

การศึกษาเชิงตัวเลขของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงาน
ของกังหันก๊าซขนาดจิ๋ว

INVESTIGATION OF PARAMETERS RELATED TO PERFORMANCE
OF ULTRA MICRO GAS TURBINE

นายยุทธพงษ์ ศรีแก้ว รหัส 51361360
นายอัฐวุฒิ อัมพา รหัส 51361483
นายอาทร อเนกนวล รหัส 51361490

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2554

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 10 ก.ค. 2555
เลขทะเบียน..... 15993517
เลขเรียกหนังสือ..... ปร.
มหาวิทยาลัยนเรศวร ๕๖56

2554

ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ การศึกษาเชิงตัวเลขของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของกิ้งก้าน
ก๊าชขนาดจ๋ว

ผู้ดำเนินโครงการ นายยุทธพงษ์ ศรีแก้ว รหัส 51361360
นายอัฐวุฒิ อัมพา รหัส 51361483
นายอาทร เอนกนวล รหัส 51361490

ที่ปรึกษาโครงการ ผศ.ดร.กุลยา กนกजारูจิตร


สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล


ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

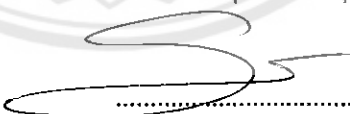
ปีการศึกษา 2554

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล


.....ที่ปรึกษาโครงการ
(ผศ.ดร.กุลยา กนกजारูจิตร)


.....กรรมการ
(ดร.ปานุ พุทธวงศ์)


.....กรรมการ
(ดร.ศลิษา วีรพันธุ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การศึกษาเชิงตัวเลขของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของกังหัน ก๊าซขนาดจิ๋ว	
ผู้ดำเนินโครงการ	นายยุทธพงษ์ ศรีแก้ว	รหัส 51361360
	นายอัฐวุฒิ อัมพา	รหัส 51361483
	นายอาทร เอนกนวล	รหัส 51361490
ที่ปรึกษาโครงการ	ผศ.ดร.กฤษยา กนกจาร์วิจิตร	
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล	
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล	
ปีการศึกษา	2554	

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลผ่านกังหันก๊าซขนาดจิ๋ว (Ultra Micro Gas Turbine) สามมิติ โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม COMSOL ซึ่งกำหนดให้การไหลเป็นแบบลามินาร์และใช้อากาศเป็นของไหล กังหันก๊าซขนาดจิ๋วถูกออกแบบให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 15 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4 มิลลิเมตร ทน 2 มิลลิเมตร และอัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ 5.89×10^{-8} ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยไม่มี Guide Vane เราพิจารณาผลกระทบต่างๆ เช่น (1) ความโค้ง (Camber) ซึ่งใช้แผนอากาศ NACA 4 Series คือ NACA 0012, NACA 2712, NACA 4712 และ NACA 6712 (2) จำนวนใบพัด 4 และ 8 ใบ (3) มุมทางออกของใบพัดที่สัมพันธ์กับเส้นความโค้งที่ 50, 60 และ 70 องศา ซึ่งผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า ใบพัดที่มีเส้นความโค้งมากที่สุด NACA 6712 ให้กำลังสูงสุดเนื่องจากรูปทรงใบพัดที่มุมทางเข้าสัมพันธ์กับเส้นความโค้ง โดยความโค้งมากจะให้มุมทางเข้าใบพัดมาก ทำให้องค์ประกอบความเร็วในแนวสัมผัสมีค่าสูง ส่งผลให้กำลังออกมาสูงไปด้วย อย่างไรก็ตามกำลังของกังหันนั้นยังขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของความเร็วรอบของกังหันกับมุมทางเข้าใบพัดด้วย นอกจากนี้จำนวนใบพัด 8 ใบให้กำลังดีกว่า 4 ใบพัด เพราะถ้าหากจำนวนใบพัดน้อยกว่านี้ การดึงพลังงานจากของไหลจะได้น้อยทำให้ได้กำลังต่ำ และสุดท้ายมุมทางออกที่ 50 องศา ให้กำลังสูงสุดเนื่องจากเมื่อพิจารณาสามเหลี่ยมความเร็วพบว่า มุมทางออกน้อยๆ ทำให้องค์ประกอบความเร็วที่ปลายใบพัดสูงสุด ทำให้ความเร็วรอบมีค่าสูงซึ่งแปรผันโดยตรงกับกำลังของกังหันจึงทำให้กำลังออกมาสูงสุด

Project title	INVESTIGATION OF PARAMETERS RELATED TO PERFORMANCE OF ULTRA MICRO GAS TURBINE	
Name	Mr. Yuttapong Srikaew	ID. 51361360
	Mr. Atthawut Aumpha	ID. 51361483
	Mr. Artorn Aneknuat	ID. 51361490
Project advisor	Dr.Koonlaya Kanokjaruvijit	
Major	Mechanical Engineering	
Department	Mechanical Engineering.	
Academic year	2011	

Abstract

This project is to numerically study the flow through an ultra micro gas turbine for 3D with the use of the finite element method via a commercial program called COMSOL®. Air is a working fluid, and laminar flow is assumed. The turbine is fixed at the size of 15 mm for external diameter, the internal diameter of 4 mm, the thickness of 2 mm and the volume flow rate of $5.89 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ without guide vanes. Some parametric effects are considered such as (1) camber – using different NACA 4 series airfoils such as NACA 0012, NACA 2712, NACA 4712 and NACA 6712 (2) number of blades: 4 and 8 blades (3) blade's outlet angle relative to the camber line at 50, 60 and 70 degrees. The results show that the most curved blade, NACA 6712, gives the highest power due to the fact that each airfoil possesses different inlet angle and the more curved one has higher degree. This leads to higher tangent velocity, thus, higher power. Nevertheless, the turbine power is also dependent of speed (rpm) and the inlet angle of the turbine blades. The turbine with 8 blades conducts the highest power. This could be because the lower number of blades could extract less energy from the flow whereas the higher number of blades leads to the friction loss. Finally, the outlet angle of 50 degrees gives the highest power because considering the velocity triangle, a small outlet angle gives the higher velocity component at the trailing edge causing higher speed, which is proportional to the turbine power.

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
สารบัญสัญลักษณ์.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาของปัญหาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบข่ายของโครงการ.....	1
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	2
1.5 กิจกรรมดำเนินงาน.....	2
1.6 สถานที่ปฏิบัติงาน.....	3
1.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการ.....	3
1.8 งบประมาณที่ใช้.....	3
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การทบทวนวรรณกรรม (Literature Review).....	4
2.2 แพนอากาศแบบ NACA 4 Series.....	6
2.3 แบบจำลองของกังหันขนาดจิ๋ว.....	7
2.4 ทฤษฎีของการคำนวณกังหัน.....	7
2.5 การหาค่ากำลังของกังหัน.....	11
2.5 การหาค่ากำลังของกังหัน.....	11

บทที่ 3 ขั้นตอนการคำนวณ.....	15
3.1 การสร้างแบบจำลองของกังหันขนาดจิวสามมิติ.....	15
3.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบจำลอง 3 มิติ.....	24
3.3 การคำนวณโดยใช้โปรแกรม COMSOL.....	32
3.4 การดึงข้อมูลจากโปรแกรม COMSOL มาคำนวณ.....	37
3.5 การคำนวณค่ากำลังที่ได้จากกังหัน.....	41
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	43
4.1. ผลของกำลังและความเร็ว.....	43
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	45
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	48
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	48
เอกสารอ้างอิง.....	49
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	50

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตาราง 1.1 กิจกรรมดำเนินงาน	2
ตาราง 1.2 งบประมาณที่ใช้	3
ตาราง 3.1 ข้อมูลจุดจำนวน 16 จุด	39
ตาราง 4.1 ผลของกำลังและความเร็วของของไหล.....	44



กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จล่วงไปด้วยดี ผู้จัดทำโครงการขอกราบขอบพระคุณ บุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ เช่น ให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำช่วยเหลือทั้งในด้านความรู้และงบประมาณซึ่งได้แก่บุคคลดังต่อไปนี้

- ผศ.ดร.กุลยา กนกจาร์วิจิตร ที่ปรึกษาโครงการ
- ดร.ภาณุ พุททวงศ์ กรรมการ
- ดร.ศลิษา วีรพันธุ์ กรรมการ
- สมาชิกในกลุ่มและเพื่อนๆทุกคน
- บุคลากรคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่เป็นผู้สนับสนุนโครงการ

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นายยุทธพงษ์ ศรีแก้ว

นายอัฐวุฒิ อัมพา

นายอาทร เอนกนวล

มีนาคม 2555

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 แพนอากาศของ NACA.....	6
รูปที่ 2.2 แบบจำลองที่นำ Import เข้าสู่โปรแกรม COMSOL เพื่อนำไปคำนวณ.....	7
รูปที่ 2.3 สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางเข้าและออกจากใบพัด.....	8
รูปที่ 2.4 ทิศทางการไหลผ่านกังหัน.....	11
รูปที่ 2.5 สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางออกของใบพัด.....	13
รูปที่ 2.6 สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางเข้าของใบพัด.....	14
รูปที่ 3.1 แบบจำลองกังหันก๊าซขนาดจืดที่พร้อมจะ Import เข้าไปคำนวณใน ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	15
รูปที่ 3.2 การเปิดโปรแกรม SolidWork 2010 ในโหมด.....	16
รูปที่ 3.3 การเลือกระนาบบนในการวาดรูป.....	16
รูปที่ 3.4 วาดรูปฐานกังหัน.....	17
รูปที่ 3.5 การเพิ่มความหนาของแบบจำลองจาก 2 มิติ ให้เป็น 3 มิติ.....	17
รูปที่ 3.6 การวาดรูปใบพัดตามขนาด NACA.....	18
รูปที่ 3.7 การ Copy ใบพัดให้มีจำนวน 4 ใบพัด.....	18
รูปที่ 3.8 การเจาะรูใบพัดทั้งหมด 4 ใบ.....	19
รูปที่ 3.9 การบันทึกแบบจำลองในนามสกุล .STEP.....	19
รูปที่ 3.10 ขั้นตอนในการนำไฟล์เขียนแบบเข้าสู่โปรแกรม COMSOL.....	20
รูปที่ 3.11 การเลือกชนิดของโหมดในการคำนวณการไหล.....	20
รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการนำ SolidWorks 2010 file เข้าสู่โปรแกรม COMSOL.....	21
รูปที่ 3.13 การนำไฟล์เข้าสู่โปรแกรมเสร็จสิ้น.....	21
รูปที่ 3.14 การวาดเส้นคอร์ต.....	22

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.15 การวาดเส้น A	22
รูปที่ 3.16 การวาดเส้น B.....	23
รูปที่ 3.17 การวาดเส้น C	23
รูปที่ 3.18 การวาดภาพ NACA ที่สมบูรณ์	24
รูปที่ 3.19 สรุปลขั้นตอนการกำหนดให้ชุดใบพัดกั้นหมุน	25
รูปที่ 3.20 สรุปลขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต	25
รูปที่ 3.21 เลือกโหมด Moving Mesh (ALE)	26
รูปที่ 3.22 เลือก Subdomain setting	26
รูปที่ 3.23 การกำหนดทิศทางการหมุนของชุดใบพัด.....	27
รูปที่ 3.24 กำหนดคุณสมบัติของของไหล	27
รูปที่ 3.25 กำหนดคุณสมบัติของของไหล	28
รูปที่ 3.26 เลือกโหมด Incompressible Navier-stokes (chns).....	28
รูปที่ 3.27 การกำหนดคุณสมบัติของการไหล	29
รูปที่ 3.28 การกำหนดตัวแปรของค่าคงที่	29
รูปที่ 3.29 การกำหนดขอบเขตแบบจำลอง.....	30
รูปที่ 3.30 การกำหนดทางเข้าของของไหล.....	30
รูปที่ 3.31 การกำหนดทางออกของของไหล	31
รูปที่ 3.32 การกำหนดขอบเขตของชุดใบพัด	31
รูปที่ 3.33 ผลลัพธ์การวิเคราะห์การไหล.....	32
รูปที่ 3.34 การกำหนด Mesh.....	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.35 การกำหนดชนิดของ Mesh	33
รูปที่ 3.36 การเลือกคำสั่งเพื่อสร้าง Mesh.....	34
รูปที่ 3.37 การเลือกคำสั่งกำหนดช่วงเวลาของการคำนวณ.....	34
รูปที่ 3.38 การตั้งเวลา (Time step).....	35
รูปที่ 3.39 การเลือกระบบ Free ใน Time stepping	35
รูปที่ 3.40 การ Solve (วิเคราะห์การไหล).....	36
รูปที่ 3.41 Solve (วิเคราะห์การไหล) เสร็จสิ้น	36
รูปที่ 3.42 เลือกโหมด Postprocessing.....	37
รูปที่ 3.43 การเลือกเวลาในการคำนวณ	38
รูปที่ 3.44 การกำหนดจุดของค่าความเร็วที่ทางออกของใบพัด	38
รูปที่ 3.45 ผลของความเร็วในหนึ่งจุด	40
รูปที่ 3.46 การบันทึกข้อมูลในแต่ละจุด	40
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับมุมที่ทางออกของใบพัด	46
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับจำนวนใบพัดของ NACA ชนิดต่างๆที่มุม 50 องศา	47

สารบัญสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่หน้าตัด	m^2
B	ความหนาของใบพัด	m
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อก๊าซ	m
D_{im}	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของใบพัด	m
d_{im}	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของใบพัด	m
g	ค่าแรงโน้มถ่วง	m/s^2
H	เฮดของสารทำงาน	m
P	กำลังของของไหล	w
Q	อัตราการไหลเชิงปริมาตร	m^3/s
u	ความเร็วปลายของใบพัด	m/s
v	ความเร็วสัมบูรณ์	m/s
v_f	ความเร็วในแนวรัศมี	m/s
v_w	ความเร็วสัมผัส	m/s
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล	kg/s
ρ	ความหนาแน่นของสารทำงาน	kg/m^3
μ	ความหนืดของอากาศ	$Pa \cdot s$
β	มุมของใบพัด	องศา
ω	ความเร็วเชิงมุม	
Re	Reynolds number	
η	ประสิทธิภาพ	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของปัญหาและความสำคัญของโครงการ

กังหันขนาดจิ๋วเป็นแหล่งผลิตพลังงานที่พัฒนาต่อยอดมาจากกังหันขนาดใหญ่ เพื่อให้สามารถใช้ได้กับเครื่องจักรและอุปกรณ์ขนาดเล็กที่มีพื้นที่จำกัด ประสิทธิภาพสูง จึงได้มีการประดิษฐ์กังหันขนาดจิ๋วขึ้นมาเป็นแหล่งผลิตพลังงานอีกทางเลือกหนึ่งและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆ เช่น งานด้านสื่อสารและคมนาคม ช่วยแผ่นโซลาร์เซลล์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าให้กับงานดาวเทียม เป็นต้น

ในปัจจุบันเราสามารถนำกังหันจิ๋วนี้ใช้ได้กับในคนและเครื่องจักร เพราะกังหันมีขนาดเล็กการใช้เงินลงทุนก็น้อย ไม่ส่งผลกระทบต่อธรรมชาติและทรัพยากรธรรมชาติมากมายนัก เหมาะกับประเทศที่กำลังพัฒนาในการสร้างเทคโนโลยีสำหรับพลังงานทดแทนต่างๆ ซึ่งไม่เพียงคำนึงถึงประสิทธิภาพเท่านั้นแต่ยังต้องคำนึงถึงผลกระทบที่ตามมากับมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ถือว่าเป็นสิ่งทีวิศวกรรุ่นใหม่จำเป็นต้องมี เพื่อให้ก้าวทันโลกที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในวันข้างหน้า

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 ศึกษาการใช้ขอบเขตที่เคลื่อนที่ (Moving boundary) โดยอาศัย Moving Mesh (ALE : Arbitrary Lagrangian - Eulerian) ในระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม COMSOL ในการศึกษาการไหลผ่านกังหันขนาดจิ๋วในรูปแบบ 3 มิติ

1.2.2 ศึกษาผลกระทบของรูปทรงใบพัดและจำนวนใบพัดที่มีผลต่อกำลังของกังหันก๊าซขนาดจิ๋ว

1.3 ขอบข่ายของโครงการ

1.3.1 แบบจำลอง 3 มิติของกังหันขนาดจิ๋ว โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

1.3.2 ใช้คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 1223 K ซึ่งเป็นอุณหภูมิจาก Literature Review ที่ได้จากการเผาไหม้ของเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) ที่ระดับน้ำทะเล [3]

1.3.3 ของไหลอัดตัวไม่ได้

1.6 สถานที่ปฏิบัติงาน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

1.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการ

1.7.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ Intel(R) Core(TM) i5, CPU M460 @ 2.53GHz, RAM 2.00GB

1.7.2 โปรแกรม SolidWorks 2010

1.7.3 โปรแกรม COMSOL Multiphysics.

1.8 งบประมาณที่ใช้

ตารางที่ 1.2 งบประมาณที่ใช้

ลำดับ	รายการ	ราคา	หน่วย
1	ค่ากระดาษ	1500	บาท
2	ค่า Print งาน	1500	บาท
	รวม	3000	บาท

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การทบทวนวรรณกรรม (Literature Review)

Mizuki [1] ศึกษาการพัฒนากังหันก๊าซขนาดจิ๋ว โดยมุ่งเน้นในส่วนของ คอมเพรสเซอร์และกังหัน โดยการสร้างแบบจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตรและ 8 มิลลิเมตร แล้วทำการทดลองที่อัตราส่วนความดันและอุณหภูมิที่เท่ากัน พบว่ากังหันขนาด 40 มิลลิเมตร ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าถึง 10 %ของประสิทธิภาพกังหันขนาด 8 มิลลิเมตร แต่มีความเร็วรอบในการทำงานที่ต่ำกว่าถึง 5 เท่าของรอบการทำงานขนาด 8 มิลลิเมตร ดังนั้นปัญหาหลักๆ ของการลดขนาดกังหันก๊าซ คือต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพที่ลดลงเมื่อลดขนาดและความแข็งแรงของวัสดุเพื่อให้สามารถรองรับการทำงานที่ความเร็วรอบสูงและอุณหภูมิสูงได้

Dumand และคณะ [2] ได้แสดงแนวคิดในการพัฒนากังหันขนาดเล็กเชิงตัวเลขที่ให้พลังงาน 10 W ถึง 100 W โดยพิจารณาที่ห้องเผาไหม้ ซึ่งได้พบปัญหาอยู่ 3 ประการ สำหรับการลดขนาดของห้องเผาไหม้ให้เล็กกว่าปกติ ได้แก่ (1) ค่า Reynolds number มีค่าน้อย ทำให้การไหลเป็นแบบราบเรียบ ซึ่งผลที่ออกมามีการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศและระหว่างก๊าซร้อนกับอากาศในห้องเผาไหม้ทำให้ได้ประสิทธิภาพต่ำลง (2) Damköhler number มีค่าน้อยซึ่งในการเปรียบเทียบปฏิกิริยาเคมีนั้น ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนมากและ (3) สร้างแบบจำลอง 3 มิติโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขศึกษาการผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศ ซึ่งการทดลองที่ไม่มีการเผาไหม้ในระดับไมโครในห้องเผาไหม้ ซึ่งการตั้งค่าสำหรับการศึกษาการเผาไหม้อยู่ระหว่างการพัฒนา

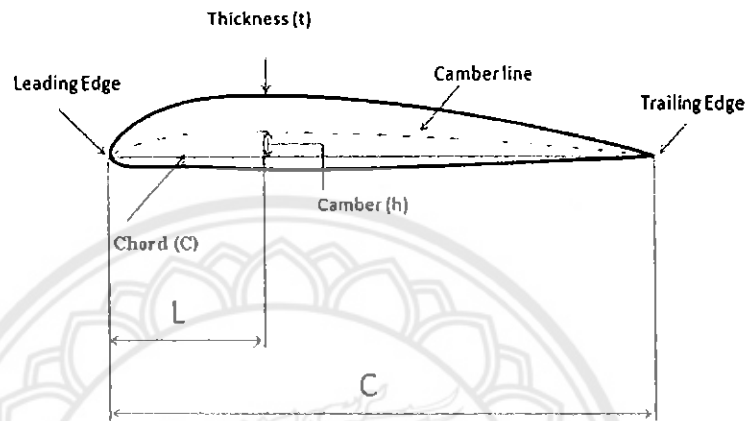
Nagashima และคณะ [3] พัฒนากังหันก๊าซขนาดจิ๋ว โดยก๊าซร้อนที่ทางเข้ามีอุณหภูมิ 1223 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นก๊าซที่ออกจากห้องเผาไหม้ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงที่ได้จากการเผาไหม้ SI หรือ SIC โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด 8 มิลลิเมตร ความเร็วรอบในการหมุน 1.2 ล้านรอบต่อนาที มีอัตราส่วนความดันเท่ากับ 2.91 อัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับ 30 กรัมต่อวินาที ให้พลังงานออกมา 10 วัตต์ นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของกังหันก๊าซขนาดจิ๋วจากแบบจำลอง 2 มิติ และเปรียบเทียบกับของแบบจำลอง 3 มิติ พบว่าประสิทธิภาพของกังหันก๊าซขนาดจิ๋วในแบบจำลอง 3 มิติ ให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าในแบบจำลอง 2 มิติ เพราะมีการสูญเสียพลังงานมากกว่าเนื่องจากมีความหนาเพิ่มขึ้นจึงทำให้พื้นที่ที่มีผลต่อแรงเสียดทานของของไหลเพิ่มขึ้น

Ishihama และคณะ [4] ศึกษากังหันก๊าซขนาดจืดที่เป็นอุปกรณ์ผลิตกำลังไฟฟ้า สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบต่างๆได้เช่น ระบบการบินอวกาศ ทุ่นยนต์ เป็นต้น แต่เนื่องจากขนาดเล็กจึงทำให้เกิดปัญหาบางอย่างของโครงสร้าง พวกเขาได้ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆที่อาจส่งผลกระทบต่อได้แก่ (1) ชีตจำกัดอุณหภูมิที่สูงของกังหันและอุณหภูมิที่ต่ำของชุดใบพัด (2) ตัวแปรต่างๆในระบบ 2 มิติ เช่น ค่าความหนืด ค่าความหนาแน่นของของไหล อุณหภูมิของของไหล จำนวนใบพัด เป็นต้น (3) วัสดุที่ใช้โดยพวกเขาเลือกใช้ซิลิกอนเพื่อทำการทดลองพบว่าใบของกังหันเกิดการเสีรูปร่าง เกิดเป็นลักษณะคล้ายจานที่ตื้น มีความแตกต่างของระดับความสูงระหว่างพื้นผิวกับใบพัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิสูงและเกิดแรงเหวี่ยงจากศูนย์กลางสูงๆ

Matsuura และคณะ [5] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับกังหันก๊าซขนาดจืดในแบบจำลอง 2 มิติ โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจากนั้นจึงได้สร้างแบบจำลอง 3 มิติ ค่าคุณสมบัติที่ใช้ในการวิจัยกังหันก๊าซขนาดจืดมีดังต่อไปนี้ ใช้อัตราส่วนความดันเท่ากับ 2.91 อากาศที่ทางเข้ามีอุณหภูมิ 1223 องศาเซลเซียส ความเร็วของใบพัดเท่ากับ 2.4 แสนรอบต่อนาที ใช้อัตราการใช้ 30 กรัมต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกังหัน 40 มิลลิเมตร จำนวน Vanes 17 ใบพัด ซึ่งจากการทดลองได้รับพลังงานออกมาประมาณ 7 กิโลวัตต์ สามารถสรุปผลจากการทดลองได้ดังนี้คือ (1) จากการวัดประสิทธิภาพของกังหันก๊าซขนาดจืดในแบบจำลอง 3 มิติ พบว่าให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบจำลอง 2 มิติ ประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ (2) การสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ปลายทางออกของหัวฉีด และสูญเสียพลังงานอีก 40 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณของพลังงานที่สูญเสียทั้งหมดเกิดขึ้นที่บริเวณทางเข้าของใบพัดและบริเวณปลายใบพัด (3) สำหรับกังหันก๊าซขนาดจืดในแบบจำลอง 2 มิติ หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของกังหันก๊าซ ต้องเปลี่ยนแปลงรูปร่างของลักษณะใบพัด และต้องลดความเร็วของของไหลลง

2.2 แพนอากาศแบบ NACA 4 Series

เนื่องจากในโครงการนี้ เราเลือกใช้ใบพัดกังหันตามแพนอากาศของ NACA 4 Series จึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจการเรียกชื่อและนิยามต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเสียก่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยมีองค์ประกอบของแพนอากาศดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 แพนอากาศของ NACA

1. ระยะคอर्ड (Chord), C คือ ระยะกระจัดที่วัดระหว่าง Leading Edge และ Trailing Edge
2. ความหนา (Thickness), t คือ ความหนาของแพนอากาศโดยวัดในส่วนที่หนาที่สุด
3. ระยะความโค้ง (Camber), h วัดจากระยะที่กว้างที่สุดระหว่างเส้นคอर्डกับเส้นแสดงความโค้ง (Camber line) หรือ เส้นศูนย์ (Center line)
4. Leading Edge คือ ส่วนต้นของแพนอากาศ
5. Trailing Edge คือ ส่วนปลายของแพนอากาศ
6. ระยะ L คือ ระยะที่วัดจาก Leading Edge ถึงตำแหน่งที่แพนอากาศมีความหนามากที่สุด

สำหรับตัวเลข 4 หลัก แสดงโดย X ใน NACA XXXX มีความหมายดังนี้ คือ

1. หลักแรก หมายถึง เปอร์เซ็นต์ของระยะความโค้งหารด้วยระยะคอर्ड แล้วคูณด้วย 10 แสดงเป็นสัญลักษณ์ได้โดย $\left(\frac{h \times 100}{C}\right) \times 10$

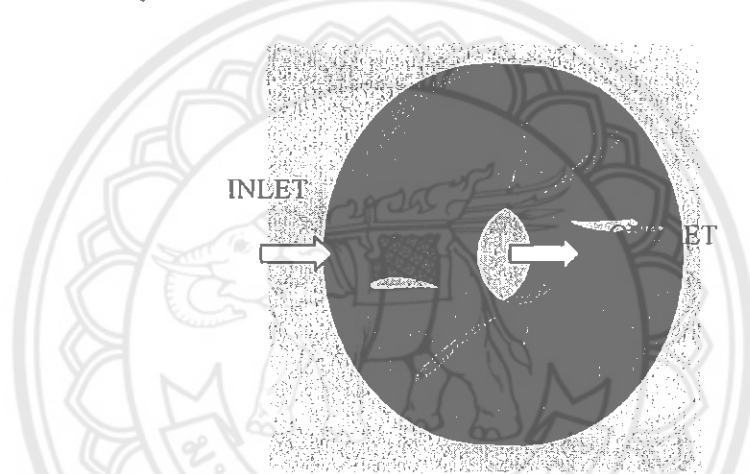
2. หลักที่ 2 หมายถึง ระยะ L หารด้วยระยะคอर्ड คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ แล้วคูณด้วย 10 แสดงเป็นสัญลักษณ์ได้โดย $\left(\frac{L \times 100}{C}\right) \times 10$

3. สองหลักสุดท้าย หมายถึง เปอร์เซ็นต์ของความหนาเทียบกับระยะคอर्ड แสดงเป็นสัญลักษณ์ได้โดย $\frac{t}{C} \times 100$

ในโครงการนี้เราใช้แพนอากาศที่มีความหนาคงที่เท่ากับ 12 เปอร์เซ็นต์ของระยะคอर्डแต่ความโค้งที่ต่างกัน ได้แก่ NACA 0012, NACA 2712, NACA 4712 และ NACA 6712

2.3 แบบจำลองของกังหันขนาดจิ๋ว

แบบจำลองกังหันขนาดจิ๋วสามารถออกแบบโดยใช้โปรแกรมเขียนแบบ SolidWorks โดยการสร้างแบบจำลองนี้ได้พิจารณาให้แบบจำลองเป็นส่วนหนึ่งของของไหลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร มีทางเข้าของของไหลเข้าด้าน Inlet ได้เจาะรูตรงกลางกำหนดเป็นด้าน Outlet เพื่อเป็นทางออกของของไหลรวมทั้งเจาะรูในส่วนของใบพัดกังหันเพื่อที่จะเปรียบเทียบให้ ส่วนของใบพัดเป็นของแข็งให้ของไหลไหลผ่านไม่ได้ และบันทึกในนามสกุล .stp หรือ .step หลังจากนั้นจึง Import เข้าสู่โปรแกรม COMSOL เพื่อคำนวณการไหลต่อไป แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แบบจำลองที่นำ Import เข้าสู่โปรแกรม COMSOL เพื่อนำไปคำนวณ

2.4 ทฤษฎีของการคำนวณกังหัน

การศึกษาการทำงานของเครื่องจักรกล [6] ของไหลอาศัยทฤษฎีการวิเคราะห์เชิงอนุพันธ์ของของไหลเพื่อบอกพฤติกรรมของของไหลและทฤษฎีเครื่องจักรกลของไหลสำหรับกังหันเพื่อวิเคราะห์กำลังที่สร้างจากกังหัน ในหัวข้อนี้จะอธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทั้งสองทฤษฎีดังนี้

2.4.1 ทฤษฎีเครื่องจักรกลของไหลสำหรับกังหัน

กังหันเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ดึงพลังงานจากของไหลโดยพลังงานนั้นมาจากความสูงหรือความดันของของไหลที่ทางเข้ากังหัน กังหันมีด้วยกัน 2 ประเภท คือ กังหันแบบแรงดล (Impulse Turbine) เป็นกังหันที่ดึงพลังงานโดยใช้การชนของเจ็ทของของไหลกับใบกังหัน เหมาะที่จะใช้กับความดันสูง เช่น กังหันเพลตัน (Pelton Turbine) เป็นต้น และประเภทที่ 2 คือ กังหันแบบแรงปฏิกิริยา (Reaction Turbine) ซึ่งจะดึงพลังงานโดยใช้แรงปฏิกิริยาที่เกิดจากผลต่างของความดันด้านบนและ

ด้านล่างของใบพัดกังหันทำงานได้ที่ความดันต่ำเช่น กังหันฟรานซิส (Francis Turbine) กังหันแคปแลน (Kaplan Turbine) เป็นต้น ดังนั้นกังหันที่เหมาะสมกับการไหลในท่อก๊าซร้อนสูงคือกังหันแบบผลต่างของความดันโดยจะใช้เป็นกังหันฟรานซิส เพราะอากาศมีความร้อนสูงและความดันที่แตกต่างกัน

การออกแบบใบพัดกังหันต้องอาศัยทฤษฎีเครื่องจักรกลของไหลมาช่วยในการวิเคราะห์ การออกแบบสามเหลี่ยมความเร็วที่ทางเข้าและทางออกจะออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุดซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อความเร็ว $v_{w2} = 0$ และความเร็ว $v_2 = v_{r2}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนั้นจึงใช้เงื่อนไขเป็นเงื่อนไขในการออกแบบ



รูปที่ 2.3 สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางเข้าและออกจากใบพัด

กำลังที่ผลิตจากกังหันสามารถหาได้จากผลต่างของความเร็วระหว่างทางเข้าและทางออกคูณกับอัตราการไหลของของไหลที่ไหลผ่านกังหัน ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$\text{Power out} = \dot{m}(u_1 v_{w1} - u_2 v_{w2}) \quad (2.1)$$

เมื่อ	P	คือ กำลังที่ได้ออกมา	(W)
	\dot{m}	คือ อัตราการไหลเชิงมวล	($\frac{kg}{s}$)
	u_1	คือ ความเร็วปลายที่ทางเข้าของใบพัด	($\frac{m}{s}$)
	v_{w1}	คือ ความเร็วสัมผัสสามเหลี่ยมมุมฉากที่ทางเข้าของใบพัด	($\frac{m}{s}$)
	u_2	คือ ความเร็วปลายที่ทางออกของใบพัด	($\frac{m}{s}$)
	v_{w2}	คือ ความเร็วสัมผัสสามเหลี่ยมมุมฉากที่ทางออกของใบพัด	($\frac{m}{s}$)

เมื่อออกแบบสภาวะทางออกให้ $v_{w_2} = 0$ จะทำให้ได้กำลังสูงสุด สำหรับกำลังสูงสุดที่กังหันสามารถสร้างได้มีค่าเป็น

$$E_{o,max} = \dot{m}(u_1 v_{w_1}) \quad (2.2)$$

กำลังที่ทางเข้าของกังหันได้มาจากความดันหรือความสูงของของไหลซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$E_{i,max} = \rho g Q H = \dot{m} g H \quad (2.3)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของสารทำงาน

g คือ ค่าแรงโน้มถ่วง $9.81 \frac{m}{s^2}$

Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร

H คือ เศษของสารทำงาน

ดังนั้น จะได้ประสิทธิภาพรวม (Overall Efficiency) เป็น

$$\eta = \frac{\text{Power out}}{\text{Power in}} = \frac{(u_1 v_{w_1} - u_2 v_{w_2})}{gH} \quad (2.4)$$

จากสมการที่ (2.4) จะได้ว่าประสิทธิภาพสูงสุดทางทฤษฎีจะได้เป็น

$$\eta_{max} = \frac{(u_1 v_{w_1})}{gH} \quad (2.5)$$

2.4.2 สมการอนุพันธ์ของของไหล

เพื่อให้สามารถอธิบายคุณสมบัติแบบจุดต่อจุดจึงทำให้ไม่สามารถใช้สมการในรูปอินทิเกรตได้ ดังนั้นการศึกษาการไหลจึงต้องพิจารณาสมการในรูปอนุพันธ์แทนสำหรับการวิเคราะห์การไหลสิ่งที่จำเป็นต้องศึกษาคือกฎอนุรักษ์มวลและกฎอนุรักษ์โมเมนตัม

กฎอนุรักษ์มวล

สมการความต่อเนื่อง ถ้าการไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (2.6)$$

กฎอนุรักษ์โมเมนตัม

สำหรับการวิเคราะห์การไหลจะใช้ทฤษฎีของนิวตันโดยประยุกต์ใช้ในรูปสมการโมเมนตัม

กฎข้อสองของนิวตันในรูปสมการเชิงอนุพันธ์

$$\begin{aligned}\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} &= \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \mu \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} &= \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + \mu \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} &= \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + \mu \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right)\end{aligned}\quad (2.7)$$

สำหรับของไหลที่เป็นนิวทอนเนียนในรูปแบบ 3 มิติ และมีความหนืดคงที่

$$\begin{aligned}\tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} & \tau_{yy} &= 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} & \tau_{zz} &= 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \tau_{xz} = \tau_{zx} &= \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} &= \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)\end{aligned}\quad (2.8)$$

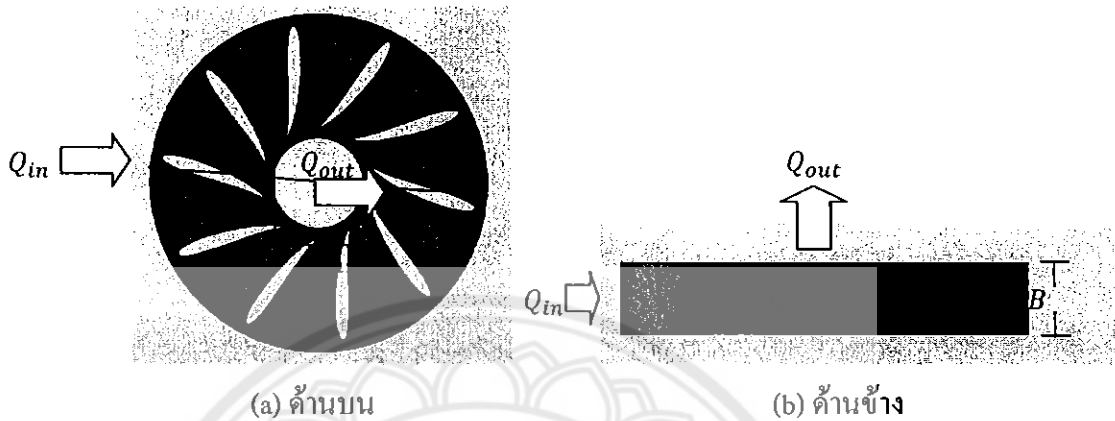
แทนสมการ (2.8) ลงในสมการ (2.7) จะได้สมการโมเมนตัมสำหรับของไหลที่เป็นนิวทอนเนียนที่มีค่าความหนาแน่นและค่าความหนืดของของไหลคงที่ ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) &= \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) \\ \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) &= \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right) \\ \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) &= \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)\end{aligned}\quad (2.9)$$

สำหรับของไหลที่เป็นนิวทอนเนียน (ความหนืดคงที่) สมการนิวตันจะเรียกว่าสมการ Navier-Stoke

2.5 การหาค่าล้างของกังหัน

การหาค่าล้างของกังหันจากแบบจำลองแสดงองค์ประกอบของข้อมูลต่างๆดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยที่รูปทรง (a) แสดงภาพด้านบนของกังหันและ (b) แสดงภาพด้านข้างของกังหัน



รูปที่ 2.4 ทิศทางการไหลผ่านกังหัน

อัตราการไหลของของไหลที่ผ่านเข้าชุดใบพัดดังรูปที่ 2.4 สามารถคำนวณได้จากพื้นที่ขอบใบพัดคูณกับความเร็วที่ตั้งฉากกับพื้นที่ตั้งสมการ

$$Q_{out} = (\pi d_{im} B) v_{f2} \quad (2.10)$$

$$Q_{in} = (\pi D_{im} B) v_{f1} \quad (2.11)$$

เมื่อ	Q_{out}	คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรทางออก	$\left(\frac{m^3}{s}\right)$
	Q_{in}	คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรทางเข้า	$\left(\frac{m^3}{s}\right)$
	D_{im}	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของใบพัด	(m)
	d_{im}	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของใบพัด	(m)
	B	คือ ความหนาของใบพัด	(m)
	v_{f2}	คือ ความเร็วในแนวรัศมีที่ทางออกของใบพัด	$\left(\frac{m}{s}\right)$
	v_{f1}	คือ ความเร็วในแนวรัศมีที่ทางเข้าของใบพัด	$\left(\frac{m}{s}\right)$

ซึ่งอัตราการไหลสามารถหาได้จากอัตราการไหลของอากาศ ดังนี้

จาก $Re = \frac{\rho v D}{\mu}$ และ $Q = vA = v\pi \frac{D^2}{4}$

เมื่อ Re คือ Reynolds number

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศที่ระดับน้ำทะเล 1 atm ที่อุณหภูมิ 1123 K ซึ่งมีค่าเท่ากับ $0.2849 \frac{kg}{m^3}$

v คือ ความเร็วสัมบูรณ์ $(\frac{m}{s})$

μ คือ ความหนืดของอากาศที่ อุณหภูมิ 1123 K ซึ่งมีค่าเท่ากับ $4.88 \times 10^{-5} Pa \cdot s$

ดังนั้นเราสามารถเขียน Re ในรูปของอัตราการไหลได้ ดังนี้

$$Re = \frac{4\rho Q}{\mu\pi D} \quad (2.12)$$

หรือ
$$Q = \frac{\mu\pi D Re}{4\rho}$$

สมการนี้คือ สมการอัตราการไหลของอากาศที่ขึ้นอยู่กับ Re และ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อก๊าซร้อนนั่นเอง

จากสมมุติฐานที่ว่าของไหลอัดตัวไม่ได้ (ความหนาแน่นคงที่)

จะได้ $Q_{in} = Q_{out} = Q$

เราสามารถหาความเร็วที่ทางเข้าและทางออกได้ดังนี้ คือ

$$v_{f1} = \frac{Q}{\pi D_{im} B} \quad (2.13)$$

$$v_{f2} = \frac{Q}{\pi d_{im} B} \quad (2.14)$$

พิจารณา สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางออกซึ่งออกแบบให้ความเร็วสัมบูรณ์อยู่ในแนวรัศมี

($v_{w2} = 0$) ทำให้ได้กำลังสูงสุด

จะได้
$$\tan\beta_2 = \frac{v_{f2}}{u_2} \quad ; \quad u_2 = v_{f2} \cot\beta_2 \quad (2.15)$$

ดังนั้นเราสามารถหาความเร็วเชิงมุมในการหมุนของใบพัดที่ทำให้เกิด E_{max} ได้

จาก $u_2 = \frac{\omega d_{im}}{2}$

$$\omega = \frac{2u_2}{d_{im}} \quad (2.16)$$

หรือ
$$N = \frac{(60)}{\pi} \frac{u_2}{d_{im}}$$

จากสมการที่ (2.10) เมื่อทราบอัตราการไหลของอากาศภายในท่อซึ่งเท่ากับอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านเข้ากังหัน และจากสมการที่ (2.11) และ (2.12) เราจะได้ความเร็วในแนวรัศมีของของไหลที่ทางเข้าและออกเป็น

$$\text{ความเร็วของของไหลที่ผ่านกังหัน } v_{f1} = \frac{Q}{\pi D_{im} B} \text{ และ } v_{f2} = \frac{Q}{\pi d_{im} B}$$

จากสามเหลี่ยมความเร็วรูปที่ 2.5 จะได้ความเร็วปลายใบพัดเป็น

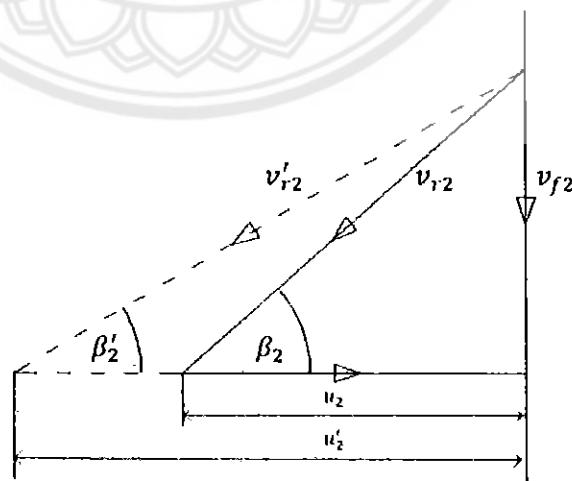
$$u_2 = v_{f2} \cot \beta_2 \quad (2.17)$$

เมื่อ u_2 คือ ความเร็วปลายที่ทางออกของใบพัด
 v_{f2} คือ ความเร็วในแนวรัศมีที่ทางออกของใบพัด
 β_2 คือ มุมทางออกของใบพัด

จากนั้นจะได้ความเร็วปลายใบพัดเป็น

$$u_1 = u_2 \frac{d_{im}}{D_{im}} = (v_{f2} \cot \beta_2) \frac{d_{im}}{D_{im}} \quad (2.18)$$

รูปที่ 2.5 เป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณหาค่ากำลังของกังหัน ซึ่งจะเป็นส่วนทางออกของใบพัด ประกอบด้วยตัวแปร v_{r2} คือ ความเร็วสัมผัสระหว่างของไหลกับใบพัดที่ทางออก v_{f2} คือ ความเร็วในแนวรัศมีที่ทางออกของใบพัด β_2 คือ มุมทางออกของใบพัด และ u_2 คือ ความเร็วปลายที่ทางออกของใบพัด β'_2 คือ มุมทางออกของใบพัดที่เปลี่ยนไป v'_{r2} คือ ความเร็วสัมผัสระหว่างของไหลกับใบพัดที่ทางออกเมื่อเปลี่ยนมุม u'_2 คือ ความเร็วปลายที่ทางออกของใบพัดเปลี่ยนมุม



รูปที่ 2.5 สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางออกของใบพัด

รูปที่ 2.6 แสดงสามเหลี่ยมความเร็วที่ทางเข้าของใบพัด ใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังของกังหัน ประกอบด้วย ตัวแปร v_{r1} คือความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างของไหลกับใบพัดที่ทางเข้า v_{f1} คือความเร็วในแนวรัศมีที่ทางเข้าของใบพัด β_1 คือมุมทางเข้าของใบพัด u_1 คือความเร็วปลายที่ทางเข้าของใบพัด และ v_{w1} คือความเร็วสัมพันธ์สามเหลี่ยมมุมฉากที่ทางเข้าของใบพัด v_1 คือความเร็วสัมบูรณ์ β'_1 คือมุมทางเข้าของใบพัดที่เปลี่ยนไป v'_{r1} คือความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างของไหลกับใบพัดที่ทางเข้าเมื่อเปลี่ยนมุม v'_{w1} คือความเร็วสัมพันธ์สามเหลี่ยมมุมฉากที่ทางเข้าของใบพัดเมื่อเปลี่ยนมุม v'_1 คือความเร็วสัมบูรณ์เมื่อเปลี่ยนมุม

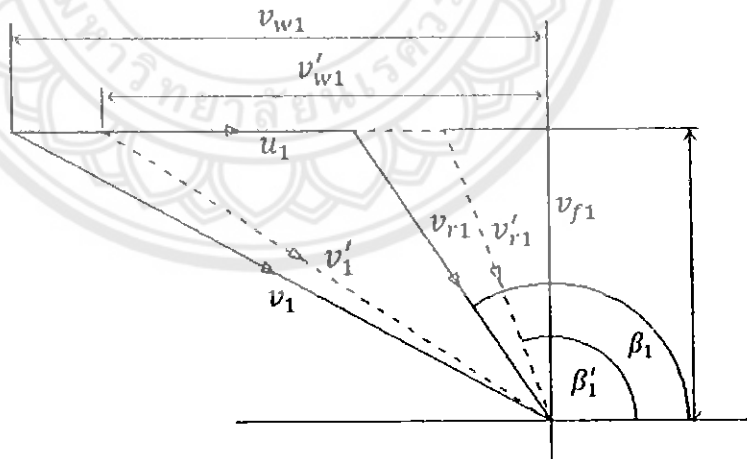
$$v_{w1} = \sqrt{v_1^2 - v_{f1}^2} \quad (2.19)$$

โดยที่ v_1 ได้จากการทดลอง ดังนั้นจึงสามารถหาค่า v_{w1} ได้

ดังนั้นเราจึงสามารถหาค่ากำลังได้จาก

$$\begin{aligned} \text{Power} &= \dot{m} v_{w1} u_1 \\ \text{Power} &= \dot{m} (v_{f2} \cot \beta_2) \frac{d_{im}}{D_{im}} \sqrt{v_1^2 - v_{f1}^2} \end{aligned} \quad (2.20)$$

นำ Power ของแต่ละใบพัดเปรียบเทียบกันเพื่อที่จะหาลักษณะใบพัดที่ให้กำลังออกมามากที่สุด



รูปที่ 2.6 สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางเข้าของใบพัด

บทที่ 3

ขั้นตอนการคำนวณ

ในบทนี้แสดงขั้นตอนการคำนวณจนได้คำตอบของกำลังของกังหันขนาดจืดโดยแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ ได้แก่ (1) การสร้างแบบจำลองกังหันก๊าซขนาดจืดใน 3 มิติ และขั้นตอนการนำไฟล์ของแบบจำลองเข้าสู่โปรแกรม COMSOL (2) การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง และ (3) การคำนวณโดยอาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโปรแกรม COMSOL

3.1 การสร้างแบบจำลองของกังหันขนาดจืดสามมิติ

3.1.1 การวาดแบบจำลองกังหันก๊าซขนาดจืดสามมิติ

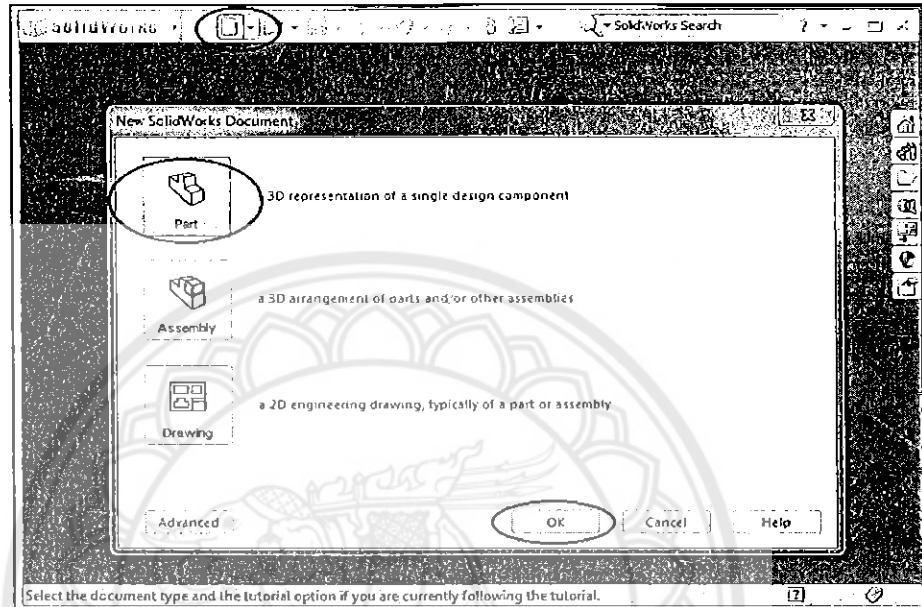
ในหัวข้อนี้ เราจะแสดงการเขียนแบบกังหันก๊าซขนาดจืดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร โดยเริ่มจากการสร้างวงกลมที่ไม่มีความหนาและเจาะรูตรงกลางให้เป็นทางออกของการไหล แล้วจึง Extruded หรือให้ความหนา 2 มิลลิเมตร แก้วกลมจนกลายเป็นทรงกระบอก จากนั้นวาดใบพัดลงบนด้านบนของทรงกระบอกและเจาะรูใบพัดทะลุผ่านทรงกระบอกออกไป โดยรูปสุดท้ายที่ได้แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองกังหันก๊าซขนาดจืดที่พร้อมจะ Import เข้าไปคำนวณ
ในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

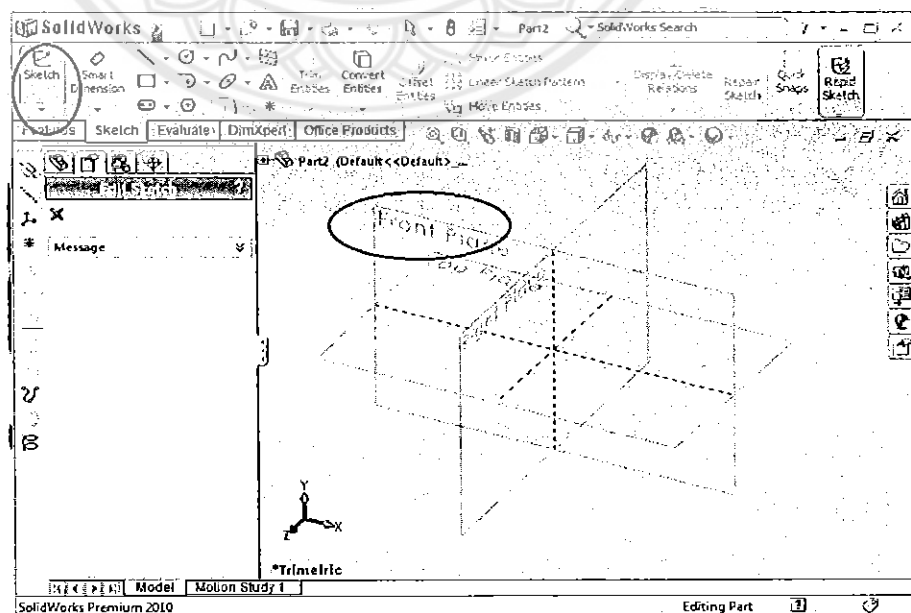
ในการสร้างกังหันก๊าซขนาดจิ๋วแบบจำลอง 3 มิติ เราจะใช้โปรแกรม SolidWorks 2010 ทำการสร้างแบบจำลองโดยมีขั้นตอนในการทำดังนี้

1. เริ่มต้นเปิดโปรแกรม SolidWorks 2010 ในโหมด Part โดยใช้คำสั่งคลิก ที่ SolidWorks 2010 >> NEW >> Part >> OK ดังในรูป 3.2



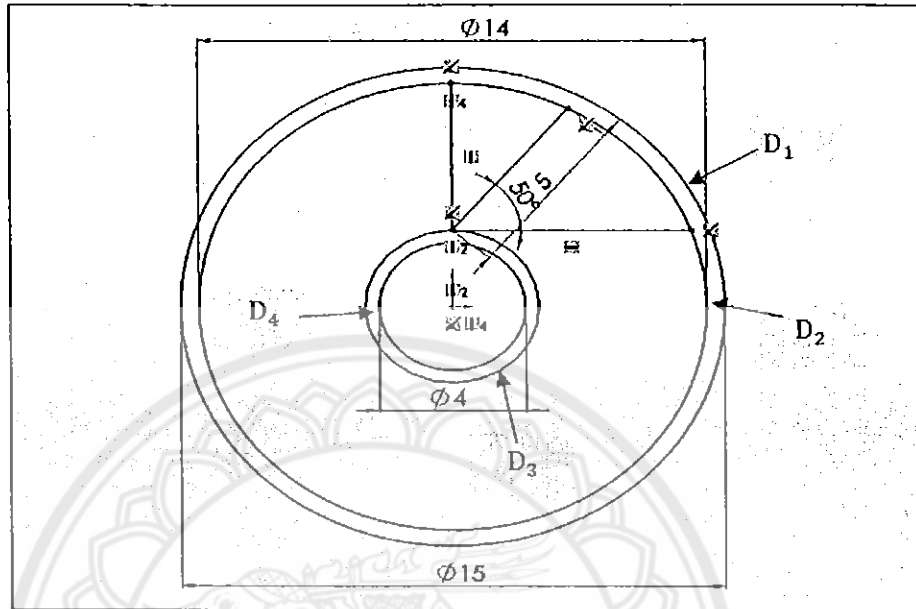
รูปที่ 3.2 การเปิดโปรแกรม SolidWork 2010 ในโหมด Part

2. ทำการเลือกระนาบหน้า (Front Plane) ในการวาดรูป โดยใช้คำสั่ง คลิก Sketch >> Front Plane ดังในรูป 3.3



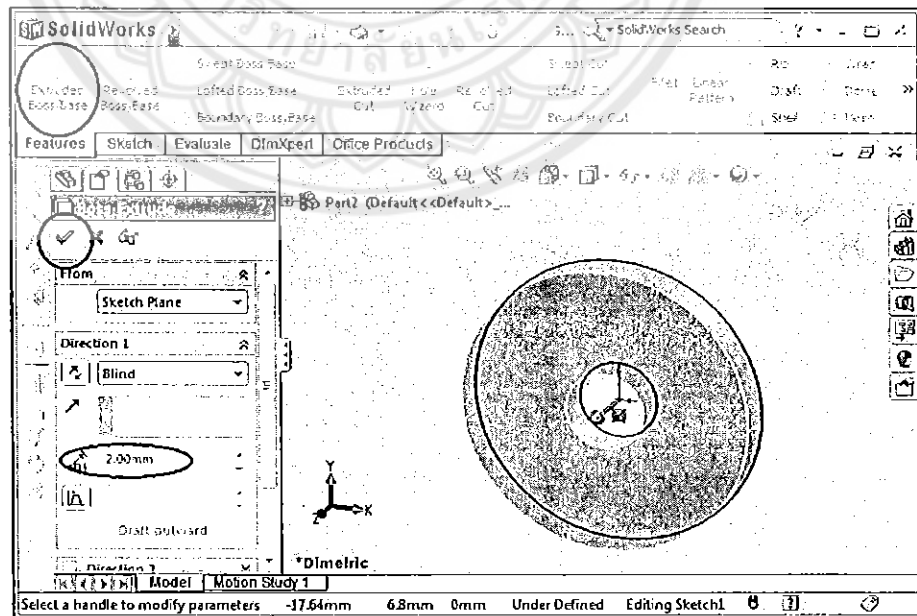
รูปที่ 3.3 การเลือกระนาบหน้าในการวาดรูป

3. วาดรูปวงกลมวงนอกสุดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D_1 = 15$ มิลลิเมตร วงกลมวงในสุด $D_4 = 4$ มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่าง D_3 และ $D_2 = 5$ มิลลิเมตร จากนั้นวาดเส้นทำระดับกับวงกลม D_3 และทำมุมกับแนวระดับ 50 องศา ดังในรูปที่ 3.4



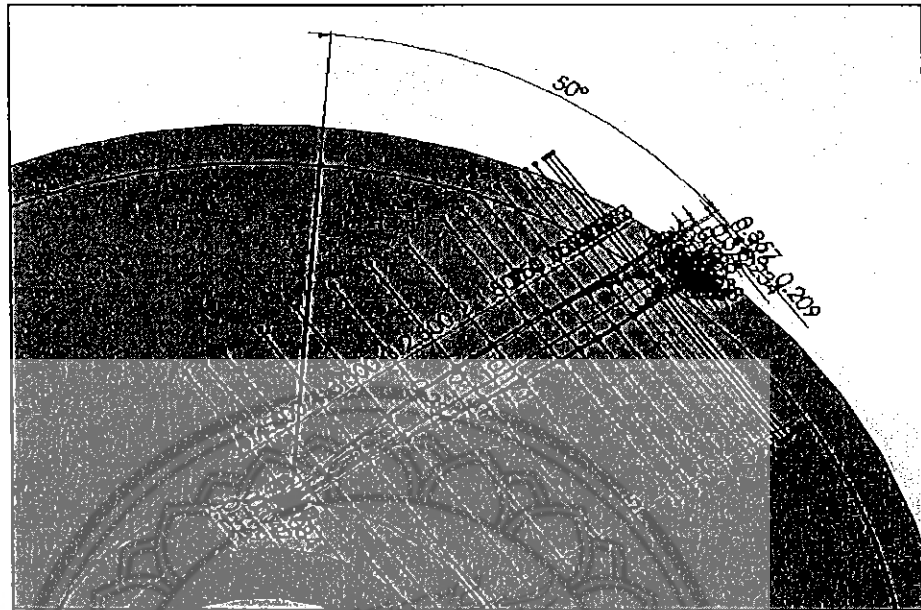
รูปที่ 3.4 วาดรูปฐานกึ่งหัน

4. เพิ่มความหนาให้กับวงกลม 2 มิลลิเมตรโดยใช้คำสั่ง Extruded Boss/Base >> คลิกที่ ชีงงานทั้งหมด >> Direction 1 >> D1 = 2.00 มิลลิเมตร >> เครื่องหมายถูกตั้งในรูปที่ 3.4



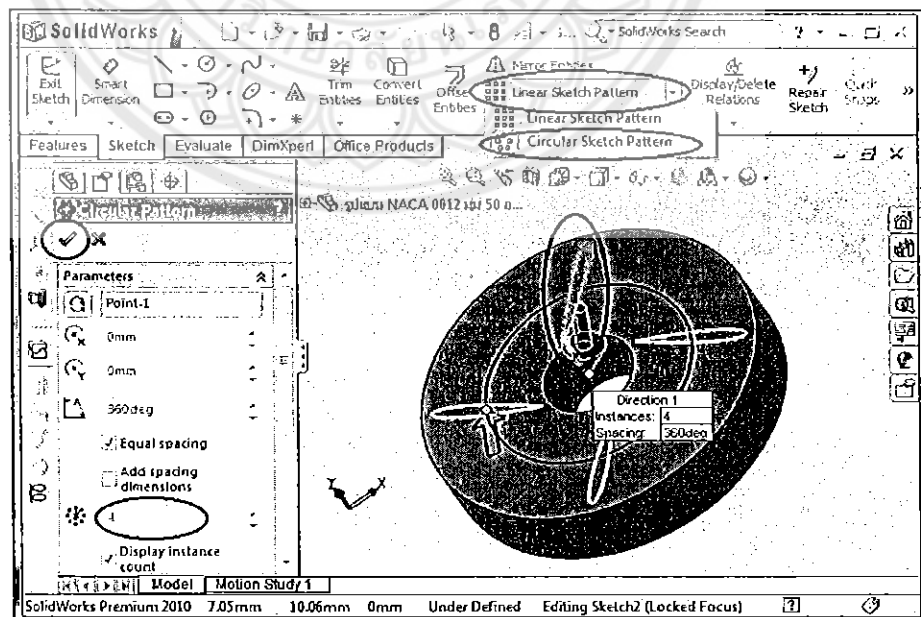
รูปที่ 3.5 การเพิ่มความหนาของแบบจำลองจาก 2 มิติ ให้เป็น 3 มิติ

5. วาดรูปใบพัดในวงกลมตาม NACA ชนิดต่างๆ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.6 สำหรับรายละเอียดในการเขียนแบบใบพัดกังหันนั้นแสดงในหัวข้อ 3.1.3



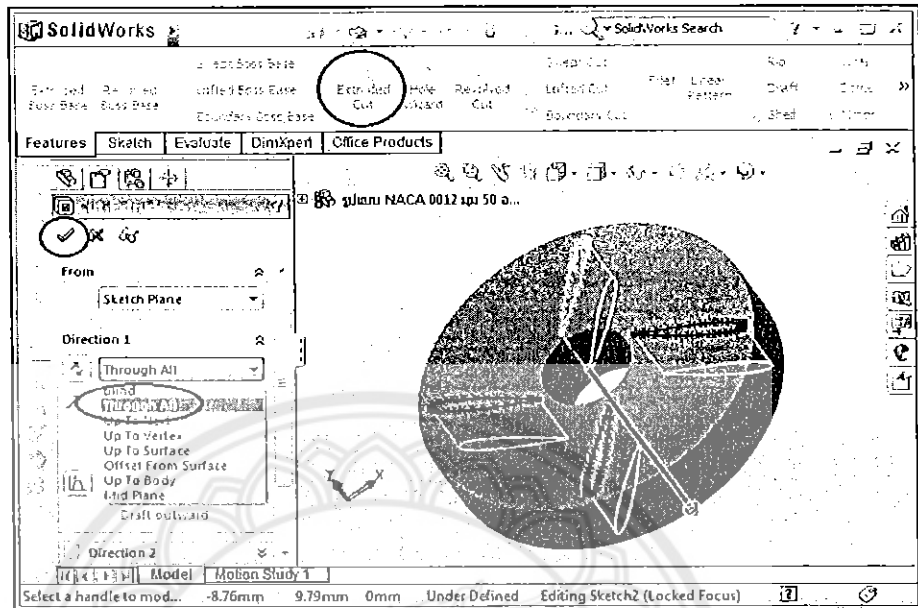
รูปที่ 3.6 การวาดรูปใบพัดตามขนาด NACA

6. Copy ใบพัดให้มีจำนวน 4 ใบ โดยใช้คำสั่ง Linear Sketch Pattern >> Circular Sketch Pattern >> คลิกขึ้นใบพัด >> Parameters >> # = 4 >> คลิกเครื่องหมายถูก ดังในรูปที่ 3.7



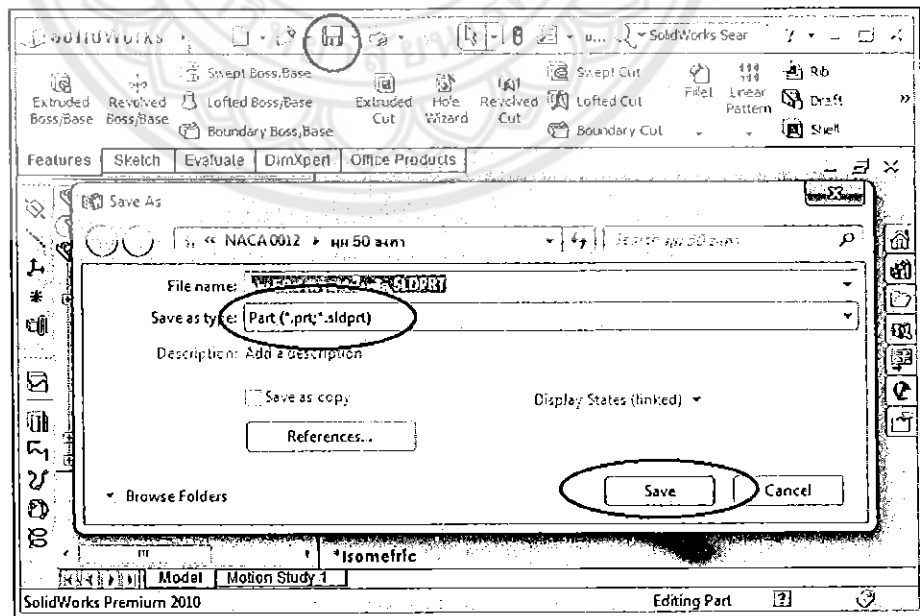
รูปที่ 3.7 การ Copy ใบพัดให้มีจำนวน 4 ใบพัด

7. เจาะรูใบพัดทั้งหมด 4 ใบ โดยใช้คำสั่ง Extruded Cut >> คลิกที่ใบพัดทั้งหมด >> Direction 1 >> through All >> คลิกเครื่องหมายถูก ดังในรูป 3.8



รูปที่ 3.8 การเจาะรูใบพัดทั้งหมด 4 ใบ

8. บันทึก (Save) แบบจำลองในนามสกุล .STEP หรือ .stp เพื่อนำไปเข้าโปรแกรม COMSOL โดยใช้คำสั่ง Save >> Save As... >> Save As Type >> STEP >> Save ดังในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การบันทึกแบบจำลองในนามสกุล .STEP

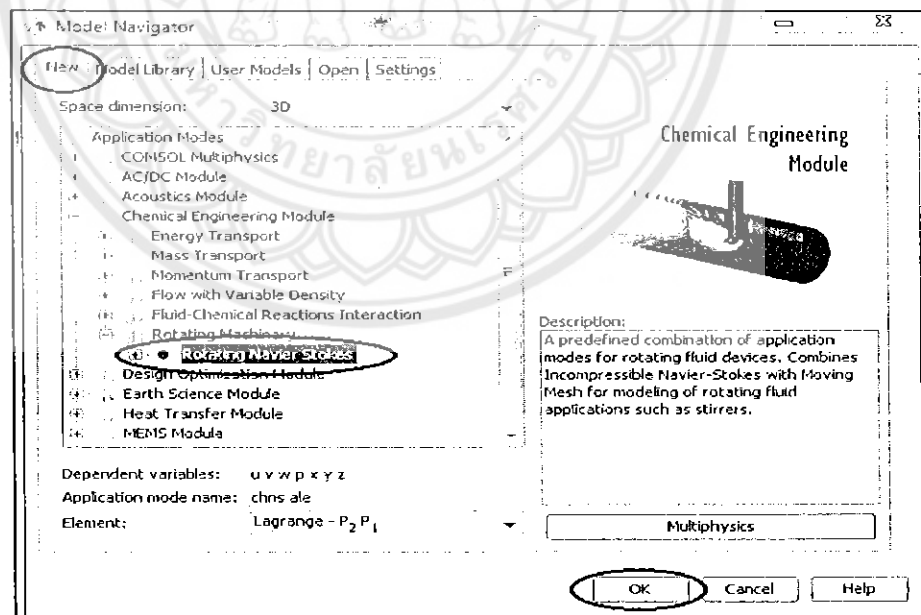
3.1.2 การนำไฟล์เขียนแบบเข้าสู่การคำนวณ

เนื่องจากแบบของกังหันเขียนขึ้นด้วยโปรแกรม SolidWorks 2010 จึงต้องมีการนำไฟล์เขียนแบบเข้าสู่โปรแกรม COMSOL เพื่อให้โปรแกรม COMSOL ประมวลผลสมการการไหล ซึ่งมีขั้นตอนหลักๆซึ่งสรุปเป็นผังแนวคิดได้ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยเริ่มจากไฟล์ต้องการจะ Import อยู่ในนามสกุล .step แล้วจึงเลือกคำสั่ง “Import” ในโปรแกรม COMSOL



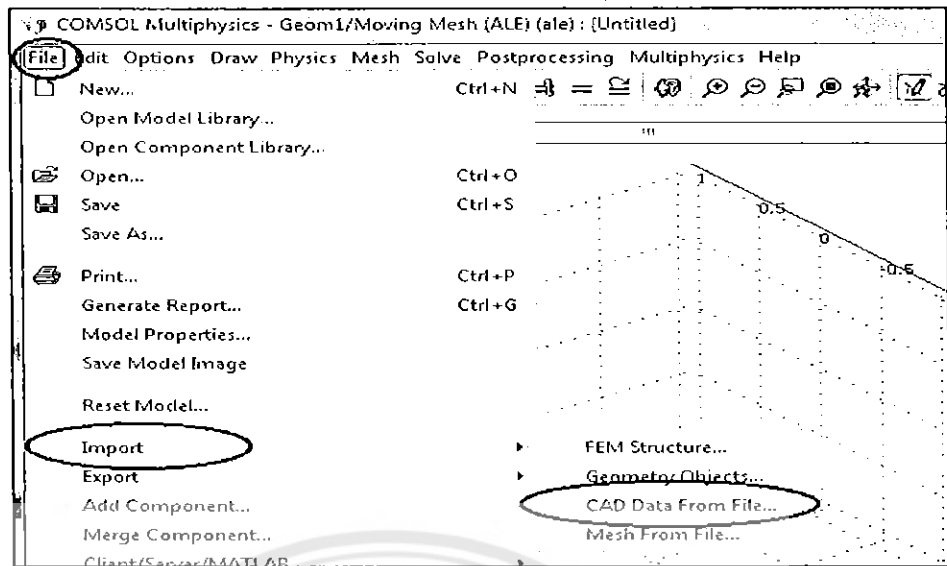
รูปที่ 3.10 ขั้นตอนในการนำไฟล์เขียนแบบเข้าสู่โปรแกรม COMSOL

1. เริ่มต้นการเปิดโปรแกรม COMSOL ในโหมด Rotating Navier-Stokes โดยใช้คำสั่ง คลิกที่ไอคอน COMSOL >> New >> Fluid-Chemical Module >> Rotating Machinery >> Rotating Navier-Stokes ดังในรูปที่ 3.11



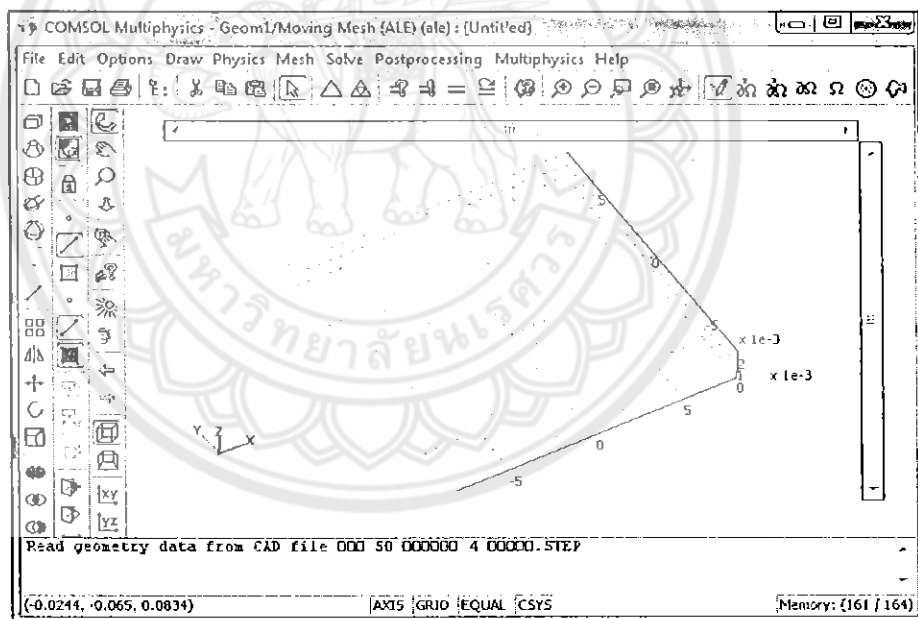
รูปที่ 3.11 การเลือกชนิดของโหมดในการคำนวณการไหล

2. ทำการนำไฟล์ที่เขียนแบบจากโปรแกรม SolidWorks 2010 เข้าสู่โปรแกรม COMSOL โดยใช้คำสั่ง File >> Import >> CAD Data From file >> Import ดังในรูปที่ 3.12



รูป 3.12 ขั้นตอนการนำ SolidWorks 2010 file เข้าสู่โปรแกรม COMSOL

3. จะได้แบบจำลองชุดใบพัด โดยลักษณะของแบบจำลองเป็น 3 มิติดังในรูปที่ 3.13

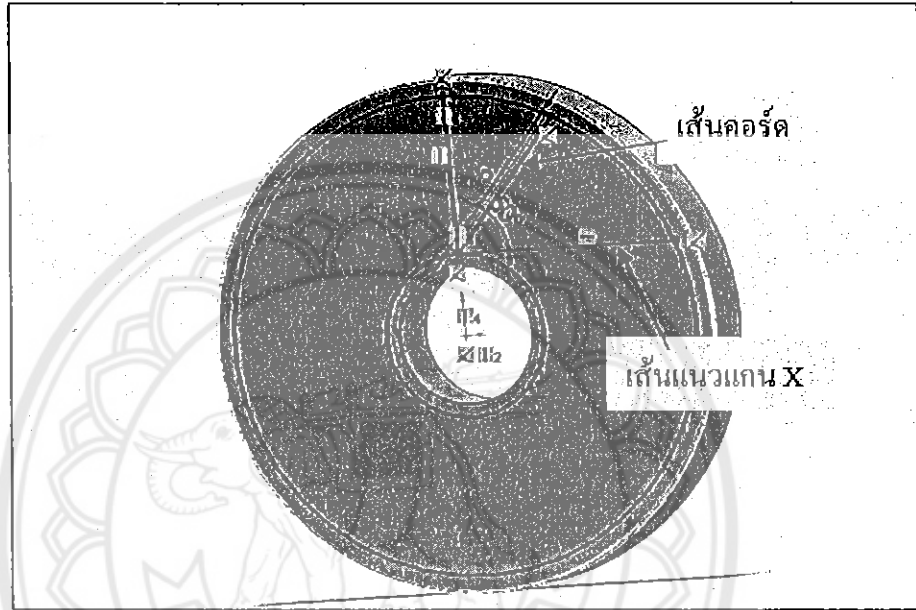


รูปที่ 3.13 การนำไฟล์เข้าสู่โปรแกรมเสร็จสิ้น

3.1.3 การวาดรูปใบพัดตามขนาด NACA

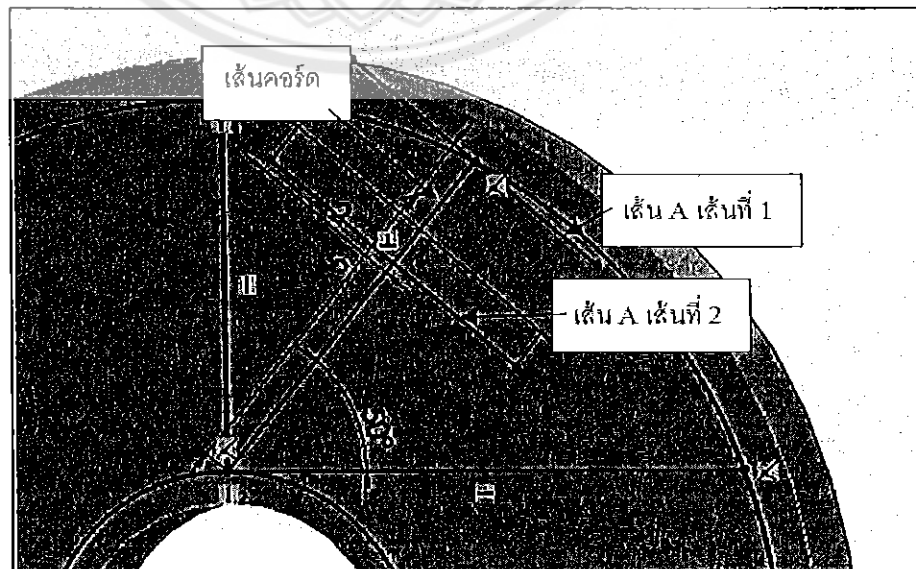
สำหรับการวาดรูปตามขนาดของ NACA นี้ เราได้ศึกษางานวิจัยของ Eastman และคณะ [7] ซึ่งในงานวิจัยได้กำหนดจุดของการวาด NACA ชนิดต่างๆไว้ ดังนั้นเราจึงได้วาดใบพัดตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. วาดเส้นคอร์ดทำมุมกับเส้นแนวแกน X เท่ากับ 50 องศา โดยมีความยาว 5 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 3.14



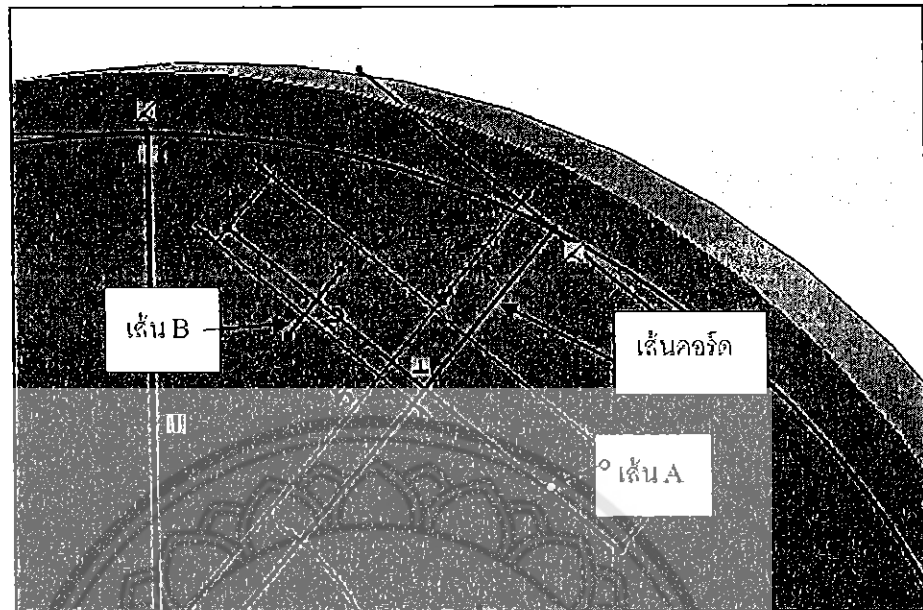
รูปที่ 3.14 การวาดเส้นคอร์ด

2. วาดเส้น A ตั้งฉากกับเส้นคอร์ดโดยมีความยาว 4 มิลลิเมตร จำนวน 18 เส้น ระยะห่างแต่ละเส้นใช้ค่าที่อยู่ในงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 3.15



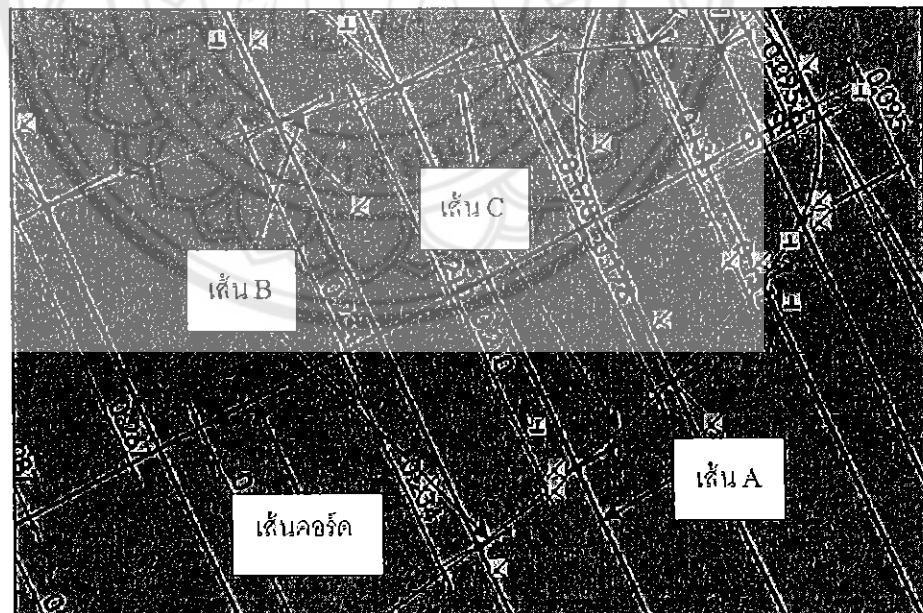
รูปที่ 3.15 การวาดเส้น A

3. วาดเส้น B ให้ขนานกับเส้นคอร์ตโดยตัดกับเส้น A ทุกเส้นทั้งด้านบวกและด้านลบของเส้นคอร์ตระยะห่างระหว่างเส้น B กับเส้นคอร์ตใช้ค่าที่อยู่ในงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 3.16



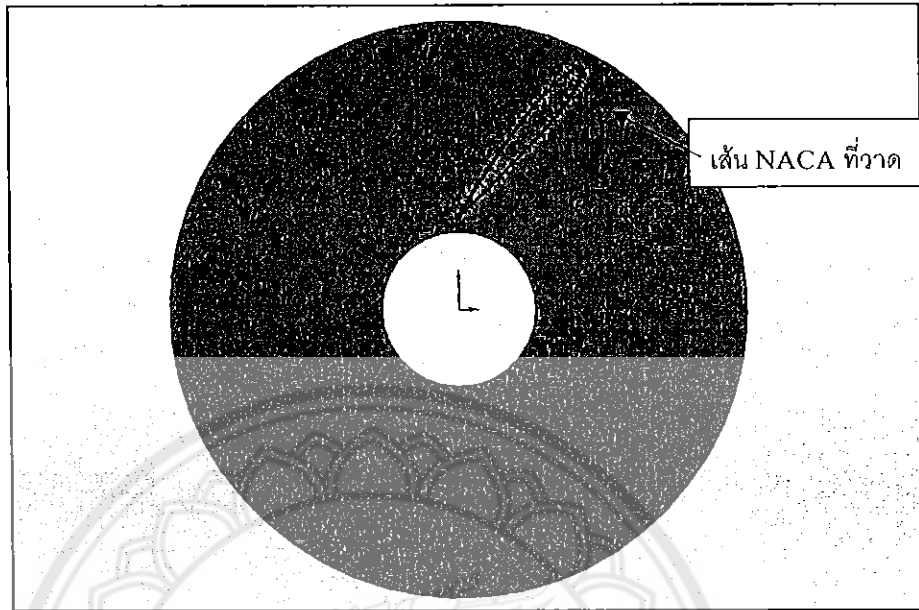
รูปที่ 3.16 การวาดเส้น B

4. วาดเส้น C ตามจุดที่ตัดกันระหว่างเส้น A กับเส้น B จะได้เป็นรูปใบพัดตาม NACA ชนิดที่เราวาด ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การวาดเส้น C

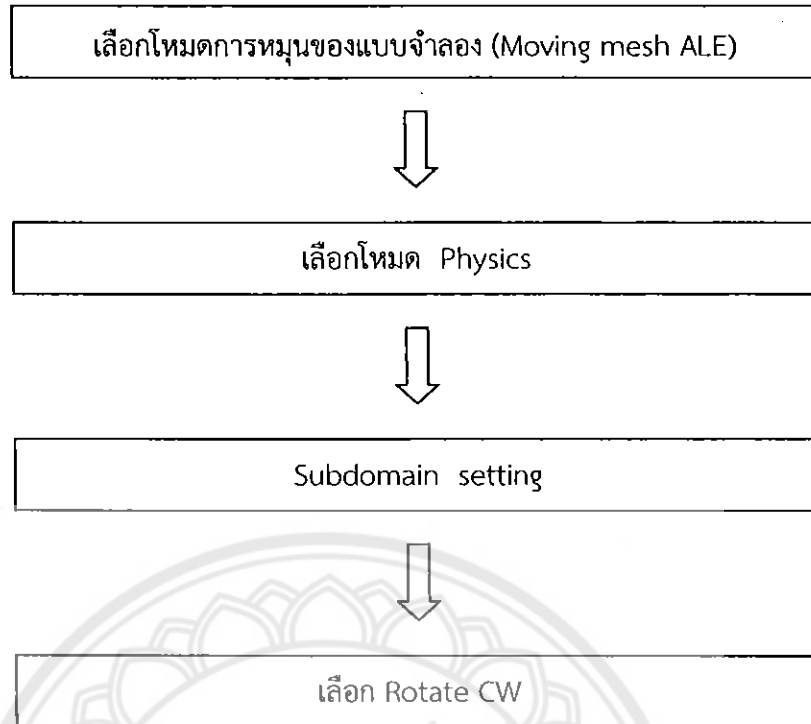
5. ลบเส้นทุกเส้นออกยกเว้นเส้นรูป NACA จะได้รูปภาพ NACA ที่สมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.18



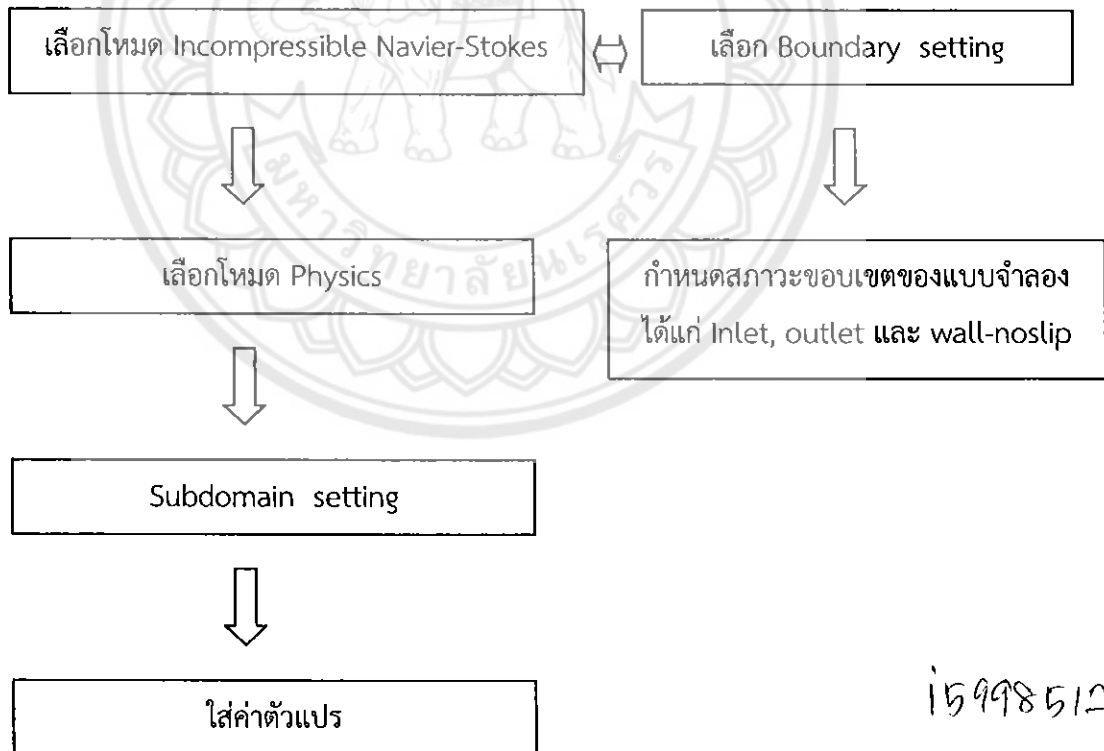
รูปที่ 3.18 การวาดภาพ NACA ที่สมบูรณ์

3.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง 3 มิติ

การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตแสดงเป็นแผนผังได้ในรูปที่ 3.19 และ 3.20 โดยเริ่มจากกำหนดให้ชุดใบกังหันหมุนจากโหมด Moving mesh ALE จากนั้นเลือกโหมด Physics เพื่อเลือก Subdomain Setting เนื่องจากเราต้องกำหนดทิศทางของการหมุน จากนั้นจึงเลือก "Rotate CW" เพื่อกำหนดให้ชุดกังหันหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา (Clockwise) และรูปที่ 3.20 เป็นการกำหนดสมบัติของของไหลรวมทั้งขอบเขตของการไหลในโหมด Incompressible Navier-Stokes โดยเลือกโหมด Physics เพื่อเลือก Subdomain Setting เนื่องจากเราต้องกำหนดสมบัติต่างๆ ของไหลคือ ค่าความหนาแน่น ความหนืด และอัตราเร็วในการหมุน จากนั้นเลือก Boundary Setting และกำหนดสภาวะขอบเขตของแบบจำลองในส่วนช่องทางเข้า ทางออก และส่วนของไหลไหลผ่านไม่ได้



รูปที่ 3.19 สรุปขั้นตอนการกำหนดให้ชุดใบพัดกังหันหมุน



รูปที่ 3.20 สรุปขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

15998512

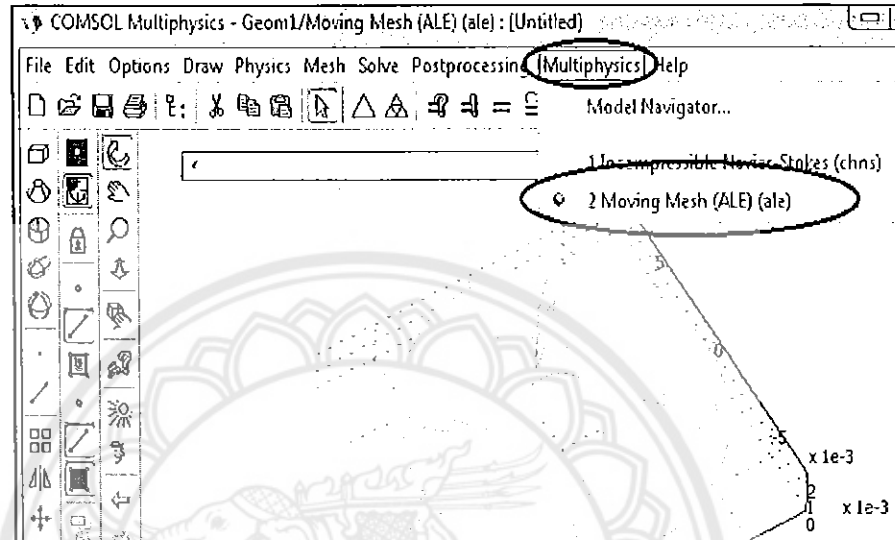
ร/ร.

ร/ร 3569

2554

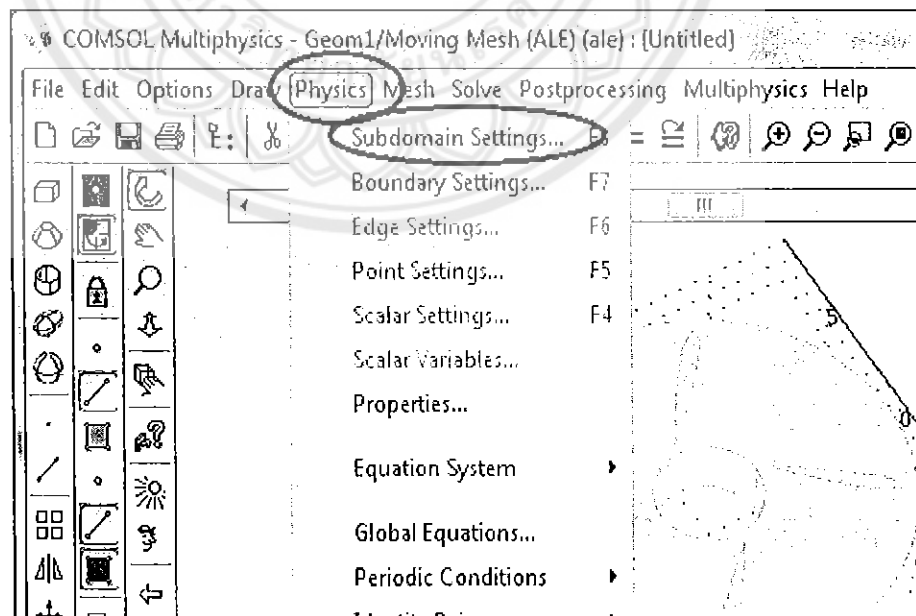
รายละเอียดของขั้นตอนในรูปที่ 3.19 และ 3.20 สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. กำหนดการหมุนของชุดใบพัดโดยต้องอยู่ในโหมด Moving Mesh เพื่อการกำหนดทิศทางการหมุน, ส่วนที่หมุน และความเร็วในการหมุนได้โดยใช้คำสั่ง Multiphysics >> Moving Mesh (ALE) ดังในรูปที่ 3.21



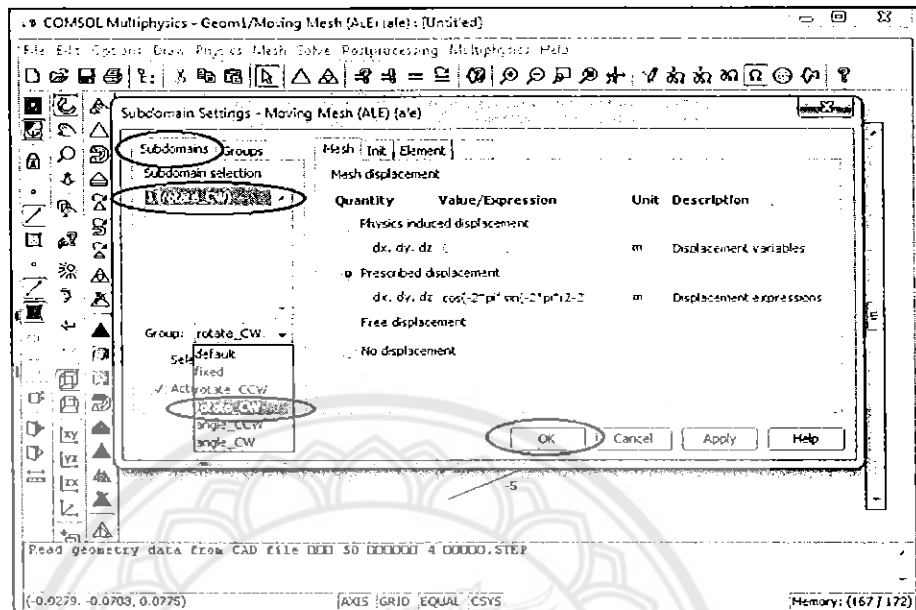
รูปที่ 3.21 เลือกโหมด Moving Mesh (ALE)

2. การกำหนดขอบเขตให้กับแบบจำลองโดยเลือกโหมด Physics >> Subdomain setting ดังในรูปที่ 3.22



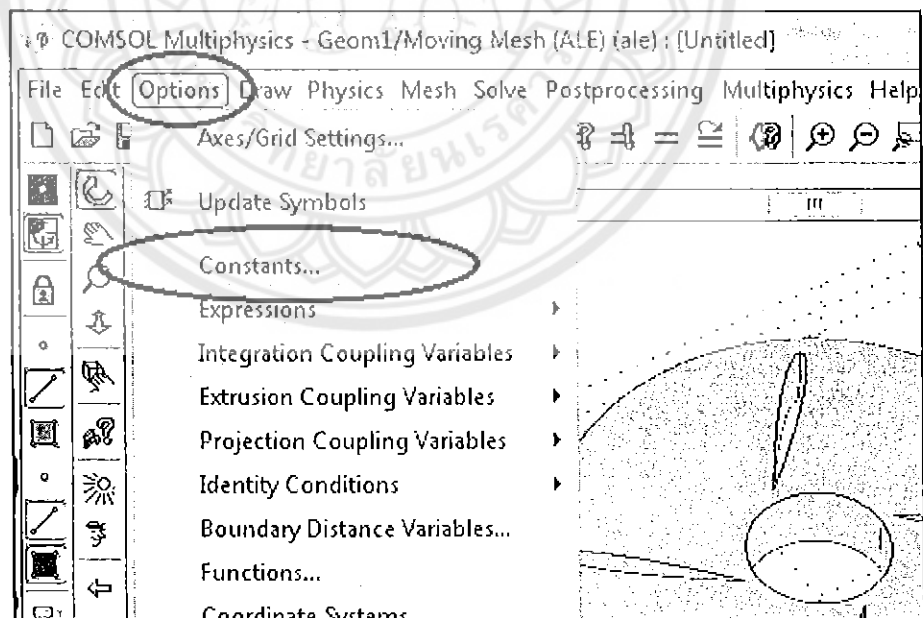
รูปที่ 3.22 เลือก Subdomain setting

3. กำหนดจุดใบพัดให้หมุนตามเข็มนาฬิกา โดยเลือก Subdomain >> 1(default) >> ช่อง Group เลือก Rotate (CW) >> OK ดังในรูปที่ 3.23



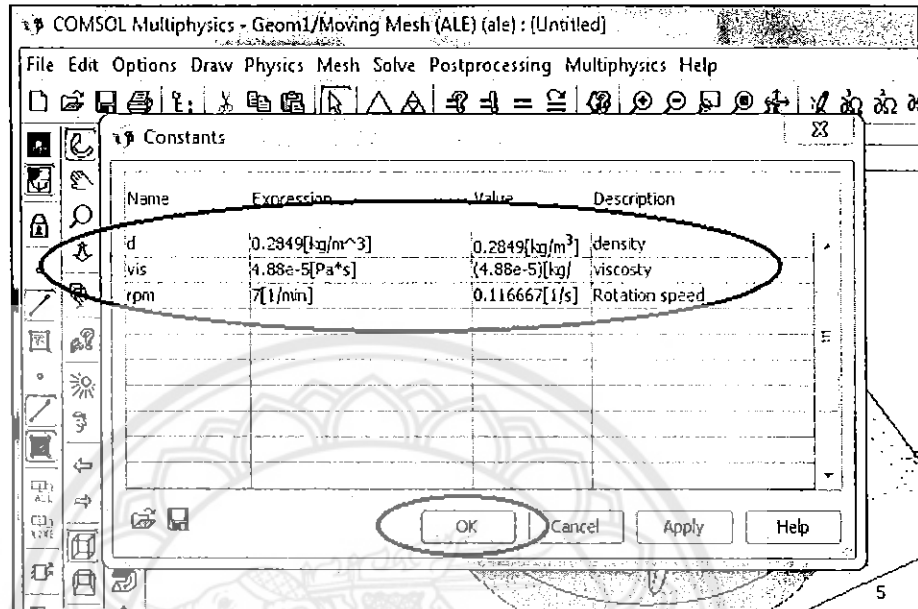
รูปที่ 3.23 การกำหนดทิศทางการหมุนของจุดใบพัด

4. กำหนดคุณสมบัติของของไหลโดยเลือก Option >> Constants.. ดังในรูปที่ 3.24



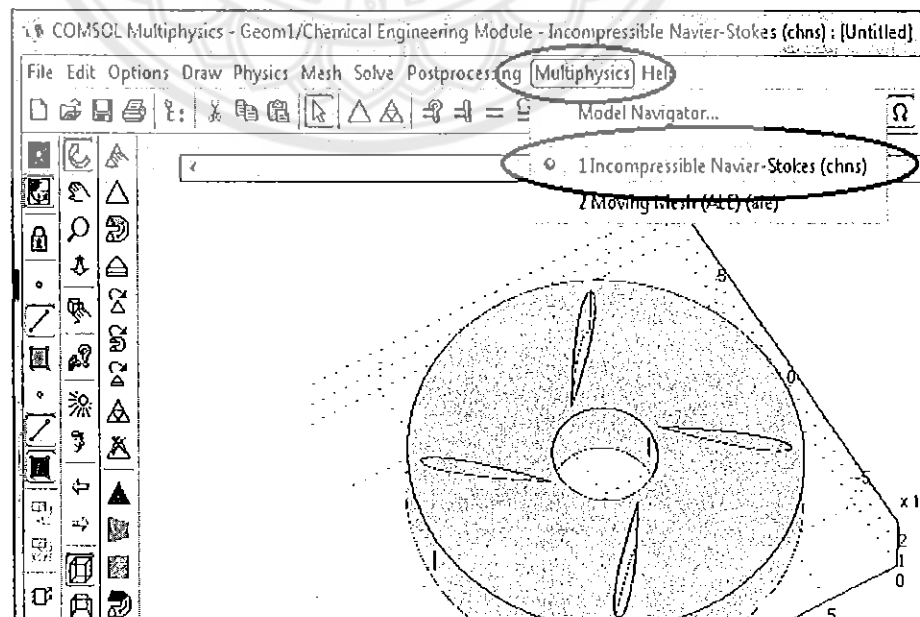
รูปที่ 3.24 กำหนดคุณสมบัติของของไหล

5. ทำการกำหนดค่าคุณสมบัติของของไหล และความเร็วการหมุนโดยให้ค่าความหนาแน่น (Density) = 0.2849 kg/m^3 , ค่าความหนืด (Viscosity) = $4.88 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ และ ค่าอัตราเร็วในการหมุน (Rotation speed) = 7 rpm >> OK ดังแสดงในรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 กำหนดคุณสมบัติของของไหล

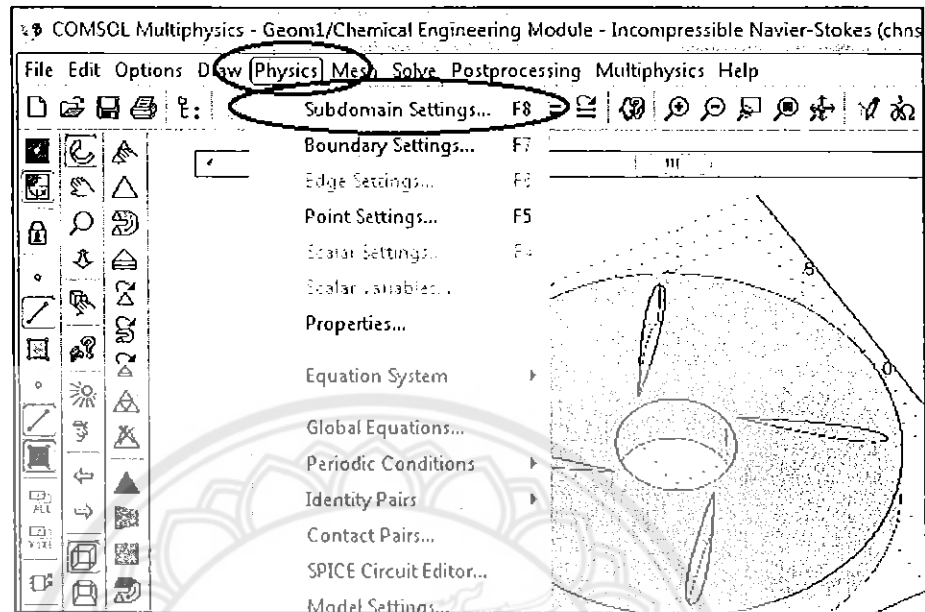
6. เปลี่ยนโหมดเป็น Incompressible Navier-stokes (chns) เพื่อกำหนดลักษณะการไหลและเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองโดยเลือก Multiphysics >> Incompressible Navier-stokes (chns) ดังในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 เลือกโหมด Incompressible Navier-stokes (chns)

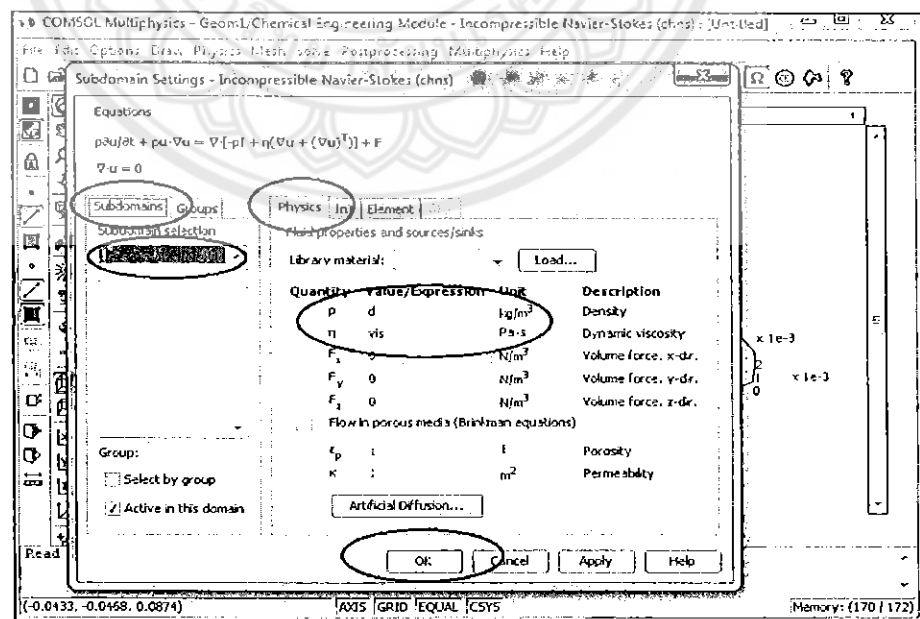
7. ทำการกำหนดคุณสมบัติของของไหล โดยเลือก Physics >> Subdomain ดังในรูปที่

3.27



รูปที่ 3.27 การกำหนดคุณสมบัติของการไหล

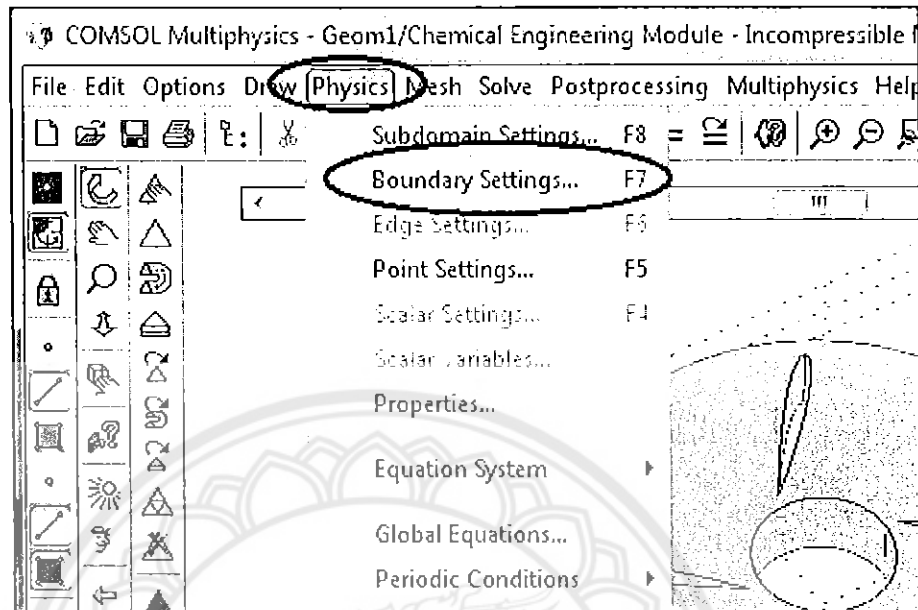
8. เมื่อคลิก Subdomain setting จะปรากฏหน้าต่างรูปที่ 3.28 ขึ้นมา จากนั้นทำการกำหนดสมบัติต่างๆของการไหลโดยเลือก 1 ในช่อง Subdomain จากนั้นใส่ค่า Density = d และ Viscosity = vis ซึ่งเป็นสัญลักษณ์ที่เรากำหนดไว้ในค่าคงที่ แล้วจึงกด OK ดังแสดงในรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 การกำหนดตัวแปรของค่าคงที่

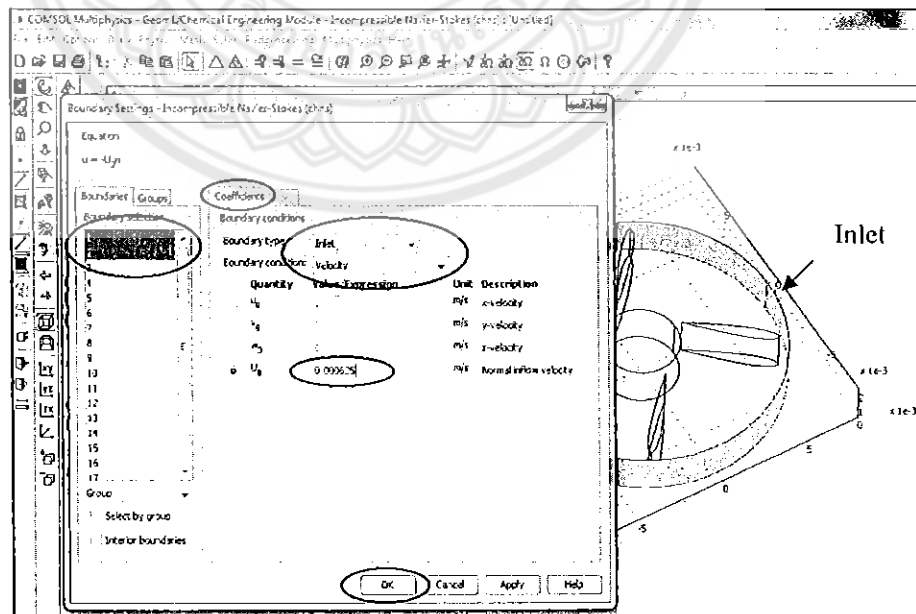
9. กำหนดเงื่อนไขของแบบจำลองโดยเลือก Physics >> Boundary Setting ดังในรูปที่

3.29



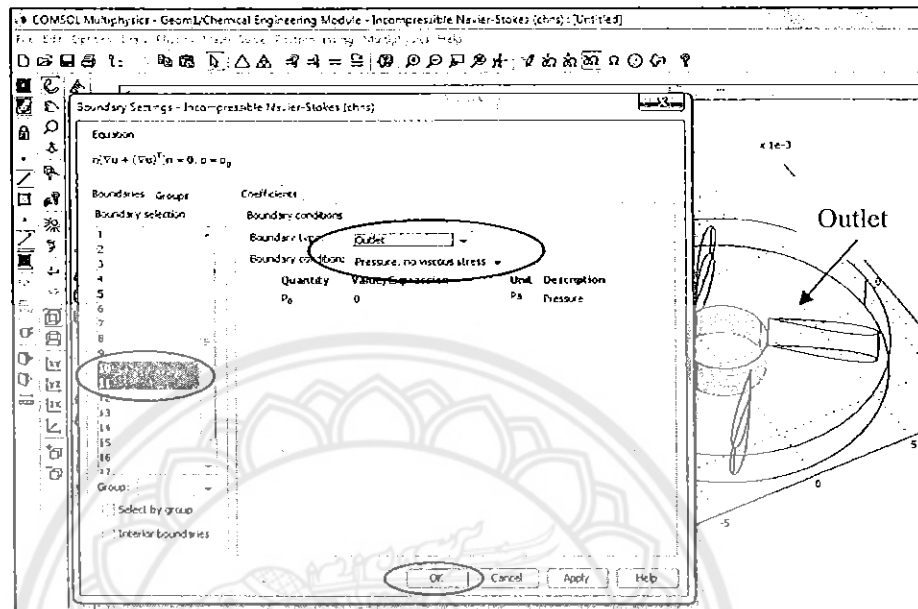
รูปที่ 3.29 การกำหนดขอบเขตแบบจำลอง

10. กำหนดทางเข้าของของไหล โดยคลิกที่เส้นวงนอกของแบบจำลองทั้งหมด ช่อง Boundary type เลือก Inlet แล้วจึงกำหนดความเร็วของของไหล $U_0 = 0.000625 \text{ m/s}$ จากนั้นกด OK ดังในรูปที่ 3.30



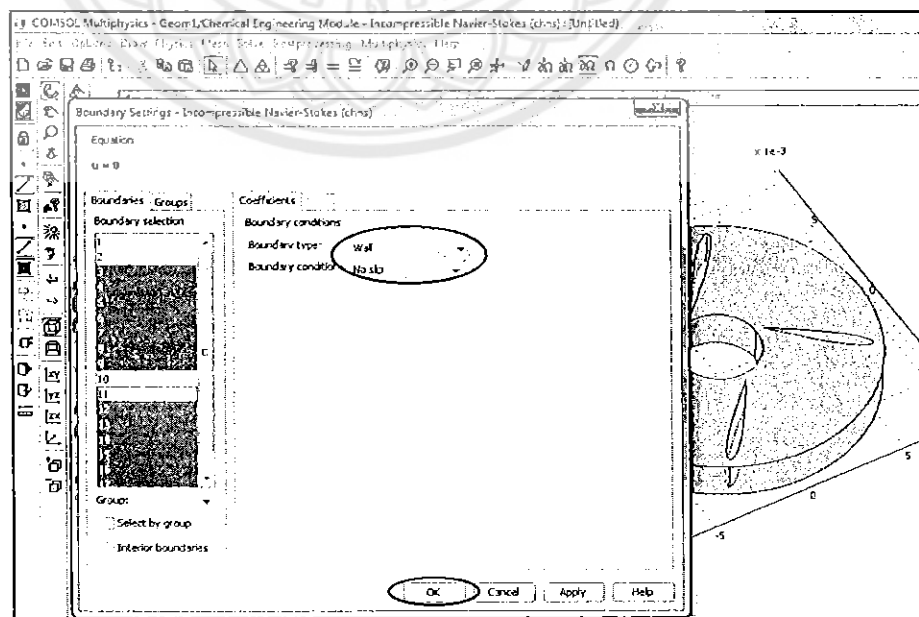
รูปที่ 3.30 การกำหนดทางเข้าของของไหล

11. กำหนดทางออกของของไหล โดยคลิกเส้นวงในของแบบจำลองทั้งหมด ช่อง Boundary type เลือก Outlet และเลือก Pressure, no viscous stress เป็นสภาวะขอบเขต ซึ่งหมายถึง การกำหนดให้ของไหลไหลออกสู่ความดันบรรยากาศจากนั้นกด OK ดังแสดงในรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 การกำหนดทางออกของของไหล

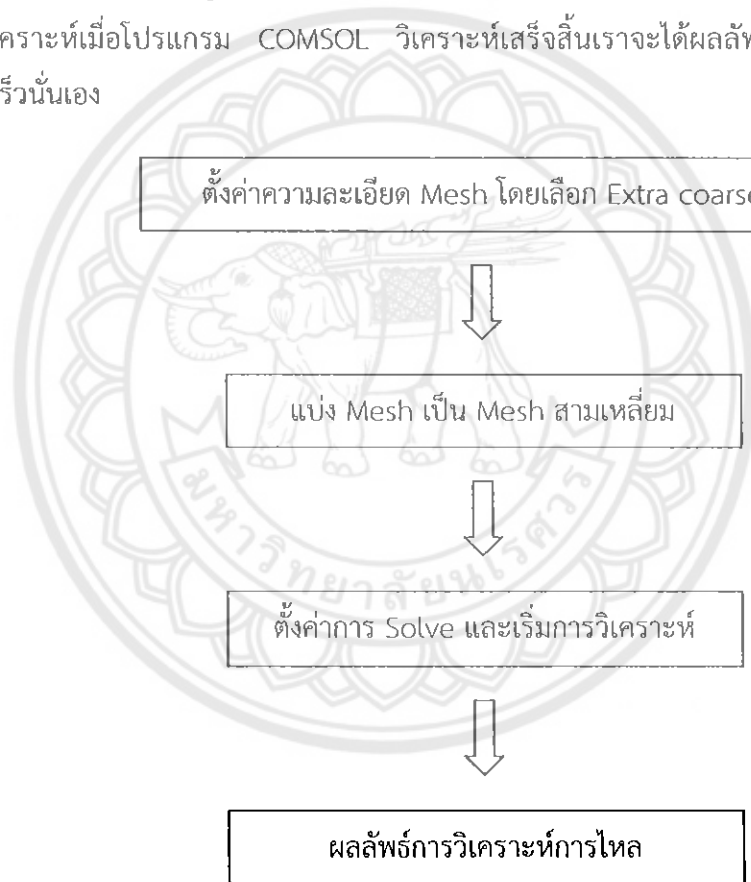
12. กำหนดชนิดของขอบเขต (Boundary type) ของชุดใบพัด โดยคลิกเลือกใบพัดทั้งหมด ให้เป็น Wall ซึ่งหมายถึงการกำหนดให้เป็นผนังของแข็ง และใน Boundary Condition เรากำหนดเงื่อนไขขอบเขตเป็น “No Slip” แล้วจึงคลิก OK ดังในรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 การกำหนดขอบเขตของชุดใบพัด

3.3 การคำนวณโดยใช้โปรแกรม COMSOL

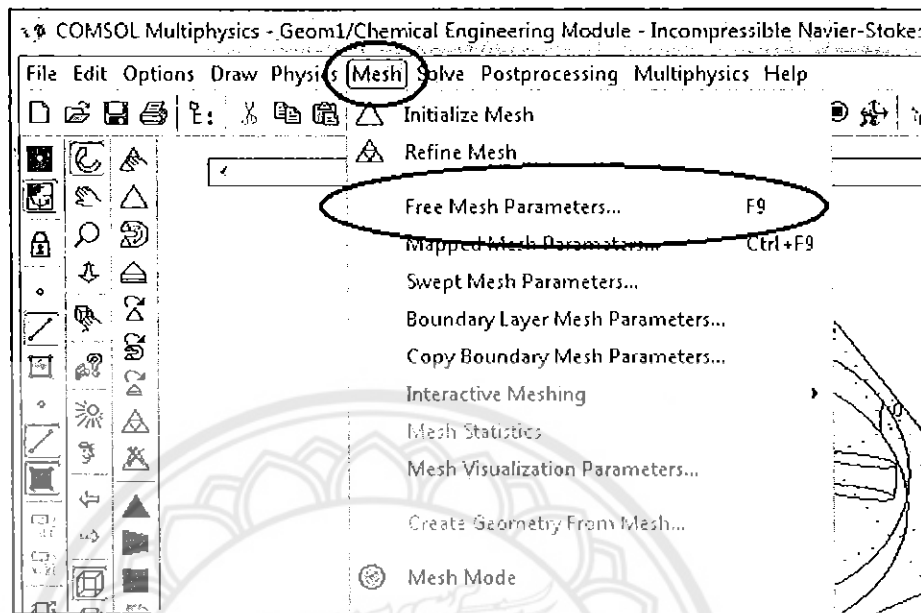
การกำหนดเงื่อนไขความละเอียดของ Mesh และเงื่อนไขการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม COMSOL แสดงเป็นแผนผังได้ในรูปที่ 3.33 โดยเริ่มจากตั้งค่าความละเอียดของ Mesh จากโหมด Mesh เพื่อเลือก Free Mesh parameter เนื่องจากเป็นโหมดการสร้าง Mesh แบบขนาดไม่คงที่ จากนั้นกำหนดความละเอียดของโครงร่างตาข่ายโดยเลือก Extra coarse สำหรับความละเอียดของ Mesh ในโปรแกรม COMSOL นั้น Extra coarse นี้มีความละเอียดที่หยาบที่สุดแล้ว เพราะว่า ถ้าเลือกความละเอียดของ Mesh ให้ละเอียดกว่านี้จะส่งผลเมื่อเวลาเราเริ่มวิเคราะห์ผลโปรแกรมจะ Error เนื่องจากหน่วยความจำในเครื่องคอมพิวเตอร์ไม่เพียงพอ ดังนั้นเราจึงเลือกใช้ความละเอียดที่ Extra coarse เพื่อแก้ปัญหาของสเปคเครื่องคอมพิวเตอร์ จากนั้นเราก็ตั้งค่าการ Solve แล้วกดเริ่มการวิเคราะห์เมื่อโปรแกรม COMSOL วิเคราะห์เสร็จสิ้นเราจะได้ผลลัพธ์ของของไหลนั้นก็คือค่าความเร็วนั่นเอง



รูปที่ 3.33 ผลลัพธ์การวิเคราะห์การไหล

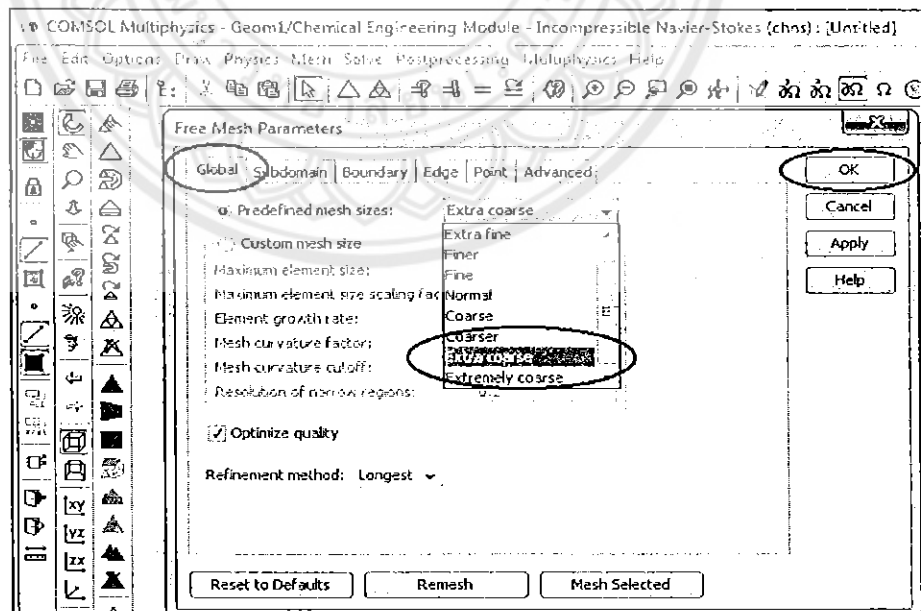
รายละเอียดของการใช้โปรแกรม COMSOL ในการแก้ปัญหาสมการ Navier – Stokes สามารถแสดงในรายละเอียดดังนี้

1. สร้างโครงร่างตาข่ายของสามเหลี่ยมปริซึมแบบไร้ระเบียบให้กับแบบจำลองเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณการไหล โดยเลือก Mesh >> Free Mesh Parameter ดังในรูปที่ 3.34



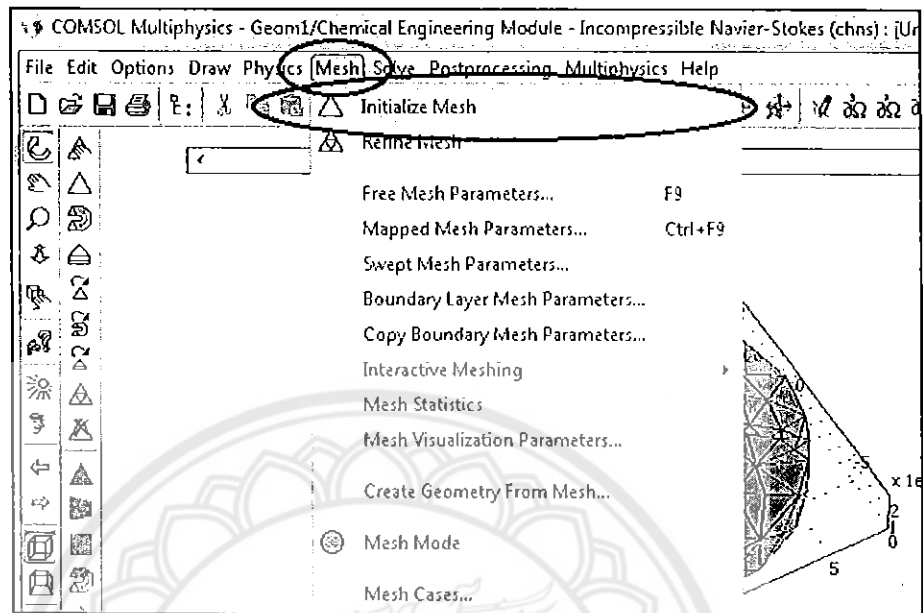
รูปที่ 3.34 การกำหนด Mesh

2. เลือกชนิด Mesh โดยหน้าต่างจะปรากฏขึ้นมา จากนั้นเลือก Global >> Extra coarse >> OK ดังในรูปที่ 3.35



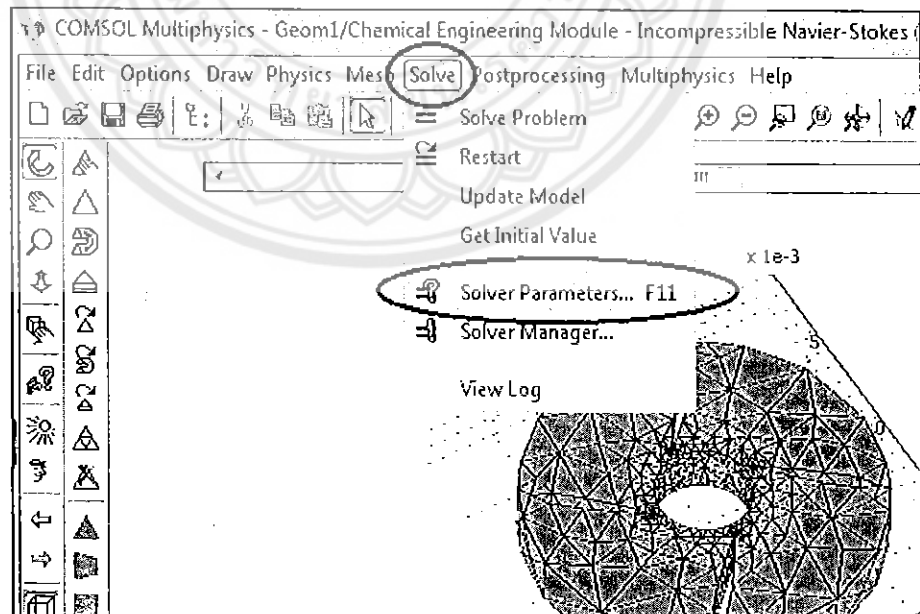
รูปที่ 3.35 การกำหนดชนิดของ Mesh

3. ทำการสร้าง Mesh โดยเลือก Mesh >> Initialize Mesh ดังในรูปที่ 3.36 จะได้ Mesh รูปทรงปริซึมเรียงตัวแบบไร้ระเบียบ



รูปที่ 3.36 การเลือกคำสั่งเพื่อสร้าง Mesh

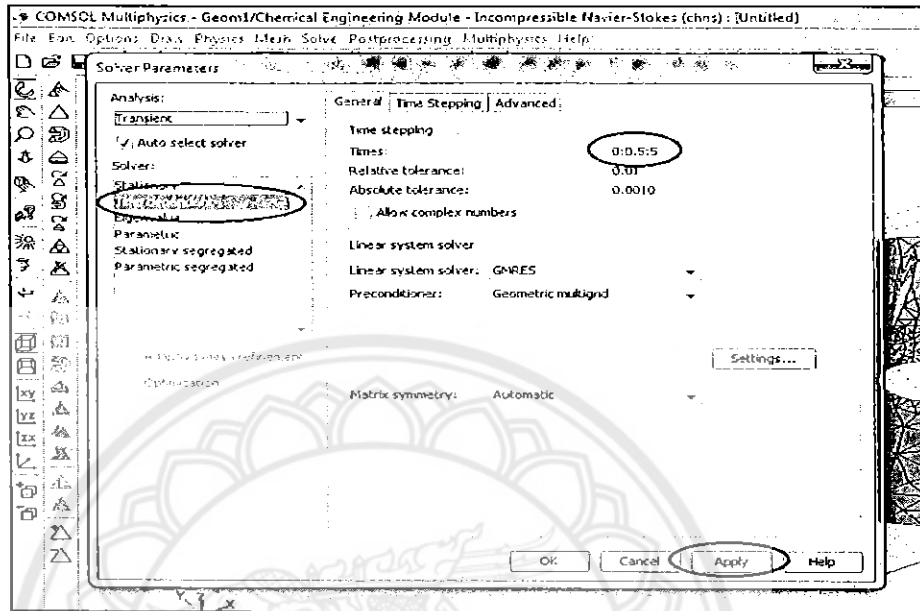
4. เตรียมการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับการคำนวณการไหลของของไหลผ่านแบบจำลอง โดยเลือก Solve >> Solve parameter ดังในรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.37 การเลือกคำสั่งกำหนดช่วงเวลาของการคำนวณ

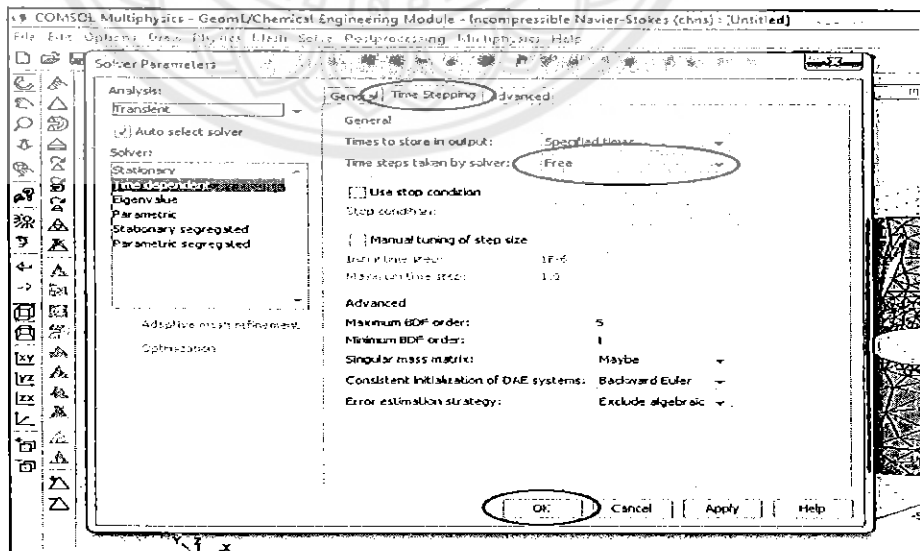
5. หน้าต่างของ Solve parameter จะปรากฏขึ้นมา เราจะต้องกำหนดเวลาของการคำนวณ โดยคลิก General >> ช่อง Time ให้ใส่ค่า 0:0.5:5 (หมายถึงเริ่มการคำนวณจากเวลาที่ 0 โดยเพิ่มที่

ละ 0.5 จนถึง 5 วินาที) >> Apply ดังในรูปที่ 3.38 ในที่นี้เราเลือก Solver เป็น GMRES เนื่องจากระบบการวิเคราะห์ผลของ GMRES เหมาะกับการวิเคราะห์แบบ 3 มิติซึ่งให้ผลการคำนวณรวดเร็วกว่าระบบวิธีอื่นและถูกต้องกว่าระบบวิธีการวิเคราะห์วิธีอื่น



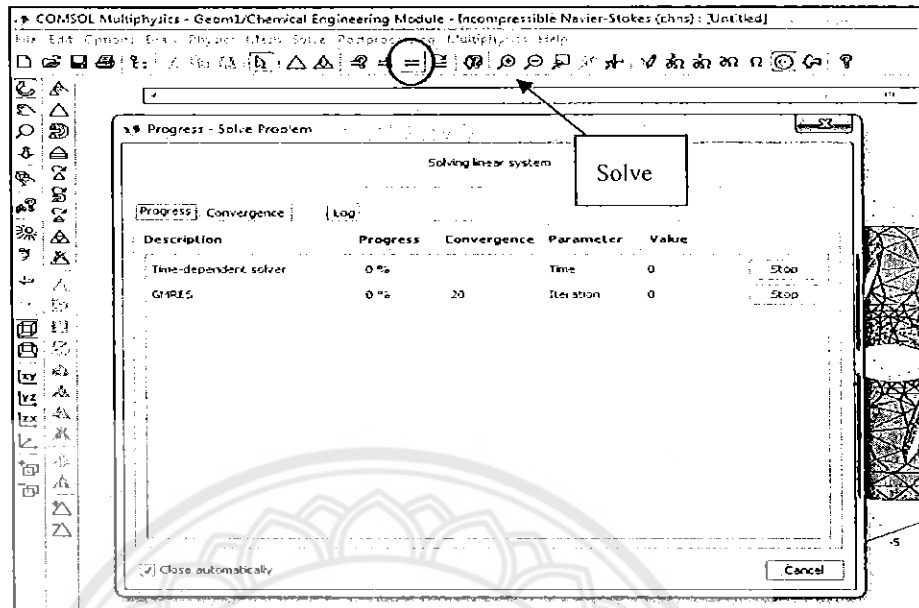
รูปที่ 3.38 การตั้งเวลา (Time step)

6. เลือกระบบในหน้าต่างของ Time Stepping โดยคลิก Time stepping >> Time Step taken by solve เลือก Free เพื่อเป็นการให้อิสระกับขั้นตอนในการแก้ปัญหา >> OK ดังในรูปที่ 3.39



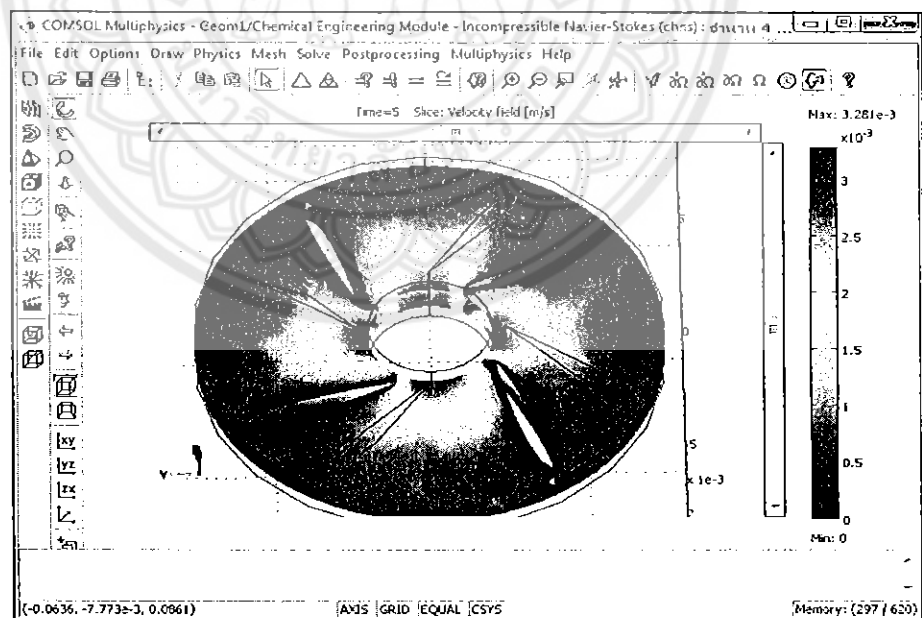
รูปที่ 3.39 การเลือกระบบ Free ใน Time stepping

7. เริ่มต้นการแก้ปัญหาโดยคลิก Solve ดังในรูปที่ 3.40



รูปที่ 3.40 การ Solve (วิเคราะห์การไหล)

8. ผลการคำนวณการไหลสามารถแสดงในรูปแบบต่างๆได้ ซึ่งในรูปที่ 3.41 เป็นการแสดงค่าที่อยู่ในรูปของความเร็วโดยใช้ลักษณะของสีเป็นการบอกความเร็วที่จุดต่างๆของแบบจำลอง



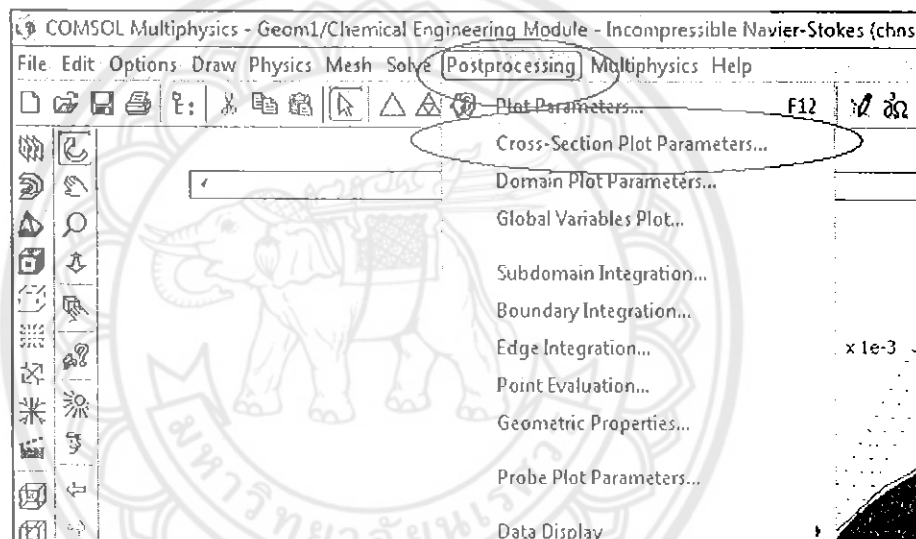
รูปที่ 3.41 Solve (วิเคราะห์การไหล) เสร็จสิ้น

3.4 การดึงข้อมูลจากโปรแกรม COMSOL มาคำนวณ

การดึงค่าข้อมูลจากโปรแกรม COMSOL แสดงได้ดังในรูปที่ 3.42 – 3.46 โดยเริ่มต้นจากเลือกโหมด Post processing เพื่อเลือก Cross-Section Plot Parameters เนื่องจากเราต้องกำหนดจุดตัดในการหาความเร็วแต่ละจุด เพื่อนำความเร็วที่ได้ในแต่ละจุดมาหาค่าเฉลี่ยและนำไปคำนวณหากำลังในสมการที่ 2.20

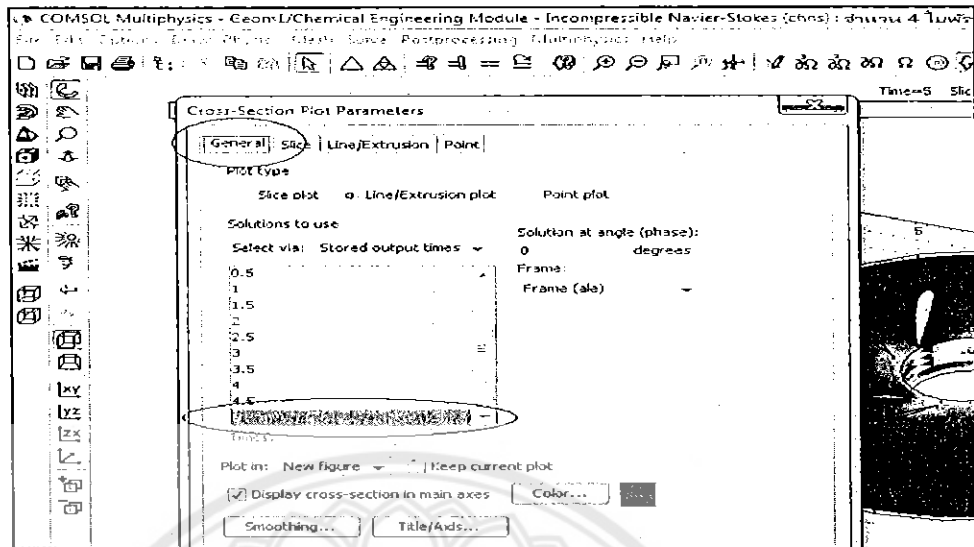
รายละเอียดของขั้นตอนในรูปที่ 3.42 – 3.46 สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. เลือกโหมด Post processing >> Cross-Section Plot Parameters เพื่อกำหนดจุดในการหาค่าความเร็วแต่ละจุด ดังในรูปที่ 3.42



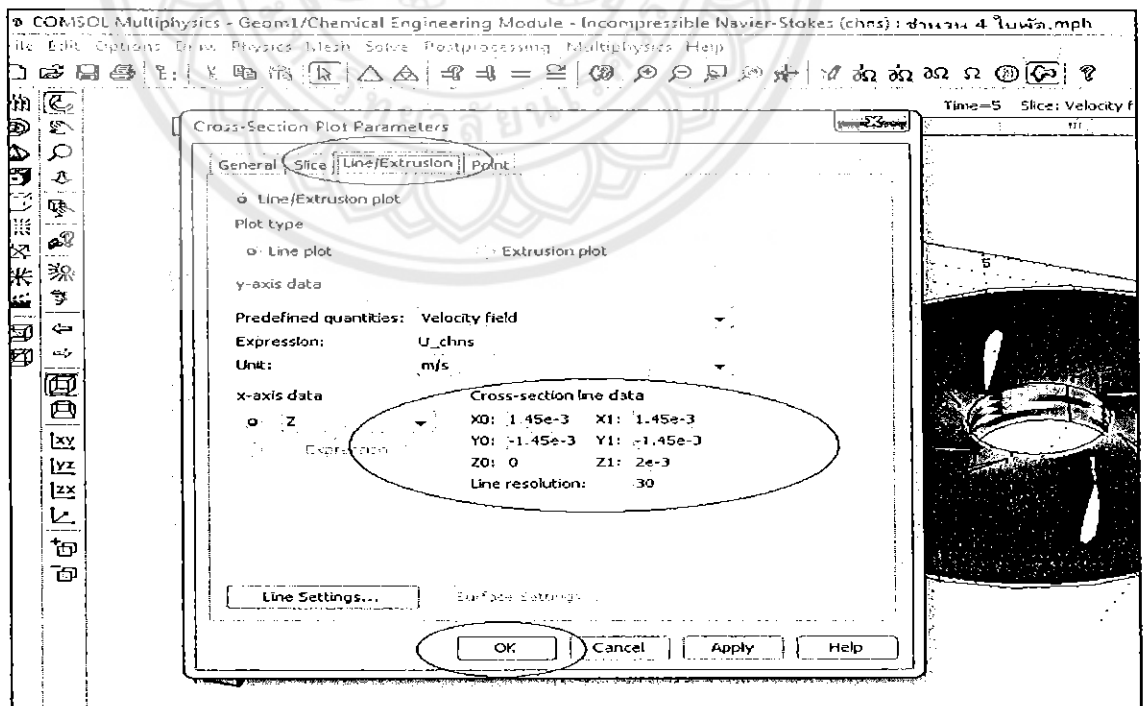
รูปที่ 3.42 เลือกโหมด Post processing

2. เลือกเวลาในการคำนวณที่ 5 วินาที โดยใช้คำสั่ง General >> 5 ดังรูปที่ 3.43



รูปที่ 3.43 การเลือกเวลาในการคำนวณ

3. กำหนดจุดแต่ละจุดในการเลือกโหมด Line/Extrusion >> ใส่ค่า Cross-Section line data >> $X_0 = 1.45E-3$, $X_1 = 1.45E-3$, $Y_0 = -1.45E-3$, $Y_1 = -1.45E-3$, $Z_0 = 0$, $Z_1 = 2.0E-3$ และจำนวนข้อมูลในหนึ่งเส้น (Line resolution) = 30 แสดงตัวอย่างการใส่ข้อมูลในหนึ่งจุดดังรูปที่ 3.44



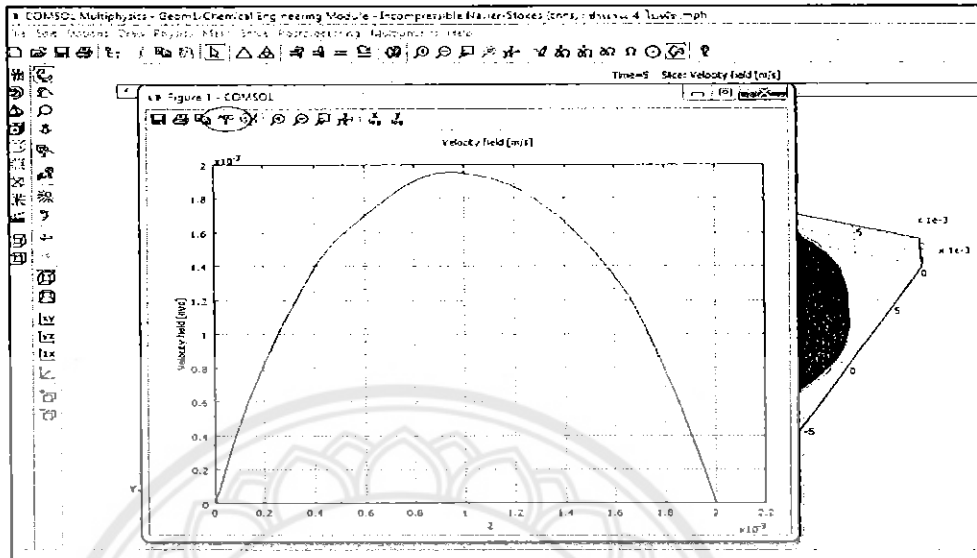
รูปที่ 3.44 การกำหนดจุดของค่าความเร็วที่ทางออกของไบพัต

สำหรับข้อมูลจำนวนจุดทั้ง 16 จุดที่ใช้ในการดึงข้อมูลในโปรแกรม COMSOL แสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจุดจำนวน 16 จุด

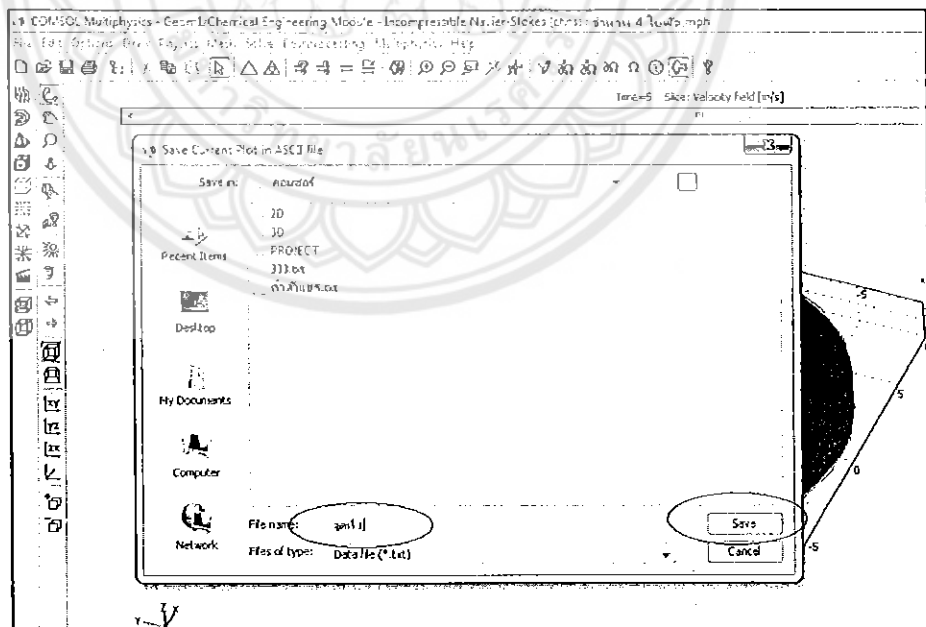
จุดที่	Cross Section Line Data						
	X0	X1	Y0	Y1	Z0	Z1	Line resolution
1	2.2e-3	2.2e-3	0	0	0	2.0e-3	30
2	1.9e-3	1.9e-3	0.8e-3	0.8 e-3	0	2.0e-3	30
3	1.45e-3	1.45e-3	1.45e-3	1.45e-3	0	2.0e-3	30
4	0.8e-3	0.8 e-3	1.9e-3	1.9e-3	0	2.0e-3	30
5	0	0	2.2e-3	2.2e-3	0	2.0e-3	30
6	-0.8e-3	-0.8e-3	1.9e-3	1.9e-3	0	2.0e-3	30
7	-1.45e-3	-1.45e-3	1.45e-3	1.45e-3	0	2.0e-3	30
8	-1.9e-3	-1.9e-3	0.8e-3	0.8e-3	0	2.0e-3	30
9	-2.2e-3	-2.2e-3	0	0	0	2.0e-3	30
10	-1.9e-3	-1.9e-3	-0.8e-3	-0.8e-3	0	2.0e-3	30
11	-1.45e-3	-1.45e-3	-1.45e-3	-1.45e-3	0	2.0e-3	30
12	-0.8e-3	-0.8e-3	-1.9e-3	-1.9e-3	0	2.0e-3	30
13	0	0	-2.2e-3	-2.2e-3	0	2.0e-3	30
14	-0.8e-3	-0.8e-3	-1.9e-3	-1.9e-3	0	2.0e-3	30
15	-1.45e-3	-1.45e-3	-1.45e-3	-1.45e-3	0	2.0e-3	30
16	-1.9e-3	-1.9e-3	-0.8e-3	-0.8e-3	0	2.0e-3	30

4. กราฟความเร็วในหนึ่งจุด แสดงได้ดังรูปที่ 3.45 จากนั้นคลิกที่ ABC เพื่อที่จะนำข้อมูลออกไปหาความเร็วเฉลี่ย ซึ่งในกราฟนี้ค่าความเร็วจะขึ้นอยู่กับระยะของความหนา



รูปที่ 3.45 ผลของความเร็วในหนึ่งจุด

5. บันทึก (Save) ข้อมูลในนามสกุล .txt เพื่อนำไปหาค่าความเร็วเฉลี่ยในโปรแกรม Excel ดังรูปที่ 3.46



รูปที่ 3.46 การบันทึกข้อมูลในแต่ละจุด

3.5 การคำนวณค่ากำลังที่ได้จากกังหัน

การคำนวณค่ากำลังที่ได้จากของไหลนี้ เราจะนำข้อมูลค่าความเร็วที่ได้จากโปรแกรม COMSOL มาคำนวณในทฤษฎี โดยเราได้ยกตัวอย่างการคำนวณกำลังของชนิด NACA 0012 จำนวน ใบพัด 8 ใบพัด ที่มุมทางออก 50 องศา มีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

1. จากการวิเคราะห์ผลของโปรแกรม COMSOL เราได้ค่าความเร็วของ NACA ในตัวอย่าง คือ 0.00217 m/s

2. จากสมการ 3.1 เราจะได้พื้นที่ A ออกมา

โดยที่ $\pi = 3.141592654$, $r = 7.5 \text{ mm}$ และ $L = 2 \text{ mm} \therefore A = 9.42857 \times 10^{-5} \text{ m}^2$

$$A = 2\pi rL \quad (3.1)$$

3. จากสมการ 3.2 เราจะได้อัตราการไหลออกมา

โดยที่ $V = 0.000625 \text{ m/s}$, $A = 9.42857 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \therefore Q = 5.9 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$

$$Q = VA \quad (3.2)$$

4. จากสมการ 3.3 เราจะได้ ความเร็วในแนวรัศมีที่ทางออกของใบพัดออกมา

โดยที่ $Q = 5.9 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$, $\pi = 3.141592654$, $d_{im} = 4 \text{ mm}$ และ $B = 2 \text{ mm}$
 $\therefore v_{f2} = 0.002344 \text{ m/s}$

$$v_{f2} = \frac{Q}{\pi d_{im} B} \quad (3.3)$$

5. จากสมการ 3.4 เราจะได้ ความเร็วปลายที่ทางออกของใบพัดออกมา

โดยที่ $v_{f2} = 0.002344 \text{ m/s}$, $\beta_2 = 50$ องศา ได้ $\cot\beta_2 = 0.8391 \therefore u_2 = 0.001967 \text{ m/s}$

$$u_2 = v_{f2} \cot\beta_2 \quad (3.4)$$

6. จากสมการ 3.5 เราจะได้ ความเร็วปลายที่ทางเข้าของใบพัดออกมา

โดยที่ $u_2 = 0.001967 \text{ m/s}$, $d_{im} = 4 \text{ mm}$ และ $D_{im} = 15 \text{ mm} \therefore u_1 = 0.00524 \text{ m/s}$

$$u_1 = u_2 \frac{d_{im}}{D_{im}} \quad (3.5)$$

7. จากสมการ 3.6 เราจะได้ ความเร็วในแนวรัศมีที่ทางเข้าของใบพัดออกมา

โดยที่ $Q = 5.9 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$, $\pi = 3.141592654$, $d_{im} = 15 \text{ mm}$ และ $B = 2 \text{ mm}$

$$\therefore v_{f1} = 0.000625 \text{ m/s}$$

$$v_{f1} = \frac{Q}{\pi D_{im} B} \quad (3.6)$$

8. จากสมการ 3.7 เราจะได้ ความเร็วสัมพันธ์สามเหลี่ยมมุมฉากที่ทางเข้าของใบพัดออกมา

โดยที่ $v_1 = 0.00217 \text{ m/s}$ ได้จากการคำนวณในโปรแกรม COMSOL และ $v_{f1} = 0.000625 \text{ m/s}$

$$\therefore v_{w1} = 0.002078 \text{ m/s}$$

$$v_{w1} = \sqrt{v_1^2 - v_{f1}^2} \quad (3.7)$$

9. จากสมการ 3.8 เราจะได้ อัตราการไหลเชิงมวลออกมา

โดยที่ $\rho = 0.2849 \text{ kg/m}^3$, $V = 0.000625 \text{ m}^3$ และ $A = 9.42857 \times 10^{-5} \text{ m}^2$

$$\therefore \dot{m} = 0.00524 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m} = \rho V A \quad (3.8)$$

10. จากสมการ 3.9 เราจะได้ กำลังออกมา

โดยที่ $\dot{m} = 0.00524 \text{ kg/s}$, $v_{w1} = 0.002078 \text{ m/s}$ และ $u_1 = 0.00524 \text{ m/s}$

$$\therefore \text{Power} = 1.82965 \times 10^{-14} \text{ kg/s}$$

$$\text{Power} = \dot{m} v_{w1} u_1 \quad (3.9)$$

บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

การศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของกังหันก๊าซขนาดจิวในแบบ 3 มิติ เราได้พิจารณาผลกระทบต่างๆที่มีต่อกำลังที่กังหันให้ออกมา ได้แก่ ลักษณะใบพัด จำนวนใบพัด และมุมทางออกของใบพัดต่อกำลังที่ได้ของกังหัน ซึ่งสำหรับผลการคำนวณนี้แสดงในรูปของความเร็วและกำลัง

4.1. ผลการคำนวณในรูปของความเร็วและกำลัง

ผลของกำลังและความเร็วแสดงในตารางที่ 4.1 ที่ชนิดของใบพัดแบบต่างๆ ได้แก่ NACA 0012, NACA 2712, NACA 4712 และ NACA 6712 โดยที่ใบพัดแต่ละชนิดแบ่งจำนวนใบพัดออกเป็น 4 ใบพัดและ 8 ใบพัด และในแต่ละจำนวนใบพัดนี้แบ่งมุมออกเป็น 50, 60 และ 70 องศา ดังนั้นจำนวนข้อมูลของความเร็วและกำลังที่ได้รับมีทั้งหมดอย่างละ 24 ข้อมูล .

ค่าความเร็วมาจากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม COMSOL ส่วนค่ากำลังมาจากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี โดยใช้สมการที่เกี่ยวข้องคือ สมการ 2.13, 2.14, 2.17, 2.18, 2.19 และ 2.20

ตารางที่ 4.1 ผลของกำลังและความเร็วของขงไหล

ชนิดใบพัด	จำนวนใบพัด (ใบ)	มุมทางออกของใบพัด (องศา)	ความเร็ว (m/s)	กำลังที่ได้รับ (10^{-14} W)
NACA 0012	4	50	0.00202	1.69127
		60	0.002026	1.16751
		70	0.001998	0.724767
	8	50	0.00217	1.82965
		60	0.002168	1.25764
		70	0.002106	0.768073
NACA 2712	4	50	0.002028	1.69867
		60	0.002033	1.17197
		70	0.002009	0.729189
	8	50	0.00219	1.84803
		60	0.002179	1.2646
		70	0.002134	0.779264
NACA 4712	4	50	0.00203	1.70052
		60	0.002033711	1.17242
		70	0.002020665	0.733875
	8	50	0.00221919	1.87483
		60	0.002014069	1.15991
		70	0.00216	0.789643
NACA 6712	4	50	0.002049	1.7181
		60	0.00204	1.17643
		70	0.00203	0.737623
	8	50	0.002249	1.90217
		60	0.00223	1.29682
		70	0.00217	0.793632

4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

กำลังที่ได้ออกมาได้นำมาเปรียบเทียบกับผลกระทบของกังหันซึ่งแบ่งผลกระทบของกังหันออกเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่ มุมที่ทางออกของใบพัด จำนวนของใบพัด และความโค้งของใบพัด สำหรับรายละเอียดคร่าวๆของแต่ละผลกระทบมีดังต่อไปนี้ (1) มุมที่ทางออกของใบพัด เราได้ศึกษามุมที่ทางออกของใบพัดอยู่ 3 มุมได้แก่ 50, 60 และ 70 องศา จากผลการทดลองพบว่ามุม 50 องศาให้กำลังมากที่สุด (2) จำนวนของใบพัด เราได้ศึกษาจำนวนของใบพัด อยู่ 2 จำนวน คือ 4 ใบพัดและ 8 ใบพัด จากผลการทดลองพบว่าจำนวนของใบพัด 8 ใบพัด ให้กำลังมากกว่าจำนวนของใบพัด 4 ใบพัด (3) ความโค้งของใบพัด เราได้ศึกษาความโค้งของใบพัด 4 ชนิดคือ NACA 0012, NACA 2712, NACA 4712 และ NACA 6712 จากผลการทดลองพบว่า NACA 6712 ให้กำลังมากที่สุดส่วน NACA 0012 ให้กำลังน้อยที่สุด

4.2.1 ผลกระทบของทางออกของใบพัด

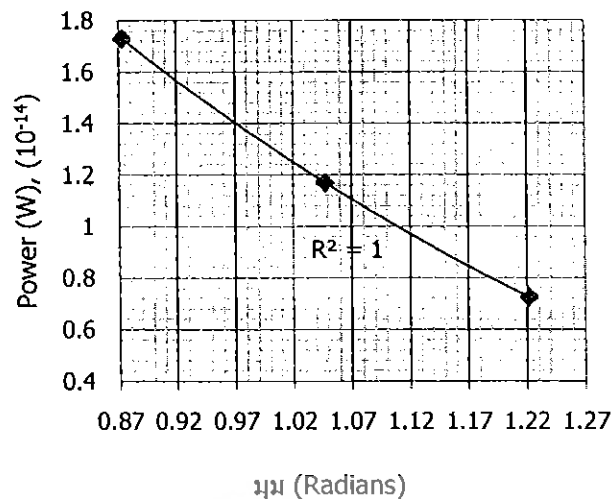
ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับมุมที่ทางออกของใบพัดแสดงได้จากกราฟรูปที่ 4.1 ซึ่งพบว่าได้ความสัมพันธ์ในลักษณะของสมการโพลีโนเมียลกำลัง 2 ($R^2 = 1$) ได้สมการคือ

$$P = 1.8861\beta_2^2 - 6.8298\beta_2 + 6.255 \quad (4.1)$$

เมื่อ P คือ กำลัง (W)
 β_2 คือ มุมที่ทางออกของใบพัด (Radians)

จากสมการ 4.1 แสดงความสัมพันธ์จะพบว่าเมื่อมุมเพิ่มขึ้น กำลังจะลดลงแสดงว่ากำลังแปรผกผันกับมุม

ทั้งนี้เนื่องจากการออกแบบใบพัดจะใช้สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางออกเพื่อให้ได้กำลังสูงสุด การออกแบบให้ใบพัดทำงานที่กำลังสูงสุดจะต้องออกแบบให้สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางออกเป็นสามเหลี่ยมมุมฉากซึ่งก็คือความเร็วสัมบูรณ์ที่ทางออกใบพัดมีทิศทางตามแนวรัศมี พิจารณารูปที่ 2.5 ที่มุมทางออกของใบพัดเป็น β_2 และความเร็ว v_{f2} คงที่จะได้เวกเตอร์ความเร็วขอบใบพัดเป็น u_2 แต่เมื่อมุมทางออกใบพัดลดลงเป็นมุม β_2 จะได้เวกเตอร์ความเร็วขอบใบพัดเป็น u_2 ซึ่งมากกว่า u_2 นั้นหมายความว่ามุมมีผลโดยตรงกับความเร็วขอบใบพัดซึ่งความเร็วขอบใบพัดนี้บ่งบอกถึงความเร็วรอบในการทำงาน จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.17 จะพบว่ากำลังและความเร็วขอบใบพัดมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นต่อกันจึงทำให้กราฟของกำลังกับมุมทางออกมีลักษณะดังสมการโพลีโนเมียล ดังนั้นจึงได้ว่ามุมทางออกใบพัดมีผลในลักษณะเป็นส่วนกลับกับกำลังจากการทดลองใช้มุมที่ 50, 60 และ 70 องศาแสดงว่ามุมที่ทางออก 50 องศาให้กำลังมากที่สุด



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับมุมที่ทางออกของใบพัด

4.2.2 ผลกระทบของจำนวนใบพัดและความโค้งของใบพัด

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับจำนวนใบพัดและความโค้งของใบพัดแสดงได้จากกราฟรูปที่ 4.2 สำหรับชนิดของ NACA ที่ใช้ในการทดลองมีความโค้งดังต่อไปนี้ NACA 0012 โค้ง 0 mm, NACA 2712 โค้ง 0.01 mm, NACA 4712 โค้ง 0.02 mm และ NACA 6712 โค้ง 0.03 mm จากนั้นจำนวนใบพัดที่ใช้ทดลอง มีจำนวนดังต่อไปนี้ 4 ใบพัดและ 8 ใบพัด ซึ่งพบว่าจำนวนใบพัด 8 ใบพัดให้กำลังมากกว่าจำนวนใบพัด 4 ใบพัด ดังนั้นจึงนำสมการของจำนวนใบพัด 8 ใบพัดมาพิจารณา จากกราฟของจำนวนใบพัด 8 ใบพัดได้ความสัมพันธ์ในลักษณะของสมการโพลิโนเมียลกำลัง 3 ($R^2 = 1$) ได้สมการคือ

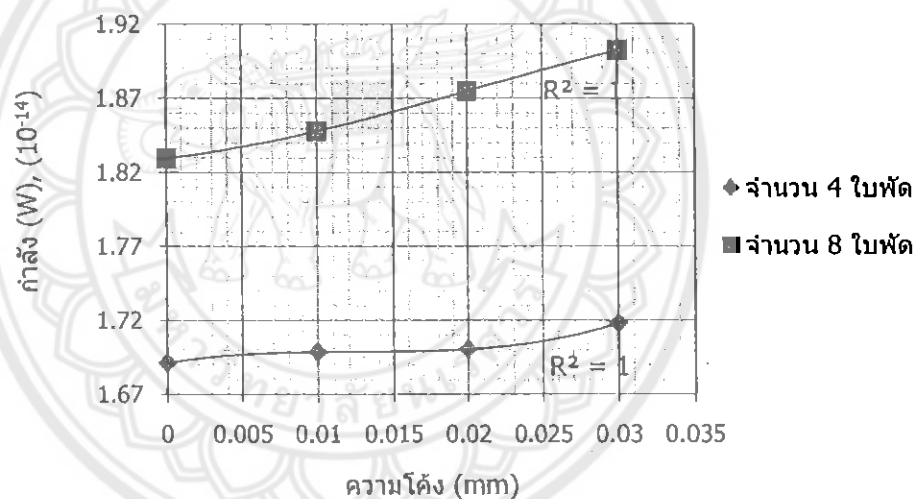
$$P = -1313.3h^3 + 81.5h^2 + 1.1543h + 1.8297 \quad (4.2)$$

เมื่อ P คือ กำลัง (W)
 h คือ ความโค้งของใบพัด (mm)

จากสมการ 4.2 จะพบว่าเมื่อค่าความโค้งเพิ่มขึ้นกำลังก็จะเพิ่มขึ้นแต่ก็มีขีดจำกัดของความโค้งคือถ้าโค้งมากเกินไปขีดจำกัดความโค้งจะทำให้กำลังลดลง

จำนวนใบพัด 8 ใบพัดให้กำลังมากกว่า 4 ใบพัด เป็นผลมาจาก เมื่อเพิ่มจำนวนใบพัดช่องว่างระหว่างใบพัดจะลดลงทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างใบพัดกับของไหล (v_r) เพิ่มขึ้นจึงทำให้ความเร็วอากาศทางเข้าเพิ่มขึ้น ($v = u + v_r$) แต่เมื่อเพิ่มจำนวนใบพัดจนกระทั่งช่องว่างระหว่างใบพัดแคบมากๆ แรงเสียดทานจะส่งผลต่อการไหลเนื่องจากสภาวะหยุดนิ่งที่ชั้นขีดผิว (no-slip conditions) ทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างใบพัดกับของไหล (v_r) ลดลงส่งผลให้ความเร็วทางเข้าลดลง

สำหรับความโค้งของใบพัดเป็นผลมาจากรูปทรงจะเป็นตัวกำหนดลักษณะและค่าสูงสุดของกำลัง โดยขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของมุมทางเข้าใบพัด พิจารณารูปสามเหลี่ยมความเร็ว (รูปที่ 2.6) ความเร็ว v_f คงที่เพราะอัตราการไหลผ่านหน้าตัดคงที่ หากกำหนดให้ความเร็วรอบในการทำงานคงที่ที่จุดออกแบบ (เวกเตอร์ u คงที่) เมื่อมุมของใบพัดเป็น β_1 องค์กรประกอบความเร็วในแนวสัมผัสของความเร็วรวมจะมีค่าเป็น v_{w1} ถ้ามุมเปลี่ยนเป็นมุม β_2 ซึ่งน้อยกว่า β_1 องค์กรประกอบความเร็วในแนวสัมผัสของความเร็วรวมจะมีค่าเป็น v_{w2} มีค่าน้อยกว่า v_{w1} และเนื่องจากมุม β นี้เป็นมุมที่เกิดจากลักษณะของใบพัด นั้นหมายความว่า รูปทรงใบพัดมีผลทำให้มุมทางเข้าของของไหลเปลี่ยนไปเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละรูปทรงใบพัด ส่งผลให้กำลังมีลักษณะแตกต่างกัน สรุปได้ว่ารูปทรงของใบพัดมีผลกระทบต่อกำลังของกังหันแต่ไม่มีรูปแบบเฉพาะ เพราะค่ากำลังจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมระหว่างมุมใบพัดหรือรูปทรงกับความเร็วยรอบของกังหันที่ใช้ในการทดลอง หากความเร็วรอบของใบพัดเปลี่ยนไปลำดับของรูปทรงที่ให้กำลังสูงสุดก็จะเปลี่ยนไปด้วย



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับจำนวนใบพัดของ NACA ชนิดต่างๆที่มุม 50 องศา

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

สำหรับการศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของกังหันก๊าซขนาดจื๋วนั้น ในที่นี้เราศึกษาผลกระทบของรูปทรงใบพัดของกังหัน จำนวนใบพัด และมุมทางออกของใบพัด ที่มีต่อกำลังของกังหันพบว่า

1. ใบกังหันที่มีความโค้งมากมีแนวโน้มที่จะให้กำลังสูง เพราะมีการเปลี่ยนทิศของการไหลมาก จึงทำให้เกิดแรงกระทำที่ใบพัดมาก กำลังจึงมาก ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของมุมทางเข้าใบพัดกับความเร็รรอบใบพัด เพราะเมื่อความเร็รรอบเปลี่ยน รูปทรงที่ให้กำลังสูงสุดจะเปลี่ยนไปด้วย รูปทรงที่ให้กำลังสูงที่สุดคือ NACA 6712

2. จากการทดสอบจำนวนใบพัด 4 และ 8 ใบพัด พบว่า จำนวนใบพัด 8 ใบให้กำลังโดยเฉลี่ยของทุกรูปทรงสูง เพราะเวลาที่จำนวนใบพัด 4 ใบ มีการดึงพลังงานจากของไหลทำได้น้อย จึงทำให้กำลังที่ได้ออกมาต่ำ

3. มุมทางออกใบพัดมีค่าระหว่าง 50, 60 และ 70 องศา พบว่า ที่มุม 50 องศา ให้กำลังออกมาสูงสุด เพราะหากพิจารณาจากสามเหลี่ยมความเร็วจะพบว่า ที่มุมทางออกใบพัดน้อยๆ องค์ประกอบความเร็วปลายใบพัดจะสูง ซึ่งก็คือความเร็รรอบในการทำงานสูง และกำลังของกังหันแปรผันโดยตรงกับความเร็รรอบใบพัด จึงทำให้ได้กำลังสูงที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรเพิ่ม Capacity ของเครื่องคอมพิวเตอร์ เพราะเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ของไหลเครื่องนี้ไม่สามารถวิเคราะห์ของไหลในใบพัดที่มีความหนาและจำนวนใบพัดมากกว่านี้ได้

2. ควรกำหนดให้การไหลเป็นแบบ Turbulent เพราะว่าจากการกำหนดขอบเขตเป็นแบบลามินาร์จึงส่งผลให้กำลังที่ได้ ออกมาน้อยกว่าที่ต้องการเพื่อให้กำลังที่ได้ออกมาสูงกว่านี้อาจจะต้องเปลี่ยนการไหลเป็นแบบ Turbulent

3. ถ้าต้องการกำลังมากกว่านี้ควรมี Casing เพื่อเป็นขอบเขตของการไหลซึ่งส่งผลให้เกิดความดันทั้งทางเข้าและทางออกของกังหันนอกจากนี้จะทำให้ของไหลเป็นแบบ Turbulent ทำให้กำลังที่ได้รับเพิ่มมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Shimpei Mizuki., 2007, "Development of Compressor for Ultra Micro Gas Turbine," *Journal of Thermal Science Vol.16, No.1 19-27.*
- [2] C. Dumand, J., Guidez, M., Orain, V., Sabel, A., (2005). "Specific problems of micro gas turbine engine for micro drones application," *Technical report.*
- [3] Nagashima, T., et al, "Lessons Learnt from the Ultra-Micro Gas Turbine Development at University of Tokyo," *Technical report.*
- [4] Ishihama, M., Sakai, Y., Matsuzuki, K., "Structural Analysis of Rotating Parts of an Ultra-micro Gas Turbine." *Report of Institute of Technology in Japan.*
- [5] Matsuura, K., Kato, C., Yoshiki, H., Matsuo, E., Ikeda, H., Nishimura, K., Sapkota, R., "Prototyping of Small-sized Two-dimensional Radial Turbine." *Report of Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Vol. 8 No. 1.*
- [6] J. F. Douglas, John Gasiorek, John Swaffield., 2001, Fluid Mechanics, 4th Edition, Prentice Hall.
- [7] Eastman, N., Kenneth, E., Robert, M., "The characteristics of 78 related airfoil sections from tests in the variable-density wind tunnel." *Technical report No. 460.*

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายยุทธพงษ์ ศรีแก้ว
 ภูมิลำเนา 107 หมู่ 5 ต.ห้วยใหญ่ อ.เมือง จ.เพชรบูรณ์ 67000
 ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย เพชรบูรณ์
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

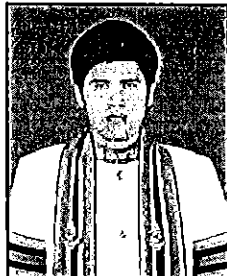
E-mail madoo_mario@hotmail.com



ชื่อ นายอัฐวุฒิ อัมพา
 ภูมิลำเนา 55/2 หมู่ 6 ต.วังโมกข์ อ.วชิรบารมี จ.พิจิตร 66140
 ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวังโมกข์พิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail am_atthawut@hotmail.com



ชื่อ นายอาทร เอนกนวล
 ภูมิลำเนา 10/5 หมู่ 8 ต.วังโมกข์ อ.วชิรบารมี จ.พิจิตร 66140
 ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวังโมกข์พิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail ragna_555@hotmail.com