



การศึกษาเชิงตัวเลขของกังหันก๊าซขนาดจิ๋วสองมิติโดยใช้แบบจำลองแบบปั่นป่วน
NUMERICAL STUDY OF TWO-DIMENSIONAL ULTRA-MICRO GAS TURBINE
USING TURBULENT MODEL



นายกิตติศักดิ์
นายธนาวิญญู

อรุณประเสริฐ
องค์วาสิญญู

รหัส 52360874
รหัส 52361000

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2555

ห้องสมุด คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 2 ต.ค. 2556.....
เลขทะเบียน..... 164.304.66.....
เลขเรียกหนังสือ.....
มหาวิทยาลัยนเรศวร ๖๖๗ ๙

2๕๕๖



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	การศึกษาเชิงตัวเลขของกังหันก๊าซขนาดจิ๋วสองมิติโดยใช้แบบจำลองแบบปั่นป่วน
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นายกิตติศักดิ์ อรุณประเสริฐ รหัส 52360874 นายธนาวิทย์ องค์กรวิสิทธิ์ รหัส 52361000
ที่ปรึกษาโครงการงาน	ผศ.ดร.กฤษยา กนกजारุจิตร
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

(ผศ.ดร.กฤษยา กนกजारุจิตร)

ที่ปรึกษาโครงการงาน

(ดร. ภาณุ พุทธวงศ์)

กรรมการ

(ดร. ศลิษา วีรพันธ์)

กรรมการ

ชื่อหัวข้อโครงการ	การศึกษาเชิงตัวเลขของกังหันก๊าซขนาดจิ๋วสองมิติโดยใช้แบบจำลองแบบ ปั่นป่วน		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายกิตติศักดิ์ อรุณประเสริฐ	รหัส	52360874
	นายธนาวิญญู องค์วาสินธุ์	รหัส	52361000
ที่ปรึกษาโครงการ	ผศ.ดร.กฤษยา กนกจาร์วิจิตร		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	2555		

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลผ่านกังหันก๊าซขนาดจิ๋ว (Ultra Micro Gas Turbine) โดยใช้แบบจำลอง 2 มิติ ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยจัดเรียงแบบ Cascade ความยาวของคอร์ดเท่ากับ 4.5 มิลลิเมตร กำหนดการไหลเป็นแบบปั่นป่วนในรูปของแบบจำลอง k- ϵ แล้วจึงนำค่าความเร็วขาออกมากำหนดหาค่ากำลังของกังหันในหน่วย W/m (เนื่องจากไม่มีความลึกของใบพัด) ผลกระทบต่างๆที่พิจารณา ได้แก่ (1) มุมปะทะระหว่างของไหลกับใบพัดซึ่งกำหนดให้มุมปะทะเป็น 40, 50 และ 60 องศา (2) ความโค้งของใบพัด (3) ความดันของอากาศเข้ากังหันที่ 2, 3 และ 4 atm (4) อุณหภูมิของอากาศเข้ากังหันที่ 1200, 1400 และ 1600 K ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่ามุมปะทะที่ 60 องศา ให้กำลังสูงสุดเนื่องจากที่มุมปะทะ 60 องศา ทำให้มีพื้นที่สัมผัสโดยตรงระหว่างของไหลกับใบพัดมากสุด ในส่วนของรูปทรงของใบพัดนั้นใบพัดที่มีความโค้งและไม่มี ความโค้งให้ผลไม่แตกต่างกันมากมีผลต่างกันโดยเฉลี่ยเพียงประมาณ 4 % และในส่วนของคุณสมบัติของอากาศเข้านั้นที่ความดัน 4 atm จะให้กำลังสูงสุดเนื่องจากความดันที่ทางเข้ากับทางออกของใบพัดมีความแตกต่างกันมากที่สุดเป็นผลให้ใบพัดได้รับพลังงานจากของไหลมากที่สุด สุดท้ายที่อุณหภูมิ 1200 K ให้กำลังสูงสุดเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของอากาศลดลงทำให้ความหนาแน่นของอากาศเพิ่มขึ้นเป็นเหตุให้อัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้นและส่งผลให้กำลังเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

Project title NUMERICAL STUDY OF TWO-DIMENSIONAL ULTRA-MICRO GAS
TUBINE USING TURBULENT MODEL

Name Mr. Kittisak Arunprasert ID 52360874
Mr. Tanawat Ongvasith ID 52361000

Project advisor Dr.Koonlaya Kanokjaruvijit

Major Mechanical Engineering

Department Mechanical Engineering

Academic year 2012

.....

Abstract

This project is aimed to numerically examine the flow past a two-dimensional cascade of four ultra micro turbine blades by using the finite element method in order to find the optimal the highest power production. The flow is assumed compressible and follows conditions for the $k-\varepsilon$ turbulence model. Each blade has chord length of 4.5 mm, and NACA 0012 and NACA 4512 are tested. In addition, some parametric effects are considered: (1) angle of attack between the flow and turbine blades at 40, 50, and 60 degrees (2) camber of blades (3) pressure of turbine air inlet 2, 3, and 4 atm (4) temperature of turbine air inlet at 1200, 1400, and 1600 K. The computed results are presented in terms of power per unit depth of the blade using Bernoulli power equation. The results show that the angle of attack at 60 degrees gives the highest power due to the possession of the highest contact area between the flow and the blade. Considering the shape of blades, the output power difference between the cambered and non-cambered blades are approximately 4%. The air inlet condition at 4 atm gives highest power, because of the high value of the difference between the pressure of inlet and outlet. Finally, the temperature at 1200 k gives the highest power, because the air density is higher than the other two cases leading to higher mass flow rate.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จล่วงได้ด้วยดี ผู้จัดทำโครงการขอกราบขอบพระคุณ บุคคลและกลุ่มบุคคล
อื่นๆที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือเป็นอย่างดี ทั้งในด้านวิชาการและงบประมาณ

- ผศ.ดร.กฤษยา กนกจาร์วิจิตร ที่ปรึกษาโครงการ
- ดร.ภาณุ พุทธวงศ์ กรรมการ
- ดร.ศลิษา วีรพันธ์ กรรมการ
- คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวรที่เป็นผู้สนับสนุนโครงการและมอบเงินใน
การจัดทำโครงการ

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นาย กิตติศักดิ์ อรุณประเสริฐ

นาย ธนาวัฏธ์ องค์वासิภูฏ



สารบัญ

เรื่อง	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
สารบัญสัญลักษณ์.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขอบเขตการทำโครงการ.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.6 แผนการดำเนินงาน.....	5
1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์.....	6
2.1 ทฤษฎี.....	6
2.2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	19
บทที่ 3 ขั้นตอนการคำนวณ.....	21
3.1 การสร้างแบบจำลองชุดไบพัตกัมมันท์กึ่งขนาดจิว.....	21
3.2 การคำนวณการไหลโดยอาศัยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	32
3.3 การดึงข้อมูลของความเร็วที่คำนวณได้จากโปรแกรม COMSOL.....	45
3.4 การคำนวณหาค่าเฉลี่ยที่ได้จากไบพัตกัมมันท์.....	47
3.5 Data Reduction.....	49
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	51
4.1 ผลกระทบของมุมปะทะและความโค้งของไบพัตที่มีต่อกำลังของไบพัต.....	52
4.2 ผลกระทบของความดันขาเข้าไบพัตที่มีผลต่อกำลังของไบพัต.....	57
4.3 ผลกระทบของอุณหภูมิขาเข้าไบพัตที่มีผลต่อกำลังของไบพัต.....	60

บทที่ 5 สรุปผลการคำนวณและข้อเสนอแนะ.....	62
5.1 สรุปผลการคำนวณ.....	62
5.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต.....	62
เอกสารอ้างอิง.....	63
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	64



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน.....	5
1.2 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ.....	5
3.1 ระยะทางจากจุดที่ 1 ถึงจุดต่างๆ ของใบพัด NACA.....	22
3.2 ระยะของเส้นตั้งฉากกับเส้นคอร์ดสำหรับใบพัด NACA 0012.....	23
3.3 ระยะของเส้นตั้งฉากกับเส้นคอร์ดสำหรับใบพัด NACA 4512.....	24
3.4 ค่าของตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	50
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะและลักษณะของใบพัดกับกำลังที่ความดันขาเข้า 2 atm อุณหภูมิ 1200 K.....	52
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิขาเข้ากับกำลังของใบพัด NACA 0012 มุม 60 องศา.....	57
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้ากับกำลังของใบพัด NACA 0012 มุม 60 องศาที่ความดันขาเข้า 2 atm.....	60



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างแบบร่างกึ่งหันขนาดจิวโดยที่ใบพัดไม่มีความโค้ง.....	2
1.2 Flowchart ของ Data Reduction.....	4
2.1 แผนอากาศของ NACA.....	6
2.2 วัฏจักรกึ่งหันก้าขอย่างง่าย.....	8
2.3 ลำดับชั้นต่างๆ สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนนับจากพื้นผิวขึ้นไป.....	9
2.4 สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางเข้าและทางออกของใบพัด.....	11
2.5 สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางออกของใบพัด.....	15
2.6 สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางเข้าของใบพัด.....	16
2.7 สามเหลี่ยมความเร็วทางเข้าและทางออก Cascade.....	17
3.1 การสร้างเส้นคอร์ด.....	21
3.2 การกำหนดระยะห่างของจุดบนเส้นคอร์ดเพื่อสร้างใบพัด.....	25
3.3 เขียนเส้นความหนาของแต่ละจุด.....	25
3.4 การลากเส้นต่อจุดจนกลายเป็นใบพัด.....	25
3.5 การเปิดโปรแกรม SolidWorks 2010 ในโหมด part.....	26
3.6 การเลือกระนาบในการวาดรูป.....	26
3.7 การเขียนเส้นคอร์ด.....	27
3.8 ใบพัด NACA 0012.....	27
3.9 การกำหนดขนาดของกรอบสี่เหลี่ยมเพื่อกำหนดโดเมนการคำนวณ.....	28
3.10การ Copy ใบพัดให้มีจำนวน 4 ใบพัด.....	28
3.11การปรับขนาดของกรอบสี่เหลี่ยม.....	29
3.12การเริ่มต้นการบันทึกไฟล์ในนามสกุล .dxf.....	29
3.13ขั้นตอนการบันทึกไฟล์ .dxf.....	30
3.14ขั้นตอนการบันทึกไฟล์ .dxf.....	30
3.15ขั้นตอนการบันทึกไฟล์ .dxf.....	31
3.16ขั้นตอนการบันทึกไฟล์ .dxf.....	31
3.17ขั้นตอนการนำไฟล์แบบจำลองใบพัดเข้าสู่การคำนวณ.....	32
3.18การเลือกชนิดของโหมดในการคำนวณการไหล.....	32
3.19การเพิ่มฟิสิกส์ของการไหลโดยเลือกแบบจำลองk-ε.....	33
3.20ขั้นตอนการนำไฟล์ SolidWorks เข้าสู่โปรแกรม COMSOL.....	33
3.21ขั้นตอนแนวคิดการกำหนดลักษณะของใบพัด.....	34
3.22แปลงแต่ละใบพัดให้เป็นของแข็ง.....	34
3.23แยกชิ้นส่วนออกจากกันด้วยคำสั่ง Split Object.....	35
3.24การตัดใบพัดออกจากโดเมนการคำนวณ.....	35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.25 รวมชิ้นงาน.....	36
3.26 ประกอบชิ้นงานทั้งหมด.....	36
3.27 คำสั่งสำหรับการเปลี่ยนลักษณะจากผนังให้เป็นช่องเปิด.....	37
3.28 ผังแนวคิดกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง.....	38
3.29 กำหนดคุณสมบัติของของไหล.....	38
3.30 การกำหนดค่าคงที่ขาเข้าที่จะใช้ในการคำนวณ.....	39
3.31 เลือก Subdomain Setting.....	39
3.32 การกำหนดตัวแปรของค่าคงที่.....	40
3.33 การกำหนดขอบเขตแบบจำลอง.....	40
3.34 การกำหนดสภาวะทางเข้าของของไหล.....	41
3.35 การกำหนดสภาวะทางออกของของไหล.....	41
3.36 การกำหนดคุณสมบัติ Mesh.....	42
3.37 การกำหนดความละเอียดของ Mesh.....	43
3.38 สร้างเมชในแบบจำลอง.....	43
3.39 คำสั่งในการแก้ปัญหาโจทย์.....	44
3.40 การแสดงผลของการคำนวณในรูปของ Surface Velocity Field.....	44
3.41 แถบเครื่องมือต่างๆ.....	44
3.42 เลือกโหมด Post processing.....	45
3.43 การกำหนดจุดของค่าความเร็วที่ทางออกของใบพัด.....	45
3.44 ผลของความเร็วในหนึ่งเส้น.....	46
3.45 การบันทึกข้อมูล.....	46
3.46 สามเหลี่ยมความเร็วขาออก.....	47
3.47 สรุปขั้นตอนการศึกษากำลังของชุดใบพัด.....	49

สารบัญสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
ω	ความเร็วเชิงมุม
v_w	ความเร็วของของไหลในแนวสัมผัส
v_f	ความเร็วของของไหลในแนวรัศมี
v_r	ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างของไหลกับใบพัด
v	ความเร็วสัมบูรณ์
u	ความเร็วปลายใบพัด
u_r	ความเร็วในแนวแกน r
u_θ	ความเร็วในแนวแกน θ
u_z	ความเร็วในแนวแกน z
θ	มุมทางเข้าของของไหล
R, r	รัศมี
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล
ρ	ความหนาแน่น
H	เฮด
g	ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก
Q	อัตราการไหลเชิงปริมาตร
η	ประสิทธิภาพ
F_r	Body Force ในแนวแกน r
F_θ	Body Force ในแนวแกน θ
F_z	Body Force ในแนวแกน z
t	เวลา
P	ความดัน
ε	อัตราการแพร่กระจาย
D_{im}	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของใบพัด
d_{im}	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของใบพัด
B	ความหนาของใบพัด
A	พื้นที่หน้าตัด
Re	Reynolds Number
μ	ความหนืด
β_1	มุมทางเข้าใบพัด
β_2	มุมทางออกใบพัด
E	พลังงาน
P'	กำลังในหน่วย W/m

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

กังหันก๊าซเป็นแหล่งผลิตพลังงานที่มีขนาดใหญ่และมีประสิทธิภาพสูง ในปัจจุบันได้มีการพัฒนากังหันก๊าซให้มีขนาดที่เล็กลงเพื่อใช้ในงานหลากหลายรูปแบบมากยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถออกแบบกังหันให้มีขนาดเหมาะสมกับพื้นที่ต่างๆ เพื่อให้เป็นแหล่งผลิตพลังงานอีกทางเลือกหนึ่ง

ในปัจจุบันประเทศที่พัฒนาแล้วได้มีการนำกังหันก๊าซขนาดเล็กมาใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากกังหันก๊าซขนาดเล็กเป็นแหล่งพลังงานสะอาดจึงไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากนัก และมีต้นทุนในการผลิตต่ำ จึงเหมาะสมกับประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศกำลังพัฒนาที่ควรนำกังหันก๊าซขนาดเล็กมาใช้เป็นแหล่งผลิตพลังงานอีกทางเลือกหนึ่ง ด้วยเหตุนี้จึงได้ทำการศึกษากังหันก๊าซขนาดจิ๋วโดยเปรียบเทียบลักษณะและสมบัติของอากาศ ที่มีผลต่อกำลังที่ได้จากกังหันก๊าซ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนากังหันก๊าซขนาดจิ๋วต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 ศึกษาผลกระทบของมุมปะทะและความโค้งของใบพัดที่มีต่อกำลังของกังหัน
- 1.2.2 ศึกษาผลกระทบของความดันของอากาศที่เข้าสู่กังหันที่มีต่อกำลังของกังหัน
- 1.2.3 ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิของอากาศที่เข้าสู่กังหันที่มีต่อกำลังของกังหัน

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 เพื่อให้ได้ข้อมูลทางอากาศพลศาสตร์เป็นแนวทางในการพัฒนากังหันก๊าซขนาดจิ๋วต่อไป

1.3.2 แบบจำลองกังหันก๊าซขนาดจิ๋วให้พลังงานสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยการไหลแบบราบเรียบ (Laminar) เนื่องจากในงานวิจัยนี้เราได้กำหนดให้การไหลเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent)

1.4 ขอบเขตการทำโครงการงาน

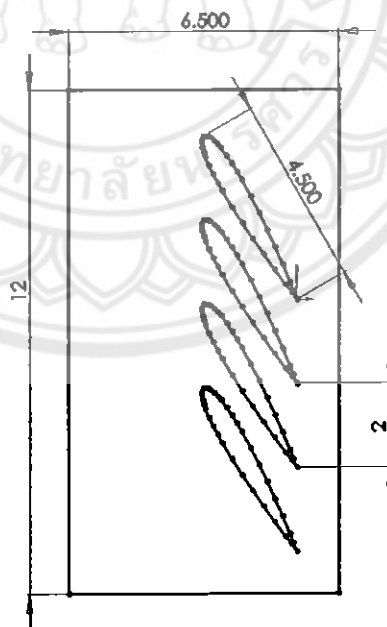
1.4.1 แบบจำลองกังหันก๊าซขนาดจิ๋ว 2 มิติจัดเรียงในแบบ Cascade โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

1.4.2 ใช้คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 1200-1600 K และความดัน 2-4 atm

1.4.3 ของไหลเป็นแบบ Compressible

1.4.4 ศึกษาใบพัดที่ไม่มีความโค้ง และใบพัดกังหันที่มีความโค้ง

1.4.5 ขนาดความกว้างของกรอบสี่เหลี่ยม (โดเมนการคำนวณ) มีขนาด 6.5 มิลลิเมตร ยาว 12 มิลลิเมตร โดยใช้ใบพัดจำนวน 4 ใบพัด มีความยาวของเส้นคอร์ด 4.5 มิลลิเมตร และระยะห่างของแต่ละใบพัดเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างแบบร่างกังหันขนาดจิ๋วโดยที่ใบพัดไม่มีความโค้ง

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและจัดทำวรรณกรรมปริทัศน์

1.5.2 เขียนแบบก้างหินขนาดจิวและแบบใบพัดโดยใช้โปรแกรม SolidWorks

1.5.3 ใช้โปรแกรม COMSOL ในการหาค่าตบเชิงตัวเลข

1.5.4 หาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ได้กับอุณหภูมิและความดัน

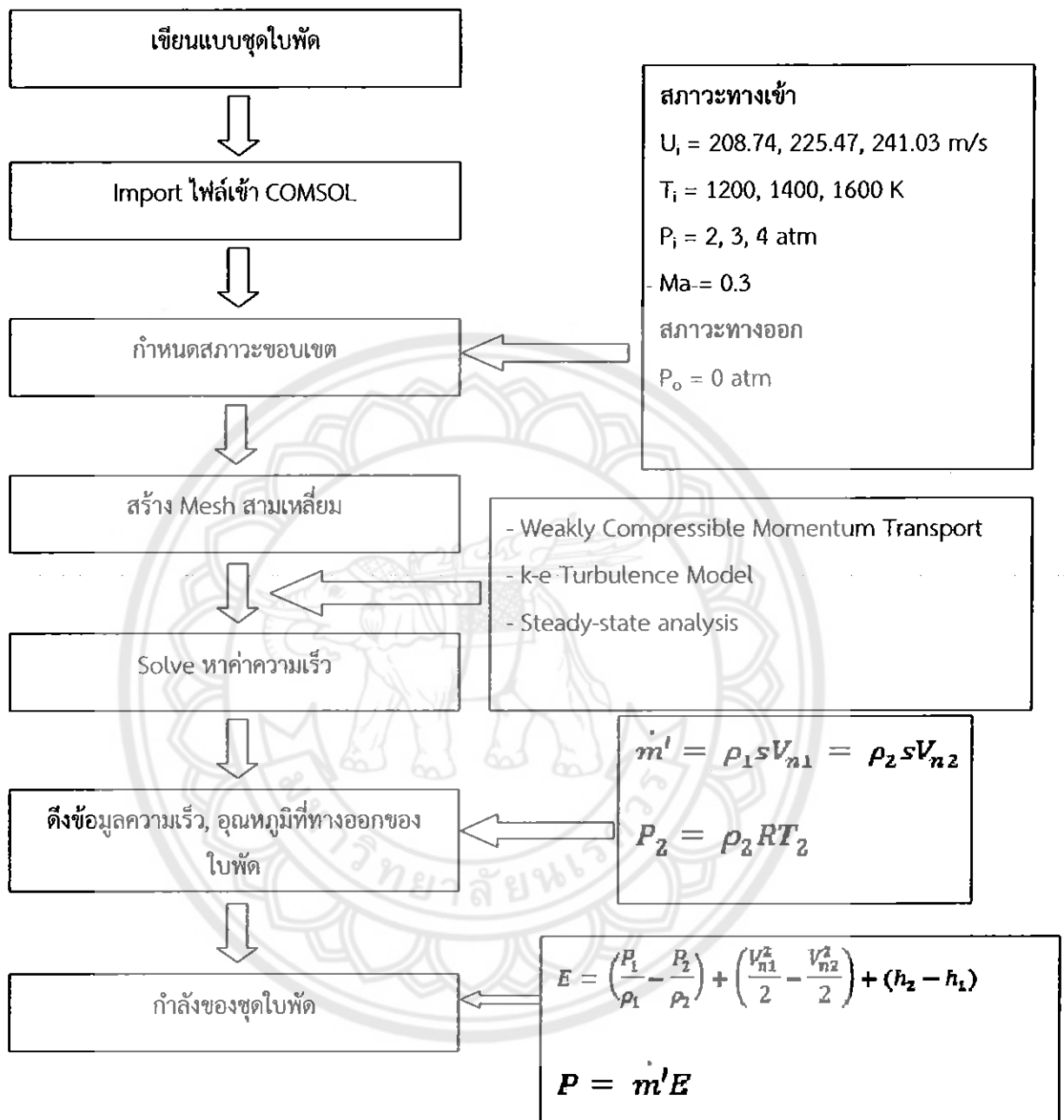
1.5.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5.6 สรุปผลการวิจัย

แบบจำลองก้างหินขนาดจิว

แบบจำลองก้างหินขนาดจิวสามารถออกแบบโดยใช้โปรแกรมเขียนแบบ Solidworks โดยการสร้างแบบจำลองนี้จะต้องบันทึกในนามสกุล .dxf และทำการบันทึกอีกครั้งโดยโปรแกรม DWGeditor ในนามสกุล .DWG หลังจากนั้นจึงทำการ Import เข้าสู่โปรแกรม COMSOL เพื่อคำนวณการไหลต่อไป





รูปที่ 1.2 Flowchart ของ Data Reduction

1.6 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

รายการ	พ.ศ. 2555					พ.ศ.2556		
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1.ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและจัดทำ วรรณกรรมปริทัศน์								
2.เขียนแบบกึ่งหุ่นขนาดจิ๋วและแบบ ใบพัดโดยใช้โปรแกรม SolidWorks								
3.ใช้โปรแกรม COMSOL ในการหา คำตอบเชิงตัวเลข								
4.หาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ได้ กับอุณหภูมิและความดัน								
5.วิเคราะห์ผลการทดลอง								
6.สรุปผลการวิจัย								

1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ

ตารางที่ 1.2 รายละเอียดงบประมาณ

ลำดับที่	รายการ	ราคา	หน่วย
1	ค่าพิมพ์งาน	1,000	บาท
2	ค่าเช่าเล่ม	1,000	บาท
	รวม	2,000	บาท

บทที่ 2

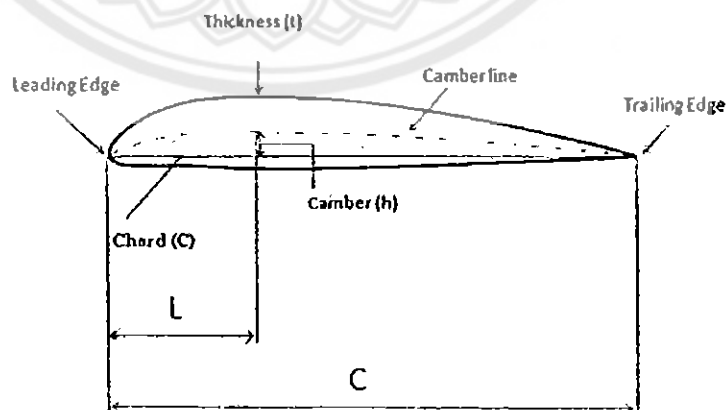
ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 แพนอากาศแบบ NACA 4 Series

เนื่องจากในโครงการนี้ เราเลือกใช้ใบพัดกังหันตามแพนอากาศของ NACA 4 Series จึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจการเรียกชื่อและนิยามต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเสียก่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยมีองค์ประกอบของแพนอากาศดังต่อไปนี้

1. Leading Edge คือ ส่วนต้นของแพนอากาศ มีรูปร่างมน
2. Trailing Edge คือ ส่วนปลายของแพนอากาศ มีรูปร่างเป็นปลายแหลม
3. ระยะคอर्ड (Chord), C คือระยะการกระจัดที่วัดระหว่าง Leading Edge และ Trailing Edge
4. ความหนา (Thickness), t คือ ความหนาของแพนอากาศโดยวัดในส่วนที่หนาที่สุดจากเส้นโค้ง (Camber)
5. ระยะความโค้ง (Camber), h วัดจากระยะที่กว้างที่สุดระหว่างเส้นคอर्डกับเส้นแสดงความโค้ง (Camber line) หรือเส้นศูนย์ (Center line)
6. ระยะ L คือ ระยะที่วัดจาก Leading Edge ถึงตำแหน่งที่แพนอากาศมีความหนามากที่สุด



รูปที่ 2.1 แพนอากาศของ NACA

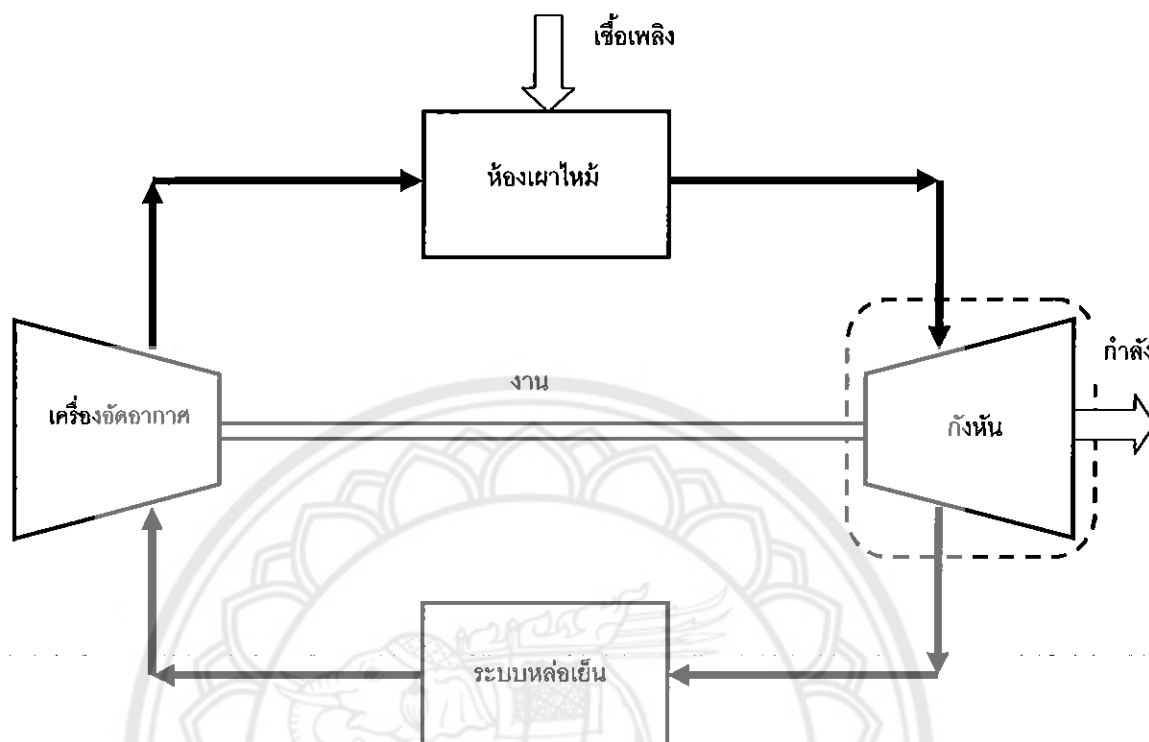
สำหรับตัวเลข 4 หลัก แสดงโดย X ใน NACA XXXX มีความหมายดังนี้คือ

1. หลักแรกหมายถึงเปอร์เซ็นต์ของระยะความโค้งหารด้วยระยะคอर्ड แล้วคูณด้วย 10 แสดงเป็นสมการได้โดย $\frac{h \times 100}{c} \times 10$
2. หลักที่ 2 หมายถึง ระยะ L หารด้วยระยะคอर्ड คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ แล้วคูณด้วย 10 แสดงเป็นสมการได้โดย $\frac{L \times 100}{c} \times 10$
3. สองหลักสุดท้าย หมายถึง เปอร์เซ็นต์ของความหนาเทียบกับระยะคอर्ड แสดงเป็นสมการได้โดย $\frac{t}{c} \times 100$

ยกตัวอย่างเช่น NACA 0012 หมายถึง แพนอากาศที่ไม่มีความโค้ง มีความหนาเป็น 12% ของระยะคอर्ड NACA 4512 หมายถึง แพนอากาศที่มีความโค้งโดยมีระยะความโค้ง 4% ของระยะคอर्ड และความหนาเป็น 12% ของระยะคอर्ड เป็นต้น

2.1.2 วัฏจักรของกังหันก๊าซ

วัฏจักรการทำงานของกังหันก๊าซเริ่มจาก อากาศไหลเข้าเครื่องอัดอากาศ (Compressor) โดยเครื่องอัดอากาศจะทำหน้าที่อัดอากาศให้มีความดันสูงขึ้น แล้วจึงไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ (Combustor) ผสมกับเชื้อเพลิง หลังจากการเผาไหม้ได้ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิสูง จากนั้นก๊าซร้อนจึงไหลเข้าสู่กังหัน (Turbine) โดยกังหันจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานจลน์ ซึ่งจะได้กำลังหรืองานออกมา กำลังที่ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนหนึ่งจะใช้ในการขับเคลื่อนเพลลาที่ต่อกับเครื่องอัดอากาศ และอีกหนึ่งส่วนนำไปใช้ต่อไป เช่น นำไปขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น เนื่องจากก๊าซที่ออกจากกังหันยังมีอุณหภูมิสูงจึงต้องเข้าเครื่องหล่อเย็นเพื่อให้ก๊าซมีอุณหภูมิลดลงก่อนเข้าเครื่องอัดอากาศ และทำงานเป็นวัฏจักรต่อไป อนึ่ง กังหันก๊าซเป็นเครื่องที่ไม่สามารถเริ่มเดินเครื่องด้วยตัวเองได้เหมือนเครื่องยนต์ลูกสูบทั่วๆ ไปจะต้องมีเครื่องช่วยหมุนจนได้ความเร็วรอบระดับหนึ่งจึงจะสามารถทำการจุดเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ได้ เครื่องช่วยหมุนนี้อาจใช้มอเตอร์ไฟฟ้าหรือกังหันก๊าซเล็กๆ

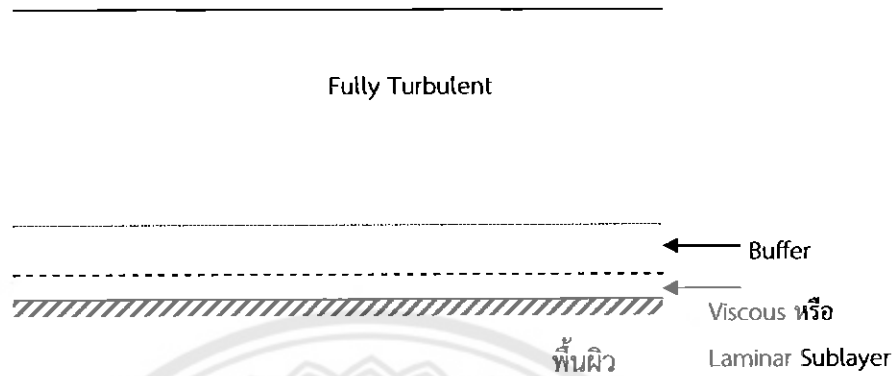


รูปที่ 2.2 วัฏจักรกังหันก๊าซอย่างง่าย

2.1.3 สมการที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากในการศึกษานี้ เรากำหนดให้การไหลเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ดังนั้นเราจึงเลือกแบบจำลอง $k-\epsilon$ เพื่อช่วยในการคำนวณหาความเร็ว ในการเริ่มการคำนวณนั้นมีความคล้ายคลึงกันกับการคำนวณสำหรับการไหลแบบราบเรียบ คือ การพิจารณาสมการการอนุรักษ์ต่างๆ นั่นเอง ความแตกต่างอยู่ที่การกำหนดความหนืด เนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วนนั้นประกอบไปด้วยชั้นต่างๆ 3 ชั้นการไหลด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งได้แก่ Viscous หรือ Laminar Sublayer ซึ่งแสดงคุณลักษณะของการไหลแบบราบเรียบ ชั้นถัดมาเป็นชั้น Buffer ซึ่งเปรียบเทียบกับ Transition และชั้นสุดท้ายเป็น Fully Turbulent ในการไหลแบบปั่นป่วนผ่านพื้นผิวใดๆ นั้นต้องมีชั้นต่างๆ ประกอบกันขึ้นมาเสมอ ขึ้นอยู่กับว่าอิทธิพลของชั้นใดมีมากกว่ากัน อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้สมการที่เหมาะสมกับลักษณะการไหลนั้น เราสามารถเปรียบเทียบจากค่าความหนืดของการ

ไหลแบบราบเรียบ (μ) กับความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วนหรือ Eddy Viscosity (μ_t) ดังแสดงในรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 2.3 ลำดับชั้นต่างๆ สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนนับจากพื้นผิวขึ้นไป

หลังจากการทำ Reynolds Decomposition และ Time Averaging แล้ว จะได้สมการอนุรักษ์เป็นดังนี้

สมการอนุรักษ์มวล (Continuity Equation)

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Conservation)

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \frac{\partial}{\partial y} \left(1 + \frac{\varepsilon}{\nu} \right) \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (2.2)$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในสองมิตินั้น ตัวไม่ทราบค่า (Unknown) ในสมการโมเมนตัมมีเพียงตัวเดียว คือ $-\rho \overline{u'v'}$ ดังนั้น ในปี 1877 Boussinesque ได้เสนอแบบจำลองเพื่อให้ Analogous กับความเค้นเฉือนเชิงโมเลกุลเป็น

$$\tau_t = -\rho \overline{u'v'} = \mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (2.3)$$

เมื่อ μ_t คือ Eddy Viscosity โดยมีหน่วยเหมือนกันกับ μ ต่างกันตรงที่ μ_t ไม่เป็นสมบัติของของไหล แต่จะเปลี่ยนแปลงกับสภาวะการไหลและรูปทรง

ในการแก้ระบบสมการ (2.1) และ (2.2) นั้น สมการอนุรักษ์มวลและสมการอนุรักษ์โมเมนตัมถือว่าเป็นสมการหลัก แล้วจึงอาศัยแบบจำลองสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนมาเพิ่มเข้าไป ในโครงการนี้เราเลือกใช้แบบจำลองที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งก็คือ แบบสองสมการ ประกอบด้วยความสัมพันธ์ของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนและอัตราการแพร่กระจาย เรียกว่าแบบจำลอง k-ε ซึ่งแบบจำลองนี้มีความซับซ้อนน้อยแต่ผลที่ได้จากการคำนวณเป็นที่น่าเชื่อถือ

สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy, k)

$$\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \rho \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \left[\rho \varepsilon + 2\mu \left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial x_j} \right)^2 \right] \quad (2.4)$$

สมการอัตราการแพร่กระจาย (Dissipation Rate, ε)

$$\rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_1 \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} + \frac{2\mu \mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \right)^2 \quad (2.5)$$

เมื่อ k คือ Turbulent Kinetic Energy

ε คือ อัตราการแพร่กระจาย

μ คือ ความหนืดสำหรับการไหลแบบราบเรียบ

μ_t คือ Turbulent Eddy Viscosity

$C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ คือ ค่าคงที่

τ คือ ความเค้นเฉือน

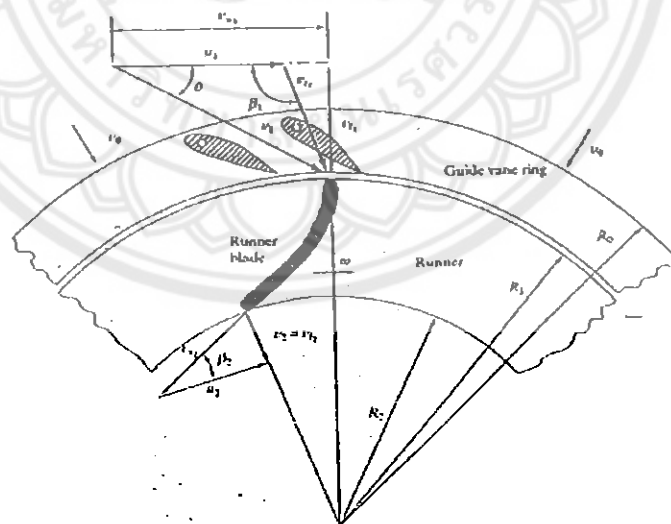
2.1.4 การหาค่าตั้งของกังหัน

การศึกษาการทำงานของเครื่องจักรกลของไหลอาศัยทฤษฎีการวิเคราะห์เชิงอนุพันธ์ของของไหลเพื่อบอกพฤติกรรมของของไหลและทฤษฎีเครื่องจักรกลของไหลสำหรับกังหันเพื่อวิเคราะห์กำลังที่สร้างจากกังหัน ในหัวข้อนี้จะอธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทั้งสองทฤษฎี

ทฤษฎีเครื่องจักรกลของไหลสำหรับกังหัน

กังหันเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ดึงพลังงานจากของไหลโดยพลังงานนั้นมาจากความสูงหรือความดันของของไหลที่ทางเข้ากังหัน กังหันมีด้วยกัน 2 ประเภท คือ กังหันแบบแรงดล (Impulse Turbine) เป็นกังหันที่ดึงพลังงานโดยใช้การชนของเจ็ทของของไหลกับใบกังหัน เหมาะที่จะใช้กับความดันสูง เช่น กังหันเพลตัน (Pelton turbine) เป็นต้น และประเภทที่ 2 คือ กังหันแบบแรงปฏิกิริยา (Reaction turbine) ซึ่งจะดึงพลังงานโดยใช้แรงปฏิกิริยาที่เกิดจากผลต่างของความดันด้านบนและด้านล่างของใบพัดกังหันทำงานได้ที่ความดันต่ำ เช่น กังหันฟรานซิส (Francis turbine) กังหันแคปแลน (Kaplan Turbine) เป็นต้น ดังนั้นกังหันที่เหมาะสมกับการไหลในท่อที่ก๊าซความร้อนสูงคือ กังหันแบบผลต่างของความดันโดยจะใช้เป็นกังหันฟรานซิส เพราะอากาศมีความร้อนสูงและความดันที่ต่างกัน

การออกแบบใบกังหันต้องอาศัยทฤษฎีเครื่องจักรกลของไหลมาช่วยในการวิเคราะห์ การออกแบบสามเหลี่ยมความเร็วที่ทางเข้าและทางออกจะออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่ง จะเกิดขึ้นเมื่อความเร็ว $v_{w2} = 0$ และความเร็ว $v_2 = v_{r2}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนั้นจึงจะใช้เงื่อนไขเป็นเงื่อนไขในการออกแบบ



รูปที่ 2.4 สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางเข้าและทางออกของใบพัด

กำลังที่ผลิตจากกังหันสามารถหาได้จากผลต่างของความเร็วระหว่างทางเข้าและทางออกคูณกับอัตราการไหลของของไหลที่ไหลผ่านกังหัน ดังแสดงในสมการที่ 2.5

$$P = \dot{m}(u_1 v_{w1} - u_2 v_{w2}) \quad (2.6)$$

เมื่อ P คือ กำลังที่ได้ออกมา

\dot{m} คือ อัตราการไหลเชิงมวล

u_1 คือ ความเร็วปลายที่ทางเข้าของใบพัด

v_{w1} คือ ความเร็วสัมผัสสามเหลี่ยมมุมฉากที่ทางเข้าของใบพัด

u_2 คือ ความเร็วปลายที่ทางออกของใบพัด

v_{w2} คือ ความเร็วสัมผัสสามเหลี่ยมมุมฉากที่ทางออกของใบพัด

เมื่อออกแบบสภาวะทางออกให้ $v_{w2} = 0$ จะทำให้ได้กำลังสูงสุด สำหรับกำลังสูงสุดที่กังหันสามารถสร้างได้มีค่าเป็น

$$E_{o,max} = \dot{m}(u_1 v_{w1}) \quad (2.7)$$

กำลังที่ทางเข้าของกังหันได้มาจากความดันหรือความสูงของของไหลซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$E_{i,max} = \rho g Q H = \dot{m}_g H \quad (2.8)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของสารทำงาน

g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก

Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร

H คือ เฮดของสารทำงาน

ดังนั้น จะได้ประสิทธิภาพรวม (Overall Efficiency) เป็น

$$\eta_{\max} = \frac{\text{Power out}}{\text{Power in}} = \frac{(u_1 v_{w_1} - u_2 v_{w_2})}{gH} \quad (2.9)$$

ประสิทธิภาพสูงที่สุดทางทฤษฎีจะได้เป็น

$$\eta_{\max} = \frac{u_1 v_{w_1}}{gH} \quad (2.10)$$

อัตราการไหลที่ผ่านเข้าชุดใบพัดสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ขอบใบพัดคูณกับความเร็วที่ตั้งฉากกับพื้นที่ตั้งสมการ

$$Q_{\text{out}} = (\pi d_{\text{im}} B) v_{f_2} \quad (2.11)$$

$$Q_{\text{in}} = (\pi D_{\text{im}} B) v_{f_1} \quad (2.12)$$

เมื่อ Q_{in} คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรทางเข้า

Q_{out} คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรทางออก

D_{im} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของใบพัด

d_{im} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของใบพัด

B คือ ความหนาของใบพัด

v_{f_1} คือ ความเร็วในแนวรัศมีทางเข้าของใบพัด

v_{f_2} คือ ความเร็วในแนวรัศมีทางออกของใบพัด

ซึ่งอัตราการไหลสามารถหาได้จากอัตราการไหลของอากาศ ดังนี้

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

เมื่อ Re คือ Reynolds number

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ

v คือ ความเร็วสัมบูรณ์

μ คือ ความหนืดของอากาศ

ดังนั้น เราสามารถเขียน Re ในรูปของอัตราการไหลได้ ดังนี้

$$Re = \frac{4\rho Q}{\mu\pi D} \quad (2.13)$$

หรือ

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

สมการนี้คือ สมการอัตราการไหลของอากาศที่ขึ้นอยู่กับ Re และเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อก๊าซร้อนนั่นเอง

จากสมมติฐานที่ว่าของไหลอัดตัวไม่ได้ (ความหนาแน่นคงที่)

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

เราสามารถหาความเร็วที่ทางเข้าและทางออกได้ดังนี้

$$v_{f1} = \frac{Q}{\pi D_{im} B} \quad (2.14)$$

$$v_{f2} = \frac{Q}{\pi d_{im} B} \quad (2.15)$$

พิจารณาสัมเหลี่ยมความเร็วที่ทางออกซึ่งออกแบบให้ความเร็วสัมบูรณ์อยู่ในแนวรัศมี ($v_{w2} = 0$)

ทำให้ได้กำลังสูงสุด

จะได้

$$\tan \beta_2 = \frac{v_{f2}}{u_2} \quad ; \quad u_2 = v_{f2} \cot \beta_2 \quad (2.16)$$

ดังนั้น เราสามารถหาความเร็วเชิงมุมในการหมุนของใบพัดที่ทำให้เกิด E_{max} ได้จาก $u_2 = \frac{\omega d_{im}}{2}$

$$\omega = \frac{2u_2}{d_{im}} \quad (2.17)$$

หรือ

$$N = \frac{60}{\pi} \times \frac{u_2}{d_{im}}$$

จากสมการที่ 2.11 เมื่อทราบอัตราการไหลของอากาศภายในท่อซึ่งเท่ากับอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านเข้ากังหัน และจากสมการที่ 2.12 และ 2.13 เราจะได้ความเร็วในแนวรัศมีของของไหลที่ทางเข้าและออกเป็น

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

จากสมการสามเหลี่ยมความเร็วรูปที่ 2.5 จะได้ความเร็วที่ปลายใบพัดเป็น

$$u_2 = v_{f2} \cot \beta_2 \quad (2.18)$$

เมื่อ u_2 คือ ความเร็วปลายที่ทางออกของใบพัด

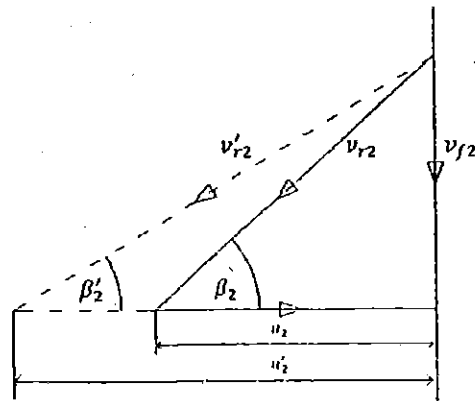
v_{f2} คือ ความเร็วในแนวรัศมีทางออกของใบพัด

β_2 คือ มุมทางออกของใบพัด

จากนั้นจะได้ความเร็วปลายที่ทางเข้าใบพัดเป็น

$$u_1 = u_2 \frac{d_{im}}{D_{im}} = (v_{f2} \cot \beta_2) \frac{d_{im}}{D_{im}} \quad (2.19)$$

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} คือ ความเร็วในแนวรัศมีที่ทางเข้าของใบพัด β_1 คือ มุมทางเข้าของใบพัด u_1 คือ ความเร็วปลายที่ทางเข้าของใบพัดและ v_{w1} คือ ความเร็วสัมพัทธ์สามเหลี่ยมมุมฉากที่ทางเข้าของใบพัด v_1 คือความเร็วสัมบูรณ์ β'_1 คือ มุมทางเข้าของใบพัดที่เปลี่ยนไป v'_{r1} คือ ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างของไหลกับใบพัดที่ทางเข้าเมื่อเปลี่ยนมุม v'_{w1} คือ ความเร็วสัมพัทธ์สามเหลี่ยมมุมฉากที่ทางเข้าของใบพัดเมื่อเปลี่ยนมุม v'_1 คือ ความเร็วสัมบูรณ์เมื่อเปลี่ยนมุม

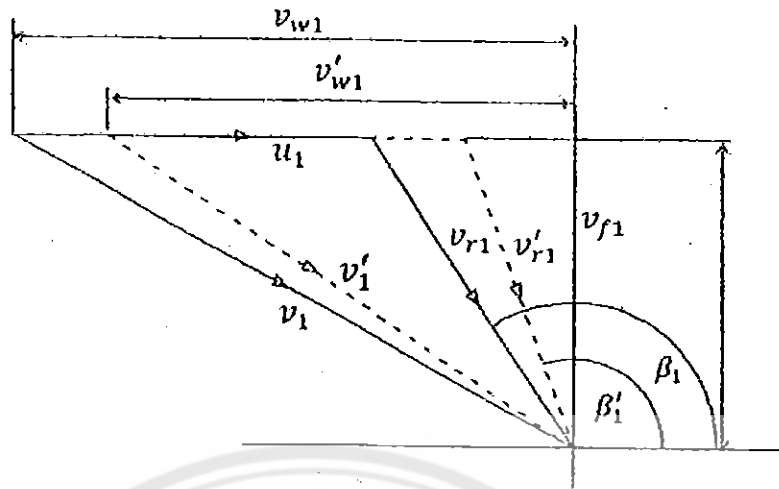
$$v_{w1} = \sqrt{v_1^2 - v_{f1}^2} \quad (2.20)$$

โดยที่ v_1 ได้จากการทดลอง ดังนั้นจึงสามารถหาค่า v_{w1} ได้

ดังนั้น เราจึงสามารถหาค่ากำลังได้จาก

$$\begin{aligned} \text{Power} &= \dot{m} v_{w1} u_1 \\ \text{Power} &= \dot{m} (v_{f2} \cot \beta_2) \frac{d_{im}}{D_{im}} \sqrt{v_1^2 - v_{f1}^2} \end{aligned} \quad (2.21)$$

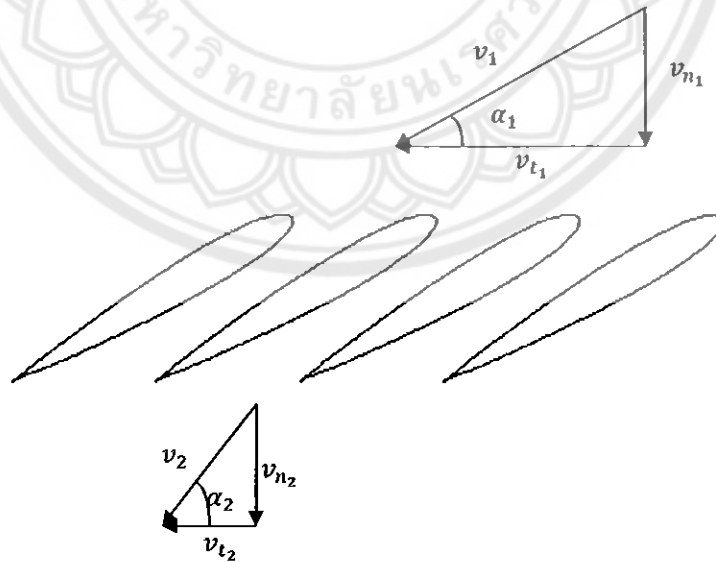
นำ Power ของแต่ละใบพัดเปรียบเทียบกับกันเพื่อที่จะหาลักษณะใบพัดที่ทำให้กำลังออกมามากที่สุด



รูปที่ 2.6 สามเหลี่ยมความเร็วที่ทางเข้าของใบพัด

2.1.4 การคำนวณกำลังของการไหลผ่านใบพัดชนิด Cascade

กรณีใบพัดของคอมเพรสเซอร์หรือกังหันก๊าซที่มีชุดใบพัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ และมีจำนวนใบพัดมากเราจะพิจารณาชุดใบพัดเป็นแบบ Cascade ทำให้การไหลเป็นแบบการไหลภายในเทียบได้กับการไหลผ่านท่อหรือช่องปิดที่มีเพียงทางเข้าและทางออกเท่านั้น



รูปที่ 2.7 สามเหลี่ยมความเร็วทางเข้าและทางออก Cascade

เมื่อ v_1 คือ ความเร็วของของไหลทางเข้า

- v_2 คือ ความเร็วของของไหลทางออก
- v_{n_1} คือ ความเร็วตามแกนตั้งฉากของของไหลทางเข้า
- v_{n_2} คือ ความเร็วตามแกนตั้งฉากของของไหลทางออก
- v_{t_1} คือ ความเร็วตามแกนสัมผัสของของไหลทางเข้า
- v_{t_2} คือ ความเร็วตามแกนสัมผัสของของไหลทางออก

ถ้าให้ B เป็นความหนาของใบพัด เราสามารถหาอัตราการไหลโดยมวลของของไหลผ่าน Cascade ได้จาก และ s เป็นระยะห่างระหว่างใบพัด

$$\dot{m} = sB\rho_1 v_{n_1} = sB\rho_2 v_{n_2} \quad (2.22)$$

จากสมการของ Bernoulli สามารถคำนวณหาพลังงานได้

$$E = \left(\frac{P_1}{\rho_1} - \frac{P_2}{\rho_2} \right) + \left(\frac{v_{n_1}^2}{2} - \frac{v_{n_2}^2}{2} \right) + (h_1 - h_2) \quad (2.23)$$

- เมื่อ P_1 คือ ความดันของของไหลขาเข้า
- P_2 คือ ความดันของของไหลขาออก
- ρ_1 คือ ความหนาแน่นของของไหลขาเข้า
- ρ_2 คือ ความหนาแน่นของของไหลขาออก
- v_{n_1} คือ ความเร็วตามแกนตั้งฉากของของไหลทางเข้า
- v_{n_2} คือ ความเร็วตามแกนตั้งฉากของของไหลทางออก
- h_1 คือ เอนทาลปีของของไหลขาเข้า
- h_2 คือ เอนทาลปีของของไหลขาออก

ดังนั้น เราจึงหาค่าได้จาก

$$P = \dot{m}E \quad (2.24)$$

2.2 วรรณกรรมปริทัศน์

Epstein [1] ทำการศึกษา micro-electro-mechanical systems (MEMS) โดยใช้เครื่องอัดอากาศแบบหอยโข่งขนาดเล็กระดับมิลลิเมตร มีอัตราส่วนการอัดระหว่าง 2:1 ถึง 4:1 และอุณหภูมิอากาศเข้ากังหันก๊าซขนาดจิ๋วอยู่ระหว่าง 1200-1600 เคลวิน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเกี่ยวกับความร้อนของกังหันก๊าซขนาดจิ๋วจะมีความคล้ายคลึงกับกังหันก๊าซขนาดใหญ่ แต่จะต่างกันที่ข้อกำหนดในด้านขนาดและการผลิต และได้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบโดยรวม กระบวนการผลิต วัสดุที่ใช้ การออกแบบส่วนประกอบ อุปกรณ์เสริม การใช้งาน และความคุ้มค่าทางหลักเศรษฐศาสตร์

Robinson [2] ทำการศึกษาการพัฒนากังหันก๊าซขนาดจิ๋วเพื่อให้สามารถผลิตกำลังออกมาได้ 1 กิโลวัตต์ ซึ่งในการพัฒนากังหันก๊าซขนาดจิ๋วนั้นจำเป็นต้องใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้เพื่อให้ปลอดภัยในการใช้งาน การใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงได้มีการพัฒนาเป็นครั้งแรกสำหรับใช้ในเครื่องยนต์เจ็ทสำหรับเครื่องบิน จะสามารถช่วยลดการปล่อย NOx ได้ จึงได้มีการพัฒนาห้องเผาไหม้โดยการเทียบสเกล เพื่อใช้ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดจิ๋วที่สามารถทำการผสมกันระหว่างอนุภาคขนาดเล็กระดับไมครอน ในการศึกษาได้กำหนดในส่วนของคอมเพรสเซอร์กับกังหัน รวมถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดความยาวรวมกันประมาณ 110 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 100 มิลลิเมตร ในส่วนที่เป็นโรเตอร์มีขนาดประมาณ 20 มิลลิเมตร และห้องเผาไหม้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 40 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 60 มิลลิเมตร และความยาวของห้องเผาไหม้ประมาณ 50 มิลลิเมตร ในการศึกษาได้ใช้ความเร็วรอบที่ 500,000 รอบ/นาที อัตราส่วนการอัด 3:1 และอุณหภูมิอากาศเข้าประมาณ 1200 K ในส่วนของวัสดุที่ใช้ทำกังหันนั้นทำมาจากไททานเนียมอัลลอยซึ่งจะสามารถทนอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ 1200 K ได้โดยไม่ต้องมีการหล่อเย็นกังหัน

Okamoto และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาหลักการทํางานเบื้องต้นและการออกแบบ Micro Wave Rotor เพื่อนำมาใช้ในการปรับปรุงระบบการทํางานของกังหันก๊าซขนาดจิ๋ว (Micro gas turbines) เนื่องจากการลดขนาดของกังหันก๊าซลงทำให้ประสิทธิภาพการทํางานของอุปกรณ์ต่างๆ ลดลง ซึ่ง Wave Rotor จะติดตั้งระหว่างห้องเผาไหม้ คอมเพรสเซอร์ และกังหัน จะทำหน้าที่เป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้ และ ทำหน้าที่อัดอากาศเพิ่มความดันของก๊าซร้อนก่อนเข้ากังหัน ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกังหันก๊าซ เพราะจะทำให้เพิ่มอัตราส่วนความดันของวัฏจักร และเพิ่มอุณหภูมิของก๊าซร้อนด้วย โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขควบคู่กับการสังเกตผลการทดลองจริงในการศึกษาปัจจัยสำคัญที่มีต่อการออกแบบ Wave Rotor เพื่อใช้กับ

กังหันก๊าซขนาดจิวระดับกิโลวัตต์ (kW) เช่น ความเร็วของอากาศ อุณหภูมิสูงสุด การถ่ายเทความร้อน
 ของการไหลของอากาศ เป็นต้น

Nagashima [4] ได้ทำการอธิบายการทำงานโดยรวมเกี่ยวกับกังหันก๊าซขนาดเล็ก ซึ่งการทำงานจะแบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนคอมเพรสเซอร์ ส่วนห้องเผาไหม้ และส่วนของกังหัน ในส่วน
 ของคอมเพรสเซอร์จะทำหน้าที่ในการอัดก๊าซเพื่อเพิ่มความดันจากความดันมาตรฐาน ในส่วนของ
 ห้องเผาไหม้จะทำหน้าที่ในการเพิ่มอุณหภูมิก๊าซหลังการอัดก่อนที่จะเข้าสู่ส่วนของกังหัน และในส่วน
 ของกังหันจะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะนำกำลังที่ได้กลับไปขับเคลื่อน
 คอมเพรสเซอร์ ซึ่งเพลลาของคอมเพรสเซอร์และกังหันจะต่อกัน และในส่วนที่สองจะนำกำลังที่ได้
 ออกไปใช้งาน ซึ่งในการศึกษานี้ได้มีการนำเอาเวฟโรเตอร์เข้ามาใช้ซึ่งเวฟโรเตอร์มีศักยภาพในการ
 ปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของระบบกังหันก๊าซ เนื่องจากสามารถเพิ่มอุณหภูมิและอัตราส่วน
 การอัดของอากาศก่อนเข้ากังหันได้

Pilavachi [5] สรุปลักษณะศักยภาพในการใช้งานกังหันก๊าซขนาดเล็กและขนาดจิวในการผลิต
 กระแสไฟฟ้า เนื่องจากมีการปรับปรุงประสิทธิภาพและประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมโดยลดการปล่อยก๊าซ
 คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) นอกจากนี้ยังมีข้อได้เปรียบกว่าระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กอื่นๆคือ มีขนาด
 เล็กกะทัดรัด น้ำหนักเบา เสียกรบวมน้อย ลดต้นทุนในการผลิต ลดต้นทุนด้านการซ่อมบำรุง ลดการ
 สิ้นเสทือน ซึ่งระบบกังหันก๊าซขนาดจิวที่มีอยู่ในปัจจุบันสามารถผลิตกำลังได้อยู่ในช่วง 25-80 kW
 และอนาคตมีการวางแผนไว้ว่าจะสามารถผลิตได้ถึง 500 หรือ 1000 kW รวมถึงศึกษาแนวทางของ
 กังหันก๊าซขนาดจิวในอนาคตด้วย ซึ่งจะขึ้นอยู่กับช่องทางทางการตลาดและนโยบายของรัฐบาล
 ประเทศต่างๆ

ยุทธพงษ์ และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลผ่านกังหันก๊าซขนาดจิว 3 มิติ
 โดยการไหลของก๊าซเป็นแบบราบเรียบ ซึ่งมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ 5.89×10^{-8} ลูกบาศก์
 เมตรต่อวินาที โดยไม่มี Guide Vane ใช้คุณสมบัติก๊าซร้อนที่อุณหภูมิเข้ากังหันก๊าซเท่ากับ 1223 K
 ซึ่งได้จากการเผาไหม้ของเซลล์เชื้อเพลิง โดยศึกษาจำนวนใบพัดที่ 4 และ 8 ใบพัด ความโค้ง และมุม
 ทางออกของใบพัดที่ 50, 60 และ 70 องศา ที่มีผลต่อกำลังที่ได้จากกังหัน ซึ่งจากการศึกษาพบว่า
 กำลังที่ได้จากกังหันจะมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ใบพัดจำนวน 8 ใบพัด เนื่องจากการดึงพลังงานจากของไหล
 มากกว่า 4 ใบพัด มีความโค้งมากที่สุด เนื่องจากการเปลี่ยนทิศของการไหลมากจึงทำให้เกิดแรง
 กระทำที่ใบพัดมาก กำลังจึงมาก และมีมุมทางออกของใบพัด 50 องศา เนื่องจากเมื่อพิจารณา
 สามเหลี่ยมความเร็วพบว่า มุมทางออกน้อยๆ ให้องค์ประกอบความเร็วที่ปลายใบพัดสูงสุด

บทที่ 3

ขั้นตอนการคำนวณ

ในบทนี้เป็นการอธิบายเกี่ยวกับวิธีและขั้นตอนการสร้างแบบจำลองโดยเริ่มจากการเขียนแบบก้างหันในโปรแกรม SolidWorks และนำไฟล์เขียนแบบเข้าสู่โปรแกรม COMSOL จากนั้นทำการตั้งค่าเริ่มต้นและกำหนดค่าการไหลของของไหลและทำการวิเคราะห์การไหลที่ไหลผ่านแบบจำลองโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 การสร้างแบบจำลองชุดใบพัดก้างหันก๊าซขนาดจิ๋ว

สำหรับในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการตัดส่วนหนึ่งของก้างหันก๊าซออกมา ทำให้ใบพัดที่ได้เป็นแบบ Cascade เพื่อใช้ในการคำนวณ โดยไม่นำความโค้ง (Curvature) ของก้างหันมาพิจารณา

3.1.1 การเขียนใบพัด NACA

สำหรับการเขียนใบพัด NACA 4 Series นี้ ได้ศึกษาจากงานวิจัยของ NASA[8] ซึ่งในงานวิจัยได้กำหนดจุดของการวาดใบพัด NACA ชนิดต่างๆไว้ ดังนั้นเราจึงได้เขียนใบพัดตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. กำหนดเส้นคอร์ด โดยมีความยาว 4.5 มิลลิเมตร และกำหนดจุดอิสระทั้งหมด 18 จุดบนเส้นคอร์ดโดยการสร้างเส้นด้วยคำสั่ง Line จำนวน 18 เส้นที่มีขนาดแตกต่างกันบนเส้นคอร์ด เนื่องจากในงานวิจัยของ NASA[8] ได้กำหนดจุดในการสร้างใบพัดไว้ 18 จุด ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การสร้างเส้นคอร์ด

ในการเขียนแบบใบพัด NACA จะต้องรู้พิกัดในการวาดใบพัด ซึ่งพิกัดเป็นไปตามตารางที่ 3.1 ถึงตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.1 ระยะทางจากจุดที่ 1 ถึงจุดต่างๆ ของใบพัด NAC [8]

จุดที่	% ระยะห่างจากจุดที่ 1 [8]	ระยะห่างจากจุดที่ 1 สำหรับ คอร์ดยาว 4.5 มิลลิเมตร (mm)
1	0	0
2	1.25	0.0563
3	2.5	0.113
4	5	0.225
5	7.5	0.338
6	10	0.450
7	15	0.675
8	20	0.9
9	25	1.13
10	30	1.35
11	40	1.8
12	50	2.25
13	60	2.7
14	70	3.15
15	80	3.6
16	90	4.05
17	95	4.28
18	100	4.5

ตารางที่ 3.2 ระยะของเส้นตั้งฉากกับเส้นคอร์ตสำหรับใบพัด NACA 0012 [8]

จุดที่	%ระยะห่างจากเส้น คอร์ตด้านบน [8]	%ระยะห่างจากเส้น คอร์ตด้านล่าง [8]	ระยะห่างจากเส้น คอร์ตด้านบน (mm)	ระยะห่างจากเส้น คอร์ตด้านล่าง (mm)
1	0	0	0	0
2	1.894	1.894	0.085	0.085
3	2.615	2.615	0.118	0.118
4	3.555	3.555	0.160	0.160
5	4.20	4.20	0.189	0.189
6	4.883	4.883	0.220	0.220
7	5.345	5.345	0.241	0.241
8	5.738	5.738	0.258	0.258
9	5.941	5.941	0.267	0.267
10	6.002	6.002	0.270	0.270
11	5.803	5.803	0.261	0.261
12	5.294	5.294	0.238	0.238
13	4.563	4.563	0.205	0.205
14	3.684	3.684	0.164	0.164
15	2.623	2.623	0.118	0.118
16	1.449	1.449	0.065	0.065
17	0.507	0.507	0.023	0.023
18	0	0	0	0

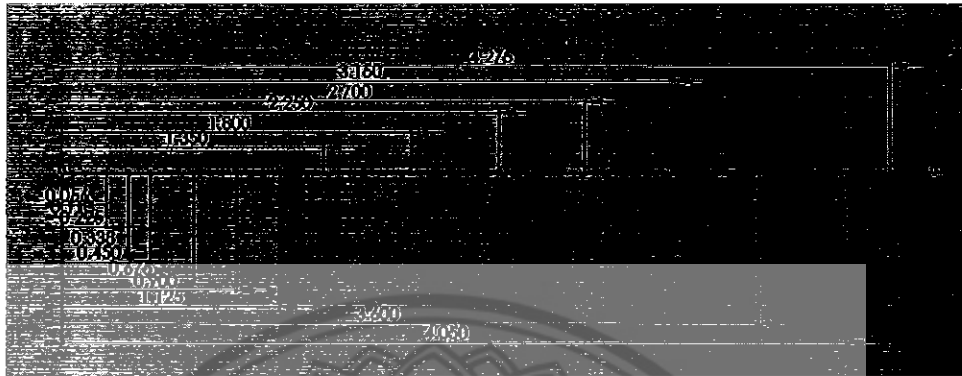
ตารางที่ 3.3 ระยะของเส้นตั้งฉากกับเส้นคอร์ตสำหรับใบพัด NACA 4512 [8]

จุดที่	%ระยะห่างจากเส้นคอร์ตด้านบน [8]	%ระยะห่างจากเส้นคอร์ตด้านล่าง [8]	ระยะห่างจากเส้นคอร์ตด้านบน (mm)	ระยะห่างจากเส้นคอร์ตด้านล่าง (mm)
1	0	0	0	0
2	2.33	1.51	0.105	0.068
3	3.22	2.07	0.145	0.093
4	4.50	2.67	0.203	0.120
5	5.46	2.99	0.246	0.135
6	6.25	3.18	0.281	0.143
7	7.46	3.28	0.336	0.148
8	8.34	3.17	0.375	0.143
9	8.95	2.95	0.403	0.133
10	9.37	2.66	0.422	0.120
11	9.64	1.97	0.434	0.089
12	9.29	1.29	0.418	0.058
13	8.43	0.7	0.379	0.032
14	7.06	0.29	0.318	0.013
15	5.23	0.04	0.235	0.002
16	2.93	0	0.132	0
17	1.58	0.04	0.0711	0.002
18	-0.12	0.12	-0.005	0.005

หมายเหตุ ระยะห่างจากเส้นคอร์ตคำนวณได้จาก

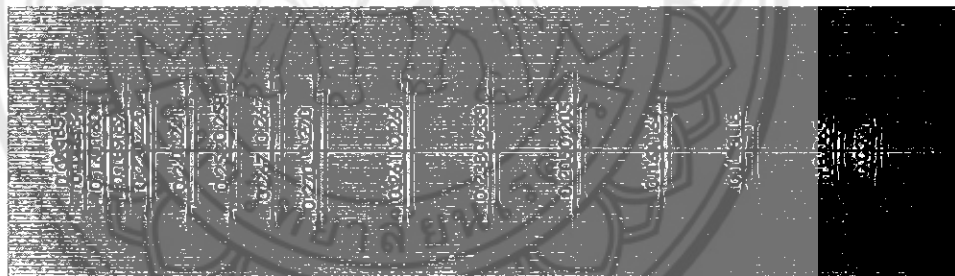
(ความยาวเส้นคอร์ต / 100) x เปอร์เซ็นของระยะห่างจากเส้นคอร์ต

2. ทำการกำหนดระยะห่างของแต่ละจุดตามตารางที่ 3.1 โดยใช้คำสั่ง Smart Dimension เพื่อกำหนดความห่างของแต่ละจุด ดังแสดงในรูปที่ 3.2



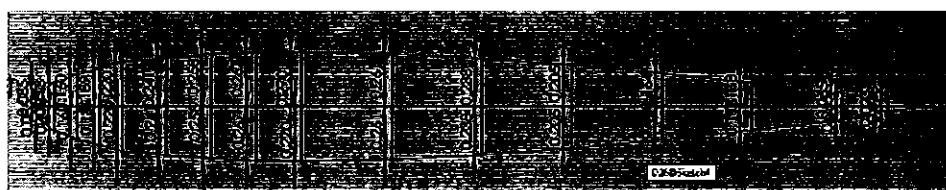
รูปที่ 3.2 การกำหนดระยะห่างของจุดบนเส้นคอร์ดเพื่อสร้างใบพัด[8]

3. เขียนเส้นตั้งฉากกับคอร์ดบนแต่ละจุดจากข้อที่ 2 ให้ความยาวของแต่ละเส้นเป็นไปตามตารางที่ 3.2 โดยใช้คำสั่ง Line ในการวาดเส้นตั้งฉากกับคอร์ด และใช้คำสั่ง Smart Dimension เพื่อกำหนดขนาดของแต่ละเส้น ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เขียนเส้นความหนาของแต่ละจุด[8]

4. ทำการลากเส้นต่อแต่ละจุดให้ครบทุกจุดโดยใช้คำสั่ง Line ในการเชื่อมแต่ละจุดเข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.4



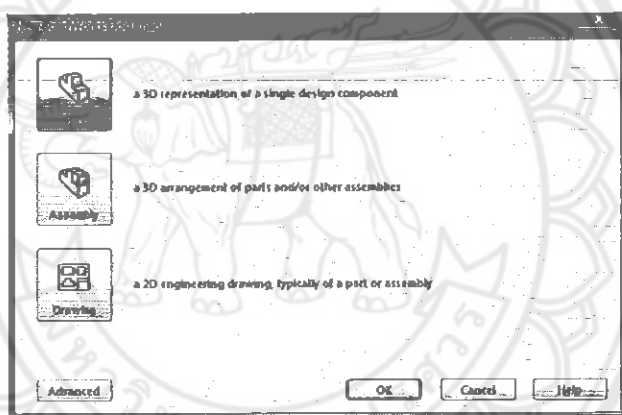
รูปที่ 3.4 ลากเส้นต่อจุดจนกลายเป็นใบพัด NACA[8]

สำหรับใบพัด NACA 4512 สามารถเขียนแบบได้ในลักษณะเดียวกัน โดยมีข้อมูลระยะในแนวแกนตามเส้นคอร์ด และระยะที่ห่างจากเส้นคอร์ดในแนวตั้งมาก แสดงในตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.3 ตามลำดับ

3.1.2 การเขียนแบบจำลองใบพัดกังหัน 2 มิติ

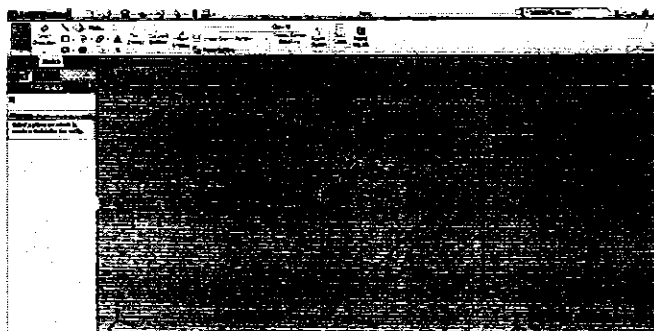
ในหัวข้อนี้ แสดงการเขียนแบบชุดกังหันขนาดจืดที่มีความยาวของคอร์ด 4.5 มิลลิเมตร จำนวน 4 ใบพัด และเขียนกล่องสี่เหลี่ยมเพื่อกำหนดขอบเขตของโดเมนการคำนวณ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เริ่มต้นเปิดโปรแกรม SolidWorks 2010 ในโหมด Part โดยใช้คำสั่ง คลิก SolidWorks 2010 >> File >> New >> Part >> OK ดังแสดงในรูปที่ 3.5



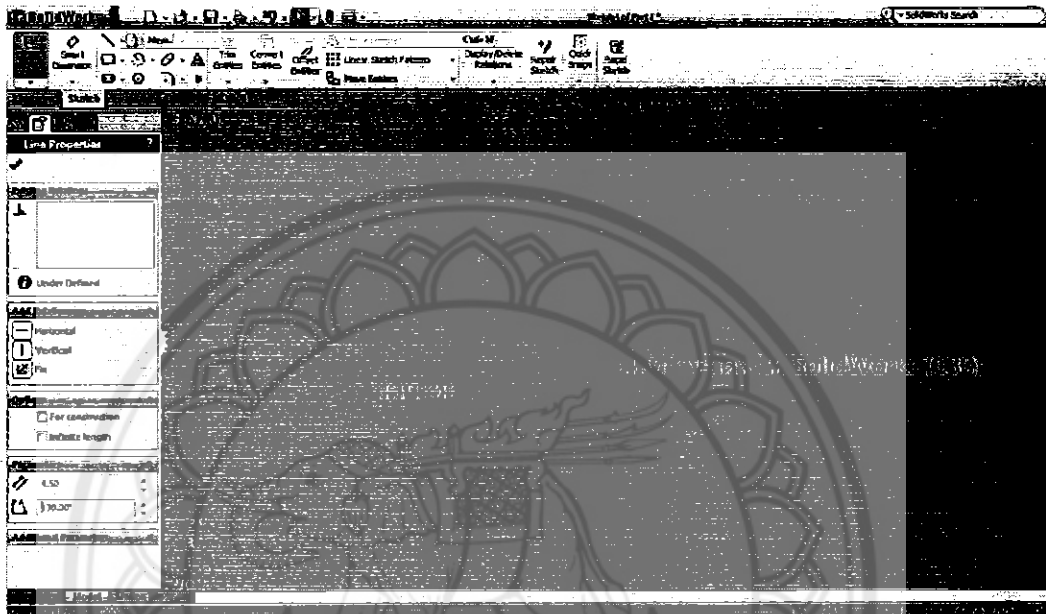
รูปที่ 3.5 การเปิดโปรแกรม SolidWorks 2010 ในโหมด Part

2. ทำการเลือกระนาบ Front Plane ในการวาดรูปโดยใช้คำสั่ง คลิก Sketch >> Front Plane ดังแสดงในรูปที่ 3.6



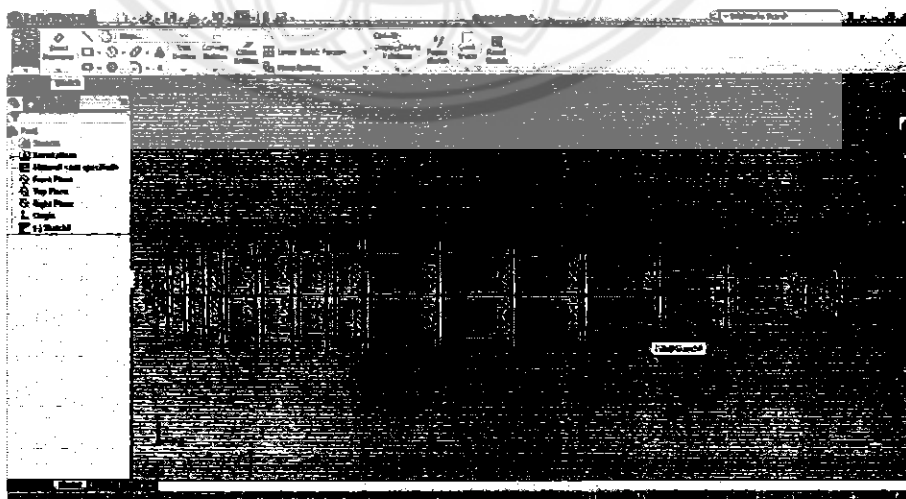
รูปที่ 3.6 การเลือกระนาบในการวาดรูป

3. ทำการสร้างเส้น chord ขนาด 4.5 มิลลิเมตร และทำมุมปะทะต่างๆ ในที่นี้จะใช้มุม 50 องศา เพื่อสร้างใบพัด โดยใช้คำสั่ง Line >> Length 4.5 mm >> Angle 130 ($180 - 130 = 50$ องศา เพราะการกำหนดมุมใน SolidWorks ต้องหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา) >> เครื่องหมายถูก ดังแสดงในรูปที่ 3.7



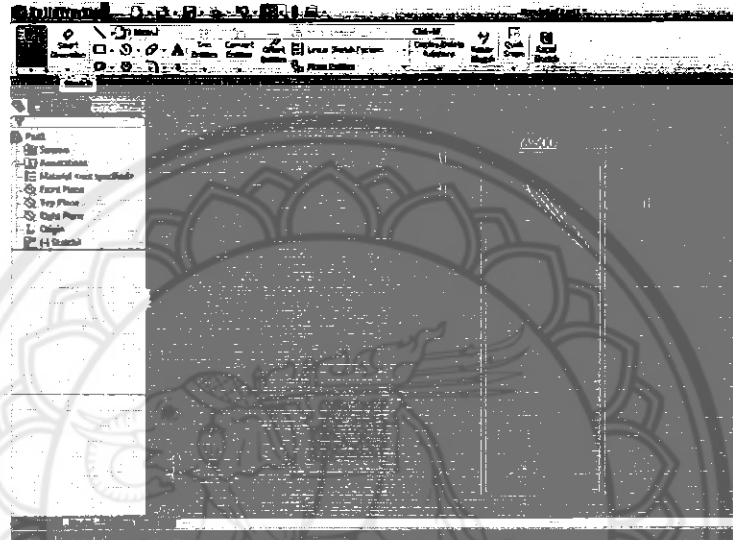
รูปที่ 3.7 การเขียนเส้นคอร์ด

4. วาดใบพัด NACA ชนิดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 สำหรับรายละเอียดในการวาดใบพัด NACA แสดงในหัวข้อ 3.1.1



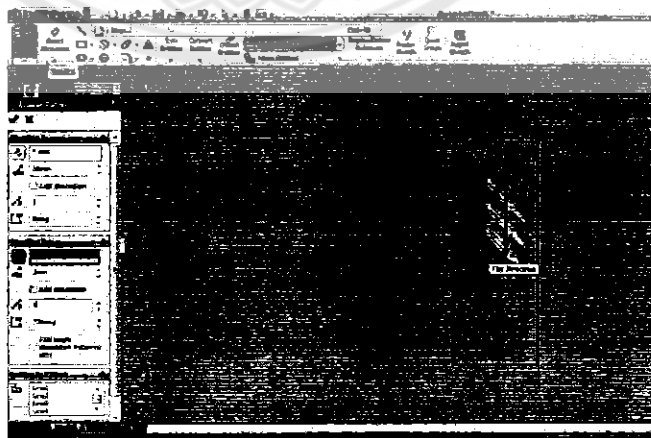
รูปที่ 3.8 ใบพัด NACA 0012

5. วาดกรอบสี่เหลี่ยมคลุมใบพัดที่วาดในข้อที่ 4 เพื่อกำหนดขอบเขตของการไหลที่มีขนาดกว้าง 6.5 มิลลิเมตร มีระยะห่างในแนวตั้งวัดจาก Leading edge 1 มิลลิเมตร และมีระยะห่างในแนวนอนวัดจาก trailing edge 1 มิลลิเมตร (เนื่องจากแบบของใบพัดกึ่งตันกึ่งขขนาดจี้มีระยะห่างจากทางเข้ากึ่งตันถึง leading edge ของใบพัดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร และระยะทางจาก Trailing edge ของใบพัดถึงทางออกของกึ่งตันเท่ากับ 1 มิลลิเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 3.9



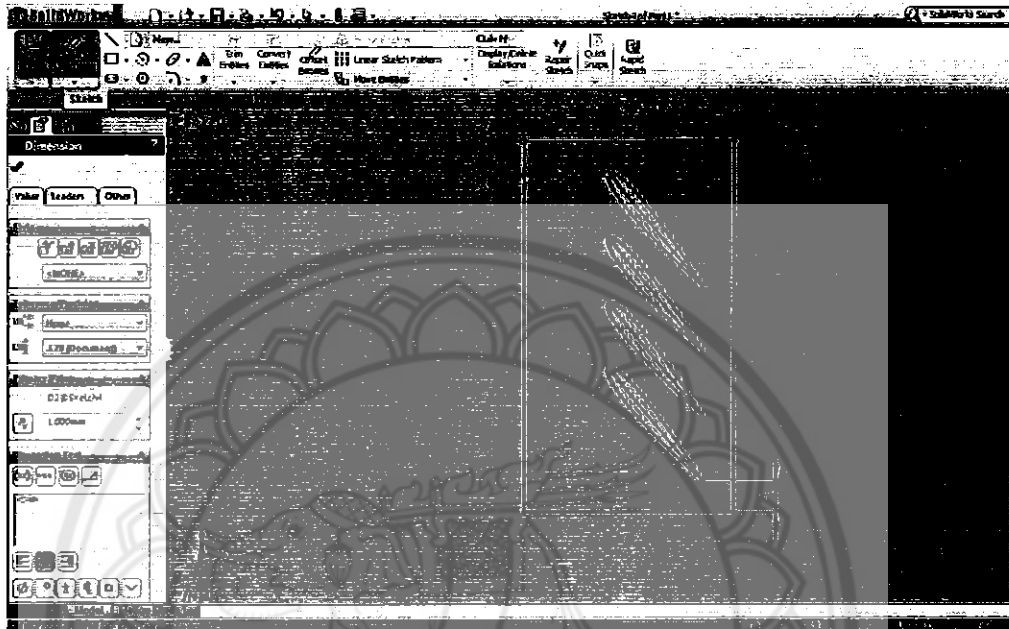
รูปที่ 3.9 การกำหนดขนาดของกรอบสี่เหลี่ยมเพื่อกำหนดโดเมนการคำนวณ

6. ทำการ copy ใบพัดที่มีระยะห่างของแต่ละใบพัด (Pitch) 2 มิลลิเมตร วัดจากจุดกึ่งกลางคอร์ดของแต่ละใบพัด โดยใช้คำสั่ง Linear sketch Pattern >> Direction 2 >> Diameter 2 mm >> จำนวน 4 ใบพัด >> เลือกเครื่องหมายถูก ดังแสดงในรูปที่ 3.10



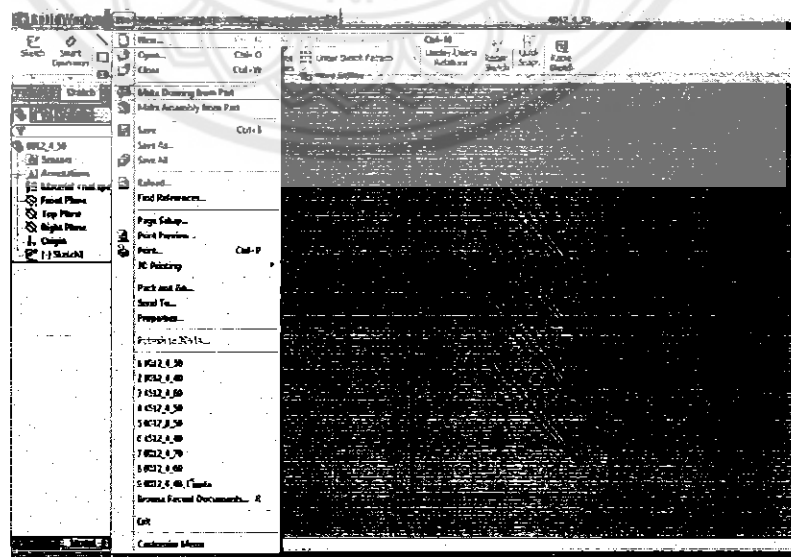
รูปที่ 3.10 การ Copy ใบพัดให้มีจำนวน 4 ใบพัด

7. ทำการปรับขนาดกรอบสี่เหลี่ยมให้มีขนาดพอดีกับใบพัดจำนวน 4 ใบพัด โดยให้ระยะห่างระหว่าง Trailing edge ของใบพัดชิ้นล่างสุดกับขอบล่างของสี่เหลี่ยมเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.11



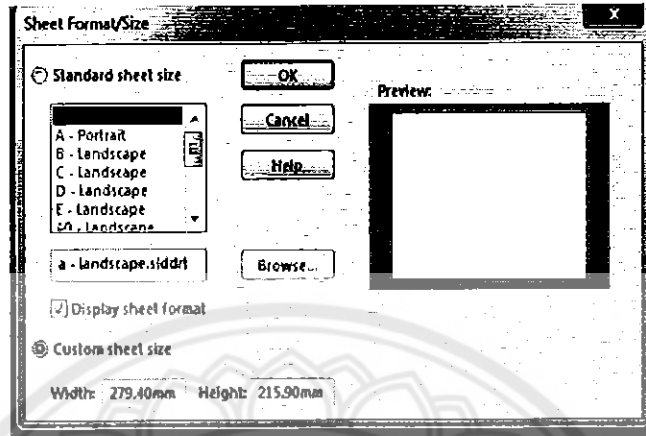
รูปที่ 3.11 การปรับขนาดของกรอบสี่เหลี่ยม

8. ทำการเปลี่ยนไฟล์ให้เป็นนามสกุล.dxf โดยการเลือก File >> Make Drawing from Part ดังแสดงในรูปที่ 3.12



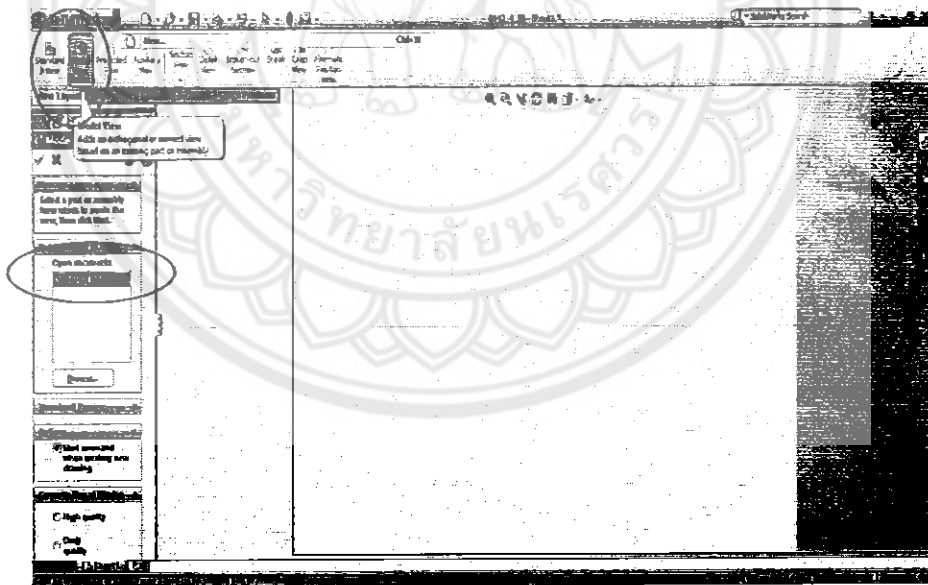
รูปที่ 3.12 การเริ่มต้นการบันทึกไฟล์ในนามสกุล .dxf

9. ทำการเลือกหน้ากระดาษเปล่าเพื่อนำแบบจำลองมาวาง เลือก Custom sheet size >> OK ดังแสดงในรูปที่ 3.13



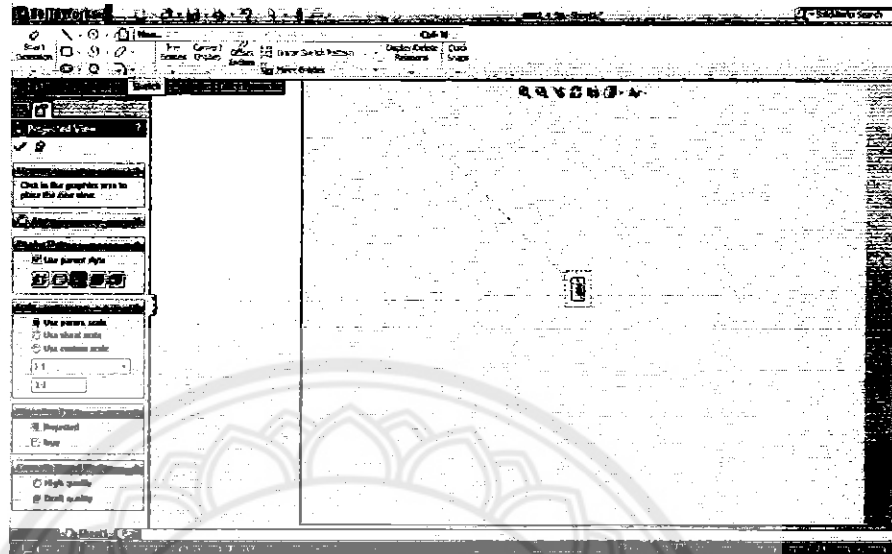
รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการบันทึกไฟล์ .dxf

10. ทำการเลือกแบบจำลองที่ต้องการเปลี่ยนนามสกุล เลือก Model view >> View Layout >> คลิกที่ไฟล์แบบจำลองในช่อง Open documents ดังแสดงในรูปที่ 3.14



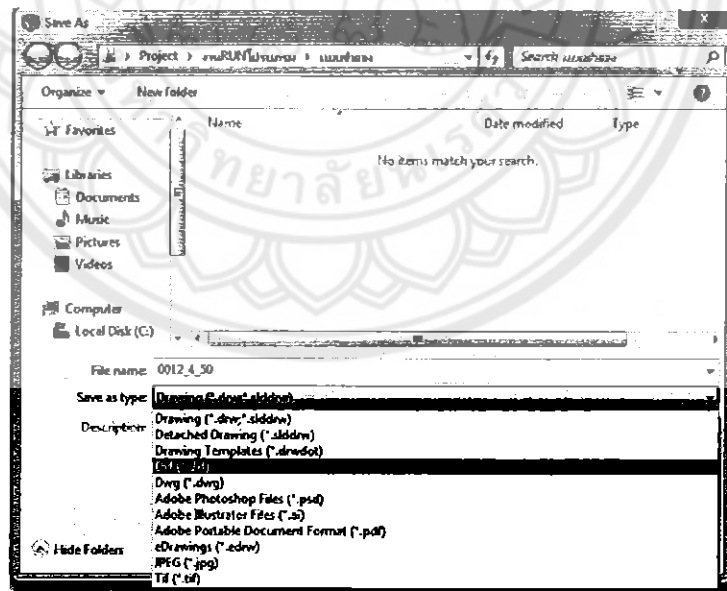
รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการบันทึกไฟล์ .dxf

11. นำไฟล์มาวาง ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการบันทึกไฟล์ .dxf

12. ทำการบันทึกไฟล์นามสกุล .dxf เลือก File >> Save as >> เปลี่ยนนามสกุลเป็น .dxf >> Save ดังแสดงในรูปที่ 3.16



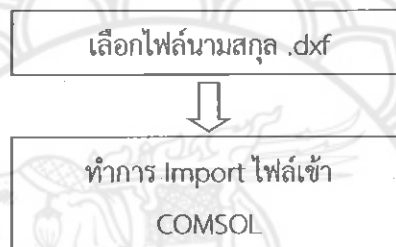
รูปที่ 3.16 ขั้นตอนการบันทึกไฟล์ .dxf

3.2 การคำนวณการไหลโดยอาศัยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

เมื่อเขียนแบบโดเมนการคำนวณเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การพิจารณาการไหลผ่านโดเมนการคำนวณดังกล่าวด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยอาศัยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ COMSOL Multiphysics โดยมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.2.1 การนำไฟล์แบบจำลองชุดใบพัดเข้าสู่การคำนวณ

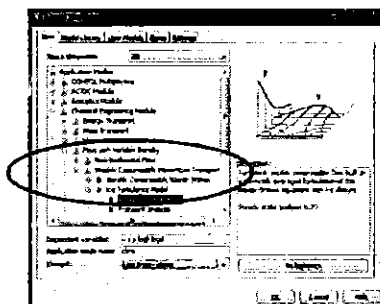
การคำนวณความเร็วของก๊าซร้อนขาออกใบพัดจะอาศัยโปรแกรม COMSOL จะต้องนำแบบจำลองที่ได้จากโปรแกรม SolidWorks นามสกุล .dxf เข้าสู่โปรแกรม โดยมีรายละเอียดตามขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการนำไฟล์แบบจำลองใบพัดเข้าสู่การคำนวณ

รายละเอียดการนำแบบจำลองเข้าสู่การคำนวณดังแสดงในรูปที่ 3.17 เป็นไปตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

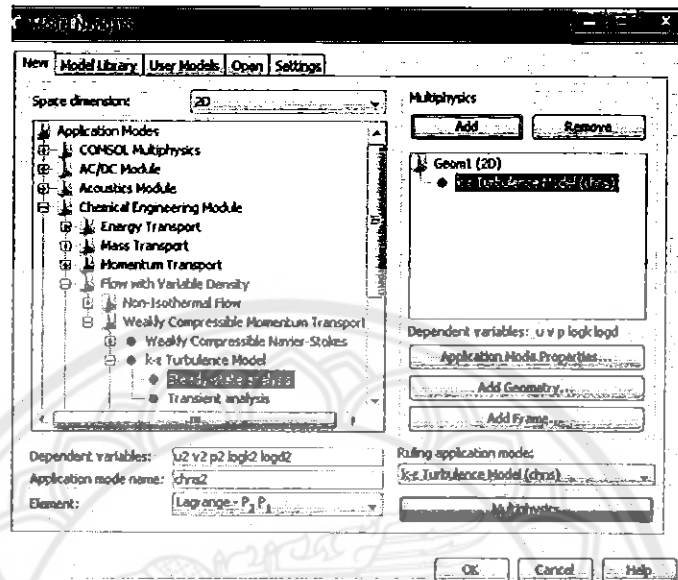
1. ทำการกำหนดฟังก์ชันในการคำนวณ โดยเลือกโหมด Chemical Engineering Module >> Flow with variable >> Weakly Compressible Momentum Transport >> k- ϵ Turbulence Model >> Steady-state analysis และในส่วนของช่อง Element เลือก Lagrange-Linear ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การเลือกชนิดของโหมดในการคำนวณการไหล

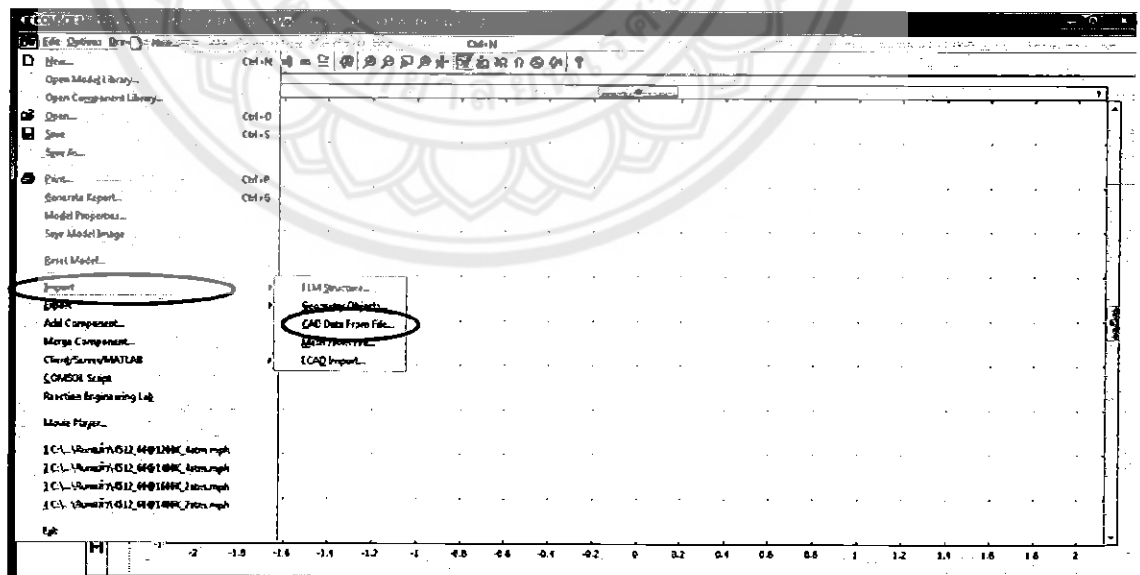
2. ทำการเพิ่มฟังก์ชันการคำนวณเลือก Multiphysics >> Add >> OK ดังแสดงในรูปที่

3.19



รูปที่ 3.19 การเพิ่มฟิสิกส์ของการไหลโดยเลือกแบบจำลอง k-ε

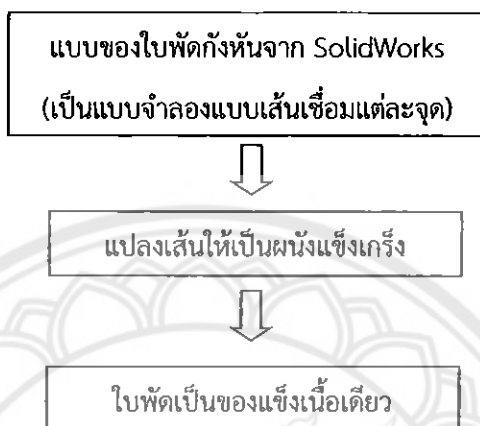
3. นำไฟล์ของแบบจำลองในนามสกุล .dxf ที่เขียนไว้ในขั้นตอนข้างต้นมาใช้ในการคำนวณ เลือก File >> Import >> CAD Data from File ดังแสดงในรูปที่ 3.20 แล้วเลือกไฟล์ที่ต้องการ



รูปที่ 3.20 ขั้นตอนการนำไฟล์ SolidWorks เข้าสู่โปรแกรม COMSOL

3.2.2 การกำหนดโดเมนสำหรับการไหล

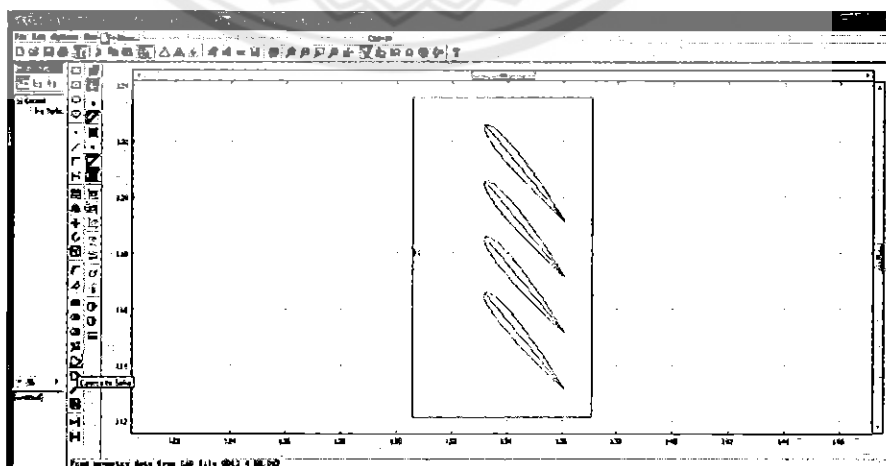
ขั้นตอนการกำหนดลักษณะใบพัดสามารถแสดงแนวคิดสรุปเป็นผังได้ดังรูปที่ 3.21 และสามารถแสดงรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.21 ขั้นตอนแนวคิดการกำหนดลักษณะใบพัด

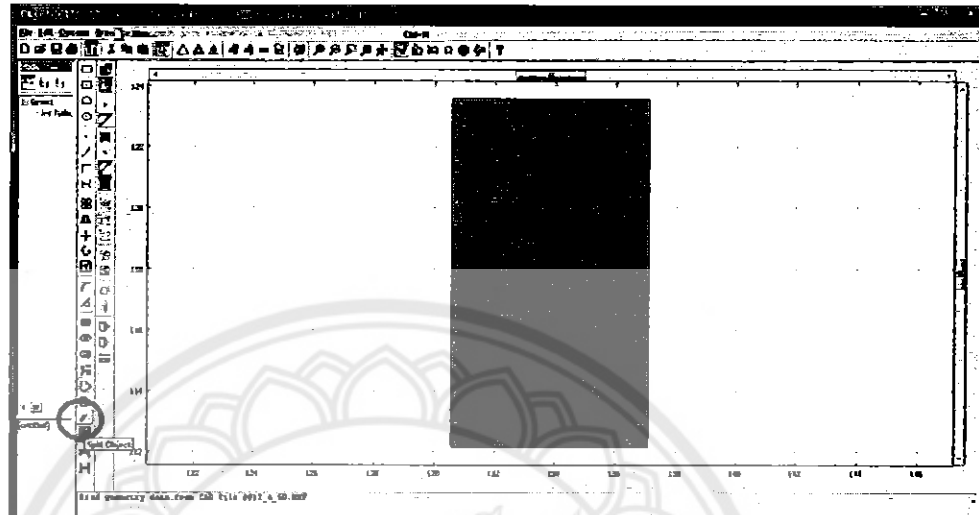
รายละเอียดการกำหนดช่องทางไหลในโปรแกรม COMSOL ในสมการ k- ϵ Turbulence มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เนื่องจากแบบจำลองใบพัดนั้นเริ่มต้นเป็นเส้นต่อจุดจากโปรแกรม SolidWorks แต่ในการวิเคราะห์จะต้องแปลงแบบจำลองให้เป็นของแข็งเสียก่อน จึงต้องทำการเปลี่ยนแปลงโดยกด Ctrl+A >> เลือก Coerce to Solid ดังแสดงในรูปที่ 3.22



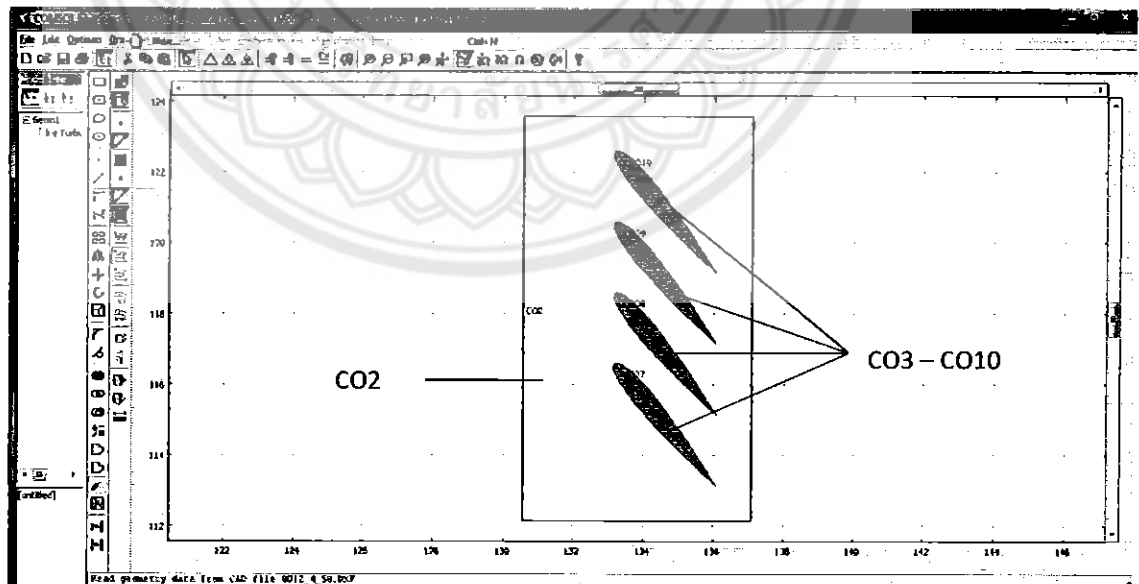
รูปที่ 3.22 แปลงแต่ละใบพัดให้เป็นของแข็ง

2. ทำการแยกส่วนของแบบจำลองออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ เพื่อให้ส่วนที่เป็นใบพัดกับช่องทางการไหลเป็นอิสระต่อกัน โดยคลิก Split Object ดังแสดงในรูปที่ 3.23



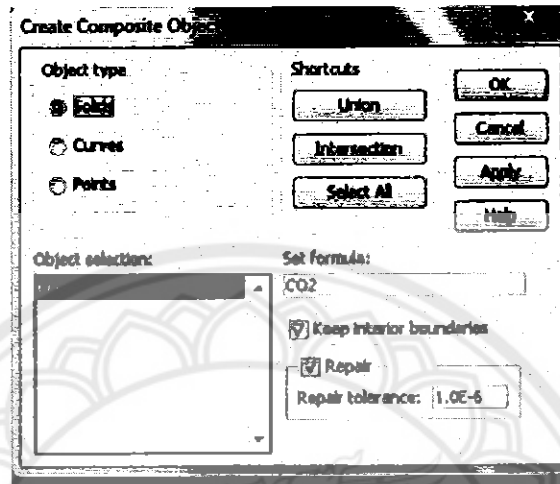
รูปที่ 3.23 แยกชิ้นส่วนออกจากกันด้วยคำสั่ง Split Object

3. ทำการตัดเนื้อของใบพัดที่เป็นส่วนที่แรงเงา CO3 ถึง CO10 ซึ่งเป็นส่วนของใบพัด 4 ใบ ออกจากโดเมน เพื่อให้ส่วนที่เป็นใบพัดมีพื้นผิวเป็นผนัง โดยการกด Ctrl และคลิกที่ละชิ้นส่วนจนครบ >>delete ดังแสดงในรูปที่ 3.24



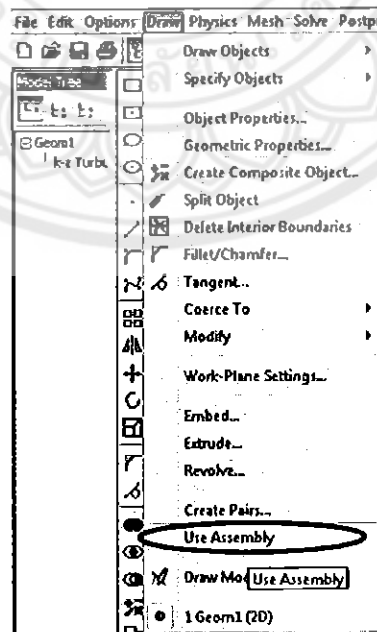
รูปที่ 3.24 การตัดใบพัดออกจากโดเมนการคำนวณ

4. ทำการรวมชิ้นส่วนทั้งหมดให้เป็นชิ้นเดียวกัน (ซึ่งในกรณีนี้มีชิ้นส่วนเพียงชิ้นเดียวจึงไม่จำเป็นต้องทำการรวม โดยเลือก) Create Composite Object >> เลือก CO2 >> OK ดังแสดงในรูปที่ 3.25



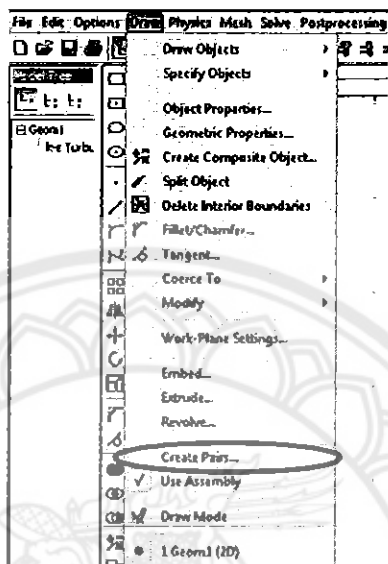
รูปที่ 3.25 รวมชิ้นงาน

5. เนื่องจากในขั้นตอนที่ 2 เราได้ทำการแยกส่วนของใบพัดกับโดเมนการคำนวณออกจากกัน จึงต้องทำการรวมส่วนของใบพัดกับกรอบสี่เหลี่ยมเข้าด้วยกันเพื่อกลับไปเป็นชิ้นเดียวอีกครั้ง กด Ctrl+A >> Draw >> Use Assembly ดังแสดงในรูปที่ 3.26

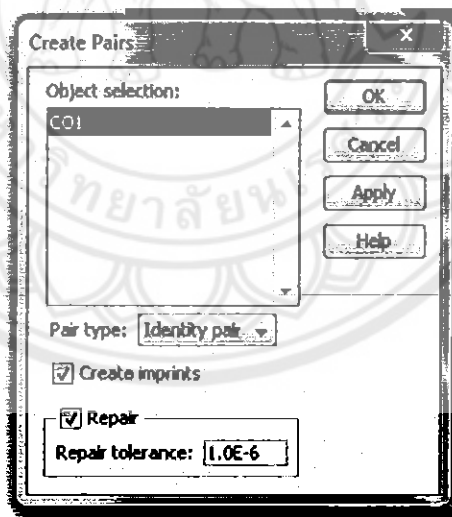


รูปที่ 3.26 ประกอบชิ้นงานทั้งหมด

6. ทำการเปลี่ยนลักษณะของส่วนที่ไม่ใช่ใบพัด ซึ่งเป็นกล่องสี่เหลี่ยมที่ลบบใบพัดออก ในตอนแรกส่วนของสี่เหลี่ยมดังกล่าวเป็นผนัง ต้องทำให้เป็นช่องเปิด เพื่อให้ของไหลสามารถไหลผ่านได้ เลือก Draw >> Create Pairs >> เลือก CO1 >> OK ดังแสดงในรูปที่ 3.27



(a)

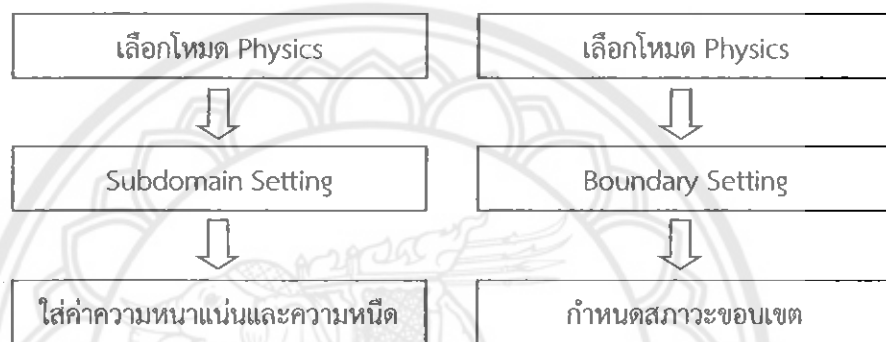


(b)

รูปที่ 3.27 คำสั่งสำหรับการเปลี่ยนลักษณะจากผนังให้เป็นช่องเปิด

3.2.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง

การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตแสดงเป็นแผนผังได้ในรูปที่ 3.28 โดยเริ่มจากกำหนดให้เป็นการไหลของก๊าซร้อนผ่านใบพัดกังหันโดยเลือกโหมดการไหลแบบปั่นป่วน k-ε Turbulence Model จากนั้นกำหนดสมบัติต่างๆของของไหลคือ ความหนาแน่นและความหนืด โดยเลือกโหมด Physics>>Subdomain Setting และกำหนดสภาวะขอบเขตของแบบจำลองในส่วนของทางเข้า ทางออก และผนังโดยเลือกโหมด Physics>>Boundary Setting

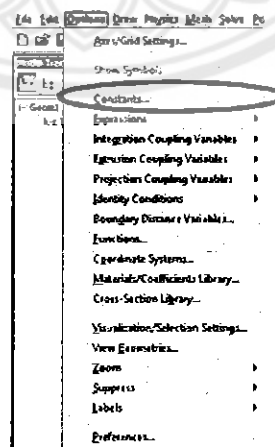


รูปที่ 3.28 ผังแนวคิดกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง

ขั้นตอนสำหรับการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของของไหลสามารถกระทำได้ตามขั้นตอนดังนี้

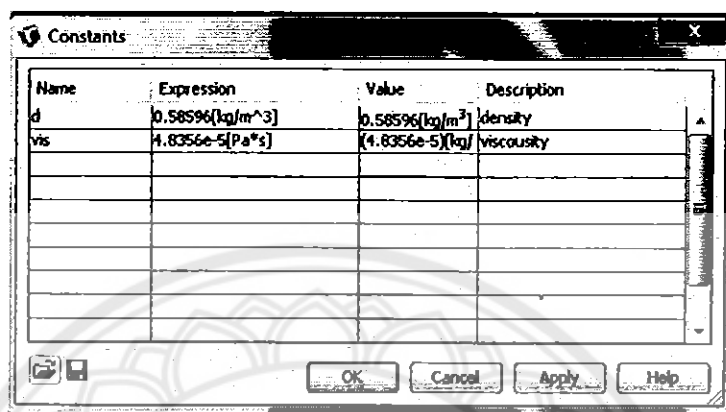
คือ

1. กำหนดคุณสมบัติของของไหลโดยเลือก Options >> Constants ดังแสดงในรูปที่ 3.29



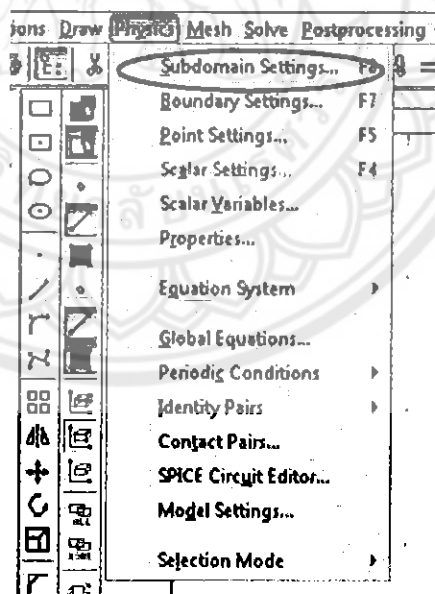
รูปที่ 3.29 กำหนดคุณสมบัติของของไหล

2. กำหนดค่าคงที่ของความหนาแน่นเท่ากับ 0.58596 kg/m^3 และค่าของความหนืดเท่ากับ $4.8356 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นและความหนืดของอากาศที่อุณหภูมิ 1200 K ความดัน 2 atm (ขาเข้า) >> OK ดังแสดงในรูปที่ 3.30



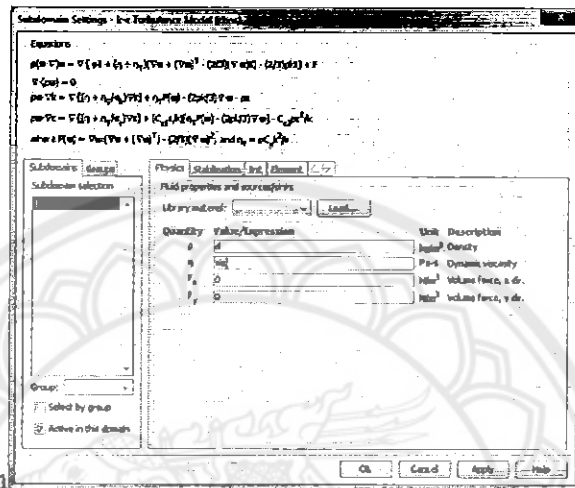
รูปที่ 3.30 การกำหนดค่าคงที่ขาเข้าที่จะใช้ในการคำนวณ

3. ทำการกำหนดคุณสมบัติของไหลที่ใช้ในการวิเคราะห์ เลือก Physics >> Subdomain Setting ดังแสดงในรูปที่ 3.31



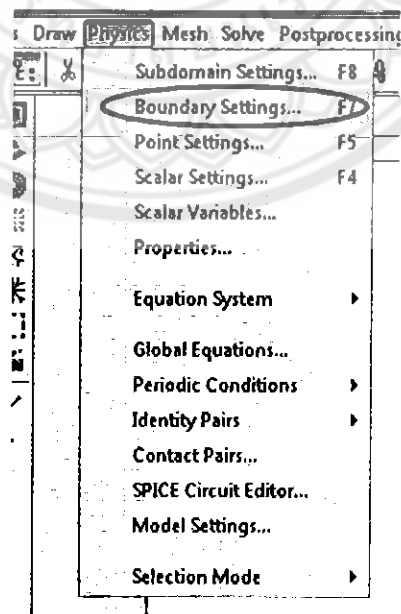
รูปที่ 3.31 เลือก Subdomain Setting

4. เมื่อคลิก Subdomain Setting จะปรากฏหน้าต่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.32 ขึ้นมา จากนั้น ทำการกำหนดสมบัติต่างๆของของไหลโดยอาศัยสัญลักษณ์โดย เลือก 1 ในช่อง Group selection >> กำหนดค่า Density = d, Dynamic Viscosity = vis >> OK (d และ vis เป็นค่าคงที่ที่กำหนดไว้ในข้อที่ 2)



รูปที่ 3.32 การกำหนดตัวแปรของค่าคงที่

5. กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองเลือก Physics >> Boundary Setting ดังแสดงในรูปที่ 3.33



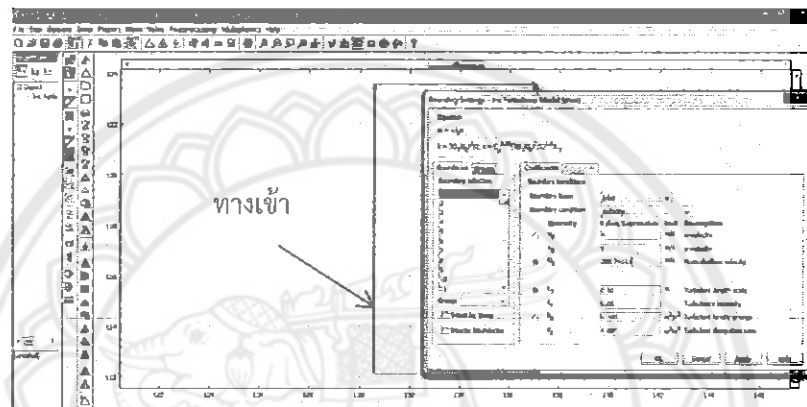
รูปที่ 3.33 การกำหนดขอบเขตแบบจำลอง

6. กำหนดความเร็วขาเข้า Inlet >> Velocity >> ใส่ค่า $U_0 = 208.74111 \text{ m/s}$ >> Apply
 ดังแสดงในรูปที่ 3.34 ซึ่งเป็นความเร็วในทิศ x ขนานกับกล่องสี่เหลี่ยม

โดยที่ ค่า U_0 สามารถหาได้จาก $Ma = \frac{U_0}{\sqrt{\gamma g_c RT}}$

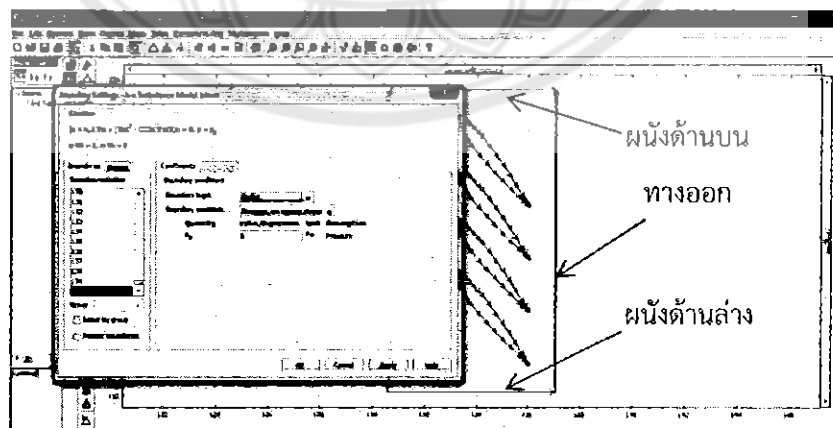
Ma คือ Mach number

หมายเหตุ เมื่อเข้าสู่การไหลแบบกอัดได้ (Compressible flow) ค่า Mach number = 0.3[7]



รูปที่ 3.34 การกำหนดสภาวะทางเข้าของของไหล

7. กำหนดความดันขาออกให้เป็นความดันบรรยากาศ หรือความดันเกจ = 0 ดังนี้ Outlet
 >> Pressure ,no viscous stress >> $P_0 = 0$ >> Apply >> OK ดังแสดงในรูปที่ 3.35 ในส่วน
 ขอบเขตด้านบนและด้านล่างกรอบสี่เหลี่ยมกำหนดให้เป็นส่วนที่เป็นผนัง

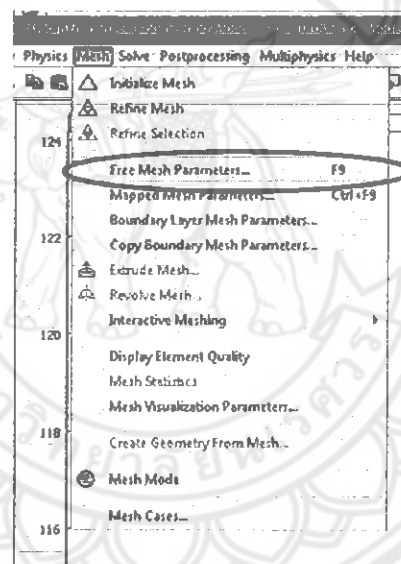


รูปที่ 3.35 การกำหนดสภาวะทางออกของของไหล

3.2.4 การคำนวณโดยใช้โปรแกรม COMSOL

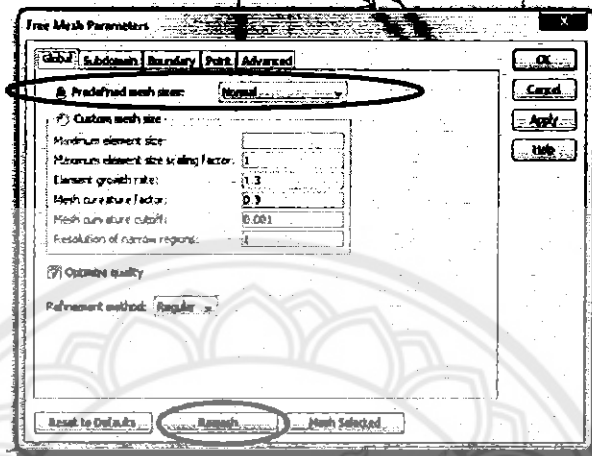
เมื่อได้โดเมนการคำนวณและกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของโจทย์แล้ว ขั้นตอนถัดมาคือการสร้างเมช ซึ่งโปรแกรม COMSOL ใช้ Delaunay Algorithm กล่าวคือ โปรแกรมจะสร้างวงกลมขึ้นมาแล้วสร้างสามเหลี่ยมที่มีขนาดใหญ่ที่สุดหรือมีพื้นที่มากที่สุดที่สามารถอยู่ภายในวงกลมนั้นได้ โดยให้จุดยอดทั้งสามของสามเหลี่ยมอยู่บนเส้นรอบวง ทำซ้ำเช่นนี้จนกระทั่งได้สามเหลี่ยมไว้ระเอียดเต็มโดเมน

1. เริ่มสร้างโครงร่างตาข่ายของสามเหลี่ยมให้กับแบบจำลองเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์การไหล เลือก Mesh >> Free Mesh Parameters ดังแสดงในรูปที่ 3.36 เพื่อแสดงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับเมช



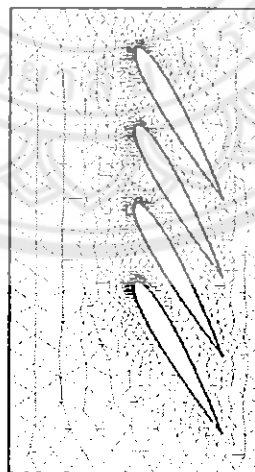
รูปที่ 3.36 การกำหนดคุณสมบัติ Mesh

2. เลือกความละเอียดของเมชซึ่งจะมีตั้งแต่เมชหยาบมาก (Extremely coarse) ไปจนถึงเมชละเอียดมาก (Extremely fine) ซึ่งในที่นี้ ได้เลือกความละเอียดแบบพื้นฐาน Normal โดย Predefined mesh sizes เลือก Normal >> Remesh >> OK ดังแสดงในรูปที่ 3.37



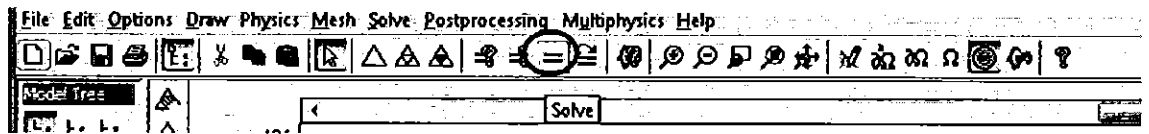
รูปที่ 3.37 การกำหนดความละเอียดของ Mesh

3. หลังจากทำการกำหนดความละเอียดของเมชและทำการสร้างเมช แบบจำลองจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.38 สังเกตได้ว่าบริเวณ Leading edge ของแต่ละใบพัดจะมีความหนาแน่นของเมชสูงกว่าบริเวณอื่น เนื่องมาจากความโค้งมนของรูปทรงใบพัด



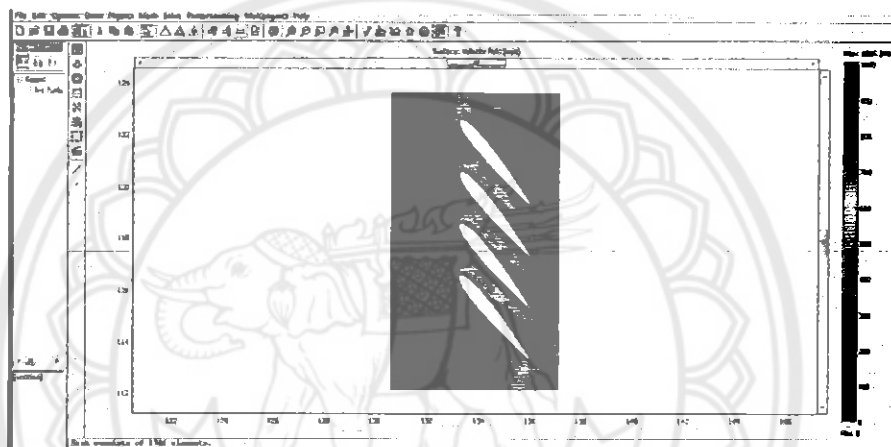
รูปที่ 3.38 สร้างเมชในแบบจำลอง

สุดท้ายในการแก้ปัญหาให้เลือก Solve (เครื่องหมาย =) ดังแสดงในรูปที่ 3.39



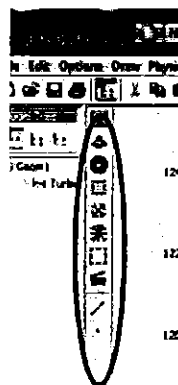
รูปที่ 3.39 คำสั่งในการแก้ปัญหาโจทย์

ผลการวิเคราะห์การไหลสามารถแสดงในรูปแบบสนามความเร็ว ในรูปที่ 3.40 ซึ่งใช้ลักษณะของสีเป็นการบอกความเร็วของสนามการไหลในส่วนต่างๆ



รูปที่ 3.40 การแสดงผลของการคำนวณในรูปแบบของ Surface Velocity Field

นอกจากนี้ในการแสดงผลสามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น Contour, Streamline เป็นต้น ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปแบบต่างๆได้โดยเลือกแถบเครื่องมือทางด้านซ้ายมือ ซึ่งมีการแสดงข้อมูลดังนี้ 2D Surface Plot, 3D Surface Plot, Contour Plot, Arrow Plot, Stress/Strain Plot, Streamline Plot, Boundary Plot และ Animate ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 3.41

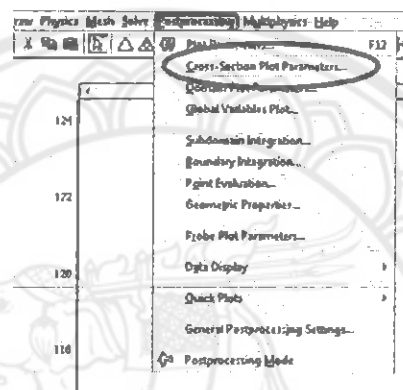


รูปที่ 3.41 แถบเครื่องมือแสดงค่าต่างๆ

3.3 การดึงข้อมูลของความเร็วที่คำนวณได้จากโปรแกรม COMSOL

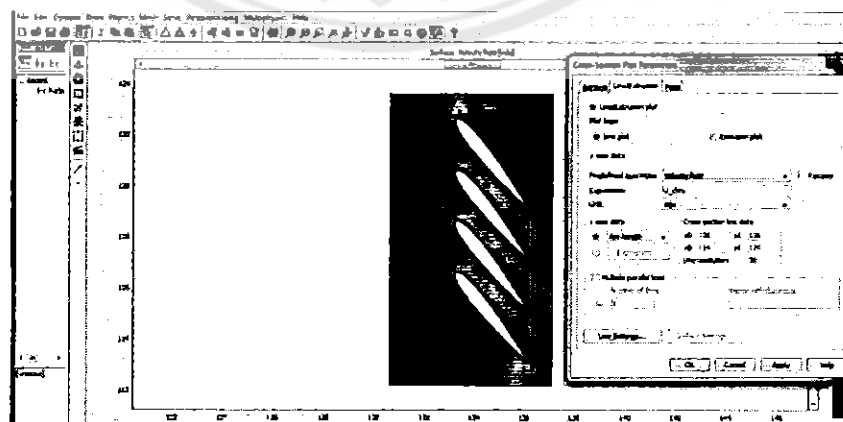
การดึงค่าข้อมูลจากโปรแกรม COMSOL แสดงได้ดังรูปที่ 3.42-3.45 โดยเริ่มต้นจากเลือก โหมด Post Processing เพื่อเลือก Cross-Section Plot Parameters เนื่องจากเราต้องการทราบความเร็ว ณ ที่ทางออก หรือ Trailing Edge ของชุดใบพัด แล้วจึงนำมาหาค่าเฉลี่ยของความเร็ว เพื่อนำไปคำนวณหากำลังจากขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เลือก Post processing >> Cross Section Plot Parameters ดังแสดงในรูปที่ 3.41



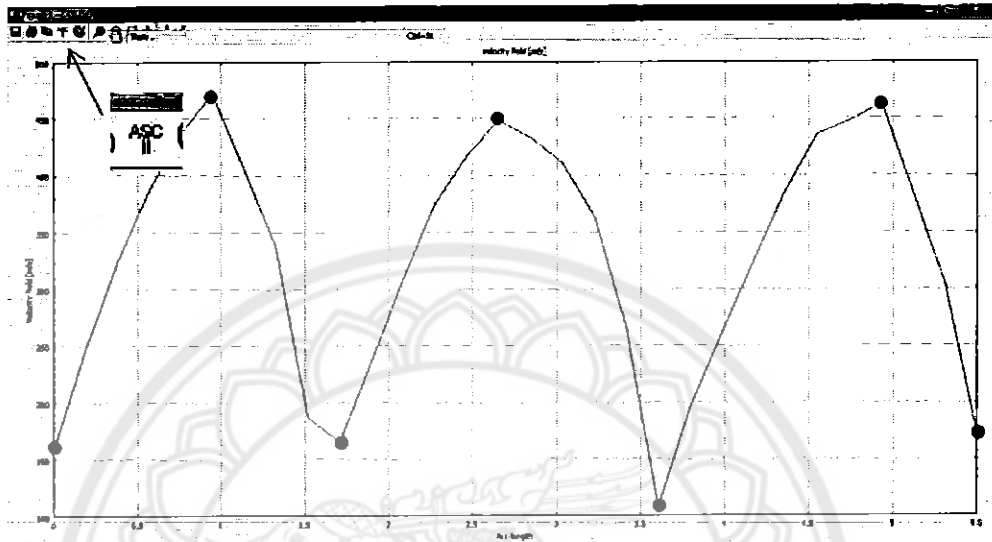
รูปที่ 3.42 เลือกโหมด Post processing

2. เลือก Line/Extrusion >> กำหนดค่า Cross-Section line data >> $X_0 = 136$, $X_1 = 136$, $Y_0 = 114$, $Y_1 = 120$ เพื่อกำหนดคู่อันดับของจุดต้นและจุดปลายสำหรับลากเส้นตรงในการเฉลี่ยค่าความเร็วที่ทางออกของใบพัด (Trailing Edge) และจำนวนข้อมูลในหนึ่งเส้น (Line resolution) = 30 แสดงตัวอย่างการใส่ข้อมูลในหนึ่งเส้น ดังแสดงในรูปที่ 3.42



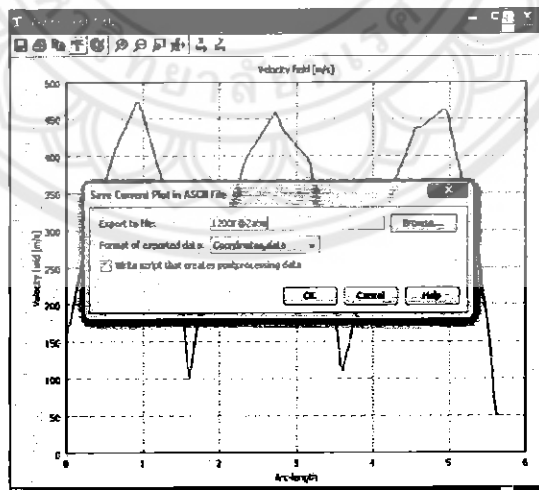
รูปที่ 3.43 การกำหนดจุดของค่าความเร็วที่ทางออกของใบพัด

3. กราฟแสดงความเร็วในหนึ่งเส้น แสดงได้ดังรูปที่ 3.43 จากนั้นคลิกที่ ASC เพื่อจะนำข้อมูลไปหาความเร็วเฉลี่ย โดยที่จุดต่ำสุดแสดงความเร็วที่ Trailing Edge ของแต่ละใบพัด และจุดสูงสุดแสดงความเร็วของอากาศระหว่าง Trailing Edge.



รูปที่ 3.44 ผลของความเร็วในหนึ่งเส้น

4. บันทึกข้อมูลในนามสกุล .txt เพื่อนำไปหาค่าความเร็วเฉลี่ยในโปรแกรม Excel ดังแสดงในรูปที่ 3.44



รูปที่ 3.45 การบันทึกข้อมูล

3.4 การคำนวณหาค่ากำลังที่ได้จากใบพัดกังหัน

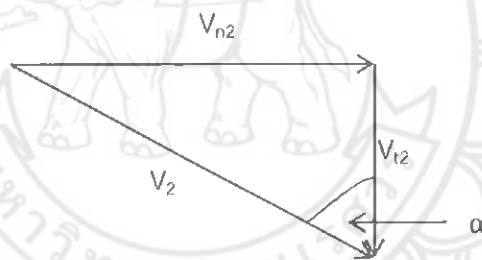
การคำนวณค่ากำลังที่ได้จากของไหลนี้ จะนำข้อมูลค่าความเร็วของของไหลที่ทางออกของใบพัดที่ได้จากโปรแกรม COMSOL มาคำนวณในทฤษฎี โดยได้ยกตัวอย่างการคำนวณกำลังของใบพัด NACA 0012 ที่ความดันขาเข้าใบพัด 2 atm อุณหภูมิขาเข้าใบพัด 1200 K ซึ่งมีความเร็วขาเข้า V_{n1} เท่ากับ 208.74 คำนวณได้จากค่า Mach number เท่ากับ 0.3 [7]

1. จากการวิเคราะห์ผลของโปรแกรม COMSOL จะได้ค่าความเร็วของของไหลที่ทางออกของใบพัด คือ $V_2 = 304.77 \text{ m/s}$

2. จากสมการ 3.1 จะได้ความเร็วของของไหลที่ปลายใบพัดในทิศทางขนานกับแนวระดับออกมา

$$V_{n2} = V_2 \sin \alpha \quad (3.1)$$

โดยที่ $V_2 = 304.77 \text{ m/s}$, $\alpha = 60^\circ \therefore V_{n2} = 155.62 \text{ m/s}$



รูปที่ 3.46 สามเหลี่ยมความเร็วขาออก

3. จากสมการ 3.2 จะได้อัตราการไหลของของไหลต่อหน่วยความลึกออกมา

$$\dot{m}' = \rho_1 s V_{n1} = \rho_2 s V_{n2} \quad (3.2)$$

โดยที่ $\rho_1 = 0.058596 \text{ kg/m}^3$, $V_{n1} = 208.74 \text{ m/s}$, $s = 2 \text{ mm} \therefore \dot{m}' = 0.24463 \text{ kg/s} - \text{m}$

4. จากสมการ 3.2 จะได้ความหนาแน่นของของไหลที่ทางออกของใบพัดออกมา

โดยที่ $\dot{m}' = 0.24463 \text{ kg/s} - \text{m}$, $V_{n2} = 155.62 \text{ m/s}$, $s = 2 \text{ mm} \therefore \rho_2 = 0.786 \text{ kg/m}^3$

5. จากสมการ 3.3 จะได้อุณหภูมิที่ทางออกของใบพัด

$$P_2 = \rho_2 RT_2 \quad (3.3)$$

โดยที่ $P_2 = 1 \text{ atm}$, $\rho_2 = 0.786 \text{ kg/m}^3$, $R = 8.314$, $T_2 = 447.33 \text{ K}$

6. จากสมการ 3.4 จะได้พลังงานที่ถ่ายเทให้กับของไหลต่อหน่วยน้ำหนักออกมา

$$E = \left(\frac{P_1}{\rho_1} - \frac{P_2}{\rho_2} \right) + \left(\frac{V_{n1}^2}{2} - \frac{V_{n2}^2}{2} \right) + (h_1 - h_2) \quad (3.4)$$

โดยที่ $P_1 = 2 \text{ atm}$, $\rho_1 = 0.58596 \text{ kg/m}^3$, $V_{n1} = 208.74 \text{ m/s}$,

$\rho_2 = 0.786 \text{ kg/m}^3$, $P_2 = 1 \text{ atm}$, $V_{n2} = 155.62 \text{ m/s}$ และเปิดตารางหาค่า h_1, h_2 ได้

$h_1 = 809,53 \text{ J/kg}$, $h_2 = -21,51 \text{ J/kg}$

$$\therefore E = 1,186,561.03 \text{ J/kg}$$

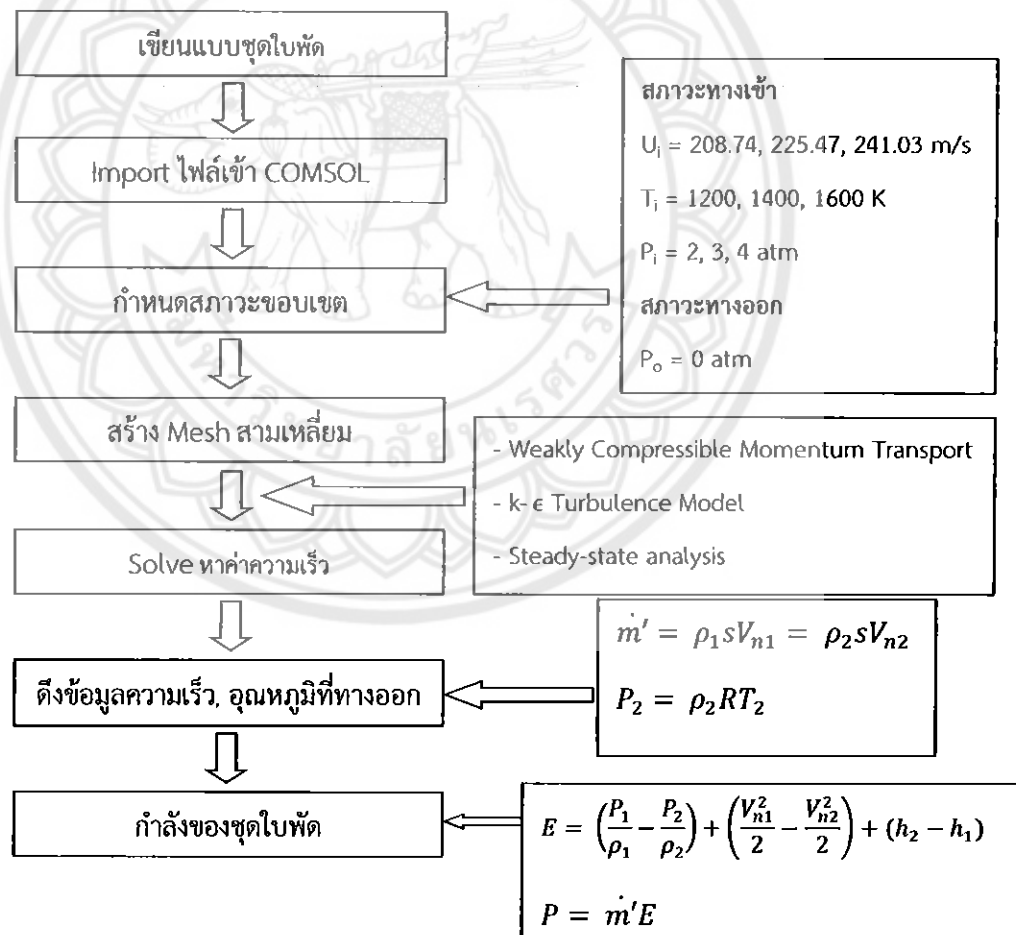
7. จากสมการ 3.4 จะได้กำลังที่ได้จากของของไหลต่อหน่วยความลึกลงมา

$$P' = \dot{m}' E \quad (3.5)$$

โดยที่ $\dot{m}' = 0.24463 \text{ kg/s} - \text{m}$, $E = 1,186,561.03 \text{ J/kg} \therefore P' = 290,268.42 \text{ W/m}$

3.5 Data Reduction

ขั้นตอนการศึกษากำลังของชุดใบพัดสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.45 โดยเริ่มต้นจากการเขียนแบบชุดใบพัดด้วยโปรแกรม SolidWorks ซึ่งทำการ Save ไฟล์ในนามสกุล .dxf จากนั้นทำการ Import ไฟล์แบบจำลองนามสกุล .dxf เข้าสู่โปรแกรม COMSOL เมื่อเข้าสู่โปรแกรม COMSOL แล้วทำการเลือกแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา (k-ε Turbulence Model) กำหนดคุณสมบัติของของไหลและสภาวะขอบเขตของการไหล จากนั้นสร้าง Mesh เพื่อใช้ในการคำนวณของโปรแกรมโดยใช้ Mesh แบบสามเหลี่ยมอิสระ ต่อไปเป็นขั้นตอนการ Solve ของโปรแกรมเพื่อหาค่าความเร็วโดยแสดงค่าที่ได้อยู่ในรูปของสีแทนความเร็วที่ส่วนต่างๆของสนามการไหล หลังจากนั้นเป็นขั้นตอนการดึงข้อมูลความเร็วที่บริเวณทางออกของใบพัดไปหาค่าเฉลี่ยและสุดท้ายนำค่าความเร็วไปใช้คำนวณตามทฤษฎีเพื่อหากำลังที่ของชุดใบพัด



รูปที่ 3.47 สรุปขั้นตอนการศึกษากำลังของชุดใบพัด

ในการคำนวณเริ่มต้นด้วยใบพัดไม่มีความโค้ง ที่อุณหภูมิของอากาศขาเข้า 1200 K, ความดัน 2, 3, 4 atm โดยใช้ความเร็วของอากาศขาเข้าชุดใบพัดที่ 208.74 m/s และทำการเปลี่ยนมุมปะทะระหว่างอากาศขาเข้ากับชุดใบพัด 40, 50 และ 60 องศาของทุกๆความดัน ทำการคำนวณต่อโดยใช้ใบพัดชนิดเดิมที่ อุณหภูมิ 1400 K, ความดัน 2, 3, 4 atm โดยใช้ความเร็วของอากาศขาเข้าชุดใบพัดที่ 225.47 m/s และทำการเปลี่ยนมุมปะทะระหว่างอากาศขาเข้ากับชุดใบพัด 40, 50, 60 องศาของทุกๆความดัน ที่อุณหภูมิ 1600 K ทำเช่นเดียวกับขั้นตอนที่กล่าวมา แต่ใช้ความเร็วที่ 245.03 m/s หลังจากนั้นเปลี่ยนชนิดของใบพัดเป็นแบบโค้ง และทำเช่นเดียวกับการคำนวณใบพัดแบบไม่มีความโค้ง

ตารางที่ 3.4 ค่าของตัวแปรที่ทำการศึกษา

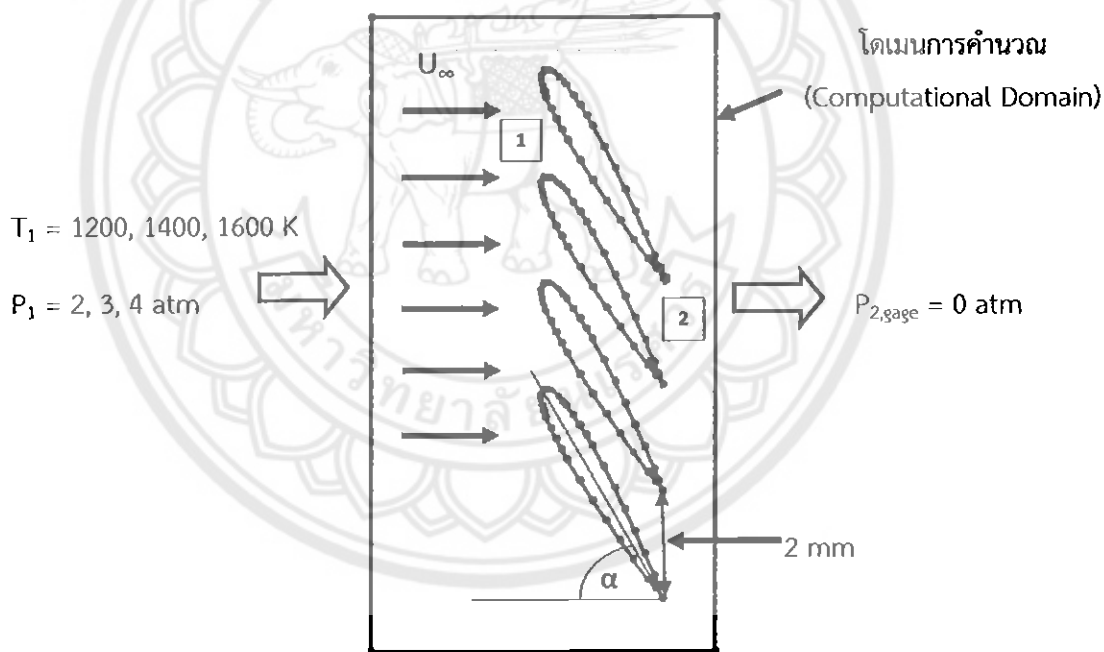
ตัวแปรที่ศึกษา	ค่า
ความโค้งของใบพัด	NACA 0012 (ไม่มีความโค้ง), NACA 4512 (โค้ง)
อุณหภูมิของอากาศขาเข้า	1200, 1400, 1600 K
ความเร็วอากาศขาเข้า	208.74 m/s (1200 K), 225.47 m/s (1400 K), 245.03 m/s (1600 K) คิดเป็น Mach number = 0.3
มุมปะทะ	40 องศา, 50 องศา, 60 องศา
ความดันอากาศขาเข้า	2, 3, 4 atm

หมายเหตุ ใช้ค่า Turbulence Intensity = 5%

บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการศึกษาการไหลของของไหลผ่านชุดใบพัดกังหันที่ทางเข้า (จุด 1) และไหลออกที่ทางออก (จุด 2) ของไหลมีความเร็ว (U_∞) โดยมีมุมปะทะ (α) ระหว่างของไหลกับชุดใบพัดที่ 40, 50 และ 60 องศาเทียบกับแนวอน และใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์หาค่าความเร็วของของไหลที่ทางออกเพื่อนำไปคำนวณกำลัง โดยการศึกษาที่กำหนดคุณสมบัติของของไหลเข้าที่อุณหภูมิ (T_1) 1200, 1400 และ 1600 K และความดัน (P_1) 2, 3 และ 4 atm ความดันขาออกกำหนดเป็นความดันบรรยากาศ ($P_{2,gage} = 0 \text{ atm}$) ดังรูปที่ 4.1 แล้วจึงคำนวณหา กำลังต่อหน่วยความยาว (W/m)



รูปที่ 4.1 ทิศทางการไหลของของไหลผ่านชุดใบพัด

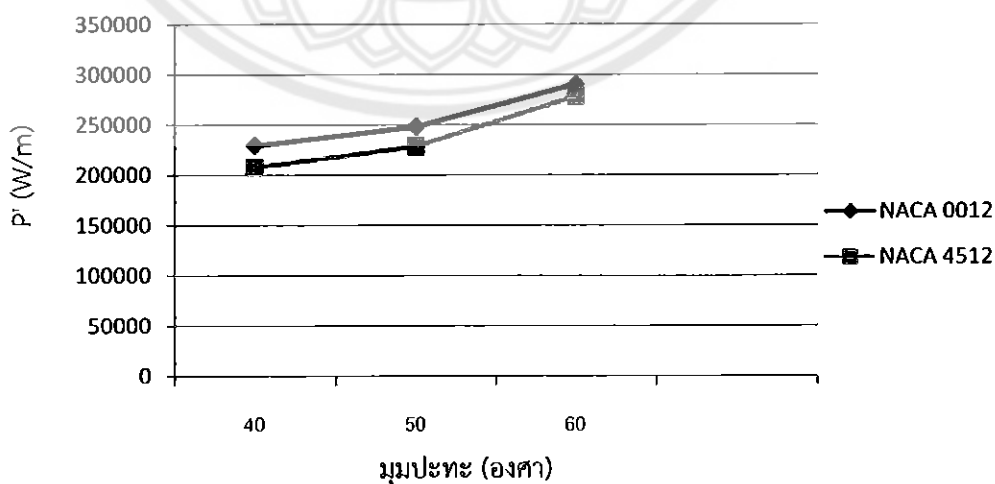
4.1 ผลกระทบของมุมปะทะและความโค้งของใบพัดที่มีต่อกำลังของใบพัด

ความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะและความโค้งของใบพัดที่มีผลต่อกำลังของใบพัดที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งทำการศึกษาที่ความดันขาเข้า 2 atm อุณหภูมิ 1200 K สำหรับชนิดของ NACA ที่ใช้ในการศึกษาในโครงการนี้มี 2 ชนิด คือ NACA 0012 ซึ่งเป็นใบพัดที่ไม่มีมุมโค้ง และ NACA 4512 เป็นใบพัดที่มีมุมโค้งเท่ากับ 45 องศาเทียบกับระยะคอर्ड และทำการศึกษาที่มุมองศาของใบพัดเทียบกับแนวระดับของทิศทางการไหล 3 ค่า คือ 40, 50 และ 60 องศา

จากรูปที่ 4.2 สังเกตว่าเมื่อมุมใบพัดเพิ่มมากขึ้นจะให้กำลังเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากที่มุมใบพัดมีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้พื้นที่สัมผัสของใบพัดบริเวณทางเข้า (Leading Edge) ปะทะโดยตรงกับของไหลมากขึ้น เป็นผลให้ใบพัดได้รับการถ่ายเทพลังงานจลน์จากของไหลที่ไหลเข้าด้วยความเร็วสูงได้มากขึ้นและกำลังที่ได้สูงขึ้น นอกจากนี้ใบพัดตรงก็ให้กำลังสูงกว่าใบพัดโค้งอีกด้วย

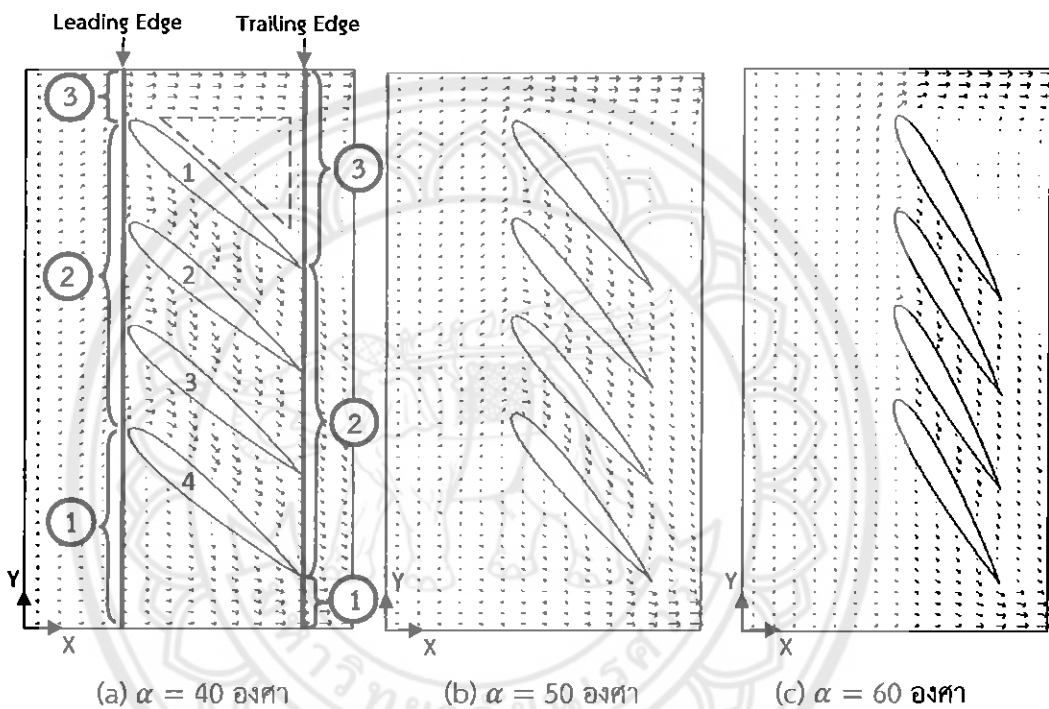
ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะและลักษณะของใบพัดกับกำลังที่ความดันขาเข้า 2 atm อุณหภูมิ 1200 K

มุมปะทะ (องศา)	ใบพัด	ความเร็วเฉลี่ยขาออก V_{n2} (m/s)	กำลังต่อหน่วยความหนา (W/m)
40	NACA 0012	233.47	229,357.78
	NACA 4512	259.96	207,636.67
50	NACA 0012	210.10	248,058.65
	NACA 4512	234.49	228,513.87
60	NACA 0012	155.62	290,268.42
	NACA 4512	171.55	278,129.75



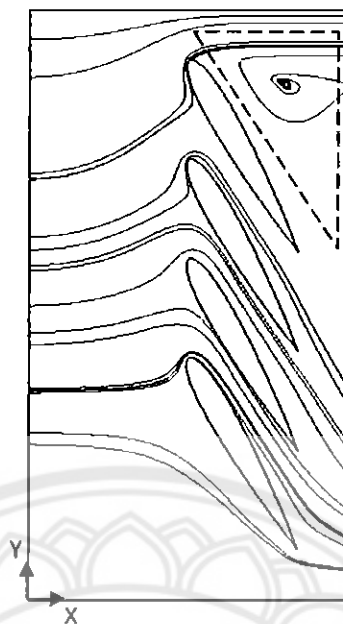
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของใบพัดกับกำลังที่ความดันขาเข้า 2 atm อุณหภูมิ 1200 K

ในการศึกษานี้กำหนดค่าความเร็วของของไหลที่ทางเข้าคงที่ 208.7411 m/s เพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มของความเร็วระหว่างมุมปะทะระหว่างของไหลกับใบพัดที่ 40, 50 และ 60 องศา จากรูปที่ 4.2 ค่ากำลังสูงสุดอยู่ที่มุมปะทะ 60 องศา เนื่องจากมุมปะทะมีความสัมพันธ์กับช่องทางการไหลของของไหล จากรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงเวกเตอร์ความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านชุดใบพัดที่มีมุมปะทะต่างกัน สังเกตว่าเมื่อมุมปะทะเพิ่มขึ้นทำให้ช่องทางการไหลลดลง จึงทำให้ค่าความเร็วของของไหลมากขึ้น (อัตราการไหลเชิงมวลเท่ากัน) การเปลี่ยนแปลงความเร็วของของไหลสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.5 และทิศทางการไหลจะเปลี่ยนไปตามมุมปะทะซึ่งสังเกตได้จากทิศทางของเวกเตอร์ความเร็ว



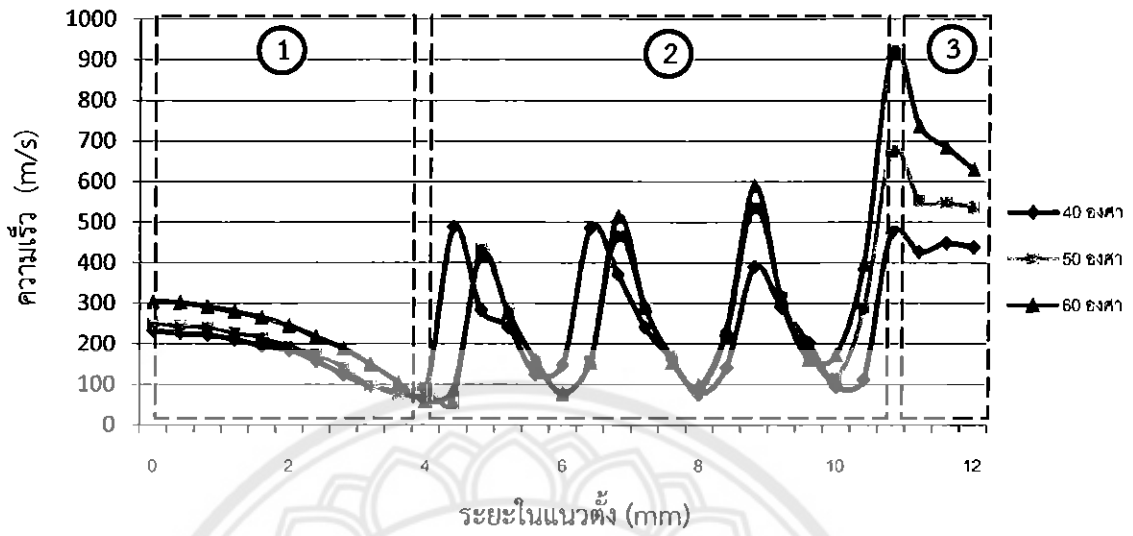
รูปที่ 4.3 เวกเตอร์ความเร็วใบพัด NACA 0012 ที่ความดันขาเข้า 2 atm อุณหภูมิขาเข้า 1200 K

จากรูปที่ 4.3 ทั้ง (a), (b) และ (c) สังเกตว่าด้านบนของใบพัดหมายเลข 1 (บริเวณเส้นประ) จะเป็นบริเวณที่มีมีความเร็วช้ามากซึ่งสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 4.4 ที่แสดงเส้นกระแสความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านใบพัด เห็นได้ว่าการใช้แผนอากาศที่มีมุมปะทะสูงๆ ทำให้มีด้านบนเกิดวอเท็กซ์ (Vortex) บางส่วนของการไหลเกิดการแยกตัว (Separate) จึงทำให้ของไหลนั้นไหลย้อนกลับ (Back Flow) ซึ่งตามทฤษฎีของแผนอากาศจะทำให้แรงยกตัว (Lift Force) ลดลงมาก ส่งผลให้แผนอากาศเกิดการตก (Stall) ในทำนองเดียวกันกับใบพัดกังหันเมื่อมุมปะทะสูงๆ จะทำให้แรงที่ของไหลสร้างเพื่อผลักใบพัดลดลง แต่ในความเป็นจริงปรากฏการณ์ต่างๆ ที่กล่าวข้างต้นจะไม่เกิดขึ้นเนื่องจากกังหันจะมีใบพัดครบวงจร ซึ่งในโครงการนี้ได้ทำการตัดส่วนหนึ่งของกังหันก๊าซออกมาทำให้ใบพัดที่ได้เป็นแบบ Cascade

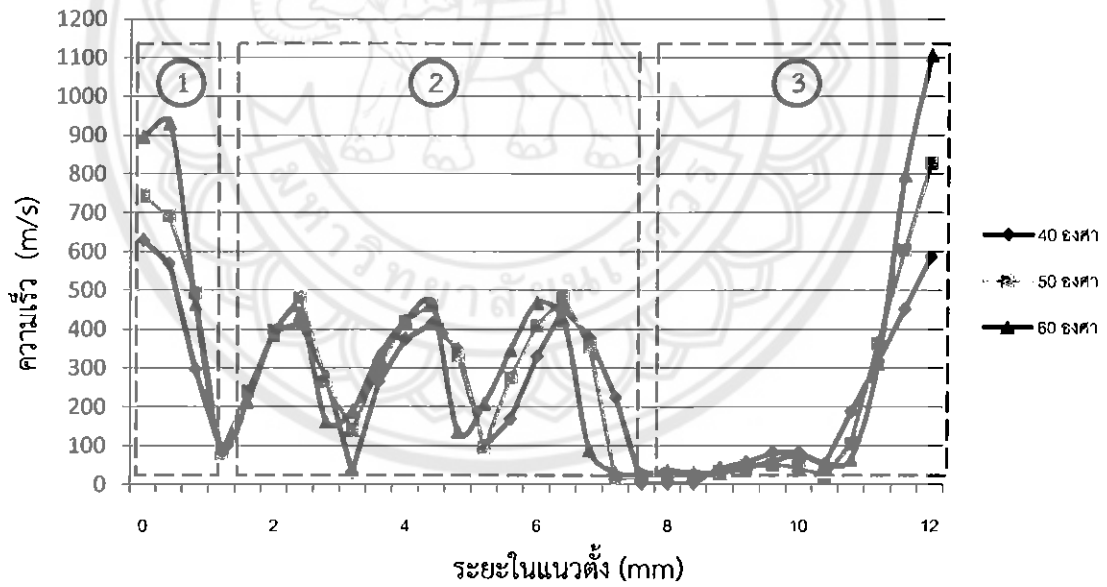


รูปที่ 4.4 เส้นกระแสความเร็วใบพัด NACA 0012 ที่ความดันขาเข้า 2 atm อุณหภูมิขาเข้า 1200 K

รูปที่ 4.5 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะกับความเร็วของของไหลที่ทางเข้า (Leading Edge) และทางออกใบพัด (Trailing Edge) ตามระยะในแนวตั้ง (แกน Y) โดยแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังรูปที่ 4.3 และ 4.5 จากรูปที่ 4.5 (a) เป็นการแสดงความเร็วที่ทางเข้าของใบพัด สังเกตว่าความเร็วของบริเวณหมายเลข 1 จะใกล้เคียงกันทั้ง 3 มุม คือจะลดลงจนถึงจุดตกกระทบบนใบพัด จากนั้นเป็นบริเวณหมายเลข 2 เป็นบริเวณที่มีใบพัด ความเร็วจะต่ำที่สุดบริเวณจุดตกกระทบบนใบพัดจะสูงที่สุดบริเวณกึ่งกลางระหว่างใบพัด สังเกตว่าข้อมูลทั้ง 3 ชุดจะเหลื่อมกันเนื่องจากมีมุมปะทะต่างกัน และบริเวณหมายเลข 3 เป็นบริเวณด้านบนของชุดใบพัดที่ของไหลไหลผ่านไปโดยไม่สัมผัสกับใบพัดโดยความเร็วที่มุม 60 องศา สูงที่สุดเนื่องจากเมื่อเพิ่มมุมปะทะจะทำให้ความเร็วกระแสอากาศที่ผ่านเหนือผิวด้านบนเพิ่มขึ้น ส่วนรูปที่ 4.5 (b) แสดงความเร็วที่ทางออกของใบพัด สังเกตว่าบริเวณหมายเลขที่ 1 ความเร็วจะลดลงจนถึงจุดจุดตกกระทบบนใบพัดเช่นเดียวกันกับที่ทางเข้าโดยที่มุม 60 องศา ความเร็วสูงที่สุดเนื่องจากช่องทางไหลของมุมปะทะ 60 องศา ที่ทางเข้าใบพัดสูงที่สุดสังเกตจากรูปที่ 4.3 (c) จึงทำให้ของไหลไหลเข้ามามากที่สุดและใบพัดจะทำหน้าที่คล้ายกับหัวฉีดจึงทำให้มีความเร็วที่ทางออกสูงที่สุด บริเวณหมายเลข 2 แนวโน้มของความเร็วจะใกล้เคียงกันมากและค่าจะเหลื่อมกันจากมุมปะทะเช่นเดียวกับที่ทางเข้า และบริเวณหมายเลข 3 จะมี 2 ส่วน ที่ต่างกันอย่างชัดเจน คือ ส่วนแรกจะเป็นส่วนที่มีความเร็วต่ำเนื่องจากของไหลผ่านใบพัดที่มีมุมปะทะสูงๆ และส่วนที่มีความเร็วสูงคือส่วนบนสุดที่ของไหลไม่สัมผัสกับใบพัด และสังเกตว่าความเร็วที่มุม 60 องศา สูงที่สุดเนื่องจากบริเวณขาเข้ามีความเร็วสูงที่สุดและไม่สัมผัสกับใบพัดจึงไหลด้วยความเร็วสูง



(a) ที่ทางเข้าใบพัด (Leading Edge)



(a) ที่ทางออกใบพัด (Trailing Edge)

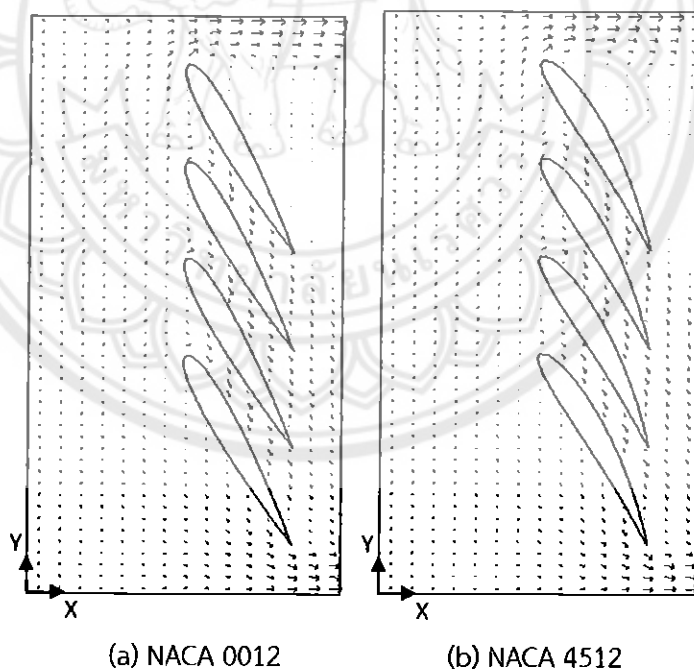
รูปที่ 4.5 ความเร็วที่ทางเข้าและทางออกใบพัด NACA 0012 ที่ความดันขาเข้า 2 atm อุณหภูมิ

ขาเข้า 1200 K (Local Velocity)

จากรูปที่ 4.2 และแสดงข้อมูลในตาราง 4.1 เมื่อพิจารณาผลของความโค้งของใบพัดที่มีต่อกำลัง พบว่าค่าความเร็วที่ทางออกใบพัด NACA 4512 (มีความโค้ง) ที่ทุกค่ามุมปะทะของใบพัดมีค่ามากกว่า NACA 0012 (ไม่มีความโค้ง) ซึ่งจากสมการ 3.3 เมื่อค่าความเร็วที่ทางออก (จุด 2) มากกว่าความเร็วที่ทางเข้า (จุดที่ 1) ทำให้ส่วนของการถ่ายเทพลังงานจลน์เป็นค่าลบจึงทำให้การถ่ายเทพลังงานรวมมีค่าลดลง เป็นผลให้ค่ากำลังมีค่าลดลงตามด้วยเช่นกัน

$$E = \left(\frac{P_1}{\rho_1} - \frac{P_2}{\rho_2} \right) + \left(\frac{V_{n1}^2}{2} - \frac{V_{n2}^2}{2} \right) + (h_1 - h_2) \quad (3.3)$$

จากการศึกษาผลของความโค้งของใบพัดพบว่าใบพัดที่ไม่มีความโค้ง (NACA 0012) ให้กำลังสูงกว่าใบพัดที่มีความโค้ง (NACA 4512) เนื่องจากลักษณะของใบพัดที่มีความโค้งจะทำให้ของไหลสามารถไหลได้ดี จึงทำให้ของไหลมีความเร็วสูงกว่าและทำให้ใบพัดได้รับพลังงานต่ำกว่าตามสมการที่ 3.3 จากรูปที่ 4.6 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านใบพัดทั้ง 2 แบบ สังเกตได้ว่าเวกเตอร์ความเร็วของใบพัดทั้ง 2 แบบ มีแนวโน้มคล้ายกันมากจึงทำให้ค่ากำลังที่ได้ไม่ต่างกันมากนัก (4.18%) แสดงว่าความโค้งของใบพัดมีผลต่อกำลังของใบพัดน้อยมาก สังเกตจากรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.6 เวกเตอร์ความเร็วที่มุมปะทะ 60 องศา ความดันขาเข้า 2 atm อุณหภูมิขาเข้า 1200 K

4.2 ผลกระทบของความดันขาเข้าไบพัดที่มีผลต่อกำลังของไบพัด

จากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะและลักษณะของไบพัดกับกำลังที่ความดันขาเข้า 2 atm อุณหภูมิ 1200 K ได้ผลคือไบพัด NACA 0012 ที่มีมุมปะทะ 60 องศา ให้กำลังสูงสุด ดังนั้นจึงใช้ไบพัดนี้ในการศึกษาผลของความดันขาเข้าและอุณหภูมิขาเข้าไบพัดที่มีผลต่อกำลัง ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาผลของความดันขาเข้าไบพัดระหว่าง 2, 3 และ 4 atm

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิขาเข้าไบพัดกับกำลังของไบพัดแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งผลของความดันที่มีต่อกำลังสามารถสรุปอยู่ในรูปที่ 4.7 (ใช้ค่าอุณหภูมิขาเข้าที่ 1200 K) พบว่าค่าของกำลังสูงขึ้นเมื่อความดันขาเข้าเพิ่มมากขึ้น โดยจะทำให้ความดันขาเข้ากับขาออกต่างกันมากขึ้น (ความดันขาออกเท่าเดิมที่ความดันบรรยากาศ) ทำให้การถ่ายเทพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงความดัน $\left(\frac{P_1}{\rho_1} - \frac{P_2}{\rho_2}\right)$ มีค่าสูงขึ้นตามสมการ 3.4 ซึ่งเมื่อการถ่ายเทพลังงาน (E) เพิ่มขึ้น จากสมการ 3.5 ส่งผลกำลังของไบพัดที่ได้มีค่าสูงขึ้นตามลำดับ

$$E = \left(\frac{P_1}{\rho_1} - \frac{P_2}{\rho_2}\right) + \left(\frac{V_{n1}^2}{2} - \frac{V_{n2}^2}{2}\right) + (h_2 - h_1) \quad (3.4)$$

$$P' = \dot{m}'E \quad (3.5)$$

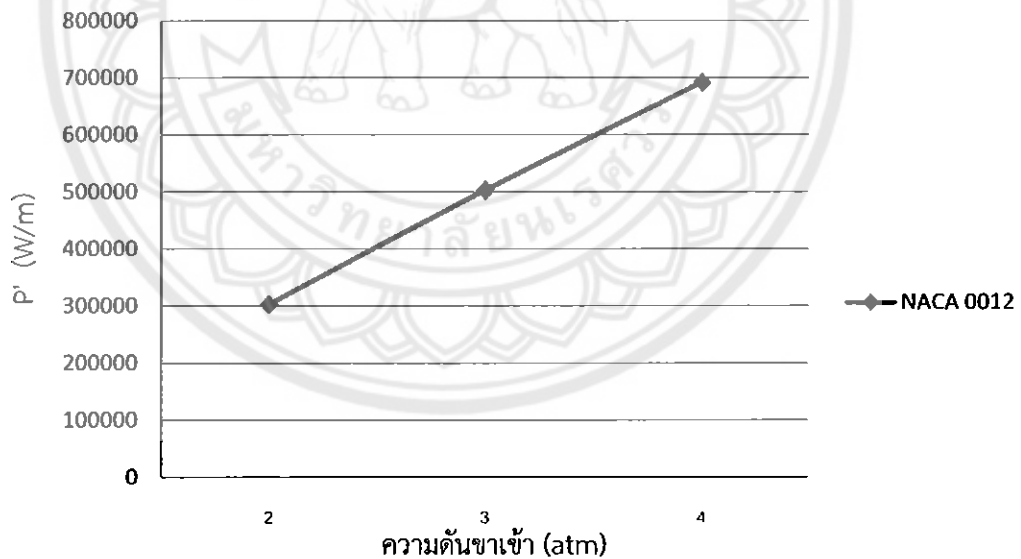
ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิขาเข้ากับกำลังของไบพัด NACA 0012 มุม 60 องศา

ความดัน (atm)	อุณหภูมิ (K)	ความเร็วเฉลี่ยขาออก V_{n2} (m/s)	กำลัง (W/m)
2 atm	1200	139.64	302,287.37
	1400	149.64	287,212.06
	1600	176.32	261,787.91
3 atm	1200	139.64	502,657.89
	1400	149.64	484,464.42
	1600	176.50	457,091.68
4 atm	1200	124.12	691,466.63
	1400	150.82	682,364.69
	1600	159.97	664,228.74

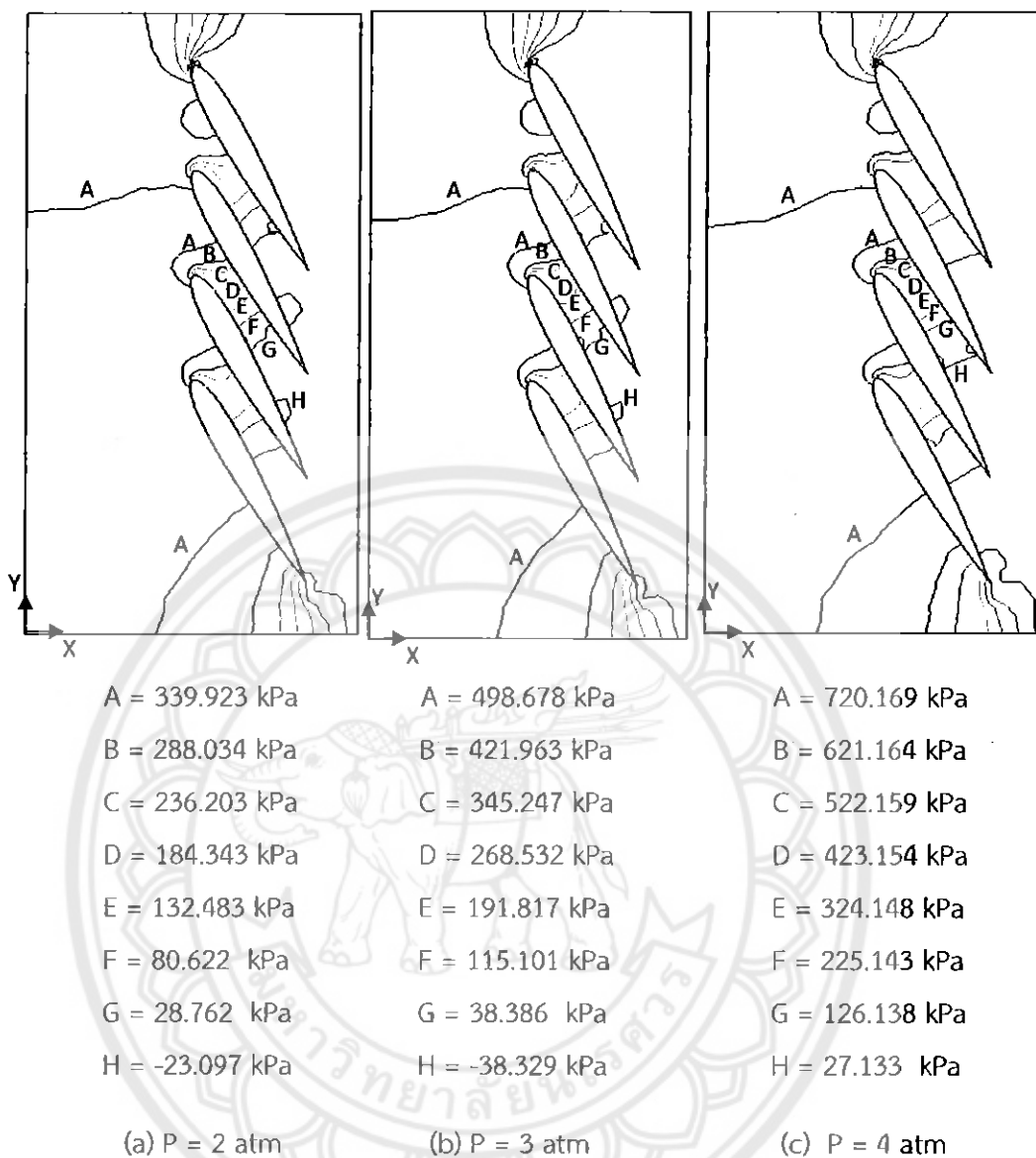
จากผลการศึกษาผลของความดันขาเข้าใบพัดรูปที่ 4.7 พบว่าใบพัดได้รับกำลังสูงสุดที่ค่าความดันขาเข้าใบพัดเท่ากับ 4 atm ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของความดันขาเข้าที่ทำการศึกษา เมื่อของไหลความดันสูงไหลผ่านใบพัดค่าความดันจะลดลงถึงค่าความดันบรรยากาศ เนื่องจากการศึกษาที่เรากำหนดให้ทางออกของใบพัดออกสู่บรรยากาศ ค่าความดันที่ทางออกจึงเป็นค่าที่ถูกกำหนดไว้เท่ากัน ผลกระทบของความดันจึงขึ้นอยู่กับค่าความดันขาเข้าใบพัดเท่านั้น จากรูปที่ 4.8 ได้แสดงการกระจายของความดันทั้ง 3 ค่าในรูป Contour ของทั้ง 3 กรณีโดยแสดงการกระจายที่ใกล้เคียงกัน แต่แตกต่างกันที่ค่าความดันขาเข้าใบพัด สังเกตจากเส้น Contour ของความดันทั้ง 3 ค่า มีแนวโน้มเหมือนกันคือ ความดันค่อยๆลดลงจากทางเข้าสู่ทางออกของใบพัด และเมื่อค่าความดันขาเข้าใบพัดมีค่ามากขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นของของไหลมีค่ามากขึ้นจึงเป็นเหตุให้ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลมีค่าสูงขึ้น (สมการที่ 3.2) และที่เป็นผลให้กำลังของใบพัดมีค่าสูงขึ้นดังสมการ 3.5 ด้วยเหตุนี้ค่ากำลังของใบพัดที่ความดันขาเข้าเท่ากับ 4 atm จึงมีค่ามากที่สุด

$$\dot{m}' = \rho_1 S V_{n1} = \rho_2 S V_{n2} \quad (3.2)$$

$$P' = \dot{m}' E \quad (3.5)$$



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันเข้ากับกำลังของใบพัด NACA 0012 สำหรับมุม 60 องศา ที่อุณหภูมิขาเข้า 1200 K



รูปที่ 4.8 Contour ของความดันใบพัด NACA 0012 มุมปะทะ 60 องศา ที่อุณหภูมิต่ำ

1200 K

เมื่อสังเกตการลดลงของความดันระหว่างบริเวณทางเข้ากับทางออกจากรูปที่ 4.8 พบว่า ความดันบริเวณด้านบนของใบพัดจะมีค่าต่ำและบริเวณใกล้ๆทางออกจะมีค่าติดลบ นั่นหมายความว่า ความดันบริเวณนั้นมีค่าต่ำกว่าบรรยากาศเนื่องจากในโครงการนี้กำหนดให้ความดันที่ศึกษาเป็นความดันเกจ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของการไหลผ่านแผ่นอากาศ กล่าวคือความดันด้านล่างแผ่นอากาศต้องสูงกว่าด้านบนแผ่นอากาศจึงจะสามารถยกตัวได้

4.3 ผลกระทบของอุณหภูมิขาเข้าไบพัดที่มีผลต่อกำลังของไบพัด

จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 เมื่อสังเกตในส่วนของผลของอุณหภูมิที่มีต่อความดันของทุกชุด ข้อมูลความดันขาเข้า (2, 3 และ 4 atm) พบว่าค่ากำลังลดลงเมื่ออุณหภูมิขาเข้าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของอากาศขาเข้าแปรผกผันกับอุณหภูมิ คือ เมื่อของไหลมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความหนาแน่นของอากาศจะลดลงจากกฎของก๊าซในอุดมคติ ($P = \rho RT$) เมื่อความหนาแน่นของอากาศลดลงส่งผลให้อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลลดลงตามสมการ 3.2 และจากสมการที่ 3.5 จึงส่งผลให้กำลังของไบพัดที่ได้ลดลงด้วยเช่นกัน ดังรูปที่ 4.9 (ความดันขาเข้าที่ 2 atm) และที่ทางออกของไบพัดเกิดการขยายตัวของอากาศทำให้อุณหภูมิที่ทางออกของไบพัดมีค่าลดลงจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีระหว่างทางเข้าและทางออกของไบพัด

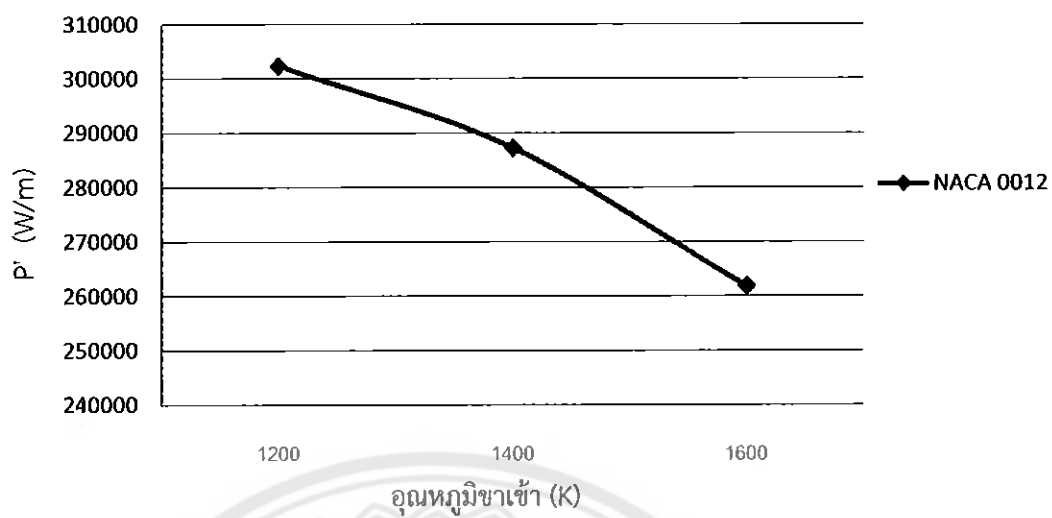
$$\dot{m}' = \rho_1 s V_{n1} = \rho_2 s V_{n2} \quad (3.2)$$

$$P' = \dot{m}' E \quad (3.5)$$

จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทางเข้ากับกำลังของไบพัดได้ผลคือ ค่ากำลังของไบพัดมากที่สุดที่อุณหภูมิขาเข้าเท่ากับ 1200 K

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้ากับกำลังของไบพัด NACA 0012 มุม 6 องศาที่ความดันขาเข้า 2 atm

ขาเข้า		ขาออก		กำลังต่อหน่วย ความหนา (W/m)
อุณหภูมิ (K)	เอนทาลปี (J/kg)	อุณหภูมิ (K)	เอนทาลปี (J/kg)	
1200	809,526	401.39	-68,286	302,287.37
1400	1,047,804	501.83	34,474	287,212.06
1600	1,291,009	675.79	217,363	261,787.91



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเข้ากับกำลังของใบพัด NACA 0012 มุม 6 องศา ที่ความดันขาเข้า 2 atm



บทที่ 5

สรุปผลการคำนวณและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการคำนวณ

สำหรับการศึกษาเชิงตัวเลขของกังหันก๊าซขนาดจิวสองมิติโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นั้น ในที่นี้เราได้ทำการพิจารณาส่วนหนึ่งของกังหันก๊าซออกมาทำให้ใบพัดที่ได้เป็นแบบ Cascade และศึกษาผลกระทบของมุมปะทะของใบพัด ลักษณะของใบพัด ความดันขาเข้าใบพัดและอุณหภูมิขาเข้าใบพัด ที่มีผลต่อกำลังในหน่วยวัตต์ต่อความลึกของใบพัดกังหันพบว่า

1. ใบพัดที่มีมุมปะทะมากให้กำลังสูง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของของไหลมาก เป็นเหตุให้มีการถ่ายเทพลังงานจลน์สูงจากของไหล และใบพัดตรง (NACA 0012) สามารถรับพลังงานจลน์ได้มากกว่าใบพัดโค้ง (NACA 4512) จึงทำให้ใบพัด NACA 0012 ที่มีมุมปะทะ 60 องศา ให้กำลังกับชุดใบพัดสูงสุด

2. จากการศึกษาผลของความดันขาเข้าที่ 2, 3 และ 4 atm พบว่าที่ความดันขาเข้าที่ 4 atm ให้กำลังสูงสุด เพราะเมื่อความดันขาเข้าเพิ่มขึ้นทำให้ได้รับพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงความดันเพิ่มขึ้น และอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลเพิ่มขึ้นด้วย

3. จากการศึกษาผลของอุณหภูมิขาเข้าที่ 1200, 1400 และ 1600 K (ที่ความดันเท่ากัน) พบว่าที่อุณหภูมิขาเข้า 1200 K ให้กำลังสูงสุด เพราะที่อุณหภูมิขาเข้า 1200 K ความหนาแน่นของของไหลมากจึงทำให้อัตราการไหลเชิงมวลสูง และกำลังสูงสุด

5.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

1. โปรแกรม COMSOL ใช้หน่วยความจำ (RAM) สูงมาก และมีจำกัดของโปรแกรมในการใช้ Multiphysics สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนอัดตัวได้ (Compressible Turbulent Flow) ร่วมกับ Moving Mesh

2. ควรศึกษาใบพัดกังหันที่มีใบพัดครบวงรอบและใบพัดสามารถหมุนได้ เพราะโครงการนี้กำหนดให้ใบพัดหยุดนิ่งจึงไม่พิจารณาความเร็วรอบของใบพัดซึ่งความเร็วรอบมีผลต่อกำลังที่ได้ด้วยเช่นกัน

3. ควรเพิ่มการศึกษา Guide Vanes เพื่อเพิ่มความเร็วขาเข้าของอากาศและทำให้อากาศสามารถไหลได้อย่างต่อเนื่องจาก Guide Vanes สู่ใบพัด

เอกสารอ้างอิง

- [1] Alen H. Epstein, 2003, "MILLIMETER-SCALE, MEMS GAS TURBINE ENGINES"
- [2] A. E. Robinson, H. H.-W. Funke, P. Hendrick, E. Recker, J. Peirs, 2003, "Development of a hydrogen fuelled 1 kW ultra-micro gas turbine with special respect to designing, testing and mapping of the μ -scale combustor"
- [3] Koji OKAMOTO, Toshio NAGASHIMA and Kazuo YAMAGUCHI, 2003, "Introductory Investigation of Micro Wave Rotor"
- [4] Toshio NAGASHIMA and Koji OKAMOTO, "Cycles and Thermal System Integration Issues of Ultra-Micro Gas Turbines"
- [5] P.A. Pilavachi, 2002, "Mini- and micro-gas turbines for combined heat and power", Research Directorate-General
- [6] Yuttapong Srikeaw et al., 2011, "Investigation of parameter related to performance of ultra-micro gas turbine"
- [7] Frank M. White, "Viscous Fluid Flow", McGraw Hill Education-London, 1991
- [8] "CHARACTERISTICS OF AIRFOIL SECTIONS FROM TESTS IN VARIABLE-DENSITY WIND TUNNEL", www.aeronautics.nasa.gov

