00586	-0.1273	0.4001	0.3164
5.75	0.9107	0.01244	0.00598	-0.1267	0.3912	0.3211
6.25	0.959	0.01275	0.00628	-0.1246	0.3712	0.3292
6.5	0.9808	0.013	0.00646	-0.1232	0.3596	0.3321
6.75	1.0067	0.01311	0.00663	-0.1225	0.3475	0.3379

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7	1.0297	0.01335	0.00686	-0.1214	0.3342	0.3427
7.25	1.0508	0.01367	0.00712	-0.1199	0.3183	0.3473
7.5	1.071	0.01404	0.00741	-0.1183	0.2982	0.3509
7.75	1.0902	0.01446	0.00774	-0.1167	0.2734	0.3561
8.25	1.1224	0.01563	0.00868	-0.1125	0.2227	0.3653
8.5	1.1376	0.01626	0.0092	-0.1103	0.202	0.3694
8.75	1.1529	0.01691	0.00974	-0.1082	0.1837	0.373
9	1.1684	0.01753	0.01032	-0.1062	0.1676	0.379
9.25	1.1833	0.01819	0.01092	-0.1041	0.1534	0.3841
9.5	1.1985	0.01884	0.01152	-0.1021	0.1412	0.3892
9.75	1.2131	0.01952	0.01214	-0.1001	0.1306	0.393
10	1.2284	0.02017	0.0128	-0.0982	0.1214	0.3991
10.25	1.2427	0.02089	0.01352	-0.0963	0.1134	0.4047
10.5	1.2553	0.02171	0.01432	-0.0942	0.1061	0.4102
10.75	1.2695	0.02247	0.01506	-0.0923	0.0996	0.4147
11	1.2828	0.02329	0.01591	-0.0905	0.094	0.421
11.25	1.2943	0.02425	0.01688	-0.0886	0.0885	0.427
11.5	1.3074	0.02515	0.01781	-0.0869	0.0838	0.4328
11.75	1.3173	0.02627	0.01891	-0.085	0.0796	0.4374
12	1.3296	0.02729	0.01999	-0.0834	0.0754	0.444
12.25	1.3394	0.02852	0.02125	-0.0818	0.0718	0.4504
12.5	1.3501	0.02973	0.0225	-0.0803	0.0683	0.4566
12.75	1.3579	0.0312	0.02397	-0.0787	0.0652	0.4614
13	1.3685	0.03254	0.02538	-0.0775	0.0621	0.4684
13.25	1.3751	0.03424	0.02712	-0.0763	0.0593	0.4748
13.5	1.3845	0.03578	0.02872	-0.0752	0.0566	0.4815
13.75	1.3898	0.03772	0.03068	-0.0741	0.0541	0.4873
14	1.3981	0.03951	0.03255	-0.0733	0.0517	0.4949
14.25	1.4036	0.04159	0.03468	-0.0725	0.0493	0.5017
14.5	1.4083	0.04382	0.03696	-0.0718	0.0473	0.5078
14.75	1.4139	0.04606	0.03927	-0.0713	0.0452	0.5152
15	1.4156	0.04876	0.04202	-0.0709	0.0434	0.5226
15.25	1.4211	0.05112	0.04446	-0.0706	0.0416	0.5301
15.5	1.4238	0.0539	0.0473	-0.0705	0.0399	0.5375
15.75	1.4231	0.05714	0.05062	-0.0706	0.0385	0.5449
16	1.4275	0.05987	0.05343	-0.0707	0.037	0.5529
16.25	1.4288	0.06303	0.05666	-0.071	0.0356	0.5607

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16.5	1.4264	0.06678	0.06049	-0.0716	0.0345	0.5689
16.75	1.4276	0.07013	0.06392	-0.0721	0.0334	0.5777
17	1.4295	0.07347	0.06737	-0.0728	0.0322	0.587
17.25	1.428	0.07734	0.07132	-0.0737	0.0312	0.5962
17.5	1.4226	0.08185	0.07591	-0.075	0.0304	0.6041
17.75	1.4237	0.08553	0.07971	-0.076	0.0296	0.6149
18	1.4239	0.08937	0.08364	-0.0772	0.0287	0.6257
18.25	1.4224	0.09356	0.08794	-0.0786	0.028	0.6373
18.5	1.4195	0.09797	0.09244	-0.0802	0.0273	0.6488
18.75	1.4125	0.10311	0.09767	-0.0822	0.0267	0.6602
19	1.4107	0.10747	0.10216	-0.084	0.0261	0.6735

XFOIL Version 6.99

Calculated polar for: NREL's S821 Airfoil

1 1 Reynolds number fixed Mach number fixed

xtrf = 1.000 (top) 1.000 (bottom)

Mach = 0.000 Re = 0.800 e 6 Ncrit = 9.000

ตารางที่ ค-5 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม xfoil ในการคำนวณ Airfoil S822 ที่ Reynolds Number=800,000

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr
-19.25	-0.5725	0.19522	0.19234	-0.0129	1	0.1275
-19	-0.5606	0.1943	0.19142	-0.0132	1	0.1278
-18.75	-0.5482	0.19348	0.1906	-0.0136	1	0.1282
-18.5	-0.5387	0.19199	0.18911	-0.0141	1	0.1287
-18.25	-0.5274	0.1909	0.18802	-0.0145	1	0.1294
-18	-0.5181	0.18938	0.1865	-0.015	1	0.1304
-17.75	-0.5161	0.18623	0.18333	-0.0161	1	0.1315
-17.5	-0.5451	0.17672	0.17377	-0.0195	1	0.1358
-17.25	-0.532	0.17593	0.17299	-0.0196	1	0.136
-17	-0.5205	0.17484	0.1719	-0.0199	1	0.1363
-16.75	-0.5091	0.17371	0.17077	-0.0201	1	0.1367
-16.5	-0.4969	0.17275	0.16982	-0.0202	1	0.1371
-16.25	-0.4878	0.17115	0.16822	-0.0206	1	0.1375
-16	-0.48	0.16932	0.16639	-0.021	1	0.1381

-15.75	-0.4734	0.16726	0.16433	-0.0214	1	0.1389
-14.75	-1.0574	0.06866	0.06481	-0.0552	1	0.1834
-14.5	-1.1137	0.06052	0.0565	-0.0573	1	0.1856
-14.25	-1.112	0.05872	0.05469	-0.0572	1	0.1865
-14	-1.1128	0.05665	0.05261	-0.0572	1	0.1874
-13.75	-1.1124	0.05474	0.0507	-0.0571	1	0.1882
-13.5	-1.1148	0.05262	0.04855	-0.057	1	0.189
-13.25	-1.1241	0.04991	0.04579	-0.057	1	0.1898
-13	-1.1289	0.04753	0.04337	-0.0572	0.9999	0.1906
-12.75	-1.1156	0.04473	0.04051	-0.0612	0.9979	0.1915
-12.5	-1.1026	0.04219	0.0379	-0.0649	0.9955	0.1924
-12.25	-1.0884	0.03971	0.03535	-0.0689	0.9931	0.1932
-12	-1.0715	0.03735	0.03291	-0.0732	0.9913	0.1939
-11.75	-1.0588	0.0353	0.0308	-0.0758	0.9882	0.1945
-11.5	-1.0474	0.03325	0.02868	-0.0783	0.984	0.195
-11.25	-1.0274	0.03151	0.02687	-0.0816	0.981	0.1954
-11	-1.003	0.03031	0.02565	-0.0841	0.979	0.1967
-10.75	-0.974	0.02933	0.02468	-0.087	0.9776	0.1979
-10.5	-0.9438	0.02826	0.02361	-0.0904	0.9763	0.1988
-10	-0.915	0.02569	0.021	-0.0922	0.9657	0.2002
-9.75	-0.8865	0.0246	0.0199	-0.0951	0.9634	0.201
-9.5	-0.8558	0.02354	0.01883	-0.0984	0.9617	0.2017
-9.25	-0.8236	0.02253	0.01779	-0.1019	0.9604	0.2026
-8.75	-0.7918	0.0202	0.0154	-0.1031	0.9474	0.2039
-8.5	-0.7556	0.01925	0.01442	-0.1068	0.946	0.2047
-8.25	-0.7173	0.01838	0.01352	-0.1107	0.9449	0.2055
-8	-0.677	0.01759	0.01269	-0.1149	0.944	0.2063
-7.5	-0.6323	0.01632	0.01133	-0.1156	0.9306	0.2072
-7.25	-0.5957	0.01571	0.0107	-0.1181	0.9289	0.208
-7	-0.5584	0.015	0.01001	-0.1207	0.9273	0.2095
-6.5	-0.5121	0.01397	0.00898	-0.1202	0.9107	0.2114
-6.25	-0.4871	0.01357	0.00858	-0.1202	0.8998	0.2123
-6	-0.4429	0.01317	0.00818	-0.1237	0.8942	0.2132
-5.75	-0.3977	0.01283	0.00782	-0.1274	0.8864	0.2143
-5.5	-0.3528	0.01251	0.00746	-0.131	0.875	0.2153
-5.25	-0.3132	0.01225	0.00714	-0.1335	0.8593	0.2163
-5	-0.2787	0.01207	0.00687	-0.135	0.8414	0.2173

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-4.75	-0.2482	0.01194	0.00665	-0.1356	0.8225	0.2182
-4.5	-0.2197	0.01184	0.00646	-0.1359	0.8044	0.219
-4.25	-0.1922	0.01177	0.00629	-0.1359	0.7871	0.2197
-4	-0.1651	0.01169	0.00614	-0.1358	0.7709	0.2201
-3.75	-0.1386	0.01147	0.00586	-0.1358	0.7556	0.2215
-3.5	-0.1122	0.01129	0.00563	-0.1357	0.7402	0.2231
-3.25	-0.0848	0.01115	0.00546	-0.1357	0.7259	0.2244
-3	-0.0573	0.01105	0.00532	-0.1357	0.7129	0.2256
-2.75	-0.0296	0.01097	0.0052	-0.1357	0.6997	0.2268
-2.5	-0.0015	0.01089	0.00509	-0.1357	0.6878	0.2279
-2.25	0.0261	0.01085	0.00499	-0.1356	0.6749	0.2291
-2	0.0546	0.01078	0.0049	-0.1357	0.6633	0.2303
-1.75	0.0822	0.01076	0.00482	-0.1355	0.6507	0.2315
-1.5	0.111	0.01072	0.00475	-0.1356	0.6402	0.2326
-1.25	0.139	0.01073	0.00469	-0.1355	0.6288	0.2335
-1	0.168	0.0106	0.00456	-0.1356	0.6189	0.2353
-0.75	0.1969	0.0105	0.00444	-0.1358	0.6081	0.2375
-0.5	0.2256	0.01045	0.00438	-0.1358	0.5978	0.2394
-0.25	0.2546	0.01041	0.00434	-0.1359	0.5874	0.2411
0	0.2828	0.01042	0.00431	-0.1358	0.5773	0.2428
0.25	0.3123	0.01039	0.00428	-0.1359	0.5686	0.2445
0.5	0.3405	0.01042	0.00426	-0.1357	0.5588	0.2461
0.75	0.3695	0.01043	0.00425	-0.1357	0.5501	0.2474
1	0.3986	0.0104	0.0042	-0.1358	0.5407	0.2497
1.25	0.4274	0.01038	0.00418	-0.1358	0.5316	0.2527
1.5	0.4572	0.01035	0.00418	-0.1359	0.5236	0.2554
1.75	0.4851	0.0104	0.00421	-0.1357	0.514	0.258
2	0.5138	0.01043	0.00423	-0.1355	0.505	0.2604
2.25	0.5418	0.0105	0.00425	-0.1352	0.4947	0.2623
2.5	0.57	0.01052	0.00426	-0.1351	0.4852	0.2653
2.75	0.5992	0.01052	0.00428	-0.1351	0.4759	0.2689
3	0.6262	0.01061	0.00435	-0.1346	0.4658	0.2721
3.25	0.6555	0.01063	0.00439	-0.1346	0.4583	0.2752
3.5	0.6826	0.01073	0.00445	-0.1341	0.449	0.2777
3.75	0.7105	0.01079	0.00451	-0.1338	0.4402	0.2807
4	0.7391	0.01082	0.00456	-0.1336	0.4314	0.2851
4.25	0.7653	0.01094	0.00467	-0.133	0.4223	0.2888

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5	0.7935	0.01099	0.00474	-0.1327	0.4148	0.2924
4.75	0.8189	0.01112	0.00483	-0.1319	0.4059	0.2952
5	0.8458	0.01118	0.00492	-0.1314	0.3976	0.2999
5.25	0.8725	0.01126	0.00502	-0.1308	0.3888	0.3043
5.5	0.897	0.01142	0.00516	-0.1298	0.3794	0.3082
5.75	0.9231	0.01152	0.00527	-0.1291	0.37	0.3116
6	0.9466	0.01172	0.00541	-0.1279	0.359	0.3147
6.25	0.9727	0.01183	0.00555	-0.1273	0.3474	0.32
6.5	0.9968	0.01203	0.00574	-0.1263	0.3351	0.3244
6.75	1.0195	0.0123	0.00595	-0.1251	0.3198	0.3284
7	1.0416	0.01262	0.00618	-0.1237	0.3009	0.3314
7.25	1.0628	0.01297	0.00646	-0.1223	0.2772	0.3363
7.5	1.0811	0.01347	0.00684	-0.1205	0.2499	0.3412
7.75	1.0984	0.01402	0.00727	-0.1185	0.2249	0.3458
8	1.1159	0.01457	0.00769	-0.1166	0.2033	0.3496
8.25	1.1327	0.01513	0.00815	-0.1146	0.184	0.3532
8.5	1.1498	0.01567	0.00863	-0.1127	0.1672	0.3587
8.75	1.1666	0.01623	0.00912	-0.1108	0.1523	0.3635
9	1.1836	0.01679	0.00962	-0.1089	0.1395	0.3679
9.25	1.2002	0.01734	0.01012	-0.1069	0.1289	0.3714
9.5	1.2174	0.01787	0.01063	-0.1051	0.1194	0.3773
9.75	1.2345	0.01842	0.01118	-0.1034	0.1111	0.3829
10	1.2499	0.01904	0.01178	-0.1014	0.1037	0.3881
10.5	1.2809	0.02032	0.01304	-0.0976	0.091	0.3979
10.75	1.2954	0.02102	0.01375	-0.0958	0.0857	0.4041
11	1.3094	0.02178	0.01451	-0.0938	0.0808	0.4096
11.25	1.3236	0.02253	0.01527	-0.092	0.0767	0.4143
11.5	1.3359	0.02342	0.01617	-0.0901	0.0726	0.4202
11.75	1.3503	0.02423	0.01702	-0.0885	0.0691	0.4268
12	1.3611	0.02526	0.01807	-0.0866	0.0656	0.4323
12.25	1.3741	0.02621	0.01904	-0.085	0.0624	0.4372
12.5	1.384	0.0274	0.02025	-0.0832	0.0593	0.4438
12.75	1.396	0.02849	0.0214	-0.0818	0.0565	0.4506
13	1.4046	0.02986	0.02279	-0.0802	0.0538	0.4565
13.25	1.4151	0.03114	0.0241	-0.0788	0.0513	0.4612
13.5	1.423	0.03269	0.02569	-0.0775	0.0489	0.4683
13.75	1.4323	0.0342	0.02726	-0.0763	0.0467	0.4755

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14	1.4396	0.03592	0.02901	-0.0751	0.0444	0.482
14.25	1.4461	0.03777	0.03091	-0.0741	0.0424	0.4878
14.5	1.4532	0.03966	0.03286	-0.0732	0.0404	0.4954
14.75	1.4571	0.04191	0.03515	-0.0724	0.0386	0.5021
15	1.4642	0.04392	0.03721	-0.0718	0.037	0.5084
15.25	1.4681	0.04633	0.03969	-0.0713	0.0354	0.5163
15.5	1.4709	0.04893	0.04236	-0.0709	0.0339	0.5242
15.75	1.476	0.05135	0.04484	-0.0706	0.0327	0.5313
16	1.4785	0.05416	0.04771	-0.0705	0.0313	0.539
16.25	1.4778	0.05741	0.05103	-0.0706	0.0302	0.5467
16.5	1.482	0.06016	0.05387	-0.0707	0.0293	0.5547
16.75	1.4844	0.0632	0.057	-0.071	0.0283	0.5637
17	1.4839	0.06671	0.06058	-0.0715	0.0274	0.5726
17.5	1.4829	0.07392	0.06797	-0.0728	0.0259	0.5904
17.75	1.4834	0.0775	0.07164	-0.0736	0.0253	0.5999
18	1.4822	0.08142	0.07566	-0.0747	0.0246	0.6099
18.25	1.4803	0.08547	0.07979	-0.0758	0.024	0.6208
18.5	1.4753	0.09005	0.08447	-0.0773	0.0234	0.6309
18.75	1.4705	0.09472	0.08925	-0.0789	0.0229	0.6423
19	1.4708	0.09865	0.0933	-0.0803	0.0225	0.6552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XFOIL Version 6.96

Calculated polar for: NREL's S822 Airfoil

1 1 Reynolds number fixed Mach number fixed

xtrf = 1.000 (top) 1.000 (bottom)

Mach = 0.000 Re = 1.000 e 6 Ncrit = 9.000

ตารางที่ ค-6 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม xfoil ในการคำนวณ Airfoil S822 ที่ Reynolds Number=1,000,000

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-18.5	-0.8604	0.09772	0.09457	-0.0661	1	0.0046
-18.25	-0.8835	0.09041	0.08715	-0.0696	1	0.0047
-18	-0.9171	0.08157	0.07817	-0.0738	1	0.0048
-17.75	-0.928	0.07652	0.07301	-0.0761	1	0.0048
-17.5	-0.9483	0.0701	0.06648	-0.0791	1	0.0048
-17.25	-0.9473	0.06698	0.06329	-0.0804	1	0.0046
-17	-0.9762	0.05973	0.05589	-0.0836	1	0.0048
-16.75	-0.9802	0.05612	0.05219	-0.085	1	0.0047
-16.5	-0.9987	0.05083	0.04678	-0.0869	1	0.0049
-16.25	-1.0072	0.04706	0.04291	-0.088	1	0.0049
-16	-1.0148	0.04363	0.03939	-0.0887	1	0.0051
-15.75	-1.02	0.04073	0.0364	-0.0889	1	0.0051
-15.5	-1.026	0.03798	0.03356	-0.0886	1	0.0052
-15.25	-1.0298	0.03566	0.03116	-0.088	1	0.0052
-15	-1.0323	0.03366	0.0291	-0.0869	1	0.0054
-14.75	-1.0368	0.03179	0.02716	-0.0853	1	0.0054
-14.5	-1.0217	0.03007	0.02536	-0.0868	0.9987	0.0059
-14.25	-1.002	0.02819	0.0234	-0.0894	0.995	0.0061
-14	-0.984	0.02654	0.02167	-0.0911	0.988	0.0064
-13.75	-0.9701	0.0243	0.01932	-0.0932	0.9804	0.0071
-13.5	-0.9461	0.0229	0.01786	-0.0956	0.9723	0.0078
-13.25	-0.9166	0.02167	0.01656	-0.0987	0.9656	0.0083
-13	-0.8872	0.02032	0.01513	-0.102	0.9563	0.0097
-12.75	-0.8595	0.01925	0.01398	-0.1044	0.9434	0.0108
-12.5	-0.8394	0.01849	0.01311	-0.1047	0.9288	0.0116
-12.25	-0.8274	0.01778	0.01229	-0.1033	0.9159	0.0129

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-12	-0.8161	0.01714	0.0116	-0.1016	0.9065	0.0143
-11.75	-0.8024	0.01665	0.01103	-0.1001	0.899	0.0156
-11.5	-0.7909	0.01605	0.01038	-0.0983	0.8924	0.0173
-11.25	-0.7786	0.01552	0.00981	-0.0964	0.8863	0.019
-11	-0.7641	0.01509	0.00932	-0.0948	0.881	0.0204
-10.75	-0.7504	0.01463	0.00881	-0.093	0.876	0.0222
-10.5	-0.7378	0.01416	0.00832	-0.0909	0.871	0.0248
-10.25	-0.7227	0.01382	0.00792	-0.0892	0.8666	0.0269
-10	-0.7097	0.01342	0.00752	-0.087	0.8627	0.0303
-9.75	-0.6952	0.01309	0.00718	-0.0849	0.8588	0.0337
-9.5	-0.677	0.01277	0.00684	-0.0836	0.8554	0.0378
-9.25	-0.6584	0.01242	0.0065	-0.0824	0.852	0.0442
-9	-0.6395	0.01204	0.00615	-0.0812	0.8493	0.0519
-8.75	-0.6188	0.01172	0.00585	-0.0803	0.8463	0.0595
-8.5	-0.5976	0.01141	0.00555	-0.0794	0.8434	0.0678
-8.25	-0.5765	0.01107	0.00525	-0.0786	0.8407	0.0787
-8	-0.5545	0.01078	0.00498	-0.0779	0.8379	0.0901
-7.75	-0.5321	0.01048	0.00473	-0.0773	0.8355	0.1027
-7.5	-0.5092	0.01018	0.00449	-0.0767	0.8329	0.1163
-7.25	-0.4858	0.00991	0.00425	-0.0762	0.8302	0.1301
-7	-0.4621	0.00964	0.00403	-0.0757	0.8276	0.1455
-6.75	-0.4379	0.00939	0.00383	-0.0754	0.8252	0.1617
-6.5	-0.413	0.00919	0.00364	-0.0751	0.8226	0.1778
-6.25	-0.3887	0.00893	0.00346	-0.0747	0.8204	0.1969
-6	-0.3642	0.00867	0.00329	-0.0744	0.8179	0.2187
-5.75	-0.3389	0.00845	0.00312	-0.0742	0.8152	0.2383
-5.5	-0.3136	0.00822	0.00296	-0.074	0.8126	0.2597
-5.25	-0.2877	0.00803	0.00281	-0.0739	0.8102	0.281
-5	-0.2616	0.00786	0.00269	-0.0738	0.8076	0.3028
-4.75	-0.2357	0.00766	0.00258	-0.0737	0.8054	0.3262
-4.5	-0.2095	0.00747	0.00246	-0.0736	0.8028	0.3474
-4.25	-0.1829	0.0073	0.00235	-0.0736	0.8	0.3712
-4	-0.1563	0.00712	0.00224	-0.0736	0.7973	0.3941
-3.75	-0.1292	0.00698	0.00214	-0.0737	0.7947	0.418
-3.5	-0.1021	0.00685	0.00207	-0.0737	0.7921	0.4414
-3.25	-0.0752	0.0067	0.002	-0.0738	0.7895	0.4653
-3	-0.0481	0.00656	0.00193	-0.0738	0.7866	0.4895

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-2.75	-0.0207	0.00642	0.00186	-0.0739	0.7837	0.5126
-2.5	0.007	0.00632	0.00181	-0.074	0.7809	0.5365
-2.25	0.0349	0.00624	0.00178	-0.0742	0.7779	0.5597
-2	0.0626	0.00616	0.00176	-0.0743	0.7751	0.5803
-1.75	0.0907	0.0061	0.00174	-0.0745	0.772	0.598
-1.5	0.1191	0.00604	0.00172	-0.0747	0.7689	0.6137
-1.25	0.1477	0.00602	0.0017	-0.075	0.7658	0.6273
-1	0.1764	0.00601	0.0017	-0.0753	0.7627	0.6393
-0.75	0.2045	0.00597	0.00171	-0.0754	0.7594	0.65
-0.5	0.2331	0.00595	0.0017	-0.0757	0.7559	0.66
-0.25	0.2616	0.00593	0.0017	-0.0759	0.7525	0.6696
0	0.2906	0.00594	0.0017	-0.0762	0.7488	0.6781
0.25	0.3183	0.0059	0.0017	-0.0763	0.7437	0.6869
0.5	0.3461	0.00586	0.00168	-0.0763	0.7376	0.6948
0.75	0.3742	0.00586	0.00167	-0.0765	0.7316	0.7029
1	0.4018	0.00583	0.00168	-0.0765	0.7253	0.7104
1.25	0.43	0.00586	0.00168	-0.0766	0.7197	0.7182
1.5	0.4575	0.00583	0.00172	-0.0766	0.7132	0.7254
1.75	0.4853	0.00586	0.00173	-0.0767	0.7068	0.7329
2	0.5128	0.00586	0.00178	-0.0767	0.7	0.7399
2.25	0.5402	0.0059	0.00181	-0.0767	0.6929	0.7474
2.5	0.5674	0.00592	0.00187	-0.0766	0.6855	0.7542
2.75	0.5943	0.00598	0.00192	-0.0765	0.6773	0.7616
3	0.6211	0.00602	0.00199	-0.0764	0.6686	0.7681
3.25	0.6474	0.0061	0.00206	-0.0761	0.6598	0.7753
3.5	0.6735	0.00616	0.00214	-0.0758	0.6497	0.7817
3.75	0.699	0.00625	0.00223	-0.0754	0.6376	0.7884
4	0.7241	0.00635	0.00233	-0.0749	0.6245	0.795
4.25	0.7484	0.00647	0.00244	-0.0743	0.6103	0.8011
4.5	0.7725	0.00661	0.00255	-0.0736	0.5947	0.8077
4.75	0.7936	0.00678	0.0027	-0.0723	0.5731	0.8134
5	0.8128	0.00703	0.00286	-0.0707	0.5421	0.8199
5.25	0.825	0.00745	0.0031	-0.0677	0.4926	0.8263
5.5	0.8321	0.00802	0.00344	-0.0638	0.44	0.8334
5.75	0.838	0.0085	0.00374	-0.0596	0.3962	0.8405
6	0.8446	0.00902	0.00411	-0.0556	0.3537	0.8473
6.25	0.8538	0.00956	0.00448	-0.0523	0.3161	0.854

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5	0.8637	0.01005	0.00486	-0.0491	0.2827	0.8601
6.75	0.8747	0.01058	0.00526	-0.0463	0.2513	0.8667
7	0.8859	0.01107	0.00566	-0.0436	0.2235	0.8728
7.25	0.8961	0.01165	0.00611	-0.0407	0.1941	0.8794
7.5	0.9078	0.01218	0.00655	-0.0382	0.1704	0.8857
7.75	0.9192	0.01273	0.00701	-0.0357	0.1478	0.8927
8	0.9324	0.01325	0.00747	-0.0336	0.1306	0.8996
8.25	0.9453	0.01374	0.00794	-0.0314	0.1156	0.9069
8.5	0.9589	0.01426	0.00842	-0.0294	0.1019	0.9146
8.75	0.971	0.01479	0.00892	-0.0271	0.0889	0.9241
9	0.9834	0.01528	0.00942	-0.0249	0.0792	0.9357
9.25	0.9973	0.01575	0.00991	-0.023	0.0707	0.9532
9.5	1.0236	0.01633	0.01049	-0.0239	0.0615	0.9799
9.75	1.0403	0.01699	0.01111	-0.0229	0.0531	1
10	1.058	0.01757	0.01168	-0.022	0.0482	1
10.25	1.0733	0.01827	0.01235	-0.0208	0.0417	1
10.5	1.0887	0.01896	0.013	-0.0196	0.0366	1
10.75	1.1037	0.01968	0.01372	-0.0184	0.0326	1
11	1.1194	0.02037	0.01441	-0.0173	0.0297	1
11.25	1.1313	0.02129	0.01531	-0.0158	0.0255	1
11.5	1.1482	0.02191	0.01595	-0.0149	0.0234	1
11.75	1.1616	0.02275	0.0168	-0.0136	0.0215	1
12	1.1741	0.02368	0.01773	-0.0123	0.0191	1
12.25	1.1894	0.02442	0.01851	-0.0113	0.0182	1
12.5	1.2032	0.02528	0.01939	-0.0102	0.0171	1
12.75	1.2152	0.02627	0.02038	-0.009	0.0157	1
13	1.2244	0.02749	0.02165	-0.0076	0.0146	1
13.25	1.2391	0.02833	0.02254	-0.0067	0.0141	1
13.5	1.2517	0.02933	0.02359	-0.0057	0.0135	1
13.75	1.2644	0.03034	0.02463	-0.0048	0.0128	1
14	1.2749	0.03154	0.02585	-0.0038	0.0121	1
14.25	1.2818	0.03306	0.02741	-0.0025	0.0111	1
14.5	1.291	0.03443	0.02885	-0.0015	0.0107	1
14.75	1.3024	0.03565	0.03013	-0.0007	0.0104	1
15	1.314	0.03687	0.03139	0	0.0099	1
15.25	1.3227	0.03837	0.03294	0.0007	0.0095	1
15.5	1.3308	0.03996	0.03459	0.0015	0.009	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15.75	1.3371	0.04176	0.03643	0.0022	0.0085	1
16	1.3371	0.0442	0.03896	0.0031	0.008	1
16.25	1.3465	0.04579	0.04061	0.0035	0.0077	1
16.5	1.3536	0.04766	0.04255	0.0039	0.0074	1
16.75	1.3596	0.04968	0.04464	0.0042	0.007	1
17	1.3651	0.0518	0.04683	0.0044	0.0067	1
17.25	1.3687	0.05418	0.04926	0.0045	0.0063	1
17.5	1.3699	0.05688	0.05203	0.0045	0.006	1
17.75	1.3625	0.06071	0.05597	0.0044	0.0056	1
18	1.3619	0.06384	0.05919	0.004	0.0055	1
18.25	1.3642	0.06669	0.06213	0.0036	0.0054	1
18.5	1.3633	0.07002	0.06557	0.0029	0.0052	1
18.75	1.3633	0.07332	0.06896	0.0021	0.005	1
19	1.3593	0.07729	0.07302	0.0009	0.0047	1
19.25	1.3539	0.08159	0.07744	-0.0005	0.0047	1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์ทดแทนพลังงานเพื่ออนาคต : การพิสูจน์และสร้างระบบบริหารจัดการพลังงานลม

Future Center : Verification and Implementation of Wind Energy System

ปริญญ์ สวงนสุข¹ พาทักษ์ พวงบานเย็น¹ และ สยาม ทองนาค²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

¹ เลขที่ 1 ซอยจลลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 0-2739-2478

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการเลือกกังหันลมแบบต่างๆ เพื่อนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการ Future Renewable Center โดยได้ทำการเปรียบเทียบกังหันลมทั้งแบบแนวนอนและแนวตั้งในพิคัดกำลัง 10kW เพื่อการเลือกกังหันลมจากท้องตลาดไม่ว่าจะเป็นการเปรียบเทียบเทคโนโลยี, ราคา และประสิทธิภาพของใบพัดกังหันลมแนวนอนระหว่างใบพัดธรรมดา 3 ใบกับใบพัดนาเกลือว่าใบพัดแบบใดที่เหมาะสมสำหรับความเร็วลมในประเทศไทยวิเคราะห์ความเร็วลมในพื้นที่ของโครงการ Future Renewable Center

คำสำคัญ: กังหันลม, ความเร็วลม, ใบพัดนาเกลือ

Abstract

The objective of this thesis is to present the method of choosing wind turbine's technology for using in Future Renewable Center. This thesis compares two types of wind turbine at 10kW, both Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) and Vertical Axis Wind Turbine (VAWT). The factors that we use for considering the wind turbines from each company are technology, price and power curve. We study the efficiency of Horizontal Wind Turbine between Three Blade and Windmill's Blade to confirm what number of blades is suitable for wind speed in Thailand. Moreover, we compare the series of Airfoil of wind turbine blades, and choose tower and foundation that suitable for the area in Future Renewable Center.

Keyword: Wind Turbine, Wind speed, Windmill's Blade

1. บทนำ

ในปัจจุบันเมื่ออัตราการเติบโตทางเศรษฐกิจเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรทำให้การใช้พลังงานในรูปแบบต่างๆ มีความต้องการสูงขึ้นเพราะพลังงานมีความจำเป็นต่อชีวิตประจำวัน พลังงานไฟฟ้าก็เป็นปัจจัยหนึ่งในปัจจุบันมีความต้องการอย่างมากวิกฤตการณ์และทางออกด้านพลังงาน

ได้ทวีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้นทั้งจากการขาดแคลนแหล่งพลังงาน รวมไปถึงผลกระทบต่อการใช้พลังงานที่มีต่อสภาพสิ่งแวดล้อมโลกต่างตระหนักถึงวิกฤตการณ์นี้จึงพยายามคิดค้นเพื่อหาทางออกหนทางหนึ่งในการแก้ไขวิกฤตการณ์ดังกล่าวคือการใช้พลังงานทดแทนและพลังงานหมุนเวียนพลังงานลมจึงเป็นที่น่าสนใจ

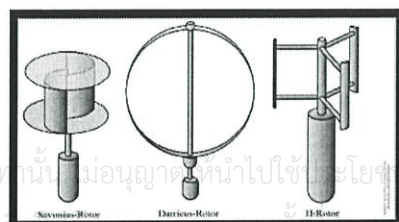
สำหรับการนำมาใช้ในประเทศไทยดังนั้นการศึกษาเทคโนโลยีกังหันลมจึงเป็นสิ่งที่จะต้องนำมาใช้ในอนาคตเพื่อการประยุกต์ใช้พลังงานทดแทนคือพลังงานลมกับประเทศไทยอย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบและการบริหารจัดการระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลมโดยศึกษาเทคโนโลยีของกังหันลมโดยศึกษาพิจารณากังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก 10 กิโลวัตต์เนื่องจากมีขนาดเหมาะสมกับพื้นที่และศักยภาพการผลิตไฟฟ้าของพื้นที่พิจารณาทั้งกังหันลมแกนอนและแกนตั้ง การพิจารณาเลือกกังหันลมมีเงื่อนไขโดยประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าในความเร็วลมของพื้นที่ติดตั้งอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยกังหันในระบบมาตรฐานของกังหันลมราคาของกังหันลมและรูปร่างความเหมาะสมกับพื้นที่ติดตั้งเพื่อติดตั้งเพื่อการใช้งานกับประเทศไทยเริ่มจากพื้นที่ชุมชนขนาดเล็กและขยายผลต่อเนื่องสู่ชุมชนที่ใหญ่ขึ้นรวมทั้งศึกษาความเพียงพอในการจ่ายโหลดหนึ่งๆและอาจนำไปขยายผลสู่การจำหน่ายไฟฟ้าให้กับการไฟฟ้า

2. กังหันลมผลิตไฟฟ้า[1]

- กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆคือ

1. กังหันลมแนวแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนและใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบทำให้สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง มีการใช้ใช้งานกังหันลมแบบนี้มีน้อยมาก มี 3 รูปแบบหลักๆคือ แบบ Savonius Rotor (รูปตัว S) , แบบ Darrieus Rotor (รูปตัว O) และแบบ H-rotor



รูป ง-1 ชนิดของกังหันลมแนวตั้ง

ในปัจจุบันยังมีกังหันลมชนิด Helix Wind ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีกังหันลมแนวตั้งสมัยใหม่โดยอาศัยหลักการเช่นเดียวกับกังหันใบเวนิสโรเตอร์อาศัยหลักการของเกลียวของการหมุนของใบและยังสามารถประกอบหรือติดตั้งได้ง่ายเหมือนกังหันลมแนวอนแต่ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าถึง 60%



รูป ง-2 กังหันลมชนิด Helix Wind

2. กังหันลมแนวแกนอน(Horizontal Axis Wind Turbine) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับทิศทางของลมโดยมีใบพัดเป็นตัวตั้งฉากกับแรงลมมีอุปกรณ์ควบคุมกังหันให้หันไปตามทิศทางของกระแสลมเรียกว่าหางเสือและมีอุปกรณ์ป้องกันกังหันชำรุดเสียหายขณะเกิดลมพัดแรง โดยกังหันลมในแนวอน แบ่งได้เป็น 3 ชนิด

- a)fixed speed with directly grid-couple (asynchronous) squirrel cage induction generator
- b)variable speed with doubly fed induction generator
- c)variable speed based on a direct drive synchronous generator

2.1 ผลกระทบของการใช้กังหันลม[2]

- 1.ขนาดพื้นที่ที่ต้องใช้ในการติดตั้งกังหันจะต้องติดตั้งอยู่ห่างกันห้าถึงสิบเท่าของความสูงกังหันเพื่อที่กระแสลมต้องการระยะห่างระหว่างกันถึง 0.5 - 1 กิโลเมตร
- 2.ทัศนวิสัยสำหรับผลกระทบทางด้านสายตาหรือการมองเห็นของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้านั้นยังไม่ได้มีการประเมินผลออกมาอย่างชัดเจน
- 3.เสียงรบกวนเสียงของกังหันลมเกิดจากการหมุนของปลายใบพัดตัดกับอากาศจากการที่ใบพัดหมุนผ่านเสากังหันเสียงดังของกังหันลมผลิตไฟฟ้า
- 4.นกมีผลการศึกษาจากหลายแห่งที่ขัดแย้งกันสำหรับสาเหตุการตายของนกจากการบินชนกังหันลมที่กำลังหมุนอยู่
- 5.คลื่นสนามแม่เหล็กรบกวนสัญญาณโทรทัศน์คลื่นวิทยุและเรดาร์สามารถถูกรบกวนได้จากการหมุนของกังหันลม
- 6.ความยั่งยืนปัจจุบันกระแสของความยั่งยืน(sustainable) และเทคโนโลยีที่ปลอดมลพิษ(zero-emission technology)

3. ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 การเลือกเทคโนโลยีของกังหันลมให้เหมาะสมกับการติดตั้งในประเทศไทย

คณะผู้ศึกษาได้ทำการเลือกพิกัดกำลังของกังหันลมที่ 10kW มาใช้ เนื่องจากขนาดพิกัดกำลัง 10kW นั้น เป็นพิกัดที่เหมาะสมที่ความเร็วลมเฉลี่ยในประเทศไทยสามารถที่จะผลิตได้ ในส่วนของเรื่องการเลือกเทคโนโลยีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้เลือกใช้เทคโนโลยีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบ PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) โดยกำหนดขนาดของใบพัดไว้ที่ เส้นผ่านศูนย์กลาง 8m เมื่อได้บริษัทที่ตรงความต้องการแล้ว จึงนำ Power Curve ของแต่ละบริษัทที่หามาได้ มาเปรียบเทียบค่า % C_f โดยคณะผู้ศึกษาได้เลือกบริษัท Hopeful และ Aeolos ซึ่งมีค่า % C_f อยู่ในช่วงที่รับได้

3.2 การเลือกรูปแบบ Airfoil จากค่า Reynolds Number

เราจะใช้ค่า ความเร็วลมเฉลี่ยในพื้นที่เป็นตัวอย่างอิง โดยความเร็วลมเฉลี่ยได้คือ 4.3 m/s และออกแบบความกว้างของใบไว้ที่ 0.717 เมตร จะได้ค่า Reynolds Number ประมาณ 220,000 จึงทำการเลือก Airfoil ที่เหมาะสมในช่วงค่า Reynolds Number อยู่ระหว่าง 50,000-1,000,000 ในขั้นตอนต่อไป การเลือก Airfoil นั้น ผู้ทำการศึกษาได้ใช้มาตรฐานของ NREL (National Renewable ซึ่งเลือกใช้ Airfoil NREL's s822

3.3 การคำนวณแรงลมที่กระทำต่อกังหันลม[3]

- การคำนวณแรงลมมี 2 วิธีคือ
- 1.วิธีแรงสถิตย์ (Static Approach) วิธีการนี้ใช้ข้อกำหนดของ Uniform Building Code, UBC-1994
 - 2.วิธีแรงจลน์ (Dynamic Method) วิธีการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างอาคารเพื่อใช้ในการออกแบบที่ให้ผลดีที่สุดคือการทดสอบแบบจำลองของอาคารและสภาพแวดล้อมจำลองด้วยอุโมงค์ลม (wind tunnel test) แต่วิธีการทดสอบนี้เป็นขบวนการที่ซับซ้อน มีระบุอยู่ในข้อกำหนดของ National Building Code of Canada, NBCC ในปัจจุบัน

4. ผลการดำเนินงาน

4.1. เปรียบเทียบเทคโนโลยีและประสิทธิภาพของกังหันลม

หลังจากเลือกบริษัทที่มีเทคโนโลยีและประสิทธิภาพที่ต้องการ นำกังหันลมเทคโนโลยีของบริษัทเหล่านั้น มาเปรียบเทียบกับ โดยอ้างอิงจาก Power Curve และความเร็วลมในพื้นที่ติดตั้ง แสดงในตารางที่ ๓-1

ตาราง ๓-1 เปรียบเทียบ specification ของกังหันลม

เทคโนโลยี	เทคโนโลยีที่ 1	เทคโนโลยีที่ 2	Purpose
Specification			
Power Output	10kW	10kW	10kW
เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด	8 m	8 m	10 m
Cut-in Speed	2.5 m/s	3 m/s	2 m/s
Rated Speed	10 m/s	10 m/s	8 m/s
Cut-out Speed	16 m/s	ไม่ได้ระบุไว้	25 m/s
Rotor Speed	180 rpm	180 rpm	120 rpm
Generator Type	PMSG	PMSG	PMSG
%Cf	24.47%	19.78%	38.56%

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่ากังหันลมที่ออกแบบเอง มีค่า %Cf สูงที่สุด ซึ่งแสดงว่ากังหันลมที่ออกแบบเอง เหมาะสมกับความเร็วลมในประเทศไทยมากกว่า เทคโนโลยีกังหันลมจากบริษัททั่วไป อีกทั้งยังมีความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ต่ำกว่าด้วย

4.2 การคำนวณ Bending Moment

ในการคำนวณ Bending moment ของกังหันลม ข้อมูลที่จำเป็นคือ ขนาดน้ำหนักของส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด การคำนวณ Bending Moment จะต้องคำนึงถึง น้ำหนักอุปกรณ์, แรงที่กระทำจากลม และฐานราก โดยเลือกคำนวณของบริษัท Acolos เนื่องจากมีน้ำหนักมากที่สุดที่ 970 กิโลกรัมแรงที่กระทำจากลมตามข้อกำหนดของ Uniform Building Code, UBC-1994 จากสมการ

$$P = C_e C_q q_s I_w$$

P คือ แรงดันบนอาคาร, กิโลกรัม/ตารางเมตร

C_e คือ สัมประสิทธิ์ซึ่งคำนึงถึงความสูง ภูมิประเทศที่อาคาร ตั้งรวมทั้งลักษณะการพักรร โขกของแรง

C_q คือ สัมประสิทธิ์แรงดันลม

q_s คือ แรงดันลมมีค่าเท่ากับ $0.004826 V^2$,

กิโลกรัม/ตารางเมตร เมื่อ V เป็นความเร็วลมซึ่งวัดที่ความสูงมาตรฐาน 10 เมตร จากพื้นดิน โดยวัดเป็นค่าเฉลี่ยในช่วงคาบเวลา 50 ปี, กิโลกรัม/ชั่วโมง

I_w คือ สัมประสิทธิ์ความสำคัญของอาคาร

ใช้ที่ลม 25 เมตร/วินาที ซึ่งคำนวณได้จากแรงลมที่กระทำต่อกังหันลมเป็น 700 กิโลกรัม ส่วนฐานราก ออกแบบให้มีความกว้าง 3 เมตร ยาว 3 เมตรหนา 0.30 เมตร บุคดินลึก 1.50 เมตร โดยเลือกเสาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มิลลิเมตร หนา 9 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถคำนวณแรงลมสูงสุดที่ฐานรากสามารถรับได้ก่อนเกิดการหมุนหรือล้มเป็น 1,887.3 กิโลกรัม เมื่อนำค่ามาเปรียบเทียบกับน้ำหนักรวมของกันหันแล้วจะพบว่า ค่าที่คำนวณมาได้จะมากกว่าแรงลมที่กระทำต่อกังหันลม ดังนั้นฐานรากนี้ สามารถรับแรงลมได้อย่างปลอดภัย จากนั้นตรวจสอบความสามารถรับแรงกดของพื้นดินจากสมการ

$$\text{Max Stress ดิน} = \frac{P}{A} + M \frac{Y}{I}$$

โดยที่

P = น้ำหนักที่กดทับบนฐานราก (น้ำหนักคอนกรีต + น้ำหนักดิน + น้ำหนักเสา + น้ำหนักกังหันลม)

A = พื้นที่ของฐานราก

M = ค่าโมเมนต์สูงสุดที่เกิดจากลม

Y = ระยะที่จุดศูนย์กลางของฐานราก

I = โมเมนต์ความเฉื่อย = $D^4 / 12$ เมื่อ D คือ ขนาดของฐานราก

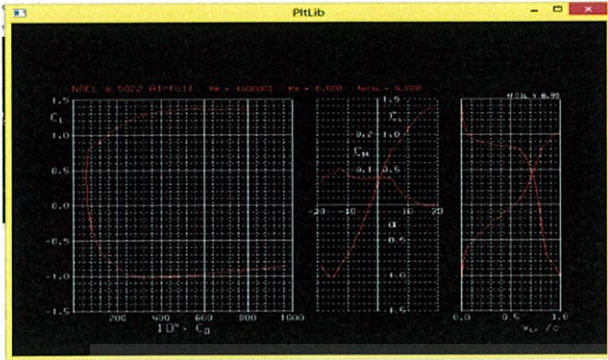
สามารถคำนวณค่า Max Stress ของดินเป็น 6,931.41 กิโลกรัม/ตารางเมตร ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งกังหันลม

เนื่องจาก ดินในพื้นที่ติดตั้งสามารถรับแรงกดได้น้อย จึงจำเป็นต้องใช้การตอกเสาเข็มให้ลึกไปจนถึงชั้นดินทราย (ที่ความลึกประมาณ 25 เมตร) หรือการเสริมความแข็งแรงของหน้าดินในพื้นที่ติดตั้ง

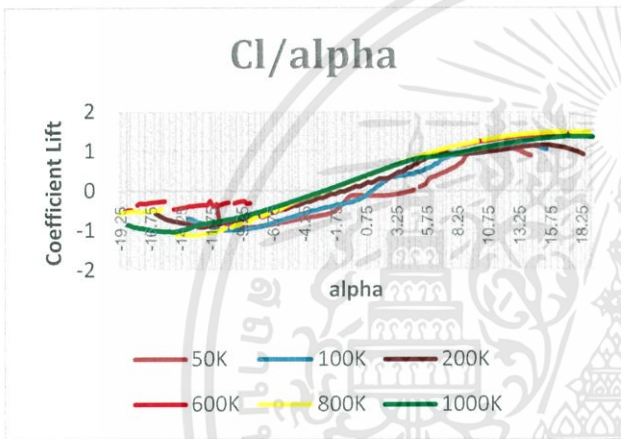
4.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพใบพัดใน Airfoil แบบต่างๆ

ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ Airfoil แต่ละตัวนั้น คณะผู้ศึกษาได้ใช้โปรแกรม XFOIL.6.99 กับ โปรแกรม GRID3.97 เพื่อทำการวิเคราะห์และออกแบบใบพัดของกังหันลมในเหมาะสมกับพื้นที่ติดตั้ง โดยใช้โปรแกรม XFOIL.6.99 ในการหาว่า Airfoil ตัวใดเหมาะที่จะนำมาใช้ จากนั้น โปรแกรม GRID3.97 ในการออกแบบใบพัด เช่น ค่าของมุมบิด และความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



รูป ง-3 ตัวอย่างการโปรแกรมใบพัดจาก XFOIL6.99 โดย Airfoil NREL's s822 ที่ Re = 1000000



รูป ง-4 กราฟความสัมพันธ์ของค่า Cl/alpha ที่ช่วง Reynolds Number ต่างๆ

5. สรุปผลการดำเนินงาน

จากการศึกษาเทคโนโลยีของกังหันลม พบว่ากังหันลมแนวอนเหมาะสมสำหรับการติดตั้งในพื้นที่ของโครงการ Future Renewable Center โดยเลือกจำนวนใบพัด 3 ใบ เมื่อระบุเทคโนโลยีและจำนวนใบพัดที่แน่นอนได้แล้ว ก็นำข้อมูล Power Curve และความเร็วลมเฉลี่ยที่ได้ไปวิเคราะห์ค่า C_f ซึ่งพบว่ากังหันลมที่ทำการออกแบบเองมีค่า C_f สูงที่สุดคือ 38.56% หลังจากขั้นตอนการเลือกเทคโนโลยีและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกังหันลม ก็จะทำการออกแบบส่วนต่างๆของกังหันลม ได้แก่ ใบพัด และเสา ในส่วนของใบพัดจากการศึกษาและวิเคราะห์ผล Airfoil ในรุ่นต่างๆ ทางผู้ศึกษาได้ทำการเลือกรุ่น Airfoil NREL's s822 ซึ่งให้ประสิทธิภาพได้สูงที่สุดในพื้นที่ความเร็วลมเฉลี่ยของโครงการเมื่อเทียบกับ Airfoil ที่อยู่ในช่วง Reynolds Number ที่ใช้งานคือ 50,000-1,000,000 โดยทำการออกแบบจากโปรแกรม

XFOIL6.99 และทำการออกแบบถึงความกว้างยาว และมุมบิดของใบพัด โปรแกรม GRID3.97

ในส่วนของเสาได้เลือกใช้เสาแบบ Monopole เนื่องจากเสาแบบ Monopole มีฐานเล็ก ทำให้ใช้พื้นที่น้อย จึงสร้างแรงสั่นสะเทือนน้อย และมีความสวยงาม วัสดุที่ใช้ทำเสาเป็น ss400 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร หนา 9 มิลลิเมตร (หากต้องการเพิ่มความปลอดภัยอาจพิจารณาใช้ความหนา 12 มิลลิเมตร) โดยฐานรากมีความกว้าง 3 เมตร ยาว 3 เมตร หนา 0.3 เมตร ขุดดินลึก 1.50 เมตร แต่เนื่องจากดินในพื้นที่ไม่เหมาะสมกับการสร้างสิ่งปลูกสร้างที่มีน้ำหนักมาก ทางคณะผู้ศึกษาจึงเห็นว่าอาจจะจำเป็นต้องมีการดองเสาเข็มในลักษณะถึงชั้นดินทราย (ลึก 25 เมตร) หรือการเสริมความแข็งแรงของหน้าดินด้วยวิธีอื่นๆ

เนื่องจากพบว่าพื้นที่ตั้งโครงการ Future Renewable Center มีความเร็วเฉลี่ยในระดับปานกลางทำให้การผลิตกำลังไฟฟ้าจากกังหันลมได้ไม่เต็มพิกัดแต่เนื่องจากการศึกษานี้เป็นการศึกษาเพื่อขยายผลต่อเนื่อง ผู้พื้นที่ต่างๆในประเทศซึ่งพบว่ามีหลายแห่งที่มีความเร็วลมสูง เช่น ทางภาคใต้ ชายฝั่งทะเลหรือบนภูเขาสูง บางแห่งที่ไฟฟ้ายังเข้าไม่ถึงการนำเอากังหันลมไปใช้จึงสามารถให้ประโยชน์ได้สูงมาก อาจนำไปติดตั้งบนอาคารสูงซึ่งช่วยประหยัดต้นทุนเนื่องจากไม่ต้องใช้เสาสูง พร้อมด้วยความเร็วลมแปรผันตามความสูงก็จะช่วยให้อาคารประหยัดค่าไฟฟ้าได้สูงขึ้น อีกทั้งยังช่วยประเทศชาติประหยัดพลังงานดังที่ได้รับแรงกล้าในปัจจุบัน

เอกสารอ้างอิง

[1] รีเจียน เอนเนอร์จี, เทล โน โลยีพลังงานลม [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.region1.energy.go.th/0gkramrukanganrom/wind/4.pdf>

[2] รีเจียน เอนเนอร์จี, ผลกระทบของการใช้กังหัน[ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.region1.energy.go.th/0gkramrukanganrom/wind/8.pdf>

[3] ไพบูลย์ ปัญญาคะโป, “การออกแบบอาคาร”, กรุงเทพฯ, ไลบรร์รี่นาย, 2535.

[4] Hopeful, H8-10K (10KW Horizontal-Axis Wind Turbine) [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.hopefulenergy.com/product/h8-10k-10kw-wt.html>

[5] Aeolos, 10kW Wind Turbine [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.windturbinestar.com/10kwh-aeolos-wind-turbine.html>

ประวัติผู้เขียน



นายปूरณัฐ สวงสุข (ปूरณัฐ)

เกิดวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2535

ที่อยู่ 39/46 หมู่ 2 ถ.งามวงศ์วาน ซ.งามวงศ์วาน 7 ต.บางเขน อ.เมือง

จ.นนทบุรี 11000

จบมัธยมศึกษาตอนปลายที่ โรงเรียนราชวินิต มัธยม

เบอร์โทรศัพท์ 086-3996975

E-mail address : total_spoom@hotmail.com



นายพาทุกษ์ พวงบานเย็น (ปาน)

เกิดวันที่ 28 สิงหาคม พ.ศ. 2535

ที่อยู่ 71 หมู่ 4 ต.ปากท่า อ.ท่าเรือ จ.พระนครศรีอยุธยา 13130

จบมัธยมศึกษาตอนปลายที่ โรงเรียนอยุธยาวิทยาลัย

เบอร์โทรศัพท์ 090-1141702

E-mail address : Hinata_boyz@hotmail.com



นายสยาม ทองนาค (ไผ่)

เกิดวันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ. 2534

ที่อยู่ 574 หมู่ 10 ถ.เถกิงพล ต.สุนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

จบมัธยมศึกษาตอนปลายที่ โรงเรียนมารีย์วิทยา จ.นครราชสีมา

เบอร์โทรศัพท์ 080-4666661

E-mail address : fireyen_siam@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้