

การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลของเลือดผ่านกังหันขนาดเล็ก

NUMERICAL STUDY OF BLOOD FLOW THROUGH

A SMALL TURBINE BLADE



นายชาติ	วีระศักดิ์ตระกูล
นายชวลิต	ต้บทอง
นายวันชัย	หวานใจ

15507326  
 ๖.๘  
 ๖140  
 ๒๕๕๓

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2553

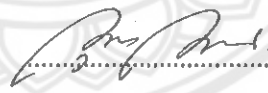
ชื่อผู้ลงทะเบียน	นายชาติ
บัตรรหัสนี้	๖ 0 ส.อ. 2553
เลขทะเบียน	15507376
เลขเรื่องฉบับนี้	๘๕
วันที่	๘ ๕ 14 17 ๒๕๕๓

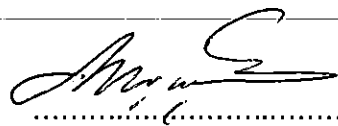


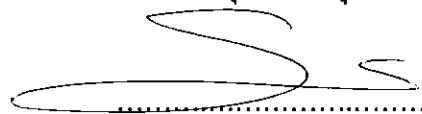
## ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลของเลือดผ่านก้นหมี  
ผู้ดำเนินโครงการ นายชาติ วีระศักดิ์ตระกูล รหัส 50360807  
นายชวลิต ตับทอง รหัส 50364027  
นายวันชัย หวานใจ รหัส 50364201  
ที่ปรึกษาโครงการ ผศ.ดร.กฤษยา กนกजारูจิตร  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา 2553

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบร. อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

  
.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(ผศ.ดร.กฤษยา กนกजारูจิตร)

  
.....กรรมการ  
(ดร.กาน พุททวงศ์)

  
.....กรรมการ  
(ดร.ศลิษา วีรพันธุ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลของเลือดผ่านกังหันขนาดจิ๋ว		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายชาติรี	วีระศักดิ์ตระกูล	รหัส 50360807
	นายชวลิต	ต๋ับทอง	รหัส 50364027
	นายวันชัย	หวานใจ	รหัส 50364201
ที่ปรึกษาโครงการ	ผศ.ดร.กฤษยา กนกจารุวิจิตร		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	2553		

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลผ่านกังหันขนาดจิ๋ว (Ultra Micro Gas Turbine , UμGT) โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม COMSOL ซึ่งกำหนดการไหลเป็นแบบลามินาร์อยู่ที่ RE เท่ากับ 1000 ทั้งนี้ตลอดโครงการเราใช้สมบัติของน้ำแทนสมบัติของเลือดเนื่องจากมีความคล้ายคลึงกันทางด้านกลศาสตร์ของไหลผ่านตัวเรย์โนลด์มันเอง และกังหันก๊าซขนาดจิ๋วถูกออกแบบให้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. โดยที่ไม่มี Guide Vane เราพิจารณาผลกระทบต่างๆที่มีผลต่อกังหันได้แก่ (1) ความโค้ง (Camber) ซึ่งใช้เพนอากาศ NACA 4 Series : 0012, 2212, 4212 และ 6212 (2) จำนวนใบพัด 14, 18 และ 22 ใบ (3) มุมทางออกของใบพัดที่สัมพันธ์กับเส้น Camber ที่ 50, 60 และ 70 องศา ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าใบพัดที่มีเส้นความโค้งมากที่สุด NACA 6212 ให้กำลังสูงสุดเนื่องจากรูปทรงใบพัดมีมุมทางเข้าที่สัมพันธ์กับเส้น Camber ไม่เหมือนกัน โดยความโค้งมากจะมีมุมทางเข้าใบพัดมาก ทำให้องค์ประกอบความเร็วในแนวสัมผัสมีค่าสูง ส่งผลให้กำลังที่ได้ออกมาสูงไปด้วย อย่างไรก็ตามกำลังของกังหันนั้นยังขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของความเร็วรอบของกังหันกับมุมทางเข้าใบพัดด้วย นอกจากนี้จำนวนใบพัด 18 ใบให้กำลังดีที่สุด เพราะถ้าหากจำนวนใบพัดน้อยกว่านี้ การดึงพลังงานจากของไหลจะเกิดขึ้นน้อย ทำให้ได้กำลังต่ำ ในขณะที่จำนวนใบพัดมากกว่านี้ก่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานทำให้ได้กำลังต่ำลง และสุดท้ายมุมทางออกที่ 50 องศา ให้กำลังสูงสุดเนื่องจากเมื่อพิจารณาสามเหลี่ยมความเร็วพบว่า ที่มุมทางออกน้อยๆให้องค์ประกอบความเร็วปลายใบพัดสูงสุด

ทำให้ความเร็วยานมีค่าสูงซึ่งแปรผันโดยตรงกับกำลังของกังหันจึงให้กำลังออกมาสูงสุดแต่ถ้าหาก  
มุมทางออกลดลงไปเรื่อยๆจนเข้าสู่ศูนย์ ความเร็วยานจะเพิ่มขึ้นเข้าสู่อนันต์ ซึ่งเป็นไปไม่ได้ใน  
ความจริง



**Project title** NUMERICAL STUDY OF BLOOD FLOW FORWARD A SMALL  
TURBINE BLADE

**Name** Mr. Chartree Werasaktrakon ID. 50360807  
Mr. Chaovalit Tubtong ID. 50364027  
Mr. Wanchai Wanjai ID. 50364201

**Project advisor** Dr.Koonlaya Kanokjaruvijit

**Major** Machanical Engineering

**Department** Machanical Engineering.

---

**Academic year** 2010

.....

### Abstract

This project is to numerically study the flow through an ultra micro gas turbine (UMGT) with the use of the finite element method via a commercial program called COMSOL®. The flow is fixed at Reynolds number of 1000 using properties of water instead of blood according to the similarity analysis. The turbine is fixed at the size of 10 mm in diameter without guide vanes. Some parametric effects are considered such as (1) camber – using different NACA 4 series airfoils, i.e. 0012, 2212, 4212 and 6212 (2) number of blades of 14, 18 and 22 blades, and (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 6212, 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 18 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. However, if the outlet angle is continuously decreased toward zero, the speed will be increased to infinity.



## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลงด้วยดี ผู้จัดทำโครงการขอกราบขอบพระคุณ บุคคลและกลุ่มบุคคลอื่นๆที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ เป็นอย่างดี ทั้งในด้านวิชาการและงบประมาณ

- ผศ.ดร.กฤษยา กนกजारูวิจิตร ที่ปรึกษาโครงการ

- ดร.ภาณุ พุทธวงศ์ กรรมการ

- ดร.ศลิษา วีรพันธุ์ กรรมการ

- สมาชิกในกลุ่มและเพื่อนๆทุกคน

- คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่เป็นผู้สนับสนุนโครงการและมอบเงินให้

ในการจัดทำโครงการ



คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นายชาติ วีระศักดิ์ตระกูล

นายชวลิต ตับทอง

นายวันชัย หวานใจ

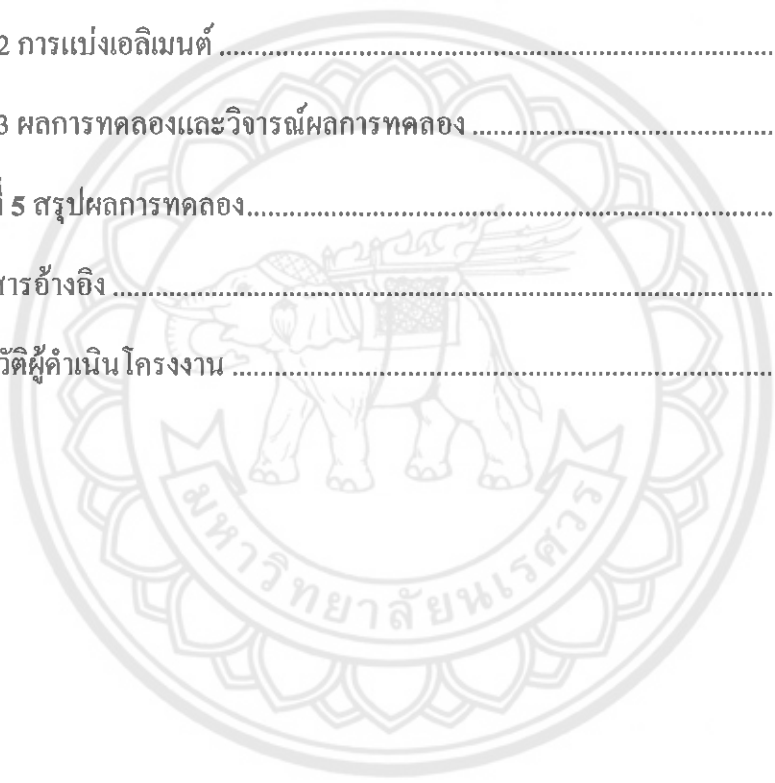
มีนาคม 2554

# สารบัญ

เรื่อง	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
สัญลักษณ์.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาของปัญหาและความสำคัญของโครงการ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ .....	2
1.3 ขอบข่ายของโครงการ .....	2
1.4 กิจกรรมดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	3
1.6 สถานที่ปฏิบัติงาน .....	3
1.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการ .....	3
1.8 งบประมาณที่ใช้ .....	3
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การทบทวนวรรณกรรม (Literature Review) .....	4
2.2 ทฤษฎีของการคำนวณกึ่งหัน .....	5
2.3 แบบจำลองของกึ่งหันขนาดเล็ก.....	8



<b>บทที่ 3</b>	<b>การสร้างแบบจำลองของกังหันขนาดเล็ก</b>	<b>13</b>
3.1	การนำไฟล์เขียนแบบเข้าโปรแกรม COMSOL	13
3.2	การกำหนดลักษณะใบพัด	15
3.3	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง	20
3.4	การวิเคราะห์ผลลัพธ์	27
<b>บทที่ 4</b>	<b>การทดลองและผลการทดลอง</b>	<b>32</b>
4.1	การกำหนดค่าเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต	32
4.2	การแบ่งเอलिเมนต์	36
4.3	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	39
<b>บทที่ 5</b>	<b>สรุปผลการทดลอง</b>	<b>43</b>
	เอกสารอ้างอิง	44
	ประวัติผู้ดำเนินโครงการ	46



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงสามเหลี่ยมความเร็วที่ทางเข้าและออกจากใบพัด.....	6
รูปที่ 2.2 แบบจำลองของกังหันขนาดเล็ก.....	8
รูปที่ 2.3 สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางออกใบพัด.....	11
รูปที่ 2.4 สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางเข้าใบพัด.....	12
รูปที่ 3.1 บันทึกไฟล์เป็นนามสกุล .dxf.....	13
รูปที่ 3.2 เลือกชนิดของโหนดในการวิเคราะห์.....	14
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการนำ AutoCAD file เข้าสู่โปรแกรม COMSOL.....	14
รูปที่ 3.4 การนำไฟล์เข้าสู่โปรแกรมเสร็จสิ้น.....	15
รูปที่ 3.5 ชิ้นงานที่มีคุณลักษณะเป็นของแข็ง.....	16
รูปที่ 3.6 แยกชิ้นส่วนออกจากกัน ด้วยคำสั่ง Split Object.....	16
รูปที่ 3.7 การตัดบางส่วนของแข็ง.....	17
รูปที่ 3.8 รวมชิ้นงาน.....	17
รูปที่ 3.9 แยกชิ้นงานออก.....	18
รูปที่ 3.10 รวมวงแหวนรอบนอกและวงแหวนด้านใน.....	18
รูปที่ 3.11 ประกอบชิ้นงานทั้งหมด.....	19
รูปที่ 3.12 การเปลี่ยนลักษณะเส้นระหว่าง Stator กับ Rotor จากผนังให้เป็นช่องเปิด.....	19
รูปที่ 3.13 ผังแนวคิดการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง.....	20
รูปที่ 3.14 เลือก โหนด Moving Mesh (ALE).....	21
รูปที่ 3.15 เลือก Subdomain setting.....	21
รูปที่ 3.16 การกำหนดทิศทางการหมุนของชุดใบพัด.....	22
รูปที่ 3.17 กำหนดคุณสมบัติของของไหล.....	22
รูปที่ 3.18 กำหนดคุณสมบัติของการไหล.....	23
รูปที่ 3.19 เลือก โหนด Incompressible Navier-Stokes (chns).....	23
รูปที่ 3.20 กำหนดคุณสมบัติของไหล.....	24

# สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตาราง 1.1 กิจกรรมดำเนินงาน.....	2
ตาราง 1.2 งบประมาณที่ใช้.....	3
ตาราง 4.1 ค่าคงที่และสมบัติที่ใช้ในการทดลอง.....	32
ตาราง 4.2 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการทดลอง.....	33



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.21 การกำหนดตัวแปรของค่าคงที่.....	24
รูปที่ 3.22 การกำหนดขอบเขตแบบจำลอง.....	25
รูปที่ 3.23 กำหนดทางเข้าของของไหล.....	25
รูปที่ 3.24 กำหนดทางออกของของไหล.....	26
รูปที่ 3.25 กำหนด Boundary type ของชุดใบพัด.....	26
รูปที่ 3.26 ผังแนวคิดของการวิเคราะห์ผลของการไหลผ่านกังหัน.....	27
รูปที่ 3.27 การกำหนด Mesh.....	27
รูปที่ 3.28 การกำหนดชนิด Mesh.....	28
รูปที่ 3.29 วิธีการสร้าง Mesh สามเหลี่ยม.....	28
รูปที่ 3.30 การวิเคราะห์การไหล.....	29
รูปที่ 3.31 การตั้งเวลา ( Time step).....	29
รูปที่ 3.32 การเลือกระบบ free ใน Time stepping.....	30
รูปที่ 3.33 การ Solve (วิเคราะห์การไหล).....	30
รูปที่ 3.34 Solve (วิเคราะห์การไหล) เสร็จสิ้น.....	31
รูปที่ 4.1 การกำหนดค่าเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต.....	33
รูปที่ 4.2 แสดงการวัดมุมทางเข้าและทางออกใบพัด.....	34
รูปที่ 4.3 แพนอากาศของ NACA.....	35
รูปที่ 4.4 การแบ่ง Mesh ที่ความหนาต่างๆ.....	36
รูปที่ 4.5 ผลของความหนาแน่นตาข่าย (mesh density) ที่มีต่อกำลังสำหรับ NACA 0012 จำนวน	
10ใบ.....	36
รูปที่ 4.6 Labels of nodes and dependent variables for a Lagrange element.....	38
รูปที่ 4.7 กำลังที่ได้จากกังหันขนาดเล็กที่มีใบพัดชนิดและจำนวนต่างๆ.....	39
รูปที่ 4.8 สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางเข้าใบพัด.....	40

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.9 ผลกระทบของมุมทางออกใบพัดต่อกำลัง สำหรับในพัดชนิด NACA 6212 จำนวน 18 ใบ พัด.....	41
รูปที่ 4.10 สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางออกของใบพัด.....	42



## สารบัญสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
$\omega$	ความเร็วเชิงมุม
$v_w$	ความเร็วในแนวสัมผัส
$v_t$	ความเร็วในแนวรัศมี
$v$	ความเร็วสัมบูรณ์
$u$	ความเร็วปลายใบพัด
$v_r$	ความเร็วสัมผัสระหว่างของไหลกับใบพัด
$\theta$	มุมทางเข้าของของไหล
$R_r$	รัศมี
$m$	อัตราการไหลเชิงมวล
$\rho$	ความหนาแน่น
$H$	เฮด
$Q$	อัตราการไหลเชิงปริมาตร
$g$	ค่าแรงโน้มถ่วง $9.81 \text{ m/s}^2$
$\eta$	ประสิทธิภาพ
$u_r$	ความเร็วในแนวแกน r
$u_\theta$	ความเร็วในแนวแกน $\theta$
$u_z$	ความเร็วในแนวแกน z
$F_r$	Body Force ในแนวแกน r
$F_\theta$	Body Force ในแนวแกน $\theta$
$t$	เวลา
$F_z$	Body Force ในแนวแกน z
$P$	ความดัน
$D_{im}$	เส้นศูนย์กลางภายนอกของใบพัด
$d_{im}$	เส้นศูนย์กลางภายในของใบพัด
$B$	ความหนาของใบพัด

สัญลักษณ์

ความหมาย

$Re$	Reynolds number
$A$	พื้นที่หน้าตัด
$\mu$	ความหนืด
$D$	เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นเลือด
$\beta_1$	มุมทางเข้าใบพัด
$\beta_2$	มุมทางออกใบพัด
$E$	กำลัง
$N$	ความเร็วรอบเป็น รอบต่อนาที



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาของปัญหาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดแรงผลักดันในการพัฒนาแหล่งพลังงานและตัวเก็บพลังงานตัวอย่างเช่น แบตเตอรี่ ให้มีประสิทธิภาพสูงและขนาดเล็กลง ต่อมาเริ่มมีการพัฒนากังหันก๊าซขนาดเล็กเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานทางเลือก อุปกรณ์ขนาดเล็กเหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์เช่น ใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับเครื่องบินเล็กไร้คนขับหรือใช้กับหุ่นยนต์

ขณะเดียวกันการวงการแพทย์เริ่มมีการพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเพื่อการรักษา มีการสร้างอวัยวะเทียมเพื่อใช้กับผู้ป่วยแต่ยังคงมีปัญหาในเรื่องของต้นกำลังที่ใช้ง่ายให้กับอวัยวะเทียม ซึ่งอวัยวะเทียมบางชนิดต้องการพลังงานในการขับเคลื่อนจึงเกิดทางเลือกขึ้นสองทาง คือ ใช้แบตเตอรี่เพื่อเป็นแหล่งพลังงาน แต่ปัจจุบันตัวเก็บพลังงานจำพวกแบตเตอรี่มีประสิทธิภาพต่ำ อีกทางเลือกหนึ่ง คือ การสร้างแหล่งพลังงานขนาดเล็กขึ้นมาโดยการลดขนาดกลจักรความร้อนที่มีอยู่ในปัจจุบันเช่น เครื่องยนต์ดีเซล เครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ ดังนั้นคณะผู้จัดทำจึงได้ทำการออกแบบกังหันขนาดเล็กด้วยแนวคิดที่จะให้เป็นแหล่งพลังงานแก่อวัยวะเทียม และ Gas Turbine ซึ่งเป็นมุมมองเกี่ยวกับแหล่งพลังงานยุคใหม่ ในอนาคตการสร้างเทคโนโลยีพลังงานต่างๆไม่ใช่เพียงต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพเท่านั้น แต่ยังต้องคำนึงถึง อัตราการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ และต้องมีขนาดเล็กด้วย การสร้างแหล่งพลังงานขนาดใหญ่ต้องใช้เงินทุนจำนวนมากและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงทำให้ประเทศกำลังพัฒนาไม่สามารถสร้างเพื่อใช้ในประเทศได้ ดังนั้นการนำแหล่งพลังงานขนาดเล็กเข้ามาใช้ในประเทศจึงเป็นสิ่งที่ดีกว่าด้วยเงินลงทุนที่ต่ำทำให้ แม้แต่ในประเทศกำลังพัฒนาที่สามารถสร้างเพื่อใช้ในประเทศได้





## 1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ

- 1.5.1 เพื่อให้ได้ข้อมูลเป็นแนวทางในการพัฒนากังหันขนาดเล็กต่อไป
- 1.5.2 คู่มือการทำสร้างแบบจำลองของกังหันขนาดเล็กโดยอาศัย Moving boundary โดย Moving mesh (ALE: Arbitrary Lagrangian – Eulerian) จากโปรแกรม COMSOL

## 1.6 สถานที่ปฏิบัติงาน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร – จังหวัดพิษณุโลก

## 1.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการ

เครื่องคอมพิวเตอร์ Intel(R) Core(TM) 2 Duo, CPU T5870 @ 2.00GHz, RAM 2.00GB

## 1.8 งบประมาณที่ใช้

ตารางที่ 2 งบประมาณที่ใช้

ลำดับ	รายการ	ราคา	หน่วย
1	ค่ากระดาษ	1500	บาท
2	ค่าปริ้นงาน	1500	บาท
	รวม	3000	บาท

## การทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การทบทวนวรรณกรรม (Literature Review)

Mizuki [1] ศึกษาการพัฒนา กังหันก๊าซขนาดจิ๋ว โดยมุ่งเน้นในส่วนของ Compressor และ Turbine โดยการสร้างแบบจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตรและ 8 มิลลิเมตร แล้วทำการทดลองที่อัตราส่วนความดันและอุณหภูมิที่เท่ากัน พบว่ากังหันขนาด 40 มิลลิเมตร ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าถึง 10 % ของประสิทธิภาพกังหันขนาด 8 มิลลิเมตร แต่มีความเร็วรอบในการทำงานที่ต่ำกว่าถึง 5 เท่า ของรอบการทำงานขนาด 8 มิลลิเมตร ดังนั้นปัญหาหลัก ๆ ของการลดขนาดกังหันก๊าซ คือต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพที่จะลดลงเมื่อลดขนาดและความแข็งแรงของวัสดุ เพื่อให้สามารถรองรับการทำงานที่ความเร็วรอบสูงและอุณหภูมิสูงได้

Dumand และคณะ [2] มีแนวคิดในการพัฒนากังหันขนาดเล็กเชิงตัวเลขที่ต้องการพลังงาน 10 W ถึง 100 W โดยพิจารณาห้องเผาไหม้ ซึ่งพบปัญหาอยู่ 3 ข้อ ในการลดขนาดของห้องเผาไหม้ ได้แก่ (1) ค่า Reynolds number มีค่าน้อย ทำให้การไหลเป็นแบบลามินาร์ ซึ่งผลที่ออกมาเป็นการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศและระหว่างก๊าซร้อนกับก๊าซบริสุทธิ์ในห้องเผาไหม้จะทำให้ได้ประสิทธิภาพที่ไม่ดี (2) Damköhler number มีค่าน้อยซึ่งในการเปรียบเทียบปฏิกิริยาเคมีนั้น จะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนมาก (3) สร้างแบบจำลอง 3 มิติที่มีรหัส CFD ของ ONERA โดยศึกษาการผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศ ซึ่งการทดลองที่ไม่มีการเผาไหม้ในระดับ Microscale ในช่องการเผาไหม้ ซึ่งการตั้งค่าสำหรับการศึกษาระเผาไหม้อยู่ระหว่างการพัฒนา

Ribaud [3] ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียทางอากาศพลศาสตร์ของ กังหันขนาดเล็กที่มีผลต่อความดันที่เพิ่มขึ้น โดยใช้จนวนกันความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพส่วนใหญ่จะมีการสูญเสียความร้อนอยู่ที่ห้องเผาไหม้จะเป็นแบบการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนและการแผ่รังสี โดยกังหันขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตรและจนวนกันความร้อนมีซิลิคอนคาร์ไบด์ประกอบอยู่ด้วยในกังหันขนาดเล็กนั้นจะต้องมีการสูญเสียความร้อนเนื่องจากความเสียดทาน แต่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้โดยการกำหนดช่องว่างระหว่างสเตเตอร์

Nagashima และ Teramoto [4] ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนา Ultra-Micro Gas Turbine ในทุกองค์ประกอบ ซึ่งส่วนหนึ่งของงานวิจัยเกี่ยวข้องกับการศึกษากังหัน 2 มิติในเรื่องของประสิทธิภาพและอัตราการไหลเชิงมวลโดยเปรียบเทียบกับมุมทางออกของใบกังหันพบว่า ที่มุมทางออกน้อยๆ (20-30 องศา) กังหันจะให้ประสิทธิภาพสูงจากนั้นค่อยๆลดลงเมื่อมุมเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันอัตราการไหลเชิงมวลกลับมีค่าน้อยที่มุมทางออกน้อยและเพิ่มขึ้นเมื่อมุมทางออกเพิ่มขึ้น เนื่องจากกำลังของกังหันประกอบด้วยอัตราการไหลและประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงต้องหาจุดทำงานที่อัตราการไหลและประสิทธิภาพเหมาะสมเพื่อให้ได้กำลังสูงสุด

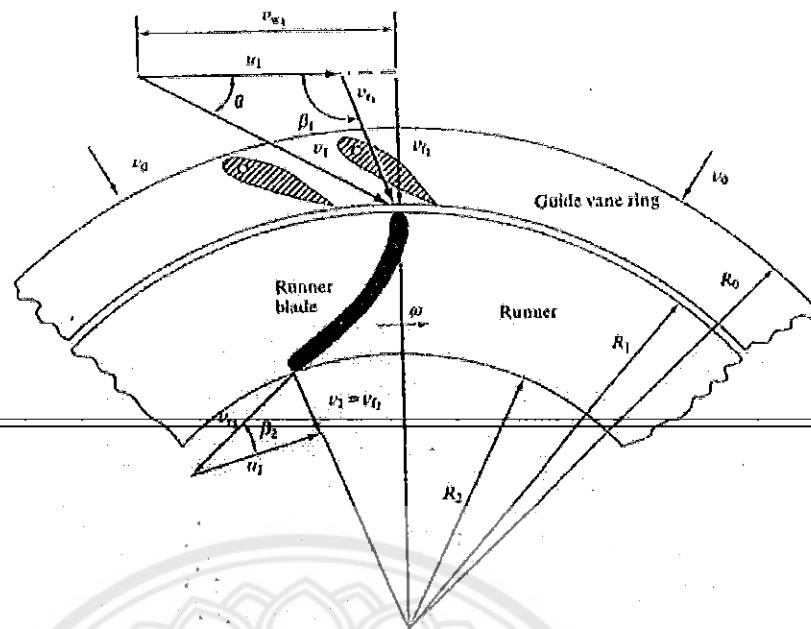
## 2.2 ทฤษฎีของการคำนวณกังหัน

การศึกษาการทำงานของเครื่องจักรกล [5] ของไหลจะอาศัยทฤษฎีการวิเคราะห์เชิงอนุพันธ์ของของไหลเพื่อบอกพฤติกรรมของของไหลและทฤษฎีเครื่องจักรกลของไหลสำหรับกังหันเพื่อวิเคราะห์กำลังที่สร้างจากกังหัน ในหัวข้อนี้จะอธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทั้งสองทฤษฎีดังนี้

### 2.2.1 ทฤษฎีเครื่องจักรกลของไหลสำหรับกังหัน

กังหันเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ดึงพลังงานจากของไหลโดยพลังงานนั้นมาจากความสูงหรือความดันของของไหลที่ทางเข้ากังหัน กังหันมีด้วยกัน 2 ประเภทคือ กังหันแบบแรงดล เป็นกังหันที่ดึงพลังงานโดยใช้การชนของเจ็ทของของไหลกับใบกังหัน เหมาะที่จะใช้กับความดันสูง เช่น กังหันเพลตัน เป็นต้น และประเภทที่ 2 คือ กังหันแบบแรงปฏิกิริยาซึ่งจะดึงพลังงานโดยใช้แรงปฏิกิริยาที่เกิดจากผลต่างของความดันด้านบนและด้านล่างของใบพัดกังหันทำงานได้ที่ความดันต่ำเช่น กังหันฟรานซิส กังหันแคปแลน เป็นต้น ดังนั้นกังหันที่เหมาะสมที่จะใช้กับการไหลในหลอดเลือดคือกังหันแบบแรงปฏิกิริยาโดยจะใช้เป็นกังหันฟรานซิสเพราะเลือกมีความดัน

การออกแบบใบกังหันต้องอาศัยทฤษฎีเครื่องจักรกลของไหลมาช่วยในการวิเคราะห์ การออกแบบสามเหลี่ยมความเร็วที่ทางเข้าและทางออกจะออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุดซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อความเร็ว  $v_{w1} = 0$  และความเร็ว  $v_2 = v_{w2}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ดังนั้นจึงจะใช้เงื่อนไขเป็นเงื่อนไขในการออกแบบ



รูปที่ 2.1 แสดงสามเหลี่ยมความเร็วที่ทางเข้าและออกจากใบพัด

กำลังที่ผลิตจากกังหันสามารถหาได้จากผลต่างของความเร็วระหว่างทางเข้าและทางออก คูณกับอัตราการไหลของของไหลที่ไหลผ่านกังหัน ดังแสดงในสมการที่ 1

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

เมื่อออกแบบสภาวะทางออกให้  $v_{w2} = 0$  จะทำให้ได้กำลังสูงสุด สำหรับกำลังสูงที่สุดที่กังหันสามารถสร้างได้มีค่าเป็น

$$E_{o,max} = \dot{m}(u_1 v_{w1}) \quad (2.2)$$

กำลังที่ทางเข้าของกังหันได้มาจากความดันหรือความสูงของของไหลซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี

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

เมื่อ H คือ head รวมจากแหล่งต้นน้ำ

Q คือ อัตราการไหลผ่านกังหัน

ดังนั้นจะได้ประสิทธิภาพรวม (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

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

## 2.2.2 การวิเคราะห์เชิงอนุพันธ์ของของไหล

เพื่อให้สามารถอธิบายคุณสมบัติแบบจุดต่อจุดจึงทำให้ไม่สามารถใช้สมการในรูปอินทิเกรตได้ ดังนั้นการศึกษากาโรไหลจึงต้องพิจารณาสมการในรูปอนุพันธ์แทนสำหรับการวิเคราะห์การไหลสิ่งที่จำเป็นต้องศึกษาคือกฎอนุรักษ์มวลและกฎอนุรักษ์โมเมนตัม

### กฎอนุรักษ์มวล

สมการความต่อเนื่อง ถ้าการไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_\theta}{r \partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (2.6)$$

### กฎอนุรักษ์โมเมนตัม

สำหรับการวิเคราะห์การไหลจะใช้ทฤษฎีของนิวตันโดยประยุกต์ใช้ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์

กฎข้อสองของนิวตันในรูปสมการเชิงอนุพันธ์

$$\rho \left( \frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\theta^2}{r} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{\partial u_r}{r \partial r} - \frac{u_r}{r^2} + \frac{\partial^2 u_r}{r^2 \partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{2 \partial u_\theta}{r^2 \partial \theta} \right) + F_r \quad (2.7)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} + \frac{\partial u_z}{r \partial r} - \frac{u_z}{r^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + \frac{2 \partial u_r}{r^2 \partial \theta} \right) + F_z \quad (2.8)$$

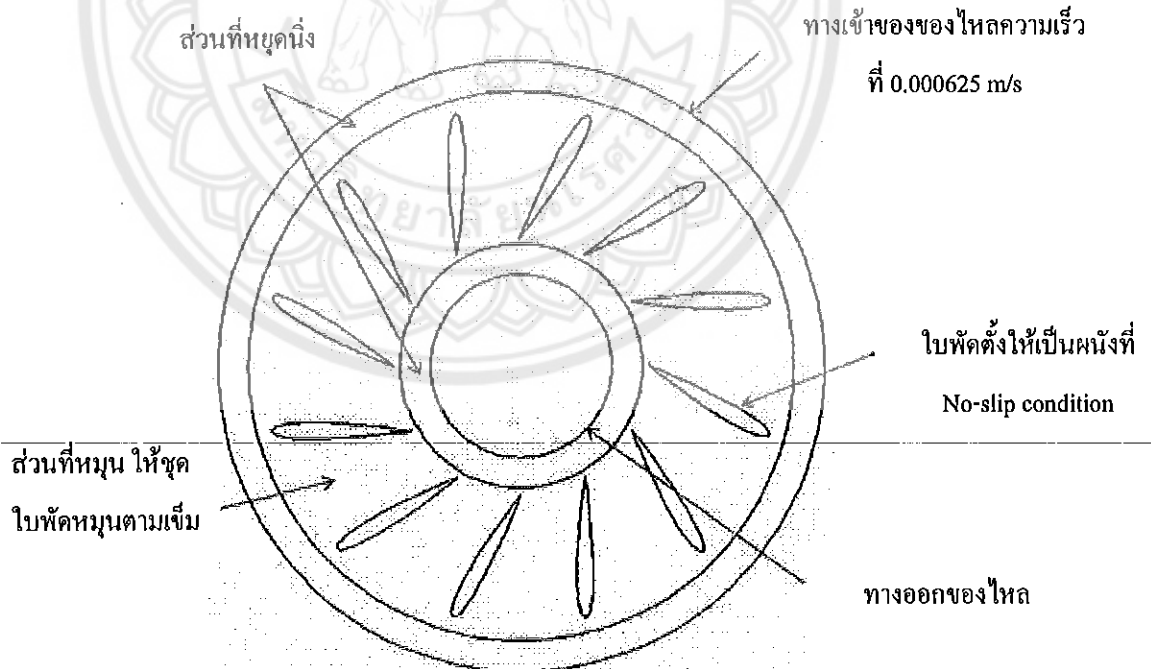
$$\rho \left( \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} + \frac{\partial u_z}{r \partial r} + \frac{\partial^2 u_z}{r^2 \partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) + F_z \quad (2.9)$$

สำหรับของไหลที่เป็นนิวทอนเนียน (ความหนืดคงที่) สมการนิวตันจะเรียกว่าสมการ

Navier-Stokes

### 2.3 แบบจำลองของกังหันขนาดจิ๋ว

แบบจำลองกังหันขนาดจิ๋วสามารถออกแบบได้โดยการใช้โปรแกรม AutoCAD หลังจากนั้น Import เข้าสู่โปรแกรม COMSOL แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แบบจำลองของกังหันขนาดเล็ก

อัตราการไหลของของไหลที่ผ่านเข้าชุดใบพัดสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ขอบใบพัดคูณ  
กับความเร็วที่ตั้งฉากกับพื้นที่ดังกล่าว

$$Q_{in} = (\pi D_{im} B) v_{f1} \quad (2.10)$$

$$Q_{out} = (\pi d_{im} B) v_{f2} \quad (2.11)$$

ซึ่งอัตราการไหลสามารถหาได้จากอัตราการไหลของเลือด(เลือดไหลที่  $Re=1000$ ) ดังนี้

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

ดังนั้นเราสามารถเขียน  $Re$  ในรูปของอัตราการไหลได้ ดังนี้

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

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

สมการนี้คือ สมการอัตราการไหลของเลือดที่ขึ้นอยู่กับ  $Re$  และ เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้น  
เลือด

จากสมมุติฐาน ของไหลอัดตัวไม่ได้(ความหนาแน่นคงที่)

$$\text{จะได้ } Q_{in} = Q_{out} = Q$$

สามารถหาความเร็วที่ทางเข้าและทางออกได้ คือ

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



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

พิจารณา สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางออกซึ่งออกแบบให้ความเร็วสัมบูรณ์อยู่ในแนวรัศมี ( $v_{w2} = 0$ ) จะทำให้เกิดกำลังสูงสุด

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

$u_2$  คือความเร็วปลายใบพัดที่ทางออกซึ่งขึ้นอยู่กับ  $v_{f2}$  และมุมปลายใบพัด

ดังนั้นเราสามารถหาความเร็วเชิงมุมในการหมุนของใบพัดที่ทำให้เกิด  $E_{max}$  ได้

$$\text{จาก } u_2 = \frac{\omega d_{im}}{2}$$

$$\omega = \frac{2u_2}{d_{im}}$$

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

แต่เนื่องจากใบพัดเป็นปัญหา 2 มิติ (ไม่คำนึงถึงความหนาของใบพัด) จึงจะพิจารณาใช้ค่าต่างๆเป็นค่าต่อหน่วยความหนา เพื่อให้การคำนวณเป็น 2 มิติ

จะได้ความเร็วต่อความหนา คือ

$$u_{f2} = \frac{Q}{\pi d_{im}} \quad (2.16)$$

สมการนี้คือ ความเร็วต่อความหนาที่ทางออกของใบพัด

$$\text{และได้ } u_2 = \frac{Q}{\pi d_{im}} \cot \beta_2 \quad (2.17)$$

$$\text{จะได้ความเร็วรอบที่จุดออกแบบเป็น } N = \frac{60 Q \cot \beta_2}{(\pi d_{im})^2}$$

ค่าเหล่านี้เป็นค่าจำเป็นเพราะที่ไม่ขึ้นอยู่กับความหนาของใบพัด ซึ่งจะนำไปใช้ในการกำหนด  
เริ่มต้นในการสร้างแบบจำลองต่อไป

### การหาค่าสั่งของกังหัน

จากสมการที่ (2.10) ทราบอัตราการไหลของเลือดในเส้นเลือดซึ่งเท่ากับอัตราการไหล  
ของเลือดที่ผ่านเข้ากังหัน และจากสมการที่ (2.11) กับ (2.12) จะได้ความเร็วในแนวรัศมีของของ  
ไหลที่ทางเข้าและออกเป็น

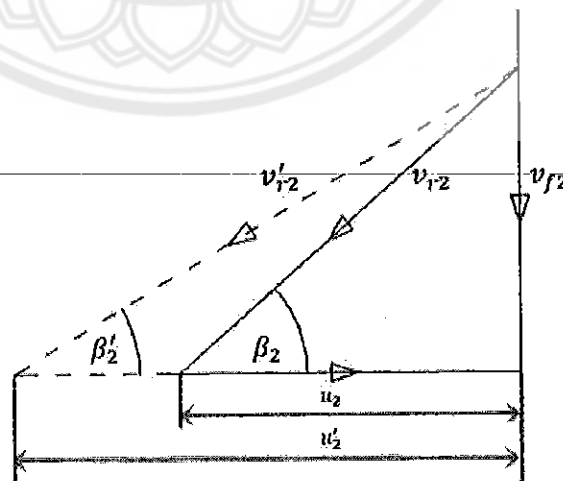
$$\text{ความเร็วของของไหลที่ผ่านกังหัน} \quad v_{f1} = \frac{Q}{\pi D_{im} B} \quad \text{และ} \quad v_{f2} = \frac{Q}{\pi d_{im} B}$$

จากสามเหลี่ยมความเร็วรูปที่ (2.3) จะได้ความเร็วปลายใบพัดเป็น

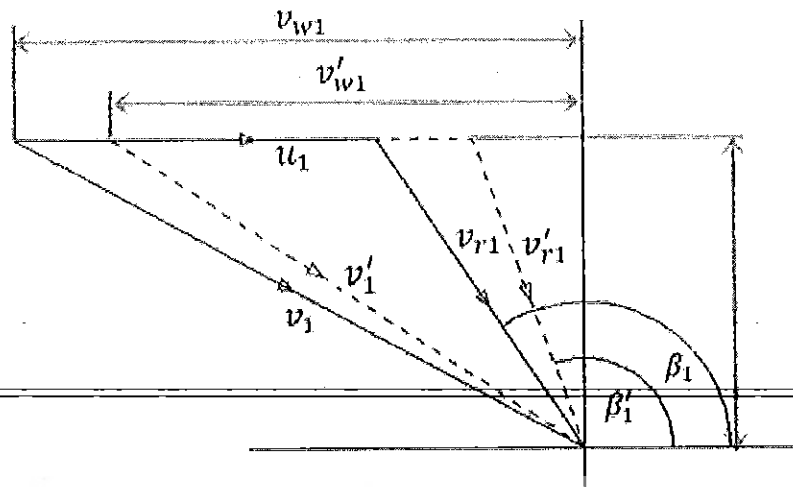
$$u_2 = v_{f2} \cot \beta_2$$

แล้วจะได้ความเร็วปลายใบพัดเป็น

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



รูปที่ 2.3 สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางออกใบพัด



รูปที่ 2.4 สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางเข้าใบพัด

จากรูปที่ (2.4) และความสัมพันธ์สามเหลี่ยมมุมฉาก

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

โดยที่  $v_1$  ได้จากการทดลอง ดังนั้นจึงสามารถหาค่า  $v_{w1}$  ได้

ดังนั้นเราจึงสามารถหาค่าได้จาก

$$Power = \dot{m} v_{w1} u_1$$

$$Power = \dot{m} (v_{f2} \cot \beta_2) \frac{d_{im}}{D_{im}} \sqrt{v_1^2 - v_{f1}^2} \quad (2.20)$$

ทำการเขียนกราฟกำลังที่จำนวนใบพัด 14-22 ใบพัด โดยกำหนดให้มุมทางออกใบพัดคงที่ที่ 60 องศา และเขียนกราฟมุมทางออกใบพัด ( $\beta_2$ ) ที่ 50-70 องศา

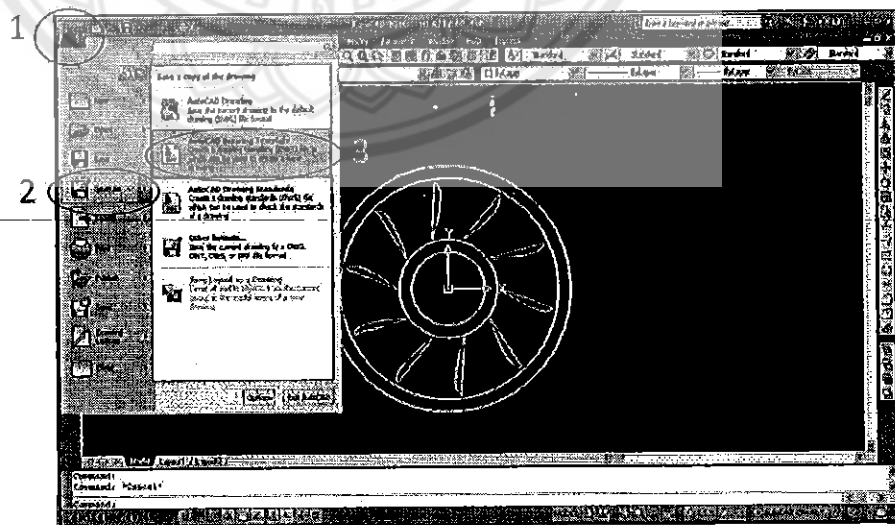
### การสร้างแบบจำลองของกังหันขนาดจิ๋ว

ในบทนี้นั้นเป็นการอธิบายเกี่ยวกับวิธีและขั้นตอนการสร้างแบบจำลองโดยเริ่มจากการเขียนแบบกังหันขนาดจิ๋วในโปรแกรม AutoCAD และนำไฟล์เขียนแบบเข้าสู่โปรแกรม COMSOL จากนั้นทำการตั้งค่าเริ่มต้นและกำหนดค่าการไหลของของไหลและการเคลื่อนที่ของใบพัด หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์การไหลของแบบจำลองกังหันขนาดจิ๋วโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

#### 3.1 การนำไฟล์เขียนแบบเข้าโปรแกรม COMSOL

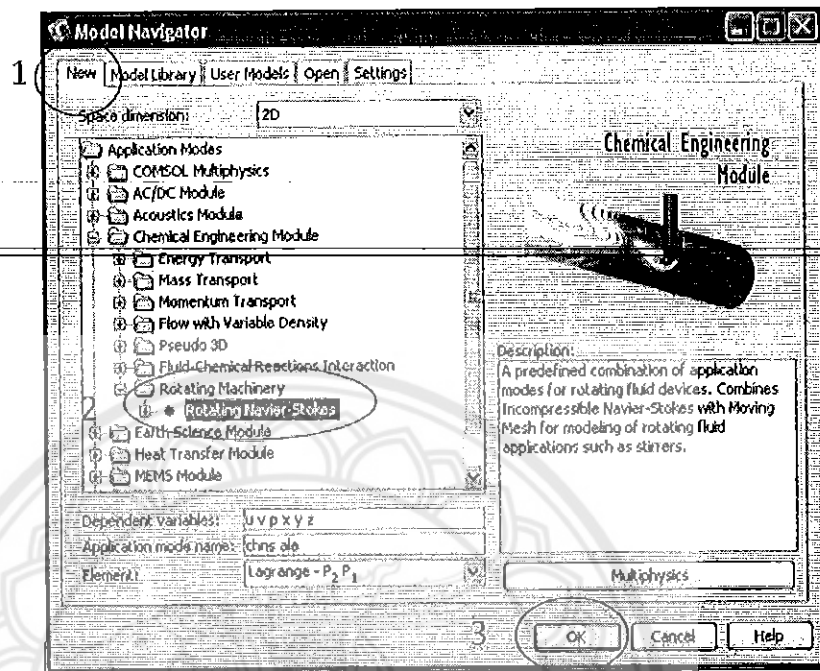
เนื่องจากใบกังหันเขียนขึ้นด้วยโปรแกรม AutoCAD จึงต้องมีการนำไฟล์เขียนแบบเข้าโปรแกรม COMSOL ในการวิเคราะห์การไหลด้วยโปรแกรม COMSOL มีขั้นตอนหลักๆ โดยเริ่มจากเลือกโหมดการทำงานจากหน้าต่าง Model Navigator หลังจากนั้นทำการนำเข้าไฟล์ AutoCAD ที่เตรียมไว้ เพื่อที่จะเริ่มทำการทดลอง โดยมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

3.1.1 เมื่อทำการเขียนแบบกังหันขนาดจิ๋วในโปรแกรม AutoCAD โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 10 มิลลิเมตรเสร็จแล้ว ทำการบันทึกไฟล์เป็นนามสกุล .dxf ดังแสดงในรูปที่ 3.1



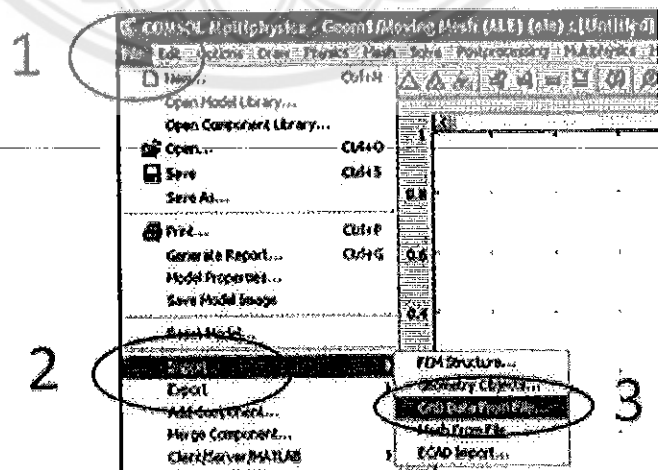
รูปที่ 3.1 บันทึกไฟล์เป็นนามสกุล .dxf

- 3.1.2 เริ่มต้นทำการเปิดโปรแกรม COMSOL ในโหมด Rotating Navier-Stokes โดยใช้คำสั่ง คลิกไอคอน COMSOL >> New >> Fluid-Chemical Module >> Rotating Machine >> Rotating Navier-Stokes ดังแสดงในรูปที่ 3.2



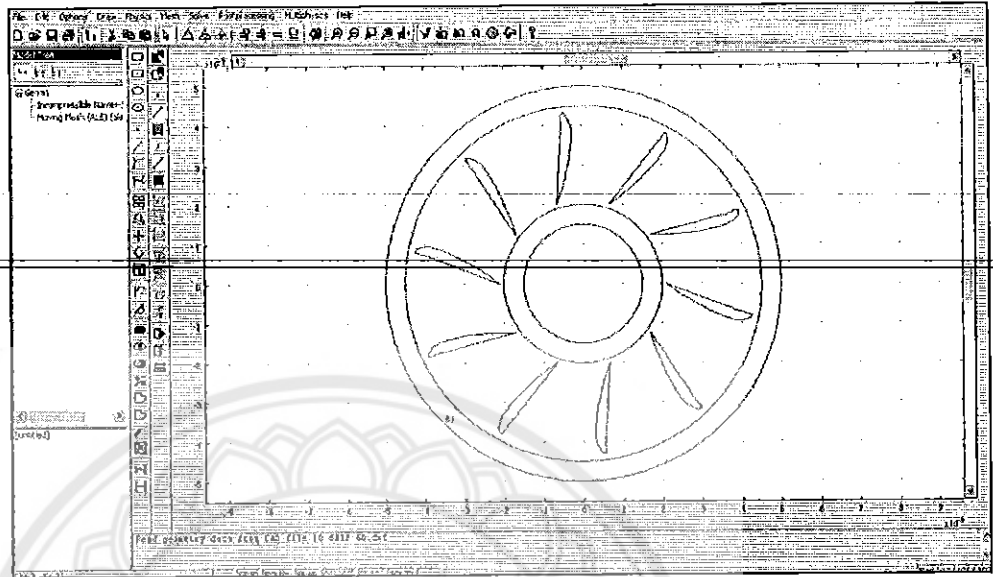
รูปที่ 3.2 เลือกชนิดของโหมดในการวิเคราะห์

- 3.1.3 ทำการนำไฟล์เขียนแบบจาก โปรแกรม AutoCAD เข้าสู่โปรแกรม COMSOL โดยใช้คำสั่งคลิก File >> Import >> CAD Data From file >> Import แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการนำ AutoCAD file เข้าสู่โปรแกรม COMSOL

3.1.4 จากนั้นจะได้แบบจำลองชุดใบพัดติดตั้งแสดงในรูปที่ 3.4 โดยมีลักษณะแบบจำลองเป็นเส้น



รูปที่ 3.4 การนำไฟล์เข้าสู่โปรแกรมสร้างจลน์

### 3.2 การกำหนดลักษณะใบพัด

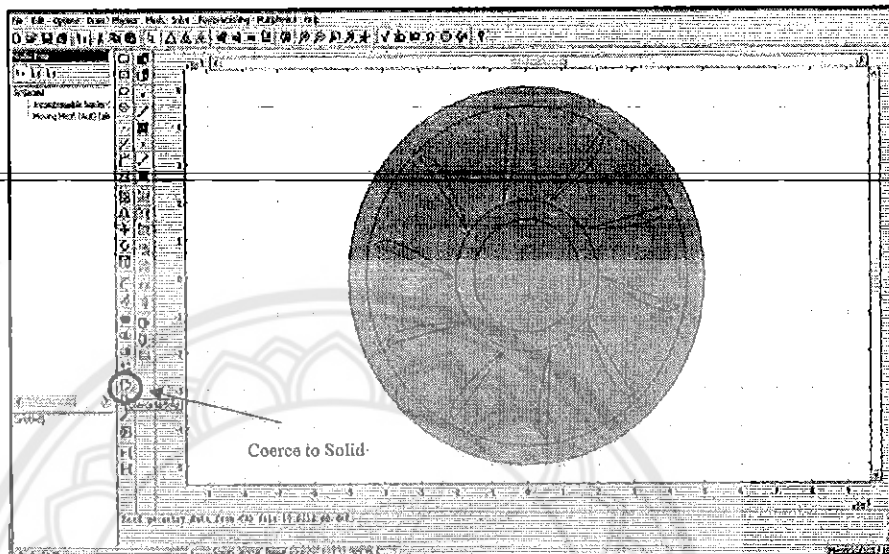
ขั้นตอนการกำหนดลักษณะใบพัดสามารถแสดงแนวคิดสรุปเป็นผังได้ดังนี้

สร้างเนื้อใบพัดโดยเปลี่ยนแบบจำลองจาก  
เส้นเป็นของแข็ง

เตรียมแบบจำลองก่อนการประกอบ  
คือสร้าง Rotor และ Stator

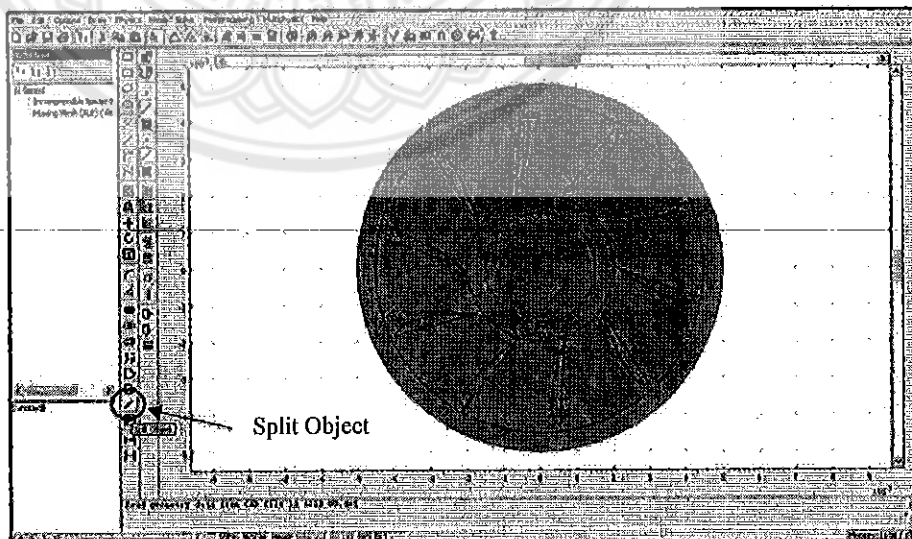
ทำการประกอบแบบจำลองเป็นชิ้นเดียวกัน

- 3.2.1 เนื่องจากแบบจำลองนั้นเริ่มต้นเป็นเส้น แต่ในการวิเคราะห์จะต้องแปลงให้แบบจำลองเป็นของแข็ง จึงต้องทำการเปลี่ยน โดยกด **Ctrl + A** จากนั้นคลิก **Coerce to Solid** ดังแสดงในรูปที่ 3.5



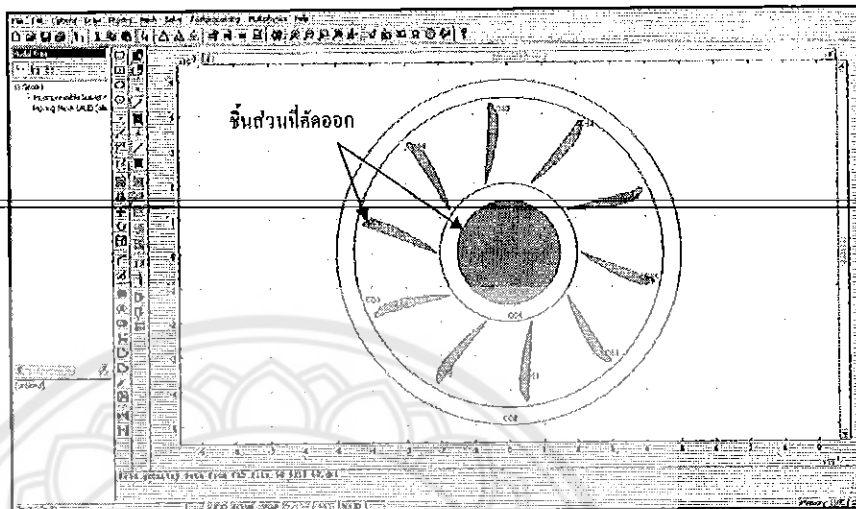
รูปที่ 3.5 ชิ้นงานที่มีคุณลักษณะเป็นของแข็ง

- 3.2.2 ทำการแยกส่วนของแบบจำลองออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ เพื่อให้แต่ละชิ้นส่วนเป็นอิสระต่อกัน โดยคลิก **Split Object** ซึ่งเป็นรูปประเปิด ดังแสดงในรูปที่ 3.6



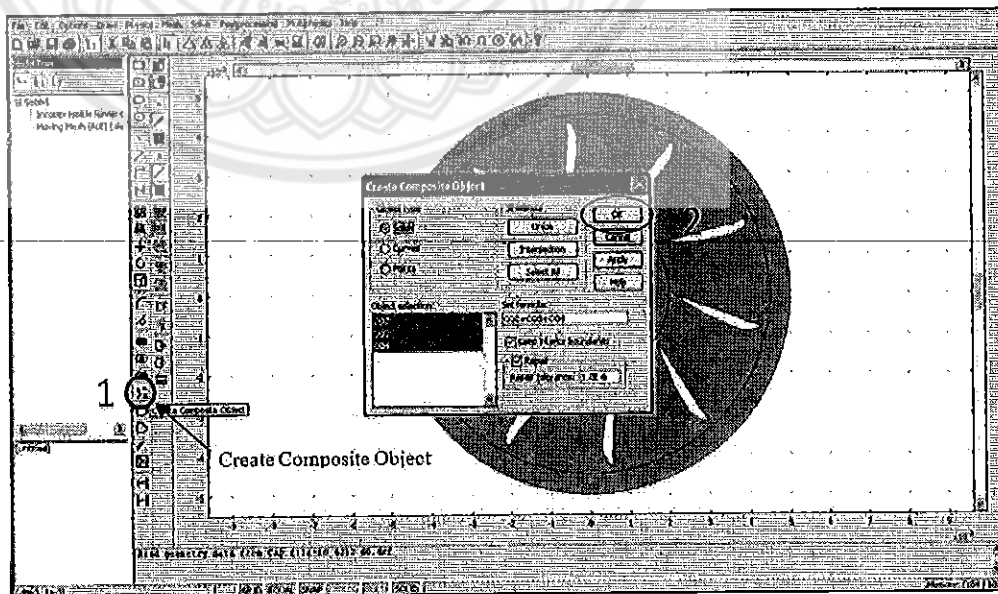
รูปที่ 3.6 แยกชิ้นส่วนออกจากกัน ด้วยคำสั่ง Split Object

- 3.2.3 ทำการตัดเนื้อของแข็งของใบพัดและวงกลมด้านในของแบบจำลองเพื่อทำเป็นทางออกของของไหล ส่วนที่ถูกตัดออกนั้นจะเป็นส่วนที่แรเงาแสดงในรูปที่ 3.7 โดยกด Ctrl ค้างจากนั้นคลิกส่วนที่แรเงาทั้งหมด >> Delete



รูปที่ 3.7 การตัดบางส่วนของแข็ง

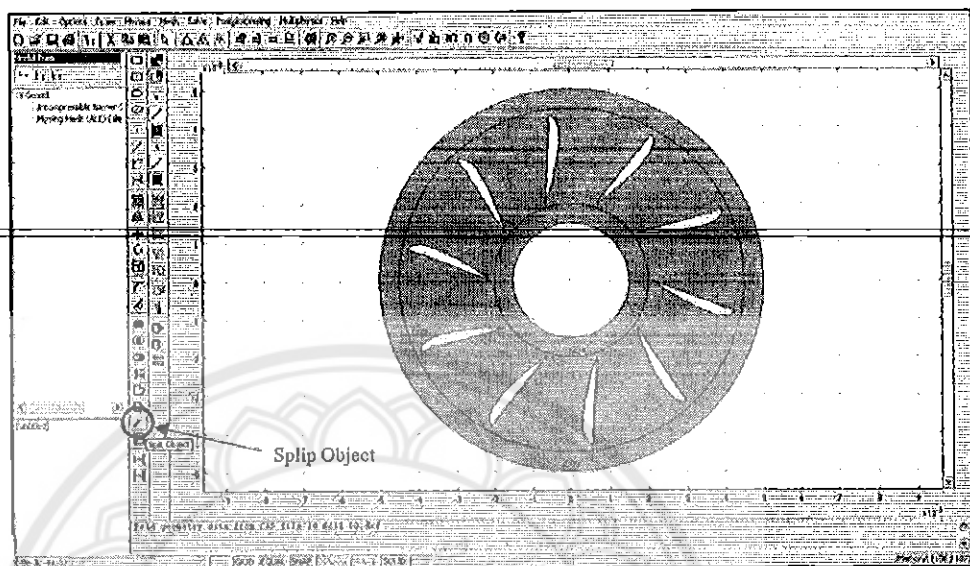
- 3.2.4 ทำการรวมชิ้นส่วนทั้งหมดให้เป็นชิ้นเดียวกันโดย กด Ctrl + A >> Create Composite Object >> OK ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 รวมชิ้นงาน

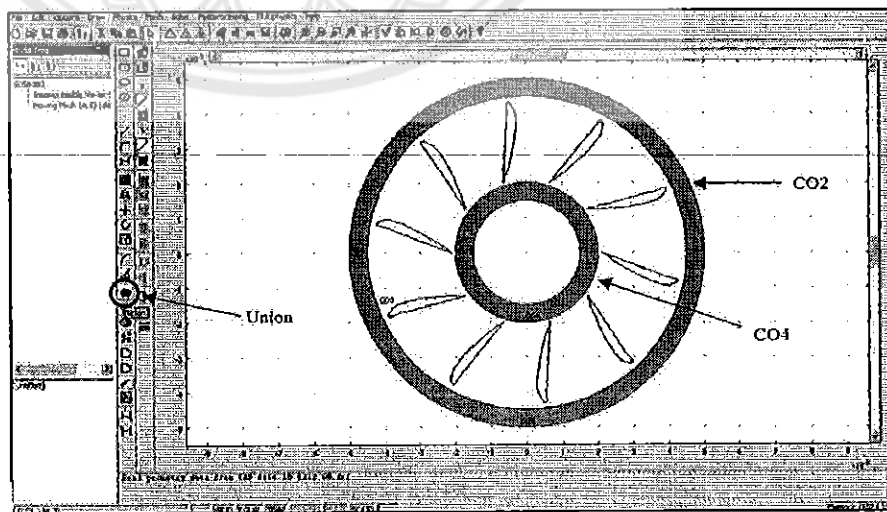


- 3.2.5 ทำการแยกชิ้นส่วนของแบบจำลองออกเป็น 3 ส่วนโดยกด Split Object เพื่อให้แบบจำลองแยกเป็น Stator (วงแหวนนอกและใน) และ Rotor(ชุดใบพัด) ดังแสดงในรูปที่ 3.9



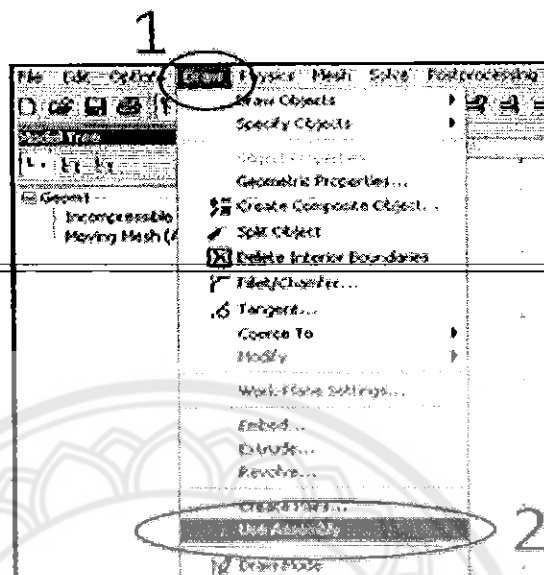
รูปที่ 3.9 แยกชิ้นงานออก

- 3.2.6 ทำการรวม Stator (วงแหวนนอกแทนด้วยสัญลักษณ์ภาพ CO2 และวงแหวนในแทนด้วยสัญลักษณ์ภาพ CO4) เข้าด้วยกันเพื่อใช้เป็นส่วนหยุดนิ่งหรือ Stator โดยกด Shift ค้างไว้แล้วคลิกวงแหวนรอบนอกกับวงแหวนในแล้วจึงกดปุ่ม Union ดังแสดงในรูปที่ 3.10



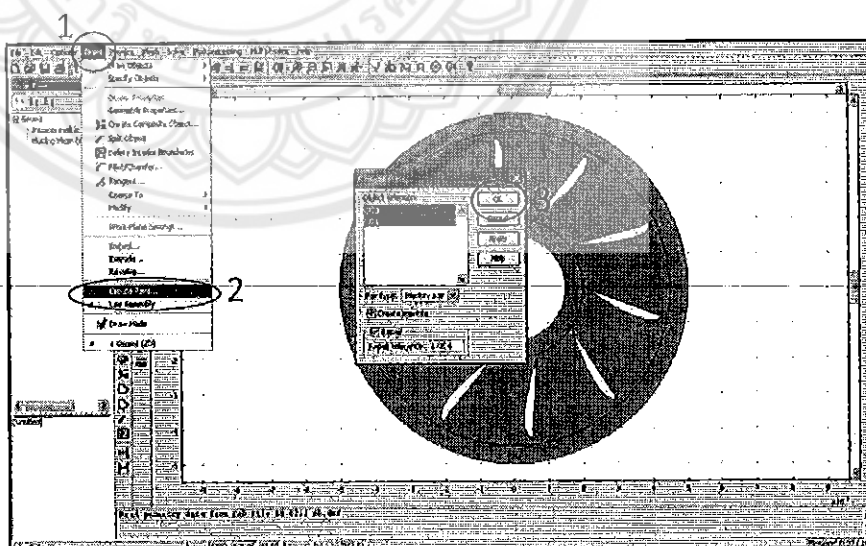
รูปที่ 3.10 รวมวงแหวนรอบนอกและวงแหวนด้านใน

- 3.2.7 ทำการประกอบแบบจำลองทั้งหมดเพื่อให้ทั้งสองชิ้นส่วนสัมพันธ์เป็นชิ้นเดียวกัน โดยกด Ctrl + A >> Draw >> Use Assembly ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ประกอบชิ้นงานทั้งหมด

- 3.2.8 ทำการเปลี่ยนลักษณะเส้นระหว่าง Stator กับ Rotor (ทั้งนอกและใน) จากที่เป็นผนังให้เป็นช่องเปิด เพื่อให้ของไหลสามารถไหลผ่านได้ โดยเลือก Draw >> Create Pairs... >> OK ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การเปลี่ยนลักษณะเส้นระหว่าง Stator กับ Rotor จากผนังให้เป็นช่องเปิด

### 3.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง

การตั้งค่าเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตแสดงเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 3.13 โดยเริ่มจากการตั้งค่าการหมุนของใบพัดในโหมด Moving mesh ALE ต่อมาเป็นการกำหนดสมบัติของไหลรวมทั้งขอบเขตของการไหลในโหมด Incompressible Navier – Stokes

#### ก. การเลือกโหมดการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ (แบบจำลองกังหัน)

เลือกโหมดการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของของแข็ง(Moving mesh ALE)

กำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ปัญหา

กำหนดค่า Rotation Speed

#### ข. การเลือกโหมดวิเคราะห์การไหล

เลือกโหมดวิเคราะห์การไหล (Navier – Stokes)

ใส่ค่าความหนาแน่นและความหนืดของของไหล

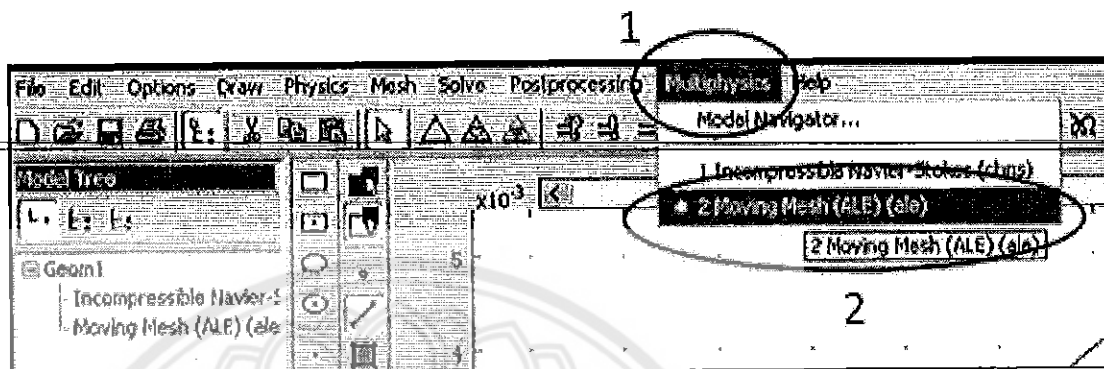
กำหนดขอบเขตทางออกของ

กำหนดเงื่อนไขขอบเขต

รูปที่ 3.13 แผนผังการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง

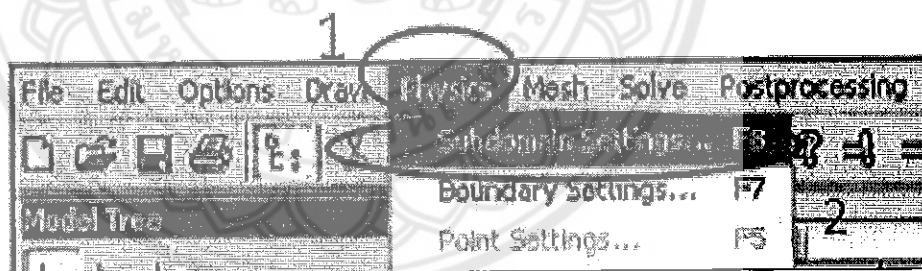
จากผังแนวคิดเราสามารถแสดงขั้นตอนการดำเนินการลงในโปรแกรม COMSOL ได้ดังนี้

- 3.3.1 กำหนดการหมุนของชุดใบพัดโดยต้องอยู่ในโหมด Moving Mesh เพื่อการกำหนดทิศทาง การหมุน, ส่วนที่หมุน, และความเร็วในการหมุนได้โดยใช้คำสั่ง Multiphysics >> Moving Mesh (ALE) ดังแสดงในรูปที่ 3.14



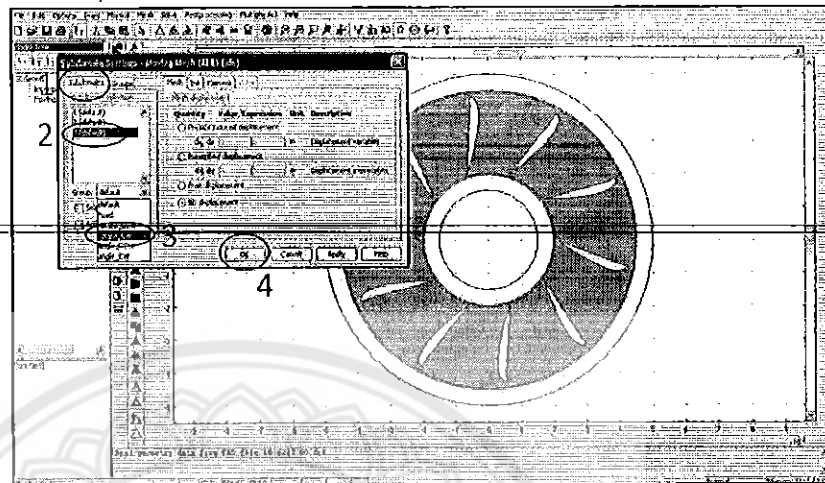
รูปที่ 3.14 เลือกโหมด Moving Mesh (ALE)

- 3.3.2 เพื่อกำหนดขอบเขตให้กับแบบจำลอง โดยเลือก Physics >> Subdomain setting ดังแสดงในรูปที่ 3.15



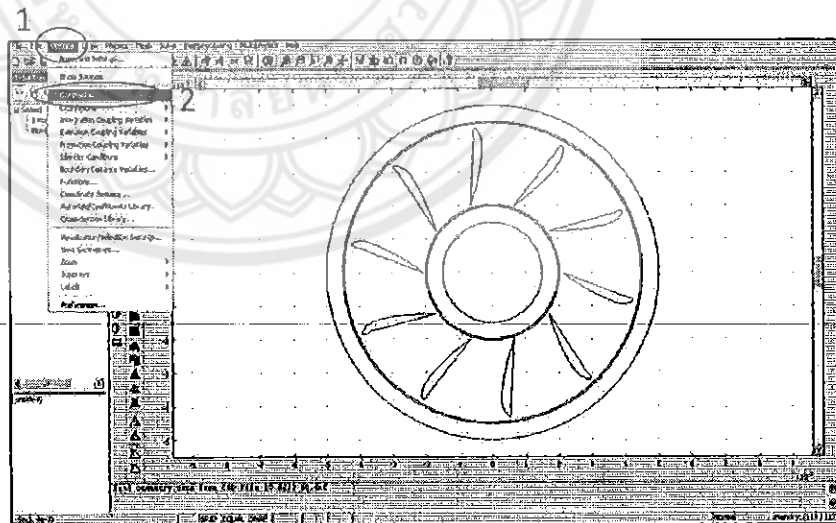
รูปที่ 3.15 เลือก-Subdomain setting

- 3.3.3 กำหนดให้ชุดใบพัดหมุนตามเข็มนาฬิกา ส่วนวงแหวนนอกและในกำหนดให้หยุดนิ่งเนื่องจากเป็น Stator โดยเลือก Subdomain >> 3(default) >> ช่อง Group เลือก Rotate (CW) >> OK ดังแสดงในรูปที่ 3.16



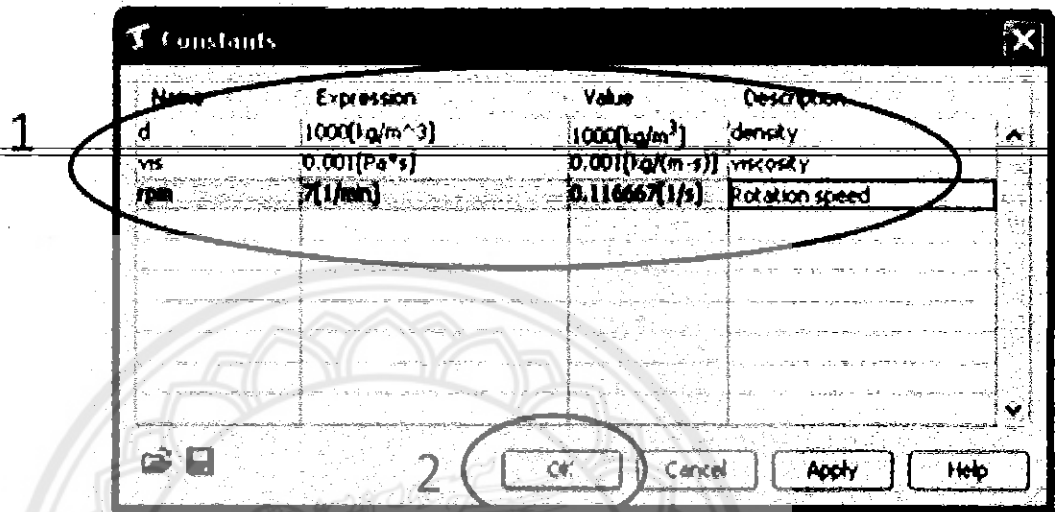
รูปที่ 3.16 การกำหนดทิศทางการหมุนของชุดใบพัด

- 3.3.4 กำหนดคุณสมบัติของของไหล โดยเลือก Option >> Constants... ดังแสดงในรูปที่ 3.17



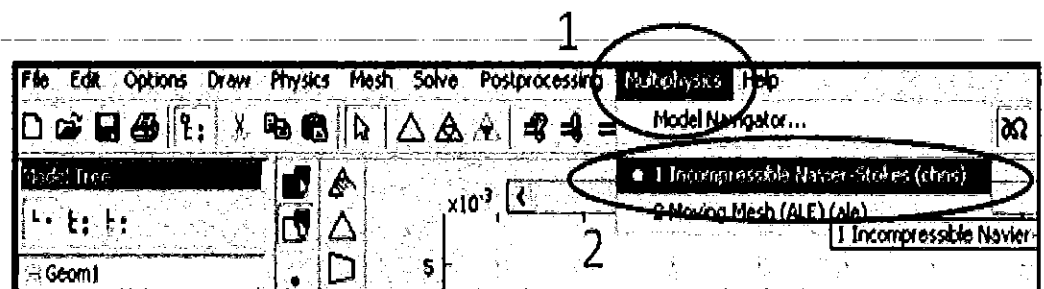
รูปที่ 3.17 กำหนดคุณสมบัติของของไหล

- 3.1.1 ทำการกำหนดค่าสมบัติของไหลและความเร็วการหมุน โดยให้ค่า Density = 1000 kg/m<sup>3</sup>, Viscosity = 0.001 Pa\*s, Rotation speed = 7 rpm >> OK ดังแสดงในรูปที่ 3.18



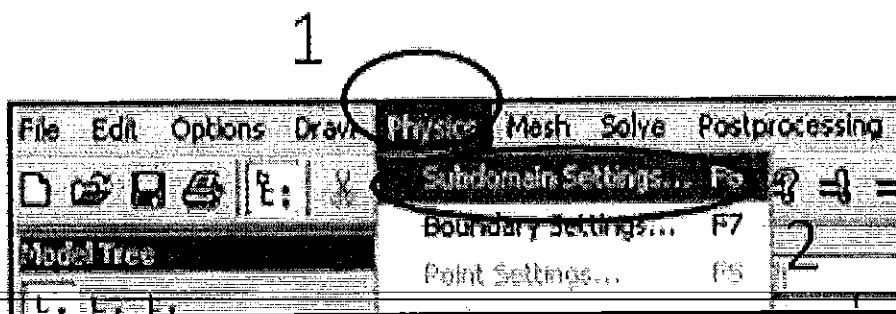
รูปที่ 3.18 กำหนดคุณสมบัติของการไหล

- 3.1.2 เปลี่ยนโหมดเป็น Incompressible Navier-Stokes (chns) เพื่อทำการกำหนดลักษณะการไหลและเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองโดยเลือก Multiphysics >> Incompressible Navier-Stokes (chns) ดังแสดงในรูปที่ 3.19



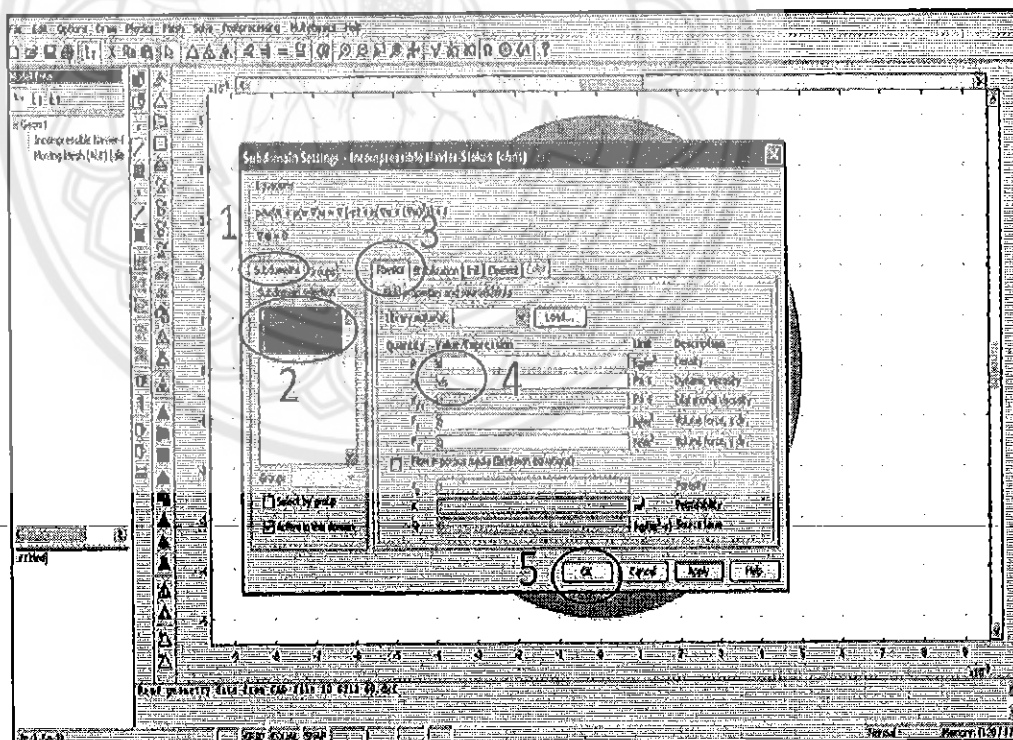
รูปที่ 3.19 เลือกโหมด Incompressible Navier-Stokes (chns)

- 3.3.7 ทำการกำหนดคุณสมบัติของไหลที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยเลือก Physics >> Subdomain setting ดังแสดงในรูปที่ 3.20



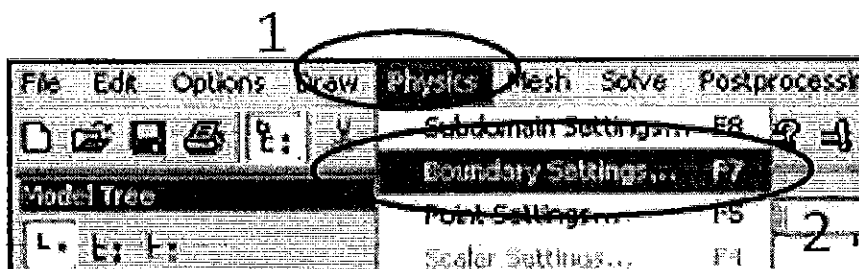
รูปที่ 3.20 กำหนดคุณสมบัติของไหล

- 3.3.8 เมื่อคลิก Subdomain setting จะปรากฏหน้าต่างรูปที่ 3.21 ขึ้นมา จากนั้นทำการกำหนดสมบัติต่างๆของของไหลโดยกด Shift ค้าง >> คลิกเลือก 1,2,3 ในช่อง Group selection จากนั้นกำหนดค่า Density = d, Dynamic Viscosity = vis >> OK



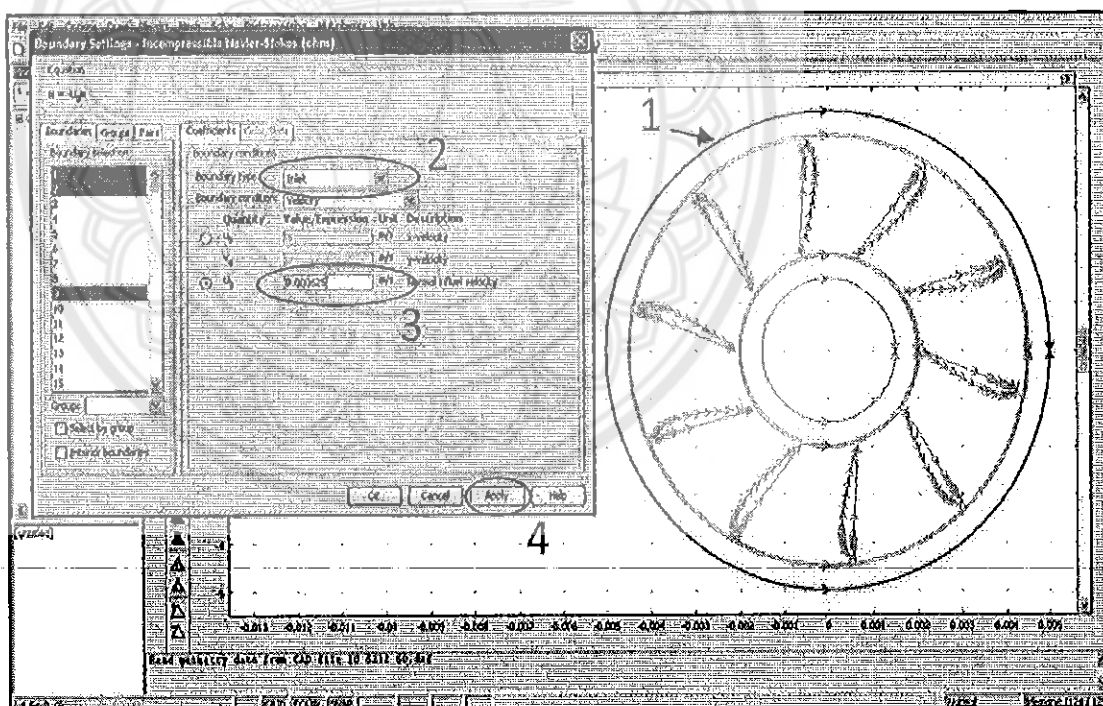
รูปที่ 3.21 การกำหนดตัวแปรของค่าคงที่

3.3.9 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองโดยเลือก Physics >> Boundary Setting  
 ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 การกำหนดขอบเขตแบบจำลอง

3.3.10 กำหนดทางเข้าของของไหลโดย คลิกเส้นวงนอกของแบบจำลองทั้งหมด  
 (หมายเลข 1) >> ช่อง Boundary type เลือก inlet >> กำหนดความเร็วของไหล  
 $U_0 = 0.000625 \text{ m/s}$  >> OK ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 กำหนดทางเข้าของของไหล

15507376

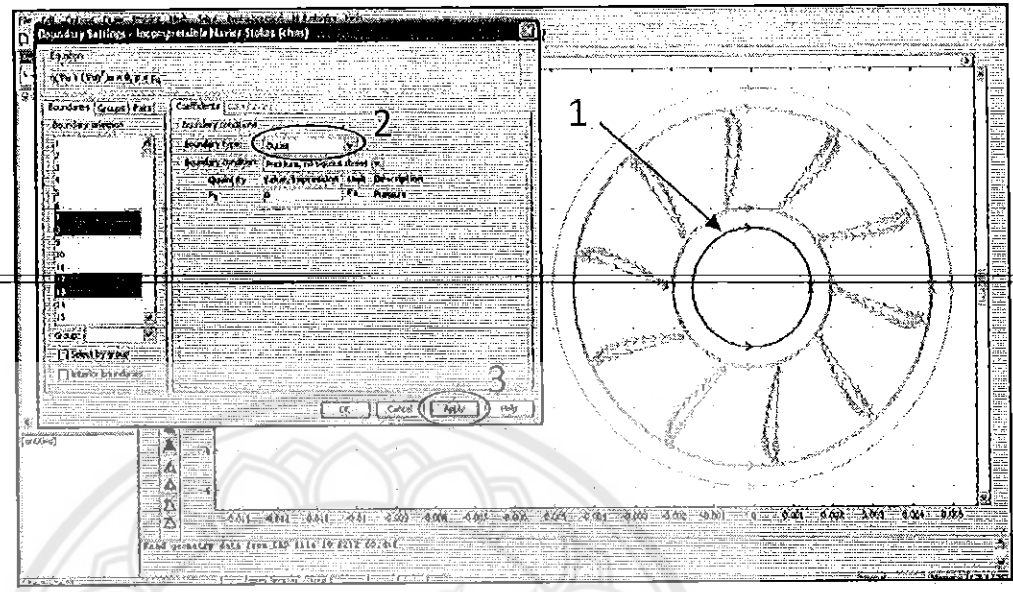
ป/ร.

๕ ๕14 ๗

2๕๕๙

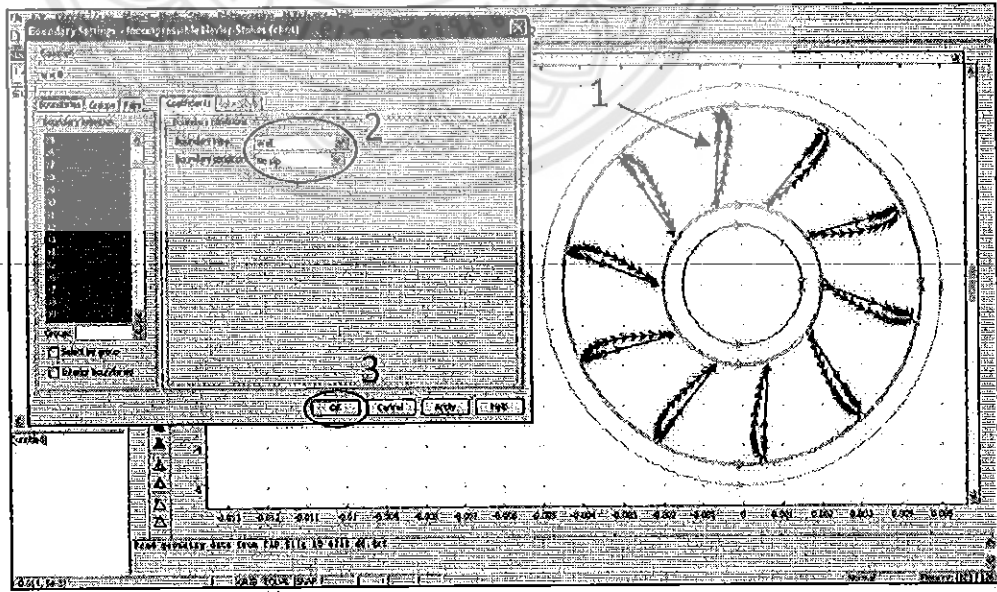


3.3.11 กำหนดทางออกของของไหลโดย คลิกเส้นวงในของแบบจำลองทั้งหมด (หมายเลข 1) >> ช่อง Boundary type เลือก outlet >> OK ดังแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 กำหนดทางออกของของไหล

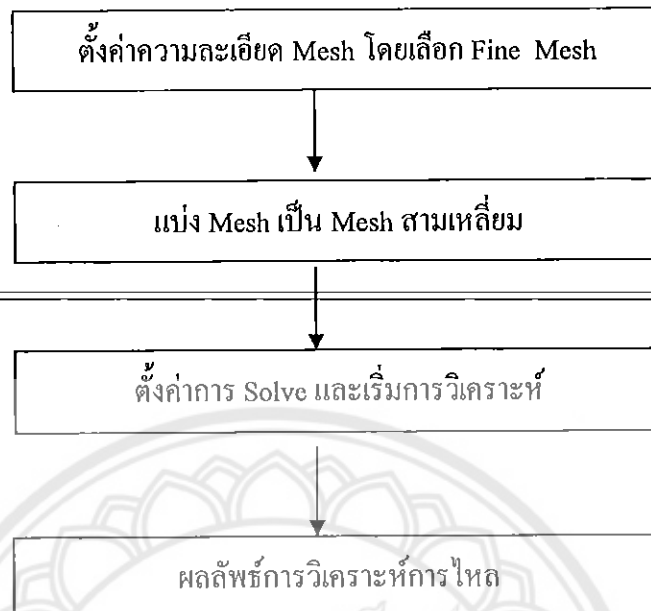
3.3.12 กำหนด Boundary type ของชุดใบพัด โดยคลิกเลือกใบพัดทั้งหมด(หมายเลข 1) >> ช่อง Boundary type เลือก Wall >> OK ดังแสดงในรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 กำหนด Boundary type ของชุดใบพัด

### 3.4 การวิเคราะห์ผลลัพธ์

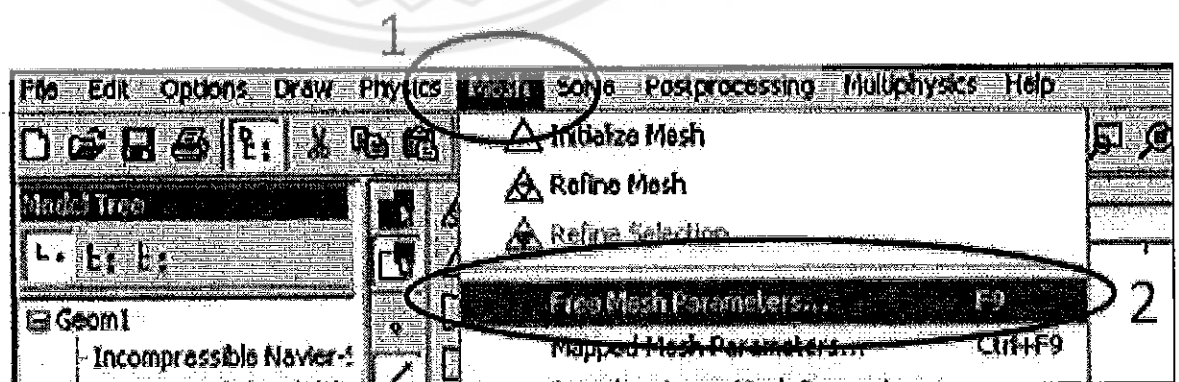
ขั้นตอนการวิเคราะห์สามารถแสดงเป็นแผนผังได้ดังแสดงในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ผังแนวคิดของการวิเคราะห์ผลของการไหลผ่านกั้น

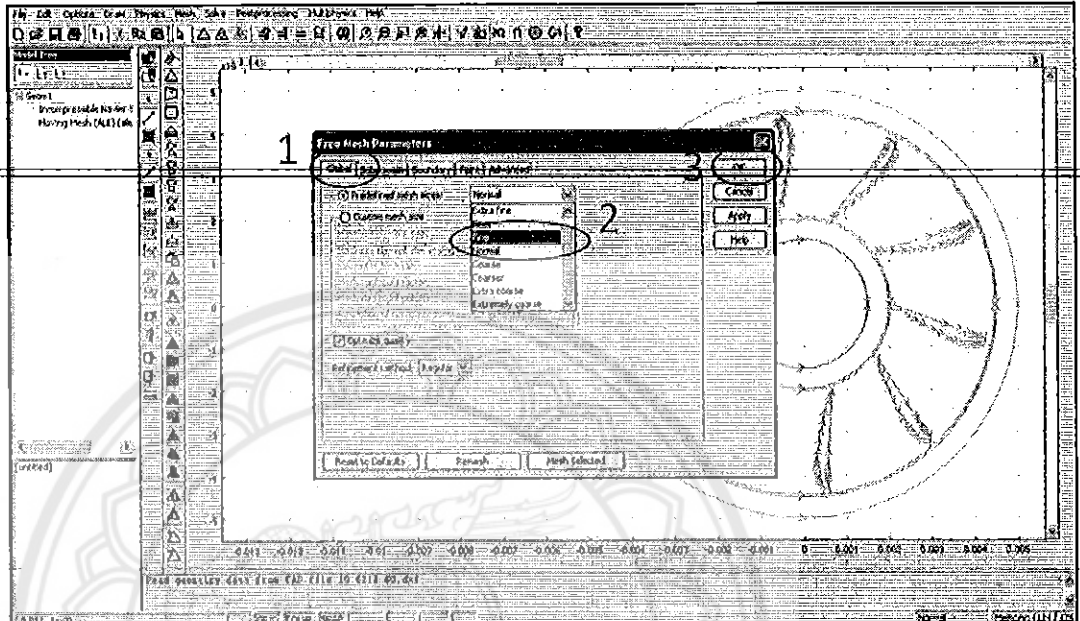
จากผังแนวคิดเราสามารถแสดงขั้นตอนการดำเนินการในรายละเอียดได้ดังนี้

3.4.1 เริ่มจากสร้างโครงร่างตาข่ายของสามเหลี่ยมให้กับแบบจำลองเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์การไหลโดยเลือก Mesh >> Free Mesh Parameter (เป็นโหมดการสร้าง mesh แบบขนาดไม่คงที่) ดังแสดงในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 การกำหนด Mesh

3.4.2 ทำการเลือกชนิด mesh โดยจะปรากฏหน้าต่าง Free Mesh Parameter >> Predefined mesh size : เลือก Fine (470 mesh/ตารางมิลลิเมตร) >> OK เป็นการกำหนดความละเอียดอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 3.28



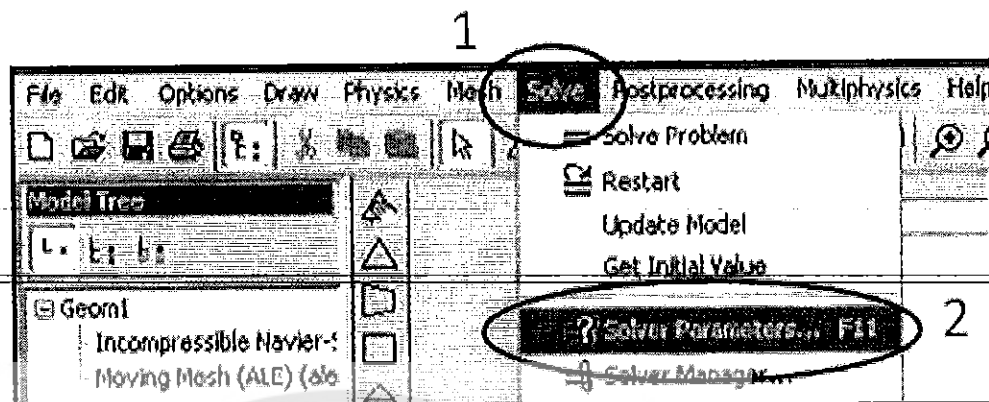
รูปที่ 3.28 การกำหนดชนิด Mesh

3.4.3 ทำการสร้าง Mesh โดยเลือก Mesh >> Initialize Mesh ดังแสดงในรูปที่ 3.29



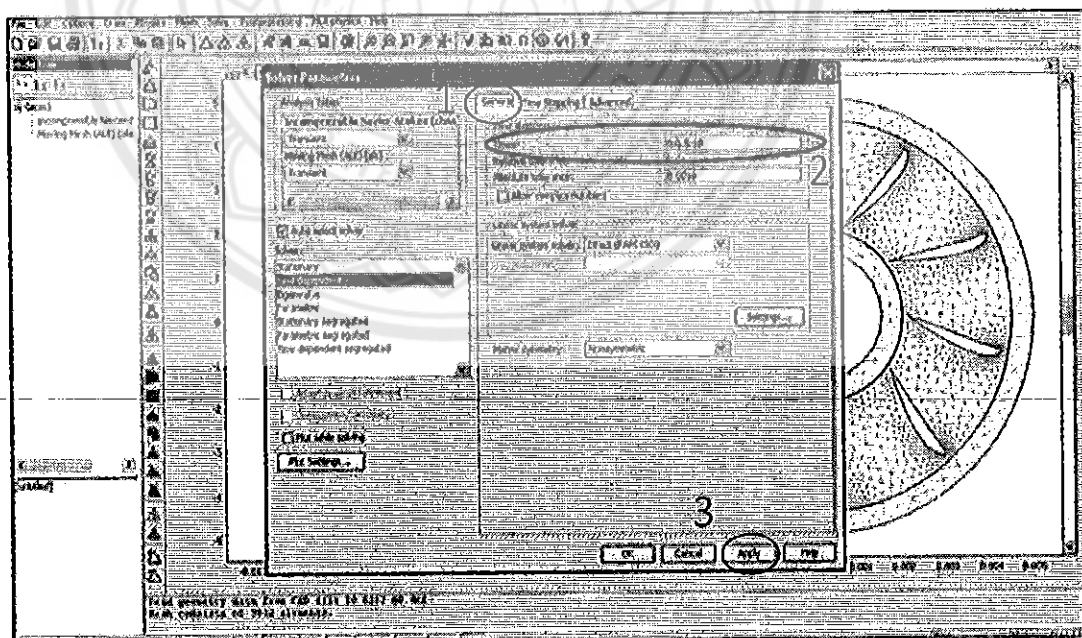
รูปที่ 3.29 วิธีการสร้าง Mesh สามเหลี่ยม

3.4.4 เตรียมการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับการวิเคราะห์การไหลของของไหลผ่านแบบจำลองโดยเลือก Solve >> Solve Parameter ดังแสดงในรูปที่ 3.30



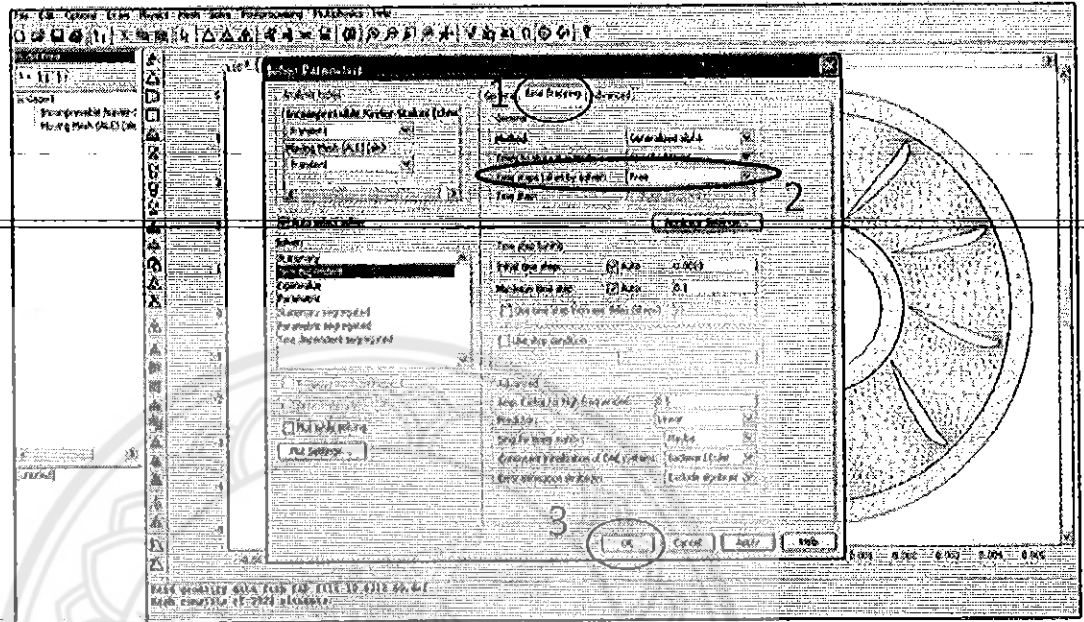
รูปที่ 3.30 การวิเคราะห์การไหล

3.4.5 จะปรากฏหน้าต่าง Solve Parameter ขึ้นมา การกำหนดเวลาการวิเคราะห์โดยคลิก General >> ช่อง Times: เปลี่ยนเวลาเป็น Times : 0:0.5:10 (หมายถึง เริ่มวิเคราะห์จากที่เวลา 0 โดยเพิ่มทีละ 0.5 จนถึง 10 วินาที) >> Apply ดังแสดงในรูปที่ 3.31



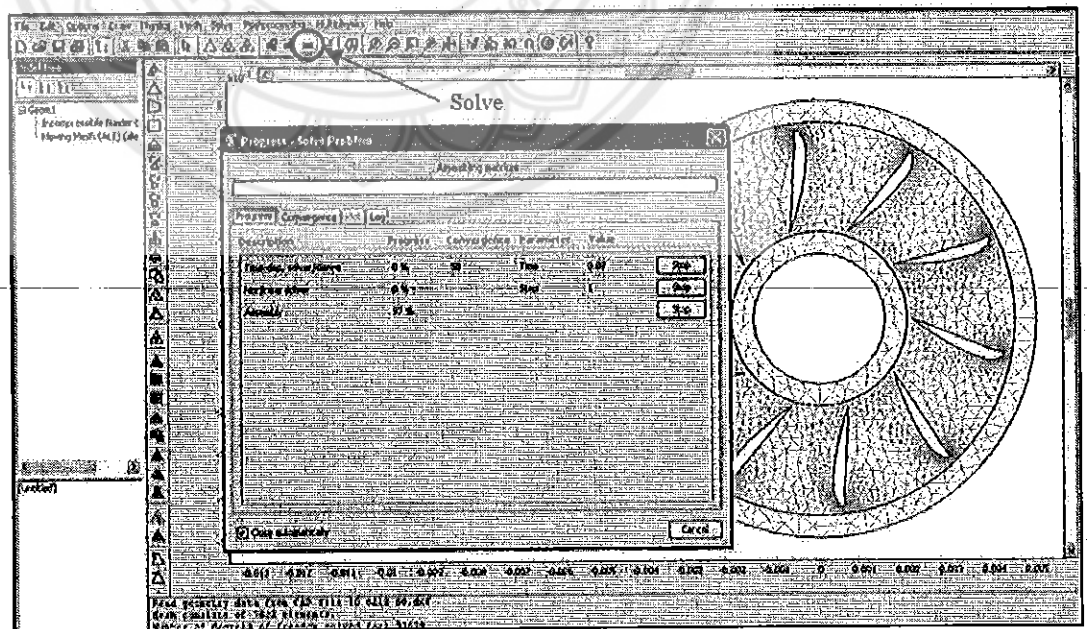
รูปที่ 3.31 การตั้งเวลา (Time step)

3.4.6 การเลือกระบบใน Time Stepping โดยคลิก Time Stepping >> Time Steps taken by solve เลือก Free (เป็นการให้อิสระกับขั้นตอนในการ solve) >> OK ดังแสดงในรูปที่ 3.32



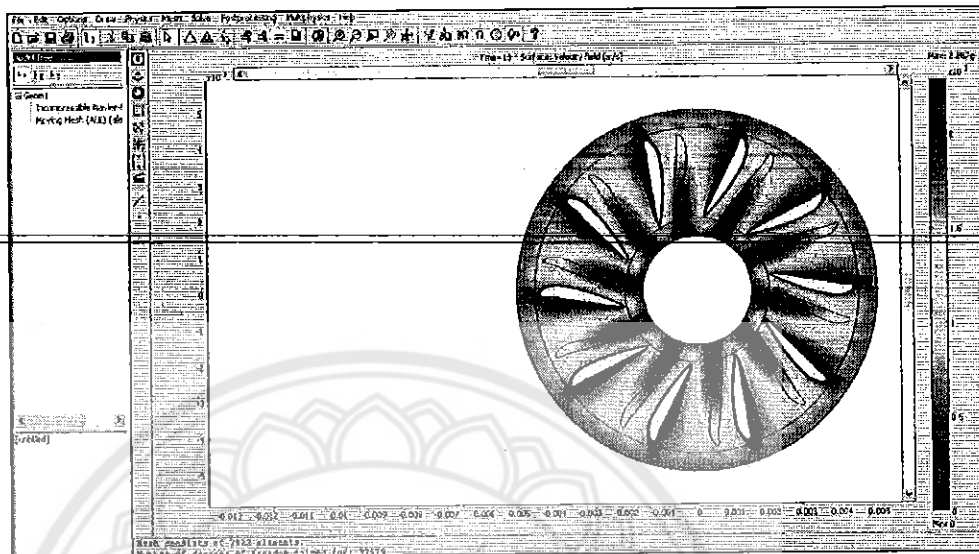
รูปที่ 3.32 การเลือกระบบ free ใน Time stepping

3.4.7 เริ่มต้นแก้ปัญหาโดยคลิก Solve ดังแสดงในรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 การ Solve (วิเคราะห์การไหล)

3.4.8 ผลการวิเคราะห์การไหลสามารถแสดงในรูปแบบค่าต่างๆได้ทั้งนี้ในรูปแบบที่ 3.34 เป็นการแสดงค่าที่อยู่ในรูปของความเร็วจนโดยใช้ลักษณะของสีเป็นการบอกความเร็วที่จุดต่างๆของแบบจำลอง



รูปที่ 3.34 Solve (วิเคราะห์การไหล) เสร็จสิ้น

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้ก่อนทำการทดสอบจะต้องมีการกำหนดค่าสภาวะเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตก่อน และหลังจากนั้นจะสร้างแบบจำลองกึ่งตันขนาดเล็ก และแบ่งเอลิเมนต์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ โดยดู ลักษณะของการเคลื่อนที่ของกึ่งตันขนาดเล็ก และจะหาความเร็วเพื่อนำไปวิเคราะห์ให้ได้กำลัง

ออกมา

#### 4.1 การกำหนดค่าเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต

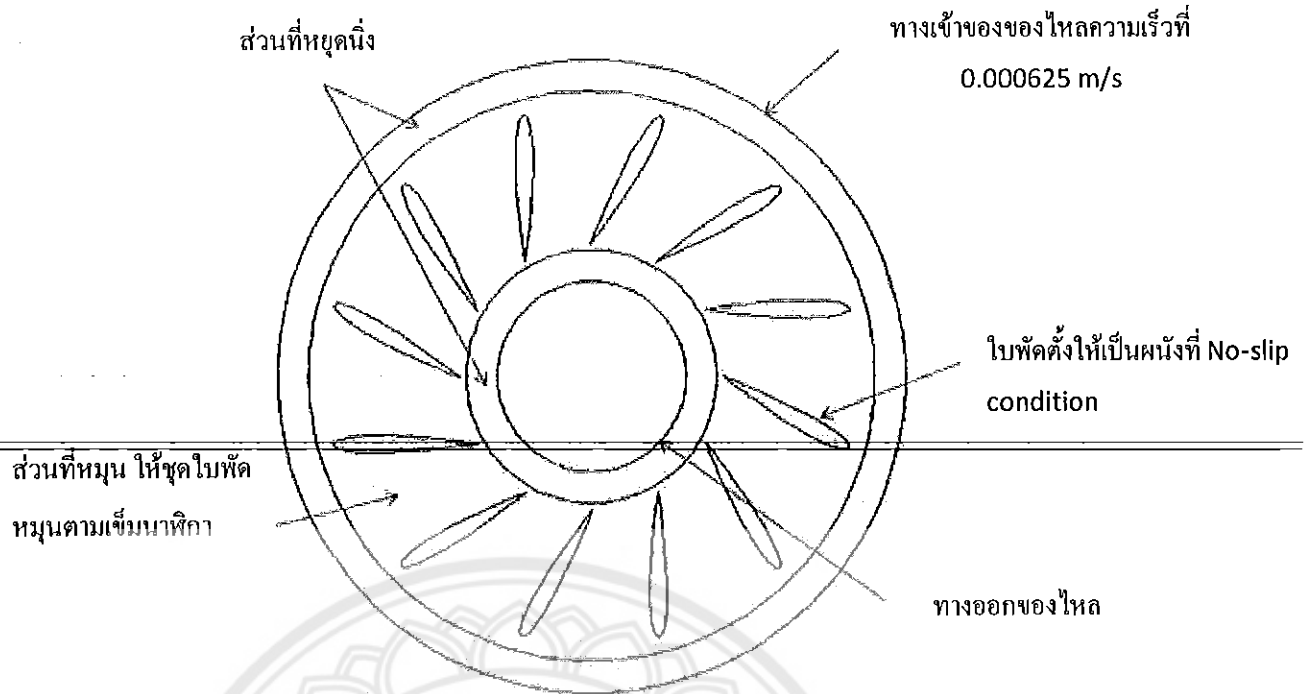
ค่าคงที่และสมบัติของของไหลที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ความหนาแน่นของน้ำ ความหนืดของน้ำ ความเร็วรอบของกึ่งตันและความเร็วของของไหล ซึ่งแสดงตามตาราง 4.1

ตาราง 4.1 ค่าคงที่และสมบัติที่ใช้ในการทดลอง

ความหนาแน่นของน้ำ	1000	kg/m <sup>3</sup>
ความหนืดของน้ำ	0.001	Pa × s
ความเร็วรอบของกึ่งตัน	7.6573	rpm
ความเร็วของของไหล	0.000625	m/s

ลักษณะการไหลของน้ำในกึ่งตันจะเหมือนกึ่งตันแบบฟรานซิส โดยที่ของไหลจะไหลเข้าที่เส้นรอบวงด้านนอกและไหลออกที่เส้นรอบวงด้านใน รายละเอียดการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นแสดงดังรูปที่ 4-1

1. ให้อัตราการไหลเข้าของน้ำ ความเร็วในการไหลเท่ากับ 0.000625 m/s ( $Re = 1000$ )
2. ให้อัตราการไหลในสุดเป็นทางออกของน้ำเป็นแบบอิสระ
3. ชุดใบพัด เป็นของแข็ง (ผนัง) และชั้นชิดผิวมีความเร็วเท่ากับศูนย์ (no-slip)
4. กำหนดความเร็วรอบให้ชุดใบพัดและกำหนดดวงแหวนรอบนอกและในเป็นชิ้นส่วนหยุดนิ่ง



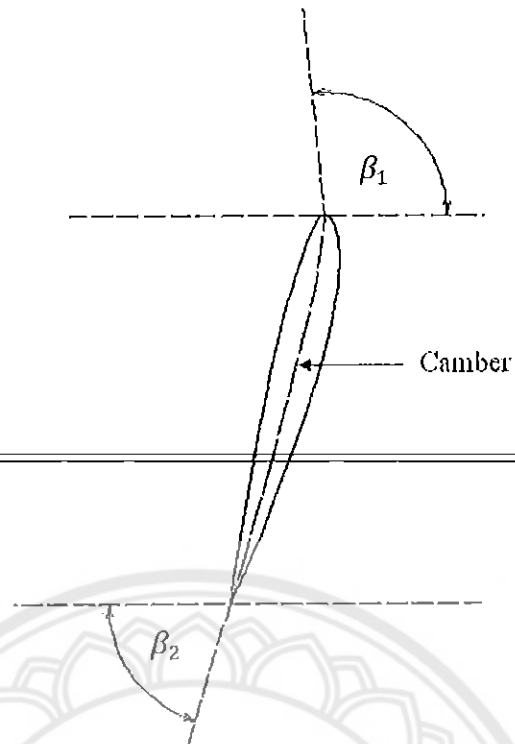
รูปที่ 4.1 การกำหนดค่าเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต

ตารางที่ 4.2 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของแบบจำลองที่จะใช้ โดยทดสอบชนิดของใบพัด 4 แบบ ด้วยการเปลี่ยนความโค้งแต่ให้ความหนาของใบพัดคงที่ที่ 12% ของความยาวใบพัด จำนวนใบพัด 14, 18 และ 22 ใบ และมุมที่ทางออกใบพัด 50-70 องศา และรูปที่ 4.2 แสดงการวัดมุมทางเข้าและทางออกใบพัด

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการทดลอง

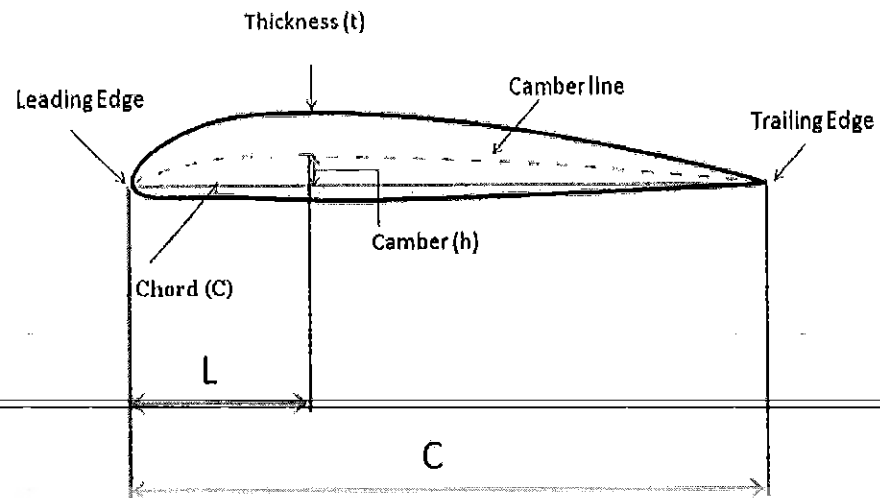
ชนิดใบพัด	NACA 0012, NACA 2212, NACA 4212, NACA6212
จำนวนใบพัด	12, 14, 16, 18
มุมที่ทางออกใบพัด	50, 60, 70
ความยาวใบพัด (Chord)	2.3 mm



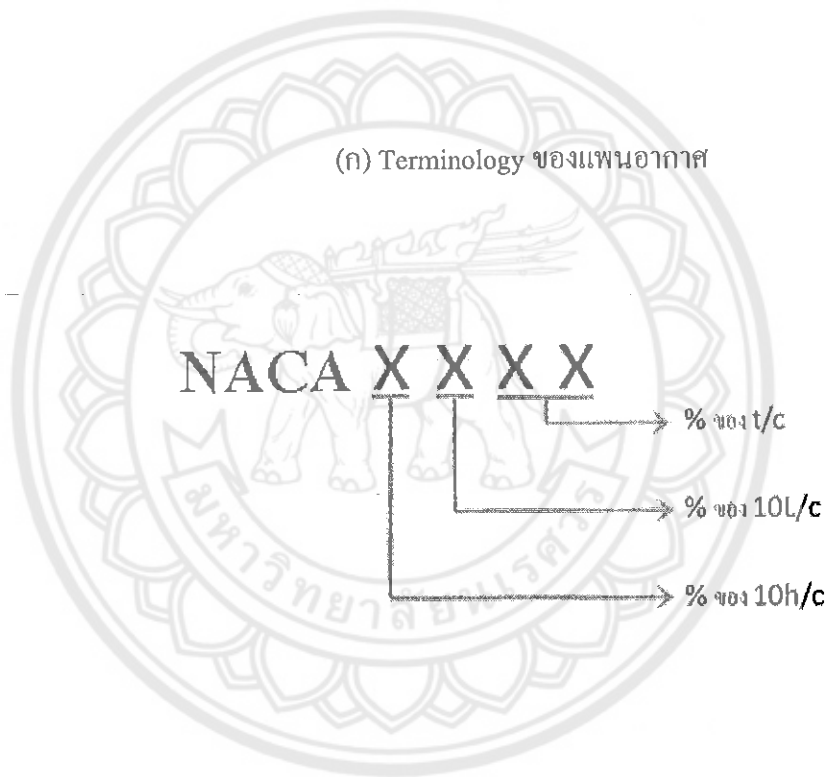


รูปที่ 4.2 มุมทางเข้า ( $\beta_1$ ) และทางออก ( $\beta_2$ ) ของใบพัด

รูปที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบของแผนอากาศของ NACA และการเรียกชื่อรูปทรง NACA ชนิด 4 หลัก โดยหลักที่หนึ่งแสดงเปอร์เซ็นต์ความโค้งเทียบกับคอร์ดของใบพัด หลักที่สองเป็นตำแหน่งที่มีเปอร์เซ็นต์ของสลิปของความโค้งสูงสุดเทียบกับคอร์ด และตำแหน่งที่สามและสี่เป็นเปอร์เซ็นต์ของสลิปของความหนาที่มากที่สุดเทียบกับคอร์ดของใบพัด



(ก) Terminology ของแพนอากาศ

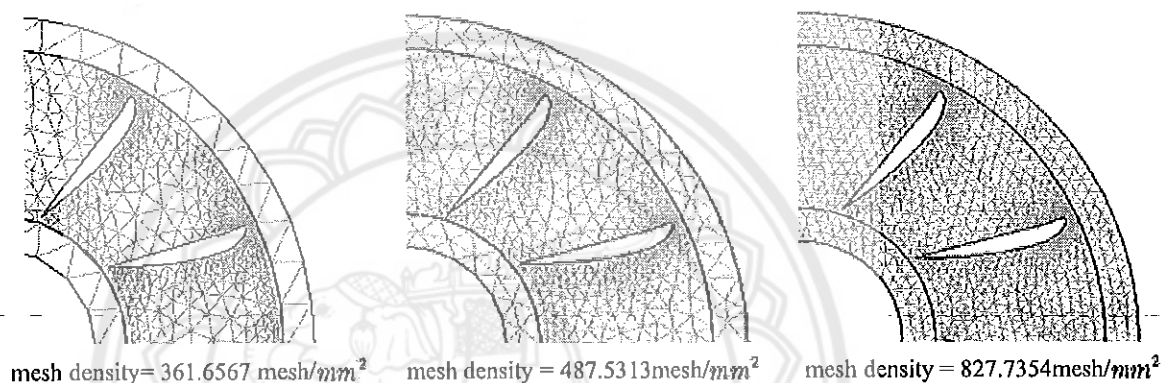


(ข) การเรียกชื่อแพนอากาศของ NACA 4 Series.

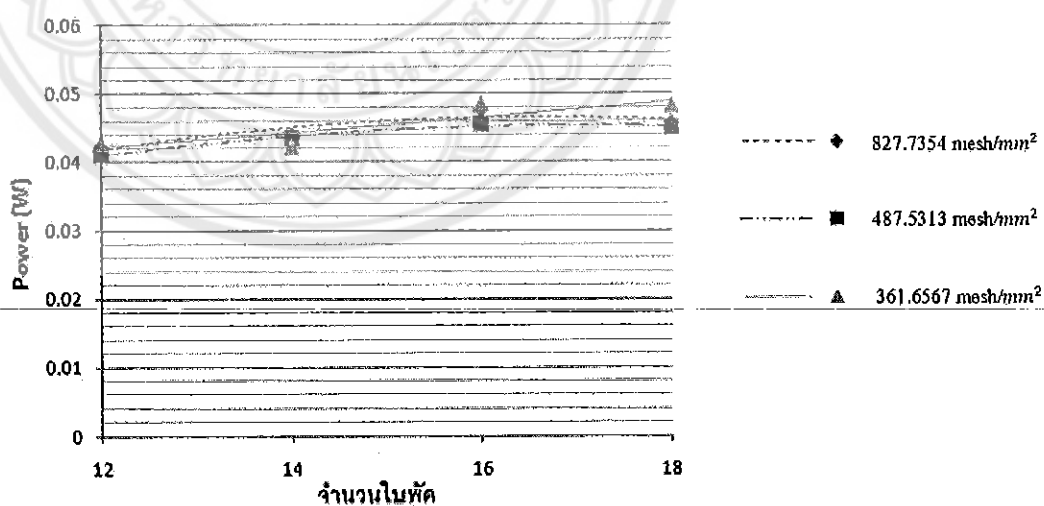
รูปที่ 4.3 แพนอากาศของ NACA

## 4.2 การแบ่งเอลิเมนต์

ความหนาแน่นของ Mesh มีความสำคัญต่อความถูกต้องของคำตอบที่ได้ ในหัวข้อนี้เราจะสร้าง Mesh ลงบนแบบจำลองสำหรับใบพัด NACA 0012 ที่มีความหนาแน่น 360, 490 และ 830 Mesh/mm<sup>2</sup> ดังแสดงในรูปที่ 4.4 เมื่อทำการคำนวณหาค่าตั้งที่ได้และทำการเปรียบเทียบดังในรูปที่ 4.5 พบว่า ผลต่างเฉลี่ยของกำลังกราฟอยู่ที่ 3% ของ 490 Mesh/mm<sup>2</sup> กับ 830 Mesh/mm<sup>2</sup> และผลต่างเฉลี่ยของกำลัง 5 % ของ 490 Mesh/mm<sup>2</sup> กับ 360 Mesh/mm<sup>2</sup> จะเห็นได้ว่า ความหนาแน่นของ Mesh ระหว่าง 480 กับ 830 Mesh/mm<sup>2</sup> มีผลต่อคำตอบต่างกันน้อยมาก



รูปที่ 4.4 การแบ่ง Mesh ที่ความหนาแน่นต่างๆ



รูปที่ 4.5 ผลของ Mesh density ที่มีต่อกำลังสำหรับ NACA 0012

การสร้าง Mesh สามเหลี่ยมไว้ระเบียนเกิดขึ้นโดยอัลกอริทึม Delaunay คือการสร้างวงกลมบนแบบจำลอง จากนั้นจึงสร้างสามเหลี่ยมที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในวงกลมนั้น สามเหลี่ยมหนึ่งรูปจะมี node อยู่ 6 node อยู่ที่มุมของสามเหลี่ยมสาม node และที่กึ่งกลางเส้นอีกสาม node ดังรูปที่ (4.6) ซึ่ง node เหล่านี้จะเป็นจุดที่แสดงถึงสมบัติที่เราศึกษา ทำกระบวนการเช่นนี้จนเต็มแบบจำลอง พิจารณา 6 node บนสามเหลี่ยมในรูปที่ (4.6) สำหรับ node  $P_i$  มี Degree of freedom  $N_i = n(P_i)$  และ basis function  $\phi_i$  แสดงดังนี้

$$\phi(x, y) = \sum N_i(x, y) \phi_i \quad (4.1)$$

โดยที่  $\phi$  คือความเร็ว  $u$  และ  $v$

$N_i$  คือ Interpolation function ซึ่งขึ้นอยู่กับ function of area  $L_i$  ซึ่งแสดงดังนี้

$$N_1 = L_1^2 - L_1(L_2 + L_3) \quad N_4 = 4(L_2L_3)$$

$$N_2 = L_2^2 - L_2(L_3 + L_1) \quad N_5 = 4(L_2L_3)$$

$$N_3 = L_3^2 - L_3(L_1 + L_2) \quad N_6 = 4(L_2L_3)$$

$$\text{โดยที่ } L_i = \frac{1}{2A} (a_i + b_i x + c_i y)$$

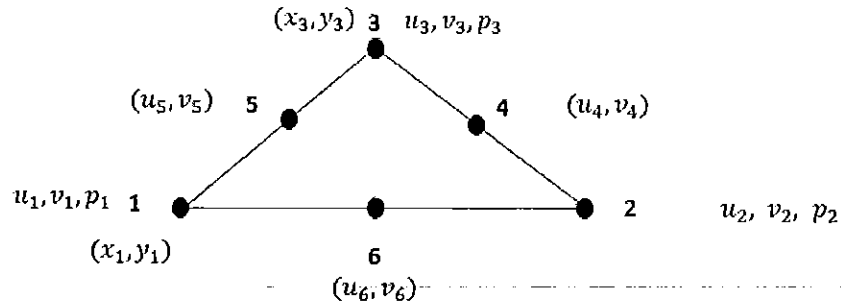
$$a_1 = x_2 y_3 - x_3 y_2 \quad b_1 = y_2 - y_3 \quad c_1 = x_3 - x_2$$

$$a_2 = x_3 y_1 - x_1 y_3 \quad b_2 = y_3 - y_1 \quad c_2 = x_1 - x_3$$

$$a_3 = x_1 y_2 - x_2 y_1 \quad b_3 = y_1 - y_2 \quad c_3 = x_2 - x_1$$

$$\text{และ } A = \frac{1}{2} [x_2(y_3 - y_1) + x_1(y_2 - y_3) + x_3(y_1 - y_2)]$$

โดยที่  $A$  คือ พื้นที่ของแต่ละเอลิเมนต์



รูปที่ 4.6 Labels of nodes and dependent variables for a Lagrange element.

สำหรับการกระจายความดันเอลิเมนต์จะทำบนสามจุดที่มุมของสามเหลี่ยม(จุด 1, 2 และ 3 ในรูปที่

4.6) *basis function* สามารถแสดงได้ดังนี้

$$p = H_j p_j$$

โดยที่  $j = 1, 2, 3$

และ  $H_j$  คือ *Interpolation function* ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$H_1 = L_1 \quad H_2 = L_2 \quad H_3 = L_3$$

เมื่อประยุกต์สมการเหล่านี้กับสมการอนุรักษ์มวล,  $x$ -โมเมนต์ดัมและ  $y$ -โมเมนต์ดัมได้เป็น

$$\int H_i \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dA = 0 \quad (4.2a)$$

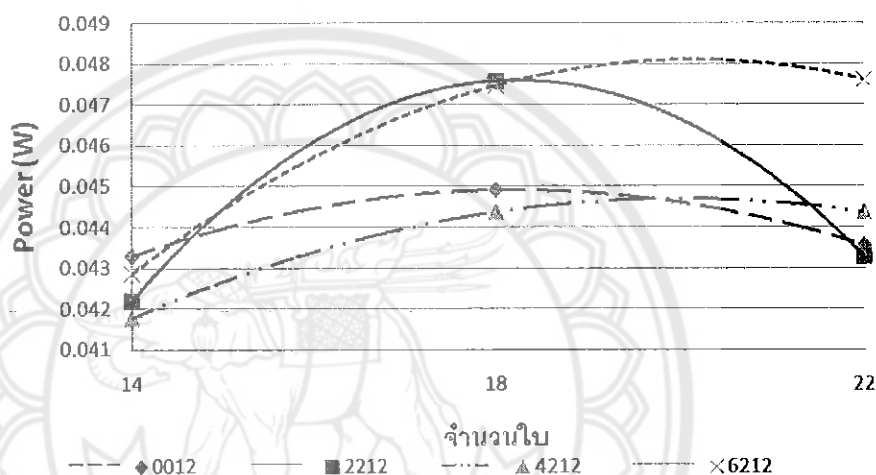
$$\int N_i \left[ \rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \left( 2\mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right) \right] dA = 0 \quad (4.2b)$$

$$\int N_i \left[ \rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \left( 2\mu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right) \right] dA = 0 \quad (4.2c)$$

เมื่อใส่เงื่อนไขขอบเขตเรียบร้อยแล้วจะใช้อัลกอริทึม PARDISO เป็นอัลกอริทึมในการวิเคราะห์สำหรับแบบจำลองที่ไม่สมมาตรนี้ โดยมุ่งหาความเร็วของแต่ละจุดบนก้างัน

### 4.3 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

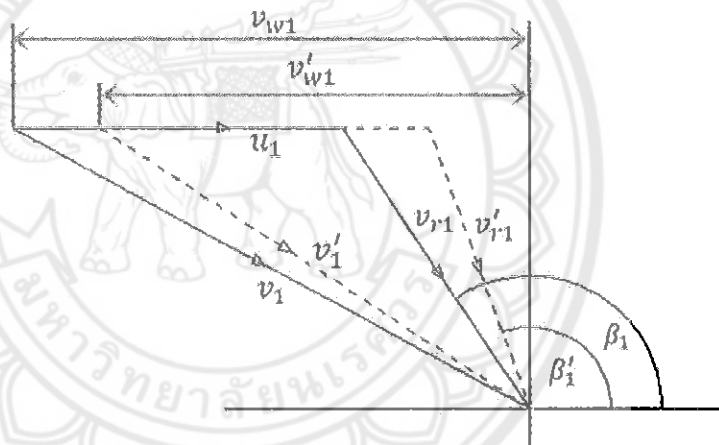
ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณสามารถนำมาเขียนกราฟแนวโน้มน่าได้เป็นสมการ โพลีโนเมียล อันดับสอง ( $R^2 = 1$ ) กราฟทุกเส้นมีลักษณะระฆังคว่ำ โดยค่าสูงสุดของกราฟทุกเส้นอยู่ในช่วง จำนวนใบ 18 ถึง 20 ใบ กราฟที่มีกำลังสูงสุดได้แก่ NACA 6212 รองลงมาคือ NACA 2212, NACA 0012 และ NACA 4212 ตามลำดับ ผลต่างของกำลังสูงสุด NACA 6212 และกำลังต่ำสุด NACA 4212 เท่ากับ 12 % ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กำลังที่ได้จากกังหันที่มีรูปทรงใบพัดและจำนวนต่างๆ ที่มุมทางออก 60 องศา

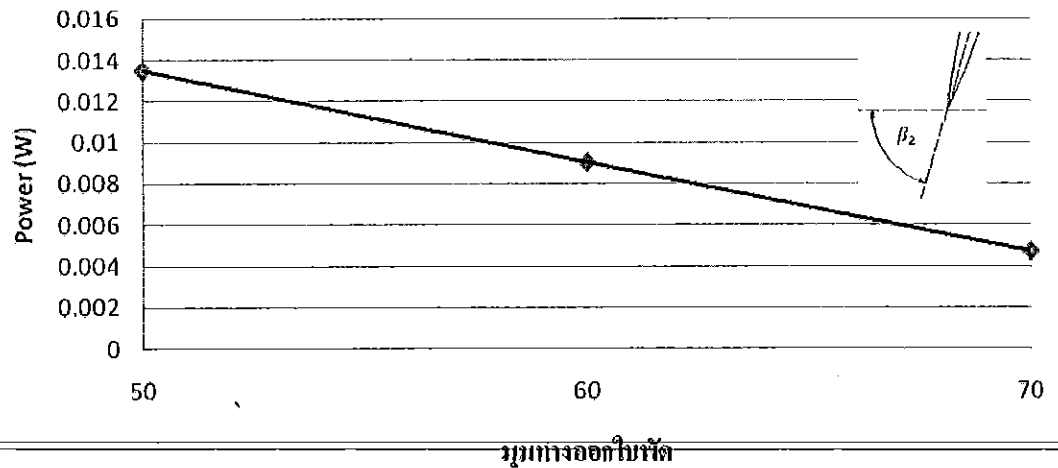
จากการทดลองเพิ่มจำนวนใบพัด พบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนใบพัดขึ้นจะทำให้กำลังสูงขึ้นเรื่อยๆ แต่เมื่อเพิ่มจำนวนใบพัด ไปจนถึงจำนวน 18 ใบ กำลังจะค่อยๆ ลดลง เป็นผลมาจาก เมื่อเพิ่มจำนวนใบพัดช่องว่างระหว่างใบพัดจะลดลงทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างใบพัดกับของไหล ( $u_r$ ) เพิ่มขึ้นจึงทำให้ความเร็วน้ำทางเข้าเพิ่มขึ้น ( $v = u + u_r$ ) แต่เมื่อเพิ่มจำนวนใบพัดจนกระทั่งช่องว่างระหว่างใบพัดแคบมากๆ แรงเสียดทานจะส่งผลต่อการไหลเนื่องจากสภาวะหยุดนิ่งที่ชั้นขีดยึด (no-slip conditions) ทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างใบพัดกับของไหล ( $u_r$ ) ลดลงส่งผลให้ความเร็วทางเข้าลดลง

รูปทรงจะเป็นตัวกำหนดลักษณะและค่าสูงสุดของกำลัง โดยขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของมุมทางเข้าใบพัด พิจารณารูปสามเหลี่ยมความเร็ว (รูปที่ 4.8) ความเร็ว  $v_f$  คงที่เพราะอัตราการไหลผ่านหน้าตัดคงที่ หากกำหนดให้ความเร็วรอบในการทำงานคงที่ที่จุดออกแบบ (เวกเตอร์  $u$  คงที่) เมื่อมุมของใบพัดเป็น  $\beta_1$  องค์ประกอบความเร็วในแนวสัมผัสของความเร็วรวมจะมีค่าเป็น  $v_{w1}$  ถ้ามุมเปลี่ยนเป็นมุม  $\beta'_1$  ซึ่งน้อยกว่า  $\beta_1$  องค์ประกอบความเร็วในแนวสัมผัสของความเร็วรวมจะมีค่าเป็น  $v'_{w1}$  มีค่าน้อยกว่า  $v_{w1}$  และเนื่องจากมุม  $\beta$  นี้เป็นมุมที่เกิดจากลักษณะของใบพัด นั้นหมายความว่า รูปทรงใบพัดมีผลทำให้มุมทางเข้าของของไหลเปลี่ยนไปเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละรูปทรงใบพัด ส่งผลให้กราฟกำลังมีลักษณะและค่าสูงสุดแตกต่างกัน สรุปได้ว่ารูปทรงของใบพัดมีผลกระทบต่อกำลังของกังหันแต่ไม่มีรูปแบบเฉพาะ เพราะค่ากำลังจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมระหว่างมุมใบพัดหรือรูปทรงกับความเร็วรอบของกังหันที่ใช้ในการทดลอง หากความเร็วรอบของใบพัดเปลี่ยนไปลำดับของรูปทรงที่ให้กำลังสูงสุดก็จะเปลี่ยนไปด้วย



รูปที่ 4.8 สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางเข้าใบพัด

เมื่อศึกษาผลกระทบของมุมทางออกของใบพัดที่มีต่อกำลังของกังหันโดยใช้แบบจำลอง NACA 6212 ที่ 18 ใบพัด เมื่อทำการทดลองสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ของกำลังกับมุมทางออกใบพัดได้เป็นเส้นตรง ( $R^2 = 0.9996$ ) ซึ่งมีลักษณะเส้นกราฟลดลงเมื่อมุมเพิ่มขึ้นโดยจุดสูงสุดและต่ำสุดของกราฟต่างกันอยู่ประมาณ 65 % ดังรูปที่ 4.9

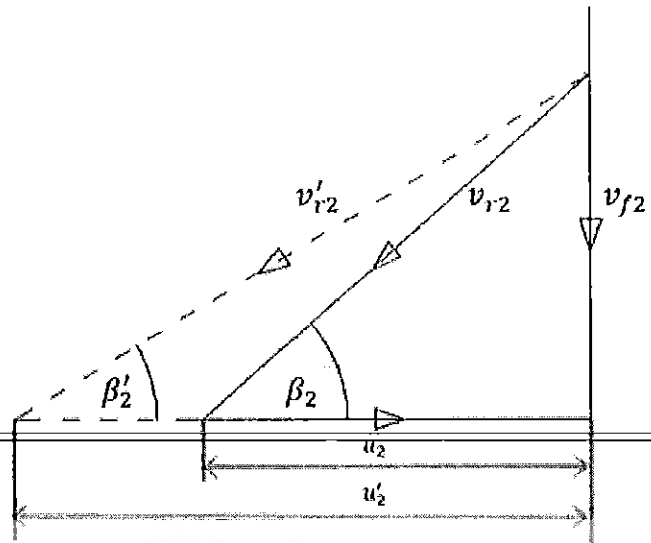


รูปที่ 4.9 ผลกระทบของมุมทางออกใบพัดต่อกำลัง สำหรับใบพัด

ชนิด NACA 6212 จำนวน 18 ใบพัด

เนื่องจากการออกแบบใบพัดจะใช้สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางออกเพื่อให้ได้กำลังสูงสุด การออกแบบให้ใบพัดทำงานที่กำลังสูงสุดจะต้องออกแบบให้สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางออกเป็นสามเหลี่ยมมุมฉากซึ่งก็คือความเร็วสัมบูรณ์ที่ทางออกใบพัดมีทิศทางตามแนวรัศมี พิจารณารูปที่ 4.10 ที่มุมทางออกของใบพัดเป็น  $\beta_2$  และความเร็ว  $v_{f2}$  คงที่ได้ได้เวกเตอร์ความเร็วขอบใบพัดเป็น  $u_2$  แต่เมื่อมุมทางออกใบพัดลดลงเป็นมุม  $\beta_2'$  จะได้เวกเตอร์ความเร็วขอบใบพัดเป็น  $u_2'$  ซึ่งมากกว่า  $u_2$  นั้นหมายความว่ามุมมีผลโดยตรงกับความเร็วขอบใบพัดซึ่งความเร็วขอบใบพัดนี้บ่งบอกถึงความเร็วรอบในการทำงาน จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.17) จะพบว่ากำลังและความเร็วขอบใบพัดมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นต่อกันจึงทำให้กราฟของกำลังกับมุมทางออกมีลักษณะเป็นเส้นตรงคั่นนั้นจึงได้ว่ามุมทางออกใบพัดมีผลในลักษณะเป็นส่วนกลับกับกำลัง





รูปที่ 4.10 สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางออกของใบพัด



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษาเชิงตัวเลขใน 2 มิติของกังหันขนาดจิ๋ว นั้น ในที่นี้เราใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกังหันเป็น 10 มิลลิเมตร โดยศึกษาผลกระทบของรูปทรงของใบพัดกังหัน จำนวนใบพัด และมุมทางออกใบพัด ที่มีต่อกำลังของกังหัน พบว่า

1. ใบกังหันที่มีความโค้งมากมีแนวโน้มที่จะให้กำลังสูง เพราะมีการเปลี่ยนทิศของการไหลมาก จึงทำให้เกิดแรงทำให้ใบพัดมาก กำลังจึงมาก ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของมุมทางเข้าใบพัดกับความเร็รรอบใบพัด เพราะเมื่อความเร็รรอบเปลี่ยน รูปทรงที่ให้กำลังสูงสุดจะเปลี่ยนไปด้วย รูปทรงที่ให้กำลังสูงที่สุดคือ NACA 6212 ที่ 20 ใบพัด
2. จากการทดสอบจำนวนใบพัด 14, 18 และ 22 ใบพัด พบว่า จำนวนใบพัด 18 ใบให้กำลังโดยเฉลี่ยของทุกรูปทรงสูง ทั้งนี้เพราะ ที่จำนวนใบพัดน้อยกว่า 18 ใบ การดึงพลังงานจากของไหลทำได้น้อย จึงทำให้กำลังที่ได้ออกมาต่ำ ขณะเดียวกันถ้าเพิ่มจำนวนใบพัดจนมากเกินไป 22 ใบ จะทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างช่องการไหลสูง ทำให้กำลังที่ได้ออกมาต่ำเช่นกัน
3. มุมทางออกใบพัดมีค่าระหว่าง 50-70 องศา พบว่า ที่มุม 50 องศา ให้กำลังออกมาสูงสุด เพราะหากพิจารณาจากสามเหลี่ยมความเร็วจะพบว่า ที่มุมทางออกใบพัดน้อยๆ องค์ประกอบความเร็วปลายใบพัดจะสูง ซึ่งก็คือความเร็รรอบในการทำงานสูง และกำลังของกังหันแปรผันโดยตรงกับความเร็รรอบใบพัด จึงทำให้ได้กำลังสูงที่สุด

## 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. A. Sabel'nikov. (2005). **Specific problems of micro gas turbine engine for micro drones application.** Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA),Palaiseau, France.
- [3] Yves RIBAUD. (2003). **Internal Heat Mixing and External Heat Losses in an Ultra Micro Turbine.** Proceedings International Gas Turbine Congress 2003 Tokyo, November 2-7, 2003. IGTC2003Tokyo OS-109.
- [4] T. Nagashima, S. Teramoto, C. Kato & S. Yuasa. (2005). **Aero-Thermal research particulars in ultra micro gas turbines.** VKI LS on micro gas turbines.
- [5] J. F. Douglas, John Gasiorek, John Swaffield. (2001). **Fluid Mechanics 4th Edition.** Publisher: Prentice Hall.

