

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพกังหันลมแกนตั้งชนิด 5 ใบขนาด 3 กิโลวัตต์

THE EFFICIENCY ANALYSIS OF 3 kW 5 BLADES

VERTICAL AXIS WIND TURBINES



ศราวุธ เอกบาง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพกังหันลมแกนตั้ง

ชนิด 5 ใบขนาด 3 กิโลวัตต์

ศราวุธ เอกบาง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ประสิทธิภาพกังหันลมแกนตั้งชนิด 5 ใบขนาด 3 กิโลวัตต์
The Efficiency Analysis of 3 kW 5 blade Vertical Axis Wind Turbines
ชื่อ - นามสกุล นายศราวุธ เอกบาง
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิรัช โยชนรินทร์, Ph.D.
ปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญยฤทธิ์ ประสาทแก้ว, D.Eng.)

..... กรรมการ
(อาจารย์อำพล อากาศนगर, ปร.ด.)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภาณุ ประทุมพรรัตน์, Ph.D.)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิรัช โยชนรินทร์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 4 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพกังหันลมแกนตั้งชนิด 5 ใบขนาด 3 กิโลวัตต์
ชื่อ-นามสกุล	นายศราวุธ เอกบาง
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิรัช โยชนรินทร์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2559

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อทำการวิเคราะห์กังหันลมแกนตั้ง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เมตร จำนวนใบกังหันลม 5 ใบมีน้ำหนัก 80 กิโลกรัมมีรูปทรงหยดน้ำรุ่น R1235 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขนาดไม่เกิน 3 กิโลวัตต์น้ำหนัก 328 กิโลกรัม

ผลการศึกษาครั้งนี้พบว่ากังหันลมแกนตั้งมีความสามารถในการรับแรงลมที่เข้ามาปะทะได้ทุกทิศทางความเร็วลมที่เริ่มหมุนตัวกังหันอยู่ที่ 3-3.5 เมตรต่อวินาทีในขณะที่กังหันลมหมุนทำงานไม่เกิดเสียงดังรบกวนและพบว่าที่ความเร็วลม 14 เมตรต่อวินาทีให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานลมของกังหันเท่ากับ 0.19 ในการติดตั้งสามารถทำได้ง่ายสะดวกใช้คนและเครื่องจักรน้อยเนื่องจากมีระดับความสูงจากพื้นดินเพียง 5.5 เมตร

ผลการศึกษาโดยใช้เทคโนโลยี CAE ศึกษาความแข็งแรงของโครงสร้างของกังหันลมแกนตั้งพบว่าที่ความเร็วลม 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมงความเร็วรอบ 110 รอบต่อนาที ความแข็งแรงของวัสดุที่เกิดขึ้นมีค่าความปลอดภัยสามารถติดตั้งใช้งานได้จริงโดยที่พบว่าในสภาวะการทำงานจริงของกังหันลมที่ระดับความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาทีแสดงค่าประสิทธิภาพสูงสุด ที่ 0.33

คำสำคัญ: พลังงานลม กังหันลมแกนตั้ง รูปทรงหยดน้ำ

Thesis Title The Efficiency Analysis of 3 kW 5 blade Vertical Axis Wind Turbines
Name - Surname Mr.Sarawut Ekbang
Program Mechanical Engineering
Thesis Advisor Assistant Professor Wirachai Roynarin, Ph.D.
Academic Year 2016

ABSTRACT

This thesis is to analyse a 5 blades vertical axis wind turbine with blade diameter of 3 meters and the total weight of 80 kg. The generator will be limited to 3 kW with the weight of 328 kg. The selected airfoil is R1235.

The results of this study found that the vertical axis wind turbine has the ability to collect wind energy in all directions of the wind flows. The cut-in speed of wind turbines is around 3-3.5 m/s which it will not create noise impact. The power coefficient of 0.19 has been examined with the wind speed at 14 m/s. The installation will be simple due to the height of the wind turbine is only 5.5 meters above the ground.

The results of the study by using CAE technology, the strength of vertical axis wind turbine has been analysed to withstand at wind speed of 90 km/h and the speed of 110 rpm. Thus the strength of the materials are secured for installation. Additionally the efficient of the machine at over wind speed at 7 m/s show power coefficient of 0.33.

Keywords: wind energy, vertical axis wind turbine, airfoil

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัช โยชนรินทร์ ซึ่งเป็นผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ให้คำแนะนำรวมถึงการแก้ปัญหาต่างๆและให้ความช่วยเหลือในระหว่างการทำงานวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบคุณบุคลากรทุกท่านของ ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ทุกท่านที่ช่วยเหลือในด้านข้อมูลและสถานที่ ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญยัถย์ ประสาทแก้ว ประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ ประทุมทรัพย์ และ ดร.อำพล อากาศนาคร ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ภรรยาและลูกชายทั้งสองคนที่คอยให้กำลังใจเสมอมาที่ทำให้สามารถฟันฝ่าอุปสรรคต่างๆไปได้ ซึ่งประโยชน์อันใดจากงานวิจัยนี้ขอมอบเป็นกตัญญูตราบาบุชาติบิดามารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนถึงผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศราวุธ เอกบาง



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(12)
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	14
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	17
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	17
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	17
บทที่ 2 ทฤษฎี เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.1 พลังงานลม.....	18
2.2 ประสิทธิภาพกังหันลม.....	21
2.3 อัตราส่วนความเร็วสูงสุด.....	23
2.4 การเกิดแรงของรูปร่างหยดน้ำ.....	24
2.5 กังหันลม.....	27
2.6 ศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทย.....	30
2.7 ทฤษฎีการออกแบบใบกังหันลม.....	31
2.8 ความแข็งแรงของวัสดุ.....	39
2.9 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	44
2.10 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ.....	46
2.11 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	49

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	52
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	54
3.2 เครื่องมือวัด.....	55
3.3 การทดลองและตารางการเก็บข้อมูล	57
3.4 พื้นที่ดำเนินการศึกษาวิจัย	64
บทที่ 4 ผลการวิจัย	65
4.1 ผลจากการศึกษาคุณสมบัติความแข็งแรงของโครงสร้างกั้นลมแกนตั้ง.....	65
4.2 ผลจากการศึกษาประสิทธิภาพกั้นลมแกนตั้ง	73
4.3 แสดงผล power curve ที่เกิดขึ้น	86
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	90
5.1 สรุปผลและอภิปรายผล.....	90
5.2 ข้อเสนอแนะ	91
บรรณานุกรม	92
ภาคผนวก.....	95
ก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	96
ข การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์	108
ประวัติผู้เขียน	124

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ผลการเปรียบเทียบมุมปะทะของรูปร่างหยดน้ำ รุ่น S-1223	27
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลกึ่งहनลมแกนตั้ง	53
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลวัสดุกึ่งहनลมแกนตั้ง	59
ตารางที่ 3.3 ตารางข้อมูลหาประสิทธิภาพกึ่งहनลม	64
ตารางที่ 4.1 ค่าที่ได้จากบริษัทและค่าจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ระดับความเร็วลมต่างๆ ...	82
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณ ที่ระดับความเร็วลมต่างๆ	86
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าที่ได้จากกึ่งहनลมทำงานจริงที่ระดับความเร็วลมต่างๆ	87
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าที่ได้จากกึ่งहनลมระดับความเร็วลมในช่วง 0-8เมตรต่อวินาที	89



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 กังหันลมแกนตั้ง.....	15
รูปที่ 1.2 กังหันลมหมุนแกนนอน	16
รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของลมในชั้นบรรยากาศ.....	19
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ.....	20
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะประสิทธิภาพของกังหันลมชนิดต่างๆ.....	22
รูปที่ 2.4 แสดงอัตราส่วนความเร็วสูงสุด	23
รูปที่ 2.5 แสดงต้นแบบของรูปร่างหยดน้ำ รุ่น S-1223.....	24
รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดแรงยกและแรงผลักบนเพนอากาศ.....	25
รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะกราฟสัมประสิทธิ์แรงยก.....	26
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะกราฟสัมประสิทธิ์แรงผลัก	26
รูปที่ 2.9 แสดงกังหันลมแบบแกนนอน	28
รูปที่ 2.10 แสดงกังหันลมแบบแกนตั้ง.....	28
รูปที่ 2.11 ใบกังหันลมชนิดต่างๆ.....	29
รูปที่ 2.12 แสดงความเร็วลมตลอดปีในประเทศไทย	30
รูปที่ 2.13 แสดงหลักการของทฤษฎี Momentum theory	31
รูปที่ 2.14 แรงต่างๆที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดรูปหยดน้ำของกังหันลม.....	36
รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะของแรงต่างๆที่เกิดขึ้นบนหน้าตัด	41
รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียดของวัสดุ	42
รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียดของวัสดุเหนียว.....	42
รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียดของวัสดุเปราะ	43
รูปที่ 2.19 การสร้างแบบจำลองของกังหันลม	47
รูปที่ 2.20 ลักษณะการกำหนดค่าต่างๆที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของกังหันลม	48
รูปที่ 3.1 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนตั้งชนิด 5 ใบขนาด 3 กิโลวัตต์.....	52
รูปที่ 3.2 แผนภูมิขั้นตอนในการดำเนินงานศึกษา.....	54
รูปที่ 3.3 เซ็นเซอร์ตรวจวัดรอบ	55
รูปที่ 3.4 เครื่องมือวัดความเร็วลม	55

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.5 วัดคัมมิเตอร์	56
รูปที่ 3.6 Digital Clamp Multimeters	56
รูปที่ 3.7 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ชิ้นส่วนกัณฑ์ลม	57
รูปที่ 3.8 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์กัณฑ์ลมประกอบเสร็จ	58
รูปที่ 3.9 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มุมมองด้านบนกัณฑ์ลม	59
รูปที่ 3.10 กำหนดค่าการจำลองสภาวะงานที่เกิดขึ้นทางคอมพิวเตอร์	60
รูปที่ 3.11 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการแบ่งชิ้นส่วนภายใน	60
รูปที่ 3.12 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการแบ่งชิ้นส่วนภายในของใบกัณฑ์	61
รูปที่ 3.13 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการแบ่งชิ้นส่วนภายในของชุดจับยึดใบกัณฑ์ ...	62
รูปที่ 3.14 แสดงผลโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	63
รูปที่ 3.15 สถานที่ดำเนินการศึกษา	64
รูปที่ 4.1 แสดงผลด้วยค่าตามจุดสี่ที่เกิดขึ้น	65
รูปที่ 4.2 แสดงค่าแรงดันและทิศทางที่เกิดขึ้นตามแนวแรงปะทะ	66
รูปที่ 4.3 แสดงค่าความเร็วลมและทิศทางที่เกิดขึ้น	67
รูปที่ 4.4 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่างๆตามเจดีย์	67
รูปที่ 4.5 แสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่างๆของกัณฑ์	68
รูปที่ 4.6 แสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณใบกัณฑ์	69
รูปที่ 4.7 แสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณชุดจับยึดแกน ใบกัณฑ์	70
รูปที่ 4.8 แสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่างๆ	71
รูปที่ 4.9 แสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณเสา กัณฑ์ที่ตำแหน่งต่างๆตามเจดีย์	72
รูปที่ 4.10 แสดงผลการใช้โปรแกรมCFD วิเคราะห์กัณฑ์ลมผลิตไฟฟ้าแกนตั้ง	73
รูปที่ 4.11 แสดงผลการวิเคราะห์กัณฑ์ลมผลิตไฟฟ้าแกนตั้งมองจากด้านบน	74
รูปที่ 4.12 แสดงผลการวิเคราะห์กัณฑ์ลมผลิตไฟฟ้าแกนตั้งมองจากด้านข้าง	75
รูปที่ 4.13 แสดงผลแนวกระแสลมที่วิ่งเข้าปะทะบริเวณริมขอบบนด้านข้างกัณฑ์ลม	76
รูปที่ 4.14 แสดงผลแนวกระแสลมที่วิ่งเข้าปะทะบริเวณช่วงกลางกัณฑ์ลม	77
รูปที่ 4.15 แสดงผลแนวกระแสลมที่วิ่งเข้าปะทะบริเวณริมขอบล่างด้านข้างกัณฑ์ลม	78
รูปที่ 4.16 แสดงผลแนวกระแสลมที่วิ่งเข้าปะทะบริเวณระนาบด้านบนกัณฑ์ลม	79

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.17 แสดงผลแนวกระแสลมที่วิ่งเข้าปะทะบริเวณระนาบช่วงกลางกังหันลม	80
รูปที่ 4.18 แสดงผลแนวกระแสลมที่วิ่งเข้าปะทะบริเวณระนาบด้านล่างกังหันลม	81
รูปที่ 4.19 แสดงผลความเร็วลมกับแรงบิด	83
รูปที่ 4.20 แสดงผลความเร็วลมกับความเร็วรอบ	84
รูปที่ 4.21 แสดงผลการเปรียบเทียบ Power Curve ที่ความเร็วลม 0 – 14 เมตรต่อวินาที	85
รูปที่ 4.22 Power Curve VAWT	86
รูปที่ 4.23 แสดงผล Power Curve ที่ความเร็วลม 0 – 7.3 เมตรต่อวินาที	88
รูปที่ 4.24 แสดงผล Power Curve ที่ความเร็วลม 0 – 8 เมตรต่อวินาที	89



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
A	พื้นที่กวาดใบ	ตารางเมตร
A_0	พื้นที่หน้าตัดทางเข้าของอุโมงค์ลม	ตารางเมตร
A_1	พื้นที่หน้าตัดทางออกของอุโมงค์ลม	ตารางเมตร
a	ปัจจัยที่รบกวนตามแนวแกน (Axial Interference Factor)	-
a'	ปัจจัยที่รบกวนตามแนวขวาง (Cross Flow Factor)	-
C_D	สัมประสิทธิ์แรงผลึก (Drag Coefficient)	-
C_L	สัมประสิทธิ์แรงยก (Lift Coefficient)	-
C_p	สัมประสิทธิ์กำลัง	-
D	แรงผลึก (Drag Force)	นิวตัน
E_K	พลังงานจลน์	จูล
L	แรงยก (Lift Force)	นิวตัน
N	ความเร็วรอบของกังหันลม	รอบต่อนาที
P_0	ความดันบรรยากาศทั่ว ๆ ไป	นิวตันต่อตารางเมตร
P_2	ความดันของอากาศที่ไหลผ่านตัวใบกังหัน	นิวตันต่อตารางเมตร
P_3	ความดันของอากาศก่อนที่จะปะทะตัวใบกังหัน	นิวตันต่อตารางเมตร
P_a	พลังงานที่ได้จากลม	วัตต์
P_w	พลังงานที่ได้จากกังหันลม	วัตต์
Q	อัตราการไหลของอากาศ	ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
R	รัศมีของใบกังหัน	เมตร
T	อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส
TSR	อัตราส่วนความเร็วสูงสุด (Tip Speed Ratio)	-
U	ความเร็วสัมผัสของใบกังหันลม	เมตรต่อวินาที
u	ความเร็วลมก่อนเข้าถึงด้านหน้าของใบกังหัน	เมตรต่อวินาที
u_1	ความเร็วลมหลังจากผ่านตัวใบกังหัน	เมตรต่อวินาที
m_a	มวลของอากาศ	กิโลกรัม

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
V_0	ความเร็วลมทางด้าน เข้า-ออก	เมตรต่อวินาที
V_∞	ความเร็วลมก่อนเข้าท่ออุโมงค์ลม	เมตรต่อวินาที
ρ_a	ความหนาแน่นของอากาศ	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
Ω	ความเร็วเชิงมุม	เรเดียนต่อวินาที



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันสถานการณ์ความต้องการใช้พลังงานในทุกภาคส่วนนับวันจะยังมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเนื่องมาจากแหล่งพลังงานหลักของโลกย่อมค่อยๆลดปริมาณลงตามเวลา พลังงานลม เป็นทางเลือกหนึ่งในการนำมาทดแทนพลังงานในรูปแบบอื่น หากได้มีการพัฒนาการใช้ประโยชน์อย่างจริงจังและมีประสิทธิภาพก็จะเป็นพลังงานทดแทนที่สำคัญและมีประสิทธิภาพ พลังงานลม เป็นพลังงานจากธรรมชาติที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยอาศัยเครื่องมือที่เรียกว่า “ กังหันลม ” (Wind Turbine) เป็น ตัวสกัดกั้นพลังงานจลน์ของกระแสลม แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานกล จากนั้นจึงนำพลังงานกลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ นับตั้งแต่ประเทศไทยต้องเผชิญกับปัญหาวิกฤติการณ์ราคาน้ำมันที่พุ่งสูงขึ้น การพึ่งพาน้ำมันจากต่างประเทศเพียงอย่างเดียวจึงเป็นเรื่องที่หลายฝ่ายเกิดความวิตกกังวลถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อประเทศ พลังงานทดแทนจึงเป็นทางเลือกใหม่ในท่ามกลางวิกฤติปัจจุบัน ข้อดีของพลังงานลมที่มีต่อธรรมชาติ พบว่า พลังงานลมเป็นพลังงานที่ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่มีวันหมด กังหันลม คือ ชุดเครื่องจักรกลชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของลมให้เป็นพลังงานกล และนำพลังงานกลมาใช้กับระบบผลิตไฟฟ้า โดยทั่วไปกังหันลมแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดตามแกนหมุนของกังหันลมได้แก่ กังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine,VAWT) และกังหันลมแกนหมุนแนวนอน(Horizontal Axis Wind Turbine,HAWT)

ในการเลือกกังหันลมผลิตไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้งานสิ่งสำคัญที่ต้องการทราบ คือ กังหันลมผลิตไฟฟ้าจะทำให้เกิดกำลังหรือพลังงานที่ต้องการใช้สูงสุดหรือต้องการให้กังหันลมผลิตไฟฟ้าผลิตที่ความเร็วรอบที่เท่าไร ความเร็วลมเริ่มต้นที่จะหมุนด้วยตัวเองจนถึงความเร็วลมที่เริ่มผลิตไฟฟ้าจนได้กำลังงานสูงสุด และต้องเริ่มหยุดการหมุนที่ความเร็วลมสุดท้ายที่เท่าไร เนื่องจากขนาดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าเป็นตัวแปรหลักในการออกแบบ สิ่งที่สำคัญอีกข้อคือต้องมีการสำรวจความเร็วลมเฉลี่ยของสถานที่ในบริเวณที่ต้องการนำกังหันลมผลิตไฟฟ้าไปใช้งานและข้อจำกัดในการใช้งาน ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงขั้นตอนการบำรุงรักษา ซึ่งจะเป็นการตัดสินใจของผู้ที่จะนำไปใช้งานต่อไป

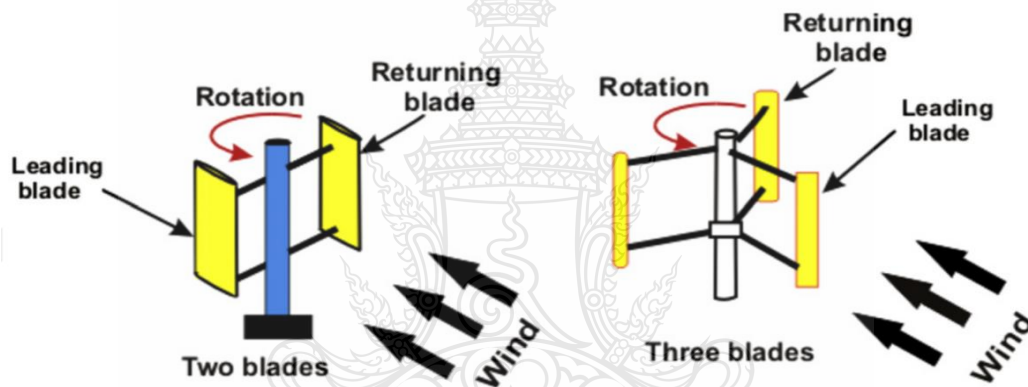
การออกแบบใบกังหันต้องออกแบบตามการนำไปใช้งานกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดปรับมุมบิดใบไม่ได้ และปล่อยให้รอบของกังหันลมไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความเร็วลมที่เข้ามาปะทะใบ เรียกกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดนี้ว่า Fixed Pitch Variable speed (F P V S)

กังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดปรับมุมบิดใบได้ เพื่อรักษารอบใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าให้คงที่ ที่ความเร็วลมต่างๆที่เข้ามาปะทะใบเรียกกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดนี้ว่า Fixed speed Variable pitch (F S V P)

ดังนั้นในการออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ผู้ออกแบบจำเป็นต้องทราบว่า จะเลือกสร้างกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดไหนก่อน เนื่องจากจะมีผลกระทบต่อระบบทุกชิ้นส่วนของกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่กังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีขนาดเกินกว่า 50 kW จะเป็นชนิดที่ 2 คือ variable pitch fixed speed เนื่องจากความสามารถในการทำงานและการป้องกันการชำรุดทำได้ง่ายกว่า

F P V S $50 \text{ kW} \leq$ Small machine wind

F S V P $50 \text{ kW} \geq$ Medium ,Big Mega wind Turbine



รูปที่ 1.1 กังหันลมหมุนแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine, VAWT) [18]



รูปที่ 1.2 กังหันลมหมุนแกนนอน(Horizontal Axis Wind Turbine,HAWT)

โดยหลักการออกแบบเชิงวิศวกรรมสำหรับงานจริงในปัจจุบันต้องเลือกใช้วัสดุที่มีโครงสร้างแข็งแรง มีน้ำหนักเบา ใช้วัสดุน้อยต้นทุนต่ำ หลีกเลี่ยงการลองผิดลองดี ดังนั้นงานออกแบบผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ชิ้นส่วนต่างๆและการบำรุงรักษาต้องประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Computer Aided Engineering (CAE) เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจริง โดยสามารถนำชิ้นงานจริงมาฝึควิเคราะห์ร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยการสร้างแบบจำลองในเครื่องคอมพิวเตอร์ แล้วทำการทดสอบทางวิศวกรรมภายใต้สภาวะแวดล้อมเสมือนจริงที่จำลองขึ้นในซอฟต์แวร์ที่ช่วยในการลดต้นทุนจากการลองผิดลองถูก ลดเวลาขั้นตอนในการออกแบบ ลดวัสดุที่ไม่จำเป็น โดยผ่านการสร้างโมเดลจำลอง กำหนดขนาด คุณสมบัติวัสดุ การเลือกและปรับแต่งขนาดรูปทรงให้เหมาะสม กำหนดสภาวะงานที่เกิดขึ้นเสมือนจริง ตั้งค่าตัวแปรต่างๆ โดยใช้เทคโนโลยี CAE ช่วยวิเคราะห์จนสามารถแก้ไขปัญหาในงานนั้นๆได้

ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์กังหันลมแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine, VAWT) ซึ่งมีจุดเด่นแตกต่างจากกังหันลมแกนนอน (Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT) โดยมีความสามารถในการรับแรงลมที่วิ่งเข้ามากระทบใบกังหันได้ทุกทิศทางที่ความเร็วลมต่างๆ โดยไม่ต้องพึ่งชุดสายหาทิศทางลม สามารถติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าได้ง่ายกว่า สามารถขยายกำลังการผลิตได้โดยการเพิ่มรัศมี ความยาวใบพัด การดูแลบำรุงรักษาทำได้ง่าย กลไกไม่ซับซ้อน ผู้วิจัยเห็นความสำคัญของพลังงานลมที่มีต่อสังคมในระยะยาว เพื่อให้เกิดการศึกษา วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานลมเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า ให้มีความเหมาะสมกับสภาพและความเร็วลมในประเทศไทยและสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้เหมาะสมกับประเทศไทยหรือประเทศอื่นๆที่มีศักยภาพพลังงานลมใกล้เคียงกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติและการทำงานของกัณฑ์ลผลิตไฟฟ้าแบบแนวแกนตั้ง
- 1.2.2 เพื่อหาความเร็วรอบที่กัณฑ์ลเริ่มผลิตไฟฟ้าและความเร็วรอบที่กัณฑ์ลผลิตไฟฟ้าแบบแนวแกนตั้งให้ประสิทธิภาพสูงสุด
- 1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการติดตั้งใช้งานจริงและการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 กัณฑ์ลที่ใช้ทดลองเป็นกัณฑ์ลผลิตไฟฟ้าแนวแกนตั้ง
- 1.3.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขนาดไม่เกิน 3 กิโลวัตต์
- 1.3.3 จำนวนใบกัณฑ์ล 5 ใบ
- 1.3.4 กัณฑ์ลผลิตไฟฟ้ามีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร
- 1.3.5 ใบกัณฑ์ลมีรูปทรงหยดน้ำ รุ่น R 1235

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้แนวทางการวิเคราะห์กัณฑ์ลแกนตั้ง
- 1.4.2 ได้แนวทางการออกแบบกัณฑ์ลแกนตั้งที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย
- 1.4.3 ได้ทราบค่าประสิทธิภาพสูงสุดของกัณฑ์ลแกนตั้ง

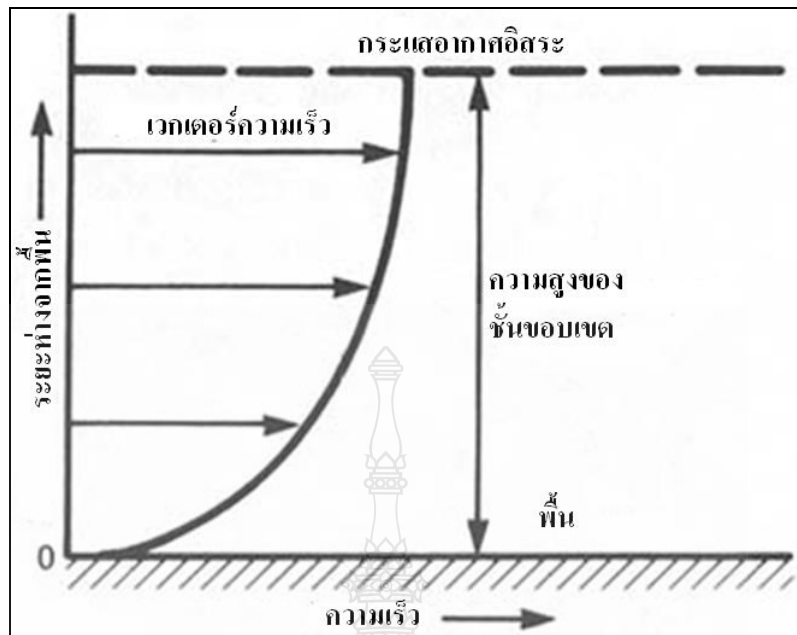
บทที่ 2

ทฤษฎีเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลังงานลม (Wind Energy)

พลังงานลม (Wind Energy) คือ การเคลื่อนตัวของมวลอากาศที่มีความแตกต่างทางด้านอุณหภูมิ ความกดดันของอากาศ และแรงจากการหมุนของโลก อากาศรับความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่แผ่รังสีความร้อนมายังโลก แต่ละตำแหน่งบนพื้นโลกได้รับปริมาณความร้อนไม่เท่ากัน ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิและความกดอากาศ บริเวณใดที่อากาศมีอุณหภูมิสูงความกดอากาศจะต่ำ อากาศบริเวณนั้นก็จะลอยตัวสูงขึ้น ส่วนบริเวณที่อากาศมีอุณหภูมิต่ำความกดอากาศจะสูงกว่าจะเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่ การเคลื่อนที่ของมวลอากาศทำให้เกิด “ลม” (Wind) พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบโลกก่อให้เกิดพลังงานลม และยังเป็นผลให้เกิดคลื่นในมหาสมุทรด้วย จากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศนี้ทำให้เกิดเป็นพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) รูปหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้

กังหันลมจะใช้ประโยชน์จากลมที่อยู่ใกล้ผิวโลก หรือที่เรียกว่าลมผิวพื้น หมายถึงลมที่พัดในบริเวณผิวพื้นโลกภายใต้ความสูงประมาณ 1 กิโลเมตรเหนือพื้นผิวดิน เป็นบริเวณที่มีการคลุกเคล้าของอากาศ และมีแรงเสียดทานอันเกิดจากแรงปะทะกับสิ่งกีดขวางในระดับต่ำ แต่ที่ระดับความสูงมากกว่า 10 เมตร ขึ้นไปแรงเสียดทานจะค่อยลดลงตามลำดับความสูง ทำให้ความเร็วลมเพิ่มขึ้นตามลำดับ แสดงไว้ใน รูปที่ 2.1 จนกระทั่งที่ระดับความสูงใกล้ 1 กิโลเมตร เกือบจะไม่มีแรงเสียดทาน ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงตามความสูง และสภาพภูมิประเทศ เช่นเดียวกันกับทิศทางของลม จากประสบการณ์ที่ผ่านมามีพบว่า กังหันลมจะทำงานได้ดีหรือไม่นั้น จะขึ้นอยู่กับตัวแปรสองตัวนี้ที่ความเร็วลมเท่าๆ กันแต่มีทิศทางลมที่ต่างกัน เมื่อพู่เข้าหาแกนหมุนของกังหันลมแล้วจะส่งผลต่อแรงบิดของกังหันลม คือ แรงลัพธ์ที่ออกจากกังหันลมจะแตกต่างกัน



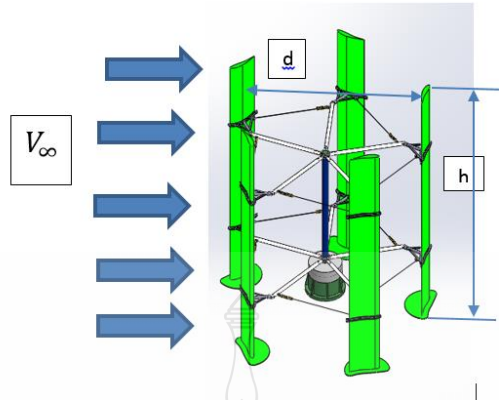
รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของลมในชั้นบรรยากาศ [13]

ดังนั้นกำลังงานจากลม เป็นพลังงานจากการเคลื่อนที่ของวัตถุขึ้นอยู่กับสองตัวแปร ได้แก่ มวล (m_a) และความเร็ว (V_∞) ถ้ามวลของอากาศคงที่ ดังนั้นพลังงานลมจึงแปรผันตามความเร็วของลม สามารถเขียนสมการพลังงานของลมได้ในรูปของพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ของลมที่เคลื่อนที่ไป เขียนได้ตามสมการที่ 2.1

$$E_K = \frac{1}{2} m_a V_\infty^2 \quad (2.1)$$

โดยที่ E_K = พลังงานจลน์ (J)
 m_a = มวลของอากาศ (kg)
 V_∞ = ความเร็วลม (m/s)

มวลของลมที่เคลื่อนที่ไปดูจาก รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของมวลของลม ด้วยความเร็ว (V_∞) ไหลผ่านใบกังหันสูง (h) และเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทาง (d)



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ

กำลังงานจากลม (Wind power) คือ งานที่ลมทำได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลา กำลังงานจากลม จึงเป็นไปตามสมการที่ 2.2

$$P_a = \frac{1}{2} \rho_a A V_\infty^3 \quad (2.2)$$

โดยที่

P_a = กำลังงานที่ได้จากลม (Watt)

ρ_a = ความหนาแน่นอากาศ (kg/m^3)

A = พื้นที่หน้าตัด (m^2)

V_∞ = ความเร็วลม (m/s)

ดังนั้นจากสมการที่ 2.2 จะเห็นได้ว่ากำลังงานของลมจะมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับความเร็วของลมและพื้นที่หน้าตัดที่รับลม โดยจะพิจารณาความเร็วของลมเป็นหลักเนื่องจากกำลังงานของลมนั้นแปรผันตามความเร็วลมยกกำลังสาม

กำลังงานจากกังหันลม (Power Wind Turbine) สำหรับค่ากำลังงานเฉลี่ยของกังหันลมสามารถหาได้จาก สมการที่ 2.3

$$P_w = \frac{1}{2} \rho_a A V_\infty^3 C_p \quad (2.3)$$

โดยที่

P_w = กำลังงานที่ได้จากกังหันลม (Watt)

ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

A = พื้นที่กวาดของใบกังหัน (m^2)

V_∞ = ความเร็วลมเข้าใบพัด (m/s)

C_p = ค่าประสิทธิภาพของกังหันลม

จากสมการที่ 2.3 จะเห็นได้ว่ากำลังงานของกังหันลม จะมีการคิดค่าประสิทธิภาพของกังหันลมด้วย ซึ่งในทางปฏิบัติจริงแล้วยังมีค่าความสูญเสีย (Losses) ในส่วนต่างๆ ของระบบอีกหลายส่วน เช่น ใบกังหันลม ระบบส่งกำลัง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งทำให้เมื่อมีการใช้งานจริงๆ จะมีประสิทธิภาพในการทำงานแค่ 35% เท่านั้นเอง

2.2 ประสิทธิภาพกังหันลม (Power Coefficient)

การวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพกังหันลม เรียกว่าค่า C_p (Power Coefficient) โดยจะได้จากการเปรียบเทียบระหว่างกำลังงานที่ได้จากกังหันลมได้ดึงเอาไว้ P_w (Power Wind Turbine) เปรียบเทียบกับกำลังงานจากลม ที่สมควรจะได้จริงจากลมที่มีการไหลอิสระ P_a (Wind Power) ถ้าวิเคราะห์ทางกลก็ คือ กำลังงาน เท่ากับ พลังงานที่ผลิตได้ต่อพลังงานที่ป้อนเข้าให้สู่ระบบนั่นเอง ในทางวิศวกรรมกังหันลมแล้วนั้นเราสามารถหาค่าประสิทธิภาพสูงสุดของใบกังหันลมได้จาก ประสิทธิภาพกังหันลม (Power Coefficient) เป็นอัตราส่วนของกำลังงานที่ได้ออกมาจากกังหันลมต่อกำลังงานของลม หรือหมายถึงประสิทธิภาพของกังหันลมในการเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานกล หรือพลังงานไฟฟ้า เป็นไปตามสมการที่ 2.4

$$C_p = \frac{P_w}{P_a} = \frac{P_w}{\frac{1}{2} \rho_a A V_\infty^3} \quad (2.4)$$

โดยที่

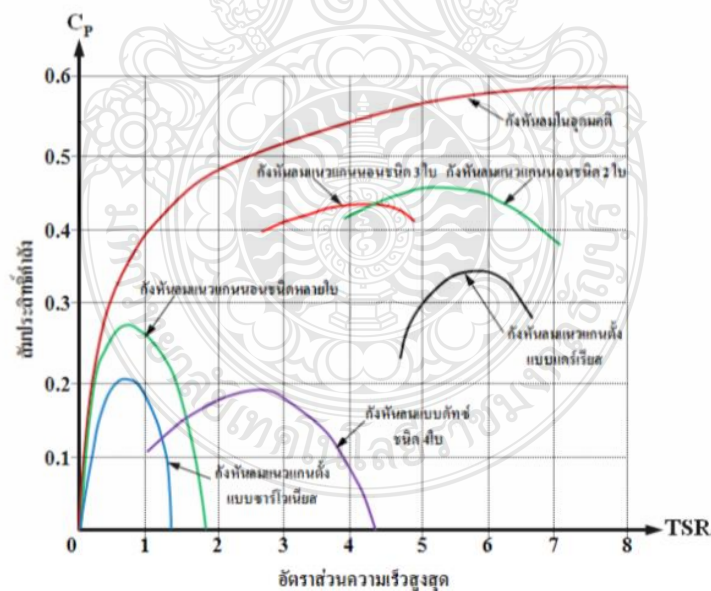
C_p = ประสิทธิภาพกังหันลม

P_w = กำลังงานจากกังหันลม หรือพลังงานไฟฟ้าจากกังหันลม (Watt)

P_a = กำลังงานจากลม (Watt)

จากสมการที่ 2.4 เราจะทราบได้ว่าค่าประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลม ซึ่งเราเรียกว่า $C_{P_{Max}}$ นั้นจะมีค่าไม่เกิน 0.5926 หรือ 16/27 นั่นคือ ถ้าลมให้พลังงานมา 100 % กังหันที่ดีที่สุดจะทำการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานทางกลได้สูงสุดไม่เกิน 59.26 % เนื่องด้วยปัจจัยหลาย ๆ อย่างที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไป โดยสามารถดูได้จากรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกังหันลมชนิดต่าง ๆ ว่าไม่มีกังหันลมชนิดใดที่สามารถออกแบบให้มีประสิทธิภาพได้ถึง 45% แต่อย่างไรก็ตามถ้าเราสามารถออกแบบชุดกังหันลมให้มีประสิทธิภาพรวม ได้ถึง 35-30 % ก็ถือว่าประสบความสำเร็จเป็นอย่างสูงเนื่องจากกังหันลมผลิตไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรที่ไม่ใช้การสันดาปเหมือนกับเครื่องยนต์ความร้อน ทำให้ไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลมจะเป็นพลังงานที่สะอาดและจะไม่มีวันหมดไปเหมือนพลังงานจากเชื้อเพลิงสารไฮโดรคาร์บอนที่จำเป็นต้องใช้การเผาไหม้ในการได้งานมานั่นเอง ดังนั้นการออกแบบระบบทางกลให้กับกังหันลมจึงต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับศักยภาพแหล่งลมในแต่ละพื้นที่ด้วย ประเทศไทยอยู่ใกล้เขตเส้นศูนย์สูตรทำให้ได้รับแรงลมเฉลี่ยต่ำถึงปานกลางจำเป็นต้องศึกษารูปแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมกับความเร็วลมที่มีอยู่ในประเทศ

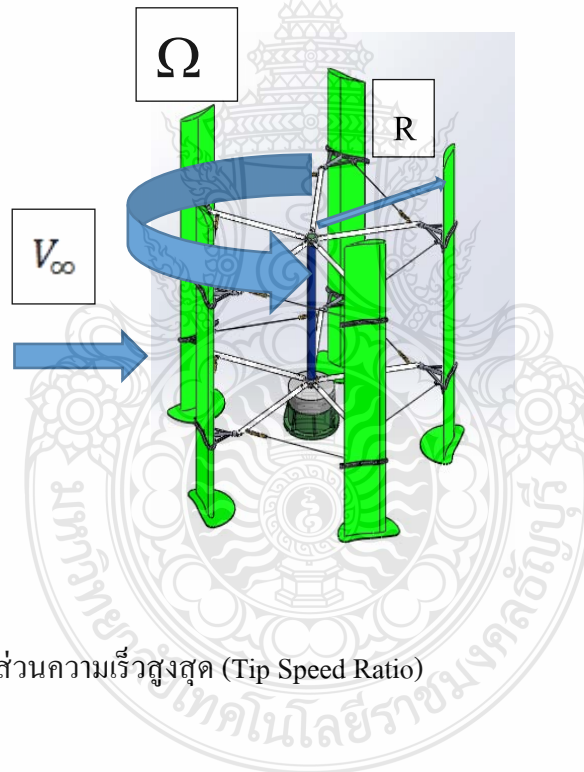
รูปแบบกังหันลมที่เหมาะสมสามารถทำงานได้ดีมีความเหมาะสมกับความเร็วลมในประเทศที่มีอยู่เป็นส่วนใหญ่และมีความสามารถในการผลิตเต็มกำลังการผลิตสูงสุดที่ความเร็วลมสำหรับความเร็วลมต่ำไปจนถึงระดับความเร็วลมปานกลาง



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะประสิทธิภาพ (Power Coefficient) ของกังหันลมชนิดต่างๆ [8]

2.3 อัตราส่วนความเร็วสูงสุด (Tip Speed Ratio)

เป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วในการหมุนที่ปลายใบกังหัน ต่อความเร็วลมที่มาปะทะใบกังหัน ในขณะที่กังหันผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาได้สูงสุด โดยที่ความเร็วลมที่มาปะทะใบกังหันนั้นจะเป็นความเร็วลมที่เราต้องการเพื่อให้กังหันผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้มากที่สุดตัวอย่าง เช่น กังหันลมที่ออกแบบมา สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 10 กิโลวัตต์ ที่ความเร็วลม 9.5 เมตรต่อวินาที อัตราส่วนความเร็วสูงสุดจะใช้ อักษรย่อว่า TSR หาได้ จากสมการที่ 2.5 ถ้าค่า TSR มีค่าสูง โดยทั่วไปจะบอกได้ว่าใบมีประสิทธิภาพสูง แต่นั่นก็หมายถึงใบจะต้องการโครงสร้างที่แข็งแรงกว่าเดิม และมีเสียงดังมากขึ้นเวลาที่ใบทำงานส่วนค่า TSR เท่ากับ 7 นั้นเรากำหนดขึ้นมาเองเพื่อใช้ในการออกแบบส่วนมากแล้วก็กำหนดไว้ประมาณ 6-8 จากรูปที่ 2.4 อัตราส่วนความเร็วรอบกังหัน ต่อความเร็วลมที่มาปะทะใบกังหันลม



รูปที่ 2.4 แสดงอัตราส่วนความเร็วสูงสุด (Tip Speed Ratio)

$$TSR = \frac{U}{V_{\infty}} = \frac{\Omega R}{V_{\infty}} = \frac{2\pi NR}{V_{\infty} 60} \quad (2.5)$$

โดยที่

TSR = อัตราส่วนความเร็วสูงสุด (Tip Speed Ratio)

U = ความเร็วสัมพัทธ์ (m/s)

V_∞ = ความเร็วลมที่มาปะทะ (m/s)

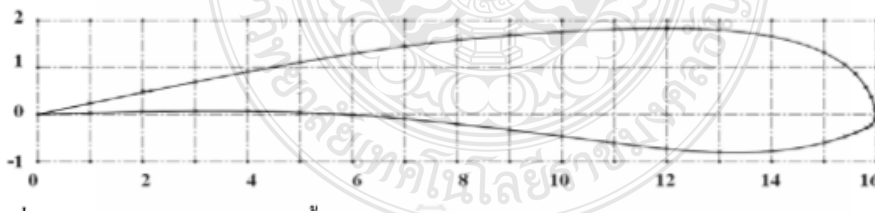
Ω = ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

N = ความเร็วรอบของกังหันลม (rpm)

R = รัศมีของใบกังหัน (m)

2.4 การเกิดแรงของรูปร่างหยดน้ำ(Airfoil)

รูปร่างหยดน้ำ (Airfoil) จะถูกนิยามเป็นวัตถุที่มีรูปร่างเพรียวตามกระแสการไหลซึ่งออกแบบเพื่อทำให้เกิดแรงยกขึ้น วัตถุรูปร่างอื่นที่ทำให้เกิดแรงยกนอกเหนือจากรูปร่างหยดน้ำ จะได้แก่ แผ่นดัดโค้ง (Hydrofoil) เมื่อรูปร่างหยดน้ำ เคลื่อนที่ผ่านของไหล หรือของไหลไหลผ่านรูปร่างหยดน้ำ ที่มุมปะทะ (Angle of Attack) ค่าหนึ่ง ของไหลจะแยกเคลื่อนที่ผ่านผิวด้านบน และด้านล่าง หากมุมปะทะมีค่าเป็นบวก และยังมีค่าไม่สูงถึงค่าที่กำหนดให้เกิดปรากฏการณ์การแยกขึ้น ของไหลจะเคลื่อนที่บนผิวด้านบนของรูปร่างหยดน้ำ ด้วยความเร็วสูงกว่าผิวด้านล่างของรูปร่างหยดน้ำทำให้ความดันที่ผิวด้านล่าง ของรูปร่างหยดน้ำ มีค่าสูงกว่าความดันที่ผิวด้านบนของรูปร่างหยดน้ำ ผลลัพธ์ของความดันแตกต่างระหว่างผิวทั้งสองด้านของรูปร่างหยดน้ำ จะทำให้เกิดเป็นแรงกระทำต่อรูปร่างหยดน้ำ จากรูปที่ 2.5 จะแสดงลักษณะการเกิดขึ้นของแรงยก (Lift Force) และแรงผลึก (Drag Force)



รูปที่ 2.5 แสดงต้นแบบของรูปร่างหยดน้ำ รุ่น S-1223[16]

การเกิดขึ้นของแรงยก (Lift Force) หมายถึง แรงที่กระทำต่อแพนอากาศแรงดังกล่าวที่อยู่ในทิศที่ตั้งฉากกับการไหลของอากาศ แทนด้วยสัญลักษณ์ L การเกิดขึ้นของแรงผลึก (Drag Force) หมายถึง แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบนผิวทั้งสองด้านของแพนอากาศซึ่งเกิดจากความเค้นเฉือนที่ผิว และ

แรงจากค่าความดันแตกต่างที่อยู่ในทิศที่ขนานกับการไหล แทนด้วยสัญลักษณ์ D ค่าแรงต่างดั่งที่กล่าวมาจะได้จากการทดสอบแพนอากาศดังกล่าวในอุโมงค์ลม ซึ่งมักจะแสดงค่าแรงยก และแรงผลักระหว่างอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์แรงยก (Lift Coefficient) แทนด้วยสัญลักษณ์ C_L และสัมประสิทธิ์แรงผลักระหว่าง (Drag Coefficient) แทนด้วยสัญลักษณ์ C_D โดยที่นิยามของค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองจะเขียนได้ดังสมการที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ [5]

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho_a AV_\infty^2} \quad (2.6)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho_a AV_\infty^2} \quad (2.7)$$

โดยที่

C_L = สัมประสิทธิ์แรงยก (Lift Coefficient)

C_D = สัมประสิทธิ์แรงผลักระหว่าง (Drag Coefficient)

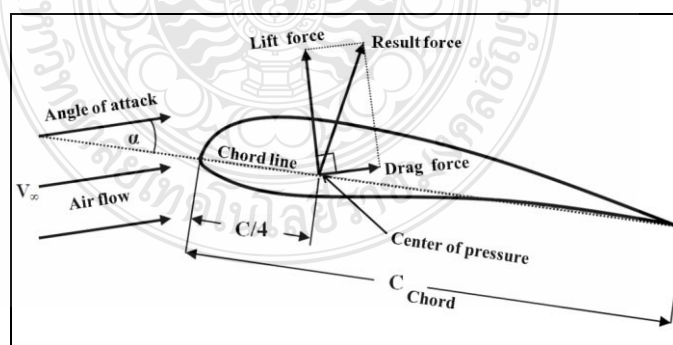
L = แรงยก (Lift Force, N)

D = แรงผลักระหว่าง (Drag Force, N)

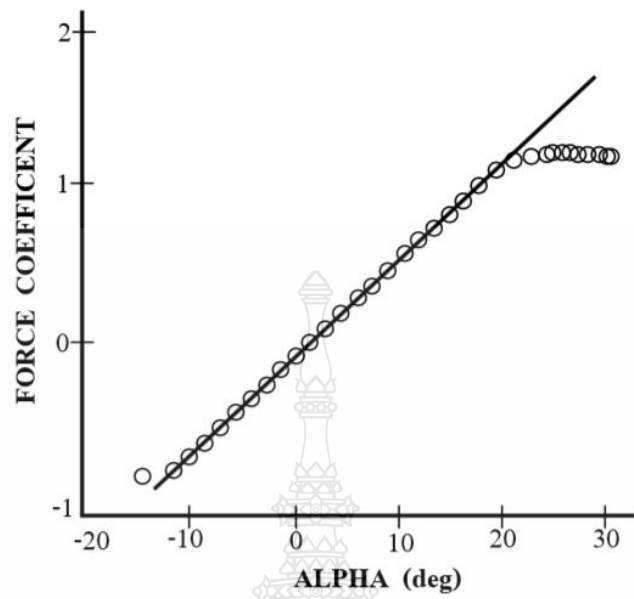
ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

A = พื้นที่กวาดของใบพัด (m^2)

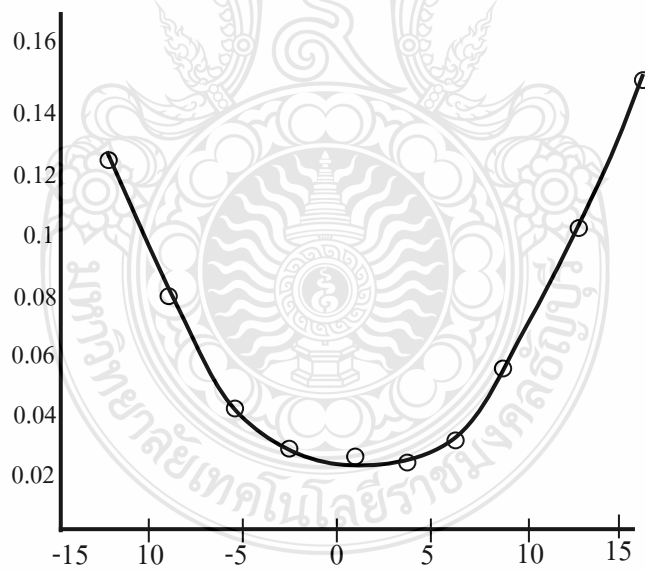
V_∞ = ความเร็วลมเข้าใบพัด (m/s)



รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดแรงยก (Lift Force)และแรงผลักระหว่าง (Drag Force) บนแพนอากาศ[15]



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะกราฟสัมประสิทธิ์แรงยก Life Coefficient



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะกราฟสัมประสิทธิ์แรงผลัก Drag Coefficient

ตารางที่ 2.1 ผลการเปรียบเทียบมุมปะทะของรูปร่างหยดน้ำ รุ่น S-1223 [6]

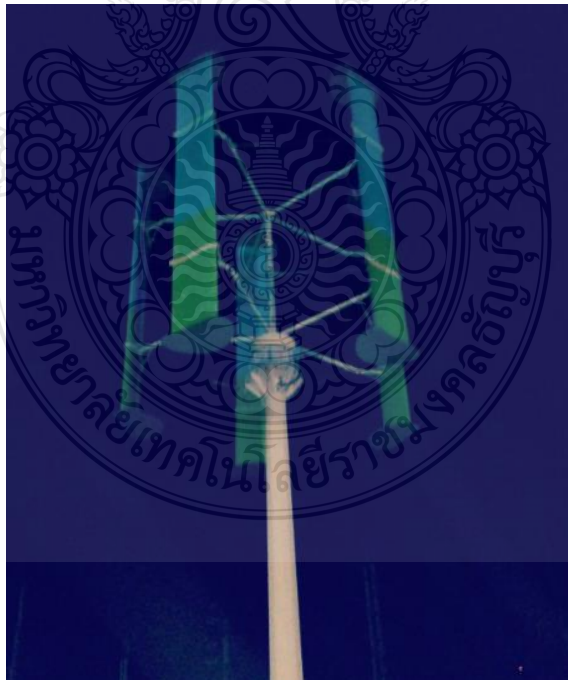
มุมปะทะ α (Degree)	แรงยก Lift Force (N)	แรงผลักร Drag Force (N)	ใช้โปรแกรม CFD		ทดสอบอุโมงค์ลม NACA		อัตราส่วน (CFD) (C_L/C_D)	อัตราส่วน (NACA) (C_L/C_D)
			Lift Coefficient (C_L)	Drag Coefficient (C_D)	Lift Coefficient (C_L)	Drag Coefficient (C_D)		
-12	-518.73	63.13	-0.8960	0.1176	-0.920	0.0160	-7.62	-57.50
-8	-406.51	38.59	-0.7018	0.0721	-0.650	0.110	-9.73	-59.09
-4	-107.24	21.42	-0.1849	0.0370	-0.250	0.008	-5.00	-31.25
-2	-15.83	18.34	-0.0274	0.0317	-0.050	0.0065	-0.86	-7.69
0	115.37	17.16	0.1993	0.0296	0.150	0.0041	6.73	36.59
2	185.74	12.99	0.3208	0.0224	0.320	0.0042	14.32	76.19
4	289.03	29.66	0.3526	0.0512	0.510	0.0082	6.89	62.20
6	307.02	25.68	0.5033	0.0453	0.700	0.0100	11.11	70.00
8	382.16	33.36	0.6601	0.0575	0.950	0.0120	11.48	79.17
10	736.64	73.41	1.2724	0.1268	1.150	0.0160	10.03	71.88
12	850.63	94.24	1.4692	0.1628	1.350	0.0210	9.02	64.29

2.5 กังหันลม

ชนิดของกังหันลม สามารถจำแนกชนิดของกังหันลม มี 2 วิธี คือ การจำแนกตามลักษณะการวางตัวของแกนหมุน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบแกนนอน หมายถึง กังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับทิศทางของกระแสลม ดังรูปที่ 2.9 และแบบแกนตั้ง หมายถึง กังหันลมที่มีแกนหมุนตั้งฉากกับทิศทางของกระแสลม และตั้งฉากกับพื้นผิวโลก ดังรูปที่ 2.10 และจะมีกังหันลมอีกหลายชนิดดังแสดงใน รูปที่ 2.11 ซึ่งจะแล้วแต่ความเหมาะสมในการเลือกใช้งานที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.9 แสดงกังหันลมแบบแกนนอน



รูปที่ 2.10 แสดงกังหันลมแบบแนวตั้ง

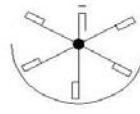
PRIMARILY DRAG-TYPE



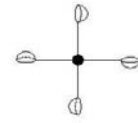
Savonius



Multi-bladed Savonius

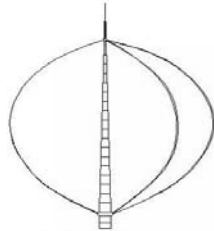


Plates



Cupped

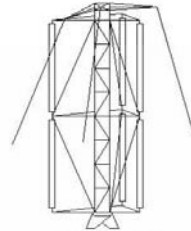
PRIMARILY LIFT-TYPE



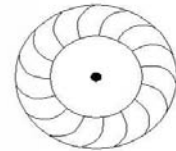
Ø Darrieus



Δ - Darrieus

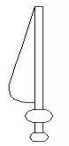


Girardin

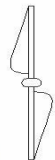


Turbine

COMBINATION HORIZONTAL AXIS



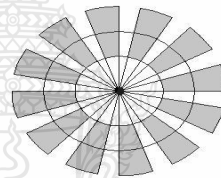
Single - Bladed



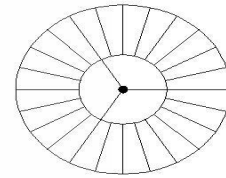
Double - Bladed



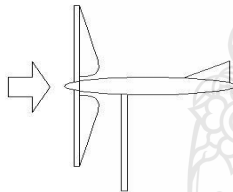
Three - Bladed



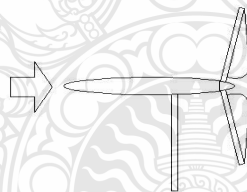
U.S Farm Windmill Multi - Bladed



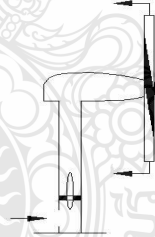
Bicycle Multi - Bladed



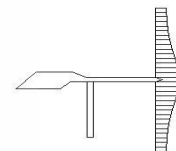
Up - Wind



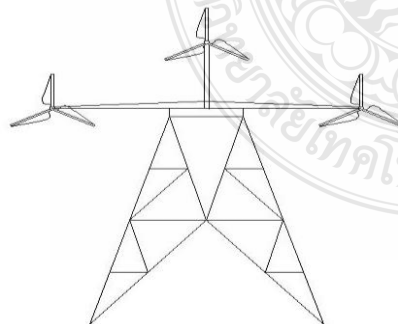
Down - Wind



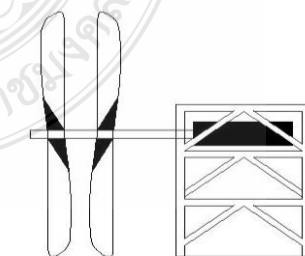
Entield - Andread



Sail - Wind



Multi - Rotor

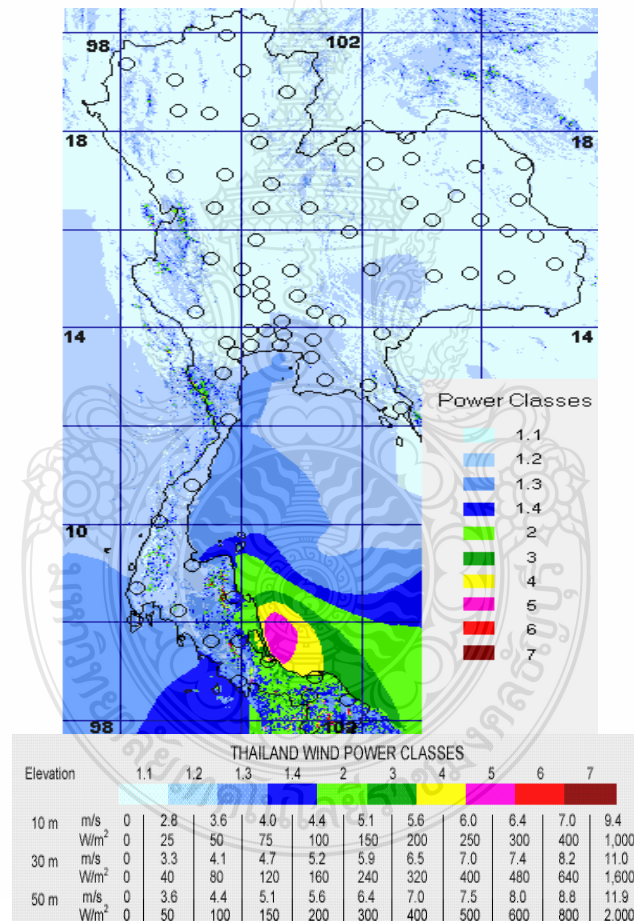


Counter - Rotating Blades

รูปที่ 2.11 ใบกังหันลมชนิดต่างๆ [8]

2.6 ศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทย

สำหรับศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทย จากรายงานการศึกษาของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานและการไฟฟ้า พบว่าแหล่งศักยภาพพลังงานลมที่ดีของประเทศไทย มีศักยภาพกำลังลมเฉลี่ยทั้งปีอยู่ประมาณระดับ 1-5 (Wind Power Classes 1-5) ซึ่งเท่ากับค่าความเร็วลมประมาณ 0-6.4 เมตร/วินาที โดยบริเวณที่พบค่าความเร็วสูงสุดโดยมากอยู่บริเวณภาคใต้บริเวณชายฝั่งทะเล ตะวันออก นอกจากนี้ยังมีการสำรวจพื้นที่ที่มีศักยภาพกำลังลมเพียงพอต่อความต้องการ เช่น บริเวณยอดเขาหรือเทือกเขาต่างๆ เป็นต้น ซึ่งศักยภาพของลมโดยรวมในประเทศไทยจะแสดงดังรูปที่ 2.12

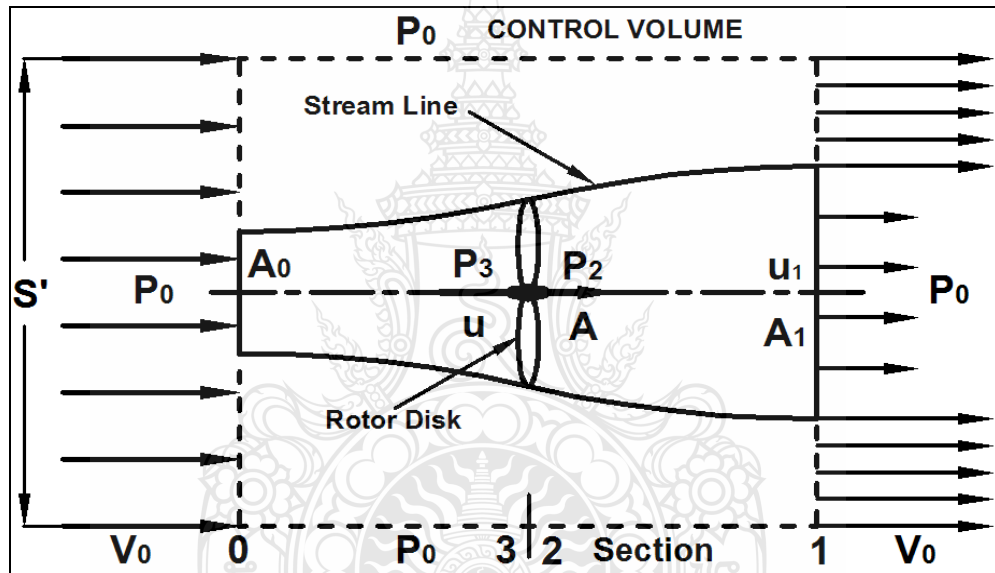


รูปที่ 2.12 แสดงความเร็วลมตลอดปีในประเทศไทย[8]

2.7 ทฤษฎีการออกแบบใบกังหันลม

2.7.1. การออกแบบโดยใช้ Momentum Theory

ในการศึกษาพลังงานจากลมที่ขึ้นสู่การคำนวณที่จำเป็นต้องใช้โดยทั่วไป ในการนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพของกังหันลม โดยใช้ทฤษฎีของหลักการที่เรียกว่า Momentum Theory โดยศึกษารายละเอียดของการวิเคราะห์ตามหลักการได้จากรูปที่ 2.10 ซึ่งในการออกแบบใบกังหันลมผลิตไฟฟ้านั้นใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าย่อมมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการคัดเลือกขนาดต่างๆที่เหมาะสมต่อการทำงานของทั้งระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ซึ่งหากการออกแบบมีความผิดพลาดสูงก็ย่อมทำให้การทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าผิดพลาดและอาจเกิดการเสียหายตามมาได้



รูปที่ 2.13 แสดงหลักการของทฤษฎี Momentum theory [15]

ทฤษฎีการวิเคราะห์โดยใช้หลักการของ Momentum Theory นั้น ในเบื้องต้นจะต้องทำการตั้งสมมุติฐาน (Assumption) ขึ้นมาก่อน ดังนี้

1. ลมที่พัดเข้ามาวิเคราะห์จะต้องมีการไหลที่สม่ำเสมอต่อเนื่อง (Steady, Homogeneous Wind Flow)
2. ไม่มีสิ่งกีดขวางการไหลของทางเข้าและทางออกของอุโมงค์ที่ใช้ในการทดสอบ (No obstruction to wind flow either upstream or downstream)
3. การเคลื่อนที่ของลมไม่มีการปั่นป่วนที่ตัวใบกังหันลม (Uniform Flow Velocity at Rotor)

4. ลมที่ไหลเข้ามาวิเคราะห์ต้องคิดว่าเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Wind Flow) จึงไม่มีผลในเรื่องของอุณหภูมิ (Temperature Effect) มากเกี่ยวข้องในการวิเคราะห์
วิเคราะห์ รูปที่ 2.13 มีตัวแปรใดบ้างที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์กั้นหลวมทุก ๆ ชนิด ตัวแปรต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องทราบคือ S' เท่ากับพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่เราใช้อยู่ในขอบเขตของการวิเคราะห์ปริมาตรทั้งหมดของระบบ (Control Volume)

V_0	คือ ความเร็วลมทางด้านเข้าและทางด้านออกของ Control volume (m/s)
u	คือ ความเร็วลมก่อนที่จะถึงด้านหน้าของใบกังหันหรือแผ่นดิสก์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ (m/s)
u_1	คือ ความเร็วลมหลังจากผ่านตัวใบกังหันหรือแผ่นดิสก์ทดสอบ (m/s)
P_0	คือ ความดันบรรยากาศทั่ว ๆ ไป (N/m^2)
P_2	คือ ความดันของอากาศที่ไหลผ่านตัวใบกังหันแล้ว (N/m^2)
P_3	คือ ความดันของอากาศก่อนที่จะปะทะตัวใบกังหัน (N/m^2)
A	คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวใบกังหัน (m^2)
A_0	คือ พื้นที่หน้าตัดทางเข้าของอุโมงค์ลมที่ใช้ในการวิเคราะห์ (m^2)
A_1	คือ พื้นที่หน้าตัดทางออกของอุโมงค์ลมที่ใช้ในการวิเคราะห์ (m^2)
Q	คือ อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์ (m^3/s)

ในการวิเคราะห์ทฤษฎีของ Momentum นั้นเราสมมุติว่าความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิห้องฟ้าปกติมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.225 kg/m^3 และจากกฎของการไหลแบบต่อเนื่อง (Continuity equation) นั้น การไหลต้องเท่ากันทั้งระบบ นั่นคือ $Q = A \cdot V$ จะได้ $V_0 A_0 = uA = u_1 A_1$ และจากกฎของเบอร์นูลลี โดยวิเคราะห์ในส่วนของความดันอย่างเดียวตั้งแต่ส่วนที่ 0 ถึงส่วนที่ 3 และจากส่วนที่ 2 ถึงส่วนที่ 1 ของรูปที่ 2.13 กล่าวถึงตัวแปรที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์กั้นหลวมทุก ๆ ชนิด ซึ่งจะมีผลการวิเคราะห์ได้ คือ

$$\frac{1}{2} \rho V_0^2 + P_0 = \frac{1}{2} \rho u^2 + P_3 \quad (2.8)$$

$$\frac{1}{2} \rho u^2 + P_2 = \frac{1}{2} \rho u_1^2 + P_0 \quad (2.9)$$

ดังนั้นแรงผลัก (Thrust) T_a ที่เกิดขึ้นในใบกังหันจะได้

$$T_a = P \cdot A$$

$$\text{นั่นคือ } A(P_3 - P_2) \quad (2.10)$$

$(P_3 - P_2)$ คือ การที่พลังงานจากลมได้ถ่ายทอดให้กับแผ่นดิสก์เรียบร้อยแล้ว พลังงานก็จะถูกสะสมอยู่ในใบกังหันนั่นเอง หรือถ้าจะวิเคราะห์ส่วนของความเร็วลมก็จะได้ว่าแรงผลักที่เกิดในใบกังหันคือ

$$T_a = \frac{\rho A (V_0^2 - u_1^2)}{2} \quad (2.11)$$

สมการที่ 2.11 ได้มาจากพลังงานจลน์ของลมนั่นเองคือ $KE = \frac{1}{2} \rho AV^2$

$$Au = A_1 u_1$$

$$\text{ดังนั้น } u = \left(\frac{V_0 + u_1}{2} \right) \quad (2.12)$$

u คือ ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมดของระบบที่เรากำลังวิเคราะห์ ในการวิเคราะห์นั้นเราสมมุติว่าระบบจะต้องมีการสูญเสียโดยกำหนดให้เป็นค่าที่เรียกว่า Axial Interference Factor โดยค่านี้คือค่าสัดส่วนการลดลงของพลังงานลม ในระหว่างลมที่เข้ามาอย่างอิสระและลมที่ปะทะตัวใบกังหัน นั่นคือ

$$a = \frac{v}{V_0} \text{ และจาก } v = V_0 - u \text{ ดังนั้นเราแทนค่า } v = V_0 - u \text{ เป็นค่าของการสูญเสียจะได้}$$

$$u = V_0(1 - a) \quad (2.13)$$

ดังนั้นแทนค่าลงในสมการ 2.12 จะได้ u_1 คือ

$$u_1 = V_0(1 - 2a) \quad (2.14)$$

ในการวิเคราะห์การทำงานของกังหันนั้นถ้าค่าสัดส่วนการลดลงของพลังงานลมมีค่าเท่ากับ 0 นั่นคือไม่มีการรบกวนของระบบ คือลมที่ทางเข้าและทางออกไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนการลดลงของพลังงานลมเลย ซึ่งเป็นไปไม่ได้และขณะเดียวกันค่าสัดส่วนการลดลงของพลังงานลมมีค่าเท่ากับ 1 นั่นก็คือไม่มีการถ่ายเทพลังงานของลมให้แก่ใบกังหันเลย ซึ่งเราก็ไม่ต้องการ ในการวิเคราะห์ครั้งนี้เราสามารถกำหนดว่าพลังงานจากลมได้ถูกถ่ายเทคให้กับใบกังหันต่อหน่วยเวลาใด ๆ นั่นคือ P_w โดย

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A u V_0^2 - \frac{1}{2} \rho u_1^2 A u$$

และแทนค่า a ลงไปจะได้ว่า

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V_0^3 4a(1-a)^2 \quad (2.15)$$

ในการวิเคราะห์การทำงานของกังหันลมโดยทั่ว ๆ ไปนั้น เราคิดพลังงานลมที่เกิดจากการไหลอิสระนั้น เราจะมีสูตรการคำนวณคือ P_a ผ่านพื้นที่รับลมใด ๆ จะได้ว่า

$$P_a = (\text{ปริมาตรของการไหล}) \times (\text{พลังงานจลน์ของลมต่อปริมาตรการไหล})$$

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกังหันลมนั้น ตัวแปรที่จะต้องใช้นั้นเราเรียกว่าค่า C_p (Power coefficient) โดยจะได้จากการเปรียบเทียบระหว่างพลังงานที่ตัวกังหันลมได้ดึงเอาไว้ P_w เปรียบเทียบกับตัวพลังงานที่สมควรจะได้จริงจากลมที่มีการไหลอิสระ P_a นั่นคือ ถ้าวิเคราะห์กันทางกลก็คือกำลังงานเท่ากับพลังงานที่ผลิตได้ต่อพลังงานที่ป้อนเข้าให้สู่ระบบนั่นเอง ในทางวิศวกรรมของพลังงานลมนั้นเราสามารถหาค่าประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลมได้คือ

$$C_p = \frac{P_w}{P_a} = \frac{\frac{1}{2} \rho A V_0^3 4a(1-a)^2}{\frac{1}{2} \rho A V_0^3} \quad (2.16)$$

$$\text{ดังนั้นค่า} \quad C_p = 4a(1-a)^2 \quad (2.17)$$

ดังนั้นถ้าเราอยากจะทำให้ค่าออกแบบให้ดีที่สุดแล้วตัวกั้นลมนสามารถมีประสิทธิภาพสูงสุดได้เท่านั้น โดยการ Differentiate สมการที่ 2.17 นั่นคือ

$C_p = 4a - 8a^2 + 4a^3$ และเมื่อทำการ Differentiate เปรียบเทียบกับค่า a แล้วเราจะได้

$$\frac{dC_p}{da} = 4 - 16a + 12a^2 = 0$$

$$12a^2 - 16a + 4 = 0$$

$$3a^2 - 4a + 1 = 0$$

ดังนั้นจะได้ว่า a คือ

$$a = \frac{4 \pm \sqrt{(-4)^2 - 4 \times 3 \times 1}}{2 \times 3}, a = \frac{4 \pm \sqrt{4}}{6}$$

นั่นคือจะได้ค่า $a = \frac{2}{3} \pm \frac{1}{3}$

สมการจะเป็นจริงได้มีค่า a แค่ 2 ค่า คือ

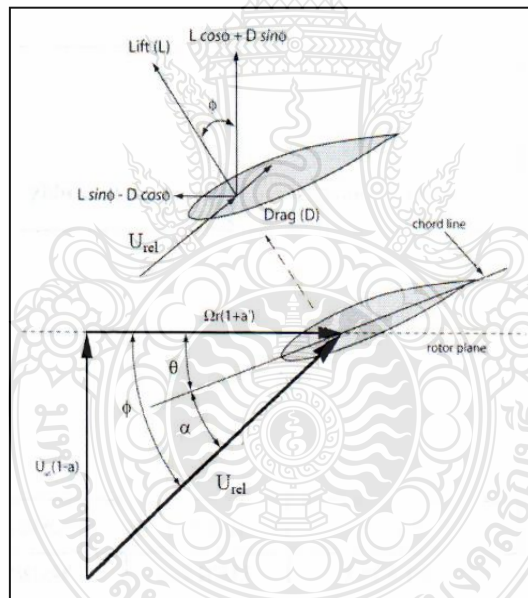
$$a = 1 \text{ และ } a = \frac{1}{3}$$

ดังนั้นถ้าเราแทนค่า $a = \frac{1}{3}$ ลงในสมการที่ 2.16 เราจะทราบได้ว่าค่าประสิทธิภาพสูงสุดของกั้นลมน ซึ่งเราเรียกว่า $C_{p_{max}}$ นั้นจะมีค่าไม่เกิน 0.5926 นั่นคือถ้าลมให้พลังงานมา 100% กั้นที่ดีที่สุดจะทำการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานทางกลได้สูงสุดไม่เกิน 59.26 % เนื่องด้วยปัจจัยหลาย ๆ อย่างที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไป โดยสามารถดูได้จากรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกั้นลมนชนิดต่าง ๆ ว่าไม่มีกั้นลมนชนิดใดที่สามารถออกแบบให้มีประสิทธิภาพได้ถึง 45% ด้วยซ้ำไปแต่อย่างไรก็ตามถ้าเราสามารถออกแบบชุดกั้นลมนให้มีประสิทธิภาพรวมได้ถึง 30-35 % ก็ถือว่าประสบความสำเร็จเป็นอย่างสูงแล้วเนื่องจากกั้นลมนผลิตไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรที่ไม่ใช้การสันดาปเหมือนกับเครื่องยนต์ความร้อน ทำให้ไฟฟ้าที่ได้จากกั้นลมนจะเป็นพลังงานที่สะอาดและจะไม่มีวันหมดไปเหมือนพลังงานจากเชื้อเพลิงสารไฮโดรคาร์บอนที่จำเป็นต้องใช้การเผาไหม้ในการได้งานมานั่นเอง

2.7.2. การออกแบบโดยใช้ Blade Element Theory (BET)

เป็นการพิจารณาแรงที่กระทำบนใบกังหันในลักษณะสองมิติ โดยแบ่งใบกังหันเป็นส่วน ๆ ตามความยาว (Span-wise) แล้วคำนวณค่าคุณลักษณะต่าง ๆ เช่น แรงยก แรงกด ที่เป็นผลของมุมปะทะ และความเร็ว ณ แต่ละส่วนของใบกังหันที่แบ่งไว้ สำหรับความเร็วในแนว Span จะไม่นำมาพิจารณาด้วย นั่นคือจะไม่นำผลในสามมิติมาพิจารณานั้นเอง

พิจารณาที่ใบกังหันในแต่ละส่วน(Blade Element) ความเร็วที่เกิดขึ้นแบ่งได้เป็นความเร็วในแนวแกน (Axial) และความเร็วในแนวสัมผัสหรือแนวการหมุน (Tangential) ความเร็วในแนวแกนที่ปรากฏที่ส่วนของใบกังหันจะมีค่าเป็น $U_d = U_o(1-a)$ และความเร็วแนวสัมผัสคือ $r\Omega + w(r)$ พจน์ $r\Omega$ คือความเร็วที่เกิดจากการหมุนของใบกังหัน และ $w(r)$ คือความเร็วการหมุนควงของอากาศ (wake)



รูปที่ 2.14 แรงต่างๆที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดรูปหยดน้ำของกังหันลม [8]

2.7.3. การออกแบบโดยใช้ Blade Element-Momentum (BEM) Theory

เป็นการนำเอา Momentum Theory มาผสมเข้ากับ Blade Element Theory สมมุติฐานของทฤษฎี BEM คือแรงกระทำบนใบกังหันเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอากาศที่วิ่งผ่านตลอดวงแหวนที่กำหนดขึ้น นั่นคือไม่คิดผลของการไหลในแนวรัศมีไปตาม span หรือไม่มีการถ่ายเท

การไหลในแต่ละวงแหวน เงื่อนไขนี้จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อค่า a ไม่เปลี่ยนแปลงในแนวรัศมี และนำเอา BET รวมกับ MT $\partial T|_{BET} = \partial T|_{MT}$ และ $\partial Q|_{BET} = \partial Q|_{MT}$ จะให้ความสัมพันธ์เป็น สำหรับค่าสัมประสิทธิ์กำลัง สามารถคำนวณได้จาก

$$C_p = \frac{P}{P_{tot}} = \frac{\int_0^R \Omega dQ}{0.5 \rho \pi R^2 U^3} \quad (2.18)$$

เนื่องจากการสูญเสียที่ปลายใบ (Tip Loss) จึงต้องมีการปรับแก้ค่า C_p ในสมการที่ 2.18 โดยคูณ Tip loss Factor (F) เข้าไปซึ่ง Prandtl ได้เสนอไว้ และ Wilson ได้สรุปแรงที่เกิดสำหรับกังหันลมไว้ดังนี้

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\exp \left[-\frac{N(R-r)}{2r \sin \phi} \right] \right) \quad (2.19)$$

เมื่อกระจายสมการที่ 2.19 ออกมาใหม่จะให้ความสัมพันธ์ของ C_p เป็น

$$C_p = \frac{2}{\lambda R} \int_0^R F \frac{\sigma' \lambda_r^2 (1-a) C_L}{\sin^2 \phi} \left[\sin \phi - \frac{C_D \cos \phi}{C_L} \right] dr \quad (2.20)$$

เมื่อ $\lambda = \Omega R / U_0$ คือ Tip Speed Ratio โดย R คือรัศมีใบ ค่า H คือ รัศมีของ Hub ค่า $\sigma' = Nc / 2\pi r$ เรียกว่า Local Solidity

โดยใช้ทฤษฎี BEM นี้ทำให้สามารถคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อหามุมบิดที่เหมาะสมที่หน้าตัดต่างๆ ของใบกังหันได้

2.7.4. การออกแบบโดยใช้ Strip Theory

ทฤษฎีสตริป (Strip theory) เป็นทฤษฎีที่นำค่าแรงที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีโมเมนตัมและทฤษฎีชิ้นส่วนย่อยของใบกังหันจับมาเท่ากัน และเขียนความสัมพันธ์เพื่อนำไปหาค่า

แฟลคเตอร์การเหนี่ยวนำตามแนวแกน ดังนั้นเมื่อนำสมการมาเท่ากัน โดยละทิ้งค่าแรงหน่วงตามข้อสมมุติฐานของสมการและนำมาจัดรูปใหม่จะสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{a}{1-a} = \frac{BcC_L \cos \varnothing}{8\pi r \sin^2 \varnothing} \quad (2.21)$$

จากนั้นก็จะสามารถหาค่าแฟลคเตอร์การเหนี่ยวนำตามแกน a ได้โดยกระบวนการทำซ้ำซึ่งจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. สมมุติค่า a

2. คำนวณค่า $\varnothing := \varnothing \tan^{-1} \left[\frac{(1-a)}{r\Omega} \right]$

3. คำนวณค่า $\alpha : \alpha = \varnothing - \beta$

4. หาค่า C_n และ C_D จากข้อมูลอากาศพลศาสตร์ของใบกังหัน

5. คำนวณค่า C_n จากสมการ

6. คำนวณค่า a จากสมการ

7. เปรียบเทียบค่า a ที่คำนวณได้จากค่าใหม่กับค่าเก่า ถ้ามีค่าเท่ากันหรืออยู่ใน

ขอบเขตที่ยอมรับได้ก็จะหยุด ถ้าไม่เท่ากันก็เริ่มต้นข้อที่ 2 ใหม่จนกระทั่งได้ค่าที่ต้องการหลังจากที่ได้ค่า a ในแต่ละตำแหน่งของใบกังหันแล้ว ก็สามารถนำไปคำนวณค่าสมรรถนะของกังหันลมที่สนใจอันได้แก่ ค่าแรงทอร์ค ค่าแรงบิดและค่ากำลังงานทางทฤษฎีขึ้นส่วนย่อยของใบกังหันได้ โดยนำเอาค่าแรงหน่วงไปคิดประกอบด้วย ค่าเหล่านั้นจะสามารถเขียนได้เป็น

$$T = B \int_{R_H}^R \frac{1}{2} \rho W^2 C_n c dr \quad (2.22)$$

$$Q = B \int_{R_H}^R \frac{1}{2} \rho W^2 C_i r c dr \quad (2.23)$$

$$P = Q\Omega = B \int_{R_H}^R \frac{1}{2} \rho W^2 \Omega C_i r c dr \quad (2.24)$$

โดยที่ค่า R คือ รัศมีของใบกังหันที่วัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายใบ r คือ ค่ารัศมีของใบกังหัน

ค่าสมรรถนะของกังหันลมที่เป็นที่สนใจก็คือกำลังงาน ซึ่งนำมาเสนอในรูปของทอมไร้มิติ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังงาน C_p กับค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip Speed Ratio, $R\Omega/V_\infty$)

2.8 ความแข็งแรงของวัสดุ

ในการออกแบบโครงสร้างและชิ้นส่วนเครื่องมือกลต่างๆ จะต้องพิจารณาสองอย่างคือ ชิ้นส่วนนั้นแข็งแรงพอที่จะรับแรงที่มากระทำได้หรือไม่ และ ชิ้นส่วนนั้นจะแข็งแรงพอที่จะไม่เปลี่ยนแปลงขนาดมากเกินไปหรือไม่ ในงานวิศวกรรมคุณสมบัติทางกลมีความสำคัญมากที่สุด เพราะเมื่อเลือกใช้วัสดุใดๆก็ตาม สิ่งแรกที่จะนำมาพิจารณาก็คือ คุณสมบัติทางกล(Mechanical Properties) เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของวัสดุเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อวัสดุ คุณสมบัติทางกลได้แก่ ความแข็งแรง ความแข็ง ความสามารถในการยืดตัว ความยืดหยุ่น ความเหนียว การที่เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ใดๆจะสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ ทำเครื่องจักร อุปกรณ์นั้นๆเป็นสำคัญ วิศวกรที่ออกแบบชิ้นส่วนของโครงสร้างหรือชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลมีข้อจำกัดหน่วยแรงในวัสดุที่อยู่ในระดับที่มีความปลอดภัยนอกจากนั้น โครงสร้างหรือเครื่องจักรกลที่ใช้กัน ในปัจจุบัน จะมีการวิเคราะห์หาผลที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกระทำบนชิ้นส่วนหรือส่วนที่รองรับซึ่งจำเป็นต้องคำนวณ โดยใช้หน่วยแรงที่ปลอดภัยหรือที่ยอมรับได้(Safe or Allowable Stress) เพื่อความปลอดภัย จำเป็นต้องเลือกใช้หน่วยแรงที่ยอมรับได้เพื่อจำกัดขนาดของแรงกระทำให้น้อยกว่าขนาดของแรงที่ชิ้นส่วนสามารถรองรับได้ แรงกระทำที่ชิ้นส่วนถูกออกแบบจะแตกต่างจากแรงที่กระทำจริงที่กระทำ ขนาดที่ออกแบบไว้ของโครงสร้างหรือเครื่องจักรกลจะมีการคลาดเคลื่อนไปจากแบบบ้าง เนื่องจากมีความผิดพลาดในการประกอบหรือการประดิษฐ์ชิ้นส่วนที่เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างหรือเครื่องจักรกล ตัวแปรที่ยังไม่ทราบค่าทำให้เกิดการสั่นสะเทือน การกระแทกหรือแรงกระทำแบบฉับพลันที่สามารถเกิดขึ้นได้แต่สิ่งที่กล่าวมาแล้วไม่อาจนำมาคิดได้ทั้งหมดในขณะที่ทำการออกแบบ ในบางครั้งการกัดเซาะโดยสภาพบรรยากาศ การผุพัง หรืออากาศที่มีแนวโน้มก่อให้เกิดวัสดุเสียหายซึ่งอาจเกิดจากสภาพเลวร้ายในช่วงระยะเวลาใช้งานของวัสดุ ซึ่งจะมีการแปรค่าของคุณสมบัติทางกลศาสตร์เป็นอย่างมากอันเนื่องมาจากพฤติกรรมดังกล่าว วิธีการในการระบุน้ำหนักกระทำที่ยอมรับได้สำหรับการออกแบบหรือการวิเคราะห์ชิ้นส่วนที่ใช้ตัวเลขเรียกว่า แฟกเตอร์ของความปลอดภัย (Factor of Safety) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของน้ำหนักกระทำมากที่สุดทางทฤษฎีที่ชิ้นส่วนสามารถรับได้จนกระทั่งชิ้นส่วนพังในลักษณะเฉพาะตามชนิดของแรงที่รองรับต่อแรงที่ยอมรับได้ ซึ่งได้จากประสบการณ์หรือการทดลองที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยภายใต้สภาพเงื่อนไขของแรงกระทำ ค่าแฟกเตอร์ความปลอดภัยโดยทั่วไปค่าที่ระบุขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้และ

วัตถุประสงค์ของการนำโครงสร้างหรือเครื่องจักรกลไปใช้งาน เช่นในการออกแบบปีกเครื่องบินหรือ ส่วนประกอบของยานอวกาศจะใช้แฟกเตอร์ของความปลอดภัยใกล้เคียงกับ 1 เพื่อลดน้ำหนักของยาน โดยทั่วไปแฟกเตอร์ของความปลอดภัยและแรงกระทำที่ยอมรับได้สำหรับชิ้นส่วนของโครงสร้างและ เครื่องจักรกล จะมีค่ามาตรฐานซึ่งเป็นผลมาจากความไม่แน่นอนในการออกแบบ ค่าดังกล่าวนี้ สามารถพบในมาตรฐานการออกแบบและคู่มือทางวิศวกรรมที่ได้รับความเชื่อมั่นจากสาธารณชนและ มีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม โดยต้องเป็นคำตอบในการออกแบบที่มีความประหยัดที่สมเหตุสมผล

ในการออกแบบโครงสร้างหรือเครื่องจักรกลใดๆ สิ่งแรกที่มีความจำเป็น คือ ต้องใช้หลักการ ของสถิติศาสตร์เพื่อหาแรงกระทำภายในชิ้นส่วนต่างๆของโครงสร้าง นอกจากนั้น ขนาดของชิ้นส่วน ระยะการทรุดตัวของชิ้นส่วน และความมีเสถียรภาพของชิ้นส่วนซึ่งขึ้นอยู่กับแรงกระทำและชนิดของ วัสดุที่ใช้ทำชิ้นส่วน ความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายนอกที่กระทำต่อวัตถุและเกิดการเปลี่ยนแปลง รูปร่างและความเข้มของแรงภายในวัตถุ หลักการแก้ปัญหาของกลศาสตร์ของวัสดุ จำเป็นต้องใช้ เทคนิคทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงและคอมพิวเตอร์เพื่อทำการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนมากๆในการ อธิบายพฤติกรรมของวัสดุดังกล่าว ด้วยเหตุผลนี้ จึงควรทบทวนหลักการสำคัญของแรงที่กระทำต่อ วัสดุ

แรงกระทำที่ผิว(Surface Force) แรงกระทำที่ผิวเกิดจากการสัมผัสโดยตรงของวัตถุหนึ่งกับ พื้นผิวของอีกวัตถุหนึ่งในทุกกรณี แรงจะกระจายบนพื้นที่ของการสัมผัสระหว่างวัตถุ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าพื้นที่นี้มีขนาดเล็ก เมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวทั้งหมดของวัตถุแล้ว แรงกระทำที่ผิวจะถูกจินตนาการว่า เป็นแรงกระทำจุด (Concentrated Force) ถ้า แรงกระทำกับพื้นที่ผิวกระทำต่อพื้นที่แคบ(Narrow Area) แรงกระทำดังกล่าวจะถูกจินตนาการเป็นแรงกระทำแบบกระจายเชิงเส้น (Linear Distributed Load) น้ำหนักกระทำจะวัดเป็นความเข้มของแรงต่อความยาวตามพื้นที่และแทนในรูปเชิงกราฟฟิก โดยชุด ของลูกศรที่กระจายตามแนวเส้นหรือแรงกระทำตามความยาวของคาน

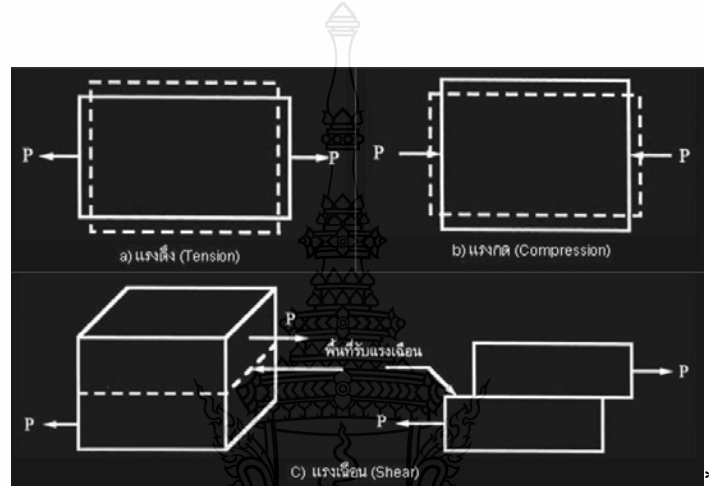
แรงวัตถุ (Body Force) แรงวัตถุเกิดขึ้นเมื่อวัตถุหนึ่งมีแรงกระทำต่ออีกวัตถุหนึ่ง โดย ปราศจากการสัมผัสทางกายภาพ โดยตรงระหว่างวัตถุ เช่นผลที่เกิดขึ้นจากความโน้มถ่วงของโลกหรือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า แรงดังกล่าวนี้โดยปกติแล้วจะถูกแทนด้วยแรงกระทำเป็นจุดที่กระทำต่อวัตถุ ใน กรณีของความโน้มถ่วง แรงนี้จะเรียกว่า น้ำหนัก (Weight) ของวัตถุและกระทำผ่านจุดศูนย์กลางของ วัตถุ (Body's Center of Gravity)

แรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับ (Support Reactions) แรงกระทำที่ผิวจะเกิดขึ้นที่ฐานรองรับหรือจุด ต่อของฐานรองรับระหว่างวัตถุเรียกว่า แรงปฏิกิริยา(Reactions)

ในการพิจารณาเราต้องคำนึงถึงแรงที่กระทำต่อวัสดุในรูปของความเค้น (Stress) และขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปในรูปของความเครียด (Strain and Deformation)

ความเค้น (Stress) หมายถึงแรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ

1. ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อวัสดุอยู่ภายใต้แรงดึง (Tension) มากกระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกออกจากกัน



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะของแรงต่างๆที่เกิดขึ้นบนหน้าตัด[11]

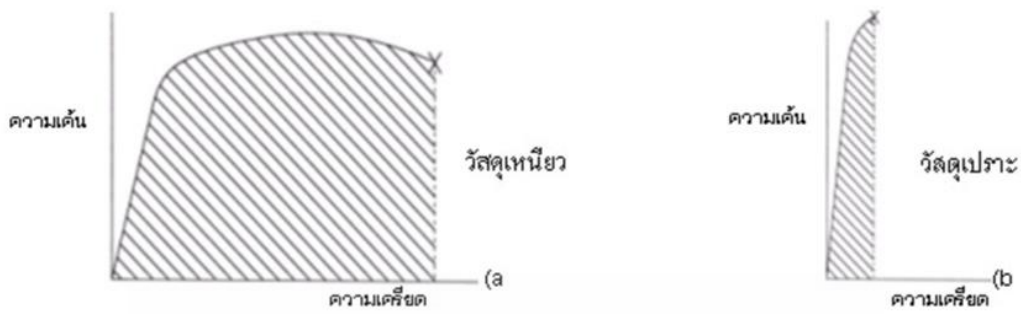
2. ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อวัสดุอยู่ภายใต้แรงอัด (Compression) มีแรงกดมากกระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวางพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง

3. ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) เกิดขึ้นเมื่อวัสดุอยู่ภายใต้แรงเฉือน (Shearing Force) มีแรงกระทำทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกัน

ในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดจะมีทั้ง 3 แบบนี้พร้อมๆกัน

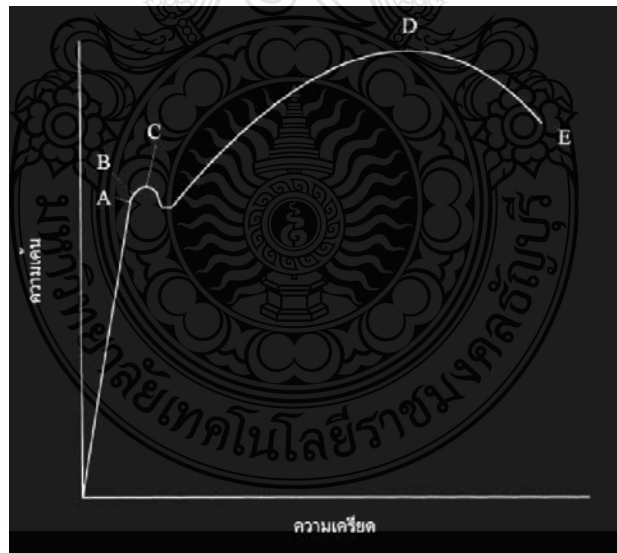
วัสดุสามารถแบ่งออกได้เป็นวัสดุเหนียวหรือวัสดุเปราะ ขึ้นอยู่กับลักษณะของหน่วยแรงความเครียด

วัสดุเหนียว (Ductile Materials) วัสดุใดๆที่ถูกกระทำแล้วเกิดความเครียดที่มีค่ามากๆก่อนที่จะเกิดการแตกหัก เรียกว่าวัสดุเหนียว โดยทั่วไปวิศวกรจะเลือกวัสดุเหนียวในการออกแบบ เนื่องจากวัสดุสามารถดูดซับพลังงานหรือแรงที่เกิดขึ้นอย่างฉับพลันและถ้าวัสดุถูกกระทำด้วยแรงมากเกินไปจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปอย่างมากก่อนจะแตกหัก



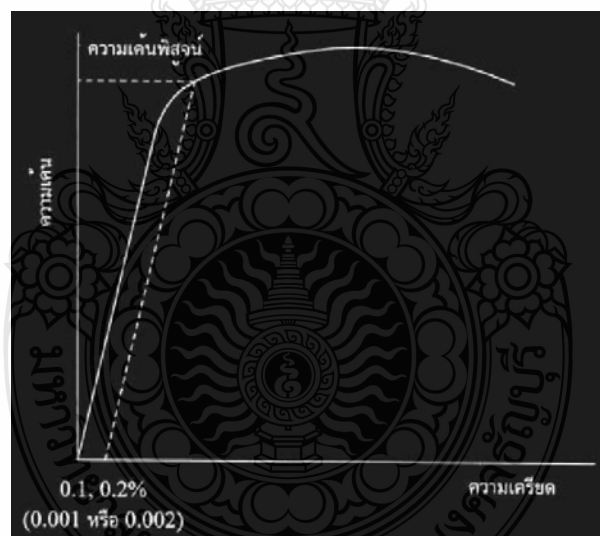
รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียดของวัสดุ[11]

วัสดุเปราะง่าย (Brittle Material) วัสดุที่มีจุดครากต่ำมากหรือไม่มีจุดคราก ก่อนการแตกหัก จะเรียกว่า วัสดุเปราะ วัสดุส่วนใหญ่จะมีพฤติกรรมทั้งของความเหนียวและการเปราะ เช่นเหล็กจะมีพฤติกรรมเป็นเหล็กเปราะเมื่อเหล็กมีปริมาณคาร์บอนสูง และเหล็กจะเหนียวเมื่อมีปริมาณคาร์บอนน้อยลง นอกจากนั้นที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุจะแข็งแต่เปราะง่าย ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น วัสดุจะมีสภาพอ่อนตัวแต่เหนียวมากขึ้น



รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียดของวัสดุเหนียว[11]

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับส่วนที่ยืดออก หรือระหว่างความเค้น(Stress) กับความเครียด (Strain) มีจุดสำคัญต่างๆดังนี้ ช่วงกราฟเป็นเส้นตรง แสดงว่า แรงเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับส่วนที่ยืดออก หรือ ความเค้นแปรผันตรงกับความเครียด จุด A เรียกว่า Proportional Limit หรือ Limite of Proportionality เป็นจุดสุดท้ายที่กราฟเป็นเส้นตรง หลังจากจุดนี้แล้ว ความเค้นไม่เป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับ ความเครียด จุด B เรียกว่า Elastic Limit เป็นจุดสุดท้ายที่ความยาวของวัสดุ จะกลับมามีความยาวเท่าเดิมได้ เมื่อปล่อยแรง วัสดุเป็นแบบ Elastic จุด C เรียกว่า Yield Point เป็นจุดที่วัสดุยืดตัวออกโดยไม่ต้องเพิ่มแรง จุดนี้จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนสำหรับ Mild Steel ส่วนวัสดุอื่นจะไม่มีจุดนี้ โดยที่จุด Yield Point นี้ เรียกว่า Yield Stress จาก C-E เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบ Plastic นั่นคือวัสดุยืดออกถาวร ถ้าปล่อยแรง จะไม่หดกลับมา จากจุดเริ่มต้นถึงจุด D การยืดเกิดขึ้นทุกส่วนของชิ้นงาน จาก D-E การยืดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เฉพาะบริเวณที่จะหักหรือขาดเท่านั้น มีคอคอดเกิดขึ้น จุด D เป็นจุดที่มีความเค้นเกิดขึ้นสูงสุด เรียกว่า Tensile Strength ของวัสดุ หรือ Ultimate Tensile Strength จุด E เรียกว่า Rupture Point หรือ Breaking Point เป็นจุดที่วัสดุขาดออกจากกัน



รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียดของวัสดุเปราะ[11]

สำหรับวัสดุ Mild Steel หรือเหล็ก โครงสร้าง จะได้กราฟที่ครบทุกจุดและช่วงของ Plastic ยาวมาก นั่นคือวัสดุยืดได้มากก่อนที่จะขาด เราเรียกววัสดุเหล่านี้ว่า เป็นพวก Ductile Material ส่วนวัสดุบางชนิด เช่น เหล็กหล่อ กราฟ Stress และ Percentage Strain จะได้กราฟ ที่มีช่วงเส้นตรง เป็น

Limite of Proportionality แต่ Yield Point ไม่มี มีแต่ค่า Tensile Strength วัสดุชนิดนี้ยืดได้เพียงเล็กน้อยก็ขาด เรียกว่าพวก Brittle Material

สำหรับวัสดุในเชิงวิศวกรรมจะแสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างหน่วยแรงและความเครียดภายในขอบเขตของความยืดหยุ่น การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงจะทำให้เพิ่มความเครียดอย่างเป็นสัดส่วน ด้วยค่าคงที่ของความเป็นสัดส่วน (Constant of Proportionality) ซึ่งเรียกว่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นหรือโมดูลัสของยัง (Modulus of Elasticity or Young's Modulus) โดยโมดูลัสของความยืดหยุ่นจะมีค่าเท่ากับความชัน(Slope)ของกราฟช่วงที่เป็นเส้นตรงทางวิศวกรรมพบว่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเป็นคุณสมบัติทางกลซึ่งแปรผันตรงกับค่าความแข็งแกร่ง (Stiffness)ของวัสดุ จากกราฟของ Stress – Strain มีค่า Stress สองค่าที่ให้คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของวัสดุ นั่นคือ Yield Stress และ Tensile Strength ในการออกแบบต่างๆจะใช้ค่าสองตัวนี้เลยไม่ได้ เพราะว่าถ้าวัสดุที่ใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องมือกล มี Stress เกิน Yield Stress เมื่ออยู่ภายใต้แรงชิ้นส่วนนั้นจะเป็น Plastic การทำงานและความเที่ยงตรงก็จะไม่ได้เช่นที่ออกแบบไว้ ถ้าวัดชิ้นส่วนนั้น Fail คือใช้งานไม่ได้แล้ว ดังนั้น Stress ที่เกิดขึ้นจริงๆไม่ควรเกิน Yield Stress แต่ในทางปฏิบัติจริงๆก็ไม่ควรจะให้ถึงค่า Yield Stress เพราะอันตราย วัสดุที่ใช้ทำชิ้นส่วนต่างๆอาจจะไม่สมบูรณ์ เช่น มีโพรงข้างใน มีรูเล็กๆผิวไม่เรียบหรือเนื้อวัสดุอาจจะไม่สม่ำเสมอซึ่งจะทำให้ Stress ที่เกิดขึ้นจริงสูงกว่าทางทฤษฎี ในการออกแบบจะต้องใช้ Stress ให้ต่ำกว่า Yield Stress ยิ่งต่ำมากโอกาสที่จะพังทลายก็ยิ่งน้อยลง เช่น ถ้าวัสดุ มี Yield Stress เท่ากับ 100 MN/m^2 ในการออกแบบอาจจะให้จุดที่อยู่ภายใต้ความเค้นสูงสุดมีค่าได้เพียง 25 MN/m^2 เท่านั้น Stress ที่เอาไปใช้ในการออกแบบนี้ เรียกว่า Design Stress บางครั้งเรียกว่า Working Stress หรือ Allowable Stress ส่วนตัวเลขที่ใช้ไปหาร Yield Stress เพื่อหา Design Stress เรียกว่า Design Factor บางครั้งเรียกว่า Factor of Safety วัสดุบางชนิดไม่มีค่า Yield Stress ค่า Design Stress หาได้จาก อัตราส่วน Tensile Strength ต่อ Design Factor ถ้าวัดวัสดุมีค่า Yield Stress ควรใช้ค่า Yield Stress เป็นหลักในการหาค่า Design Stress เสมอ

2.9 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า(Generator) ทำหน้าที่แปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้ามีลักษณะเป็นแบบแม่เหล็กถาวรที่รอบการทำงานต่ำ(Low Speed Permanent Generator:PMG) การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบแม่เหล็กถาวรที่รอบการทำงานต่ำใช้หลักการของการหมุนของสนามแม่เหล็กตัดขดลวดดังเช่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั่วไป ในเบื้องต้นแม่เหล็กชนิดนี้จะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กสูงกว่าแม่เหล็กธรรมดาโดยทั่วไปประมาณ 10 เท่า ขึ้นอยู่กับเกรดของวัสดุที่ผสมลงไปในเรื่องของ

แม่เหล็ก ซึ่งเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่นำมาใช้งานในกังหันลมชนิด ไม่มีเกียร์(Gear-Less System)ที่มีประสิทธิภาพสูง โดยการลดรอบการทำงานของโรเตอร์(Rotor)และเพิ่มจำนวนขั้วของแม่เหล็ก(Pole Pieces) ให้ได้ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมกับจำนวนรอบของกังหันลมและเริ่มผลิตไฟฟ้าได้ที่ความเร็วลมต่ำ (Cut-In Wind Speed) จากความสามารถเริ่มทำการผลิตไฟฟ้าที่รอบการทำงานต่ำแล้วยังเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ระบบโดยไม่ดึงไฟฟ้าจากระบบสายส่งหลักมาใช้ในการเริ่มหมุนเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กแบบเหนี่ยวนำ(Induction Generator or Asynchronous) ชนิดที่มีเกียร์ทดทั่วไป ทำให้ระบบมีเสถียรภาพในการทำงานสูงและลดการผันผวนของระบบสายส่งหลัก(Non-Fluctuating Grid-Connection)ได้อีกด้วย

จุดเด่นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร สำหรับงานผลิตไฟฟ้าจากลม(Wind Electrication) เครื่องกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลมที่นิยมใช้โดยทั่วไปมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.9.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส (Synchronous Generator) เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ หมุนด้วยความเร็วคงที่คือ ความเร็วซิงโครนัส(Synchronous Speed) พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมีความถี่และแรงดันไฟฟ้าเท่ากับความถี่และแรงดันไฟฟ้าของระบบสายส่ง สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกได้ในย่านไม่กว้างนัก โดยการควบคุมปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กหลักจากขดลวดกระตุ้น มักมีโครงสร้างขนาดใหญ่พิกัดกำลังไฟฟ้าค่อนข้างสูง และการควบคุมค่อนข้างซับซ้อนจึงไม่นิยมใช้ในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมโดยเฉพาะกรณีพิกัดกำลังไฟฟ้าไม่สูงนัก

2.9.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอะซิงโครนัสหรือแบบเหนี่ยวนำ(Aynchronous Generator or Induction Generator) เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนเหมือนมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ(Induction Motor) โดยป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าที่ขด สเตเตอร์ทำให้เกิดฟลักซ์เป็นขั้วแม่เหล็กหมุนตามสภาวะกระแสสลับไปเหนี่ยวนำแกนโรเตอร์ให้หมุนตามในตอนเริ่มต้นและเมื่อมีแรงมาจับโรเตอร์ ให้หมุนเกินกว่าความเร็วซิงโครนัส จะเกิดการเหนี่ยวนำย้อนกลับ ทำให้เกิดกระแสไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายย้อนกลับเข้าระบบสายส่ง มีหลายขนาดให้เลือกใช้ แต่การควบคุมแรงดันขาออกค่อนข้างซับซ้อน เหมาะสมกับงานผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่มีพิกัดกำลังขนาดใหญ่ และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระบบควบคุมค่อนข้างสูง

2.9.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Generator:PMG.) เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนทำให้การดูแลรักษาง่าย และควบคุมการทำงานได้ง่าย ทั้งนี้เนื่องจากปัจจุบัน อุปกรณ์แม่เหล็กถาวร ที่มีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูง อายุการใช้งานไม่น้อยกว่า 30 ปี ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร ยังมีขนาดเล็ก และเบาอย่างมาก อีก

ทั้งประสิทธิภาพในการทำงานสูงมาก จึงนิยมประยุกต์ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในงานผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมขนาดเล็กและขนาดกลางทั่วไป

2.10 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ

การใช้โปรแกรมทางด้าน CFD คือการที่นำความรู้ด้านพลศาสตร์ของไหลมารวมกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งสมการทางพลศาสตร์ของไหลที่นิยมนำมาใช้กันอยู่ก็จะ เป็นสมการการอนุรักษ์ ซึ่งสมการการอนุรักษ์ที่นำมาใช้กันจะมี 3 สมการคือ

สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

สมการการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Conservation equation)

สมการการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Conservation equation)

การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นเครื่องมือช่วยแก้ปัญหาที่ซับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับการไหล โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) คำนวณเพื่อประมวลผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อยที่มีความซับซ้อน ซึ่งมีความยุ่งยากในการหาผลเฉลยด้วยวิธีแม่นยำ หลักสำคัญในการคำนวณพลศาสตร์ของไหลต้องเกี่ยวข้องกับสมการบังคับ ซึ่งสมการบังคับพื้นฐานของพลศาสตร์ของไหลได้แก่ สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

2.10.1 สมการพื้นฐานสำหรับการไหล

การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นเครื่องมือช่วยแก้ปัญหาที่ซับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับการไหล โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) คำนวณเพื่อประมวลผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อยที่มีความซับซ้อน ซึ่งมีความยุ่งยากในการหาผลเฉลยด้วยวิธีแม่นยำ หลักสำคัญในการคำนวณพลศาสตร์ของไหลต้องเกี่ยวข้องกับสมการบังคับ ซึ่งสมการบังคับพื้นฐานของพลศาสตร์ของไหลได้แก่ สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบนั้นมีความสำคัญมาก ยิ่งมีการออกแบบกังหันลมโดยการใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) มาใช้ ซึ่งในหลักการทางวิศวกรรมของไหลแล้วเรียกว่า Computational Fluid Dynamics (CFD)

โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็วโดยมีความเร็วของชุดประมวลผล (CPU Speed) แล้วยังมีหน่วยความจำ (Memory) ที่มีประสิทธิภาพสูงจึงทำให้การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) และการทำงานของโปรแกรมการคำนวณของ

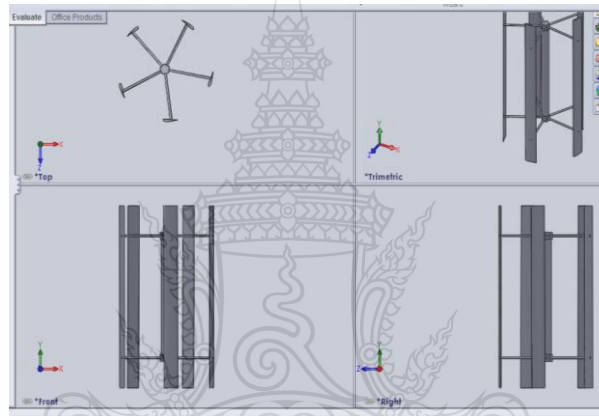
CFD สามารถทำได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นตามไปด้วย ในการวิเคราะห์ปัญหาด้านของไหลต่างๆ เช่น

ของไหลที่สามารถอัดตัวได้ หรือ Compressible Fluid ตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์การไหลในระบบท่อทางต่างๆ ของระบบการทำความเย็นหรือปรับอากาศ เป็นต้น

ของไหลที่ไม่สามารถอัดตัวได้ หรือ Incompressible Fluid ตัวอย่างเช่น การไหลของน้ำในระบบท่อทางต่างๆ ภายในอาคาร

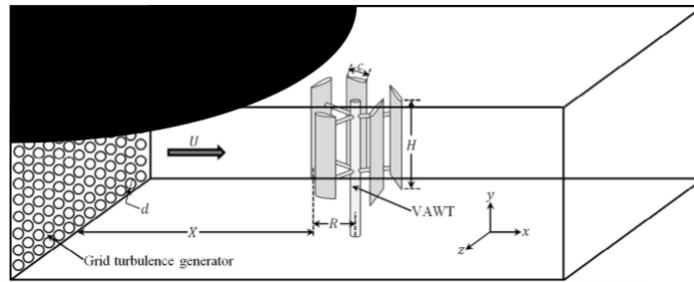
ของไหลที่มีการไหลเป็นแบบราบเรียบหรือที่เราเรียกกันว่า Laminar Flow Problems

ของไหลที่มีการไหลแบบปั่นป่วน หรือ Turbulent Fluid Flows เป็นต้น



รูปที่ 2.19 การสร้างแบบจำลองของกังหันลม

สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ในทางเรื่องของ CFD นั้น อาจจำแนกออกได้หลายชนิดหลักๆ อาทิเช่น สมการการไหลแบบต่อเนื่อง (Continuity Equation) หรือสมการอนุรักษ์ของมวลสาร (Conservation of Mass) สมการทางคณิตศาสตร์ในเรื่องของการคำนึงถึง Momentum หรือที่รู้จักกันเป็นอย่างดีในทาง CFD ก็ คือ Navier-Stokes Equations และสุดท้ายอาจจะรวมถึงสมการทางคณิตศาสตร์ในเรื่องของการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Equations) สมการทั้งหมดที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะนำมาใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ของไหลในโปรแกรม การคำนวณของ CFD โดยการจัดรูปรวมกันเป็นสมการที่เรียกว่า Non-linear Partial Differential Equations (PDE) มาใช้ในการ



รูปที่ 2.20 ลักษณะการกำหนดค่าต่างๆที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของกังหันลม[20]

วิเคราะห์การไหลของ ของไหลแบบต่างๆ ในทางวิศวกรรมดังกล่าวมาแล้วข้างต้น

การวิเคราะห์การไหลของ ของไหลแบบต่างๆในทางวิศวกรรม โดยทั่วไปนั้นเราจะคิดเสียว่าการไหลนั้นจะเป็นแบบต่อเนื่องคงที่ (Linear Flow) เราจึงทำการสมการที่จะตัดตัวแปรบางอย่างออกไปได้ ซึ่งในทางความเป็นจริงแล้วของไหลต่างๆในทางวิศวกรรม โดยทั่วไปที่จริงแล้วจะมีความซับซ้อนสูงแล้วยังจะเป็นการไหลแบบไม่ราบเรียบและไม่คงที่ตลอด (Non-linear Flow) เกือบทั้งสิ้น ซึ่งนั่นก็คือ จะต้องมีการใช้การวิเคราะห์ทางตัวเลขขั้นสูง (Advanced Numerical Methods) มาใช้ในการวิเคราะห์การไหลของ ของไหลในปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นจริงในทางวิศวกรรม

การทำงานโดยทั่วๆ ไปของการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆใน Computational Fluid Dynamics หรือ CFD นั้น คือการใช้หลักการแทนที่ (Discretisation) จุดประสงค์ของการทำ เพื่อเปลี่ยนสมการที่มีความต่อเนื่องไปเป็นสมการไม่ต่อเนื่อง ไม่ว่าจะด้วยวิธีการใดก็ตามเพื่อลดความยุ่งยากของสมการ Partial Differential Equations (PDE) ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมทางฟิสิกส์ให้เป็นของชุดสมการทางพีชคณิต (Set of Algebraic Equation) ซึ่งอยู่ในรูปของการ บวก ลบ คูณ หาร เท่านั้น ซึ่งจะสามารถหาผลเฉลยได้สะดวกขึ้น การแก้ปัญหาดังแต่จุดเริ่มต้นของปัญหาในการไหลในทางวิศวกรรมใดๆ จนกระทั่งถึงจุดท้ายสุดของการวิเคราะห์นั้นก็คือ การหาคำตอบที่เราต้องการ ซึ่งในทางของการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) หรือ CFD แล้วเราเรียกวิธีการนี้ว่าการ Discretisation ซึ่งจะสามารถทำได้นั้นก็จำเป็นต้องใช้การได้เปรียบทางด้านคอมพิวเตอร์ (Computer) เข้ามาช่วยในการคำนวณเท่านั้น ซึ่งเราจะได้คำตอบโดยประมาณ (Approximate Solution) เมื่อสิ้นสุดการวิเคราะห์การไหลในปัญหาชนิดต่างๆหลักการ Discretisation Method ที่มีการใช้อย่างกว้างขวาง และเป็นที่ยึดกันดีใน CFD นั้น แบ่งออกเป็น 2 วิธีการหลักๆ ดังนี้

1. Finite Difference Method (FDM)

2. Finite Element Method (FEM)

สมการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Differential Equation เปรียบเทียบกับค่าที่เรียกว่า Finite Difference Approximation เพราะฉะนั้นค่าความแม่นยำที่ตรงของคำตอบจึงขึ้นอยู่กับขนาดของกริด (Grid หรือ Mesh) ที่เราสร้างขึ้นมา

ในทางการวิเคราะห์กังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบโดยทั่วไปแล้วยังมีความละเอียดของ Mesh สูงก็จะทำให้คำตอบมีความแม่นยำสูงไปด้วย แต่ก็มีได้หมายความว่าอย่างนี้เสมอไป

2.11 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากรุวรรณ ตั้งต้นสกุลวงศ์ (2549) ได้ประเมินศักยภาพของCFD ในการศึกษาการไหลผ่านกังหันลมแกนตั้ง โดยจำลองเชิงตัวเลขของการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กแบบแรงยกด้วยโปรแกรมวิเคราะห์การไหลFLUENT พบว่าค่าแรงบิดมีการเปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลาสัมพันธ์กับความเร็วมุมพัดและมุมปะทะที่เข้าสู่หน้าตัดกังหันผลเฉลยจากการคำนวณสามารถนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหัน

สมจิตร ชินะใจ(2550)ศึกษาการปรับปรุงสมรรถนะและวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานของกังหันลมแกนตั้งโดยใช้กรอบเสริมกันบังคับลมเข้ามีมุมต่างกัน 7 มุมพื้นที่ช่องลมเข้า 4 ค่าทดสอบในอุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบเปิด ออกแบบและสร้างใบพัด 6 ใบ ผลการศึกษาพบว่า การแปรเปลี่ยนมุมกรอบเสริมกันบังคับลมเข้า พื้นที่ช่องลมเข้าและแปรเปลี่ยนความเร็วลม มีส่วนทำให้ความเร็วรอบเพลา กำลังขาออกสูงสุด 7.1 วัตต์ และแรงบิด เพิ่มขึ้น 0.071 นิวตัน-เมตรและประสิทธิภาพ 57.3% .

เกียรติขจร สุเวทเวทิน(2552)ได้ศึกษาทฤษฎีส่วนของใบกังหันและทฤษฎีโมเมนตัม แบบลำการไหลเดี่ยว วิเคราะห์กังหันลมแกนตั้งแบบใบกังหันตรงชนิด 3 ใบ ที่อัตราส่วนอัตราเร็วปลายใบกังหันประมาณ 4 พบว่าแผนอากาศแบบ NACA 0012 มีความเหมาะสมในการนำมาใช้สร้างกังหันลมแกนตั้งประสิทธิภาพสูง

สว่างชาติทอง (2554)ได้ศึกษาการออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยใช้ทฤษฎีโมเมนตัมกับการคำนวณพลศาสตร์ของไหล ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์CF-Design V9.0 เพื่อให้ผลิตไฟฟ้าได้ที่ความเร็วลมเริ่มทำงานที่ 2.5 เมตรต่อวินาทีและได้กำลังผลิตไฟฟ้าสูงสุด 20 กิโลวัตต์ ความเร็วลม 9.5 เมตรต่อวินาที โดยใช้รูปร่างใบกังหันลม คือหยดน้ำรุ่น S-1223 พบว่าใบกังหันมีมุมบิดโคนใบ 8

องศา มุมบิดปลายใบ 2 องศาได้แรงบิด 109 นิวตันเมตรกับระบบส่งกำลังแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 กิโลวัตต์ 2 ตัว สำหรับพื้นที่ที่มีความเร็วลมเฉลี่ย 4-5 เมตรต่อวินาที

ไมตรี พลสงคราม(2558) ศึกษาการปรับปรุงกังหันลมแกนตั้งแบบใบปรับมุมได้ต่อเนื่อง ด้วยวิธีการติดตั้งอุปกรณ์เสริมพบว่าอัตราส่วนความเร็วปลายโรเตอร์และความเร็วกระแสลมที่มีต่อสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมเพิ่มขึ้น 9 % เมื่อเทียบกับผลการทดลองก่อนการปรับปรุงและกังหันลมที่ได้ปรับปรุงใหม่นี้ให้สัมประสิทธิ์กำลังสูงที่ความเร็วกระแสลมต่ำ รวมทั้งสามารถเริ่มหมุนได้ด้วยตัวเองเนื่องจากแรงบิดสถิตค่อนข้างสูง สรุปได้ว่ากังหันลมชนิดนี้เหมาะสมกับสภาพกระแสลมความเร็วต่ำอย่างในประเทศไทย

กฤตภาส คงกาพิสุทฐ(2559) ศึกษาผลกระทบของอาคารที่เป็นสิ่งกีดขวาง ซึ่งมีผลต่อการไหลของอากาศ ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ ชนิดแนวอนโดยใช้แบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหล(CFD) งานวิจัยนี้แสดงถึงพลังงานลมที่ผลิตได้จากกังหันลม ประสิทธิภาพลดลง 80.63%เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีติดตั้งที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง สามารถใช้เป็นรูปแบบแนวทางในการติดตั้งกังหันลมขนาดเล็กในพื้นที่ต่างๆที่มีสิ่งกีดขวางได้ในอนาคต ควรที่จะมีการประเมินและคำนึงถึงสิ่งกีดขวางในบริเวณนั้นก่อนที่จะมีการติดตั้ง

Yan Li(2009) พบว่ากังหันลมแนวแกนตั้งที่ติดตั้งบนพื้นที่ภูเขาสูงที่ปราศจากระบบส่งกำลังไฟฟ้า ในภาวะที่อากาศหนาวเย็น หิมะและน้ำแข็งที่เกิดขึ้นบนผิวใบพัดส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของกังหันลม จึงได้ทำการศึกษาการหมุน ประสิทธิภาพพลังงานสภาวะดังกล่าวในอุโมงค์ลม

Khemraj Patel (2014) ได้ทำการศึกษาเอกสารที่เกี่ยวกับกังหันลมในแนวแกนตั้งเพื่อเปลี่ยนพลังงานทดแทนจากลมมาอยู่ในรูปพลังงานทางไฟฟ้าโดยศึกษาประเภทของวัสดุ ความหนาของวัสดุที่นำมาใช้สร้างใบกังหัน จำนวนใบกังหัน การปรับมุมใบกังหันรวมทั้งการปรับความถี่ตรงของใบกังหัน

M.Saqib Hameed (2015) พบว่าแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นกับกังหันลมในแนวแกนตั้งมีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบใบกังหันลม แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการโค้งและความแข็งแรงของใบกังหันลม วัสดุผสมมีความเหมาะสมในการนำมาสร้างใบกังหันที่มีขนาดความหนาแน่นแต่มีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักของวัสดุ โดย Glass-Epoxy มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้มากกว่าAluminium

Qing'an Li (2015) ได้ทำการทดสอบกังหันลมแนวแกนตั้งในอุโมงค์ลมโดยใช้ใบกังหันลมที่มีรูปร่างหยดน้ำ NACA 0021 และจำนวนใบพัด 2 ถึง 5 ใบ พบว่ากังหันลมแนวแกนตั้ง สามารถพัฒนาให้ออกแบบให้ใช้งานได้สะดวกขึ้นในอนาคต

Wei-Hsin Chen(2016)วิเคราะห์พลังงานที่ออกจากกังหันลมแนวแกนตั้งสองชุด โดยCFD พบว่ามุมอัตราการไหล 120 องศา อัตราส่วนความเร็วสูงสุดเท่ากับ 2 ระยะห่างระหว่างกังหันลมกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกังหันเท่ากับ 3 ทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาและมุมของใบกังหัน ที่ 0 องศา กังหันลมให้ค่าพลังงานที่เหมาะสมที่สุด



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิเคราะห์กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนตั้งขนาด 3 กิโลวัตต์ทำการวิเคราะห์จาก กังหันลมผลิตไฟฟ้าแกนตั้งแบบ Vertical Axis Wind Turbines(VAWT)ระบบ Off-Grid ที่มีขนาด 5 ใบพัดมีเส้นผ่าศูนย์กลางกังหันขนาด 3 เมตร เพื่อใช้ในการศึกษาและทำการติดตั้งใช้งานจริง

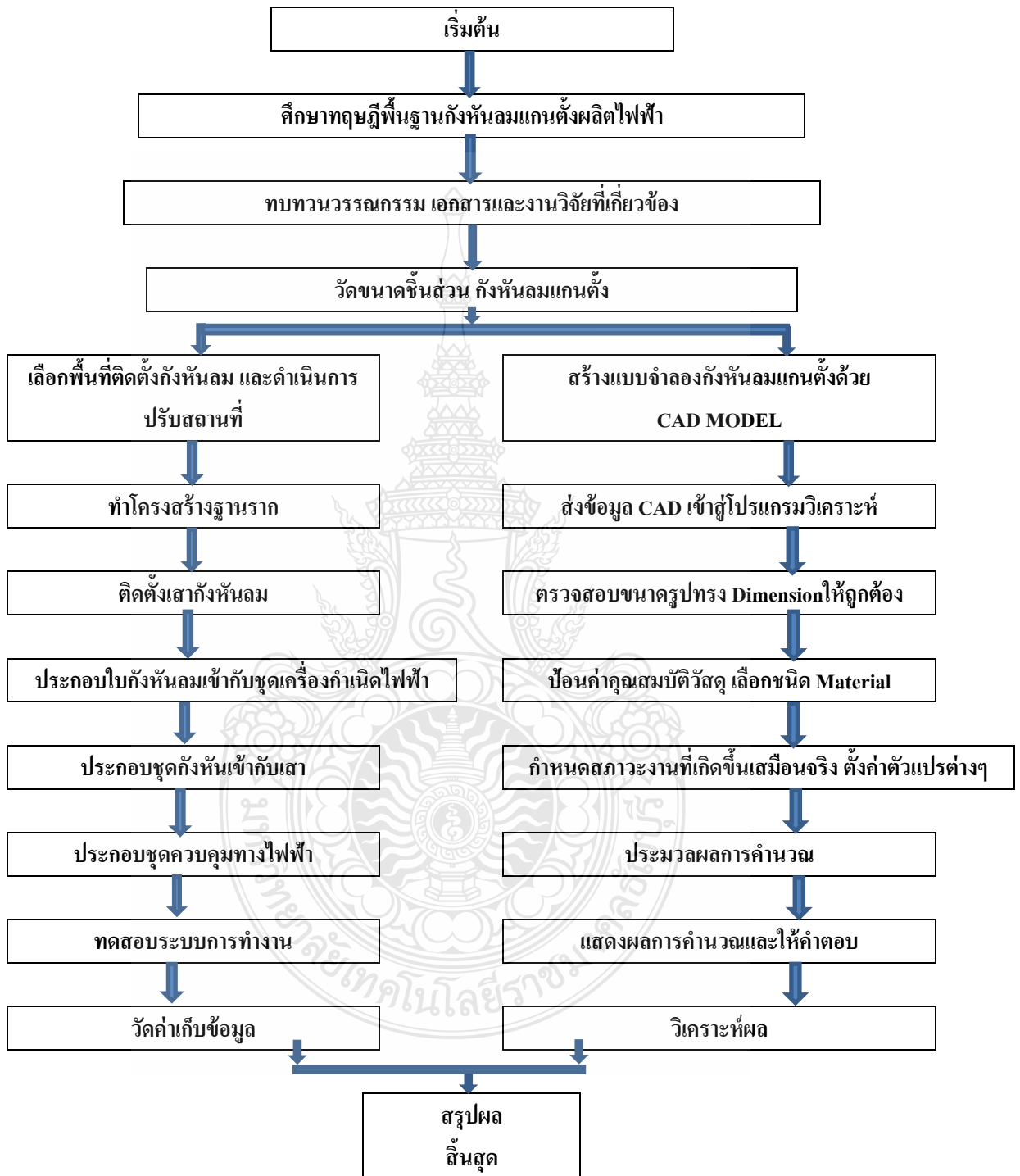


รูปที่ 3.1 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนตั้งชนิด 5 ใบขนาด 3 กิโลวัตต์

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลกึ่งหุ่นลมแกนตั้ง

Geometry parameter	Dimension
Number of blades	5
Radius of wind turbine	1.5 m
Height of blade	3.6 m
Chord of blade	47.2 cm
Weight of the single blade	16 kg
Technical data for off Grid VAWT	
Generator	328 kg
Working wind speed	4-25 m/s
Cut in wind speed	3 m/s
Rated wind speed	12 m/s
Cut out wind speed	25 m/s
Rated rotation speed	110 rpm

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย



รูปที่ 3.2 แผนภูมิขั้นตอนในการดำเนินงานศึกษา

3.2 เครื่องมือวัด



รูปที่ 3.3 เซ็นเซอร์ตรวจสอบ



รูปที่ 3.4 เครื่องมือวัดความเร็วลม



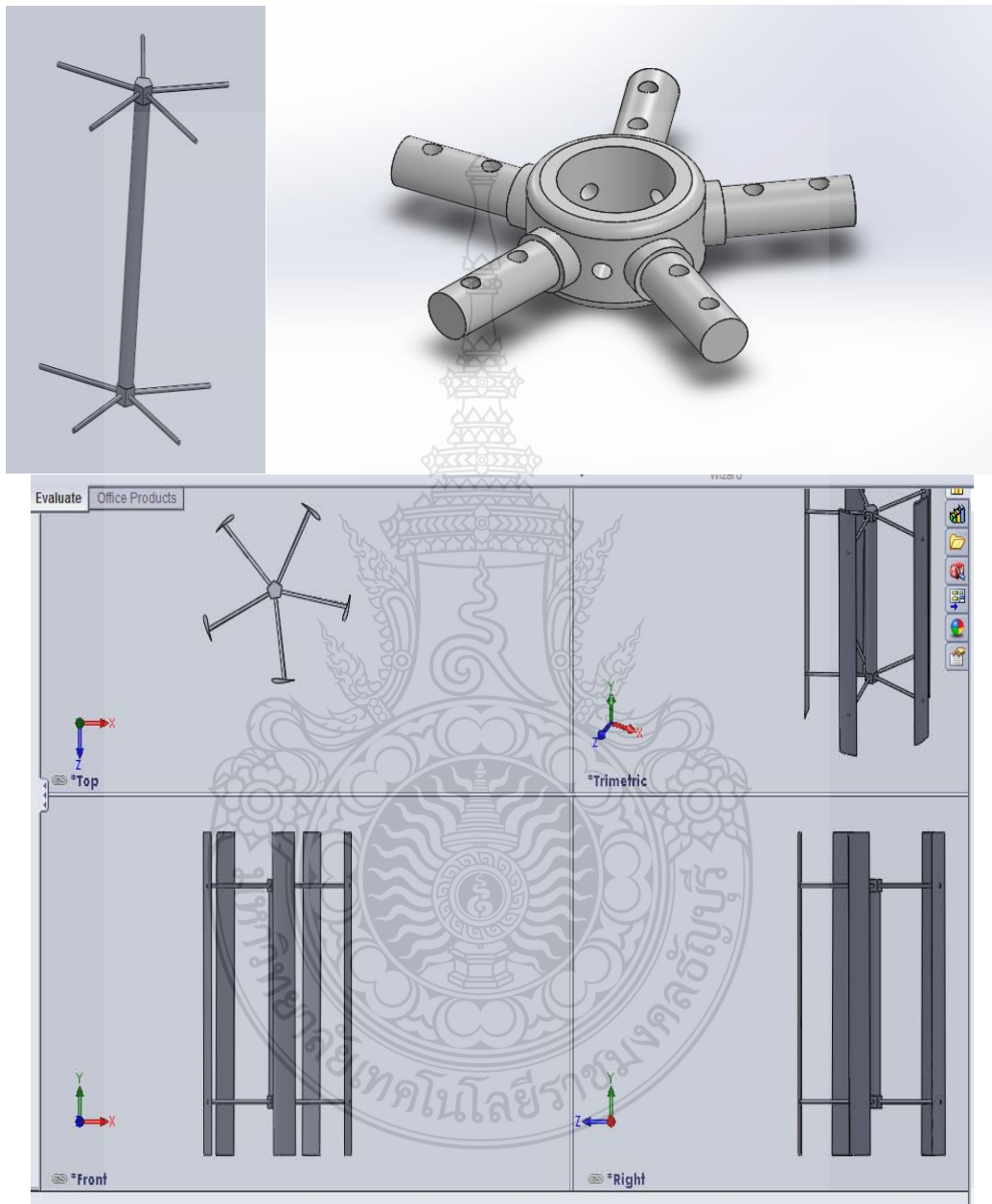
รูปที่ 3.5 วัตต์มิเตอร์



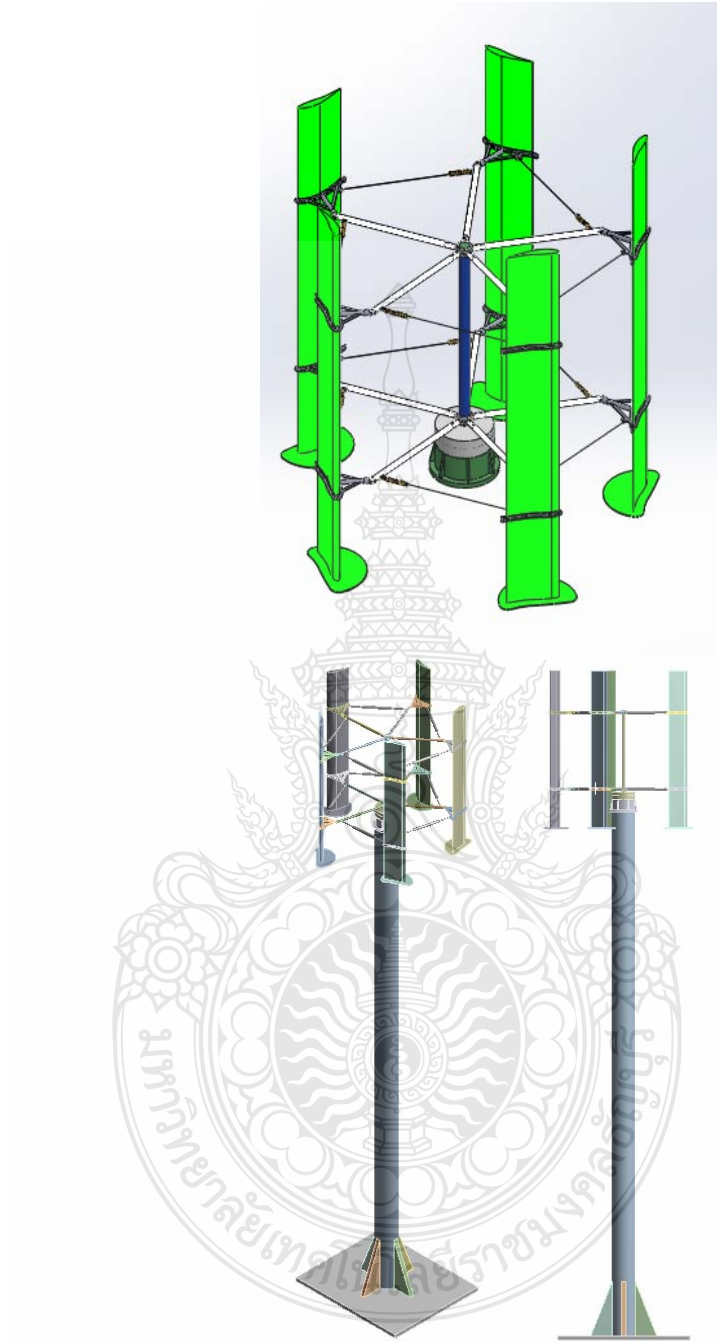
รูปที่ 3.6 Digital Clamp Multimeters

3.3 การทดลองและตารางการเก็บข้อมูล

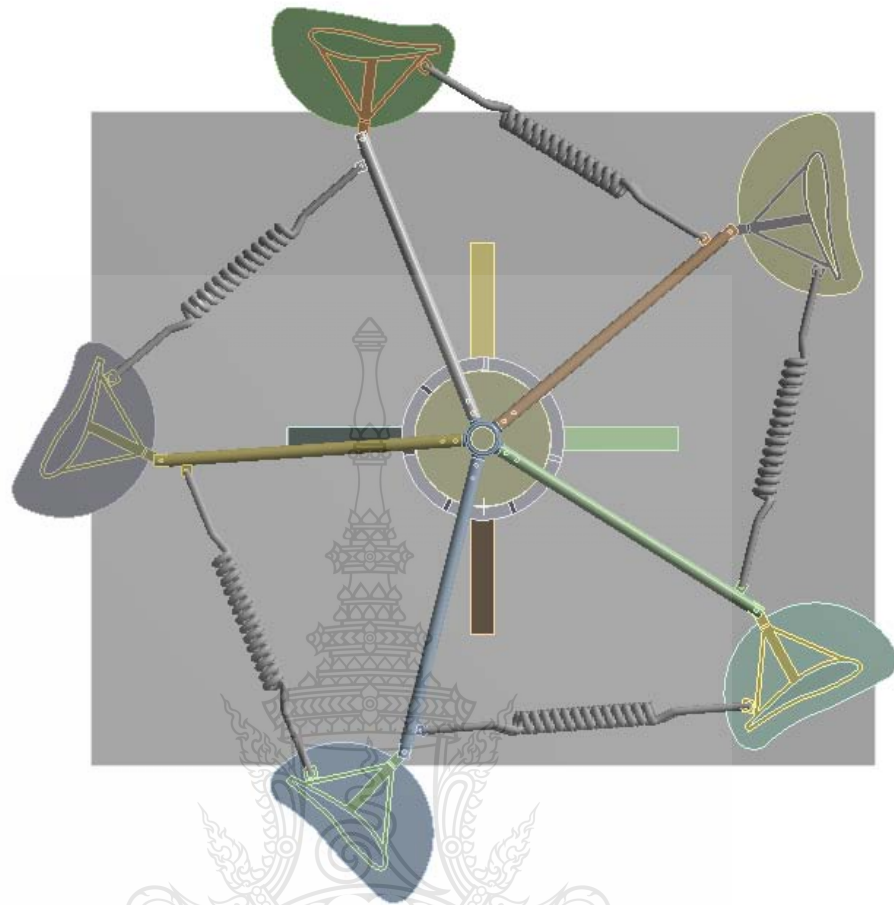
3.3.1 สร้างแบบจำลองก้านหมกแกนตั้ง



รูปที่ 3.7 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ชิ้นส่วนก้านหมกแกนตั้ง



รูปที่ 3.8 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์กั้นล้มประกอบเสร็จ



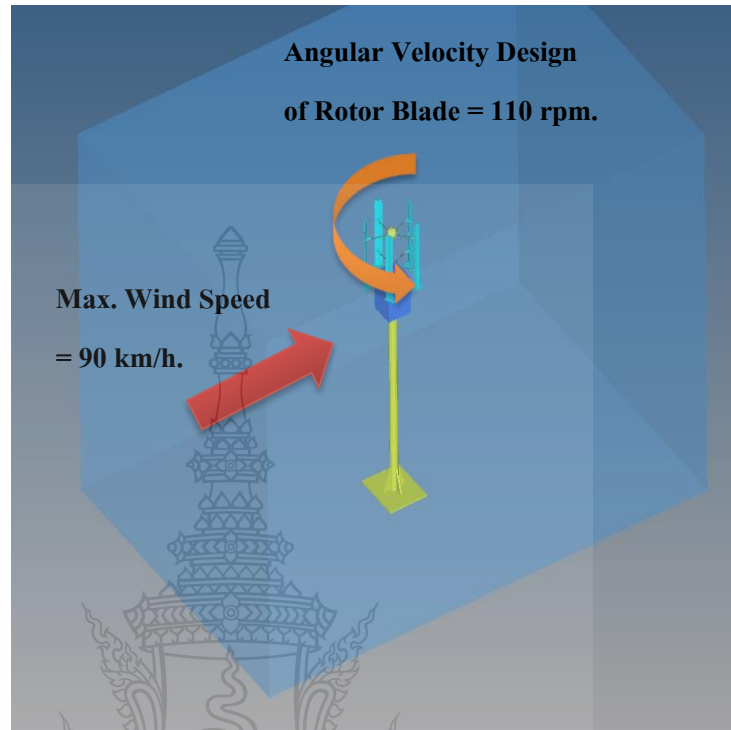
รูปที่ 3.9 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มุมมองด้านบนกึ่งหันลม

3.3.2 เลือกชนิดวัสดุ

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลวัสดุกึ่งหันลมแกนตั้ง

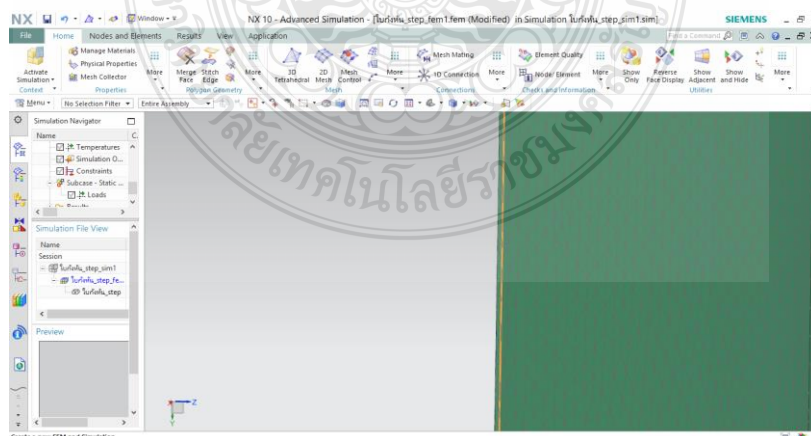
Material	Density (g/cc.)	Elastic Modulus (GPa.)	Poisson's ratio	Yield Strength (MPa.)
Steel	7.85	205	0.3	250
E-Glass	2.64	77	0.19	1,080 – 3,345

3.3.3 กำหนดสภาวะงานที่เกิดขึ้นเสมือนจริง ตั้งค่าตัวแปรต่างๆ

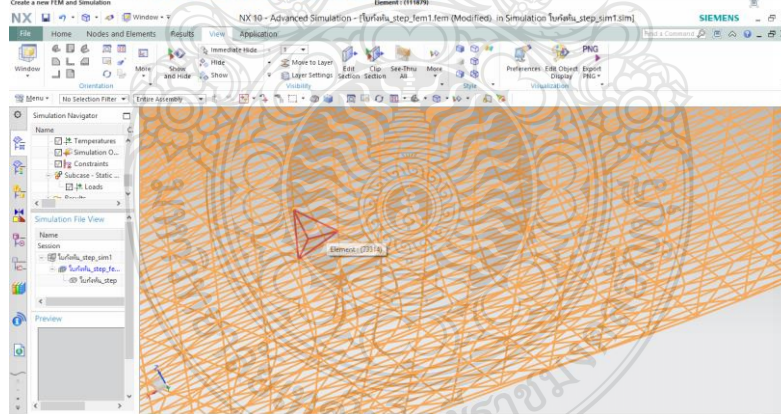
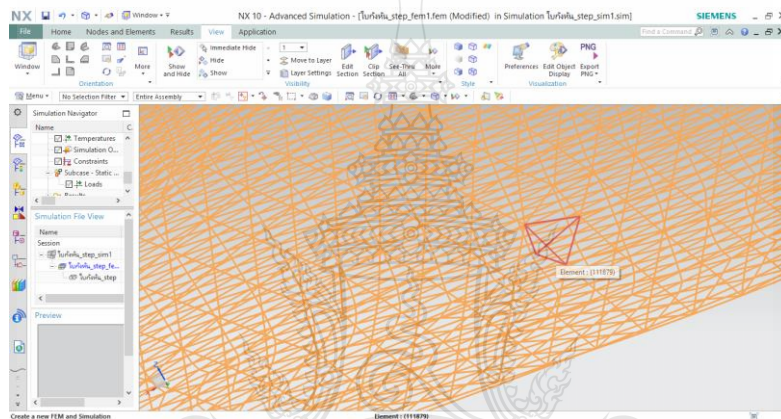
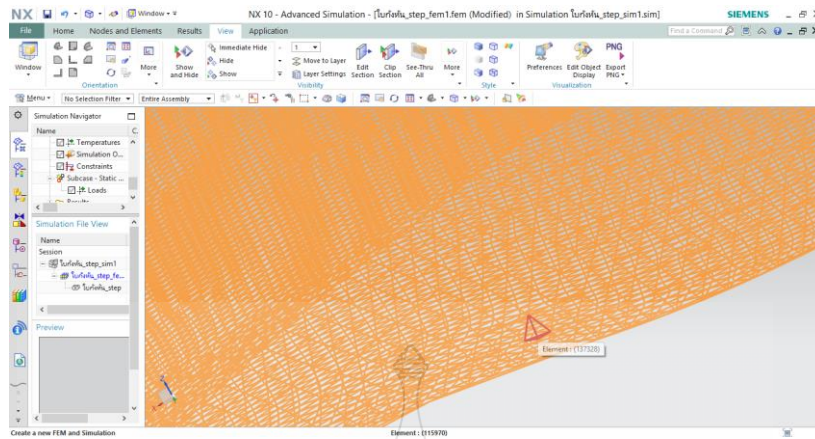


รูปที่ 3.10 กำหนดค่าการจำลองสภาวะงานที่เกิดขึ้นทางคอมพิวเตอร์

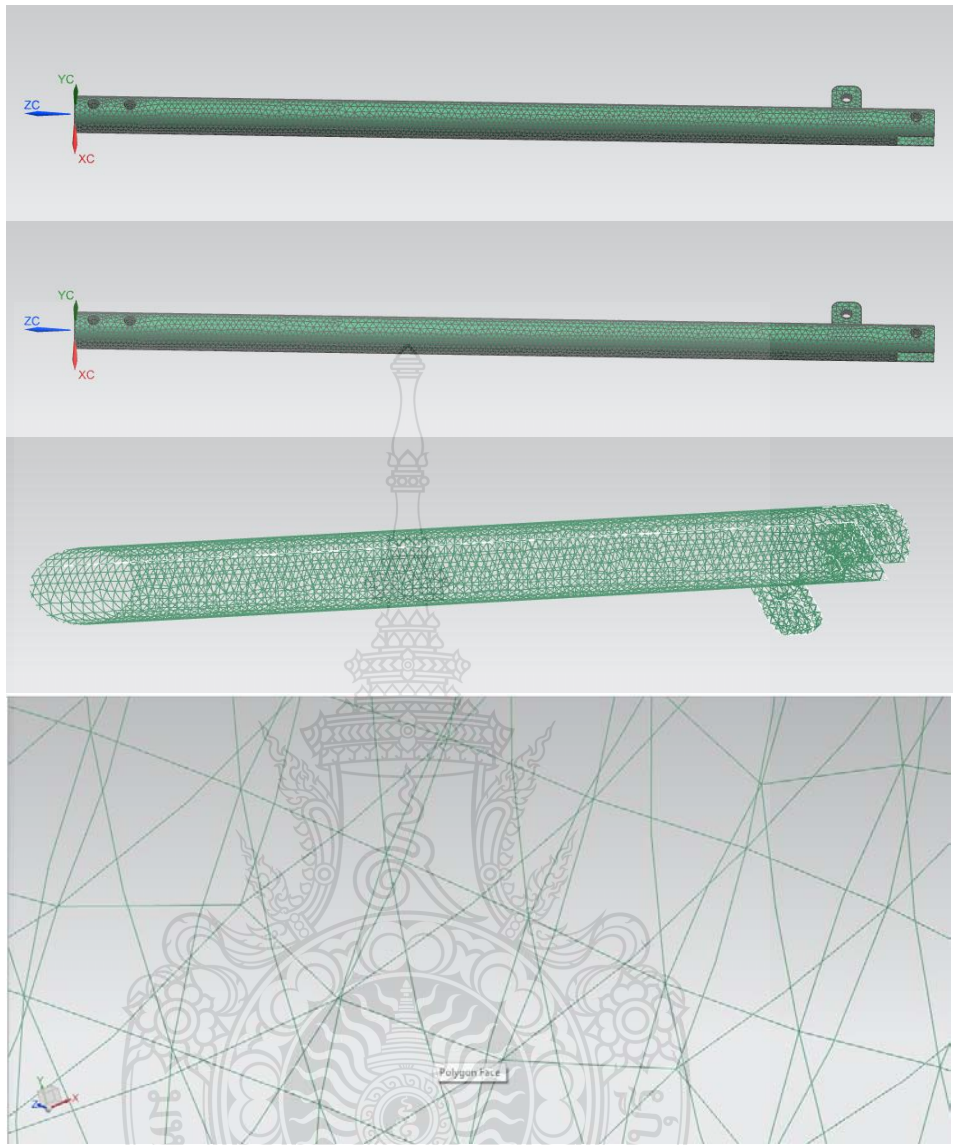
3.3.4 สร้าง Mesh ชิ้นส่วนใบกังหัน



รูปที่ 3.11 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการแบ่งชิ้นส่วนภายใน

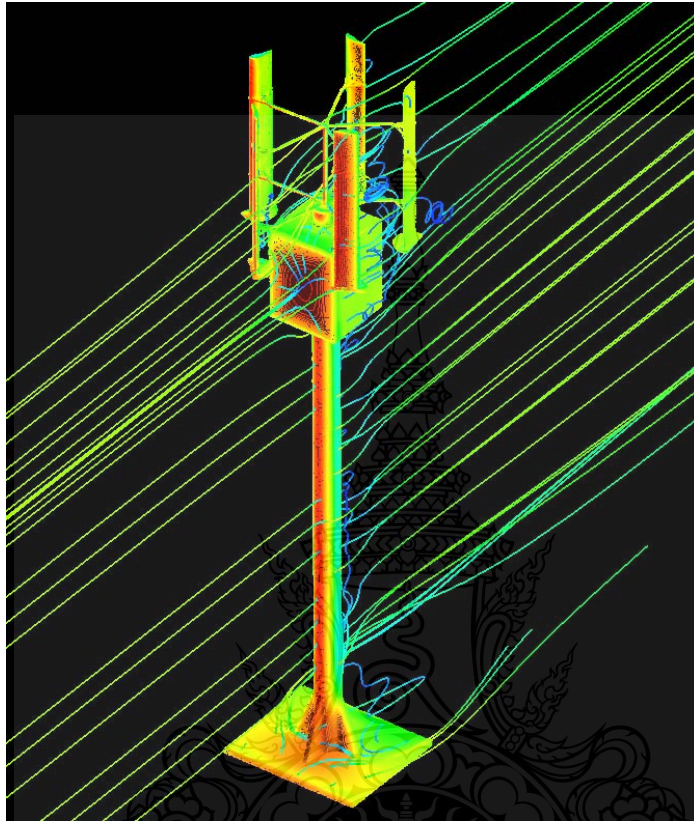


รูปที่ 3.12 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการแบ่งชิ้นส่วนภายในของใบกังหัน



รูปที่ 3.13 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการแบ่งชิ้นส่วนภายในของชุดจับยึดใบกังหัน

3.3.5 ประมวลผล



รูปที่ 3.14 แสดงผลโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

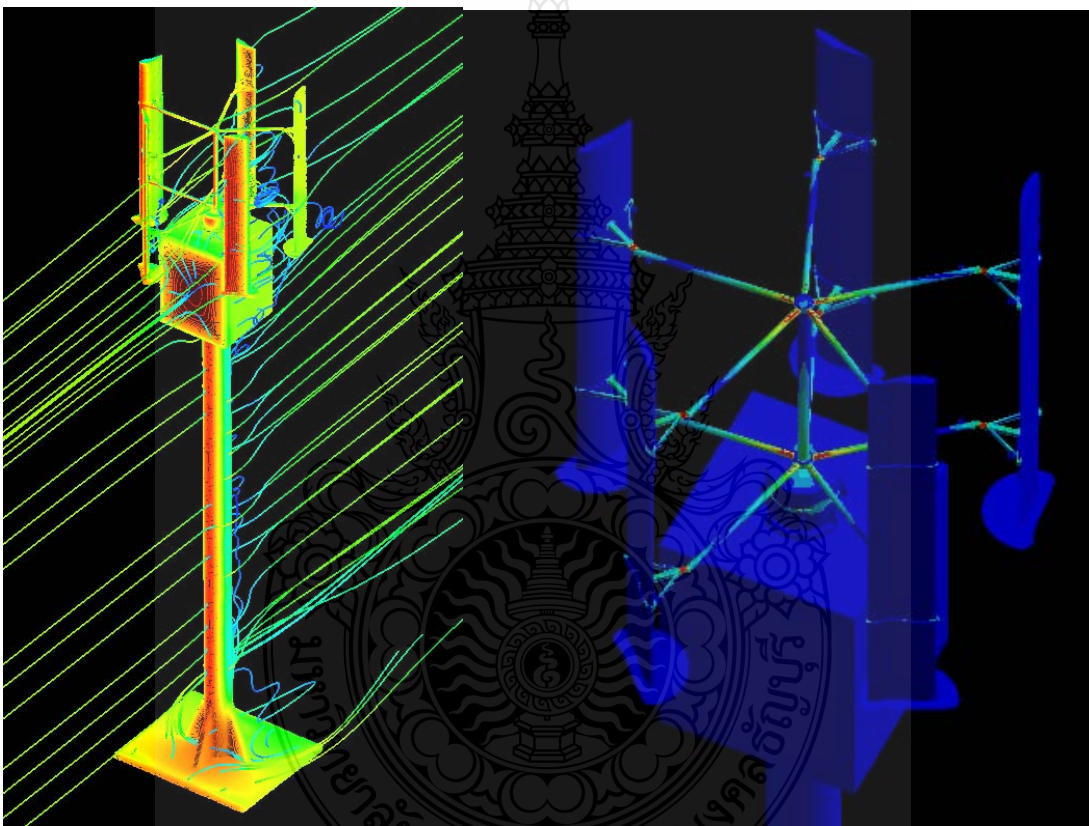
ขั้นตอนการทดลองเพื่อหาจุด Cut in และหาค่าประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า
แนวแกนตั้งขนาด 3 กิโลวัตต์ หาค่าที่ได้จากการติดตั้งใช้งานจริง ทำการติดตั้ง กังหันลมผลิตไฟฟ้า
เตรียมอุปกรณ์เครื่องมือวัด

บทที่ 4

ผลงานวิจัย

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงผลที่ได้จากการประมวลผลที่สืบเนื่องมาจากการดำเนินการในบทที่ 3

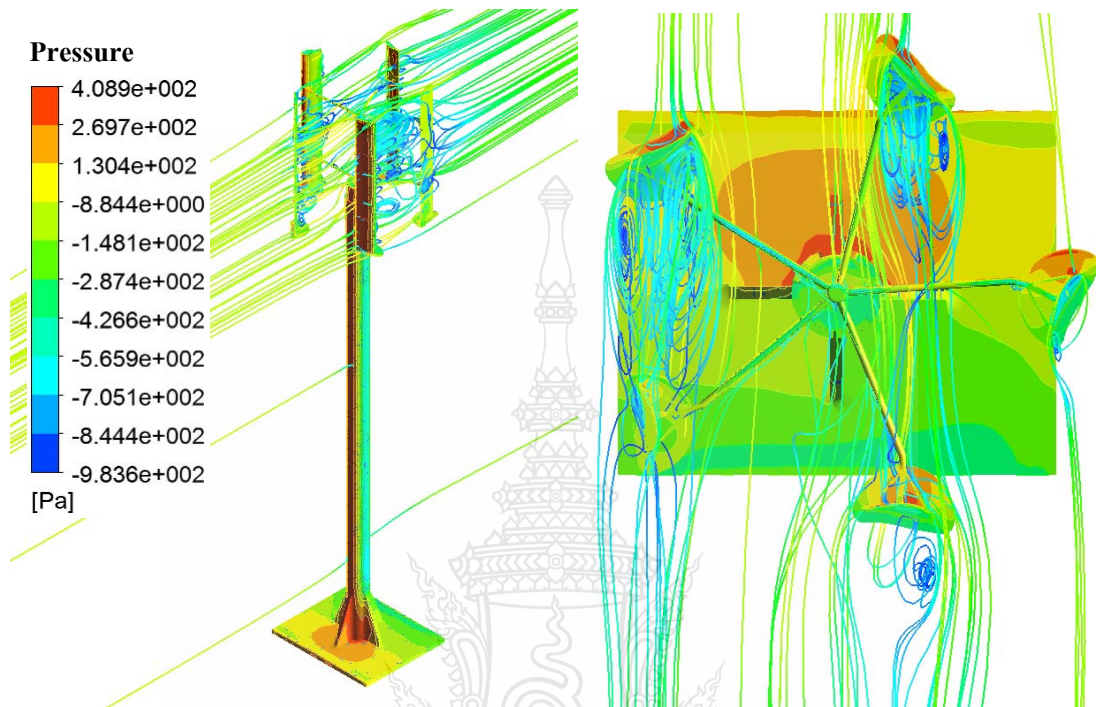
4.1 ผลจากการศึกษาคุณสมบัติความแข็งแรงของโครงสร้างกั้นลมแกนตั้ง



รูปที่ 4.1 แสดงผลด้วยค่าตามจุดสี่ที่เกิดขึ้น

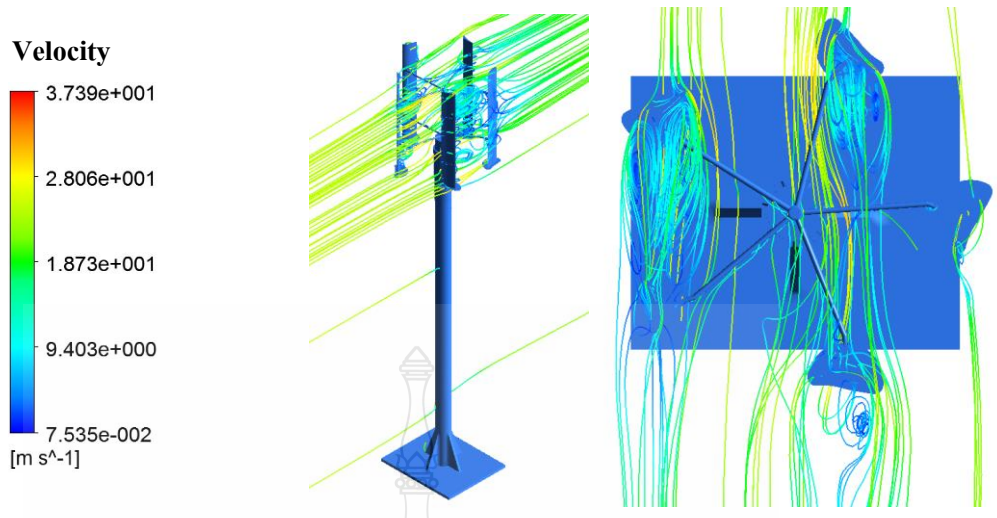
รายงานนี้ศึกษาความแข็งแรงโครงสร้างของกั้นลมผลิตไฟฟ้าแบบแนวแกนตั้ง ซึ่งมีใบกั้นลมที่ทำการศึกษา มีรูปทรงหยดน้ำ รุ่น R1235 สำหรับกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุด 3 กิโลวัตต์ จำนวนใบกั้นลม 5 ใบ ทำมุม 72 องศา ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เมตร ที่ความเร็วสูงสุด 90 กิโลเมตร

ต่อชั่วโมงความเร็วรอบ 110 รอบต่อนาทีในการศึกษานี้ใช้เทคโนโลยี CAE ช่วยในการวิเคราะห์ก่อนที่จะมีการติดตั้งจริง



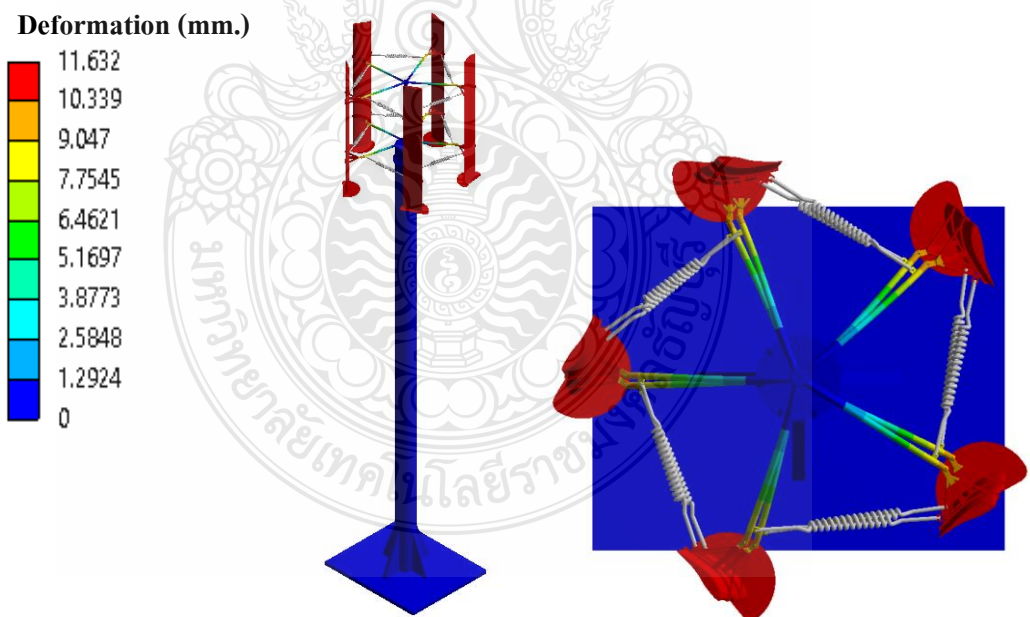
รูปที่ 4.2 แสดงค่าแรงดันและทิศทางที่เกิดขึ้นตามแนวแรงปะทะ

จากผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ความแข็งแรงของโครงสร้างก้านหลุมผลิตไฟฟ้าแบบแนวแกนตั้งที่ความเร็วลม 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยมีความเร็วในการหมุนของใบกังหันเท่ากับ 110 รอบต่อนาทีพบว่าความดันที่กระทำกับโครงสร้างก้านหลุมเท่ากับ 408.9 กิโลปาสกาลและค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชุดใบกังหันเท่ากับ 11.632 มิลลิเมตร ความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณสามเหลี่ยมเท่ากับ 226.71 เมกะปาสกาล ความเค้นที่เกิดขึ้นบนเสา ก้านเท่ากับ 207.87 เมกะปาสกาล ความเค้นที่เกิดขึ้นบนเสา ก้านหลุมเท่ากับ 15.24 เมกะปาสกาล และความเค้นที่เกิดขึ้นบนใบกังหันมีค่าเท่ากับ 22.634 เมกะปาสกาล



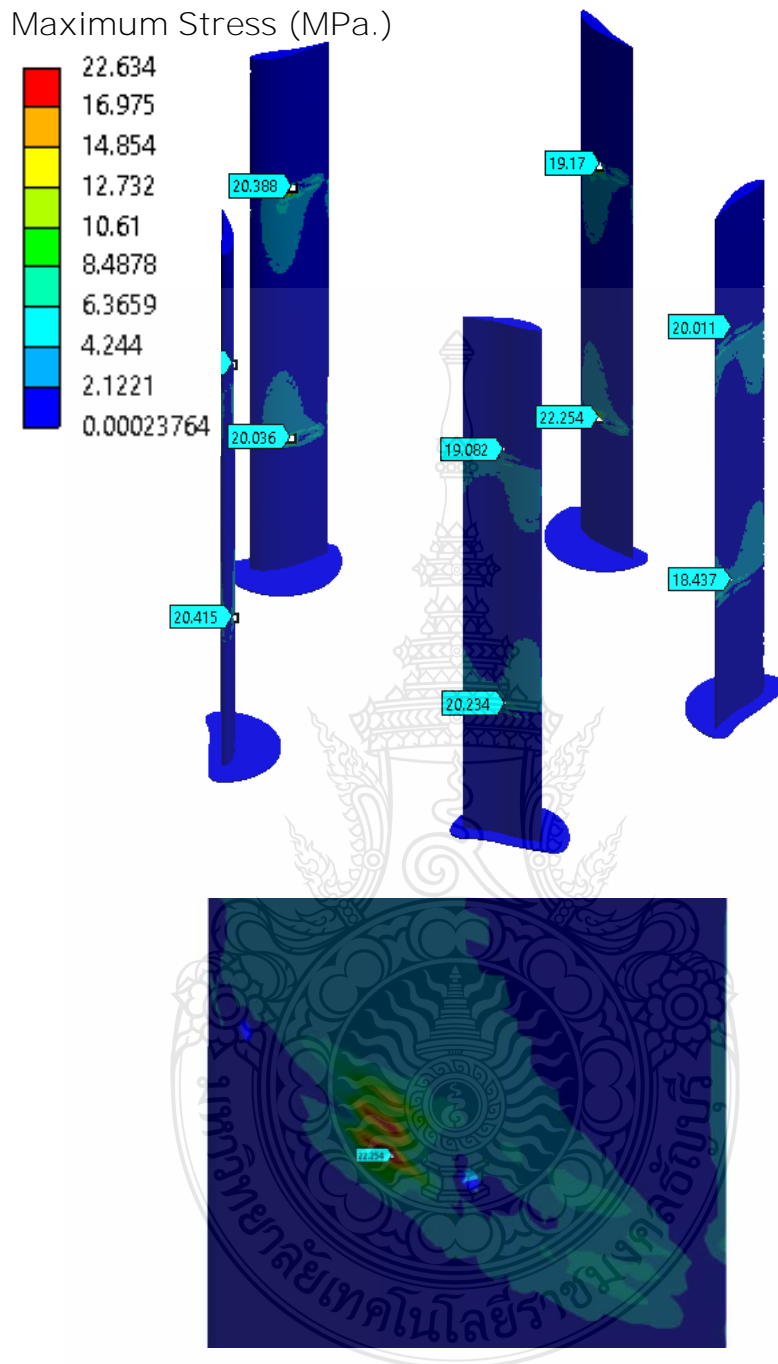
รูปที่ 4.3 แสดงค่าความเร็วลมและทิศทางที่เกิดขึ้น

จากผลที่เกิดขึ้นพบว่าภายหลังที่ลมเข้าปะทะกังหันทิศทาง กระแสลมบริเวณด้านหลังใบกังหันลมมีการไหลม้วนตัวทำให้ความเร็วลมลดต่ำ



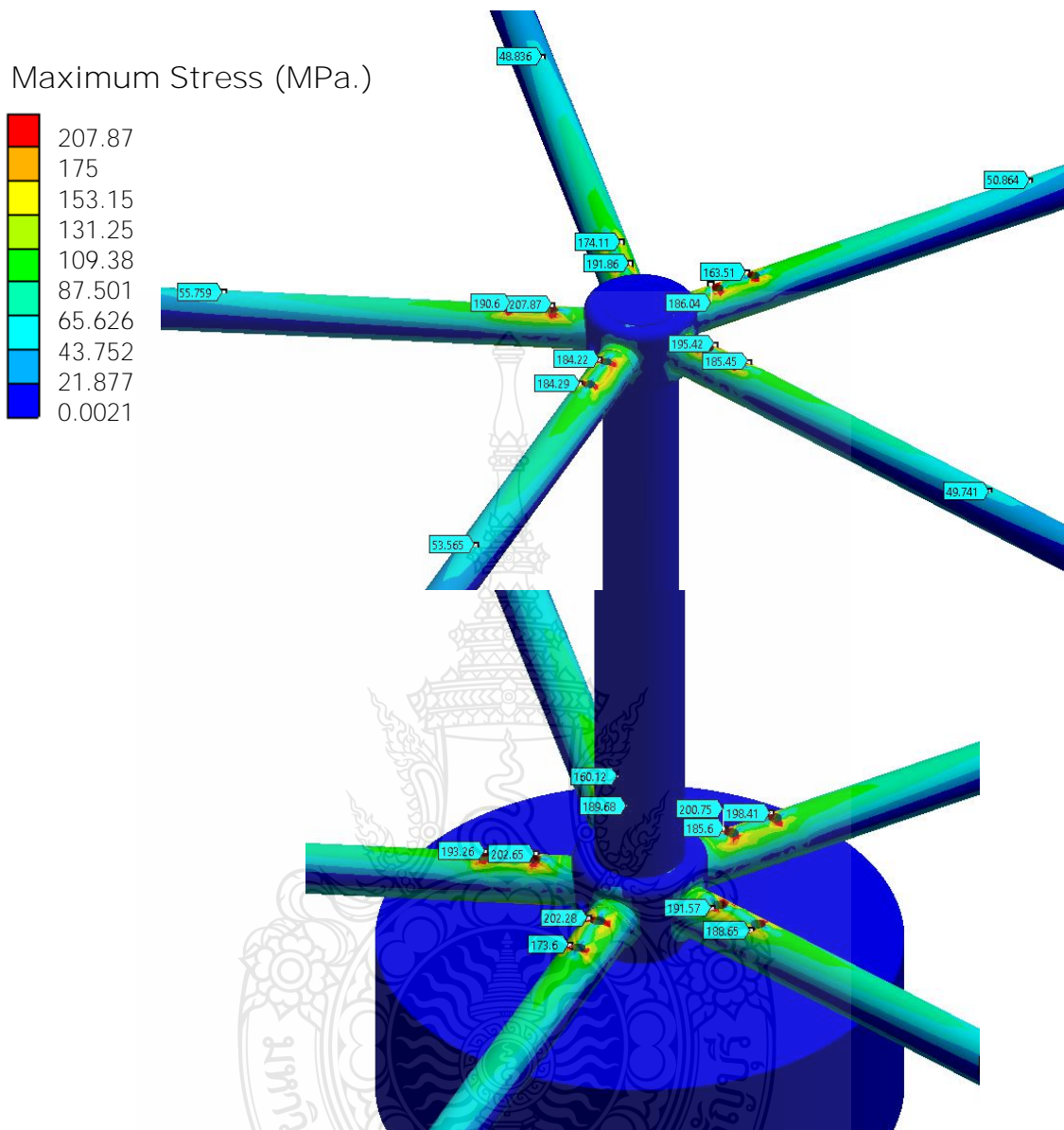
รูปที่ 4.4 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่างๆตามเจดสี

จากผลที่เกิดขึ้นพบว่าใบกังหันลมมีการเปลี่ยนแปลงขนาด สูงสุด 11.632 มิลลิเมตร บริเวณแกนจับยึดใบกังหันกับแกนเพลากลางมีขนาดเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 ถึง 10.33 มิลลิเมตร ตลอดช่วงความยาวของแกนจับยึด โดยมีการเปลี่ยนแปลงในส่วนปลายจับแกนยึดสูงแล้วค่อยๆลดลง



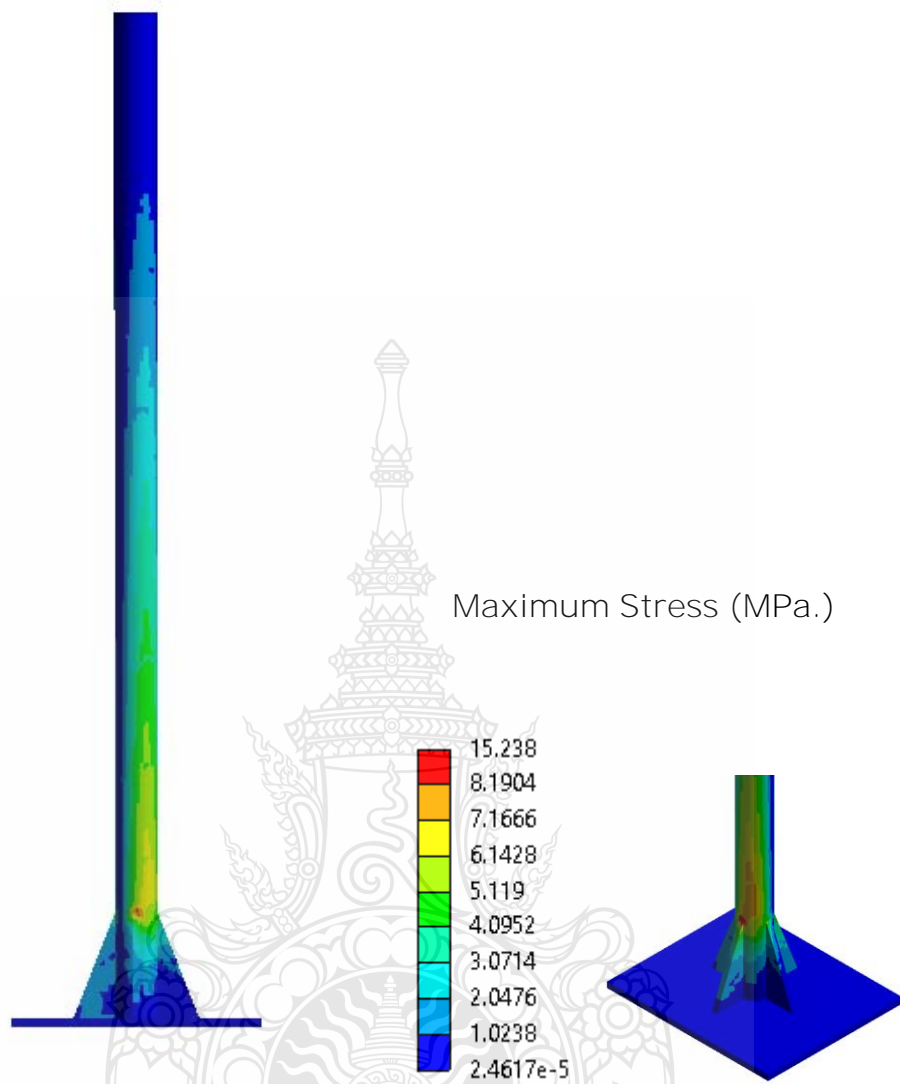
รูปที่ 4.6 แสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณไบกัณฑ์

จากผลที่เกิดขึ้นพบว่าที่ผิวไบกัณฑ์บริเวณที่สัมผัสกับอุปกรณ์จับยึดมีค่าความเค้นสูงสุดเกิดขึ้น ในช่วง 18.437 ถึง 22.254 เมกะปาสกาล



รูปที่ 4.7 แสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณจุดจับยึดแกนใบกังหัน

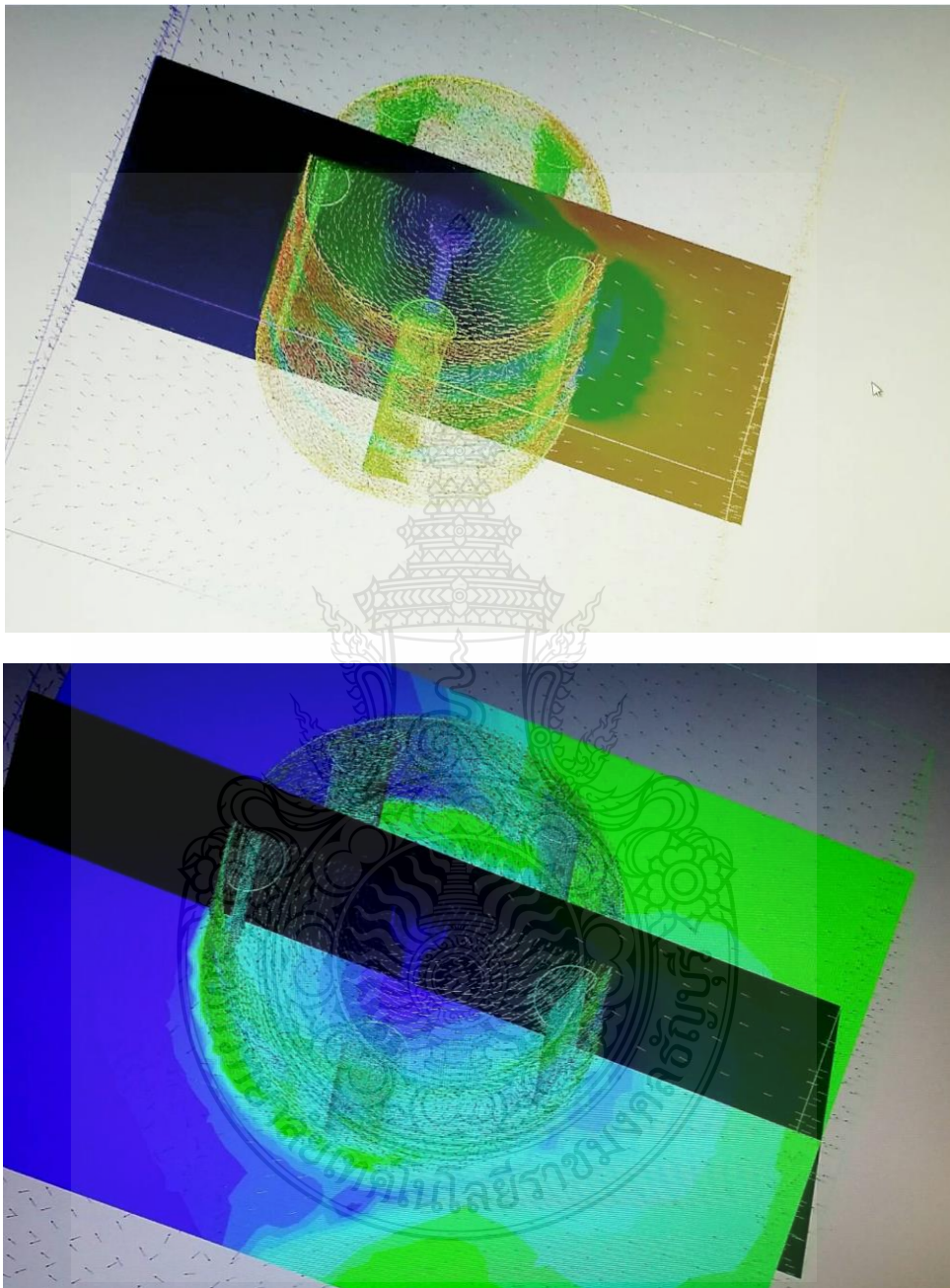
จากผลที่เกิดขึ้นพบว่าบริเวณรูเจาะสำหรับยึดชิ้นส่วนแกนเพลลาเกิดความเค้นสูงสุดอยู่ในช่วง 163.51 ถึง 207.87 เมกะปาสกาล



รูปที่ 4.9 แสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณเสาที่ตำแหน่งต่างๆตามเจดีย์

การนำเทคโนโลยี CAE มาช่วยในการวิเคราะห์กังหันลมผลิตไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่ามีประโยชน์ช่วยให้เห็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น โดยชัดเจนบนหน้าจอ เพิ่มขีดความสามารถในการปรับเปลี่ยนรูปแบบ ได้รวดเร็ว ลดน้ำหนัก ลดปริมาณวัสดุ ลดเวลาในการออกแบบหลีกเลี่ยงการลงมือทดลอง เหมาะสมที่จะลงทุนเชิงพาณิชย์

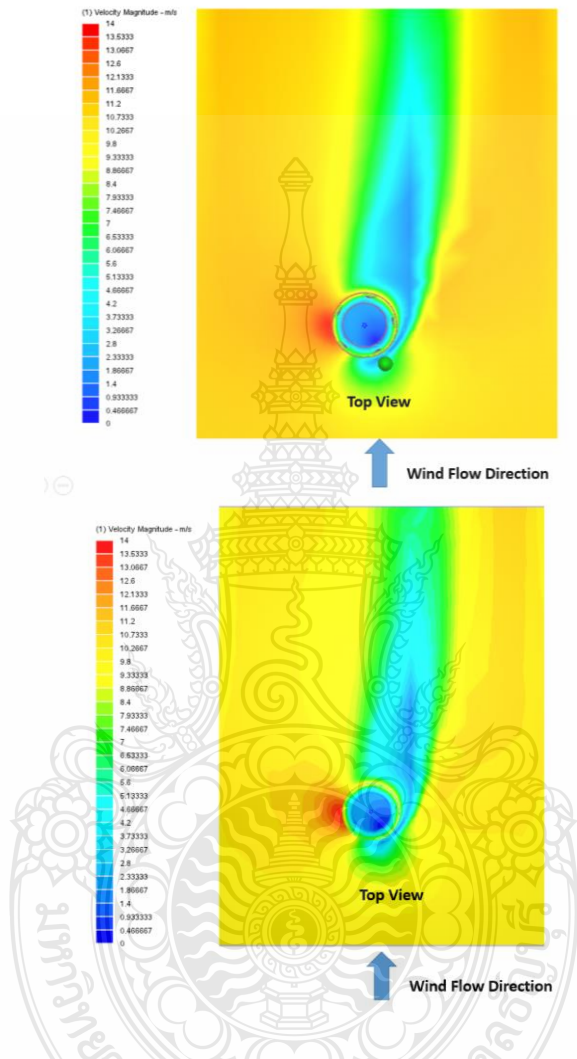
4.2 ผลจากการศึกษาประสิทธิภาพกังหันลมผลิตไฟฟ้าในแนวแกนตั้ง



รูปที่ 4.10 แสดงผลการใช้โปรแกรมCFDวิเคราะห์กังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวแกนตั้ง

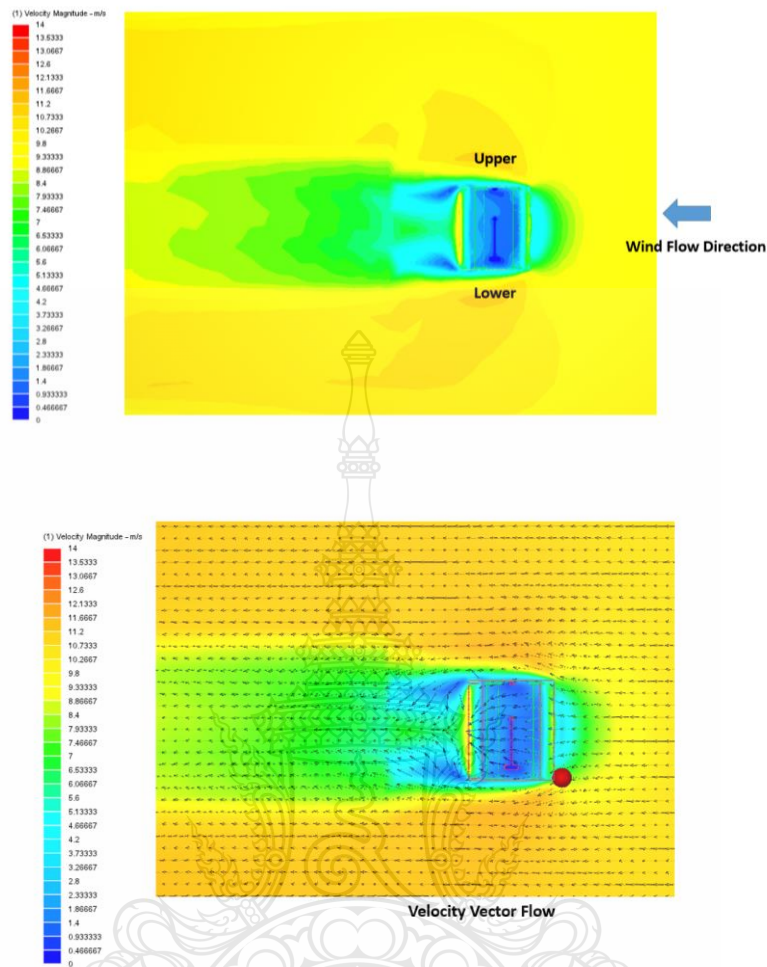
รายงานนี้ศึกษาความแข็งแรงโครงสร้างของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแนวแกนตั้ง ซึ่งมีใบกังหันลมที่ทำการศึกษามีรูปทรงหยดน้ำรุ่น R1235 สำหรับกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุด 3 กิโลวัตต์

จำนวนใบกังหันลม 5 ใบ ทำมุม 72 องศา ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เมตร ที่ความเร็วลมตั้งแต่ 0 -14 เมตรต่อวินาที การศึกษานี้ใช้เทคโนโลยี CAE ช่วยในการวิเคราะห์



รูปที่ 4.11 แสดงผลการวิเคราะห์กังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวแกนตั้งมองจากด้านบน

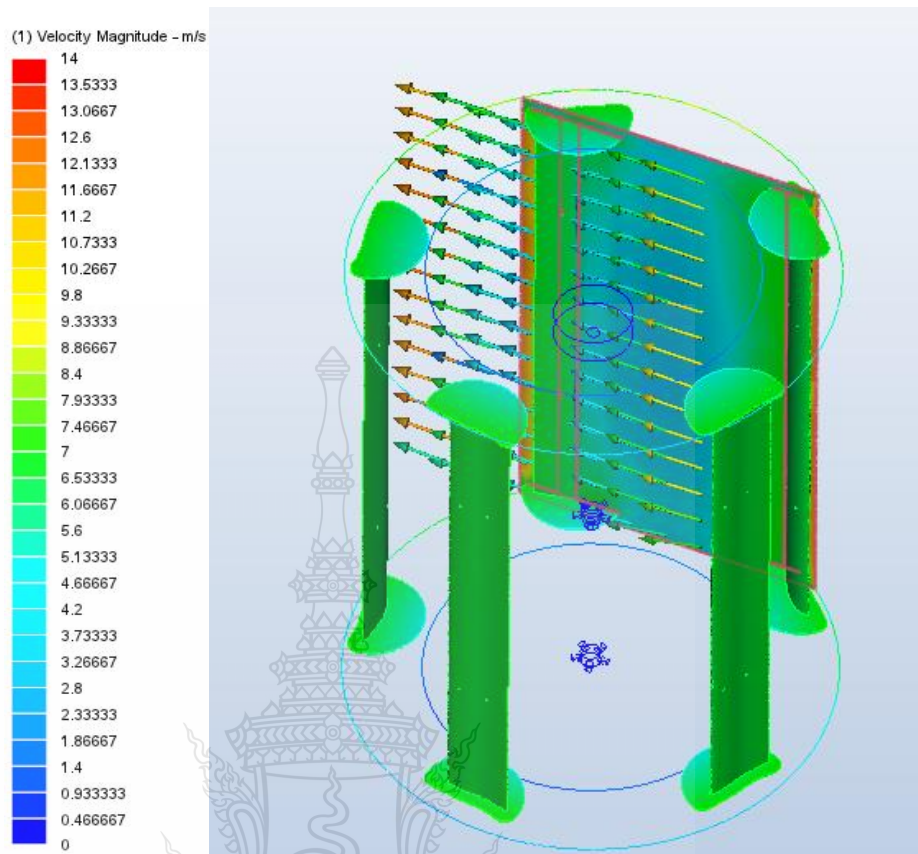
จากการสังเกตสีและกระแสลมที่เกิดขึ้นบริเวณภาคตัดด้านบนพบว่าภายหลังที่ความเร็วลมระดับ 14 เมตรต่อวินาทีวิ่งเข้าปะทะกังหันลม ความเร็วลมบริเวณรอบกังหันลมจะลดความเร็วลมลงไปในช่วง 0 - 3 เมตรต่อวินาที และจะค่อยๆเพิ่มความเร็วขึ้นไปในระดับ 7 - 8.4 เมตรต่อวินาทีที่บริเวณด้านหลังกังหันลม โดยตำแหน่งที่ใบกังหันปะทะความเร็วลมจะลดต่ำลงและจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามค่าเฉลี่ย



รูปที่ 4.12 แสดงผลการวิเคราะห์กังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวแกนตั้งมองจากด้านข้าง

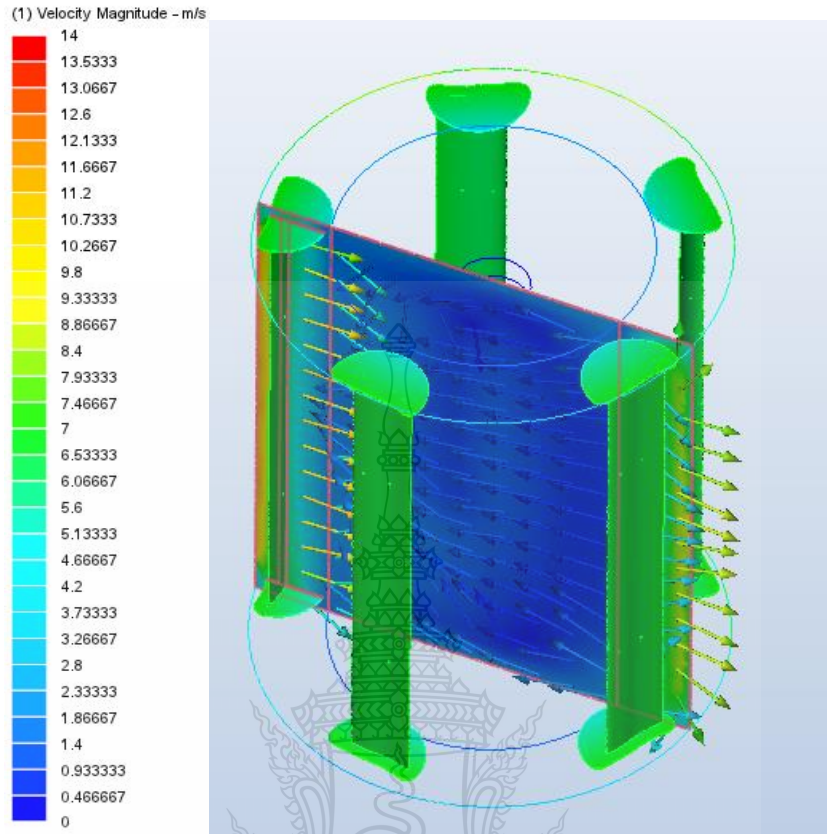
จากการสังเกตสีและกระแสลมที่เกิดขึ้นพบว่าลมที่วิ่งเข้าปะทะบริเวณด้านหน้า ด้านบนและด้านล่างกังหันลมที่ความเร็วลมอยู่ในช่วง 3.7 - 8.4 เมตรต่อวินาที บริเวณภายในตัวกังหันลมมีความเร็วลมตั้งแต่ 0 - 5.6 เมตรต่อวินาที ส่วนบริเวณด้านหลังกังหันลม ช่วงกลางมีความเร็วลม 6 - 7 เมตรต่อวินาที และมีช่วงความเร็วลดลงช่วงมุมด้านบนและมุมด้านล่างอยู่ที่ 0 - 5 เมตรต่อวินาที

โดยเวกเตอร์ของทิศทางลมที่วิ่งเข้ากังหันลมทางด้านหน้าเมื่อเกิดการปะทะกับใบกังหันเวกเตอร์กระแสลมจะถูกรวมกันที่ช่วงกลางด้านท้ายกังหันลมภายหลังที่เกิดการปะทะทำให้มีลักษณะเหมือนคอคอดอากาศ



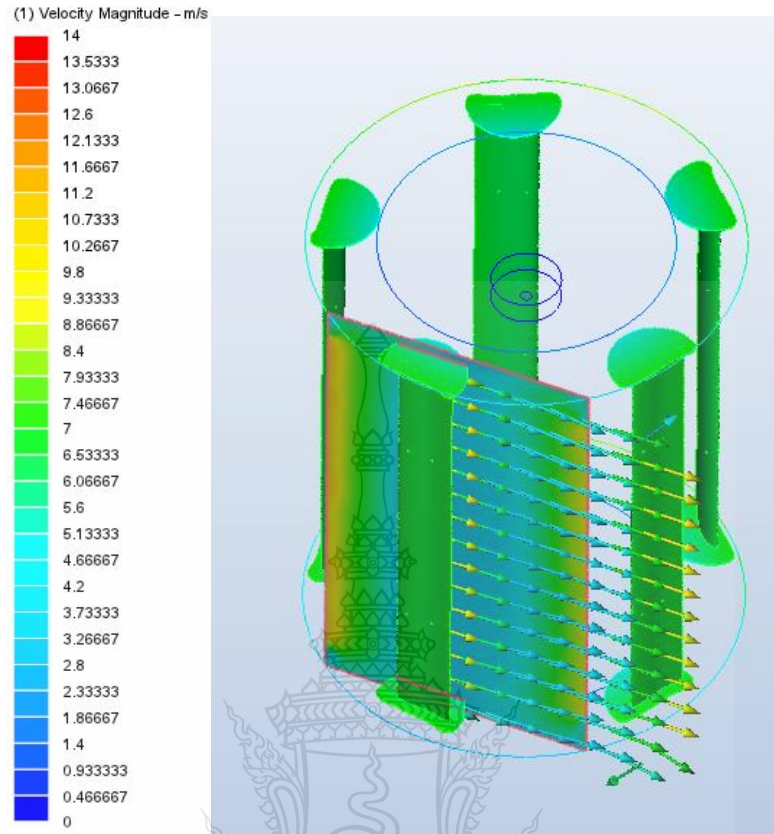
รูปที่ 4.13 แสดงผลแนวกระแสลมที่วิ่งเข้าปะทะบริเวณริมขอบบนด้านข้างกังหันลม

จากการสังเกตสีและกระแสลมที่เกิดขึ้นบริเวณภาคตัดขวางแนวตั้งด้านริมขอบบนของกังหันพบว่ากระแสลมที่วิ่งผ่านเข้าปะทะกังหันลมในบริเวณริมขอบกังหันด้านขวามีทิศทางวิ่งเข้าออกเป็นเส้นตรงลักษณะการไหลแบบราบเรียบ โดยบริเวณช่วงกลางจะมีความเร็วลมอยู่ที่ 12 เมตรต่อวินาที แล้วลดลงมาที่ 3 เมตรต่อวินาที หลังจากเคลื่อนที่ผ่านไปด้านบริเวณท้ายกังหันความเร็วลมจะเพิ่มขึ้นไปถึง 13 เมตรต่อวินาที



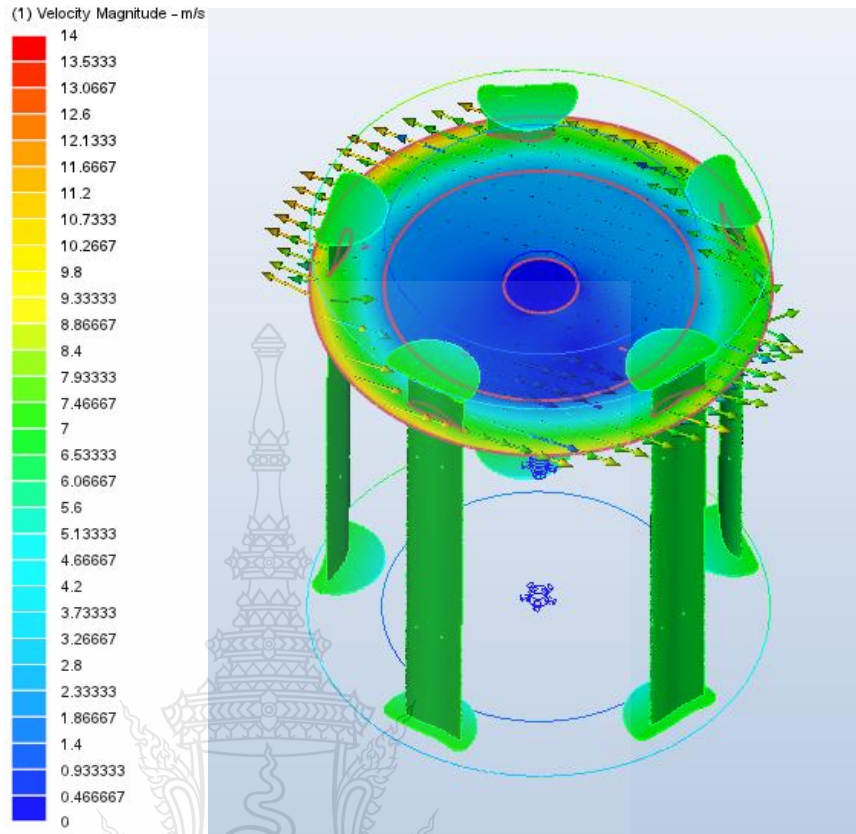
รูปที่ 4.14 แสดงผลแนวกระแสลมที่วิ่งเข้าปะทะบริเวณช่วงกลางกึ่งหันลม

จากการสังเกตและกระแสลมที่เกิดขึ้นบริเวณภาคตัดขวางแนวตั้งช่วงกลางกึ่งหันพบว่า กระแสลมมีทิศทางการวิ่งสวนทางกัน ในบริเวณช่วงกลางทำให้ความเร็วลมแสดงค่าลมที่ต่ำมากเข้าใกล้ค่า 0 เมตรต่อวินาทีที่มีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน ส่วนทางด้านกระแสลมขาเข้าและออกจาก กึ่งหันมีค่าอยู่ในช่วง 9.8 - 11.6 เมตรต่อวินาที บริเวณทางออกลมบางส่วนจะวิ่งสู่เข้าหาทางด้านหลัง ใบพัด



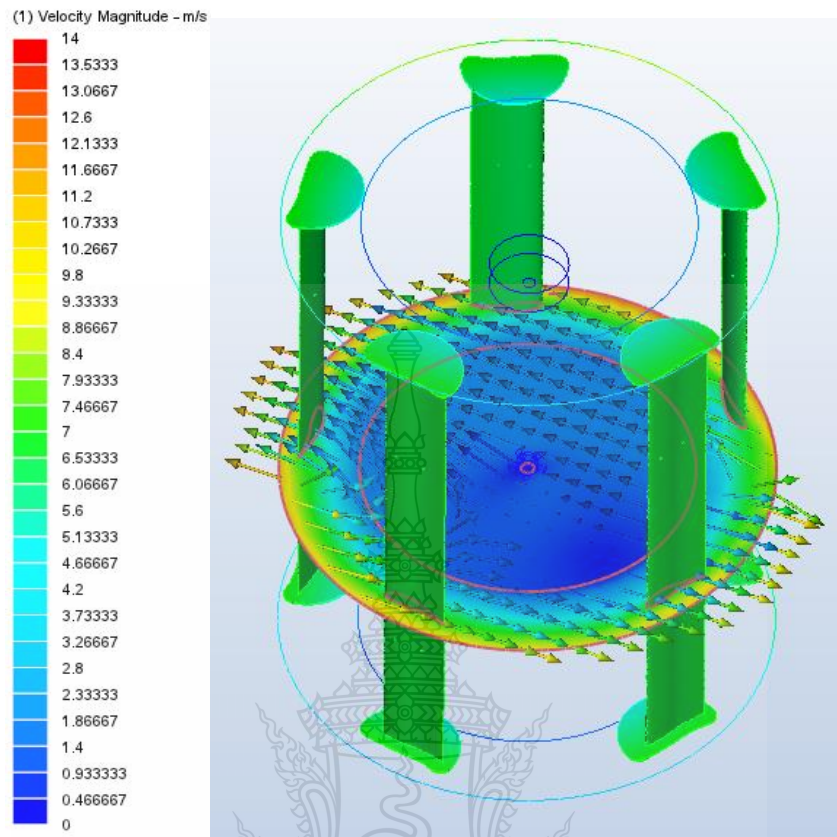
รูปที่ 4.15 แสดงผลแนวกระแสลมที่วิ่งเข้าปะทะบริเวณริมขอบด้านล่างข้างกึ่งหันลม

จากการสังเกตและกระแสลมที่เกิดขึ้นบริเวณภาคตัดขวางแนวตั้งด้านริมขอบล่างพบว่า กระแสลมไหลผ่านกึ่งหันลมมีทิศทางเป็นเส้นตรงมีค่าความเร็วอยู่ในช่วง 2.8 - 11.6 เมตรต่อวินาที ลักษณะการไหลค่อนข้างราบเรียบ มีบริเวณขาออกกระแสลมจะมีลักษณะพยายามวิ่งสู่เข้าด้านในหลังใบพัด



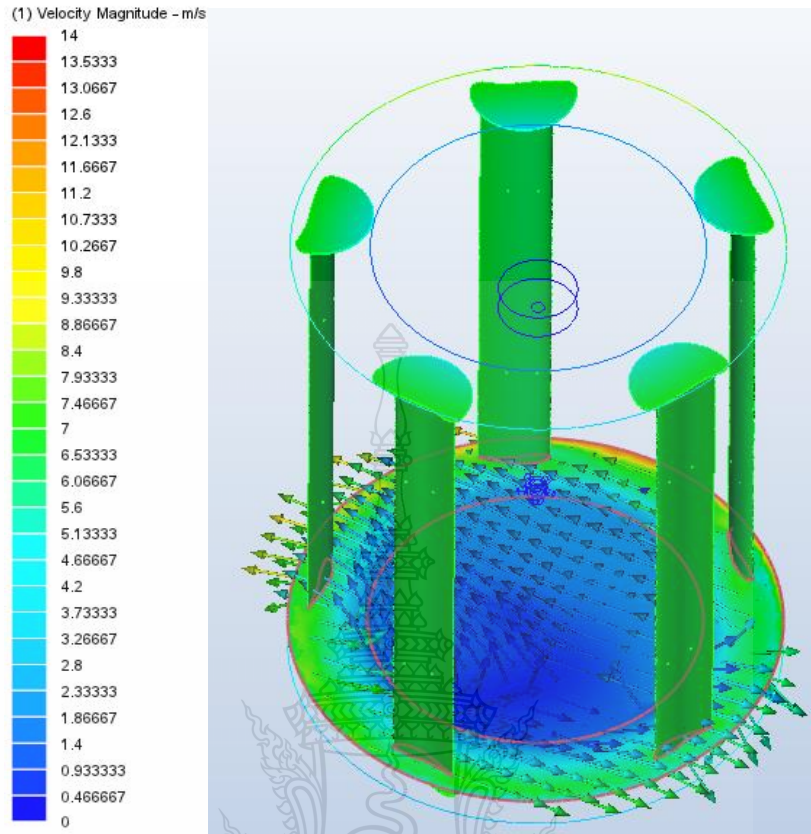
รูปที่ 4.16 แสดงผลแนวกระแสลมที่วิ่งเข้าปะทะบริเวณระนาบด้านบนกึ่งหันลม

จากการสังเกตสีและกระแสลมที่เกิดขึ้นบริเวณภาคตัดขวางแนวนอนด้านบนสุดของกึ่งหันพบว่ากระแสลมที่วิ่งออกจากกึ่งหันทั้งด้านหน้าและด้านหลังมีทิศทางตรงกันข้ามค่อนข้างราบเรียบมีค่าอยู่ในช่วง 5 - 12 เมตรต่อวินาทีบริเวณภายในกึ่งหันความเร็วลมจะมีค่าต่ำอยู่ในช่วง 0 - 6.6 เมตรต่อวินาที โดยบริเวณมุมด้านล่างจะมีช่วงความเร็วต่ำสุด



รูปที่ 4.17 แสดงผลแนวกระแสลมที่วิ่งเข้าปะทะบริเวณระนาบช่วงกลางกึ่งหันลม

จากการสังเกตสีและกระแสลมที่เกิดขึ้นบริเวณภาคตัดขวางแนวนอนพบว่ากระแสลมที่วิ่งออกจากตัวกึ่งหันมีทิศทางตรงกันข้าม การไหลค่อนข้างมีลักษณะราบเรียบมีค่าความเร็วอยู่ในช่วง 3 - 12 เมตรต่อวินาที กระแสลมมีการปะทะหักล้างกันในบริเวณมุมด้านล่างซ้ายทำให้เกิดค่าความเร็วลมเข้าใกล้ 0 เมตรต่อวินาที



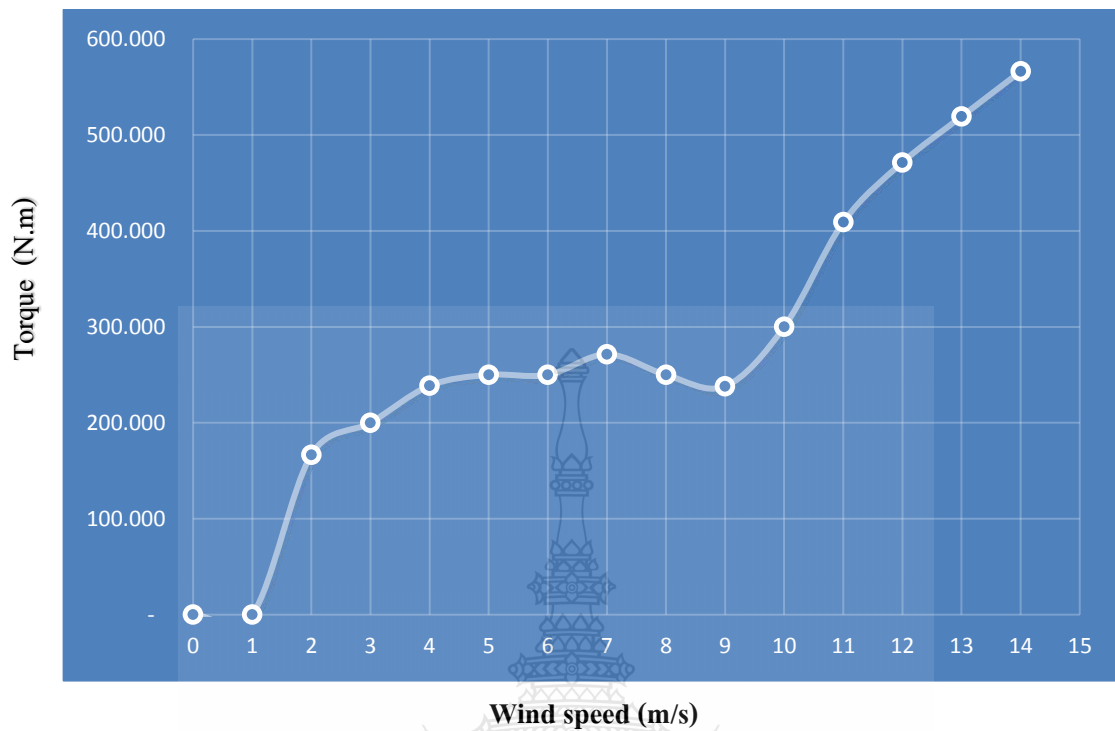
รูปที่ 4.18 แสดงผลแนวกระแสลมที่วิ่งเข้าปะทะบริเวณระนาบด้านล่างกึ่งหันลม

จากการสังเกตสี่และกระแสลมที่เกิดขึ้นบริเวณภาคตัดขวางแนวนอนพบว่ากระแสลมทางออกมีทิศสวนทางกันพยายามพุ่งลงด้านล่างและมีค่าความเร็วลมอยู่ที่ 3.2 - 11.2 เมตรต่อวินาที กระแสมีการหักล้างบริเวณมุมด้านล่างในช่วง 0 - 2.8 เมตรต่อวินาที

ตาราง 4.1 ค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตและค่าจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ระดับความเร็วลมต่างๆ

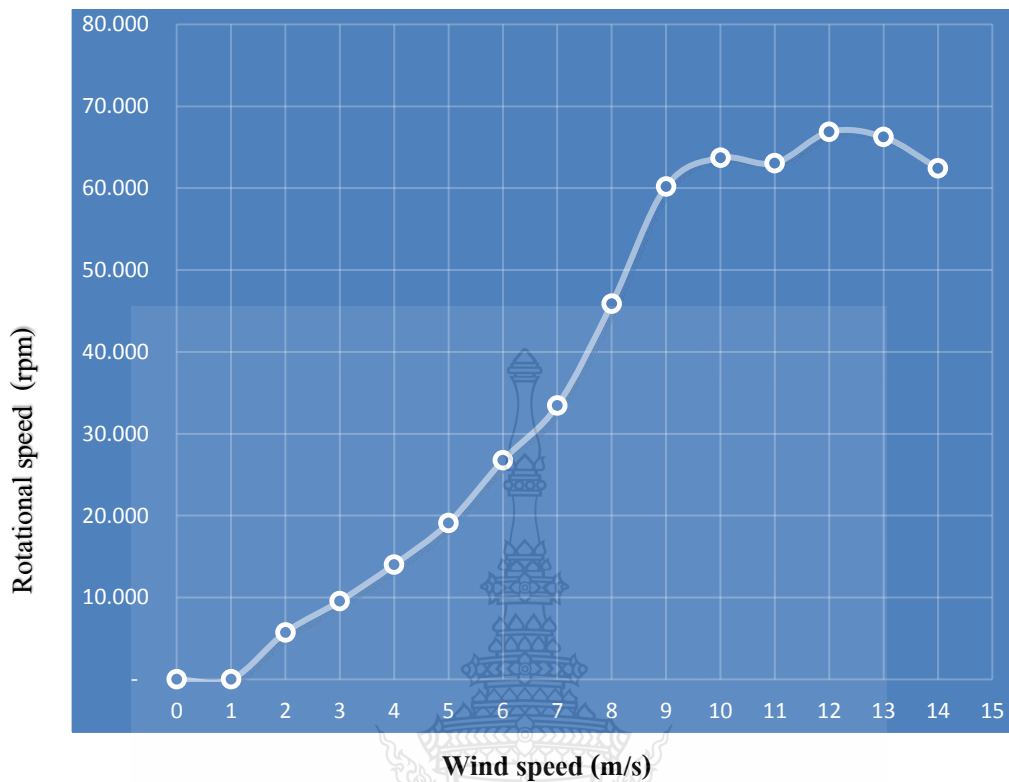
Win speed (m/s)	Power curve (watt)	CFD Power (watt)	Tip speed	Rotational speed (rad/sec)	Rotational speed (rpm)	Torque (N.m)
0	0	0	-	-	-	-
1	0	0	-	-	-	-
2	40	100	0.90	0.600	5.732	166.667
3	100	200	1.00	1.000	9.554	200.000
4	200	350	1.10	1.467	14.013	238.636
5	320	500	1.20	2.000	19.108	250.000
6	500	700	1.40	2.800	26.752	250.000
7	750	950	1.50	3.500	33.439	271.429
8	1000	1200	1.80	4.800	45.860	250.000
9	1300	1500	2.10	6.300	60.191	238.095
10	1750	2000	2.00	6.667	63.694	300.000
11	2400	2700	1.80	6.600	63.057	409.091
12	3000	3300	1.75	7.000	66.879	471.429
13	3400	3600	1.60	6.933	66.242	519.231
14	3500	3700	1.40	6.533	62.420	566.327

จากตารางความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกำลังงานที่กังหันลมทำงานพบว่าความเร็วรอบที่กังหันลมเริ่มผลิตไฟฟ้าอยู่ที่ 5.732 รอบต่อวินาทีที่ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาทีและความเร็วรอบที่กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแนวแกนตั้งให้ประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ความเร็วรอบ 62.42 รอบต่อวินาทีที่ความเร็วลม 14 เมตรต่อวินาที



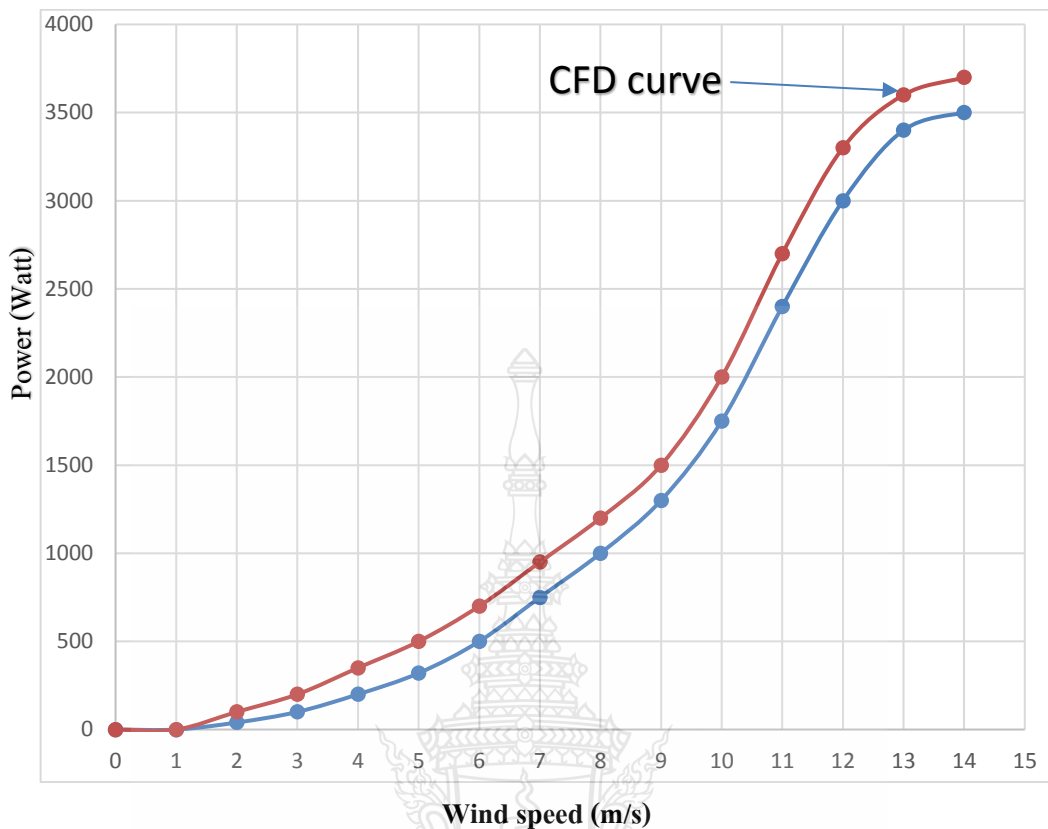
รูปที่ 4.19 แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับแรงบิดที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับแรงบิดที่เกิดขึ้นพบว่าแรงบิดที่กักหันลมแนวแกนตั้งได้รับต่ำสุด 166.667 N.m ที่ความเร็วลม 2 m/s และให้ค่าแรงบิดสูงสุด 566.327 N.m ที่ความเร็วลม 14 m/s โดยค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจะค่อยๆเพิ่มขึ้นในช่วงความเร็วลม 2-7 m/s และลดลงในช่วง 7-9 m/s จากนั้นค่าความเร็วลมจะเพิ่มสูงขึ้นในช่วงความเร็วลม 9-14 m/s



รูปที่ 4.20 แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับความเร็วรอบที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

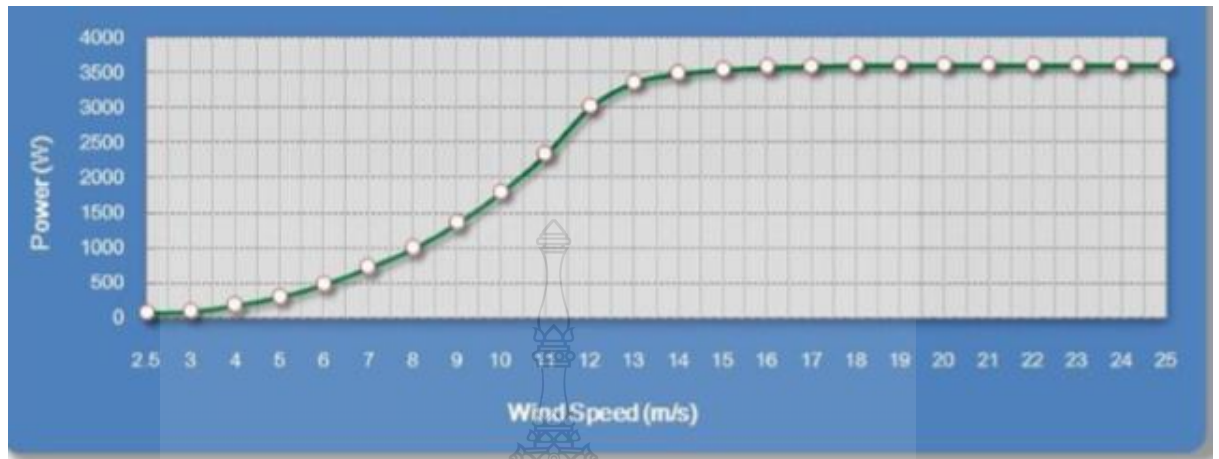
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับความเร็วรอบที่กั้นหั่นลมทำงานพบว่าความเร็วรอบจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วลมอย่างรวดเร็วที่ความเร็วลม 1 - 9 เมตรต่อวินาที โดยในช่วงความเร็วลม 9 - 14 เมตรต่อวินาที จะมีความเร็วรอบอยู่ในช่วง 60 - 66.879 เมตรต่อวินาที และจะเกิดความเร็วรอบสูงสุดที่ 66.879 รอบต่อนาทีที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.21 แสดงผลการเปรียบเทียบ Power Curve ที่ความเร็วลม 0 – 14 เมตรต่อวินาทีจากบริษัทผู้ผลิต และค่าจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกำลังงานที่กังหันลมทำงานพบว่ากราฟที่ได้มีความสอดคล้องไปทางเดียวกัน โดยกำลังงานที่กังหันลมจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วลมที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความเร็ว 14 เมตรต่อวินาทีค่ากำลังงานสูงสุดที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้ค่า 3700 วัตต์ สูงกว่าค่าจากบริษัทผู้ผลิตที่ให้ค่าที่ 3500 วัตต์

4.3 แสดงผล Power Curve ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.22 Power Curve VAWT จากบริษัทผู้ผลิต

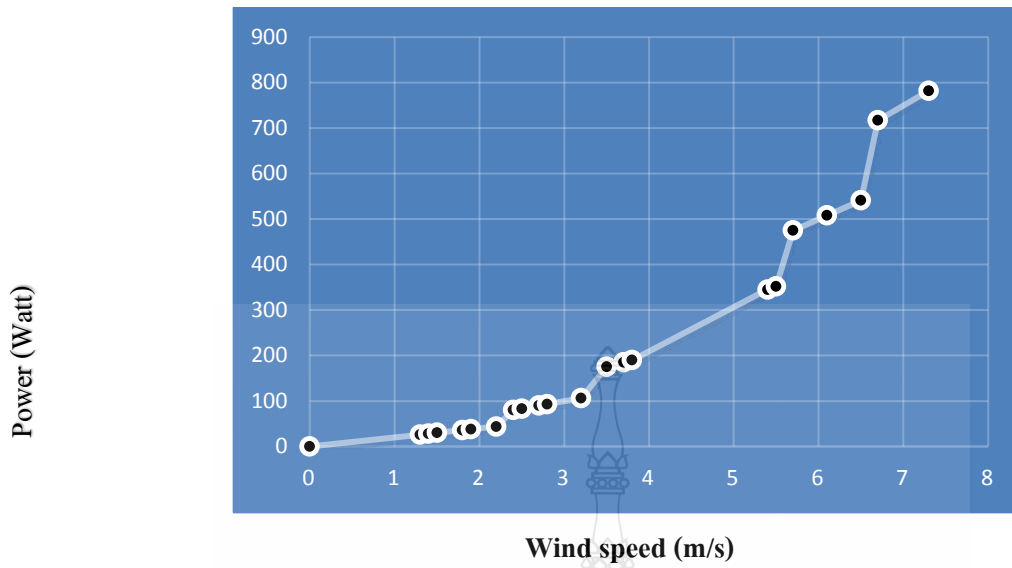
ที่มา :SAWT Inc.

ตาราง 4.2 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณ ที่ระดับความเร็วลมต่างๆจากบริษัทผู้ผลิต

Wind speed (m/s)	Power (watt)	T (N.m)	N	Cp
3	100	50	19.0	0.559
4	200	75	25.4	0.472
5	300	90	31.8	0.362
6	500	125	38.1	0.349
7	700	150	44.5	0.308
8	1000	187.5	50.9	0.295
9	1400	233.33	57.2	0.290
10	1800	270	63.6	0.272
11	2300	313.63	70.0	0.261
12	3000	375	76.3	0.262
13	3400	392	82.8	0.233
14	3500	375	89.1	0.192

ตาราง4.3 แสดงค่าที่ได้จากกังหันลมที่ทำงานจริงที่ระดับความเร็วลมต่างๆ

wind speed (m/s)	Power (Watt)
0	0
1.3	26
1.4	28
1.5	30
1.8	36
1.9	38
2.2	44
2.4	80
2.5	83
2.7	90
2.8	93
3.2	106
3.5	175
3.7	185
3.8	190
5.4	345
5.5	352
5.7	475
6.1	508
6.5	541
6.7	717
7.3	782

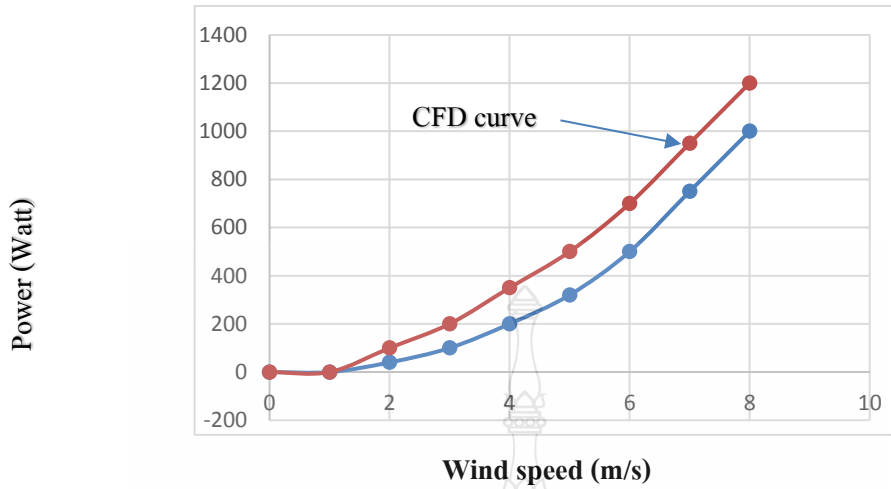


รูปที่ 4.23 แสดงผล Power Curve ที่ความเร็วลม 0 – 7.3 เมตรต่อวินาทีที่กั้นลมทำงาน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกำลังงานที่กั้นลมทำงานพบว่ากราฟที่ได้จากการทำงานในช่วงความเร็วลม 0 - 7.3 เมตรต่อวินาทีกำลังงานที่กั้นลมจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นโดยที่ความเร็ว 7.3 เมตรต่อวินาที ให้ค่ากำลังงานสูงสุดที่ 782 วัตต์

ตาราง 4.4 แสดงค่าที่ได้จากกั้นลมที่ระดับความเร็วลมในช่วง 0-8 เมตรต่อวินาทีจากบริษัทผู้ผลิต และค่าจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

Win speed (m/s)	Power curve	
	watt	CFD Power watt
0	0	0
1	0	0
2	40	100
3	100	200
4	200	350
5	320	500
6	500	700
7	750	950
8	1000	1200



รูปที่ 4.24 แสดงผล Power Curve ที่ความเร็วลม 0 – 8 เมตรต่อวินาทีจากบริษัทผู้ผลิตและค่าจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกำลังงานที่กังหันลมทำงานพบว่ากราฟที่ได้มีความใกล้เคียงกัน โดยที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาทีค่ากำลังงานสูงสุดที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้ค่า 950 วัตต์ สูงกว่าค่าจากบริษัทผู้ผลิตที่ให้ค่าที่ 750 วัตต์

ในทางทฤษฎีค่าประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลม ซึ่งเราเรียกว่า $C_{P_{Max}}$ นั้นจะมีค่าไม่เกิน 0.5926 ถ้ามลให้พลังงาน 100 เปอร์เซ็นต์ กังหันที่ดีที่สุดจะทำการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานทางกลได้สูงสุดไม่เกิน 59.26 เปอร์เซ็นต์ จากรูปที่ 4.24 พบว่าค่าที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที ให้ค่า ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 0.418 และจากรูปที่ 4.23 ที่กังหันลมทำงานจริงที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที ให้ค่า ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 0.33

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาคณสมบัติและการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแนวแกนตั้ง

5.1 สรุปผลและอภิปรายผล

กังหันลมแกนตั้งมีความสามารถในการรับลมได้รอบทิศทางไม่ต้องเสียเวลาในการหมุนตัวเองรับลม ความเร็วลมที่เริ่มหมุนตัวเองอยู่ที่ประมาณ 3-3.5 m/s หลังจากนั้นจะสามารถหมุนได้ในทุกระดับแรงลม จุดเด่นอีกข้อคือพบว่าในขณะที่หมุนแทบเกือบไม่ได้ยินเสียงในทุกจังหวะ และโดยเฉพาะพบว่าค่าประสิทธิภาพของกังหันลมนั้น ที่ความเร็วลมต่ำมีค่ามากดังนั้นแสดงให้เราเห็นว่าการเคลื่อนที่จะเข้ามาปะทะใบกังหันไม่ต้องสูงมาก ในทางกลับกันความเร็วรอบสูงๆค่าประสิทธิภาพของกังหันลม จะมีค่าต่ำแสดงว่าในความเร็วรอบสูงต้องใช้แรงลมมาปะทะสูง ให้ความเร็วรอบ 62.24 รอบต่อนาทีที่ความเร็วลม 14 เมตรต่อวินาที โดยกังหันจะทำงานตามลักษณะการเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การติดตั้งประกอบง่ายสะดวกใช้ระยะเวลาสั้น ใช้คนและเครื่องมือน้อย การซ่อมบำรุงง่าย ที่ระดับความสูงจากผิวดิน 5.5 เมตร การทำงานของระบบเบร็กรับน้ำหนักที่ตกลงมาอย่างเดียวในระบบที่สมมาตรทุกความเร็วลม

จากการแสดงผลทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่ากระแสลมที่วิ่งเข้าปะทะกังหันลมแล้วจะคู่เข้าสู่กึ่งกลางบริเวณท้ายกังหันลมและบริเวณภายในพื้นที่รัศมีกังหันลมจะมีกระแสลมวิ่งสวนทิศทางกันทำให้ความเร็วลมลดลงต่ำ โดยความเร็วลมที่เกิดขึ้นจริงมีค่าขึ้นลงในแต่ละช่วงเวลาไม่เท่ากันมีการขึ้นลง และสังเกตพบว่าในช่วงเวลากลางวันและช่วงเวลาเย็นจะเป็นเวลาที่กังหันลมทำงานได้ดี และในการศึกษาความแข็งแรง โครงสร้างของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแนวแกนตั้ง ซึ่งมีใบกังหันลมที่ทำการศึกษา มีรูปทรงหยดน้ำรุ่น R1235 สำหรับกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุด 3 กิโลวัตต์ จำนวนใบกังหันลม 5 ใบ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เมตรที่ความเร็วสูงสุด 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมงความเร็วรอบ 110 รอบต่อนาทีในการศึกษานี้ใช้เทคโนโลยี CAE ช่วยในการวิเคราะห์ก่อนที่จะมีการติดตั้งจริง จากผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ความแข็งแรงของโครงสร้างกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแนวแกนตั้ง ความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณสามเหลี่ยมเท่ากับ 226.7 เมกะปาสคาลมีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 1.10 ความเค้นที่เกิดขึ้นที่บนขากังหันเท่ากับ 207.87 เมกะปาสคาลมีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 1.20 ความเค้นที่เกิดขึ้นบนเสากังหันลมเท่ากับ 16.40 และความเค้นที่เกิดขึ้นบนใบกังหันมีค่าเท่ากับ 22.634 เมกะปาสคาลมีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 47.7

5.2 ข้อเสนอแนะ

กังหันลมในแนวแกนตั้ง มีความสามารถในการรับแรงลมที่วิ่งเข้ามากระทบใบกังหันได้ทุกทิศทางที่ความเร็วลมต่างๆ สามารถขยายกำลังการผลิตได้โดยการเพิ่มรัศมีหรือเพิ่มความสูงใบกังหันลม รวมทั้งติดตั้งเสาที่สูงขึ้นให้พื้นแนวบังลมจากต้นไม้หรือสิ่งปลูกสร้าง และควรมีการศึกษาระยะตำแหน่งการติดตั้งกังหันลมกับขนาดรัศมีกังหันลมที่เหมาะสมในกรณีที่ตั้งมากกว่าหนึ่งชุด ควรมีการศึกษา ชนิดของวัสดุที่ใช้สร้างใบกังหันและควรทำการติดตั้งในตำแหน่งที่มีกระแสลมต่อเนื่อง



บรรณานุกรม

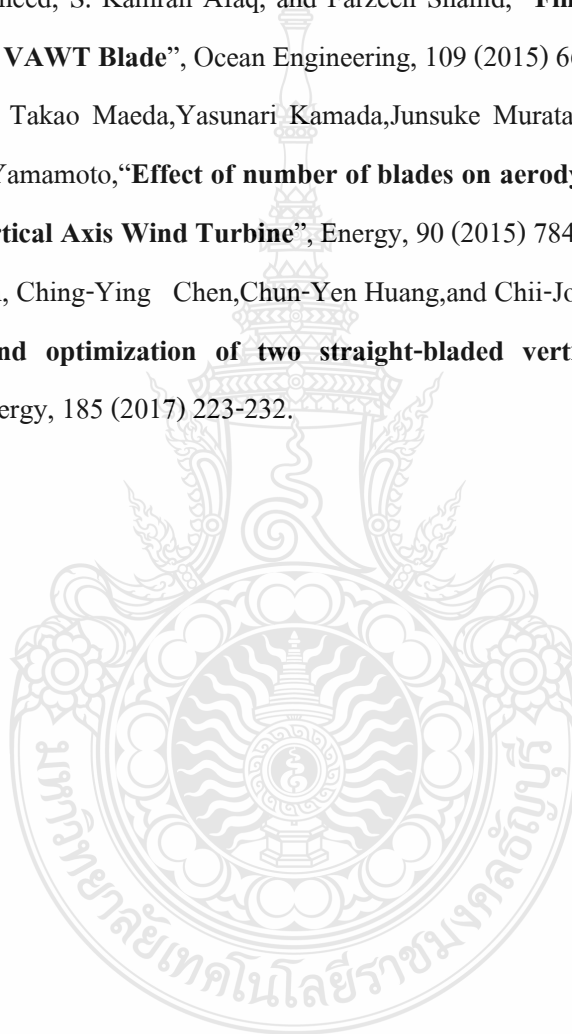
- [1] วิรัชย์ โรยนรินทร์. “รายงานการศึกษาวิจัยพัฒนาสาขิตต้นแบบเทคโนโลยีกัณฑ์ลผลิตไฟฟ้าความเร็วลมต่ำ”, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2551.
- [2] วิรัชย์ โรยนรินทร์. “รายงานโครงการวิจัยเพื่อพัฒนา กัณฑ์ลผลิตไฟฟ้าต้นแบบขนาด 50 กิโลวัตต์”, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2552.
- [3] จารุวรรณ ตั้งต้นสกุลวงศ์ และทวิช จิตรสมบุญณ์. “การจำลองการไหลผ่าน กัณฑ์ลลมแกนตั้งแบบ 3 ใบพัด”, การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2, 27-29 กรกฎาคม 2549, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 2550
- [4] สมจิต ชินะใจ, “การวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานของ กัณฑ์ลลมแกนตั้งโดยใช้กรอบเสริมกันบังคับลมเข้า”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2550
- [5] เกียรติจักร สุเวทเวทิน, “การออกแบบ กัณฑ์ลลมแกนตั้งประสิทธิภาพสูง”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2552
- [6] สว่าง ชาติทอง, “การออกแบบ กัณฑ์ลผลิตไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554
- [7] พิณิจ สังข์ทอง, “การวิเคราะห์ประสิทธิภาพใบ กัณฑ์ลผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 เมกะวัตต์ด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหล”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2555
- [8] ชาคริต จินลอย, “การศึกษาผลกระทบของรูปร่างปลายใบ กัณฑ์ลลมต่อประสิทธิภาพการทำงาน กัณฑ์ลผลิตไฟฟ้าขนาด 50 กิโลวัตต์”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2557
- [9] ไมตรี พลสงคราม และปรีชา ชันดีโกมล. “การปรับปรุง กัณฑ์ลลมแกนตั้งแบบใบ กัณฑ์ลปรับมุมได้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ”, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, 2558

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] กฤตภาส คงคาพิสุทธ, วิรัชย์ โรยนรินทร์ และเดชา อินทร์โทโล่. “การศึกษาผลกระทบของการกีดขวางการไหลของลมเนื่องจากอาคารที่มีต่อประสิทธิภาพกังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ โดยใช้วิธีแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหล”, การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9, 29 พฤศจิกายน – 1 ธันวาคม 2559, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (คอดสะแก) เชียงใหม่, 2559
- [11] อนุวัตร และประกาศิต. “เอกสารประกอบการเรียนวิชา InE191 Engineering Material”, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรจน์.
- [12] ชนะ กสิการ “ความแข็งแรงของวัสดุ,” โรงพิมพ์ชวนพิมพ์, กรุงเทพฯ, 2546
- [13] นิพนธ์ เกตุจ้อยและ อชิตพล ศศิธรานูวัฒน์. “เทคโนโลยีพลังงานลม”, Naresuan University Journal, 2004, 12(2), pp 57-73.
- [14] F.S. David M. Eggleston and Forrest S. Stoddard “Wind Turbine Engineering Design”, Van Nostrand Reinhold, New York, 1987.
- [15] Martin O. L. Hansen. “Aerodynamics of wind turbines,” 2nded, Earthscan in the UK and USA, 2008
- [16] James F. Manwell, Jon G. McGowan and Anthony L. Rogers “Wind Energy Explained,” Theory, Design and Application, 2nded, John Wiley & Sons Ltd., 2009
- [17] Yan Li, Kotaro Tagawa, and Wei Liu, “Performance effects of attachment on blade on a straight-bladed vertical axis wind turbine”, Current Applied Physics, 10 (2010) S335-S338
- [18] M.H. Mohamed “Performance investigation of H-rotor Darrieus turbine with new airfoil shapes”, Energy, 47 (2012) 522-530.
- [19] Khemraj Patel, Arti Tirkey, Yamini Sarthi, Prakash Kumar Sen and Shailendra Kumar Bohidar, “A Review about the Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine (SBVAWT) and its Performance”, International Journal for Innovative Research in Science & Technology, ISSN2349-6010, Vol.1, Issue 6, November 2014

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [20] Mojtaba Ahmadi-Baloutaki, Rupp Cariveau, and David S.-K. Ting, “**Performance of a vertical axis wind turbine in grid generated turbulence**”, Sustainable Energy Technology, 11 (2015) 178-185.
- [21] M. Saqib Hameed, S. Kamran Afaq, and Farzeen Shahid, “**Finite Element Analysis of a Composite VAWT Blade**”, Ocean Engineering, 109 (2015) 669-676.
- [22] Qing’an Li , Takao Maeda, Yasunari Kamada, Junsuke Murata, Kazuma Furukawa, and Masayuki Yamamoto, “**Effect of number of blades on aerodynamic forces on straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine**”, Energy, 90 (2015) 784-795.
- [23] Wei-Hsin Chen, Ching-Ying Chen, Chun-Yen Huang, and Chii-Jong Hwang , “**Power output analysis and optimization of two straight-bladed vertical-axis wind turbines**”, Applied Energy, 185 (2017) 223-232.





ภาคผนวก ก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



TREC-9

Thailand Renewable Energy for Community Conference

Abstract

ประชุมสัมมนาวิชาการ
 รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9
 The 9th Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-9)
 29 พฤศจิกายน -1 ธันวาคม 2559
 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (โดยสภากีต)



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินบทความ (Peer Review)

ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.สัมพันธ์	ฤทธิเดช	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.สิงห์ทอง	พัฒนเศรษฐนันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.พานิช	อินดี๊ะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐพร	ไชยญาติ	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุสรณ์	แสงประจักษ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัฒนาพล	มีนา	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัชย์	โรยรินรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรี	ศรีนนท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วารุณี	อริยวิริยะนันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นำพร	ปัญญาใหญ่	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์	ทิพจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา	เย็นยงกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย	เดชธรรมรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์	จันทร์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษณุ	ทองเล็ก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุเทน	คำน่าน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา	ยิ่งขยัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์บัญญัติ	นิยมवास	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ดร.วิเชียร	อุบแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.พิสิษฐ์	มณีโชติ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.สหัทยา	ทองสาร	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.ภาสวรรณ	วัชรดำรงศักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ดร.จักรกฤษณ์	เคลือบวัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ดร.ยุธนา	ศรีอุดม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ดร.วรวิภา	ยังประยูร	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ดร.วรจิตต์	เศรษฐพรรค	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
ดร.อำพล	อาภาธนากร	สำนักงานวัฒนธรรมแห่งชาติ
ดร.ณนิต	เกตประดิษฐ์	บริษัท เอ็นจีไอ จำกัด

สารจากอธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เป็นสถาบันอุดมศึกษาที่มีความสำคัญกับการวิจัยและบริการวิชาการทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แก่สังคมและชุมชน ที่ผ่านมามีความร่วมมือระหว่างสถาบันอุดมศึกษาและหน่วยงานภาครัฐอื่น ตลอดจนภาคเอกชนต่าง ๆ อย่างต่อเนื่องจนเกิดการบูรณาการองค์ความรู้ที่นำไปสู่การพัฒนาคุณภาพการศึกษา สังคม ชุมชน และประเทศชาติ

ปัญหาความต้องการใช้พลังงานและมลพิษที่เกิดจากกระบวนการผลิต เป็นปัญหาที่นานาประเทศให้ความสนใจและรณรงค์ให้มีการลดการใช้พลังงาน สำหรับประเทศไทยซึ่งโดยส่วนใหญ่ประกอบอาชีพด้านเกษตรกรรม โดยต้องนำเข้าพลังงานมากกว่าร้อยละ 60 ของความต้องการ ดังนั้นการพัฒนาพลังงานทางเลือก ต่าง ๆ ให้เป็นนวัตกรรมทางพลังงาน จึงมีความสำคัญต่อชุมชน สังคม และประเทศไทยอย่างยิ่ง

ในนามมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ขอแสดงความชื่นชมและยินดีที่จะสนับสนุนการจัดประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9 ขอขอบคุณทุกท่านที่ได้เพียรพยายามศึกษาค้นคว้าจนเกิดองค์ความรู้ใหม่ ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการพัฒนาองค์ความรู้ทางเทคโนโลยีและนวัตกรรมให้ก้าวหน้าและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันกับโลกพลังงานยุคใหม่ต่อไป



(รองศาสตราจารย์ ดร. น่ายุทธ สงค์ธนาพิทักษ์)
อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา



สารจากนายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

ในนามของนายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ซึ่งได้ก่อตั้งขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ในการศึกษา วิจัย สนับสนุนการใช้พลังงานทดแทนของประเทศอย่างยั่งยืน โดยเน้นการนำพลังงานและรูปแบบการจัดการพลังงาน เพื่อนำไปใช้ได้จริงอย่างเหมาะสมต่อชุมชนในประเทศไทย เพื่อให้เกิดผลได้อย่างแท้จริงจากการใช้พลังงานทดแทนและพลังงานสะอาด ซึ่งรวมถึงการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม ชีวมวล และพลังงานจากน้ำ ซึ่งเป็นพลังงานต้นกำเนิดที่มีอยู่ในชุมชนทุกที่ การจัดประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9 นี้เป็นการจัดงานในรูปแบบใหม่อีกครั้งหนึ่งของสมาคมฯ ซึ่งจะเน้นประโยชน์อย่างยิ่งต่อนักวิชาการ นักศึกษา และประชาชนทั่วไปในการแลกเปลี่ยนความรู้และประสบการณ์ในการใช้พลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ ในชุมชน โดยจะมีผลต่อการพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศอย่างเหมาะสม จะทำให้เราอยู่ร่วมกับธรรมชาติและสามารถพึ่งพาตนเองได้ในอนาคต โดยสมาคมจะเป็นศูนย์กลางในการดำเนินกิจกรรมที่ดี ทางด้านพลังงานที่ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ความมั่นคง การบริหารจัดการที่เหมาะสม การสร้างรายได้ให้กับชุมชน อย่างยั่งยืนคู่กับประเทศไทยตลอดไป



ในฐานะตัวแทนของสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ขอโอกาสพิเศษนี้ โคร้ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เจ้าภาพในการจัดงานประชุมสัมมนาวิชาการ ในครั้งนี้ และท่านที่ปรึกษา กิตติมศักดิ์ของสมาคมฯ ผู้สนับสนุนทุกท่าน รวมถึงทีมงานในการจัดงานครั้งนี้ หวังเป็นอย่างยิ่งว่าการจัดงานประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9 ในครั้งนี้จะสำเร็จลุล่วงด้วยดี และเป็นประโยชน์ต่อองค์ความรู้โดยรวมทั้งภาคชุมชน และภาควิชาการของประเทศไทยต่อไป

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัช โรจนวิทย์)

นายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย



กลุ่มที่ 5	นวัตกรรมพลังงานทดแทน	หน้า
007	การออกแบบชุดผลิตไฟฟ้าด้วยโซลาร์เซลล์สำหรับพื้นที่กึ่งทิปติ	314
011	การออกแบบและพัฒนาเครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์	321
013	การวิเคราะห์เลือกสารทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์สำหรับประเทศไทย	331
015	การลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบแสงสว่างสำนักงานโดยใช้ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1.2 kWp	339
016	การพัฒนาตู้อบพลังงานความร้อนร่วมแสงอาทิตย์และไฟฟ้า	344
018	การวิเคราะห์การผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสานจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับจักรยานออกกำลังกายปั่นไฟ	349
024	ศึกษาความเป็นไปได้ของการเลี้ยงปลาหมอในระบบหมุนเวียนน้ำโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นพลังงานทางเลือกในระดับชุมชน	355
040	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศแบบอัดไอ ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์คอมเพรสเซอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน สารทำความเย็น R22 สำหรับใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	365
050	เตาอบดินเผาสำหรับอบไก่โดยใช้ฮีทเตอร์อินฟราเรดและควบคุมการทำงานโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์	376
052	การเตรียมแผ่นดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้วัสดุรีไซเคิล HDPE และวัสดุไมโครจากแร่โอลิเมนไนท์ของไทย	384
071	การวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างกั้นหลุมผลิตไฟฟ้าแบบแนวแกนตั้ง ขนาด 3 กิโลวัตต์	390
072	ระบบผลิตและส่งจ่ายก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกรระดับชุมชน และการประยุกต์ใช้ร่วมกับเตาด่าน	398
กลุ่มที่ 6	การจัดการพลังงานในชุมชน	
033	การพัฒนาเครื่องอัดเชื้อเห็ด	408
042	การวิเคราะห์สมรรถนะการผลิตพลังงานและการลดค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีแบตเตอรี่สำรองพลังงาน	415
047	การพัฒนาแนวทางการฟื้นฟูความชุ่มชื้นในป่าชุมชนจังหวัดลำปาง	430
051	การจัดการพลังงานชุมชน โดยบูรณาการหน่วยงานรัฐกับระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ กรณีศึกษา : ตำบลคงเมือง อำเภอวังสีสุราช จังหวัดมหาสารคาม	442
054	ระบบวัดบันทึกเฟิร์วริงระยะไกลแบบชาญฉลาดสำหรับไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	449
064	การศึกษาปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพจากเศษผักผลไม้เหลือทิ้ง	454
073	การทดสอบสมรรถนะการผลิตไฟฟ้า น้ำร้อน และน้ำเย็นจากโมดูลไฮบริดโฟโตโวลตาอิก/ความร้อน	459



การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9
29 – 30 พฤศจิกายน 2559 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา

การวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแนวแกนตั้ง ขนาด 3 กิโลวัตต์

The Analysis Strength Structural of 3 kW Vertical Axis Wind Turbine

ศราวุธ เอกบาง^{1*}, วิรัชย์ โยชนรินทร์²

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

โทร 0-2549-3797 โทรสาร 0-2549-3432

E-mail : thai_sarawut@rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

รายงานการศึกษาวิจัยฉบับนี้ จัดทำเพื่อศึกษาความแข็งแรงโครงสร้างของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแนวแกนตั้ง ซึ่งใบกังหันลมที่ทำการศึกษา มีรูปทรงหยดน้ำรุ่น Roy 1235 สำหรับกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุด 3 กิโลวัตต์ จำนวนใบกังหันลม 5 ใบ ทำมุม 72 องศา ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เมตร ที่ความเร็วลมสูงสุด 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ความเร็วรอบ 110 รอบต่อนาที ในการศึกษาใช้เทคโนโลยี CAE ช่วยในการวิเคราะห์พบว่าความเค้นที่กระทำกับโครงสร้างกังหันลมเท่ากับ 408.9 กิโลปาสกาลและค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชุดใบกังหันเท่ากับ 11.632 มิลลิเมตร ความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณสามเหลี่ยมเท่ากับ 226.71 เมกะปาสกาลความเค้นที่เกิดขึ้นบนขากังหันเท่ากับ 207.87 เมกะปาสกาล ความเค้นที่เกิดขึ้นบนเสากังหันลมเท่ากับ 15.24 เมกะปาสกาล และความเค้นที่เกิดขึ้นบนใบพัดมีค่าเท่ากับ 22.634 เมกะปาสกาล

โดยสรุปเมื่อเทียบกับความแข็งแรงของวัสดุแล้วยังมีค่าความปลอดภัยในจุดค่าสุดที่ประมาณ 50 เท่าในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม ดังนั้นสามารถนำไปติดตั้งใช้งานจริงได้ตามที่ออกแบบไว้จริง

คำหลัก: กังหันลมแกนตั้ง, การออกแบบเชิงวิศวกรรม

Keywords: Vertical Axis Wind Turbine, VAWT, Computer Aided Engineering, CAE

บทนำ

ปัจจุบันสถานการณ์ความต้องการใช้พลังงานในทุกภาคส่วนนับวันจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จากแหล่งพลังงานหลักของโลกอย่างถ่านหินและปิโตรเลียมกำลังจะหมดลง พลังงานลม เป็นทางเลือกหนึ่งในการนำมาทดแทนพลังงานในรูปแบบอื่น หากได้มีการพัฒนาการใช้ประโยชน์อย่างจริงจังและมีประสิทธิภาพก็จะเป็นพลังงานทดแทนที่สำคัญและมีประสิทธิภาพ (Wind

Turbine) พลังงานลม เป็นพลังงานจากธรรมชาติที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยอาศัยเครื่องมือที่เรียกว่า “กังหันลม” เป็นตัวสกัดกั้นพลังงานจลน์ของกระแสลมแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานกล จากนั้นจึงนำพลังงานกลที่ได้ไปใช้ประโยชน์จากการศึกษาศักยภาพพลังงานลมทั่วโลกพบว่าแหล่งพลังงานที่มีอยู่อย่างมหาศาล ข้อมูลจากเอกสารอ้างอิงพบว่า เฉพาะในพื้นที่ชายฝั่งของทวีปยุโรปมีพลังงานจากลมถึง 2,500 เทอราวัตต์ชั่วโมงปี ซึ่งคิดเป็น 85

เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานไฟฟ้าในยุโรปในปี ค.ศ. 1997 (Thomas & Lennart. 2002 : 54) ซึ่งตัวเลขพลังงานลมดังกล่าวนี้อาจแตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลความเร็วลมที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสมมุติฐานของเทคโนโลยีกังหันลมที่เลือกใช้ในการประเมิน (www.thaigoodview.com) นับตั้งแต่ประเทศไทยต้องเผชิญกับปัญหาวิกฤติการณ์ราคาน้ำมันที่พุ่งสูงขึ้น การพึ่งพาน้ำมันจากต่างประเทศเพียงอย่างเดียวจึงเป็นเรื่องที่หลายฝ่ายเกิดความวิตกกังวลถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อประเทศ พลังงานทดแทนจึงเป็นทางเลือกใหม่ในท่ามกลางวิกฤติปัจจุบัน ข้อดีของพลังงานลมที่มีต่อสังคม พบว่าพลังงานลมเป็นพลังงานที่ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่มีวันหมด กังหันลมคือชุดเครื่องจักรกลชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของลมให้เป็นพลังงานกล และนำพลังงานกลมาใช้กับระบบผลิตไฟฟ้า โดยทั่วไปกังหันลมแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดตามแกนหมุนของกังหันลมได้แก่ กังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง (Vertical Axis Wind Turbines,VAWTs) และกังหันลมแกนหมุนแนวนอน(Horizontal Axis Wind Turbines,HAWTs) ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์กังหันลมในแนวแกนตั้ง(Vertical Axis Wind Turbines,VAWTs) ซึ่งมีจุดเด่นแตกต่างจากกังหันลมในแนวแกนนอน(Horizontal Axis Wind Turbines,HAWTs) โดยมีความสามารถในการรับแรงลมที่วิ่งเข้ามากระทบใบกังหันได้ทุกทิศทางที่ความเร็วลมต่างๆ โดยไม่ต้องพึ่งชุดสายหาคีตทางลม สามารถขยายกำลังการผลิตได้โดยการเพิ่มรัศมีการดูแลบำรุงรักษาทำได้ง่าย ทั่วโลกไม่ซับซ้อน ผู้วิจัยเห็นความสำคัญของพลังงานลมที่มีต่อสังคมในระยะยาวเพื่อให้เกิดการศึกษา วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานลมเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า ให้มีความเหมาะสมกับสภาพและความเร็วลมในประเทศไทยและสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้เหมาะสมกับประเทศไทยหรือประเทศอื่นๆที่มีศักยภาพพลังงานลมใกล้เคียงกัน

โดยหลักการออกแบบเชิงวิศวกรรมสำหรับงานจริงในปัจจุบันต้องเลือกใช้วัสดุที่มีโครงสร้างแข็งแรง มีน้ำหนักเบา ใช้วัสดุน้อย ต้นทุนต่ำ หลีกเลี่ยงการลงถูกกลองผิ

ดังนั้นงานออกแบบผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ชิ้นส่วนต่างๆและการบำรุงรักษาต้องประยุกต์ใช้เทคโนโลยี CAE เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจริงโดยสามารถนำชิ้นงานจริงมาศึกษาวิเคราะห์ร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยการสร้างแบบจำลองในเครื่องคอมพิวเตอร์ แล้วทำการทดสอบทางวิศวกรรมภายใต้สภาวะแวดล้อมเสมือนจริงที่จำลองขึ้นในซอฟต์แวร์ที่ช่วยในการลดต้นทุนจากการลงมือทดลองถูกลงเวลาขั้นตอนในการออกแบบวัสดุที่ไม่จำเป็น โดยผ่านการสร้างโมเดลจำลอง การเลือกและปรับแต่งขนาดรูปทรงให้เหมาะสม การกำหนดขนาดคุณสมบัติวัสดุ ใช้เทคโนโลยี CAE ช่วยวิเคราะห์จนสามารถแก้ไขปัญหาในงานนั้นๆได้

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาคุณสมบัติและการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแนวแกนตั้งและศึกษาคุณสมบัติความแข็งแรงของโครงสร้างกังหันลมผลิตไฟฟ้าในแนวแกนตั้ง โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์

แนวคิด ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

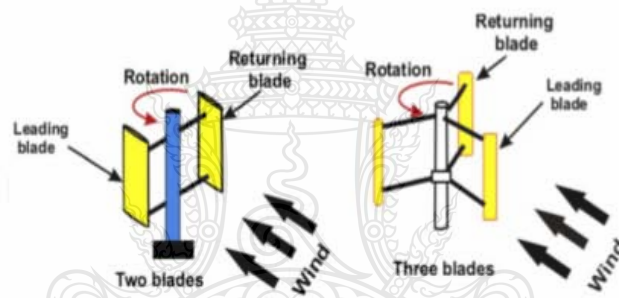
งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า จากนั้นจึงทำการสร้างแบบจำลองเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์โดยอาศัยทฤษฎีต่างๆ เช่น ทฤษฎีของลม หลักการของงานและพลังงาน ทฤษฎีใบพัดกังหันลมรวมไปถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พลังงานลม (Wind Energy) คือ การเคลื่อนตัวของอากาศที่มีความแตกต่างทางด้านอุณหภูมิและความดัน เนื่องจากได้รับความร้อนจากแสงแดดที่ไม่เท่ากัน ทำให้อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำมีความหนาแน่นจะต่ำลงขึ้นด้านบนและเมื่ออากาศที่มีอุณหภูมิต่ำความหนาแน่นจะสูงเคลื่อนที่เข้ามาแทน ทำให้เกิดเป็นพลังงานจลน์รูปหนึ่ง ที่เรียกว่า “ลมพัด” พลังงานลมนิยู่ตามธรรมชาติโดยทั่ว ๆ ไปไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการนำมาใช้และไม่ต้องนำเข้าจาก

ต่างประเทศเหมือนกับน้ำมันเชื้อเพลิง และเป็นพลังงานที่สะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากพลังงานลมสามารถจะนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างไม่มีวันหมดไปจากโลกใบนี้ถ้าโลกยังคงหมุนและมีแสงแดดอยู่ ดังนั้นเราจึงต้องหาอุปกรณ์ที่จะเปลี่ยนพลังงานจลน์ของลมให้มาเป็นพลังงานกลและเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้าเป็นที่ได้รับความนิยมและเป็นที่ยอมรับอยู่ในขณะนี้ถือว่าเป็นเครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพสูงสุด มีชื่อเรียกว่า กังหันลม (Wind turbine)

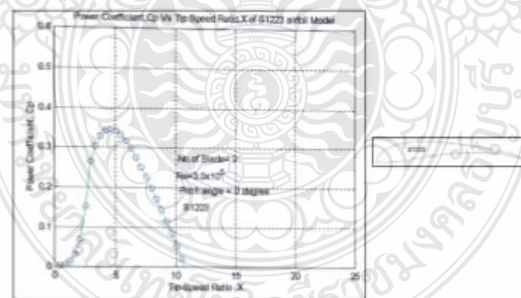
ทฤษฎีการวิเคราะห์โดยใช้หลักการของ Momentum Theory นั้น ในเบื้องต้นจะต้องทำการตั้งสมมุติฐาน (Assumption) ขึ้นมาก่อน ดังนี้ การทำงานของกังหันลมจะเกี่ยวข้องและมีความสัมพันธ์กับความเร็วลมในการทำงาน

ประเทศไทยอยู่ใกล้เขตเส้นศูนย์สูตรทำให้ได้รับแรงลมเฉลี่ยทั้งปีต่ำถึงปานกลางจำเป็นต้องศึกษารูปแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมกับความเร็วลมที่มีอยู่ในประเทศ

รูปแบบกังหันลมที่เหมาะสมสามารถทำงานได้ดีมีความเหมาะสมกับความเร็วลมเฉลี่ย 5-6 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วลมในประเทศที่มีอยู่เป็นส่วนใหญ่ และมีความสามารถในการผลิตเต็มกำลังการผลิตสูงสุดที่ความเร็วลมไม่เกิน 10 เมตรต่อวินาที เป็นรูปแบบกังหันลมที่มีความเหมาะสมสำหรับความเร็วลมต่ำไปจนถึงระดับความเร็วลมปานกลาง

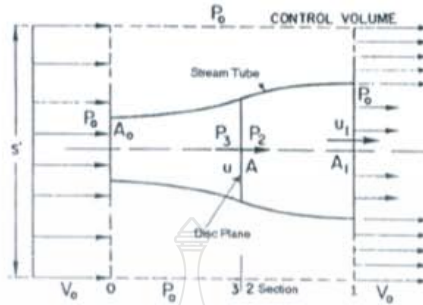


รูปที่ 1 กังหันลมหมุนแนวแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine, VAWT)



รูปที่ 2 แสดง Power Curve ของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ที่มา : Roynarin W. Optimisation of vertical axis wind turbines. Northumbria University; 2004



รูปที่ 3 แสดงภาพหลักการ Momentum theory

ที่มา: Roynarin W. Optimisation of vertical axis wind turbines. Northumbria University; 2004

จาก Power in the wind

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

N คือ จำนวนรอบในการหมุน (rpm)

$$\text{หรือ } \omega = \frac{v}{r} \quad (4)$$

เมื่อ P คือ กำลังงานของกังหันลม (Watt)

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศมีค่า

1.225 kg/m³

A คือ พื้นที่รับลมของชุดกังหันลมมาจาก

v คือ ความเร็วลม (m/s)

v คือ ความเร็ว (rpm)

r คือ รัศมีใบกังหันลม (m)

แรงบิดที่กังหันลมได้รับ

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (2)$$

T คือ แรงบิด (N.m)

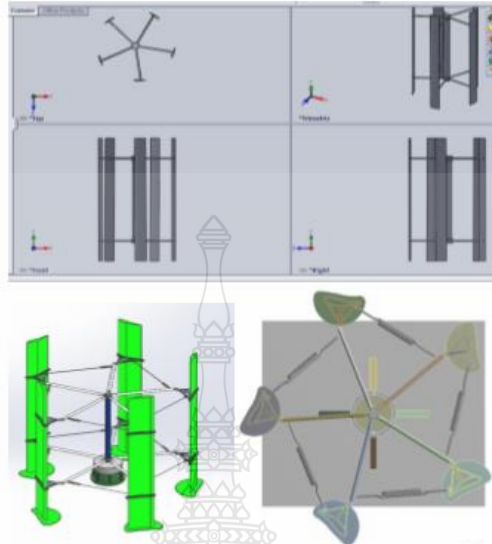
P คือ กำลังงานของกังหันลม (Watt)

ω คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/sec)

ระเบียบวิธีการวิจัย

งานศึกษาวิจัยนี้ทำการศึกษาโดยมีขั้นตอนการทำงาน
ขั้นตอนดังนี้ คือ สร้างแบบจำลอง Cad Model ส่งเข้า
โปรแกรมวิเคราะห์ CAE ตรวจสอบขนาดรูปทรงให้ถูกต้อง
ป้อนคุณสมบัติวัสดุ กำหนดสภาวะงานที่เกิดขึ้นจริง ตั้ง
ค่าตัวแปรต่างๆ ประมวลผลการคำนวณ แสดงผลการ
คำนวณและให้คำตอบวิเคราะห์ผล

$$\text{จาก } \omega = \frac{2\pi TN}{60} \quad (3)$$



รูปที่ 4 แบบจำลองการจับยึดโอบกั้นสนมแนวแกนตั้ง

ที่มา: ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ร่วมกับ ศูนย์บริการวิชาการการออกแบบและวิศวกรรม

ตารางที่ 1 ค่าคุณสมบัติของโครงสร้างกั้นสนมแนวแกนตั้ง

Material	Density (g/cc.)	Elastic Modulus (GPa)	Poisson' ratio	Yield Strength (MPa)
Steel	7.85	205	0.3	250
E-Glass	2.64	77	0.19	1,080-3,345

ที่มา: ศูนย์บริการวิชาการการออกแบบและวิศวกรรม



รูปที่ 5 แบบจำลอง โครงสร้างกั้นสนมแนวแกนตั้ง

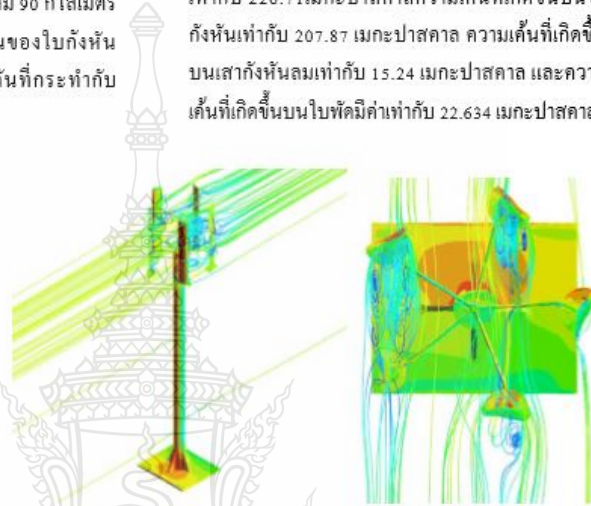
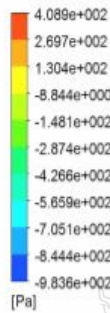
ที่มา: ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ร่วมกับ ศูนย์บริการปรึกษาการออกแบบและวิศวกรรม

ผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ความแข็งแรงของโครงสร้างของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแนวแกนตั้งที่ความเร็วลม ๑๐ กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยมีความเร็วในการหมุนของใบกังหันเท่ากับ 110 รอบต่อนาทีพบว่าความดันที่กระทำกับ

โครงสร้างกังหันลมเท่ากับ 408.9 กิโลปาสคาลและค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชุดใบกังหันเท่ากับ 11.632 มิลลิเมตร ความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณสามเหลี่ยมเท่ากับ 226.71 เมกะปาสคาลความเค้นที่เกิดขึ้นบนขากังหันเท่ากับ 207.87 เมกะปาสคาล ความเค้นที่เกิดขึ้นบนเสากังหันลมเท่ากับ 15.24 เมกะปาสคาล และความเค้นที่เกิดขึ้นบนใบพัดมีค่าเท่ากับ 22.634 เมกะปาสคาล

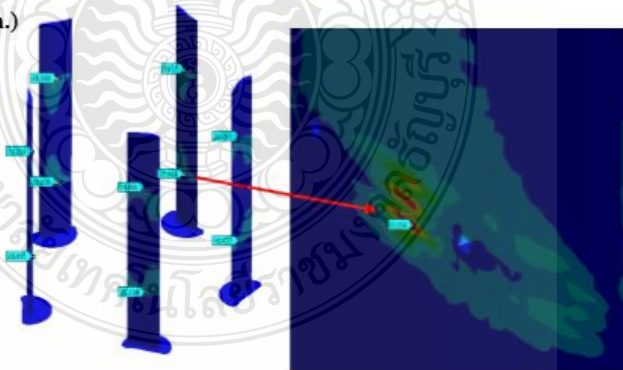
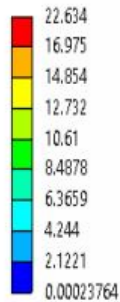
Pressure



รูปที่ 6 การนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยประมวลผลงานทางวิศวกรรม

ที่มา: ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ร่วมกับ ศูนย์บริการปรึกษาการออกแบบและวิศวกรรม

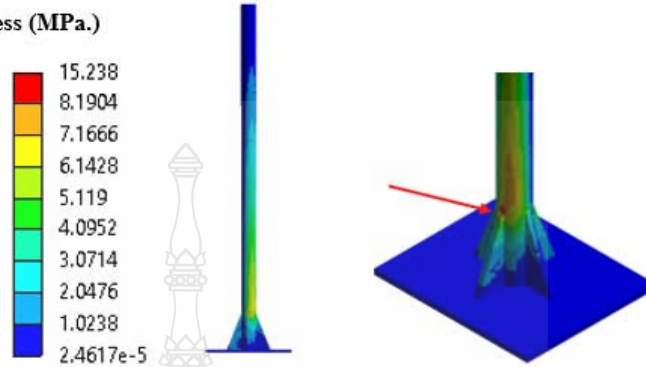
Maximum Stress (MPa.)



รูปที่ 7 ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองใบกังหันลม

ที่มา: ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ร่วมกับ ศูนย์บริการปรึกษาการออกแบบและวิศวกรรม

Maximum Stress (MPa.)



รูปที่ 8 ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับแกนเสากังหันลม

ที่มา: ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ร่วมกับ ศูนย์บริการปรึกษาการออกแบบและวิศวกรรม

อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ความแข็งแรงของโครงสร้างของกังหันลมผลิต ไฟฟ้า แบบแนวแกนตั้ง ความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณ สามเหลี่ยมเท่ากับ 226.71 เมกะปาสคาลมีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 1.10 ความเค้นที่เกิดขึ้นบนขากังหัน เท่ากับ 207.87 เมกะปาสคาลมีค่าความปลอดภัย เท่ากับ 1.20 ความเค้นที่เกิดขึ้นบนเสากังหันลมเท่ากับ 15.24 เมกะปาสคาล มีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 1.40 และความเค้นที่เกิดขึ้นบนใบพัดมีค่าเท่ากับ 22.634 เมกะปาสคาล มีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 50

สรุป

การนำเทคโนโลยี CAE มาช่วยในการวิเคราะห์ กังหันลมผลิต ไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่ามีประโยชน์ช่วยให้เห็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น โดยชัดเจนบนหน้าจอ เพิ่มขีดความสามารถในการปรับเปลี่ยนรูปแบบได้ รวดเร็ว ลดน้ำหนัก ลดปริมาณวัสดุ ลดเวลาในการ ออกแบบหลีกเลี่ยงการลองผิดลองถูก เหมาะสมที่จะ ลงทุนเชิงพาณิชย์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ศึกษาวิจัยขอขอบคุณศูนย์วิจัยและบริการด้าน พลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ เครื่องมือข้อมูลและองค์ ความรู้ด้านกังหันลมและ ขอขอบคุณศูนย์บริการ ปรึกษาการออกแบบและวิศวกรรม DECC ที่ให้ความ ช่วยเหลือในการดำเนินงานศึกษาวิจัยวิเคราะห์ โดยใช้เทคโนโลยี CAE ขอขอบคุณมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำหรับทุนในการศึกษา ระดับปริญญาโท

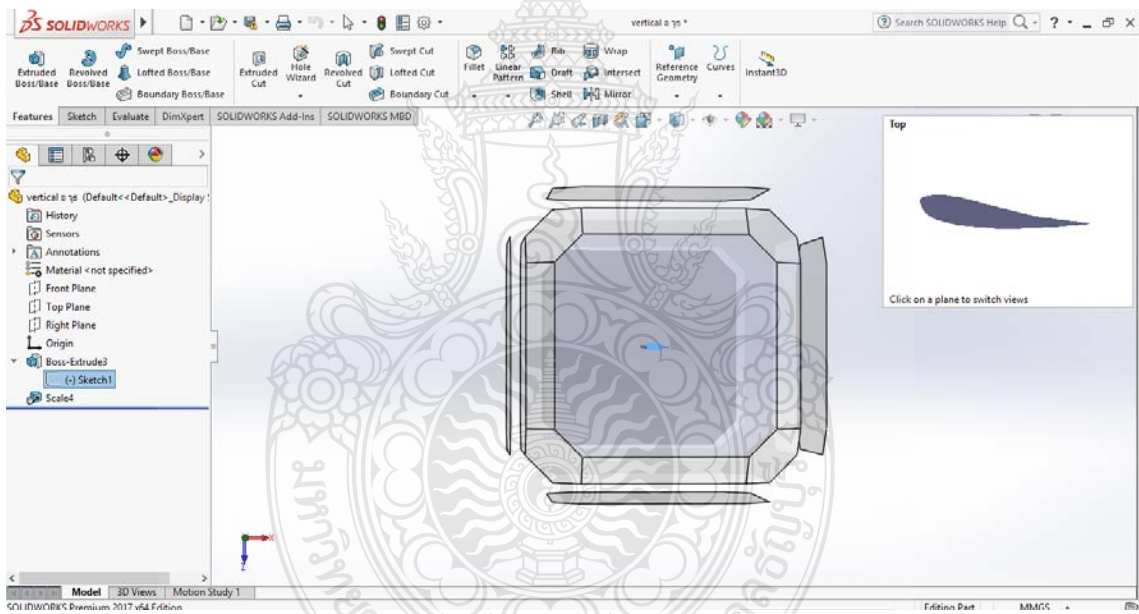
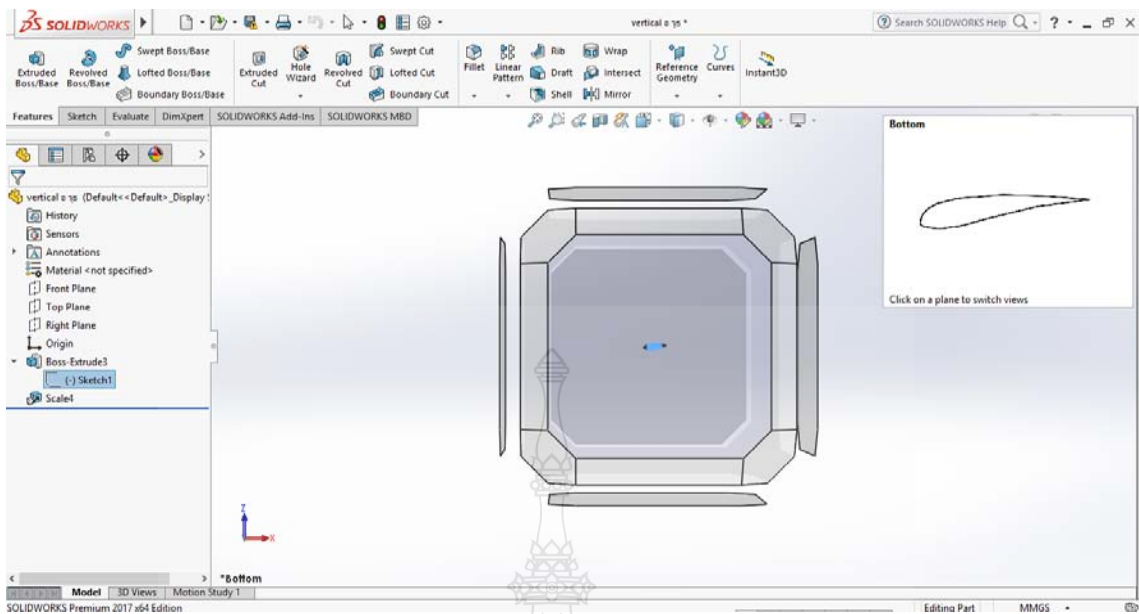
เอกสารอ้างอิง

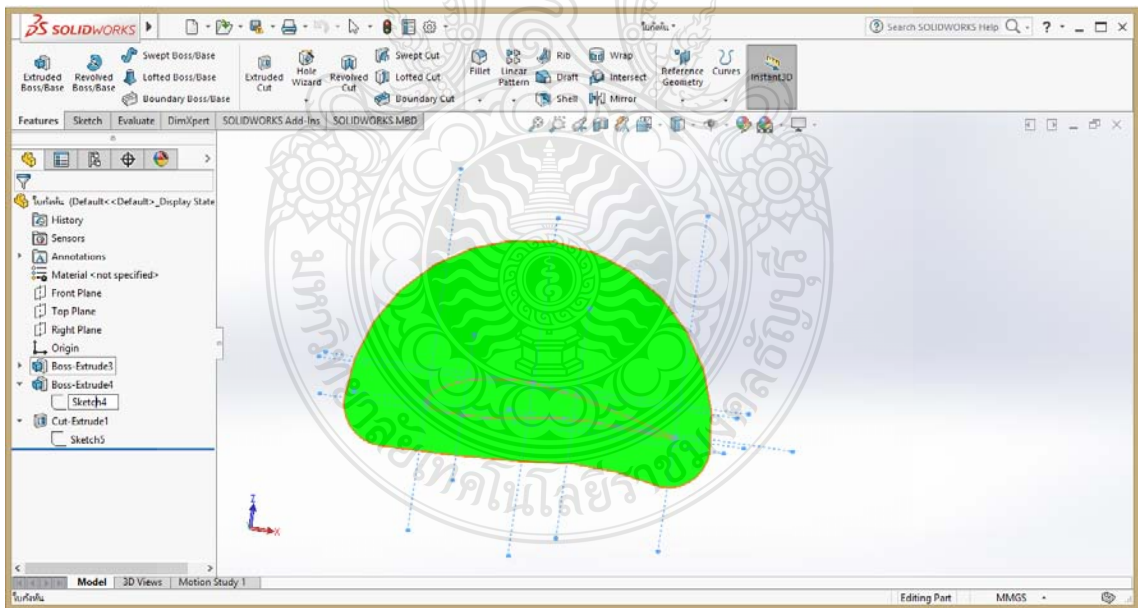
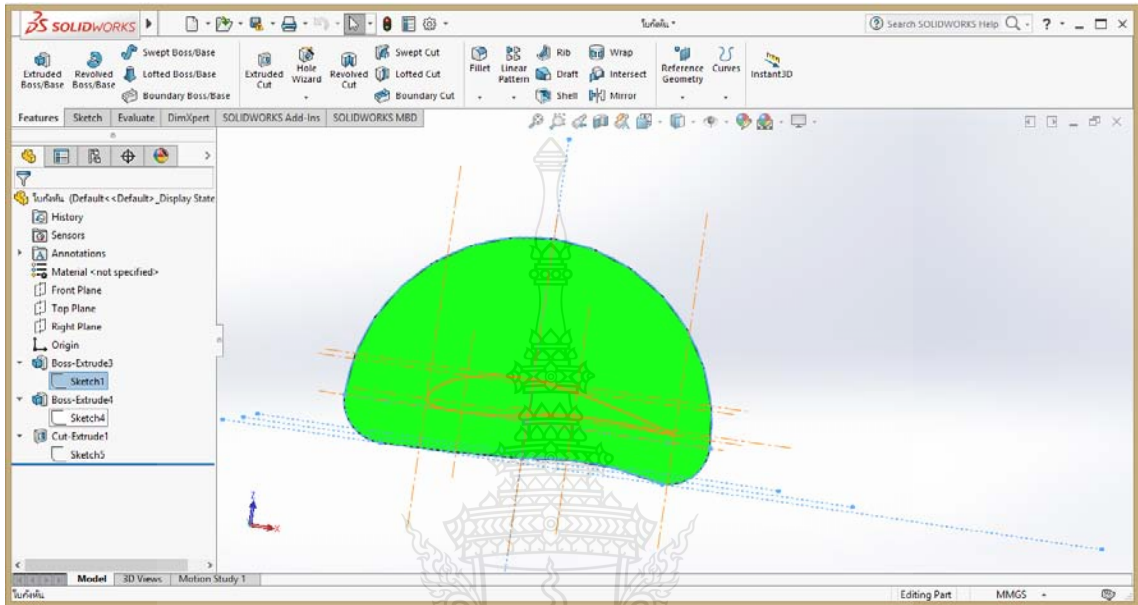
- [1] วิรัชย์ ไธนรินทร์. “รายงานการศึกษาวิจัยพัฒนา สาริตต้นแบบเทคโนโลยีกังหันลมผลิต ไฟฟ้า ความเร็วลมต่ำ”, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2551.
- [2] Roynarin W. Optimisation of vertical axis wind turbines. Northumbria University; 2004.
- [3] F.S. David M. Eggleston and Forrest S. Stoddard. “Wind Turbine Engineering Design”, Van nostrand reinhold company.

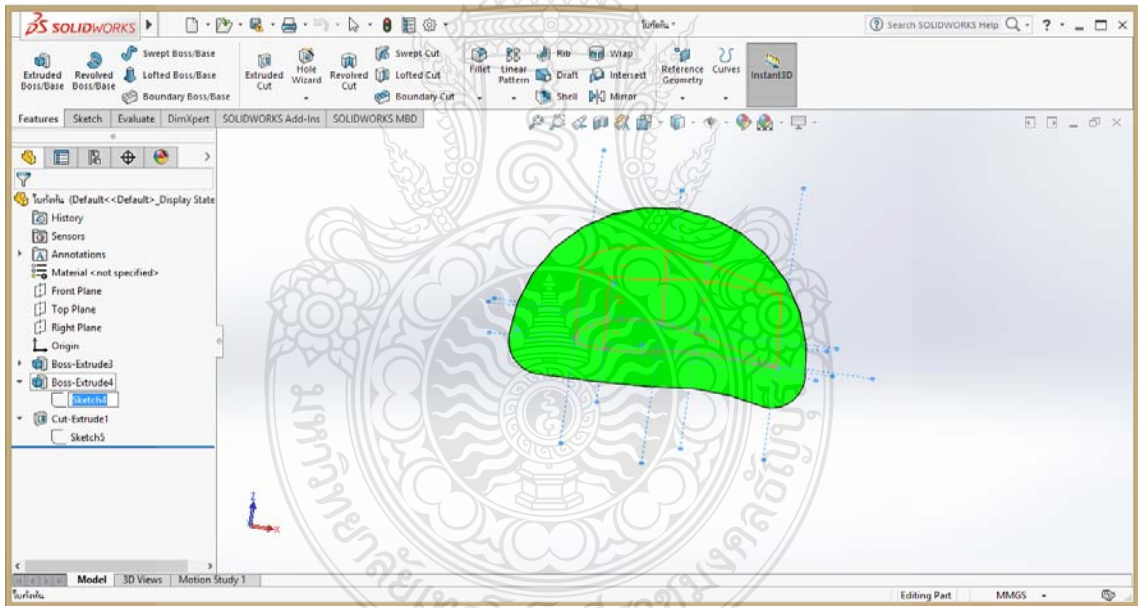
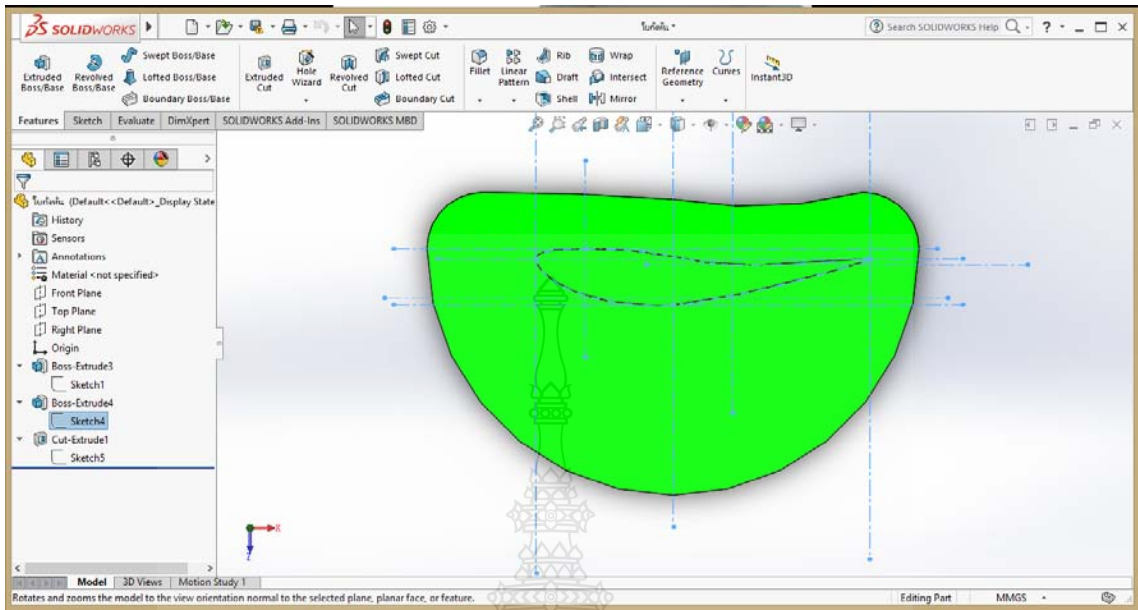


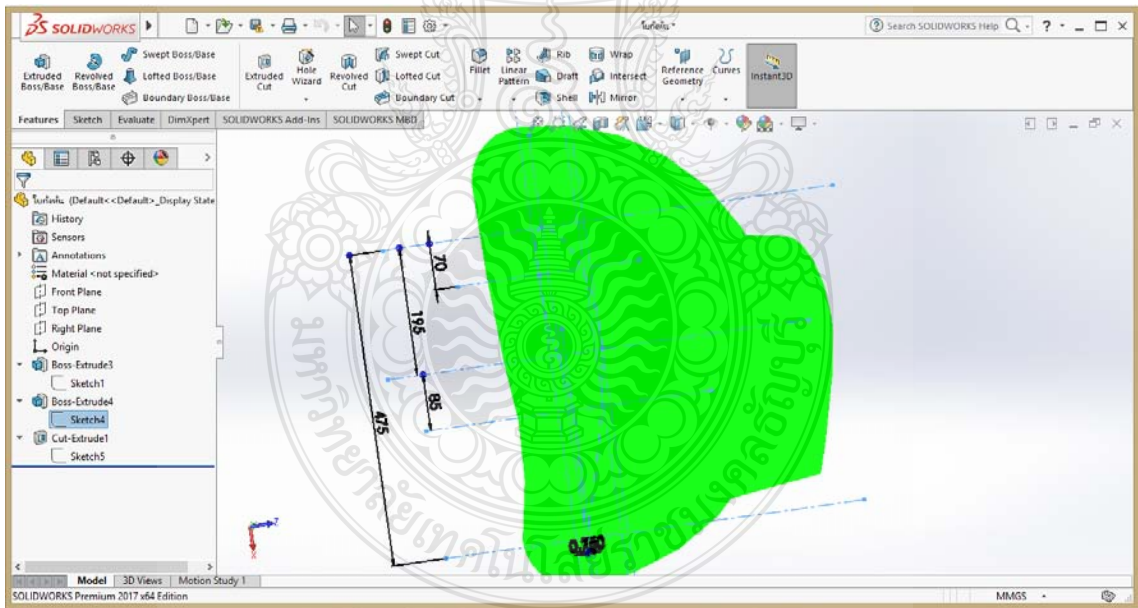
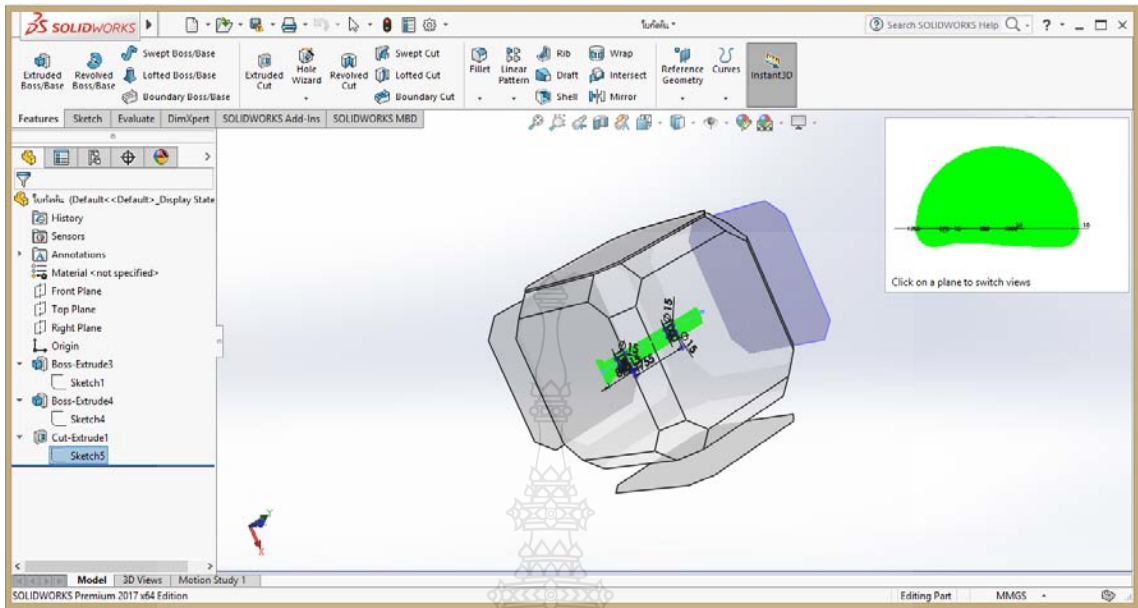
ภาคผนวก ข

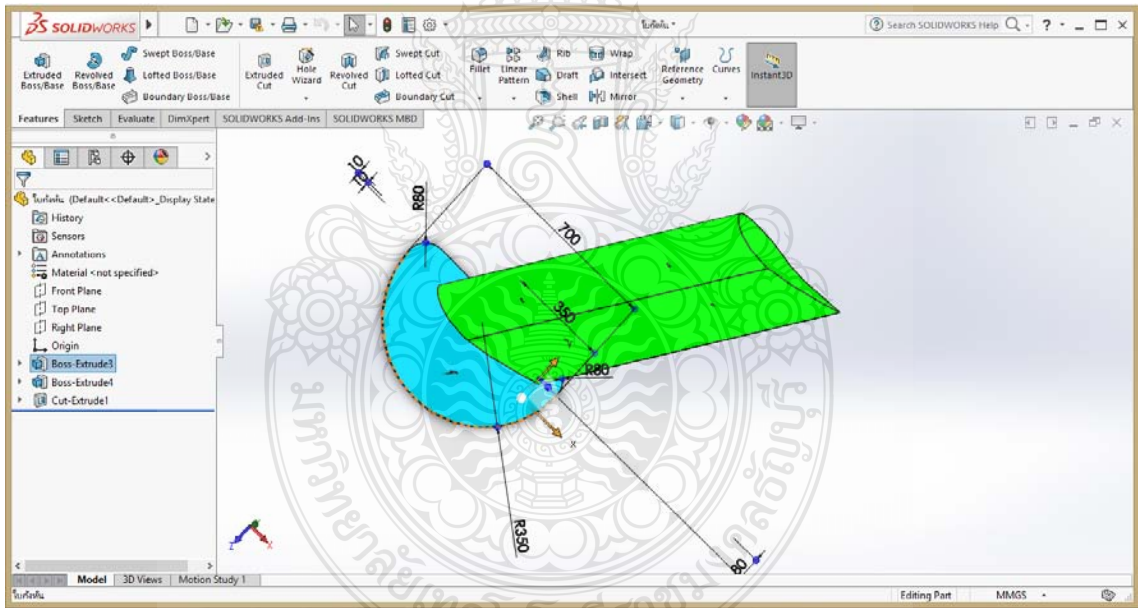
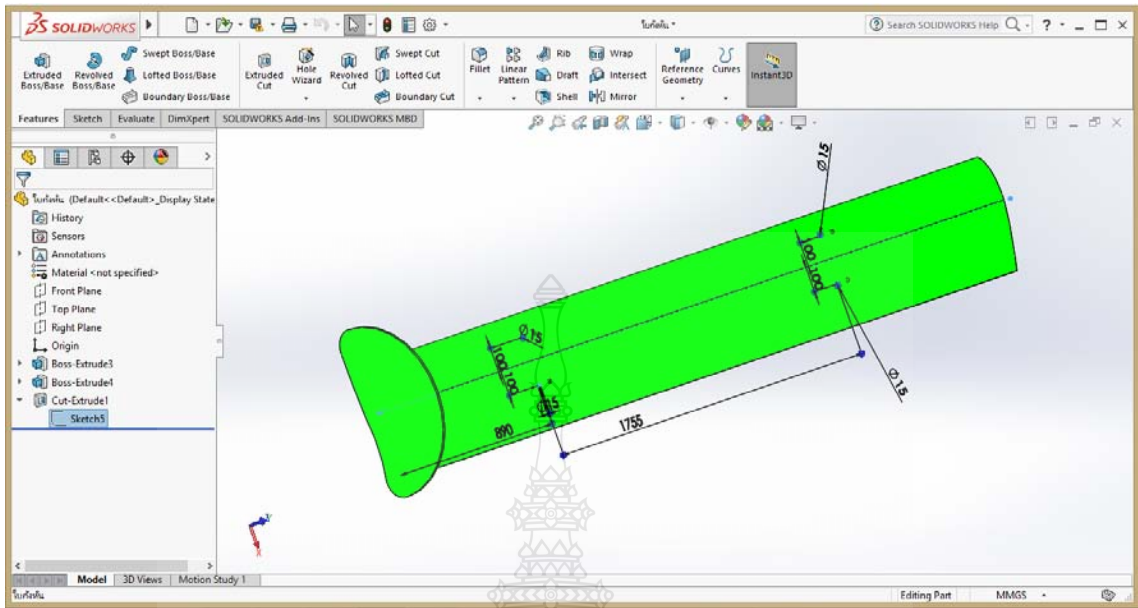
การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

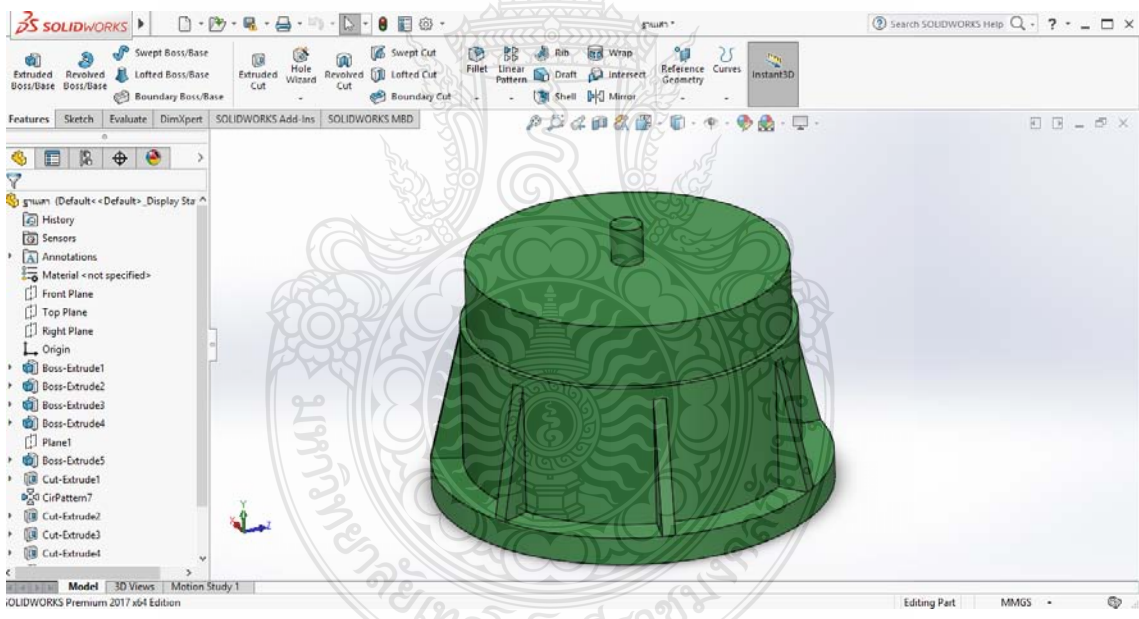
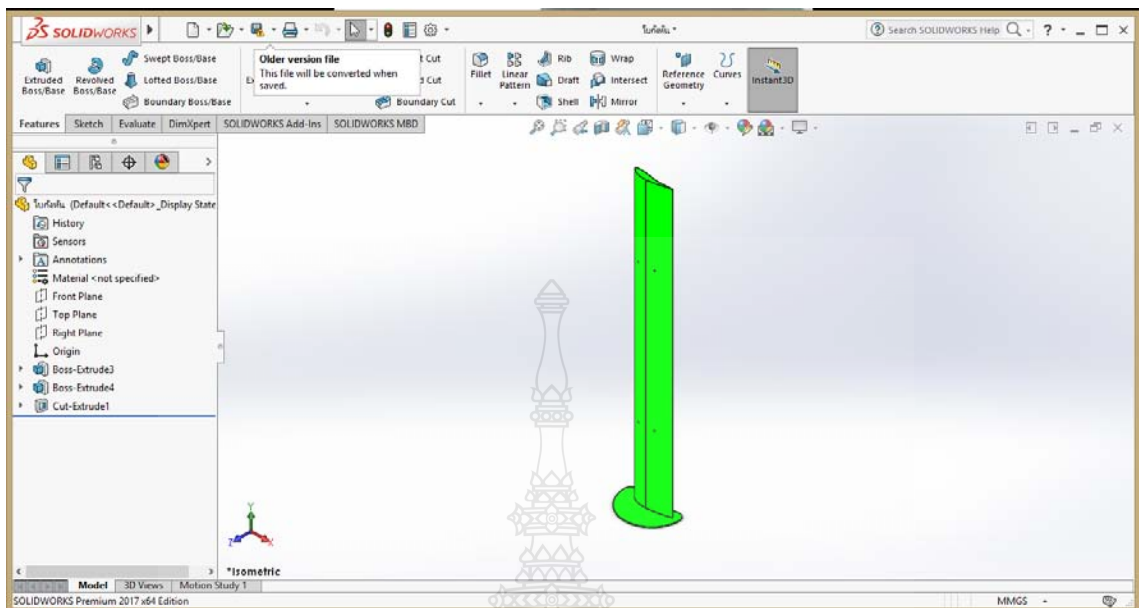


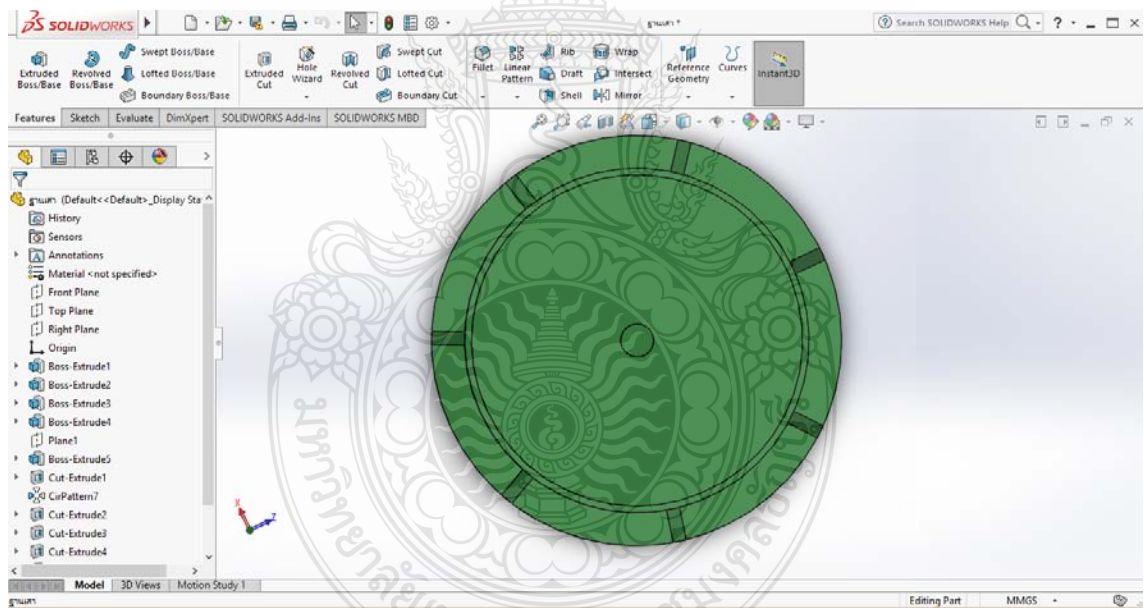
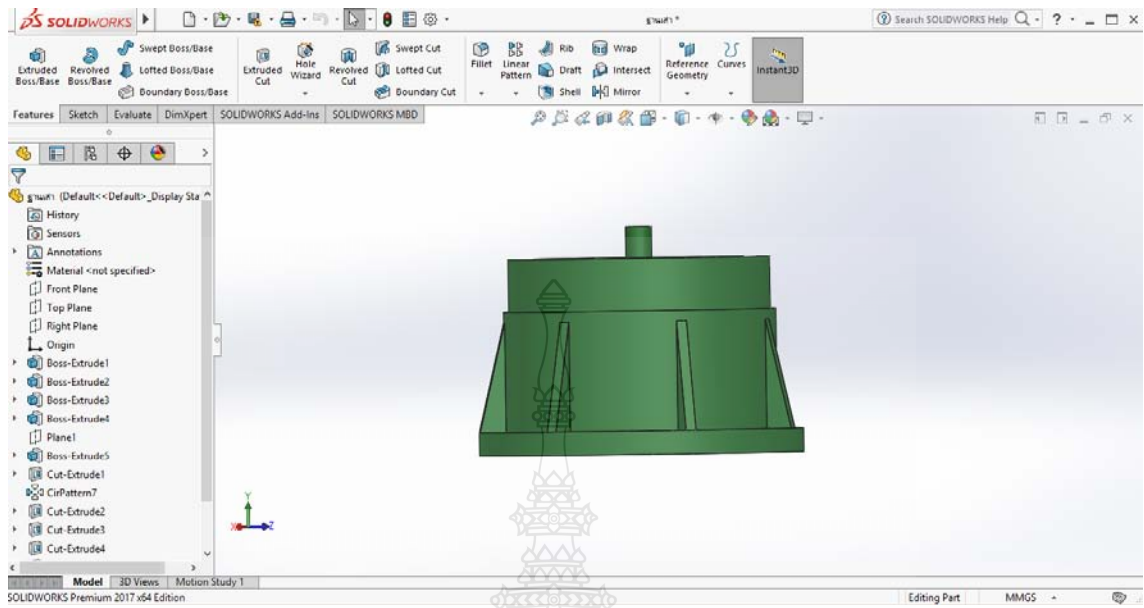


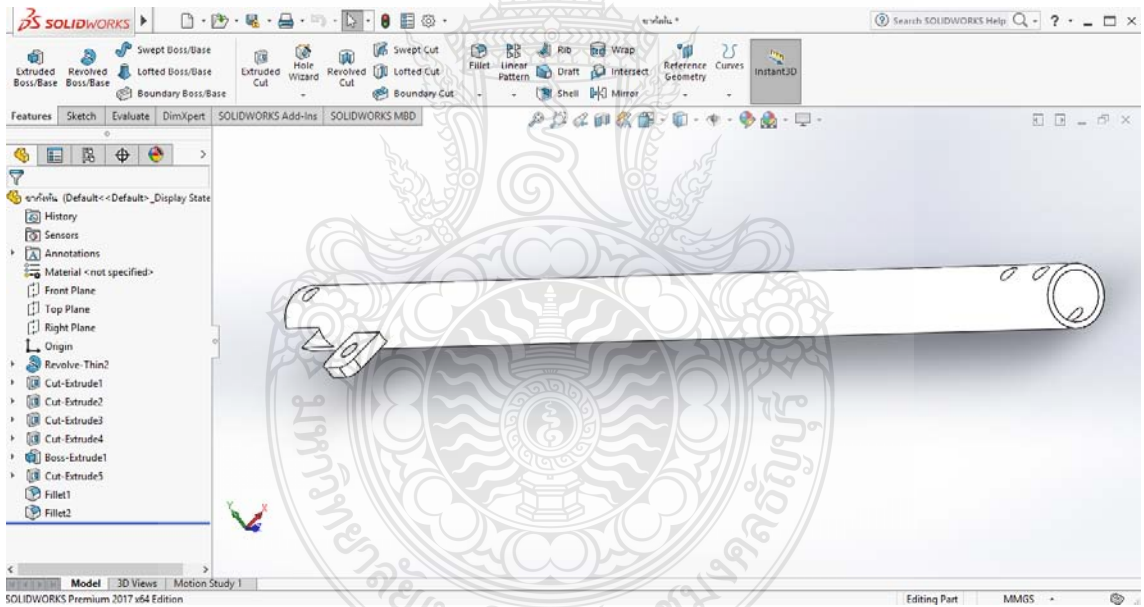
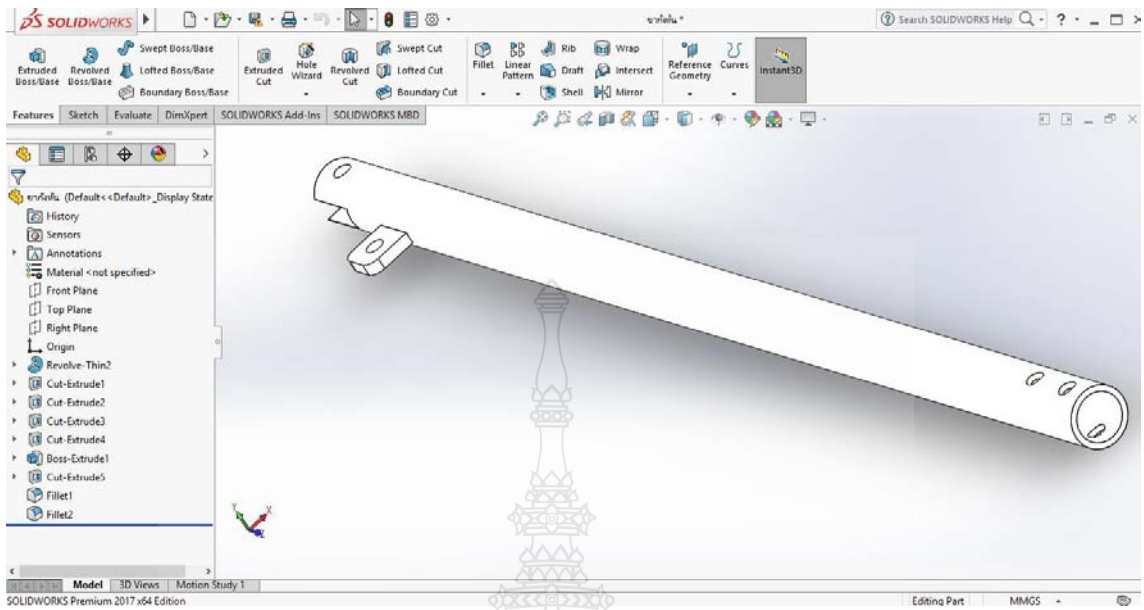


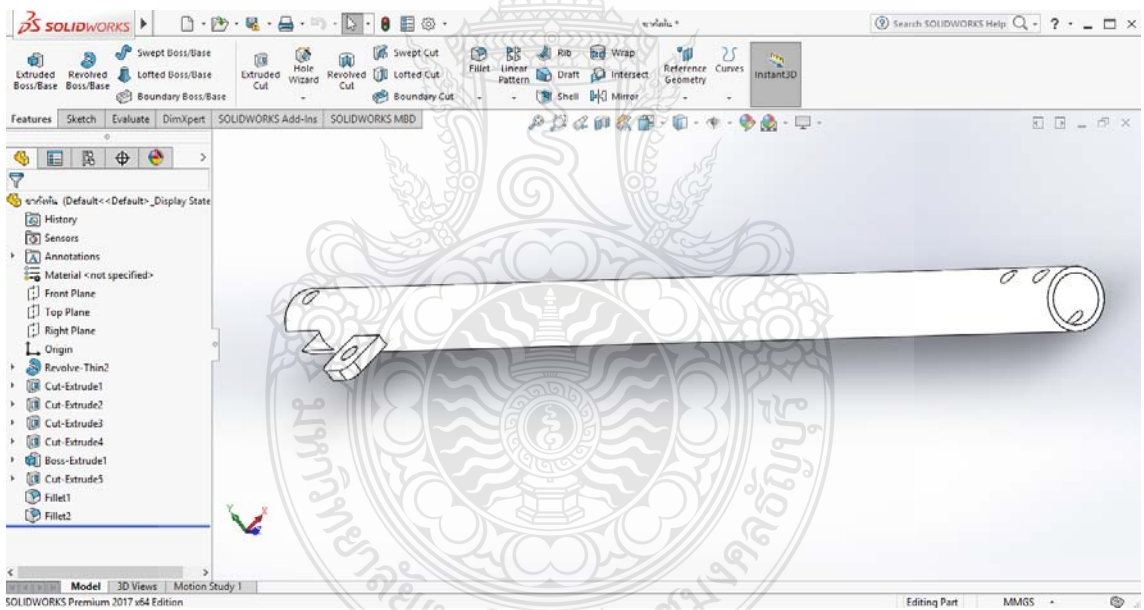
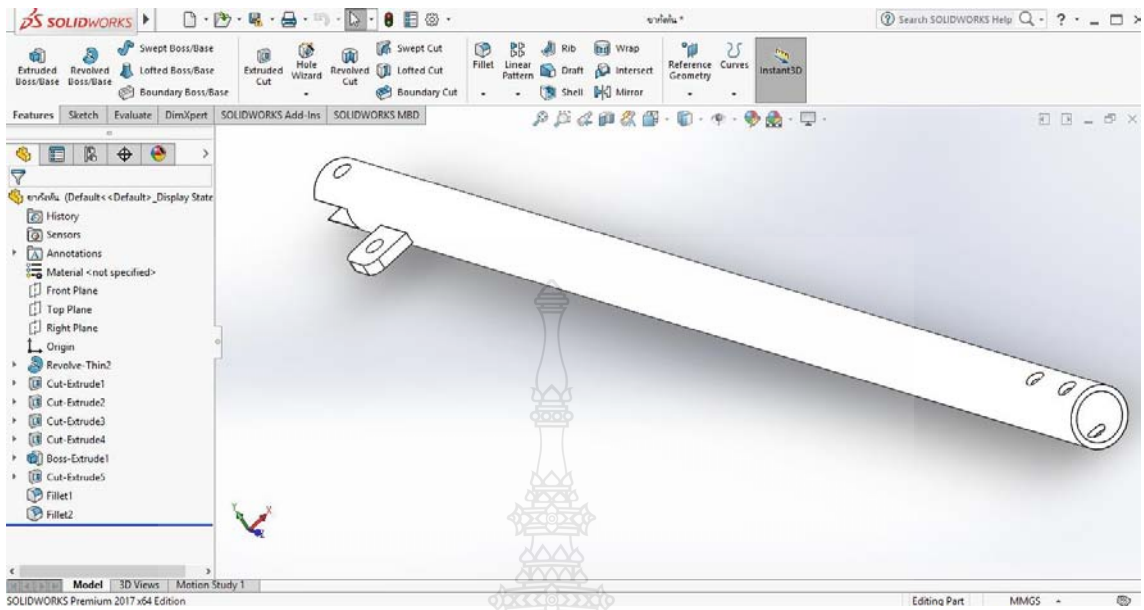


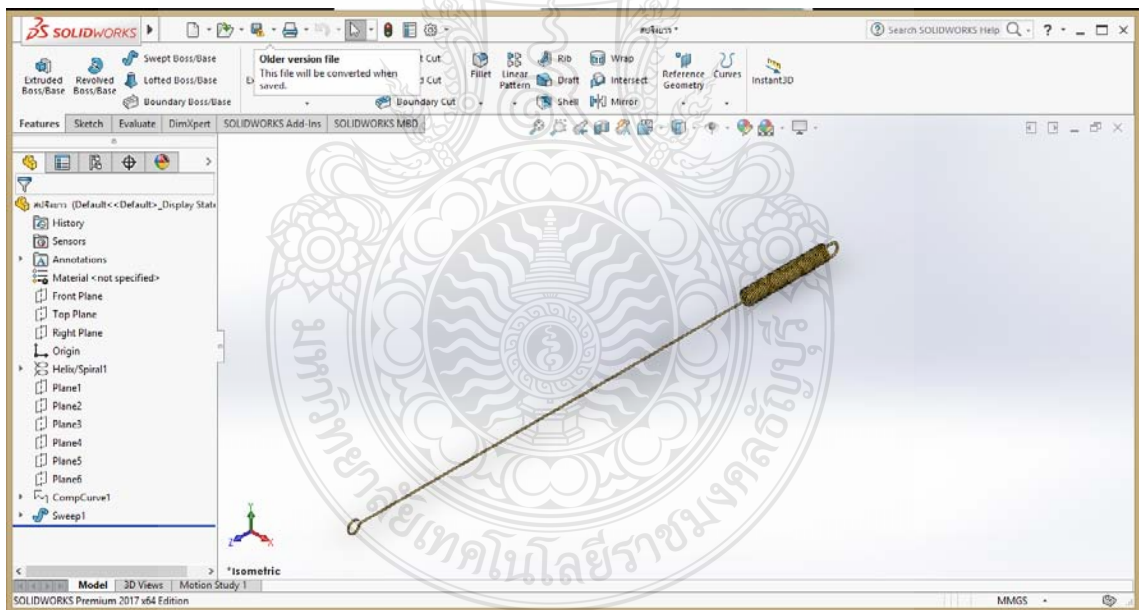
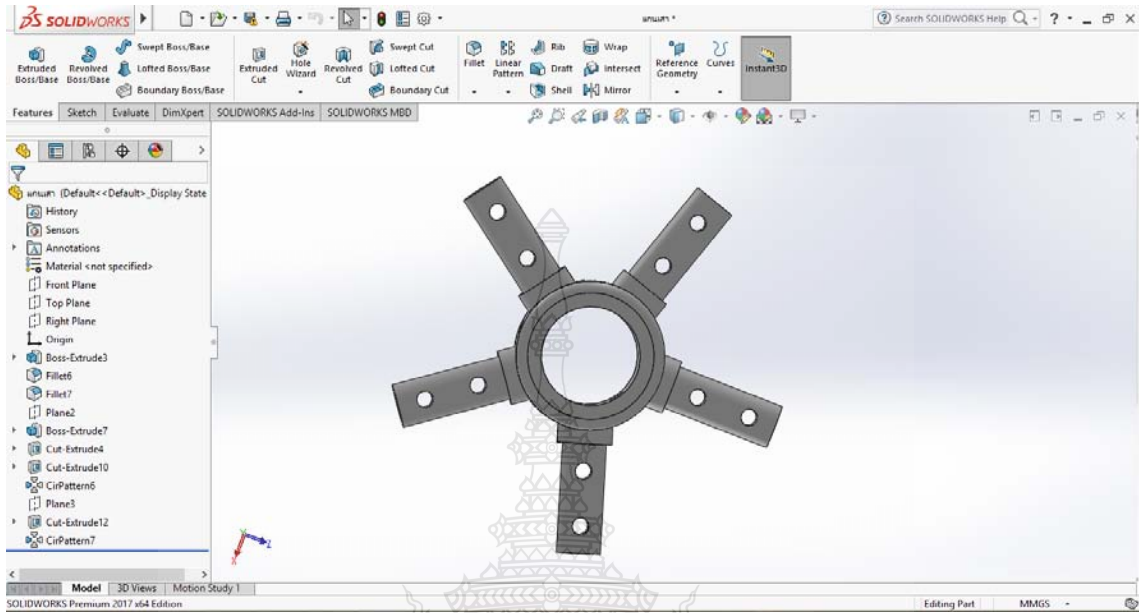


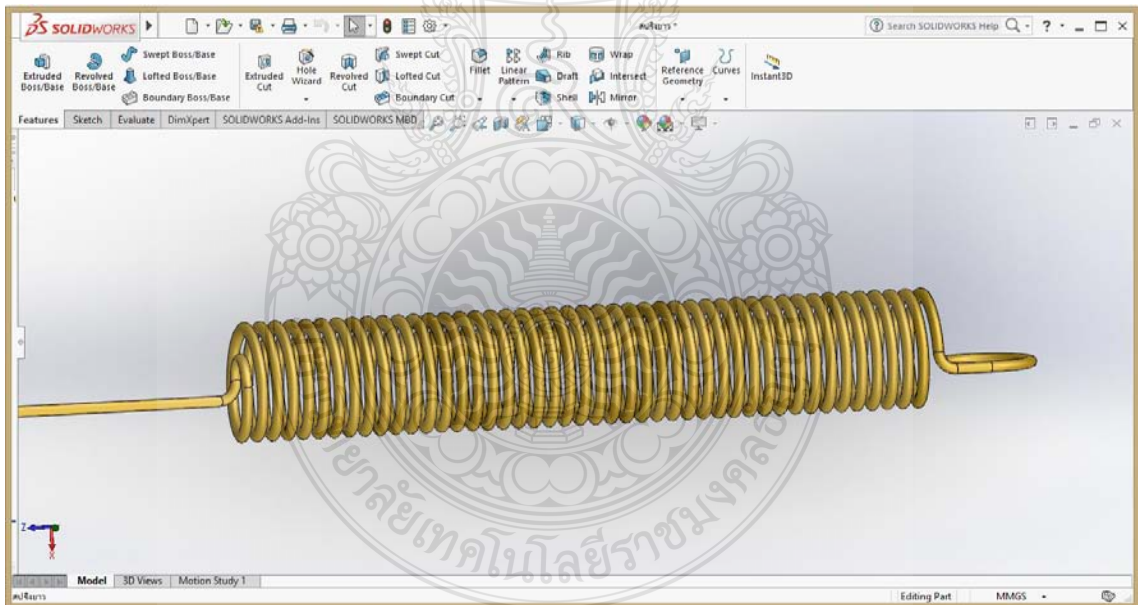
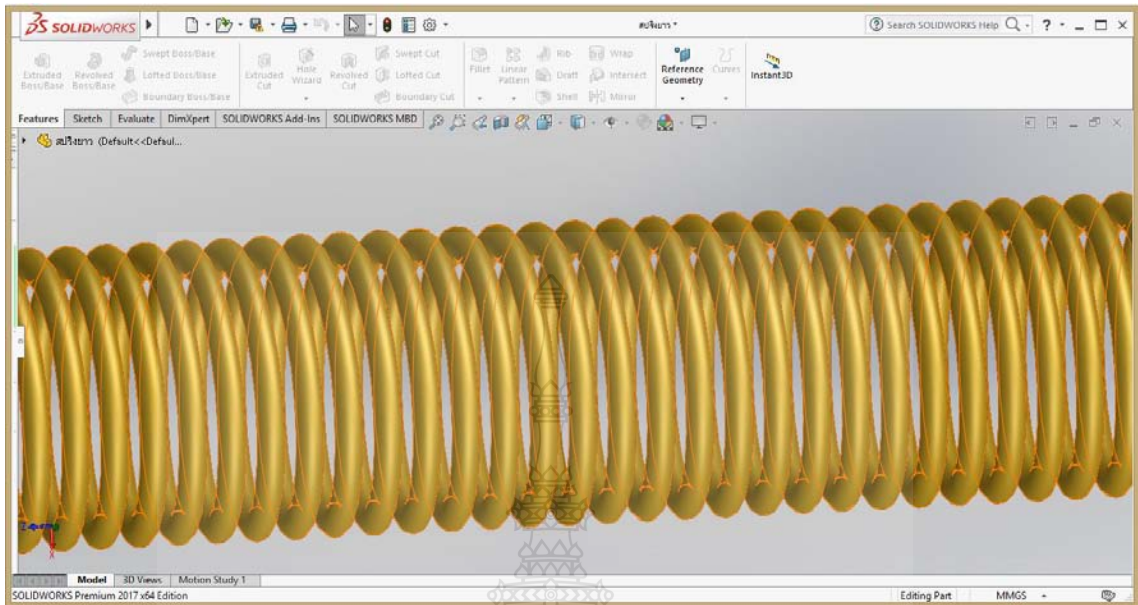


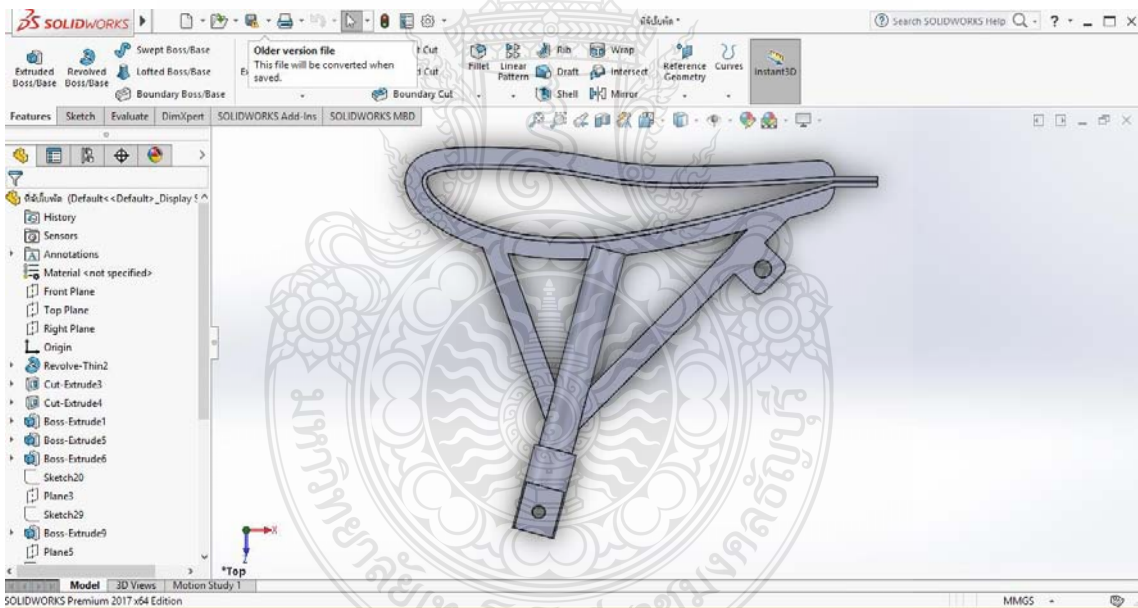
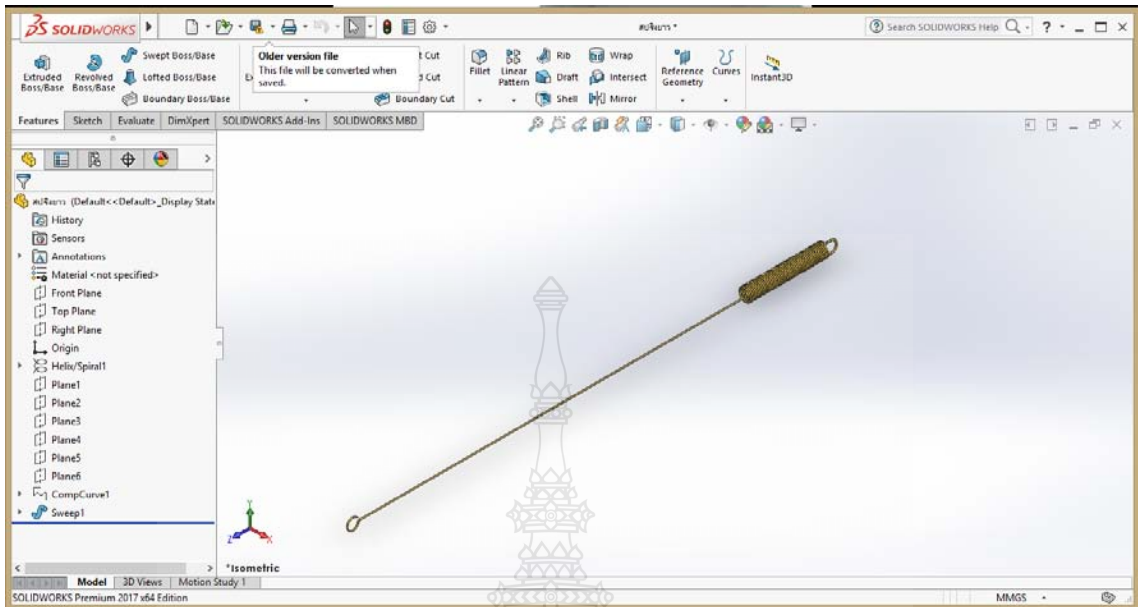


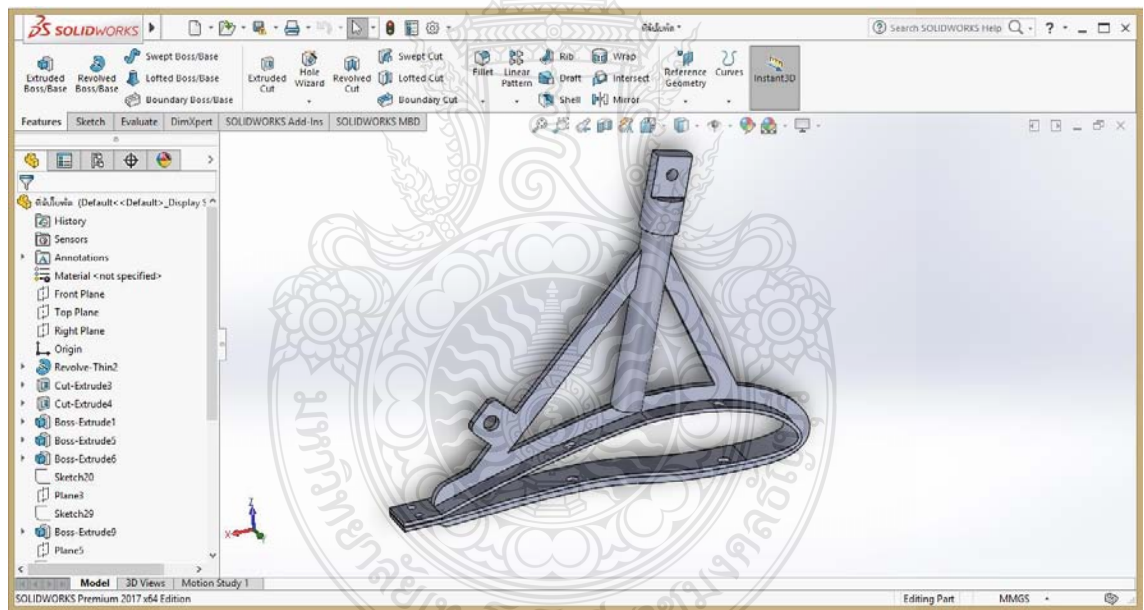
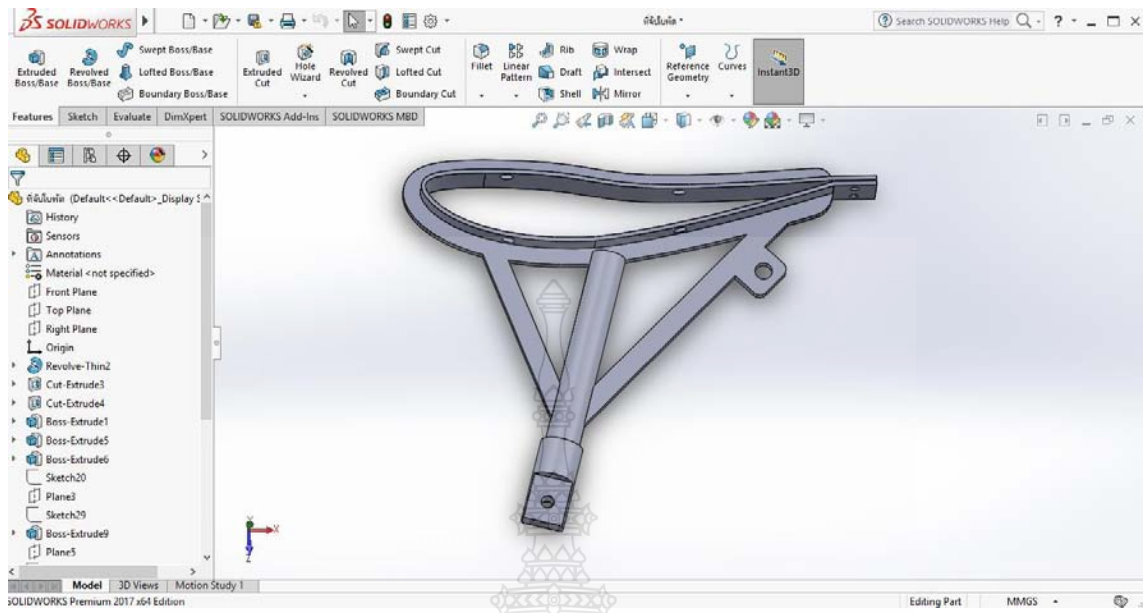


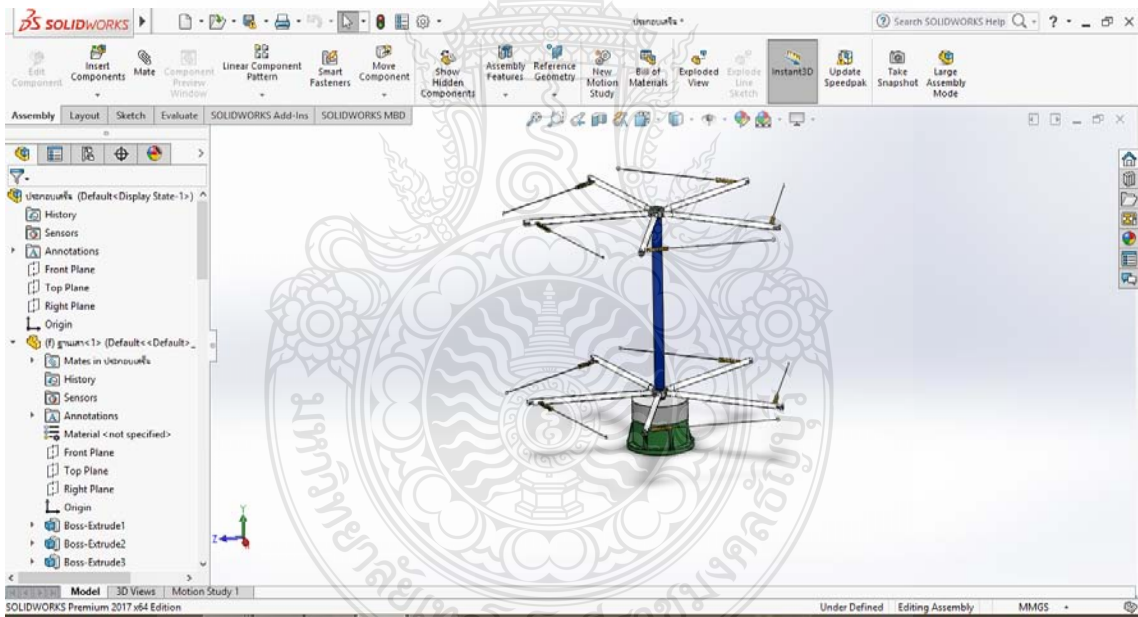
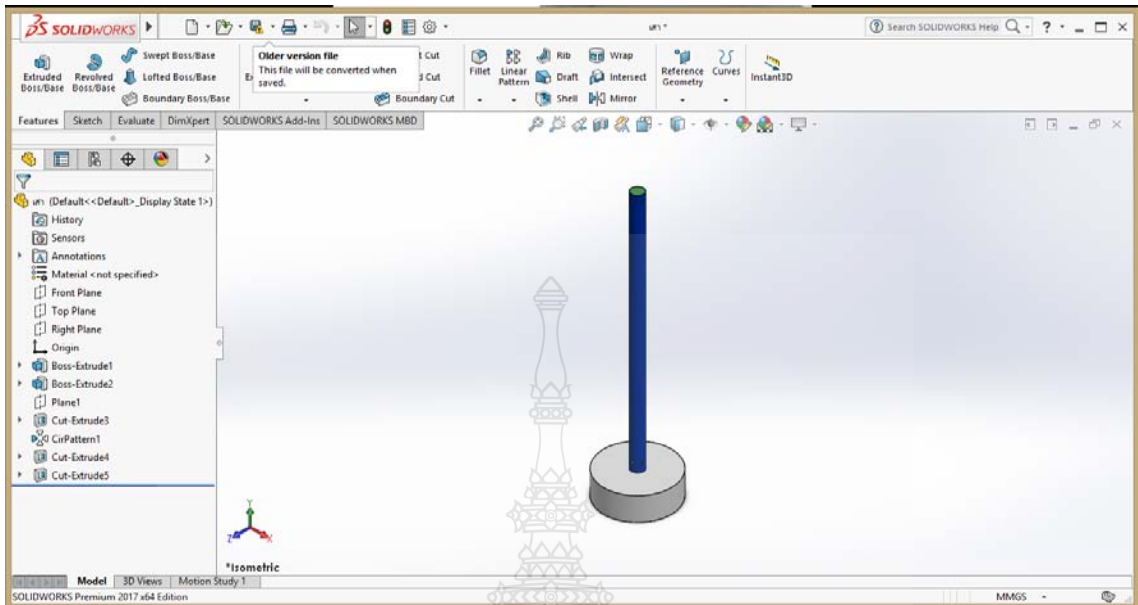


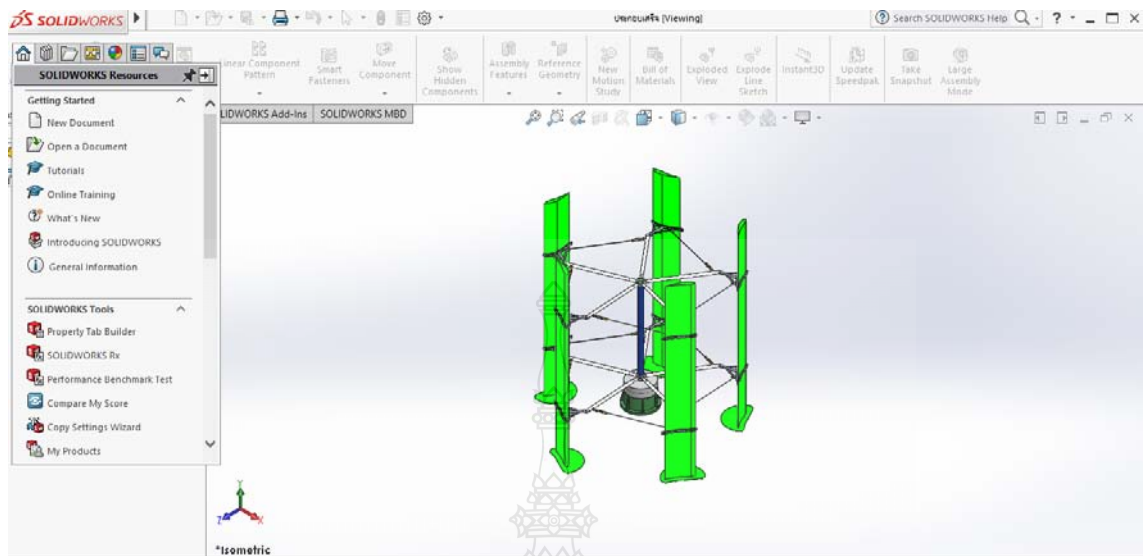












ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย สราวุธ เอกบาง
วัน เดือน ปีเกิด	21 ตุลาคม 2516
ที่อยู่	270 หมู่ 1 ตำบลไม้งาม อำเภอมืองตาก จังหวัดตาก 63000
การศึกษา	ปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	ตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ลำปาง
โทรศัพท์	054342547-8
อีเมลล์	thai_sarawut@rmuit.ac.th