

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาชุดทดลองและการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้โปรแกรม  
จำลองการทำงานของใบพัดหม้อน้ำรถยนต์

**Development of Experimental Apparatus & Application  
of Computational Simulation of Fan Performance**



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
โดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วัน,เดือน,ปี - 4 ส.ย. 2548



การพัฒนาชุดทดลองและการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้โปรแกรม  
จำลองการทำงานของใบพัดหม้อน้ำรถยนต์

**Development of Experimental Apparatus & Application  
of Computational Simulation of Fan Performance**



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2546

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง

การพัฒนาชุดทดลองและการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้โปรแกรม  
จำลองการทำงานของใบพัดหม้อไอน้ำรถยนต์

Development of Experimental Apparatus &  
Application of Computational Simulation of Fan  
Performance

ผู้จัดทำ

นายกิตติศักดิ์ อารัมภักวิโรจน์

รหัสนักศึกษา 43010581

นายสุภศิณี ถิ่นทุกข์

รหัสนักศึกษา 43010815

นายอนุรักษย์ ทวีนิช

รหัสนักศึกษา 43010828

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาชุดทดลองและการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้โปรแกรมจำลองการทำงานของ  
ใบพัดหม้อน้ำรถยนต์

นายกิตติศักดิ์ อารัมภะวิโรจน์ 43010581

นายสุกสิลป์ สิ้นทุกข์ 43010815

นายอนุรักษ์ ทวีนุช 43010828

ผศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการพัฒนาการทดสอบใบพัดหม้อน้ำรถยนต์โดยการจำลองและใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขที่เรียกว่า วิธีปริมาตรคืบเนื่อง (Finite Volume Method) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาประยุกต์กับปัญหานี้ โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองโดยจะเทียบกับที่สภาวะ 1 บรรยากาศเท่านั้น ซึ่งคือสภาวะจริงในการทำงานของใบพัด และนำผลที่ได้จากการทำการทดลองมาสร้างกราฟ P-Q curve ที่ความเร็วรอบต่างๆ



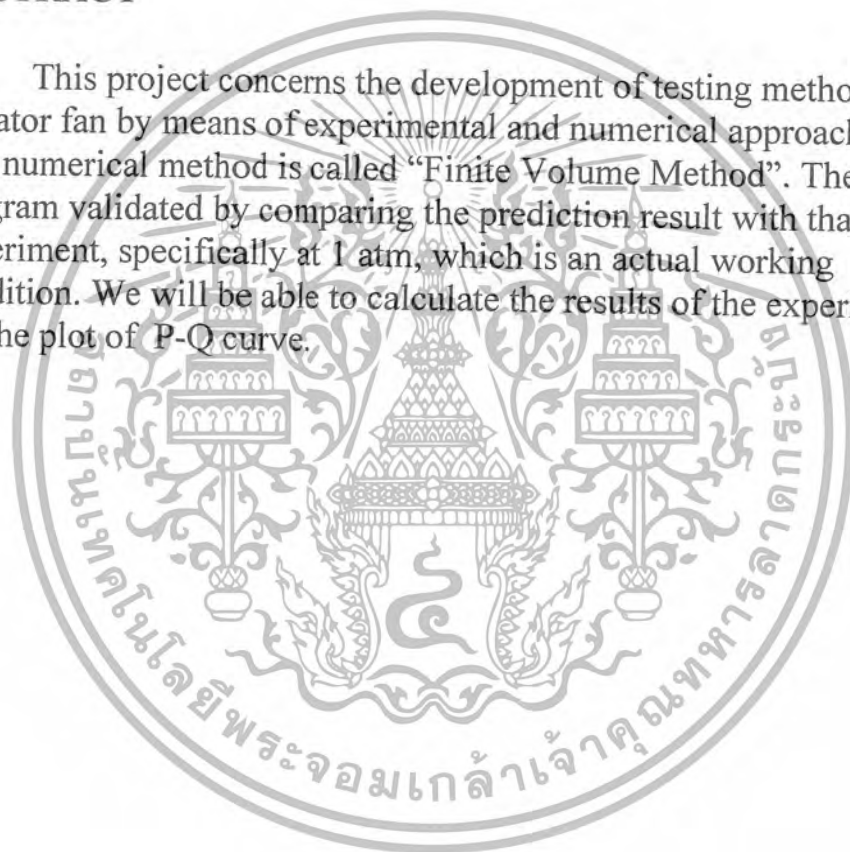
## Development of Experimental Apparatus & Application of Computational Simulation of Fan Performance

Mr. Kittisak Arumwirot  
Mr. Supasin Sintook  
Mr. Anurak Taweenut

Asst.Prof.Dr. Jaruwat Cheroensuk Adviser

### ABSTRACT

This project concerns the development of testing method of radiator fan by means of experimental and numerical approaches. The numerical method is called “Finite Volume Method”. The program validated by comparing the prediction result with that of the experiment, specifically at 1 atm, which is an actual working condition. We will be able to calculate the results of the experiment for the plot of P-Q curve.



### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ จารุวัตร เจริญสุข เป็นอย่างสูงในฐานะที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ได้ให้คำปรึกษา แนะนำวิธีการต่างๆ อีกทั้งยังอำนวยความสะดวกทางด้านการให้ใช้ห้องพักอาจารย์ เป็นที่ประชุมพูดคุยปรึกษารวมถึงการค้นคว้าหาข้อมูลและ เอกสารต่างๆ อาจารย์ มิ่ง โลกิจแสงทอง ที่ไว้วางใจให้ใช้ห้องทดลองอุโมงค์ลม, อาจารย์ภาคเครื่องกลหลายๆท่านที่ได้ให้คำปรึกษา, เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ที่ให้ความสะดวกในด้านเครื่องมือต่างๆ และเพื่อนๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	IV
หน้าที่	
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	3
2.1 อุโมงค์ลม	3
2.2 ใบพัดหม้อน้ำรถยนต์	5
2.3 ท่อทรงกระบอก	5
2.4 แผ่นกั้นลม	6
2.5 สกรีน	6
2.6 แบร็ง และก้านเหล็กวัดแรง	7
2.7 พิโทท ทีวี	7
2.8 มานอมิเตอร์	10
2.9 สอดไวร์ อานีโมมิเตอร์	10
2.10 เพาเวอร์ซัพพลาย	12
2.11 เครื่องวัดความเร็วรอบ	13
2.12 ตรีคอม โพนนท์	14
บทที่ 3 แนวคิดพื้นฐานของการไหล	17
3.1 คำนิยามของการไหล	17
3.2 สมการพื้นฐาน	21
3.3 แบบอย่างของการไหล	26
3.4 เส้นสายธาร,เส้นทางไหลและเส้นใยการไหล	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	V
	หน้าที่
3.5 การไหลของของไหลในอุดมคติ	29
บทที่ 4 การไหลแบบไม่สามารถอัดได้ และมีความหนืดภายในท่อ	32
4.1 บทนำ	32
4.2 ฟลูตี่ ดีเวลอปสำหรับการไหลแบบลามินาระหว่างแผ่นขนานที่ไม่จำกัด	33
4.3 ฟลูตี่ ดีเวลอปสำหรับการไหลแบบราบเรียบในท่อ	40
4.4 การกระจายของความเค้นเฉือนใน ฟลูตี่ ดีเวลอปในการไหลในท่อ	44
4.5 โพรไฟล์ของความเร็ว เทอร์บูเลนซ์สำหรับ ฟลูตี่ ดีเวลอปในการไหลในท่อ	46
4.6 การพิจารณาพลังงานในการไหลในท่อ	50
4.7 การคำนวณ เฮดลอส	52
บทที่ 5 การคำนวณ	63
5.1 การแทนผลลัพธ์โดยใช้โพลีโนเมียล	63
5.2 การหาสมการกับกลุ่มข้อมูลโดยใช้วิธีกำลังสองต่ำสุด	63
บทที่ 6 การดำเนินงานทดลอง	65
6.1 ขั้นตอนการเตรียมชุดทดสอบ	65
6.2 ขั้นตอนการทดสอบ	66
6.3 ชุดทดสอบ	67
บทที่ 7 ผลการทดลอง	69
7.1 ผลการทดลอง	69
7.2 ขั้นตอนการคำนวณเพื่อหาค่าอัตราการไหลเชิงมวล	69
7.3 แนวทางในการหาประสิทธิภาพของใบพัดหม้อน้ำ	72
บทที่ 8 วิจัยและสรุปผล	80
8.1 ข้อสรุป	80
8.2 ข้อวิจารณ์	82
เอกสารอ้างอิง	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้าที่
2.1	อุโมงค์ลม	4
2.2	ใบพัดหม้อน้ำ	5
2.3	แผ่นไม้กั้นลม	6
2.4	สกรีน(1)	6
2.5	สกรีน(2)	6
2.6	แบร็งและก้านเหล็กซึ่งประกอบกับเคสมอเตอร์แล้ว	7
2.7	พิโทท ทีวี	8
2.8	รูปอธิบาย พิโทท ทีวี	8
2.9	พิโทท ทีวีที่ใช้ในการทดลอง	9
2.10	รูปอธิบายมอเตอร์	10
2.11	ฮอต ไวร์ อานีโมมิเตอร์	11
2.12	ลักษณะการห่อหุ้มฮอต ไวร์	11
2.13	ฮอต ไวร์ อานีโมมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	12
2.14	เพาเวอร์ซัพพลายชนิด สเตลที่ใช้ทดลอง	13
2.15	เครื่องวัดความเร็วรอบชนิดใช้แสง	13
2.16	ทรिकอม โพนนท์	14
2.17	ส่วนประกอบต่างๆที่สำคัญของ ทรिकอม โพนนท์ ด้านหน้า	15
2.18	ส่วนประกอบต่างๆที่สำคัญของ ทรिकอม โพนนท์ ด้านข้าง	16
3.1	การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของของไหลเมื่อมีแรงเฉือน F กระทำ	17
3.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง	19
3.3	แสดงตัวอย่างการไหลในแบบต่าง ๆ	28
3.4	เส้นสายธาร	29
3.5	อนุภาคของไหลเคลื่อนที่ตามเส้นสายธาร	31
4.1	แสดงการพัฒนากระบวนการไหลในท่อ	32
4.2	การวิเคราะห์คอนโทรลวอลูมของการไหลแบบราบเรียบระหว่างแผ่นขนานที่อยู่นิ่งและยาวไม่จำกัด	33
4.3	แสดงโปรไฟล์ของความเร็วยุ่สำหรับฟลูลิตีเวลอปในการไหลแบบราบเรียบระหว่างแผ่นขนานที่มีความยาวไม่จำกัด	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้าที่	
4.4	คอนโทรวอลลุ่มสำหรับการวิเคราะห์การไหลแบบราบเรียบระหว่างแผ่นขนานที่มีความยาวไม่จำกัดและแผ่นด้านบนเคลื่อนด้วยความเร็วคงที่	38
4.5	แสดงการกระจายของความเร็วสำหรับฟลูลิตีเวลลอปในการไหลแบบราบเรียบระหว่างแผ่นขนานในขณะที่ด้านบนเคลื่อนด้วยความเร็วคงที่	40
4.6	แสดงการวิเคราะห์คอนโทรวอลลุ่มของฟลูลิตีเวลลอปสำหรับการไหลแบบราบเรียบในท่อ	41
4.7	แสดงคอนโทรวอลลุ่มสำหรับการวิเคราะห์ความดันเนื่องในการไหลฟลูลิตีเวลลอปในท่อกลม	45
4.8	กราฟแสดงเรย์โนลด์ส เลขสำหรับฟลูลิตีเวลลอปในการไหลแบบปั่นป่วนในท่อ	46
4.9	โพรไฟล์ของความเร็วในช่วงปั่นป่วน สำหรับฟลูลิตีเวลลอปในท่อเรียบ	47
4.10	โพรไฟล์ของความเร็วจาก power-law สำหรับฟลูลิตีเวลลอปสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในท่อเรียบ	47
4.11	แสดงกำลังของ power-law สำหรับฟลูลิตีเวลลอปในการไหลแบบปั่นป่วนในท่อเรียบ	48
4.12	แสดงโพรไฟล์ของความเร็วสำหรับฟลูลิตีเวลลอปของการไหลในท่อ	49
4.13	คอนโทรวอลลุ่มและพิกัด สำหรับการวิเคราะห์พลังงานของการไหลผ่านท่อของ $90^\circ$	50
4.14	แสดง friction factor ในท่อกลม	55
4.15	แสดง relative roughness ในท่อ	56
4.16	สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (loss coefficient) สำหรับการไหลผ่านบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่อย่างทันที	59
4.17	แสดงความสัมพันธ์ในเทอมต่างๆ สำหรับการออกแบบ ดิฟิวเซอร์	59
4.18	แสดงความยาวเทียบเท่า ( $L_e/D$ ) สำหรับ ก. ท่อโค้ง $90^\circ$ และ ข. miter bend	61
6.1	ชุดทดลองที่ได้ออกแบบไว้	65
6.2	แสดงตำแหน่งการวัดความดันในท่อ	66
6.3	แสดงแกนที่ใช้วัดความเร็ว	66
6.4	รูปชุดทดลองและอุปกรณ์วัดค่าในตำแหน่งต่างๆ	68
8.1	กราฟ P-Q curve ที่ความเร็วรอบ 2000,2300,2600 rpm	80
8.2	P-Q curve จากงานวิจัยอื่น	

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้าที่
4.1	สัมประสิทธิ์การสูญเสียแรงสำหรับท่อที่มีทางเข้าต่างกัน	58
4.2	แสดงความยาวเทียบเท่าของวาล์ว และข้อต่อ	62
7.1	แสดงการหาอัตราการไหลเชิงมวลที่ความดัน	71
7.2	แสดงผลการทดลองที่ความเร็วรอบ 2000 rpm ครั้งที่ 1	74
7.3	แสดงผลการทดลองที่ความเร็วรอบ 2000 rpm ครั้งที่ 2	75
7.4	แสดงผลการทดลองที่ความเร็วรอบ 2300 rpm ครั้งที่ 1	76
7.5	แสดงผลการทดลองที่ความเร็วรอบ 2300 rpm ครั้งที่ 2	77
7.6	แสดงผลการทดลองที่ความเร็วรอบ 2600 rpm ครั้งที่ 1	78
7.7	แสดงผลการทดลองที่ความเร็วรอบ 2600 rpm ครั้งที่ 2	79
8.1	ตารางการเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวล	82



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มา

ใบพัดหม้อน้ำรถยนต์เป็นหนึ่งในระบบระบายความร้อนของเครื่องยนต์ภายในรถยนต์ซึ่งทำงานร่วมกับหม้อน้ำรถยนต์ ซึ่งพัดลมจะติดตั้งอยู่หน้าของหม้อน้ำทำการดูดอากาศเพื่อให้อากาศวิ่งผ่านหม้อน้ำเพื่อระบายความร้อนให้กับน้ำที่ไหลหมุนเวียนอยู่ในหม้อน้ำเพื่อทำการระบายความร้อนให้กับเครื่องยนต์ต่อไป

ขนาดของหม้อน้ำรถยนต์แต่ละรุ่นมีขนาดแตกต่างกันนั้นหมายถึงความเหมาะสมของใบพัดที่ใช้ร่วมกับหม้อน้ำย่อมมีขนาดแตกต่างกันด้วย ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางพัดลม ขนาดของใบเบลดแต่ละใบ จำนวนใบ มุมเอียงของใบพัด ฯลฯ ส่วนแล้วมีผลต่ออัตราการไหลของอากาศทั้งสิ้น หม้อน้ำรถยนต์ของเครื่องยนต์ขนาดใหญ่ต้องการปริมาณน้ำในการระบายความร้อนมากจึงเหมาะกับหม้อน้ำขนาดใหญ่รวมถึงใบพัดขนาดใหญ่ขึ้นเพื่ออัตราการไหลของอากาศที่จะต้องมากเพียงพอต่อการระบายความร้อน และไม่จำเป็นว่าใบพัดหม้อน้ำที่ให้อัตราการไหลมากกว่าเท่านั้นที่จะมีประสิทธิภาพ เพราะถ้าอัตราการไหลมากเกินไปจนจำเป็นแล้วก็ไม่ช่วยให้อัตราการไหลมากขึ้นกว่าเดิมแต่จะเป็นการเปลืองพลังงานไฟฟ้า เปลืองแบตเตอรี่มากกว่า

เพราะฉะนั้นการเลือกอุปกรณ์ให้เหมาะสมนั้นเป็นเรื่องจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อความเหมาะสมทางด้านประสิทธิภาพการทำงานที่สูงที่สุดและความสิ้นเปลืองต่ำสุด

สำหรับการเลือกใบพัดหม้อน้ำรถยนต์นั้น สิ่งที่จะบ่งชี้ถึงความสามารถของใบพัดได้ดีที่สุดคือ กราฟแสดงสมรรถนะ (Performance Curve) กราฟที่จะแสดงถึงการเปรียบเทียบตัวแปรต่างๆที่มีผลต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตร เช่นความดัน ความเร็วรอบใบพัด รวมทั้งยังแสดงค่าประสิทธิภาพรวมของใบพัดได้ การพิจารณาที่จะเลือกใบพัดมาใช้งานนั้นควรเลือกใบพัดที่มีประสิทธิภาพสูงในสภาวะที่ใช้งานนั้นๆถึงจะดีที่สุด

#### 1.2 วัตถุประสงค์

##### 1. เพื่อทำการหา P-Q curve ของใบพัด

P-Q curve เป็นกราฟแสดงสมรรถนะ ของใบพัดอย่างหนึ่ง เป็นกราฟระหว่าง ความดัน และ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ ทำให้ทราบว่าที่ความดันระดับใดๆจะมีค่าอัตราการไหลเท่าไร จะทำให้ทราบถึงความสามารถของใบพัดนั้นๆได้ การหา P-Q curve นั้นจะหาจากการทดลอง ที่จะกล่าวในบทต่อไป

##### 2. เพื่อดูว่าสามารถนำโปรแกรมมาประยุกต์ใช้กับปัญหานี้ได้หรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโครงการนี้จะนำผลการทดลอง และผลจากการจำลองของ โปรแกรมมาเปรียบเทียบเพื่อหาข้อสรุปว่าปัญหาแบบนี้เราสามารถที่จะนำโปรแกรมสำเร็จรูปนี้มาประยุกต์ใช้ได้ผลดีมากน้อยแค่ไหน ซึ่งสถานะที่เราจะนำมาเปรียบเทียบ คือสถานะที่ความดัน 1 บรรยากาศเป็นสถานะที่ใช้งานจริงในรถยนต์

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการที่จะศึกษาประสิทธิภาพของใบพัดหม้อน้ำรถยนต์โดยจะพิจารณาที่กราฟ P-Q curve ซึ่งจะได้มาจากการทดลองซึ่งต้องทำการพัฒนาชุดทดลองให้ได้ผลที่ต้องการและถูกต้องตามทฤษฎี รวมทั้งทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการที่จะนำโปรแกรมไปประยุกต์ใช้กับปัญหานี้ โดยในการนำผลมาเปรียบเทียบนั้นจะเน้นไปที่สถานะจริงที่ใบพัดทำงานในรถยนต์เท่านั้น ซึ่งจะเป็นที่สถานะความดันคือที่ 1 บรรยากาศ แล้วทำการสรุปผลว่ามีความคลาดเคลื่อนมากน้อยแค่ไหน อยู่ในระดับที่ยอมรับได้หรือไม่ และความคลาดเคลื่อนนั้นเกิดจากข้อจำกัดอะไรบ้างสามารถที่จะแก้ไขได้อย่างไร

### 1.4 วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยในโครงการนี้จะเริ่มด้วยการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยซึ่งส่วนใหญ่ก็เป็นทฤษฎีต่างๆที่อยู่ในวิชา กลศาสตร์ของไหล(Fluid Mechanics) และ เทอร์โบแมชชีนเนอร์รี่ (Turbo Machinery) รวมทั้ง วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) ที่เน้นเรื่อง วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method) ซึ่งใช้ในโปรแกรมที่จะนำมาจำลองผลการทดลองด้วย จากนั้นก็นำความรู้ที่ได้ศึกษามาทั้งหมดมาออกแบบและพัฒนาชุดทดลองขึ้น จัดเตรียมอุปกรณ์ กำหนดตัวแปรต่างๆ ในขณะเดียวกันก็ศึกษาโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อใช้ในการวิจัย

จากนั้นก็ทำการสร้างชุดทดลองขึ้นมาภายใต้ทฤษฎีและจุดประสงค์ของโครงการทำการทดสอบความถูกต้องของชุดทดลองและปรับแต่งก่อนทำการทดลองจริง จากนั้นก็ทำการทดลองเพื่อหาผลการทดลองตามจุดประสงค์ของ โครงการรวมทั้งทำการจำลองเพื่อหาผลการทดลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากผลการทดลองก็นำมาคำนวณหาค่าตัวแปรที่ได้กำหนดไว้ตอนแรกซึ่งก็คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ และความดันแล้วนำมาสร้างกราฟเพื่อนำไปพิจารณาประสิทธิภาพของใบพัดได้ รวมทั้งนำผลที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาเปรียบเทียบเฉพาะที่ความดัน 1 บรรยากาศเท่านั้น

สรุปผลการทดลองค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างการทดลองกับโปรแกรม และแนวทางในการพัฒนาต่อไป

## บทที่ 2

### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 2.1 อุโมงค์ลม

เป็นอุโมงค์ลมของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

##### 2.1.1 ลักษณะโดยทั่วไป

ตัวอุโมงค์เป็นแบบวงจรเปิด โครงสร้างส่วนใหญ่ทำจากอลูมิเนียม อากาศจะเข้าทางด้านทางเข้า ซึ่งมีรูปร่างเหมาะสมและมีตะแกรงป้องกัน บริเวณที่ทำการทดสอบสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนและสนับสนุน โมเดลแบบต่างๆ สำหรับกระแสการไหลทางด้านบนที่บริเวณทดสอบจะมีการติดตั้ง สเตติก เทปปีง (Static Tapping) และ ท่อโททัลเฮด (Total Head) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยน ได้ถึงจุดสูงสุดของบริเวณที่ทดสอบ ส่วนกระแสการไหลทางด้านล่างจะมีท่อ พิโทท์ สเตติก (Pitot-Static) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้เช่นกัน

ทางด้านหลังของบริเวณทดสอบจะมี ดีฟิวเซอร์ (Diffuser) ซึ่งเป็นช่องไปสู่พัดลมดูดอากาศแบบทิศทางขนานกับแกนหมุน (Axial Flow) และความเร็วของอากาศจะถูกกำหนดโดย วาล์วปีกผีเสื้อคู่ที่ติดตั้งอยู่ที่ทางออกของพัดลมความเร็วสูงสุดของอากาศสามารถหาได้จากผลต่างของความดันที่ 300 มิลลิเมตรน้ำ และสามารถอ่านได้จากมานอมิเตอร์ที่ติดตั้งไว้

อุโมงค์ลมประกอบด้วย

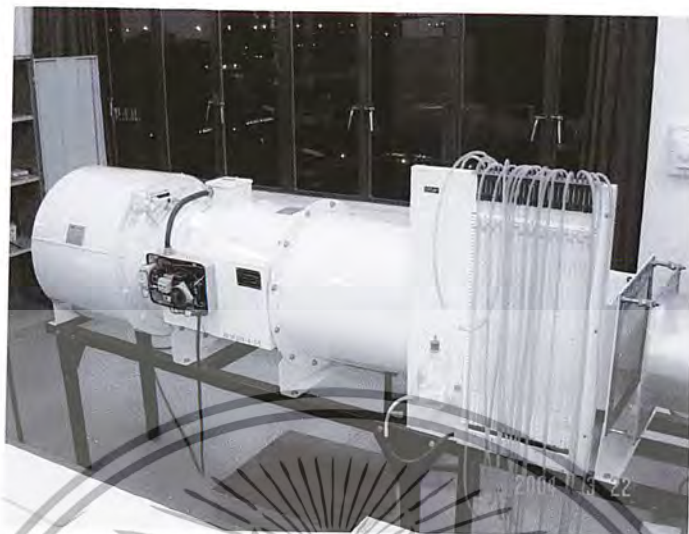
1. ท่อโททัลเฮด ใช้วัดความดันสถิตโดยค่าที่วัดได้จะถูกแสดง โดยค่าที่วัดได้จะถูกแสดงที่มานอมิเตอร์
2. ท่อ พิโทท์ สเตติก
3. มานอมิเตอร์ 24 ท่อ ภายในบรรจุน้ำ ให้แสดงค่าวัดความดันที่วัดได้มีหน่วยเป็นเซ็นติเมตร
4. ท่อทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 64 มิลลิเมตร ประกอบด้วยเพรเซอร์ เทปปีง ( Pressure

Tapping)

อุโมงค์ลมสามารถติดตั้งอุปกรณ์พิเศษเพิ่มเติมได้ดังนี้:

TE81E	Three Component Balance
TE54DPS	20 way scanning valve
TE54LA	Linear actuator & pilot traverse gear
TRU300	Single Axis traverse mechanism
TE54RA	Rotary actuator for models
RE35	Smoke generator & probe
COMPENDW	Computer control & data acquisition system

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 อุโมงค์ลม

### 2.2.2 การตรวจสอบความแม่นยำสำหรับอุโมงค์ลม

การวัดอย่างกว้างๆของอุโมงค์ลมที่วางแปลนดังรูป จะก่อให้เกิดการทดลองที่เหมาะสม และช่วยให้เข้าใจหลักการของ ความดันสถิตย์, ไดนามิก, รวม (Static, Dynamic, Total Pressure) และ เบบ์คาร์ลี เลเยอร์ ดีเวลอปเม้นท์ (Boundary Layer Development) ในขั้นแรกจะต้องทำการ ตรวจสอบการกระจายของความเร็ว (Velocity Distribution) ตลอดความสูงของบริเวณทดสอบใน ระบาย 1 โดยการใช้อุปกรณ์ ทอทัสเตด และ สแตติก เพรเชอร์ เทปปีง (Static Pressure Tapping) และ ในระบาย 3 ตรวจสอบโดยใช้ท่อ พิโทท สแตติก ซึ่งจะช่วยให้สามารถใช้อุโมงค์ลมที่ความเร็วลม สูงสุดและค่า ความดันรวมที่ 20 มิลลิเมตร ตลอดความสูงของบริเวณทดสอบ และทำการวัดค่าที่ บริเวณด้านล่างของเบบบ์คาร์ลี เลเยอร์ (Boundary Layer) เพื่อหาค่าการกระจายความเร็วใน เบบ์คาร์ลี เลเยอร์ (ซึ่งตามปกติความหนา เบบ์คาร์ลี เลเยอร์ น้อยมากประมาณ 5 มิลลิเมตรในระบาย 3 และน้อยมากในระบาย 1 )

ความเร็ว (U) เกิดจากความหนาแน่นของก๊าซ ( $\rho$ ) เร่งอิสระภายใต้อิทธิพลของ เพรเชอร์ดิเฟอเรนซ์ (Pressure Difference) (P) เมื่อ P มีค่าน้อย เมื่อไม่คิดความสามารถในการอัด (Compressibility)

## 2.2 ใบพัดหม้อน้ำรถยนต์

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อทดสอบและทำการศึกษาเป็นใบพัดหม้อน้ำที่เป็น โมเดลที่ใช้จริง ทั้งชุดรวมทั้ง เซอร์วาวด์ และมอเตอร์

ใบพัดหม้อน้ำรถยนต์จัดอยู่ในประเภทการทำงานแบบ ทิศทางขนานกับแกนหมุน (Axial Flow) หมายถึง ลักษณะของการไหลของอากาศนั้นจะมีทิศทางไหลตั้งฉากกับใบพัด ซึ่งในการทำงานจริงนั้นอากาศจะเข้าด้านหน้าใบพัดและออกทางด้านหลังซึ่งจะผ่านหม้อน้ำเพื่อการระบายความร้อนต่อไป



รูปที่ 2.2 ใบพัดหม้อน้ำ

รายละเอียดของใบพัดที่ใช้ทดสอบมีดังนี้

- ใบพัดที่ผลิตขึ้นเพื่อรถยนต์โตโยต้า โซลูน่า (Toyota Soluna )
- เป็นใบพัดชนิดมี เบลด (blade) 5 ใบ
- มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร
- มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง hub 9 เซนติเมตร
- มีมุมบิซของ เบลด เท่ากับ  $17^{\circ}10'$

## 2.3 ท่อทรงกระบอก

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้บังคับให้การไหลของอากาศไหลอยู่เฉพาะในท่อเพื่อที่จะสามารถวัดค่าการไหลและความดันของอากาศหลังใบพัดได้

รายละเอียดของท่อที่ใช้ทดสอบมีดังนี้

- ใช้ท่อแบบ round duct หรือ ท่อทรงกระบอก
- ท่อที่ใช้เป็นท่อกัลป์วาไนส์ สตีล ชีต (Galvanised Steel Sheet )
- เส้นผ่าศูนย์กลางท่อเท่ากับ 32 เซนติเมตร เนื่องจากในที่นี้เราใช้ใบพัดขนาด 30 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 แผ่นกั้นลม

ในการทำงานจริงของใบพัดหม้อน้ำรถยนต์นั้นจะมีอากาศเข้าที่ด้านหน้าของใบพัดเท่านั้น ดังนั้นในการทดลองเราจึงต้องใช้แผ่นไม้กั้นลมมาประกอบเข้ากับชุดทดลองในลักษณะดังรูป โดยที่ให้ระนาบของแผ่นไม้และของใบพัดอยู่ในระนาบเดียวกัน เพื่อป้องกันลมหรืออากาศจากด้านหลังที่อาจถูกดูดเข้ามาได้ซึ่งจะทำให้ไม่เป็นไปตามการทำงานจริงของใบพัด



รูปที่ 2.3 แผ่นไม้กั้นลม

## 2.5 สกรีน

เนื่องจากอากาศที่อยู่ด้านหลังใบพัดนั้นในสภาวะจริงจะเกิดการหมุนวนไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งหน้าตัดทำให้เป็นการยากต่อการที่จะวัดค่าความเร็วของอากาศได้ จึงจำเป็นต้องทำสกรีนเพื่อกรองหรือบังคับอากาศนั้นไหลไปในทิศทางเดียวกันและสม่ำเสมอทั่วทั้งหน้าตัด จะทำให้การวัดค่าความเร็วของอากาศนั้นทำได้ง่ายและให้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้น โดยที่สกรีนที่ใช้นั้นทำขึ้นจากหลอดกาเฟลพลาสติกทั่วไปหลายๆหลอดมาอัดกันให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับท่อ ดังรูป



รูปที่ 2.4 และ 2.5 สกรีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 แบริ่ง และก้านเหล็กวัดแรง

อุปกรณ์นี้ทำขึ้นเพื่อจุดประสงค์ในการหาค่าแรงบิดของมอเตอร์เพื่อนำไปหาประสิทธิภาพของใบพัด โดยมีหลักการที่ เมื่อจ่ายกระแสไฟเข้ามอเตอร์แล้วจะเกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำให้แกนมอเตอร์หมุน ซึ่งแกนมอเตอร์จะทำแรงคู่ปฏิกิริยา กับ เคส มอเตอร์ทำให้หมุนไปในทิศทางตรงกันข้ามแต่มีแรงเท่ากัน นำแบริ่งมาประกอบโยสวมเข้ากับเคสมอเตอร์เพื่อให้มอเตอร์นั้นหมุนได้อย่างอิสระ และนำก้านเหล็กต่อเข้ากับมอเตอร์จะสามารถวัดแรงจากมอเตอร์ได้โดยใช้โพลลเซลล์ในการวัดค่าต่อไป



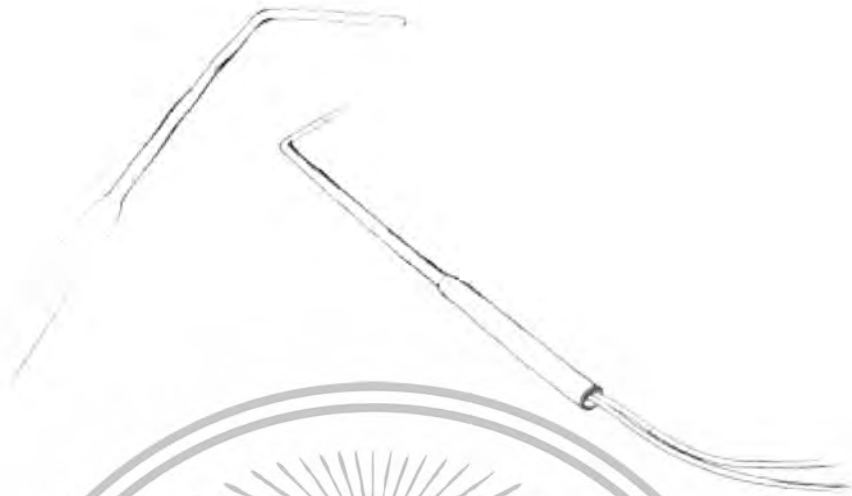
รูปที่ 2.6 แบริ่งและก้านเหล็กซึ่งประกอบกับเคสมอเตอร์แล้ว

รายละเอียดของอุปกรณ์มีดังนี้

- แบริ่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซ็นติเมตร
- ก้านเหล็กยาว 42 เซ็นติเมตร

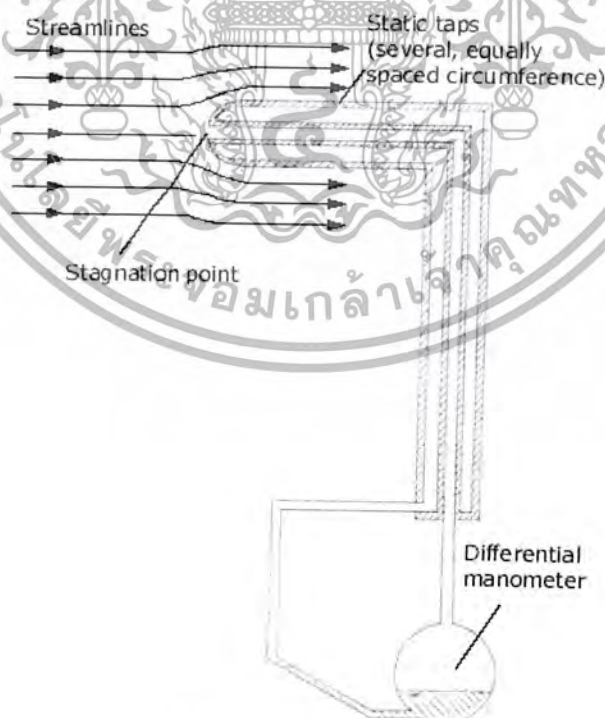
## 2.7 พิโทท ทิวป์ (Pitot Tube)

เป็นอุปกรณ์ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับการวัด ความดันสถิตย์ที่ปลายด้านที่สัมผัสกับกระแสการไหลของอากาศ จะมีลักษณะรูและจะมีทิศทางขนานกับทิศทางการไหลส่วนปลายจะมีลักษณะเป็นกรวยลาดเอียง ที่ปลายสุดจะมีการเจาะรูเพื่อให้อากาศสามารถผ่านไปได้อย่างลักษณะนี้เองทำให้ แรงต้านจากการปะทะน้อยมาก ส่วนด้านปลายอีกด้านหนึ่งจะต่อไปยังมานอมิเตอร์ ในขณะที่มีรูที่ปลายแหลมก็จะสัมผัสกับกับกระแสการไหลเช่นกัน โดยจะมีทิศทางตั้งฉากกับการไหลในส่วนนี้จะเป็นการวัดค่าความดันรวม โดยที่ปลายอีกด้านหนึ่งต่อ ไปยังมานอมิเตอร์เพื่ออ่านค่าเช่นกัน



รูปที่ 2.7 พิโทท์ ทิวบ์

พิโทท์ ทิวบ์ สามารถวัดความเร็วของไหลโดยเปลี่ยนพลังงานจลน์ของการไหลไปเป็นพลังงานศักย์ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้กระทำที่จุด สแตกเนชัน (Stagnation point) ซึ่งอยู่ที่รูของปลายพิโทท์ ทิวบ์ ดังรูป ซึ่งจะมีความดันมากกว่าความดัน ฟรี สตรีม (free-stream) ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจลน์เป็นพลังงานศักย์



รูปที่ 2.8 รูปอธิบายพิโทท์ ทิวบ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิโทห์ ทิวน์ สามารถวัดความดันได้ซึ่งโดยทั่วไปจะอ่านค่าจากผลต่างของระดับน้ำใน มานอมิเตอร์ ถ้าต้องการหาความเร็วของไหลจะหาได้จากค่าของความดันที่คำนวณ โดยใช้ทฤษฎีการไหลแบบอัดตัวได้ และการไหลแบบอัดตัวไม่ได้

สิ่งที่ควรทราบ

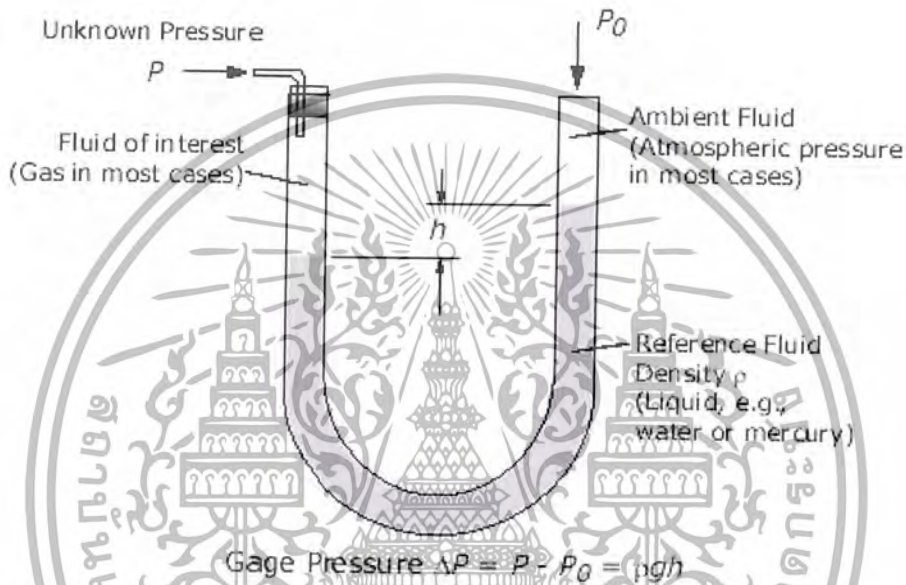
- พิโทห์ ทิวน์ โครงสร้างไม่ซับซ้อน
- ราคาไม่สูงมาก
- ไม่จำเป็นต้องมีการ калиเบรต เพราะเป็นอุปกรณ์ทดลองที่อาศัยหลักกลศาสตร์
- เกิดความดันลด (Pressure drop) เนื่องจากอุปกรณ์เล็กน้อยขณะทำการวัด
- ต้องการรูทางเข้าสำหรับอุปกรณ์เล็กมากเพื่อทำการวัด ไม่ควรเจาะรูให้ใหญ่มากนักจะมีผลกระทบต่อผลการวัดได้
- ความแม่นยำและความละเอียดของค่าที่ได้จริง ไม่เพียงพอกับการทดลองบางชนิด
- อุปกรณ์ช่วงที่เป็นหลอดควรอยู่ในแนวเดียวกับทิศทางการไหลเพื่อผลที่ถูกต้องหากเกิดการเอียงออกหรือเอียงเข้าต้องไม่เกิน  $\pm 5^\circ$



รูปที่ 2.9 พิโทห์ ทิวน์ชนิดที่ใช้ในการทดลอง

## 2.8 มานอมิเตอร์

เป็นอุปกรณ์อ่านค่าความดันโดยจะเชื่อมต่อมาจาก พิโทท์ ทิวบ์จะอ่านค่าจากระดับน้ำที่ขึ้นลง เนื่องจากความดันโดยมีสเกลเทียบค่าที่ได้จะมีหน่วยเป็น มิลลิเมตรน้ำ ( $mmH_2O$ )



รูปที่ 2.10 รูปอธิบายมานอมิเตอร์

## 2.9 ฮอตไวร์ อานีโมมิเตอร์

เป็นอุปกรณ์วัดความเร็วของของไหลที่มีความแม่นยำสูง ที่แกนของอานีโมมิเตอร์ (anemometer) นั้นมีลวดร้อนซึ่งอยู่ในลักษณะที่เห็นได้ชัด ความร้อนได้ถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยของไหล หรืออีกนัยหนึ่งคือ การสูญเสียความร้อนไปให้กับการเคลื่อนที่ของของไหลคือฟังก์ชันของความเร็วของการไหล

V  
Hot-wire made by  
Platinum or Tungsten

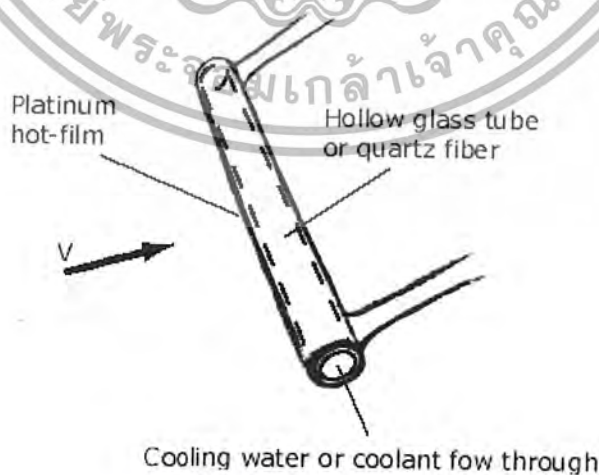


Typical Hot-Wire Anemometer

รูปที่ 2.11 ฮอตไวร์ อานีโมมิเตอร์

ซึ่ง อานีโมมิเตอร์ จะทำการวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของลวด ภายใต้กระแสการไหลที่คงที่ ลวด อานีโมมิเตอร์ ทำมาจาก แพลตินัม หรือทังสเตนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง  $4-10\ \mu\text{m}$  ไมโครเมตร และมีความยาว  $1\text{mm}$  มิลลิเมตร

เนื่องจากขนาดที่เล็กมากของลวดซึ่งประะบางจึงเหมาะกับการทดสอบกับกระแสของของไหลที่สะอาดเท่านั้น ในกรณีที่ใช้ทดสอบกับกระแสของของเหลวหรือแก๊สบางชนิดที่มีฝุ่นผงด้วยควรมีวัสดุห่อหุ้มที่เป็น ควอตซ์ไฟเบอร์ (quartz fiber) หรือหลอดแก้วที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $25-150\text{mm}$  มิลลิเมตร มาห่อหุ้ม ดังรูป



รูปที่ 2.12 ลักษณะการห่อหุ้มฮอตไวร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### สิ่งที่ควรทราบ

- มีลักษณะที่เปราะบางควรใช้ทดลองกับกระแสของไหลที่สะอาดเท่านั้น
- ต้องการ การคาลิเบรต(recalibration) บ่อยครั้งเนื่องจากการเกาะตัวของฝุ่นผง (เว้นแต่ว่ากระแสของไหลนั้นสะอาดจริงๆ)
- มีราคาสูง



รูปที่ 2.13 ฮอตไวร์ อานีโมมิเตอร์ ที่ใช้ในการทดลอง

### 2.10 เพาเวอร์ ซัพพลาย

เป็นอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้าแก่มอเตอร์ไบพัด ซึ่งเราสามารถปรับความเร็วรอบของไบพัดได้จากการปรับโวลท์ที่เพาเวอร์ ซัพพลาย ซึ่งเครื่องเพาเวอร์ ซัพพลายที่ใช้จะแสดงผลเป็นแบบสเกลซึ่งจะสามารถปรับได้ทั้งกระแสไฟฟ้าและโวลท์



รูปที่ 2.14 เพาเวอร์ซัพพลายชนิด สเกลที่ใช้ทดลอง

### 2.11 เครื่องวัดความเร็วรอบ

อุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วรอบของใบพัด โดยในที่นี้ใช้เครื่องวัดความเร็วรอบแบบใช้แสงแสดงผลแบบดิจิตอล มีหน่วยเป็น รอบต่อวินาทีRPM ซึ่งเครื่องนี้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จำเป็นต้องได้รับการ คาลิเบรต อย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 2.15 เครื่องวัดความเร็วรอบชนิดใช้แสง

## 2.12 ตรีคอมโพเนนท์ หรือ Three Component Balance

เป็นอุปกรณ์ที่นำมาประยุกต์ใช้ในการวัดค่าแรงจากมอเตอร์เพื่อนำมาหาค่าประสิทธิภาพใบพัด



รูปที่ 2.16 ตรีคอมโพเนนท์

ตรีคอมโพเนนท์ (Three Component Balance) ทำจากอลูมิเนียมอัลลอยด์เป็นหลัก และโครงหลักประกอบด้วยเมาน์ดิงเพลต (mounting plate) ซึ่งจะเป็นตัวช่วยป้องกันเวอร์คิง เซกชัน (working section) ของอุโมงค์ลม และฟอยซ์เพลต (force plate) สามเหลี่ยม เมาน์ดิงเพลต และ ฟอยซ์เพลต ถูกเชื่อมต่อกับขารองรับ 3 ขา ซึ่งจะอยู่ที่มุมของ ฟอยซ์เพลต แต่ละขาถูกยึดโดยสเฟียร์ริคัล ยูนิเวอร์แซล จอยท์ (spherical universal joints) ซึ่งจะทำให้ ฟอยซ์เพลตเคลื่อนที่ได้เพียงแนวขนานกับ เมาน์ดิงเพลต ขณะที่สามารถหมุนได้อย่างอิสระรอบแกนในแนวราบ ดังนั้นจึงมี 3 ดีกรี ออฟ ฟรีดอม โดยก้านเหล็กที่ต่อเชื่อมกับเคสมอเตอร์จะถูกวางพาดกับ เมาน์ดิงเพลต หรือแท่งเหล็กทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตรซึ่งถูกสอดเข้าไปในช่องโมเดล ซัพพอร์ต (model support) ที่อยู่ใน ฟอยซ์เพลตเพื่อการวัดแรงจากมอเตอร์โดยแรงที่กระทำบน ฟอยซ์เพลต จะถ่ายทอดผ่านเคเบิลอ่อน (flexible cable) ไปสเตรนเกจ โหลด เซลล์ (Strain gage Load Cells) ซึ่งสามารถวัดค่าแรงของอัพท์, ลิฟท์และแดรก (aft , lift และ drag force) ได้ตามลำดับ เคเบิลรับแรงแดรก (drag cable) จะวางอยู่ในแนวนอนกระทำผ่านแนวกลางของ โมเดล ซัพพอร์ต ซึ่งในกรณีทดลองนี้จะไม่เกิดแรงแดรกมีเพียงแรงที่เคเบิลรับแรงลิฟท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

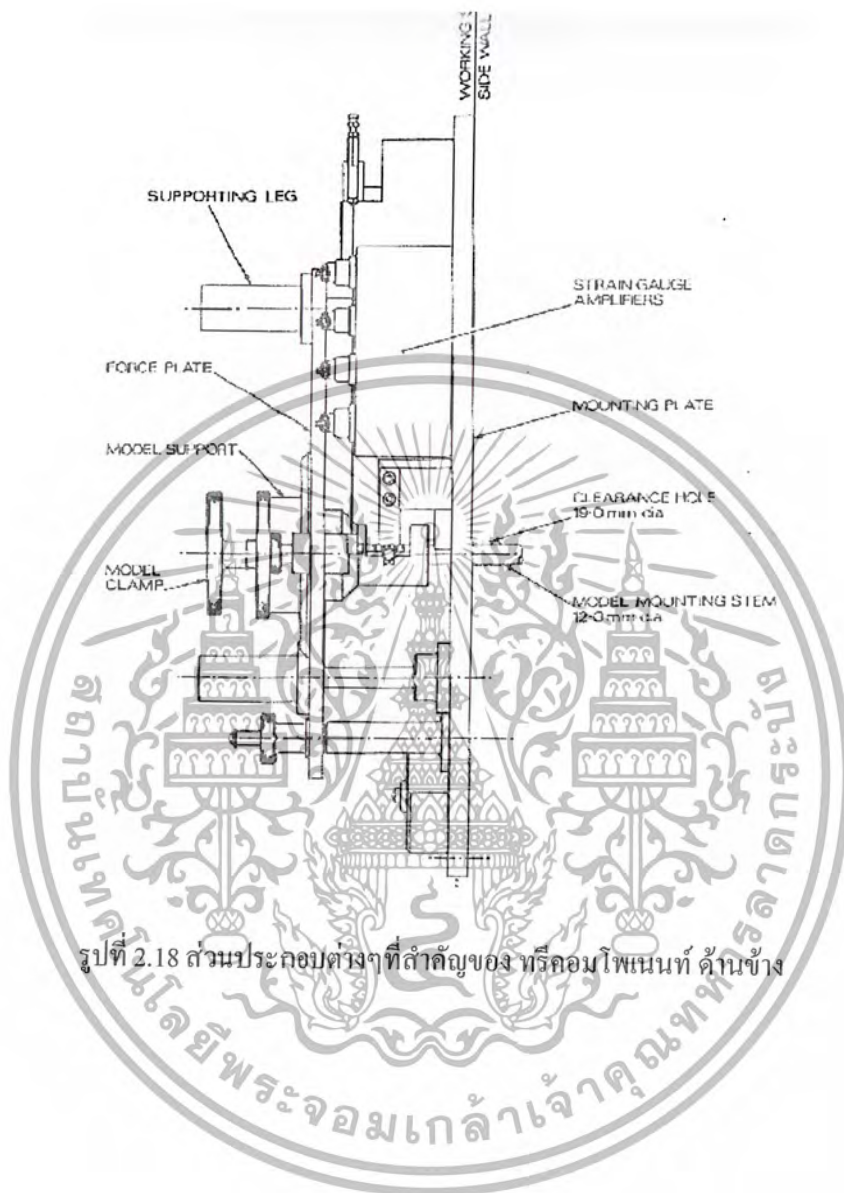
(lift cable) ทั้ง 2 เส้นที่อยู่ในแนวตั้งเท่านั้น ซึ่งจะอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของ โมเดล ชับพอร์ต เป็นระยะทางเท่ากัน และอยู่ในระนาบเดียวกัน

ผลของแต่ละ โหลด เซลล์จากสเตรนเกจ์ แอมพลิไฟเออร์ (strainage amplifier) ที่รองรับด้วย เมาน์ดิง เพลต และด้วยเพราะผ่านจาก เคเบิลอ่อน ไปสู่จอแสดงผลจะได้แรงลัพท์ที่มีหน่วยเป็น นิวตัน



รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบต่างๆที่สำคัญของ ทรีคอมโพเนนท์ ด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 ส่วนประกอบต่างๆที่สำคัญของ ทรานสดิวเซอร์ ด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

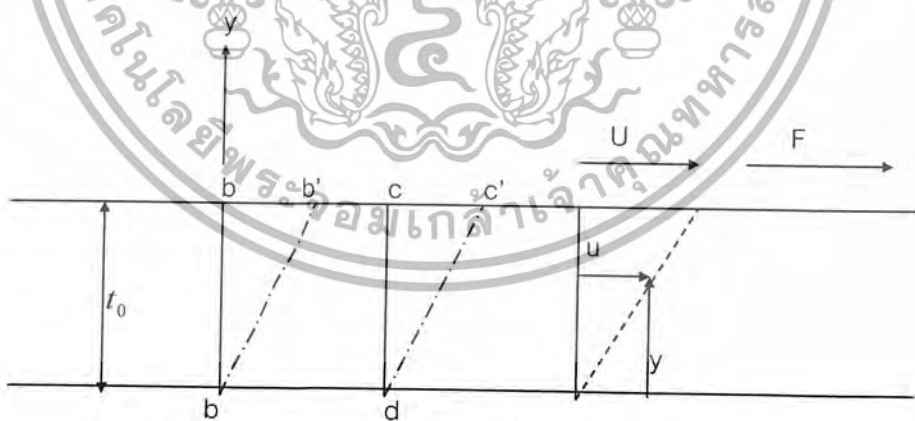
บทที่ 3

แนวคิดพื้นฐานของการไหล

3.1 คำนิยามของการไหล

ของไหล คือ สารที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อย่างต่อเนื่องกันไปภายใต้การกระทำของความเค้นเฉือนหนึ่ง ๆ ทั้งนี้ไม่ว่าความเค้นเฉือนนั้นจะมีค่าน้อยเท่าใดก็ตาม เมื่อพิจารณาแรงเฉือนที่กระทำต่อพื้นผิวหนึ่ง ๆ ก็คือแรงย่อยในแนวสัมผัสกับพื้นผิวนั้น แรงเฉือนนี้หารด้วยพื้นที่ของพื้นผิวจะเป็นความเค้นเฉือนเฉลี่ยซึ่งกระทำทั่วพื้นผิวนั้น สำหรับความเค้นเฉือนที่จุด ๆ คือค่าลิมิต (Limiting Value) ของแรงเฉือนเฉลี่ยต่อพื้นที่ผิวซึ่งขณะนั้นพื้นที่มีขนาดลดลงเป็นจุด

ในรูปที่ 3.1 ของไหลอยู่ระหว่างแผ่นราบคู่ขนานซึ่งมีระยะห่างกันเล็กน้อย ( $Y$ ) โดยแผ่นราบล่างนั้นอยู่กับที่และแผ่นราบบนถูกแรงเฉือน  $F$  กระทำให้เคลื่อนที่ ซึ่งขณะนั้นพบว่าของไหลในบริเวณระหว่างแผ่นราบนี้ถูกกระทำด้วยความเค้นเฉือน  $\frac{F}{A}$  โดยที่  $A$  คือ พื้นที่ของแผ่นราบบนพบว่าเมื่อแรงเฉือน  $F$  กระทำต่อแผ่นราบบนให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง  $U$  จะทำให้ของไหลเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากพื้นที่  $abcd$  ไปสู่ตำแหน่งใหม่ในพื้นที่  $ab'c'd$  ทั้งนี้ไม่ว่าขนาดของแรงเฉือน  $F$  จะมีค่าน้อยเพียงใดก็ตาม



รูปที่ 3.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของของไหลเมื่อมีแรงเฉือน  $F$  กระทำ

กำหนดให้ของไหลที่สัมผัสกับผิวของแผ่นราบมีความเร็วเท่ากับแผ่นราบนั้น (นั่นคือกำหนดให้ว่าไม่มีการลื่นไถลที่ผิวของแผ่นราบ) อนุภาคของไหลที่กำลังเคลื่อนที่ขนานไปกับแผ่นราบจะมีความเร็ว  $u$  ซึ่งเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอตั้งแต่ศูนย์ที่แผ่นราบล่างจนถึง  $U$  ที่แผ่นราบบน อาศัยผลจากการทดลองกับของไหลจริง พบความเค้นเฉือนของของไหลดังกล่าวแปรผัน

โดยตรงกับอัตราความเครียดเฉือน (Fate shearing strain) หรือจะกล่าวได้ว่าแรงเฉือน  $F$  นั้นแปรผันตรงกับ  $A$  และ  $U$  และแปรผกผันกับความหนา  $Y$  ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ คือ

$$F = \mu \frac{AU}{Y} \quad (3.1)$$

โดยที่  $\mu$  คือแฟกเตอร์สัดส่วน (Proportionality factor) ดังนั้นความเค้นเฉือน คือ

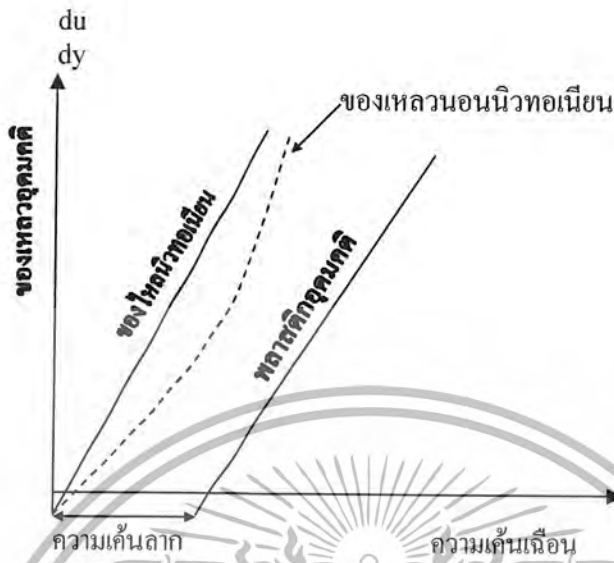
$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{\mu U}{Y} \quad (3.2)$$

อัตราส่วน  $U/Y$  คือ ความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity) ของเส้น  $ab$  หรืออัตราของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงมุมของของไหลซึ่งเราสามารถเขียนอยู่ในเทอมของ  $du/dy$  แทน  $U/Y$  ได้คือ

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (3.3)$$

ในสมการที่ (3.3) บ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงมุมสำหรับกรไหลแบบหนึ่งมิติของของไหลหนึ่ง ๆ และเรียก  $\mu$  ว่าค่าความหนืดเชิงพลวัต (Dynamic Viscosity)

สมการที่ (3.3) นี้เรียกว่า กฎของนิวตันสำหรับความหนืด (Newton's law of viscosity) ของไหลที่มีพฤติกรรมดังสมการที่ (3.3) เราเรียกว่าของไหลนิวตันเนียน (Newtonian fluid)



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

สำหรับของไหลที่มีพฤติกรรมไม่เป็นดังสมการที่ (3.3) เราเรียกว่าของไหลนอนนิวตันเนียน (Non - newtonian fluid) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 จะพบว่าของไหลนิวตันเนียนนั้นให้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\tau$  และ  $du/dy$  อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้น (นั่นคือ  $\mu$  เป็นค่าคงที่ ในสมการที่ (3.3) ) และสำหรับของไหลนอนนิวตันเนียนจะให้ความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear relation) เมื่อพิจารณาเส้นกราฟของพลาสติกพบว่าพลาสติกไม่เป็นของไหลนิวตันเนียน พลาสติกนั้นจะเสียรูปร่างไปเมื่อมีแรงมากระทำที่มีสัดส่วนในปริมาณหนึ่ง แต่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพลาสติกนั้นไม่ต่อเนื่องเมื่อความเค้นเฉือนกระทำต่ำกว่าความเค้นคลาก (Yield shear stress) ของมัน สำหรับก๊าซและของเหลวใส (Thin Liquid) จัดว่าเป็นของไหลนิวตันเนียน ในขณะที่เดียวกันสารไฮโดรคาร์บอนจำพวก thick, long - chained hydrocarbons อาจจัดว่าเป็นของไหลนอนนิวตันเนียน

### 3.1.1 ความหนืด

ความหนืดเป็นคุณสมบัติของของไหลหนึ่ง ๆ ซึ่งใช้ต้านทานต่อแรงเฉือนระหว่างชั้นของไหล ความต้านทานต่อแรงเฉือนของของไหล ขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวและอัตราการถ่ายเทโมเมนตัมของของไหลนั้น ความหนืดของของไหลที่ความดันหนึ่ง ๆ จะเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ โดยที่ความหนืดของก๊าซจะเพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิและความหนืดของของเหลวจะลดลงกับอุณหภูมิ

จากกฎของนิวตันสำหรับความหนืดในสมการที่ (3.3) จะได้

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง  $\mu$  นี้เรียกว่า ความหนืดเชิงพลวัตหรือความหนืดสมบูรณ โดยทั่วไปนิยมระบุความ เป็นหนืดเชิงจลน์ (Kinematic Viscosity) มีสัญลักษณ์  $\nu$  กล่าวคือ

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.4)$$

### 3.1.2 ความหนาแน่น ปริมาตรจำเพาะ น้ำหนักจำเพาะ

ความหนาแน่น ( $\rho$ ) คือ ปริมาตรของมวลสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของของไหลนั้น และมีหน่วยเป็น  $kg/m^3$  สำหรับน้ำที่ความดันมาตรฐาน (760mm - Hg) และ  $4\text{ }^{\circ}C$  นั้นจะ ทำให้  $\rho = 1000\text{ }kg/m^3$

ปริมาตรจำเพาะ ( $\nu$ ) คือ ปริมาตรของของไหลต่อหนึ่งหน่วยมวลของของไหลนั้น หรือ กล่าวได้ว่าปริมาตรจำเพาะเป็นส่วนกลับของความหนาแน่น และมีหน่วยเป็น  $kg/m^3$

$$\nu = \frac{1}{\rho} \quad (3.5)$$

น้ำหนักจำเพาะ ( $\gamma$ ) คือ น้ำหนักของของไหลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และมีหน่วยเป็น  $N/m^3$

$$\gamma = \rho g \quad (3.6)$$

สำหรับน้ำที่มีความดันมาตรฐาน (760mm - Hg) และ  $4\text{ }^{\circ}C$  นั้นจะให้  $\gamma = 1000(9.81) = 9810\text{ }N/m^3$

ความถ่วงจำเพาะ (SG) คืออัตราส่วนของน้ำหนักจำเพาะ (หรือความหนาแน่น) ของของไหลหนึ่ง ๆ ต่อน้ำหนักจำเพาะ (หรือความหนาแน่น) ของน้ำ ที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน

### 3.1.3 ความดันของของไหล

ความดัน คือ แรงในแนวตั้งฉากของของไหลกระทำต่อพื้นที่ 1 ตารางหน่วย สำหรับใน หน่วย SI นั้นจึงกำหนดให้ความดันคือแรงขนาด 1 นิวตันซึ่งกระทำต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร และ ความดันจะมีหน่วยเป็น Pa (ปาสคาล) โดยที่  $1\text{ Pa} = 1\text{ }N/m^2$  หน่วยของความดันอาจจะ

ปรากฏอยู่ในทอมของความสูงสมมูลของลำของไหล ( $h$ ) ซึ่งเป็นไปตามสมการ  $P = \gamma h$  เช่น ความดัน  $10^5$  Pa จะคิดเป็นความสูงน้ำ  $= p/\gamma_w = 10^5/9810 = 10.2$  เมตร

ความดันสมบูรณ์และความดันเกจ โดยทั่วไปแล้วเกจวัดความดันจะอ่านออกมาเป็นผลต่างระหว่างความดันแท้จริงกับความดันบรรยากาศ ( $P_{atm}$ ) ซึ่งเรียกผลต่างความดันนี้ว่า ความดันเกจ ( $P_{atm}$ ) ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาความดันแท้จริงหรือความดันสมบูรณ์ ( $P_{abs}$ ) ได้จาก

$$P_{abs} = P_{gage} + P_{atm} \quad (3.7)$$

ในบางครั้งถ้าความดันแท้จริงค่าความดันบรรยากาศความดันสูญญากาศหาได้จาก

$$P_{vac} = P_{atm} + P_{abs}$$

### 3.2 สมการพื้นฐาน (Basic Equation)

สมการพื้นฐานที่ใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์ของไหลคือ

#### 3.2.1 สมการพื้นฐานสำหรับปริมาตรควบคุม

สมการพื้นฐานสำหรับใช้วิเคราะห์ปริมาตรควบคุมกล่าวว่า "อัตราการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดของคุณสมบัติขึ้นกับปริมาณของระบบหนึ่ง ๆ ( $N$ ) เท่ากับผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติขึ้นกับปริมาณ  $N$  ภายในปริมาตรควบคุมและอัตราการไหลออกโดยสุทธิของคุณสมบัติขึ้นกับปริมาณ  $N$  ที่ข้ามผิวควบคุม" กล่าวคือ

$$\left. \frac{dN}{dt} \right|_{System} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \eta \rho dV + \int_{cs} \eta \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (3.8)$$

ข้อควรจำ สำหรับการใชสมการที่ (3.8) มีอยู่ 2 ประการ

1. ความเร็ว  $\vec{V}$  เป็นปริมาณที่วัดเกี่ยวกับปริมาตรควบคุม
2. ในสมการ (3.8) พิจารณาปริมาตรควบคุมนั้นคงที่เทียบกับพิกัดอ้างอิง  $x, y$  และ  $z$  โดยสนามความเร็วถูกกำหนดให้วัดเทียบกับพิกัดอ้างอิงอันเดียวกัน และเนื่องจากระบบหนึ่ง ๆ นั้นเคลื่อนที่ในสนามความเร็วที่กำหนดนี้ ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติขึ้นกับปริมาณ  $N$  ภายในปริมาตรควบคุมจึงวัดเทียบกับปริมาตรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 กฎการอนุรักษ์มวล

กล่าววามวลสารของระบบหนึ่ง ๆ ย่อมคงที่เสมอในที่นี้  $N = M$  และ  $\eta = m/m = 1$  จากสมการที่ (3.8) จะได้

$$\frac{dM}{dt} \Big|_{\text{System}} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho dV + \int_{cs} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (3.9)$$

ในสมการ (3.9)  $\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho dV$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลภายในปริมาตรควบคุม และ  $\int_{cs} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลไหลออกโดยสุทธิข้ามผิวควบคุม และเรียกสมการที่ (3.9) นี้ว่า สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) สำหรับการไหลยวดยิ่งไม่ได้ จากสมการที่ (3.9) โดย  $\rho$  เป็นค่าคงที่ ดังนั้น

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho dV + \rho \int_{cs} \vec{V} \cdot d\vec{A} &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} [\rho V] + \rho \int_{cs} \vec{V} \cdot d\vec{A} &= 0 \end{aligned}$$

ในที่นี้ปริมาตร  $V$  เป็นค่าคงที่ ดังนั้น  $\frac{\partial}{\partial t} [\rho V] = 0$  จะได้

$$\int_{cs} \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (3.10)$$

ซึ่งเขียนเป็น  
(อัตราการไหลโดยมวลออกจากปริมาตรควบคุม) = (อัตราการไหลโดยมวลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม) (3.11)

สำหรับการไหลแบบคงตัว จากสมการที่ (3.9) โดยที่  $\rho = \rho(x, y, z)$

ดังนั้น 
$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho dV = 0$$

และจะได้ 
$$\int_{cs} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเขียนเป็น

$$(\text{อัตราการไหลโดยมวลออกจากปริมาตรควบคุม}) = (\text{อัตราการไหลโดยมวลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม}) \quad (3.13)$$

3.2.3 กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน กล่าวว่าแรงลัพธ์ที่ไม่เป็นศูนย์กระทำต่อระบบในที่นี้  $N = \vec{G}$  และ  $\eta = \vec{V}$  จากสมการที่ (3.8) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{G}}{dt} \Big|_{\text{System}} &= \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \vec{V} \rho dV + \int_{cs} \vec{V} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \\ \vec{F} = \vec{F}_{cv} &= \vec{F}_b + \vec{F}_s \\ &= \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \vec{V} \rho dV + \int_{cs} \vec{V} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \end{aligned} \quad (3.14)$$

จากสมการที่ (3.14) พบว่า "ผลรวมของแรงทั้งหมด (แรงกระทำที่พื้นผิวและแรงกระทำวัตถุ) ที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมที่ปราศจากความเร่งนั้นเท่ากับผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมภายในปริมาตรควบคุมและอัตราการไหลออกโดยสุทธิของโมเมนตัมข้ามผิวควบคุม"

สำหรับพิกัดฉาก (x,y,z) โดยที่  $\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$  ดังนั้น

$$\begin{aligned} \vec{F}_x &= \vec{F}_{Bx} + \vec{F}_{Sx} \\ &= \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} u \rho dV + \int_{cs} u \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\vec{F}_x = \vec{F}_{Bx} + \vec{F}_{Sx}$$

$$= \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} v \rho dV + \int_{cs} v \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\vec{F}_x &= \vec{F}_{Bz} + \vec{F}_{Sz} \\ &= \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} w \rho dV + \int_{cs} w \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}\end{aligned}\quad (3.17)$$

### 3.2.4 กฎของโมเมนตัม

พิจารณาสมการโมเมนตัมสำหรับปริมาตรควบคุมอยู่กับที่ โดยมีพิกัด (x,y,z) เป็นพิกัดซึ่งอยู่กับที่ แต่สำหรับปริมาตรควบคุมที่เคลื่อนที่นั้นจะเลือกพิกัด (x,y,z) เคลื่อนที่ติดไปกับปริมาตรควบคุมและมีพิกัด XYZ นั้นเป็นพิกัดที่อยู่กับที่ แบ่งกรณีพิจารณาดังต่อไปนี้

ปริมาตรควบคุมเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงเส้น ในที่นี้  $N = \vec{G}_{xyz}$  และ  $\eta = \vec{V}_{xyz}$  จากสมการที่ (3.8) จะได้

$$\begin{aligned}\left. \frac{d\vec{G}}{dt} \right|_{System} &= \vec{F}_{System} - \int_{g} \vec{a}_{rf} \rho dV \\ &= \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \vec{V}_{xyz} \rho dV + \int_{cs} \vec{V}_{xyz} \rho \vec{V}_{xyz} \cdot d\vec{A}\end{aligned}$$

เมื่อที่เวลา  $t_0$  ระบบและปริมาตรควบคุมจะซ้อนทับกัน นั่นคือ

$$\begin{aligned}\vec{F}_{System} - \int_{g} \vec{a}_{rf} \rho dV &= \vec{F}_{cv} - \int_{cv} \vec{a}_{rf} \rho dV \\ &= \vec{F}_B + \vec{F}_s - \int_{cv} \vec{a}_{rf} \rho dV\end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \vec{F}_B + \vec{F}_s - \int_{cv} \vec{a}_{rf} \rho dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \vec{V}_{xyz} \rho dV + \int_{cs} \vec{V}_{xyz} \rho \vec{V}_{xyz} \cdot d\vec{A}\quad (3.18)$$

ในที่นี้  $\vec{a}_{rf}$  คือ ความเร่งเชิงเส้นของพิกัด xyz เทียบกับพิกัด XYZ และ  $\vec{V}_{xyz}$  คือ ความเร็วของของไหลวัดเทียบกับพิกัด xyz

ปริมาตรควบคุมเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ในที่นี้  $\vec{a}_{rf} = 0$  ดังนั้น

$$\vec{F}_B + \vec{F}_s = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \vec{V}_{xyz} \rho dV + \int_{cs} \vec{V}_{xya} \rho \vec{V}_{xyz} d\vec{A}\quad (3.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ กล่าวว่าสำหรับระบบหนึ่ง ๆ เมื่อมีงานหรือ (และ) ความร้อนข้ามขอบเขตของระบบนั้น จะทำให้พลังงานภายในระบบเปลี่ยนแปลง

ในที่นี้กล่าวถึงกฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์สำหรับปริมาตรควบคุมโดยที่  $N = E$  (พลังงานทั้งหมด) และ  $\eta = e$  พลังงานจำเพาะจากสมการที่ (3.8) จะได้

$$(3.20) \quad \frac{d\bar{E}}{dt} \Big|_{\text{System}} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} e\rho dV + \int_{cs} e\rho\vec{V} \cdot d\vec{A}$$

ที่เวลา  $t$  ระบบและปริมาตรควบคุมจะซ้อนทับกัน ดังนั้น

$$\frac{d\bar{G}}{dt} \Big|_{\text{System}} = \dot{Q}_{xyz} - \dot{W}_{sys} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv}$$

$$= \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} e\rho dV + \int_{cv} e\rho\vec{V} \cdot d\vec{A}$$

และจะได้

$$\dot{Q}_{cv} - (\dot{W}_s + \dot{W}_{shear} + \dot{W}_{other}) = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} e\rho dV + \int_{cv} \left[ u + Pv + \frac{V^2}{2} + gz \right] \rho\vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (3.21)$$

ในที่นี้  $\dot{Q}_{cv}$  คืออัตราการถ่ายเทความร้อนข้ามผิวควบคุม  $\dot{W}_s$  คือ อัตราของงานเพลลา  $\dot{W}_{shear}$  คือ อัตราของงานเนื่องจากความเค้นเฉือน  $\dot{W}_{other}$  คือ อัตราของงานอื่น ๆ  $e$  คือ พลังงานจำเพาะภายในปริมาตรควบคุม  $u$  คือพลังงานภายใน และ  $v$  คือปริมาตรจำเพาะ

โดยที่  $\dot{Q}_{cv}$  เข้าสู่ปริมาตรควบคุมมีเครื่องหมายบวกและออกจากปริมาตรควบคุมมีเครื่องหมายลบ และ  $\dot{W}_{cv}$  ทำโดยปริมาตรควบคุมมีเครื่องหมายบวกและใส่ให้กับปริมาตรควบคุมมีเครื่องหมายลบ

3.2.6 กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ กล่าวว่าเอนโทรปีของระบบโดดเดี่ยว (Isolated system) จะไม่ลดลงขณะระบบดำเนินกระบวนการระหว่างสภาวะสมดุล

ในที่นี้  $N = s$  (เอนโทรปีทั้งหมด) และ  $y = s$  (เอนโทรปีจำเพาะ) จากสมการที่ (3.8) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left. \frac{dS}{dt} \right|_{\text{system}} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{cv}} s \rho dV + \int_{\text{cs}} s \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \geq \left. \frac{Q}{T} \right|_{\text{sys}} \quad (3.22)$$

ที่เวลา  $t$  ระบบและปริมาตรควบคุมจะซ้อนทับกัน ดังนั้น

$$\left. \frac{Q}{T} \right|_{\text{sys}} = \frac{C_{\text{cv}}}{T} = \int_{\text{cs}} \frac{1}{T} \left[ \frac{Q}{A} \right] dA$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{cv}} s \rho dV + \int_{\text{cs}} s \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} > \int_{\text{cs}} \frac{1}{T} \left[ \frac{Q}{A} \right] dA \quad (3.23)$$

### 3.3 แบบอย่างของการไหล

การไหลจัดแบ่งออกเป็นหลายแบบอย่างและมีชื่อเรียกซึ่งต่างกันไป ตามแฟกเตอร์ที่ใช้พิจารณา

#### 3.3.1 เมื่อใช้เวลาพิจารณาแบบอย่างของการไหล

การไหลแบบคงตัว (Steady flow) คือ การไหลซึ่งสมบัติของของไหลที่จุดใด ๆ ในของไหลนั้นไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา

การไหลแบบไม่คงตัว (Unsteady flow) คือ การไหลซึ่งสมบัติของของไหลที่จุดใด ๆ ในของไหลนั้นเปลี่ยนแปลงกับเวลา

#### 3.3.2 เมื่อใช้ความเร็วพิจารณาแบบอย่างของการไหล

การไหลแบบสม่ำเสมอ (Uniform flow) คือ การไหลซึ่งความเร็วของของไหลที่ทุก ๆ จุดในของไหลนั้นเท่ากัน (ทั้งขนาดและทิศทาง) ในขณะหนึ่งที่กำหนด

การไหลแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform flow) คือ การไหลซึ่งความเร็วของของไหลเปลี่ยนแปลงจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในของไหลนั้นในขณะหนึ่ง ๆ

#### 3.3.3 เมื่อใช้เส้นสายธารพิจารณาแบบอย่างของการไหล

การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) คือ การไหลซึ่งมีเส้นสายธารจัดตัวกันอย่างเป็นระเบียบ

การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) คือ การไหลซึ่งมีเส้นสายธารจัดตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ

#### 3.3.4 เมื่อใช้ความหนืดพิจารณาแบบอย่างของการไหล

การไหลโดยของไหลอุดมคติ (Ideal fluid flow) คือ การไหลที่ไม่คำนึงถึงผลของความหนืดของของไหลนั้น

การไหลโดยของไหลจริง (Real fluid flow) คือ การไหลที่คำนึงถึงผลของความหนืดของของไหลนั้น

### 3.3.5 เมื่อใช้ความหนาแน่นของของไหลพิจารณาแบบอย่างของการไหล

การไหลแบบยุบตัวไม่ได้ (Incompressible flow) คือ การไหลที่ไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของของไหลนั้น

การไหลแบบยุบตัวได้ (Compressible flow) คือ การไหลที่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของของไหลนั้น

โดยส่วนมากแล้วการไหลของของเหลวจัดว่าเป็นการไหลแบบยุบตัวไม่ได้ และการไหลของก๊าซจัดว่าเป็นการไหลแบบยุบตัวได้ การไหลของก๊าซจัดว่าเป็นการไหลแบบยุบตัวไม่ได้เมื่อการไหลของก๊าซนั้นมีเลขมัค (Mach Number)  $M < V/c$  โดยที่  $v$  คือความเร็วของการไหล และ  $c$  คือความเร็วของเสียงที่สภาวะเดียวกันกับการไหลนั้น

### 3.3.6 เมื่อใช้ผลการหมุนพิจารณาแบบอย่างของการไหล

การไหลแบบหมุนตัว (Rotational flow) คือ การไหลที่อนุภาคของไหลหมุนรอบแกนหนึ่ง ๆ ไปพร้อมกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้น


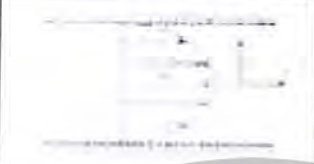

การไหลแบบไม่หมุนตัว (Irrotational flow) คือ การไหลที่อนุภาคของไหลเคลื่อนที่ไปโดยไม่มีการหมุนของอนุภาคนั้น

### 3.3.7 เมื่อใช้จำนวนพิกัดพิจารณาแบบอย่างของการไหล

การไหลในหนึ่งมิติ (One dimensional flow) คือ การไหลที่ความเร็วของของไหลขึ้นอยู่กับหนึ่งพิกัด (Coordinate) เช่น  $\vec{V} = \vec{V}(x)$

การไหลในสองมิติ (Two dimensional flow) คือ การไหลที่ความเร็วของของไหลขึ้นอยู่กับสองพิกัด (Coordinate) เช่น  $\vec{V} = \vec{V}(x, y)$

การไหลในสามมิติ (Three dimensional flow) คือ การไหลที่ความเร็วของของไหลขึ้นอยู่กับสามพิกัด (Coordinate) เช่น  $\vec{V} = \vec{V}(x, y, z)$

ปัญหา	รูป	ชนิด	สนามความเร็ว
- การไหลอยู่ระหว่างแผ่นราบคู่ขนาน		การไหลในหนึ่งมิติ	$U=U(y)$
- การไหลตามท่อกลมยาว		การไหลในหนึ่งมิติ	$U=U(r)$
- การไหลทั่วแผ่นราบ (ชั้นขี้นผิว)		การไหลในสองมิติ	$U=U(x,y)$

รูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างการไหลในแบบต่าง ๆ

### 3.4 เส้นสายธาร (Streamline) เส้นทางไหล (Pathline) และเส้นใยการไหล (Streakline)

เส้นสายธาร คือ เส้นที่ลากสัมผัสกับทิศทางการไหลที่ทุก ๆ จุดในสนามการไหลในขณะใดขณะหนึ่ง และเนื่องจากเส้นสายธารสัมผัสกับความเร็วของการไหลที่ทุก ๆ จุดในสนามการไหลหนึ่ง ๆ ดังนั้นจึงไม่มีการไหลข้ามเส้นสายธารนี้ ที่จุด ๆ หนึ่งบนเส้นสายธารพบว่า

$$\frac{dx}{u} = \frac{dy}{v} = \frac{dz}{w} \quad (3.24)$$

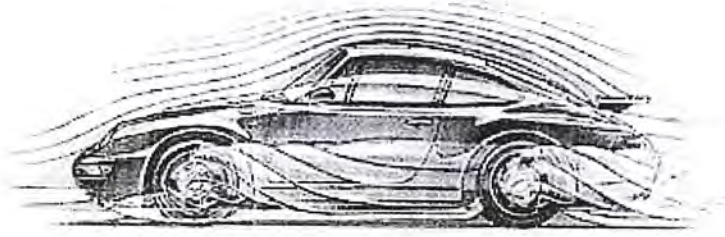
โดยที่  $dx$ ,  $dy$  และ  $dz$  คือ ส่วนที่เปลี่ยน (Increment) ของระยะทางตามเส้นสายธารในทิศทาง  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ตามลำดับ  $u$ ,  $v$  และ  $w$  คือความเร็วย่อยในทิศทาง  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ตามลำดับ

เส้นทางไหล คือ เส้นที่ใช้แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคของไหลในขณะใดขณะหนึ่ง และเมื่ออยู่ในสภาวะคงตัวพบว่าเส้นทางไหลและเส้นสายธารเป็นเส้นเดียวกัน

เส้นใยการไหล คือ เส้นที่ใช้แสดงตำแหน่งของอนุภาคของไหลทั้งหมดที่ผ่านจุดกำหนดหนึ่ง ๆ อันเดียวกันในขณะหนึ่ง

สำหรับในสนามการไหลที่การไหลแบบคงตัวนั้น เส้นสายธาร เส้นทางไหล และเส้นใยการไหลเป็นเส้นเดียวกันทั้งหมด และสำหรับในสนามการไหลที่มีการไหลแบบไม่คงตัวนั้น เส้นสายธาร เส้นทางไหล และเส้นใยการไหลจะเป็นคนละเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 เส้นสายธาร

### 3.5 การไหลของของไหลในอุดมคติ

การไหลอุดมคติ คือ ของไหลแบบขุ่นตัวไม่ได้และปราศจากความหนืด ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของของไหลอุดมคตินี้จะไม่มีความเค้นเฉือนเข้ามาเกี่ยวข้อง ความเค้นตั้งฉากเป็นความเค้นเดียวเท่านั้นที่ใช้การวิเคราะห์ของไหลอุดมคติ ความเค้นตั้งฉากที่กระทำต่อของไหลที่จุดหนึ่ง ๆ นั้นจะมีขนาดเท่ากันในทุก ๆ ทิศทางและมีค่าเป็นลบของความดันทางอุณหพลวัต นั่นคือ  $\sigma_{nn} = -P$

#### 3.5.1 สมการออยเลอร์ (Euler's Equation)

สมการออยเลอร์ คือ สมการโมเมนตัมสำหรับของไหลที่ไม่มีความเสียดทาน นั่นคือความเค้นเฉือน  $\tau = 0$  มีเพียงความเค้นตั้งฉาก  $\sigma_{nn} = -P$

$$\rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} = \rho \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] \quad (3.25)$$

$$\rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} = \rho \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] \quad (3.26)$$

$$\rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} = \rho \left[ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] \quad (3.27)$$

#### 3.5.2 สมการออยเลอร์ในพิกัดตามเส้นสายธาร

พิจารณาสมการการเคลื่อนที่ของของไหลอุดมคติในแนวสัมผัส (s) และแนวตั้งฉาก (n) กับเส้นสายธาร ของไหลมีความเร็วในแนวสัมผัสกับเส้นสายธารเป็น  $\vec{V} = \vec{V}(s, t)$  โดยอาศัยกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันต่อปริมาตรย่อย  $ds \, dn \, dx$  สำหรับการไหลบนระนาบตั้ง yz พบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการออยเลอร์ในแนว  $s$ ;

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial s} - g \frac{\partial Z}{\partial s} = a_s$$

$$= \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial s} \quad (3.28)$$

ในที่นี้  $V = V_s$  คือ ความเร็วสัมพันธ์กับเส้นสายธาร  
สำหรับการไหลแบบคงตัวและไม่คิดน้ำหนักของของไหลนั้นพบว่า

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial s} = -V \frac{\partial V}{\partial s} \quad (3.29)$$

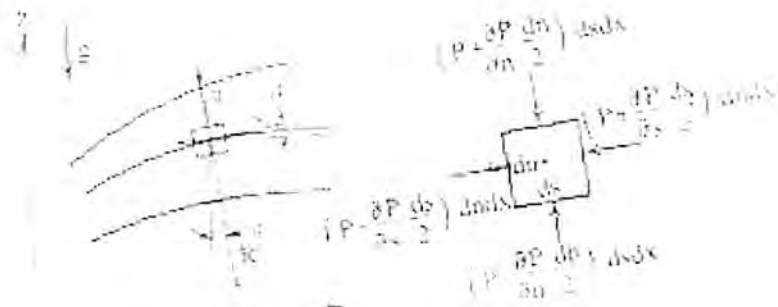
ในสมการที่ (3.29) แสดงให้เห็นว่าสำหรับการไหลตามแนวเส้นสายธารนั้นถ้าความเร็ว  
ของของไหลลดลง ความดันจะเพิ่มขึ้น  
สมการออยเลอร์ในแนว  $n$  ;

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial n} + g \frac{\partial z}{\partial n} = -\frac{V^2}{R} \quad (3.30)$$

สำหรับการไหลแบบคงตัวและอยู่ในแนวระนาบระดับพบว่า

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial n} = \frac{V^2}{R} \quad (3.31)$$

ในสมการที่ (3.31) แสดงให้เห็นว่าความดันจะเพิ่มขึ้นในทิศทางออกจากจุดศูนย์กลาง  
ความโค้งของเส้นสายธาร สำหรับเส้นสายธารที่เป็นเส้นตรง รัศมีความโค้งของเส้นสายธาร  $R$  จะ  
มีค่านันต์ นั่นคือ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความดันในทิศทางตั้งฉากกับเส้นสายธารเหล่านั้น



รูปที่ 3.5 อนุภาคของไหลเคลื่อนที่ตามเส้นสายธาร

### 3.5.3 สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli Equation)

สำหรับการไหลไปตามเส้นสายธารหนึ่ง ๆ ภายใต้การไหลแบบยุบตัวไม่ได้ คงตัว และปราศจากความเสียดทานนั้น จะอยู่ภายใต้สมการการเคลื่อนที่ที่เรียกว่าสมการเบอร์นูลลี ซึ่งพิสูจน์โดยอาศัยการอินทิเกรตสมการออยเลอร์ไปตามเส้นสายธารในการไหลแบบคงตัว สมการออยเลอร์ตามแนวเส้นสายธาร

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial s} - g \frac{\partial z}{\partial s} = V \frac{\partial V}{\partial s}$$

โดยที่  $\frac{\partial P}{\partial s} ds = dP$ ,  $\frac{\partial z}{\partial s} ds = dz$  และ  $\frac{\partial V}{\partial s} ds = dV$  นั้นจะได้

$$-\frac{1}{\rho} dP - g dz = V dV$$

หรือ

$$\frac{dP}{\rho} + g dz + V dV = 0$$

อินทิเกรตสมการข้างต้น จะได้ดังนี้

$$\int \frac{dP}{\rho} + gz + \frac{V^2}{2} = \text{ค่าคงที่} \tag{3.32}$$

สมการในที่นี่เรียกว่า สมการเบอร์นูลลี ซึ่งใช้สำหรับการไหลตามเส้นสายธาร ภายใต้การไหลแบบยุบตัวไม่ได้ คงตัว และปราศจากความเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การไหลแบบไม่สามารถอัดได้ และมีความหนืดภายในท่อ (Internal Incompressible Viscous Flow)

#### 4.1 บทนำ (Introduction)

จากรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงการไหลแบบราบเรียบในท่อกลม ของไหลไหลด้วยความเร็วสม่ำเสมอ ( $U_0$ ) ที่ทางเข้าของท่อ และความเร็วของของไหลที่ผนังจะมีค่าเป็นศูนย์ตลอดความยาวของท่อ : ซึ่งชั้นขอบเขต (boundary layer) จะพัฒนาขึ้นผนังของท่อเนื่องจากผนังท่อจะมีแรงเสียดทานที่ทำให้ของไหลชะลอการไหลลงไปเรื่อย ๆ ตามความยาว ดังนั้น ความเร็วของของไหลบริเวณที่ใกล้ผนังจะยิ่งลดลง

สำหรับของไหล ที่ไม่สามารถอัดได้ (Incompressible) ความเร็วเฉลี่ยที่จุดใด ๆ ตลอดภาคตัดขวาง คือ

$$\bar{V} = \frac{1}{A_{area}} \int u \, dA$$

ซึ่งจะต้องเท่ากับ  $U_0$  (เนื่องจากการอนุรักษ์มวล)

$$\bar{V} = U_0 = \text{ค่าคงที่}$$

ณ ตำแหน่งใด ๆ ที่ห่างจากทางเข้า เนื่องจากมีการพัฒนาขึ้นมาของ boundary layer ตลอดความยาวท่อ และทำให้ของไหลมีลักษณะการไหลเป็นแบบที่มีความหนืด (viscous) มากขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลง โพรไฟล์ของความเร็ว ดังรูป 4.1 เมื่อโพรไฟล์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอีกแล้ว การไหลนั้นจะเป็น “fully developed” และระยะทางจากปากทางเข้าท่อกลมนี้ไปจนถึงตำแหน่งที่เกิด fully developed เรียกว่า ‘entrance length’



รูปที่ 4.1 แสดงการพัฒนากระบวนการไหลในท่อ

ในการไหลแบบราบเรียบ (laminar) และมี entrance length ( $L$ ) ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันของ Reynolds number

$$\frac{L}{D} \approx 0.06 \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} \approx 0.06 \text{Re} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $\bar{V}$  คือ ความเร็วเฉลี่ย

$\mu$  คือ ความหนืดของของไหล

$D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

เนื่องจากถ้าเป็นการไหลแบบราบเรียบ แล้ว  $\text{Re} \leq 2300$

ดังนั้น

$$L \approx 0.06 \text{Re} D \leq (0.06)(2300)D = 138D$$

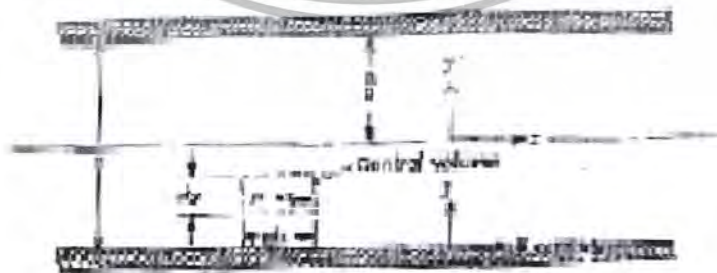
ส่วนที่ 1 fully developed สำหรับการไหลแบบราบเรียบ

4.2 ฟลูอิด ดีเวลอป (fully developed) สำหรับการไหลแบบลามินาร์ (laminar) ระหว่างแผ่นขนานที่ไม่จำกัด (Fully Developed Laminar Flow between Infinite Parallel Plates)

4.2.1 แผ่นทั้งสองนี้อยู่กับที่

พิจารณารูปที่ 4.2 ซึ่งแสดง control volume สำหรับการวิเคราะห์การไหลแบบ laminar ระหว่างแผ่นขนานที่อยู่นิ่งและมีความยาวไม่จำกัดในทิศทาง  $z$  แผ่นขนานทั้งสองนี้อยู่ห่างกัน  $a$  ซึ่งสมบัติต่าง ๆ ของของไหล ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดการไหลในทิศทางนี้ และกำหนดให้ของไหลนี้ไม่สามารถอัด (incompressible) ได้ กำหนดสภาวะขอบเขต (boundary conditions)

$$\begin{aligned} \text{at } y=0 & \quad u=0 \\ y=a & \quad u=0 \end{aligned}$$



รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์ control volume ของการไหลแบบราบเรียบระหว่างแผ่นขนานที่อยู่นิ่งและยาวไม่จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการไหลนี้เป็น fully developed ความเร็วจะไม่เปลี่ยนแปลงไปกับ  $x$  แต่จะขึ้นกับ  $y$  เท่านั้น ดังนั้น

$$u = u(y)$$

นั่นคือ

$$V = w = 0$$

กำหนด control volume ที่มีขนาด  $dV = dx dy dz$

สมการพื้นฐาน

$$F_{Sx} + F_{Bx} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho u dV + \int_{CS} \rho u \vec{V} \cdot d\vec{A}$$

(4.19a)

ข้อกำหนด

- 1) การไหลคงที่
- 2) การไหลแบบ fully developed
- 3)  $F_{Bx} = 0$

สำหรับการไหลแบบ fully developed พลิกซ์ของโมเมนตัมสุทธิที่ผ่าน control surface จะเป็นศูนย์ (นั่นคือไม่มีพลิกซ์โมเมนตัมสะสมอยู่ใน control volume) นั่นคือ จากสมการ 4.19a จะได้ว่า

$$F_{Sx} = 0 \quad (4.2)$$

ขั้นตอนต่อไปจะพิจารณาผลรวมของแรงที่กระทำบน control volume ในทิศทาง  $x$  เนื่องจาก normal forces (ได้แก่ แรงความดัน) ที่กระทำทางด้านซ้ายและทางด้านขวาของลูกบาศก์ รวมทั้ง tangential force (ได้แก่ แรงเฉือน) กระทำที่ด้านบนและด้านล่างของลูกบาศก์

ถ้าความดันที่กึ่งกลางของ control volume คือ  $p$  ดังนั้น แรงความดันที่กระทำทางด้านพื้นผิวด้านซ้ายจะเป็น

$$\left( p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) dy dz$$

และทางด้านขวา

$$-\left( p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) dy dz$$

ความเค้นเฉือนที่กึ่งกลางของ control volume คือ  $\tau_{yx}$  ดังนั้นแรงเฉือน (shear force) ที่ก้นของลูกบาศก์คือ

$$-\left( \tau_{yx} - \frac{d\tau_{yx}}{dy} \frac{dy}{2} \right) dx dz$$

และแรงเฉือนที่ด้านบนคือ

$$\left( \tau_{yx} + \frac{d\tau_{yx}}{dy} \frac{dy}{2} \right) dx dz$$

แทนค่าลงในสมการที่ 4.2 จะได้ว่า

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{d\tau_{yx}}{dy} = 0$$

$$\frac{d\tau_{yx}}{dy} = \frac{\partial p}{\partial x}$$

(4.3)

สมการนี้แสดงให้เห็นว่า ความเค้นเฉือนจะแปรตาม  $y$  ในลักษณะเชิงเส้น และเนื่องจากของไหล Newtonian

ดังนั้น

$$\tau_{yx} = \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)y + c_1$$

$$\tau_{yx} = \mu \frac{du}{dy}$$

$$\mu \frac{du}{dy} = \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)y + c_1$$

$$u = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)y^2 + \frac{c_1}{\mu}y + c_2$$

จากสภาวะขอบเขต ;  $y = 0, u = 0$  แล้ว  $c_2 = 0$  และ

$y = a, u = 0$  ดังนั้น

$$0 = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)a^2 + \frac{c_1}{\mu}a$$

(4.4)

เพราะฉะนั้น

$$c_1 = -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)a$$

$$\mu = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)y^2 - \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)ay$$

$$\mu = \frac{a^2}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right) \left[ \left(\frac{y}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{a}\right) \right] \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ 4.5 เป็นโพธิ์ไฟล์ ของความเร็วสำหรับกรณีนี้

1. การกระจายของความเค้นเฉือน

จาก 
$$\tau_{yx} = \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)y + c_1$$

$$\tau_{yx} = \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)y - \frac{1}{2}\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)a = a\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)\left[\frac{y}{a} - \frac{1}{2}\right] \quad (4.6a)$$

2. อัตราการไหลโดยปริมาตร

จาก 
$$Q = \int_A \vec{V} \cdot d\vec{A}$$

ถ้าความยาวในทิศทาง z คือ  $l$

$$Q = \int_0^a uldy$$

$$\frac{Q}{l} = \int_0^a \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right) (y^2 - ay) dy$$

$$\frac{Q}{l} = -\frac{1}{12\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right) a^3 \quad (4.6b)$$

3. อัตราการไหลในลักษณะที่เป็นฟังก์ชันความดันตก (pressure drop)

เนื่องจาก  $\frac{\partial p}{\partial x}$  เป็นค่าคงที่ ดังนั้น ความดันแปรตาม  $x$  ในลักษณะเชิงเส้น

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{p_2 - p_1}{L} = \frac{-\Delta p}{L}$$

$$\frac{Q}{l} = -\frac{1}{12\mu} \left(\frac{-\Delta p}{L}\right) a^3 = \frac{a^3 \Delta p}{12\mu L} \quad (4.6c)$$

4. ความเร็วเฉลี่ย

เนื่องจาก 
$$\bar{V} = \frac{Q}{A}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$\bar{V} = -\frac{1}{12\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \frac{a^3 l}{la} = -\frac{1}{12\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) a^2$$

(4.6d)

### 5. จุดที่มีความเร็วมากที่สุด

จุดที่มีความเร็วมากที่สุดนั้น จะเป็นจุดที่  $\frac{du}{dy} = 0$  และอาศัยสมการที่ (4.5)

$$\frac{du}{dy} = \frac{a^2}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \left[ \frac{2y}{a^2} - \frac{1}{a} \right]$$

แต่  $\frac{du}{dy}$  ที่ตำแหน่ง  $y = \frac{a}{2}$  ดังนั้น

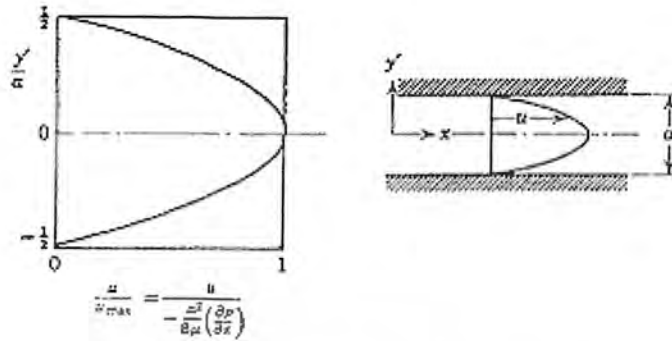
$$u = u_{\max} = -\frac{1}{8\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) a^2 = \frac{3}{2} \bar{V} \quad (4.6e)$$

### 6. การย้ายแกน

ในการพิสูจน์ความสัมพันธ์ข้างต้น จุดเริ่มแรกของพิกัดคือ  $y = 0$  ซึ่งให้เป็นแผ่นด้านล่าง แต่อาจจะทำให้การพิสูจน์ง่ายขึ้นได้ ถ้ากำหนดพิกัดจุดกำเนิดที่เส้นผ่านกึ่งกลาง (centerline) และสถานะขอบเขต คือ  $u = 0$  ที่  $y = \pm \frac{a}{2}$  ดังนั้น โพรไฟล์ของความเร็วในแกน  $x, y'$  จะหาได้จากการแทน  $y = y' + \frac{a}{2}$  ลงในสมการ 4.5 ซึ่งจะได้ว่า

$$u = \frac{a^2}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \left[ \left( \frac{y'}{a} \right)^2 - \left( \frac{1}{4} \right) \right] \quad (4.7)$$

ซึ่งจะได้สมการพาราโบลา ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงโพรไฟล์ของความเร็วสำหรับ fully developed ในการไหลแบบราบเรียบระหว่างแผ่นขนานที่มีความยาวไม่จำกัด

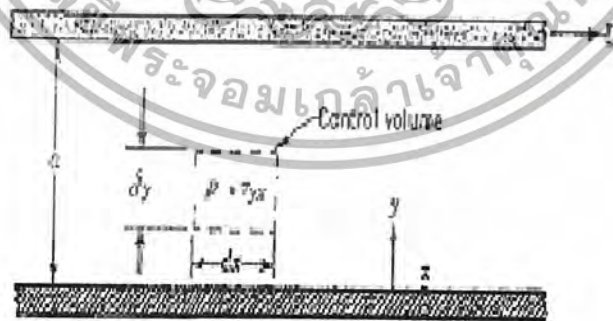
4.2.2 แผ่นด้านบนมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่,  $U$

กรณีการไหลแบบราบเรียบ กรณีที่สองนี้ พิจารณาจากรูปที่ 4.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่า แผ่นด้านบนมีการเคลื่อนที่ไปทางขวาด้วยความเร็วคงที่ ( $U$ ) นั่นคือ boundary condition จะเปลี่ยนไปดังนี้

$$\begin{aligned} u &= 0 & \text{ที่} & \quad y = 0 \\ u &= U & \text{ที่} & \quad y = a \end{aligned}$$

เนื่องจากมีเพียงสภาวะขอบเขตเท่านั้นที่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นสามารถอ้างอิงสมการ 4.4 ได้

$$u = \frac{1}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) y^2 + \frac{c_1}{\mu} y + c_2 \tag{4.4}$$



รูปที่ 4.4 control volume สำหรับการวิเคราะห์ การไหลแบบราบเรียบระหว่างแผ่นขนานที่มีความยาวไม่จำกัด และแผ่นด้านบนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่

ที่  $y = 0, u = 0$  ดังนั้น  $c_2 = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y = a, \quad u = U \quad \text{ดังนั้น} \quad u = \frac{1}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) a^2 + \frac{c_1}{\mu} a$$

$$c_1 = \frac{U\mu}{a} - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) a$$

ดังนั้น

$$u = \frac{1}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) y^2 + \frac{Uy}{a} - \frac{1}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) ay$$

$$u = \frac{Uy}{a} + \frac{a^2}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \left[ \left( \frac{y}{a} \right)^2 - \left( \frac{y}{a} \right) \right] \quad (4.8)$$

ก. การกระจายของความเค้นเฉือน

เนื่องจาก  $\tau_{yx} = \mu \frac{du}{dy}$

$$\text{ดังนั้น} \quad \tau_{yx} = \mu \frac{U}{a} + \frac{a^2}{2} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \left[ \frac{2y}{a^2} - \frac{1}{a} \right] = \mu \frac{U}{a} + a \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \left[ \frac{y}{a} - \frac{1}{2} \right] \quad (4.9a)$$

ข. อัตราการไหลโดยปริมาตร

เนื่องจาก  $Q = \int \vec{V} \cdot d\vec{A}$  โดย  $l$  คือความลึกในทิศทาง  $z$

$$Q = \int_0^a u l dy$$

$$\text{นั่นคือ} \quad \frac{Q}{l} = \int_0^a \left[ \frac{Uy}{a} + \frac{1}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) (y^2 - ay) \right] dy$$

$$\frac{Q}{l} = \frac{Ua}{2} - \frac{1}{12\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) a^3 \quad (4.9b)$$

ค. ความเร็วเฉลี่ย

$$\bar{V} = \frac{Q}{A} = \frac{U}{2} - \frac{1}{12\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) a^2 \quad (4.9c)$$

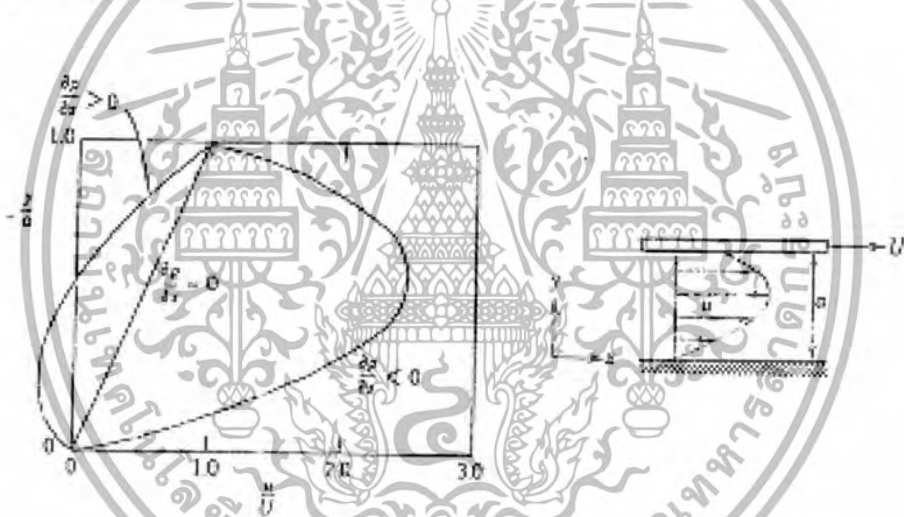
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง. จุดที่มีความเร็วมากที่สุด

จาก 
$$\frac{du}{dy} = \frac{U}{a} + \frac{a^2}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \left[ \frac{2y}{a^2} - \frac{1}{a} \right] = \frac{U}{a} + \frac{a}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \left[ 2 \left( \frac{y}{a} \right) - 1 \right]$$

เนื่องจาก  $\frac{du}{dy} = 0$  ที่  $y = \frac{a}{2} - \frac{U/a}{(1/\mu)(\partial p/\partial x)}$

จะเห็นว่าจุดที่ความเร็วสูงสุด จะไม่ใช่จุดบนเส้นผ่านกึ่งกลางท่อ และสมการ 4.8 ก็จะไม่บอกให้ทราบว่าโปรไฟล์ ของความเร็วจะเป็นผลรวมกันของโปรไฟล์ที่เป็นเส้นตรง และพาราโบลา ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงการกระจายของความเร็วสำหรับ fully developed ในการไหลแบบราบเรียบ ระหว่างแผ่นขนาน ในขณะที่แผ่นด้านบนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่

#### 4.3 fully developed สำหรับการไหลแบบราบเรียบในท่อ (Fully Developed Laminar Flow in a Pipe)

พิจารณารูปที่ 4.6 ซึ่งจะใช้ volume เล็ก ๆ ในการพิจารณา control volume นี้มีความยาว  $dx$  และความหนา  $dr$  ซึ่งระบบของ control volume นี้เป็นระบบพิกัดทรงกระบอก เมื่อพิจารณา fully developed สำหรับการไหลคงที่ ในทิศทาง  $x$  สมการ 4.19a อาจเขียนให้อยู่ในรูปของ

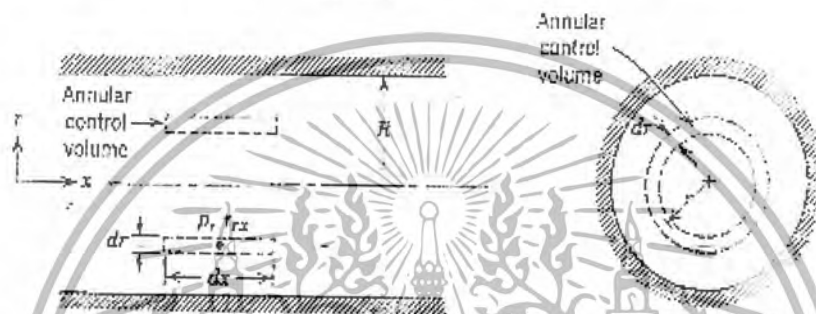
$$F_{sx} = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าความดันที่กึ่งกลางของวงแหวนทรงกระบอก (annular) คือ  $p$  ดังนั้นแรงดันทางปลายด้านซ้าย

คือ 
$$\left( p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) 2\pi r dr$$

และทางด้านขวา 
$$-\left( p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) 2\pi r dr$$



รูปที่ 4.6 แสดงการวิเคราะห์ control volume ของ fully developed สำหรับการไหลแบบราบเรียบในท่อ

ถ้าความเค้นเฉือนที่กึ่งกลางของวงแหวนทรงกระบอก คือ  $\tau_{rx}$  ดังนั้นแรงเฉือนภายในพื้นผิวทรงกระบอก คือ

$$-\left( \tau_{rx} - \frac{d\tau_{rx}}{dr} \frac{dr}{2} \right) 2\pi \left( r - \frac{dr}{2} \right) dx$$

และแรงเฉือนด้านนอก

$$\left( \tau_{rx} + \frac{d\tau_{rx}}{dr} \frac{dr}{2} \right) 2\pi \left( r + \frac{dr}{2} \right) dx$$

นั่นคือ

$$F_{sx} = -\frac{\partial p}{\partial x} 2\pi r dr dx + \tau_{rx} 2\pi r dx + \frac{d\tau_{rx}}{dr} 2\pi r dr dx = 0$$

หารตลอดทั้งสมการด้วย  $2\pi r dr dx$  และจัดรูปสมการ

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\tau_{rx}}{r} + \frac{d\tau_{rx}}{dr} - \frac{1}{r} \frac{d(r\tau_{rx})}{dr} \quad (4.10)$$

แต่

$$\frac{1}{r} \frac{d(r\tau_{rx})}{dr} = \frac{\partial p}{\partial x} = \text{ค่าคงที่}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือ

$$\frac{d(r\tau_{rx})}{dr} = r \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$r\tau_{rx} = \frac{r^2}{2} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) + c_1$$

$$\tau_{rx} = \frac{r}{2} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) + c_1$$

เนื่องจาก  $\tau_{rx} = \mu \frac{du}{dr}$ 

$$\mu \frac{du}{dr} = \frac{r}{2} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{c_1}{r}$$

และ

$$u = \frac{r^2}{4\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{c_1}{\mu} \ln r + c_2 \quad (4.11)$$

BC 1 ;  $u = 0$  at  $r = R$ 

แม้จะไม่ทราบความเร็วของของไหลที่ centerline แต่เนื่องจากความเร็วจะถูกจำกัดไว้ที่  $r = 0$  ทั้งสมการจะเป็นจริงได้ ก็ต่อเมื่อ  $c_1 = 0$  ดังนั้น

$$u = \frac{r^2}{4\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) + c_2$$

จาก BC 1 ;

$$0 = \frac{R^2}{4\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) + c_2$$

$$c_2 = -\frac{R^2}{4\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right)$$

ดังนั้น

$$u = \frac{1}{4\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) (r^2 - R^2)$$

$$u = -\frac{R^2}{4\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \left( 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right) \quad (4.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก  $u$  ที่ได้ทำให้ได้เทอมต่าง ๆ มาคือ

ก. การกระจายของความเค้นเฉือน

$$\tau_{rx} = \mu \frac{du}{dr} = \frac{r}{2} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (4.13a)$$

ข. อัตราการไหลโดยปริมาตร

$$Q = \int_A \vec{V} \cdot d\vec{A} = \int_0^R u 2\pi r dr$$

$$Q = -\frac{\pi R^4}{8\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (4.13b)$$

ค. อัตราการไหลในลักษณะที่เป็นฟังก์ชันความดัน

เนื่องจาก fully developed  $\frac{\partial p}{\partial x}$  เป็นค่าคงที่

ดังนั้น

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{(p_2 - p_1)}{L} = -\frac{\Delta p}{L}$$

ดังนั้น

$$Q = -\frac{\pi R^4}{8\mu} \left( -\frac{\Delta p}{L} \right) = \frac{\pi \Delta p R^4}{128\mu L} \quad (4.13c)$$

ง. ความเร็วเฉลี่ย ( $\bar{V}$ )

เนื่องจาก

$$\bar{V} = \frac{Q}{A} = -\frac{R^2}{8\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (4.13d)$$

จ. จุดที่ความเร็วมากที่สุด

จุดที่ความเร็วมากที่สุดนั้น จะเป็นจุดที่  $\frac{du}{dr} = 0$

จากสมการที่ 4.2

$$\frac{du}{dr} = \frac{1}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) r$$

จาก  $\frac{du}{dr} = 0$  ที่  $r = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ที่ } r = 0; \quad u = u_{\max} = -\frac{R^2}{4\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 2\bar{V} \quad (4.13e)$$

และการกระจายของความเร็ว (สมการ 4.12) อาจเขียนในรูปของความเร็วที่มากที่สุดได้

$$\frac{u}{U} = 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \quad (4.14)$$

### ส่วนที่ 1 การไหลในท่อ และช่องทางเดิน

ในส่วนนี้ จะแสดงให้เห็นว่าความดันจะเกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระดับ หรือการเปลี่ยนแปลงความเร็ว หรือเนื่องจากการเสียดทาน โดยเฉพาะความเสียดทานที่มีผลทำให้เกิดการสูญเสียความดัน (pressure loss) ซึ่ง ยังอาจจะแบ่งได้เป็น

1. การสูญเสียหลัก (major losses) : เนื่องจากการเสียดทานในระบบท่อที่มีพื้นที่คงที่
2. การสูญเสียรอง (minor losses) : เนื่องจากการไหลผ่านวาล์ว, ท่อโค้ง, ท่องอ, ข้อต่อ ฯลฯ

### 4.4 การกระจายของความเค้นเฉือนใน fully developed ในการไหลในท่อ (Shear Stress Distribution in Fully Developed Pipe Flow)

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า สมการ โมเมนตัมในแกน x จะได้ว่า

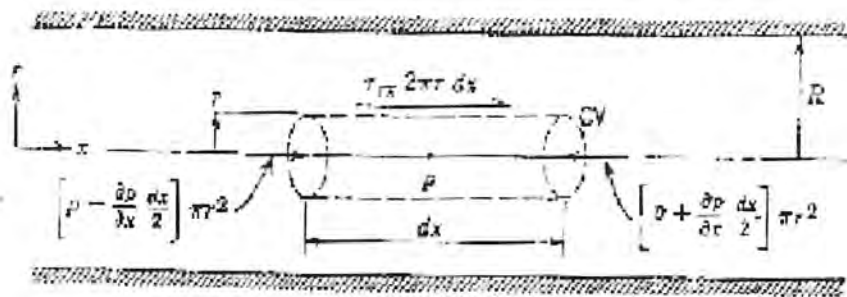
$$F_{Sx} + F_{Bx} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V u \rho dV + \int_{CS} u \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (4.19a)$$

ข้อกำหนด

- 1) ท่อวางอยู่ในแนวราบ ( $F_{Bx} = 0$ )
- 2) การไหลคงที่
- 3) ของไหลไม่สามารถอัดได้
- 4) การไหล fully developed

ดังนั้น

$$F_{Sx} = 0$$



รูปที่ 4.7 แสดง control volume สำหรับ การวิเคราะห์ความเค้นเฉือนในการไหล fully developed ในท่อกลม

จากรูปที่ 4.7 ; 
$$F_{Sx} = \left( p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) \pi r^2 - \left( p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) \pi r^2 + \tau_{rx} 2\pi r dx = 0$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x} dx \pi r^2 + \tau_{rx} 2\pi r dx = 0$$

$$\tau_{rx} = \frac{r}{2} \frac{\partial p}{\partial x}$$

(4.15)

จะเห็นได้ว่า ความเค้นเฉือนของของไหลจะมีการกระจายตามขวางของท่อในเชิงเส้น (เป็นศูนย์ที่ centerline และมากที่สุดที่ผนังท่อ)

ถ้าความเค้นเฉือนที่ผนังท่อ คือ  $\tau_{rx}$  ดังนั้นสมการที่ 4.15 สำหรับความเค้นเฉือนที่ผนังท่อ คือ

$$\tau_{rx} = -[\tau_{rx}]_{r=R} = -\frac{R}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (4.16)$$

สมการที่ 4.16 ใช้ได้ในการไหล fully developed ทั้งการไหลแบบราบเรียบ และปั่นป่วนในท่อ

ในการไหลแบบปั่นป่วนนั้นความสัมพันธ์ระหว่างสนามความเค้นเฉือน และสนามความเค้นเฉื่อยจะซับซ้อนมาก โดย

$$\tau = \mu \frac{d\bar{u}}{dy} - \rho \overline{u^1 v^1} \quad (4.17)$$

ซึ่ง  $y$  คือ ระยะทางจากผนังท่อไปยังตำแหน่งใด ๆ

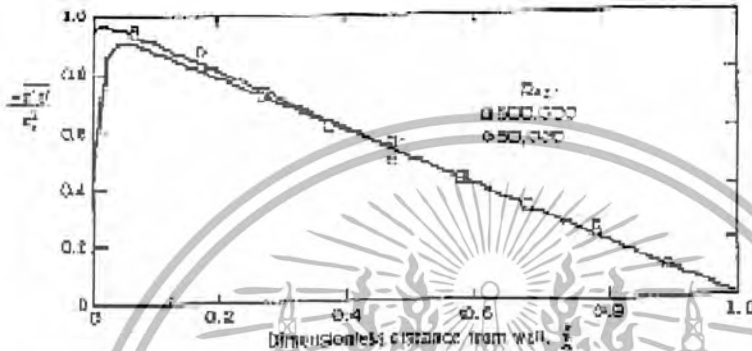
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\bar{u}$  คือ ความเร็วเฉลี่ย

$\bar{u}'$  และ  $\bar{V}'$  คือ องค์ประกอบของความเร็วที่ไม่แน่นอนในทิศทาง  $y$  และ  $x$  ตามลำดับ

$\overline{u'V'}$  คือ เวลาเฉลี่ยของการคูณของ  $u'$  และ  $V'$

และเทอม  $\overline{\rho u'V'}$  เรียกว่า 'Reynolds stress' ซึ่งถ้าหารตลอดสมการ 4.17 ด้วย  $\rho$  จะได้ว่า



รูปที่ 4.8 กราฟแสดง Reynolds stress สำหรับ fully developed ในการไหลแบบปั่นป่วนในท่อ

เทอม  $\frac{\tau}{\rho}$  จะมีหน่วยเป็น ความเร็วยกกำลังสอง ดังนั้น  $\left(\frac{\tau_w}{\rho}\right)^{1/2}$  จึงถูกเรียกว่า 'friction velocity'

และมีสัญลักษณ์  $u_0$  ในรูปที่ 4.8 เป็นการทดลองวัด ส่วน fully developed turbulent สำหรับการไหลในท่อ โดยกำหนด  $ReU = \frac{UD}{\nu}$  ซึ่ง  $U$  คือ ความเร็วที่ตำแหน่ง centerline จะเห็นได้ว่า turbulent stress จะมีค่าเป็นศูนย์ที่ผนัง เนื่องจากที่ผนังของไหลจะไม่ไหล ดังนั้นเมื่ออ้าง

สมการที่ 4.17

$$\tau_w = \mu \left( \frac{d\bar{u}}{dy} \right)_{y=0} \quad (4.18)$$

#### 4.5 Profile ของความเร็ว turbulent สำหรับ fully developed ในการไหลในท่อ (Turbulent Velocity Profiles in Fully Developed Pipe Flow)

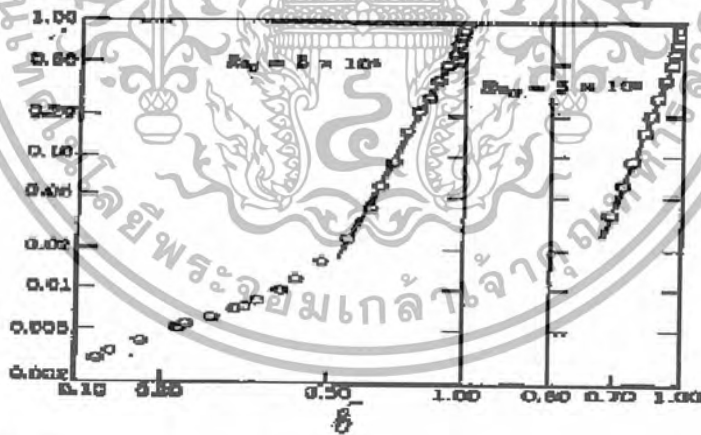
โปรไฟล์ของความเร็วสำหรับการไหล fully developed ในท่อที่เรียบ จะเป็นไปดังรูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{\bar{u}}{u_0}$  กับ  $\log(yu_0/\nu)$  จะเห็นได้ว่า ณ บริเวณใกล้กับผนัง viscous shear จะแสดงอิทธิพลออกมามากกว่า และโปรไฟล์ของความเร็วสำหรับความหนืดเชิงเส้น (linear viscous) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u^+ = \frac{\bar{u}}{u_0} = \frac{yu_0}{\nu} = y^+ \quad (4.19)$$

โดยที่  $y$  คือ ระยะทางจากตำแหน่งของผนัง ( $y = R - r$ ;  $R$  คือ รัศมีท่อ) และ  $\bar{u}$  คือ ความเร็วเฉลี่ย สมการที่ 4.19 จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อ  $0 \leq y^+ \leq 5$  โดยบริเวณนี้จะเรียกว่า viscous sublayer

รูปที่ 4.9 โพรไฟล์ของความเร็วในช่วงปั่นป่วน สำหรับ fully developed ในท่อเรียบ



รูปที่ 4.10 โพรไฟล์ของความเร็วจาก power-law สำหรับ fully developed สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในท่อเรียบ

ในขณะที่บริเวณที่ซึ่ง มีความหนืด (viscous) และ มีความปั่นป่วน (turbulent) แสดงออกมาทั้งคู่ ทำให้โพรไฟล์ของความเร็วจะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\bar{u}}{u_0} = 2.5 \ln \frac{yu_0}{\nu} + 5.0 \quad (4.20)$$

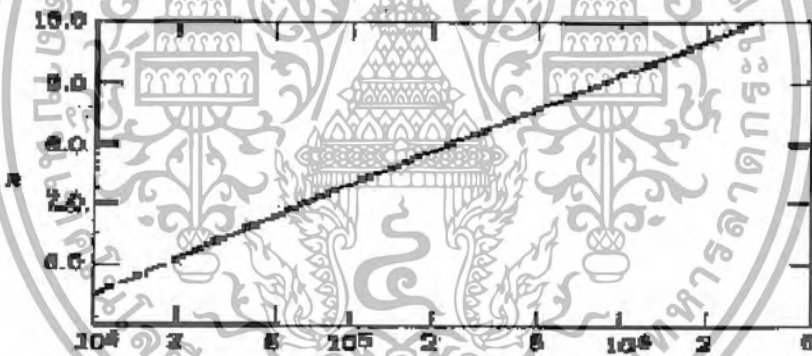
ส่วนบริเวณกึ่งกลาง (turbulent shear แสดงอิทธิพลมากที่สุด) สมการที่สอดคล้องกับข้อมูล คือ

$$\frac{U - \bar{u}}{u_0} = 2.5 \ln \frac{R}{y} \quad (4.21)$$

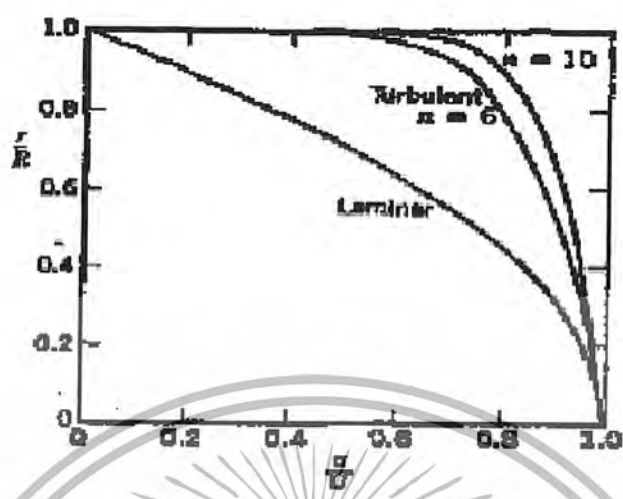
โดย  $U$  คือ ความเร็วของของไหล ณ ตำแหน่ง centerline

สำหรับโปรไฟล์ ของความเร็วสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในท่อเรียบ อาจแสดงได้ในรูปของสมการ power-law

$$\frac{\bar{u}}{U} = \left(\frac{y}{R}\right)^n = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^n \quad (4.22)$$



รูปที่ 4.11 แสดงกำลังของ power-law สำหรับ fully developed ในการไหลแบบปั่นป่วนในท่อเรียบ



รูปที่ 4.12 แสดง โพรไฟล์ของความเร็วสำหรับ fully developed ของการไหลในท่อ ซึ่งกำลัง ( $n$ ) จะแปรตาม  $Re$  ในรูปที่ 4.10 เป็นข้อมูลเมื่อกำหนด  $\ln \frac{y}{R}$  และ  $\ln \frac{u}{U}$  และความชันของเส้นตรงจะเป็นตัวบอกค่าของ  $n$

อย่างไรก็ตาม power-law profile ไม่สามารถใช้ได้กับบริเวณที่ใกล้กับผนัง ( $\frac{y}{R} < 0.04$ ) เนื่องจากสมการนี้จะให้ค่ากรเดียนของความเร็วมีค่าเป็นอนันต์ที่ผนังท่อ และความสัมพันธ์ระหว่าง  $n$  กับ  $Re$  ณ บริเวณ centerline แสดงในรูปที่ 4.11

เนื่องจากความเร็วเฉลี่ย  $\bar{v} = \frac{Q}{A}$  และ  $Q = \int_A \vec{v} \cdot d\vec{A}$

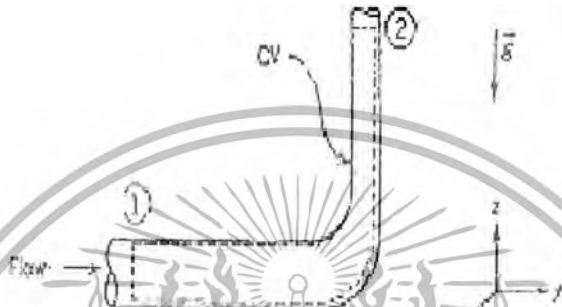
อัตราส่วนของความเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วที่ centerline ( $U$ ) อาจคำนวณได้จาก power-law

$$\frac{\bar{v}}{U} = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \tag{4.23}$$

สมการที่ (4.23) จะเห็นได้ว่า เมื่อ  $n$  จะเพิ่มขึ้น (เนื่องจากการเพิ่ม Reynolds number) จะทำให้อัตราส่วนของความเร็วข้างต้นก็จะเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.12 แสดงถึง โพรไฟล์ของความเร็วสำหรับ fully developed ในการไหลในท่อ

#### 4.6 การพิจารณาพลังงานในการไหลในท่อ (Energy Considerations in Pipe Flow)

พิจารณาจากตัวอย่างของการไหลในระบบท่อ ซึ่งมีท่อโค้งด้วย ดังรูปที่ 4.13 ขอบเขตของ control volume จะกำหนดโดยเส้นประ



รูปที่ 4.13 control volume และพิกัด สำหรับการวิเคราะห์พลังงานของการไหลผ่านท่ออง 90°

สมการพื้นฐาน

$$\dot{Q} - \dot{W}_s - \dot{W}_{shear} - \dot{W}_{other} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} e \rho dV + \int_{CS} (e + pV) \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (4.57)$$

และ

$$e = u + \frac{V^2}{2} + gz$$

สมมติฐาน

1)  $\dot{W}_s = 0, \dot{W}_{other} = 0$

2)  $\dot{W}_{shear} = 0$  (ถึงแม้ว่า ความเค้นเฉือนจะมีที่ผนังของท่อโค้ง นั่นคือความเร็ว

จะเป็นศูนย์ที่ผนัง)

3) การไหลคงที่

4) ของไหล ไม่สามารถอัดได้

5) พลังงานภายใน และความดันสม่ำเสมอตลอดส่วนที่ ① และ ②

ภายใต้ข้อกำหนดนี้

$$\dot{Q} = \dot{m}(u_2 - u_1) + \dot{m} \left( \frac{P_2}{\rho} - \frac{P_1}{\rho} \right) + \dot{m}g(z_2 - z_1) + \int_{A_2} \frac{V_2^2}{2} \rho v_2 dA_2 - \int_{A_1} \frac{V_1^2}{2} \rho v_1 dA_1 \quad (4.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ ในที่นี้ไม่อาจตั้งข้อกำหนดขึ้นมาได้ว่าความเร็วที่สม่ำเสมอที่ส่วนที่ ① และส่วนที่ ② เนื่อง

จาก เป็นที่ทราบอยู่แล้วว่าความเร็วที่แต่ละส่วนใน viscous flow นั้นไม่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตาม อาจจะนำความเร็วเฉลี่ยมาใช้ในสมการที่ (4.24) เพื่อที่จะได้สามารถกำจัดเครื่องหมาย อินทิกรัล ออกไปได้ และเพื่อที่จะทำเช่นนี้ได้จึงต้องนิยามเทอม ‘สัมประสิทธิ์พลังงานจลน์’ (kinematic energy coefficient) ขึ้นมา

#### 4.6.1 สัมประสิทธิ์พลังงานจลน์

โดยสัมประสิทธิ์พลังงานจลน์ ( $\alpha$ ) มีนิยามดังนี้

$$\int_A \frac{V^2}{2} \rho V dA = \alpha \int_A \frac{\bar{V}^2}{2} \rho V dA = \alpha m \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (4.25a)$$

หรือ

$$\alpha = \frac{\int_A \rho V^3 dA}{m \bar{V}^2} \quad (4.25b)$$

สำหรับการไหลแบบราบเรียบในตอนนั้น (ซึ่งมี profile ของความเร็วเป็นดังสมการ 4.12)  $\alpha = 2.0$  สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (โพรไฟล์ของความเร็วค่อนข้างราบเรียบ ดังรูปที่ 4.12) จึงใช้สมการ (4.25b) ร่วมกับสมการ (4.22) และ (4.23) สำหรับการหา  $\alpha$  จะได้ว่า

$$\alpha = \left[ \frac{U}{\bar{V}} \right]^3 \frac{2n}{(3+n)(3+2n)} \quad (4.26)$$

โดยที่  $n = 6$  แล้ว  $\alpha = 1.08$  และ  $n = 10$  แล้ว  $\alpha = 1.03$  รวมทั้งจะเห็นได้ว่า  $n$  เป็นฟังก์ชัน Reynolds number ดังนั้น  $\alpha$  ก็จะเป็นฟังก์ชันกับ Reynolds number ด้วย

#### 4.6.2 Head loss

เมื่อกำหนดเทอม  $\alpha$  ที่กำหนดขึ้นมาก็ให้นำ  $\alpha$  ไปใช้ในสมการที่ (8.24) จะได้ว่า

$$\dot{Q} = \dot{m}(u_2 - u_1) + \dot{m} \left( \frac{P_2}{\rho} - \frac{P_1}{\rho} \right) + \dot{m}g(z_2 - z_1) + \dot{m} \left( \frac{\alpha_2 \bar{V}_2^2}{2} - \frac{\alpha_1 \bar{V}_1^2}{2} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หารตลอดสมการนี้ด้วย อัตราการไหลโดยมวล ดังนั้น

$$\frac{\delta Q}{dm} = u_2 - u_1 + \frac{P_2}{\rho} - \frac{P_1}{\rho} + gz_2 - gz_1 + \frac{\alpha_2 \bar{V}_2^2}{2} - \frac{\alpha_1 \bar{V}_1^2}{2}$$

จัดเทอมใหม่

$$\left( \frac{P_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2} + gz_1 \right) - \left( \frac{P_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2} + gz_2 \right) = (u_2 - u_1) - \frac{\delta Q}{dm} \quad (8.27)$$

ในสมการที่ (4.27) นั้น เทอม  $\left( \frac{P}{\rho} + \alpha \frac{\bar{V}^2}{2} + gz \right)$  จะแสดงให้เห็นคือ พลังงานกลต่อหน่วยมวลที่ ส่วนตัดขวางใด ๆ เทอม  $u_2 - u_1 - \frac{\delta Q}{dm}$  จะเท่ากับ ผลต่างของพลังงานกลต่อหน่วยมวลระหว่าง ส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลที่ 1 ไปเป็นพลังงานความร้อนที่ไม่ต้องการ  $(u_2 - u_1)$  และพลังงานที่สูญเสียไปก็เนื่องจากการถ่ายโอนความร้อน  $\left[ -\frac{\delta Q}{dm} \right]$  ดังนั้น จึงกำหนดกลุ่มของเทอมทั้งหมดนี้ว่าเป็น 'total head loss' ( $h_{lr}$ ) ซึ่ง

$$\left( \frac{P_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2} + gz_1 \right) - \left( \frac{P_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2} + gz_2 \right) = h_{lr} \quad (4.28)$$

#### 4.7 การคำนวณ head loss (Calculation of Head Loss)

total head loss นั้นจะแบ่งออกเป็นองค์ประกอบสององค์ประกอบย่อย ๆ คือ การสูญเสียหลัก (major loss,  $h_l$ ) ซึ่งเกิดเนื่องจากความเสียดทานในการไหลแบบ fully developed ในท่อที่มีพื้นที่ภาคตัดขวางคงที่ และการสูญเสียรอง (minor loss,  $h_{lm}$ ) เนื่องจากทางเข้าข้อต่อหรือการเปลี่ยนแปลงพื้นที่

##### 4.7.1 การสูญเสียหลัก ; friction factor

จากสมการพลังงานที่แสดงในสมการที่ (4.28) สามารถใช้ในการหาการสูญเสียหลักได้ โดยเมื่อกำหนดการไหล fully developed ผ่านท่อที่มีพื้นที่ภาคตัดขวางคงที่ และ  $h_{lm} = 0$  และ  $\alpha_1 (\bar{V}_1^2 / 2) = \alpha_2 (\bar{V}_2^2 / 2)$  สมการที่ (4.28) จะลดเหลือ

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} = g(z_2 - z_1) + h_l \quad (4.29)$$

ถ้าท่อนี้วางในแนวราบ ดังนั้น

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} = \frac{\Delta p}{\rho} = h_l \quad (4.30)$$

นั่นคือ การสูญเสียหลักสามารถเขียนได้ในรูปของ ความดัน สูญเสีย (pressure loss) สำหรับ fully developed ผ่านท่อที่มีพื้นที่ตัดขวางคงที่ และวางในแนวราบ และเนื่องจาก head loss เป็นการเปลี่ยนรูปของพลังงานอื่นเนื่องจาก อิทธิพลของความเสียดทานจากพลังงานกลไปเป็นพลังงานความร้อน ดังนั้น head loss สำหรับการไหล fully developed ในท่อที่มีพื้นที่คงที่จึงขึ้นกับรายละเอียดของการไหลในท่อเท่านั้น ไม่ขึ้นกับการจัดเรียงท่อเลย

ก. การไหลแบบราบเรียบ สำหรับการไหลแบบราบเรียบนั้น ความดันลดลงอาจคำนวณได้จากสมการ (8.13c) ได้

$$\Delta p = \frac{128\mu L Q}{\pi D^4} = 32 \frac{L}{D} \frac{\mu \bar{V}}{D}$$

เมื่อแทนลงในสมการ (8.30)

$$h_p = 32 \frac{L}{D} \frac{\mu \bar{V}}{\rho D} = \left( \frac{64}{\text{Re}} \right) \frac{L \bar{V}^2}{D} \quad (4.31)$$

ข. การไหลแบบปั่นป่วน ในการไหลแบบนี้ไม่อาจสร้างสูตรสำหรับคำนวณความดันลดได้ เช่นเดียวกับกรณีการไหลแบบราบเรียบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยผลจากการทดลอง และใช้การวิเคราะห์หำมิติเพื่อสร้างสหสัมพันธ์ (correlate) สำหรับข้อมูลการทดลอง ซึ่งมีการพิจารณาดังนี้

เนื่องจากความดันลด ( $\Delta p$ ) ขึ้นกับเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $D$ ) ของท่อ ความยาวของท่อ ( $L$ ) ความขรุขระของท่อ ( $e$ ) ความเร็วเฉลี่ยในการไหล ( $\bar{V}$ ) ความหนาแน่นของท่อ ( $\rho$ ) และความหนืดของของไหล ( $\mu$ ) โดย

$$\Delta p = \Delta p(D, L, e, \bar{V}, \rho, \mu)$$

ซึ่งใช้การวิเคราะห์หำมิติ ในตัวอย่างที่ 7.2 จะได้ว่า

$$\frac{\Delta p}{\rho \bar{V}^2} = f\left(\frac{\mu}{\rho \bar{V} D}, \frac{L}{D}, \frac{e}{D}\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก  $\frac{\mu}{\rho \bar{V} D} = \frac{1}{\text{Re}}$  ดังนั้น

$$\frac{\Delta p}{\rho \bar{V}^2} = \phi \left( \text{Re}, \frac{L}{D}, \frac{e}{D} \right)$$

แทนค่าลงในสมการที่ (4.30) 
$$\frac{h_f}{\bar{V}^2} = \phi \left( \text{Re}, \frac{L}{D}, \frac{e}{D} \right)$$

ในการทดลองแสดงให้เห็นว่า head loss แปรผันตาม  $\frac{L}{D}$  ดังนั้น

$$\frac{h_f}{\bar{V}^2} = \frac{L}{D} \phi \left( \text{Re}, \frac{e}{D} \right)$$

และฟังก์ชัน  $\phi_1$  นั้นยอมให้มีการนำค่าคงที่บางเพิ่มในเทอมทางซ้ายของสมการได้ ในที่นี้จะนำ  $\frac{1}{2}$  มาเพิ่มในตัวของเทอมทางด้านซ้ายมือของสมการ เพื่อที่จะให้อยู่ในรูป

$$\frac{h_f}{\frac{1}{2} \bar{V}^2} = \frac{L}{D} \phi_2 \left( \text{Re}, \frac{e}{D} \right)$$

ฟังก์ชันที่ไม่ทราบค่า  $\left[ \phi_2 \left( \text{Re}, \frac{e}{D} \right) \right]$  จะถูกนิยามให้อยู่ในรูปของ friction factor ( $f$ ) นั่นคือ

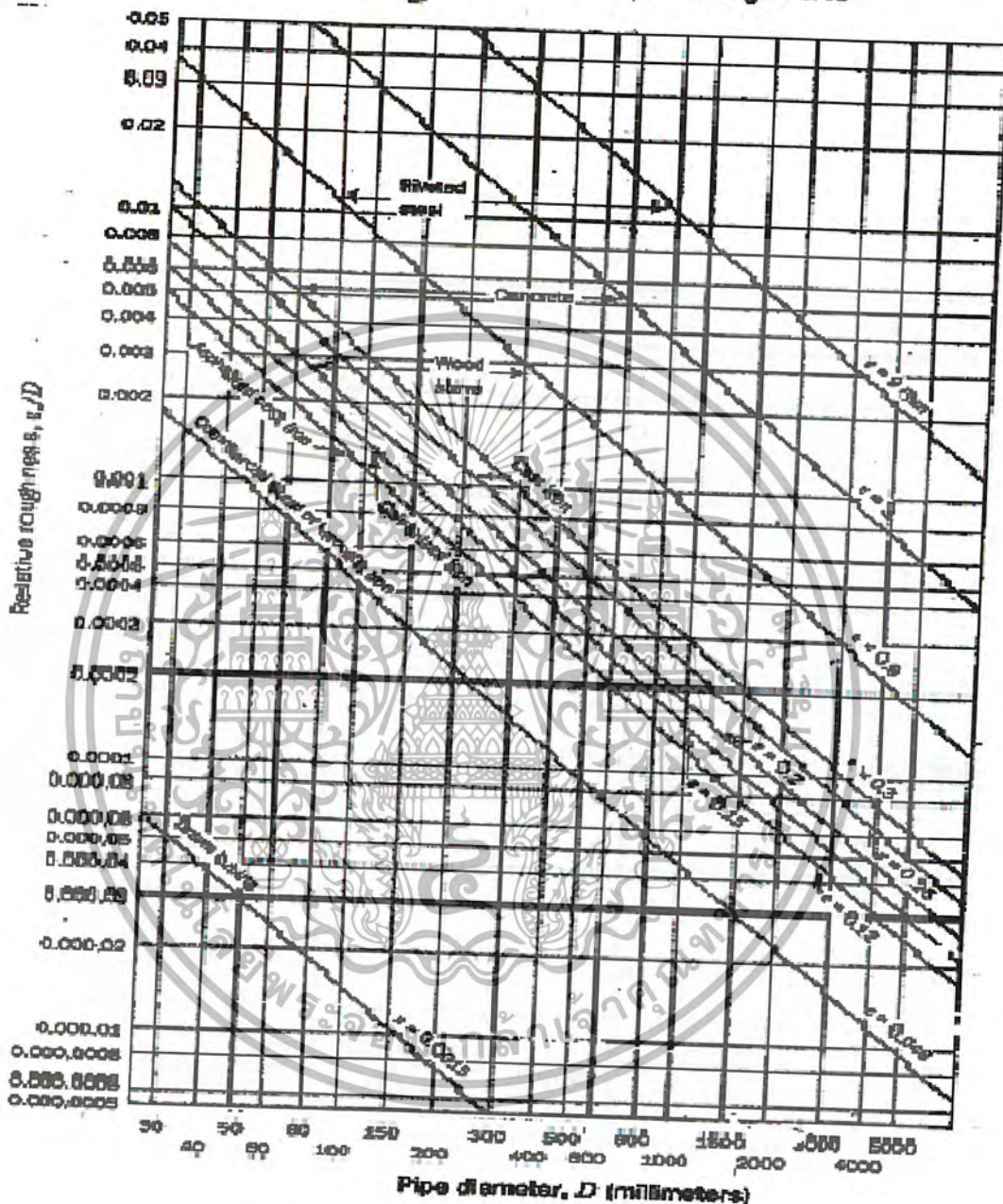
$$f \equiv \phi_2 \left( \text{Re}, \frac{e}{D} \right)$$

และ

$$h_f = f \frac{L \bar{V}^2}{D \cdot 2}$$

(4.32) ค่าของ  $f$  สามารถหาได้จากการทดลอง ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.14

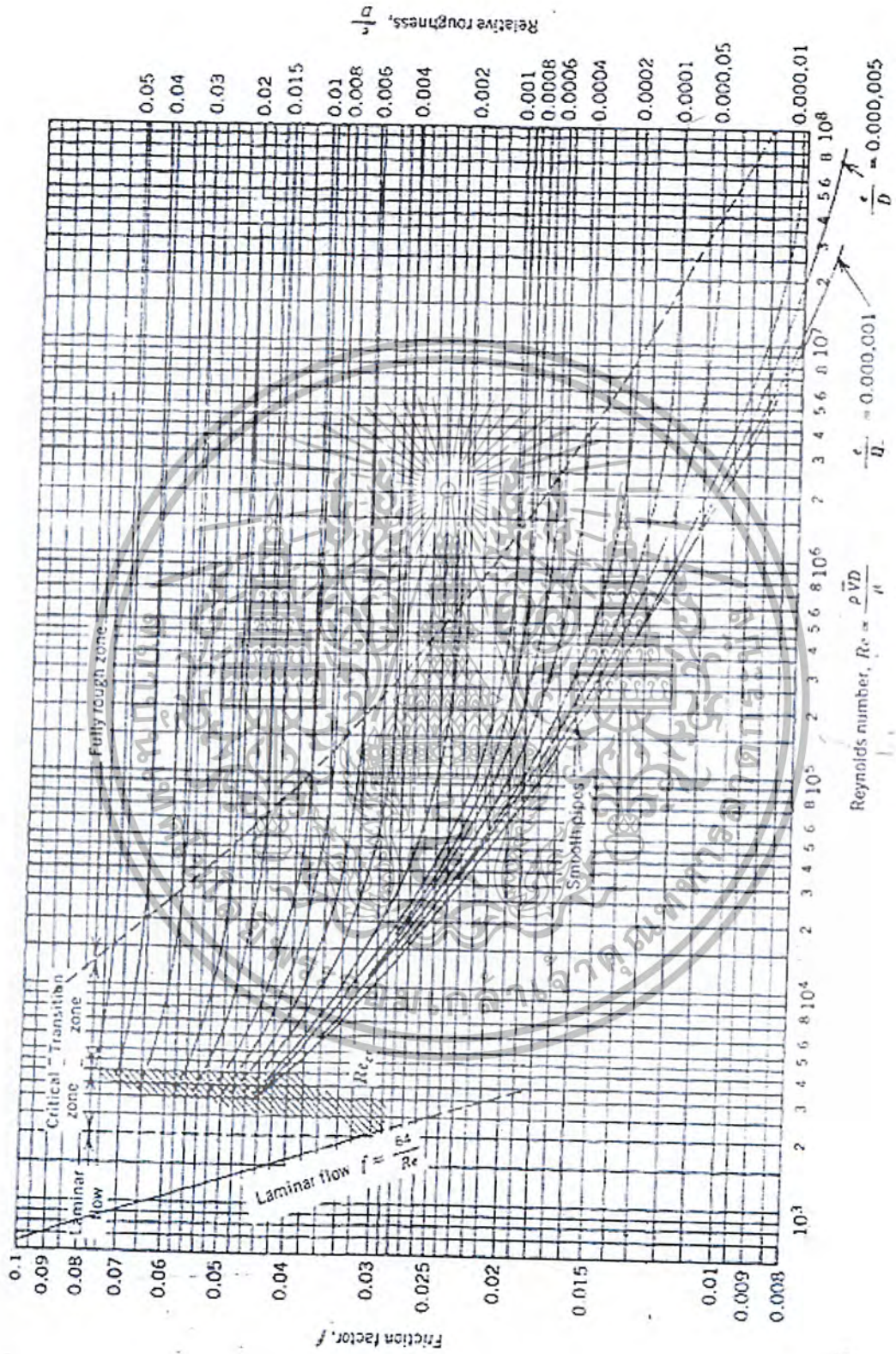
และเทอมของ relative roughness ( $\frac{e}{D}$ ) ของท่อชนิดต่าง ๆ หาได้จากรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.14 แสดง friction factor ในท่อกลม

และเทอมของ relative roughness ( $\frac{e}{D}$ ) ของท่อชนิดต่าง ๆ หาได้จากรูปที่ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แสดง relative roughness ในท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่ากรณีการไหลแบบราบเรียบ

$$f_{laminar} = \frac{64}{Re} \quad (4.33)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่า สำหรับการไหลแบบราบเรียบนั้น friction factor จะขึ้นกับค่าของ Reynolds number เท่านั้น ไม่ขึ้นกับความขรุขระ (roughness) ของท่อเลย

ในการวิเคราะห์ข้อมูลการไหลในท่อ จะเห็นได้ว่า friction factor ( $f$ ) อาจจะมี ความสัมพันธ์กับค่า  $n$  สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในท่อ โดยอาจจะประมาณได้ว่า

$$\frac{1}{n} = \sqrt{f} \quad (4.34)$$

ยังมีการหาค่าของ  $f$  อีกหลาย ๆ แบบแล้วแต่สถานะที่จะใช้ในการพิจารณา เช่น Blasius correlation สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในท่อราบเรียบ ซึ่ง  $Re \leq 10^5$

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (4.35)$$

$$\tau_w = 0.03325 \rho V^2 \left( \frac{V}{RV} \right)^{0.25} \quad (4.36)$$

นอกจากนี้ยังมีสมการของ Cole brook ซึ่งนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง

$$\frac{1}{f^{0.5}} = -2.0 \log \left( \frac{e/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re f^{0.5}} \right) \quad (4.37a)$$

หรือของ Miller

$$f_0 = 0.25 \left[ \log \left( \frac{e/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^{-2} \quad (4.37b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 8.7.2 การสูญเสียรอง (minor losses)

การสูญเสียรอง ( $h_m$ ) เกิดเนื่องจากการไหลในระบบซึ่งอาจจะไหลผ่าน ข้อต่อ ท่อโค้ง หรือมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่แบบต่างๆ ฯลฯ ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$(h_m) = K \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (4.38a)$$

โดยที่  $K$  คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (loss coefficient) ซึ่งเกิดขึ้นกับการทดลองเป็นกรณี ๆ ไป ในบางครั้งการสูญเสียรองอาจจะหาได้จาก

$$(h_m) = f \frac{L_e \bar{V}^2}{D \cdot 2} \quad (4.38b)$$

โดย  $L_e$  คือความยาวเทียบเท่า (equivalent length) ของท่อตรง

ตารางที่ 4.1 สัมประสิทธิ์การสูญเสียรองสำหรับท่อที่มีทางเข้าต่างกัน

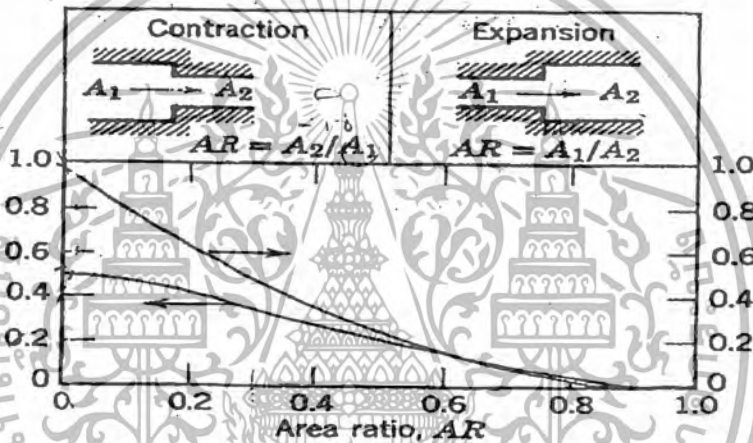
Entrance Type	Minor Loss Coefficient, $K^a$			
Reentrant	0.78			
Square-edge	0.5			
Rounded	$r/D$	0.02	0.06	$\geq 0.15$
	$K$	0.28	0.15	0.04

ก. inlets and outlets ถ้ามุมของบริเวณ inlet ไม่โค้งมน จะเกิดการไหลที่บริเวณที่มุมนี้ แยกขึ้นมาจากการไหลปกติด้วย ซึ่งเรียกว่า vena contracta โดยที่ตำแหน่ง vena contracta นี้ ของไหลจะมีความเร่งเฉพาะแต่ละจุดขึ้นมา เนื่องจากผ่านไปยังบริเวณที่มีพื้นที่สำหรับการไหลลดลง การสูญเสียพลังงานกล ณ บริเวณนี้เนื่องจากการไหลผสมกันอย่างไม่มีการควบคุม ซึ่งตารางที่ 4.1 แสดงตัวอย่างของ inlet geometries อย่างง่าย ๆ ไว้ จะเห็นได้ว่า ถ้า well-round inlet  $\left(\frac{r}{D} \geq 0.15\right)$  ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย เนื่องจากทางเข้าของของไหลอาจจะตัดทิ้งไปได้

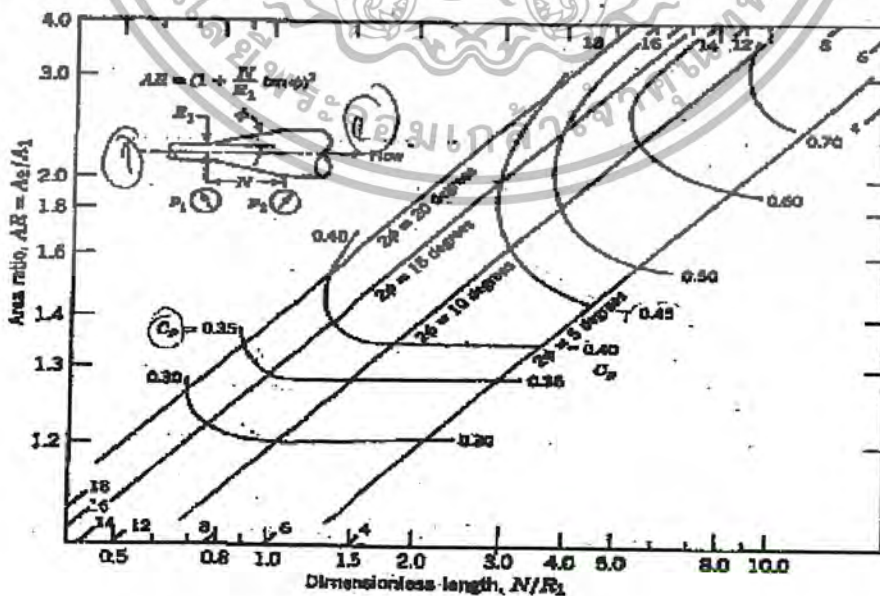
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอม  $\frac{\alpha \bar{V}^2}{2}$  ซึ่งถูกทำให้กระจายออกไปอย่างสมบูรณ์โดยการผสม เมื่อมีการไหลจากท่อไปยังถังขนาดใหญ่ในสถานการณ์นี้ จะสอดคล้องกับการไหลผ่านท่อที่มีภาคตัดขวางใหญ่ขึ้น กล่าวคือ  $AR = 0$  ดังรูปที่ 4.16 แล้วสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะเท่ากับ  $\alpha$

ข. Enlargements and Contractions สัมประสิทธิ์การสูญเสียรองสำหรับกรณีที่มีท่อกลมเพิ่มหรือลดขนาดแบบทันทีทันใด ดังรูปที่ 4.16 การสูญเสียเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ที่ลดลง อาทิเช่น พวย (nozzle) เป็นต้น



รูปที่ 4.16 สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (loss coefficient) สำหรับการไหลผ่านบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่อย่างทันที



รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ในเทอมต่างๆ สำหรับการออกแบบ diffuser

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสูญเสียใน diffuser จะขึ้นกับจำนวนตัวแปร ของรูปทรงทางเรขาคณิต และการเปลี่ยนแปลงในการไหล ซึ่งข้อมูลของ diffuser จะอยู่ในเทอมของ pressure recovery coefficient ( $C_p$ )

$$C_p \equiv \frac{p_2 - p_1}{\frac{1}{2} \rho \bar{V}_1^2} \quad (4.39)$$

ข้อมูลสำหรับ diffuser ในกรณี fully developed turbulent สำหรับการไหลในท่อที่ inlet และแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งเป็นฟังก์ชันของรูปร่างทางเรขาคณิต จากนิยามของ  $C_p$  (สมการ 4.39) เพื่อจะจัดให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์กับ head loss ได้โดยกำหนดว่าไม่คิดค่าความโน้มถ่วง และ  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1.0$  และอ้างอิงสมการ (4.28) โดย

ดังนั้น

$$h_m = \frac{\left[ \frac{p_1}{\rho} + \frac{\bar{V}_1^2}{2} \right] - \left[ \frac{p_2}{\rho} + \frac{\bar{V}_2^2}{2} \right]}{\frac{\bar{V}_1^2}{2}} = \frac{\bar{V}_2^2 - \frac{p_2 - p_1}{\rho}}{\frac{\bar{V}_1^2}{2}} = \frac{\bar{V}_1^2}{2} \left[ \left( 1 - \frac{\bar{V}_2^2}{\bar{V}_1^2} \right) - \frac{p_2 - p_1}{\rho \bar{V}_1^2} \right] = \frac{\bar{V}_1^2}{2} \left[ \left( 1 - \frac{\bar{V}_2^2}{\bar{V}_1^2} \right) - C_p \right]$$

จากความต่อเนื่อง  $A_1 \bar{V}_1 = A_2 \bar{V}_2$  ดังนั้น

$$h_m = \frac{\bar{V}_1^2}{2} \left[ \left( 1 - \frac{1}{(AR)^2} \right) - C_p \right] \quad (4.40)$$

สำหรับการไหลที่ไม่มีความเสียดทาน ( $h_m = 0$ ) ดังนั้น

$$C_p = 1 - \frac{1}{(AR)^2} \quad (4.41)$$

เมื่อ  $C_p \equiv$  ideal pressure recovery coefficient

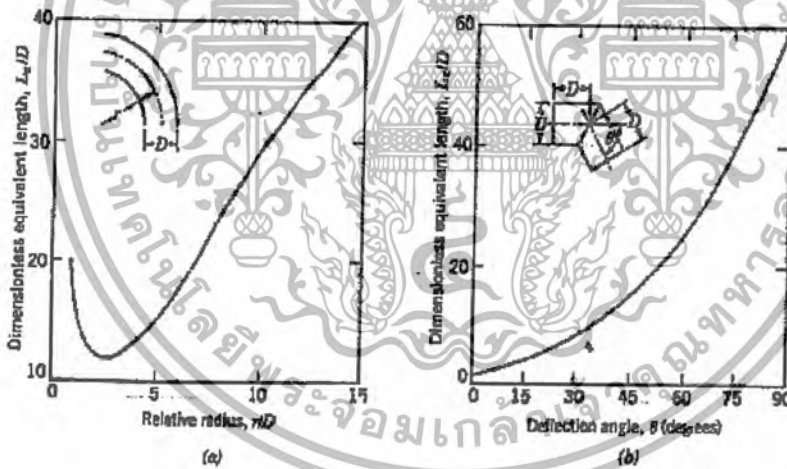
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น head loss สำหรับการไหลผ่าน diffuser ที่ใช้งานจริง ๆ คือ

$$h_{l_m} = (C_{p_i} - C_{p_p}) \frac{\bar{V}_1^2}{2} \quad (4.42)$$

ก. ท่อโค้ง (pipe bend) head loss ของท่อโค้งจะแสดงอิทธิพลมากกว่า สำหรับ fully developed flow ผ่านท่อตรงที่มีความยาวเท่ากัน และการสูญเสียในท่อโค้งจะพิจารณาในลักษณะว่าจะเท่ากับการสูญเสียอันเนื่องมาจากของไหลไหลผ่านท่อตรงที่มีความยาวค่าหนึ่ง และเรียกว่า ‘ความยาวเทียบเท่า’ (equivalent length) และแสดงดังรูปที่ 4.18

ง. วาล์ว และ ข้อต่อ การพิจารณาการสูญเสียสำหรับกรณีนี้ ก็จะใช้ความยาวเทียบเท่าในการพิจารณาซึ่งมีข้อมูลนั้นกำหนดในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.18 แสดงความยาวเทียบเท่า ( $L_e/D$ ) สำหรับ ก. ท่อโค้ง  $90^\circ$  และ ข. miter bend

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## บทที่ 5 การคำนวณ

### 5.1 การแทนผลลัพธ์โดยใช้โพลิโนเมียล(Polynomial Representation)

โพลิโนเมียลเป็นรูปแบบของสมการที่ง่ายและมีประโยชน์มาก ถ้า  $y$  เป็นฟังก์ชันของ  $x$  รูปของโพลิโนเมียลสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \tag{5.1}$$

ซึ่ง  $a_0$  ถึง  $a_n$  เป็นค่าคงที่

โดยในการคำนวณในที่นี้เราใช้สมการ โพลิโนเมียลกำลังสองซึ่งมีรูปแบบดังต่อไปนี้

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 \tag{5.2}$$

ซึ่งจะได้ 3 สมการดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} 1 & x_0 & x_0^2 \\ 1 & x_1 & x_1^2 \\ 1 & x_2 & x_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$$

ทำการแก้สมการเหล่านี้จะได้ค่าของ  $a_0$ ,  $a_1$  และ  $a_2$   
จากนั้นเราจะได้สมการ

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 \tag{5.3}$$

ที่มีสัมประสิทธิ์เป็นค่าคงที่เป็นสมการแสดงโพรไฟล์ความเร็วจากนั้นเราก็จะนำสมการดังกล่าวไปหาอัตราการไหลเชิงมวล

### 5.2 การหาสมการกับกลุ่มข้อมูลโดยใช้วิธีกำลังสองต่ำสุด

สมการที่ใช้ในการแทนชนิดของข้อมูลคือสมการพหุนาม

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 \tag{5.1}$$

$$\sum_{i=1}^m (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 - y_i)^2 = 0 \tag{5.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วทำการหาอนุพันธ์เทียบกับ  $a_0$ ,  $a_1$  และ  $a_2$  ให้เท่ากับ ศูนย์และได้สมการ 3 สมการคือ

$$\begin{bmatrix} m & \sum x_i & \sum x_i^2 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \\ \sum x_i^2 y_i \end{bmatrix}$$

ทำการแก้สมการเหล่านี้จะได้ค่าของ  $a_0$ ,  $a_1$  และ  $a_2$

จากนั้นเราจะได้สมการ

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 \quad (5.1)$$

ที่มีสัมประสิทธิ์เป็นค่าคงที่เป็นสมการแสดงโพรไฟล์ความเร็วจากนั้นเราก็จะนำสมการดังกล่าวไปหาอัตราการไหลเชิงมวล



## บทที่ 6

### การดำเนินงานทดลอง

#### 6.1 ขั้นตอนการเตรียมชุดทดสอบ

5.1.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับสภาวะการทำงานจริงของใบพัดหม้อน้ำรถยนต์ และมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบใบพัดหม้อน้ำรถยนต์

5.1.2 ทำการออกแบบชุดทดสอบ

5.1.3 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการใช้คู่มือ

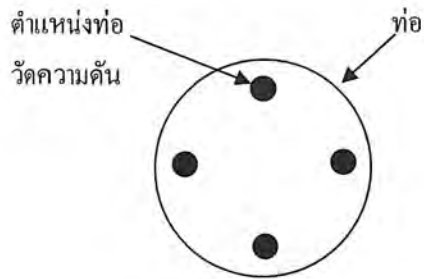
5.1.4 สร้างชุดทดสอบตามที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 6.1 ชุดทดลองที่ได้ออกแบบไว้

6.1.5 ติดตั้งท่อวัดความดัน (Pitot tube) ด้านหลังใบพัดเข้ามาจากขอบท่อ 5 เซนติเมตร 4 ตำแหน่งดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 แสดงตำแหน่งการวัดความดันในท่อ

#### 6.1.6 ติดตั้งชุดสวดร้อนวัดความเร็ว (Hot wire) ด้านหลังตะแกรง

### 6.2 ขั้นตอนการทดสอบ

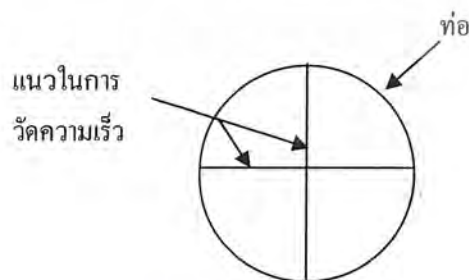
6.2.1 จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เพื่อหมุนใบพัด

6.2.2 ปรับความเร็วรอบให้ได้ตามต้องการ คือ 2000, 2300, 2600 รอบต่อนาที โดยการปรับค่าความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับมอเตอร์

6.2.3 ทำการวัดความดันสถิตย์ (Static pressure) ด้านหลังใบพัด และปรับความดันสถิตย์ ด้านหลังใบพัดให้เท่ากับความดันบรรยากาศ โดยการปรับช่องระบายลมด้านหลังใบพัดของอุโมงค์ลม

6.2.4 ปรับความเร็วรอบอีกครั้งให้ได้ตามต้องการ คือ 2000, 2300, 2600 รอบต่อนาที โดยครั้งแรกเริ่มที่ 2000 รอบต่อนาที

6.2.5 ทำการวัดแรงที่ได้จากมอเตอร์และวัดความเร็วลมหลังตะแกรง (Screen) ที่ระยะห่างจากขอบท่อ 2.5, 5.5, 8.5, 11.5, 14.5, 17.5, 20.5, 23.5, 26.5 และ 29.5 เซนติเมตร 2 แนวตามแนวตั้งรูป แล้วบันทึกค่า



รูปที่ 6.3 แสดงแกนที่ใช้วัดความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.6 ทำการปรับช่องระบายลมให้ปิดสุด แล้ววัดความดันสถิตย์หลังใบพัดนำค่าความดันนี้ไปแบ่งช่วงความดัน 7-8 ช่วง

6.2.7 ปรับความเร็วรอบให้ได้ 2000 รอบต่อนาที แล้วทำตาม 5.2.5

6.2.8 ปรับความดันสถิตย์หลังใบพัดตามช่วงที่ได้แบ่งไว้ แล้วทำตาม 5.2.7

6.2.9 ตามข้อ 5.2.3 – 5.2.8 โดยเปลี่ยนความเร็วรอบเป็น 2300, 2600 รอบต่อนาทีตามลำดับ

### 6.3 ชุดทดสอบ

รายละเอียดและข้อจำกัดในการสร้างชุดทดสอบ

1. การปรับความดันสถิตย์หลังใบพัดให้เท่ากับความดันบรรยากาศนั้นเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบใบพัดหม้อน้ำรถยนต์

2. เนื่องจากลมที่ได้จากใบพัดมีลักษณะหมุนวนจึงไม่สามารถวัดความเร็วได้จึงทำการติดตั้งตะแกรง เพื่อเป็นการปรับลักษณะการไหลของอากาศให้เป็นแบบคงที่(Uniform flow) จึงสามารถวัดความเร็วลมได้

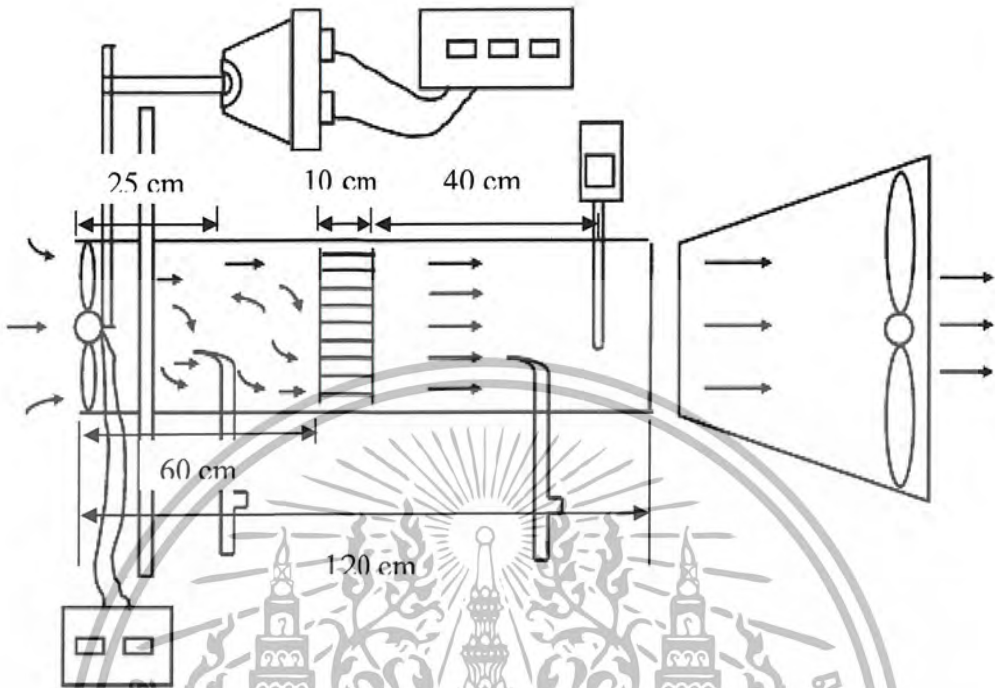
3. เพื่อทำการปรับความดันสถิตย์หลังใบพัดให้ได้ค่าต่างๆกัน จึงทำการประกอบชุดทดสอบเข้ากับอุโมงค์ลม และใช้การปรับช่องระบายอากาศของอุโมงค์ลมให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความดันสถิตย์หลังใบพัด

4. แผ่นกั้นลมที่ติดตั้งไว้เพื่อไม่ให้ใบพัดดูดอากาศจากทางด้านหลังซึ่งเป็นการจำลองการทำงานตามสภาวะจริง

5. ขนาดของชุดทดสอบถูกจำกัดด้วยขนาดของห้องอุโมงค์ลม

6. ระยะเวลาทำการติดตั้งตะแกรงและระยะที่ทำการวัดความเร็วกำหนดโดยการทดลองติดตั้งในหลายๆตำแหน่ง แล้วดูว่าตำแหน่งใดที่ไม่ทำให้เกิดลมย้อนกลับจึงเลือกตำแหน่งนั้น

7. เครื่องมือสำหรับใช้ในการวัดแรงมีความละเอียดไม่เพียงพอที่จะแยกความแตกต่างของแรงจากมอเตอร์ที่ความดันสถิตย์หลังใบพัดแต่ละค่าที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 6.4 รูปชุดทดลองและอุปกรณ์วัดค่าในตำแหน่งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### ผลการทดลอง

#### 7.1 ผลการทดลอง

ผลที่ได้จากการทดลองจะแสดงค่าในตารางที่ 7.2 -7.7

#### 7.2 ขั้นตอนการคำนวณเพื่อหาค่าอัตราการไหลเชิงมวล

7.2.1. หาค่าความเร็วเฉลี่ย ณ ตำแหน่งที่มีระยะห่างจากขอบท่อเท่ากัน เช่น นำความเร็วที่  $x-2.5$ ,  $x-29.5$ ,  $y-2.5$ ,  $y-29.5$  มาหาค่าเฉลี่ย เนื่องจากท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 เซนติเมตร

7.2.2. สร้างคู่อันดับจากค่าความเร็วเฉลี่ย โดยกำหนดคู่อันดับตัวแรกและตัวที่สองเป็นดังนี้ คือ (ระยะห่างจากกึ่งกลางท่อ,ความเร็วเฉลี่ย) ซึ่งแต่ละความสัมพันธ์ของความเร็รรอบและความดันสถิตย์หลังใบพัดคู่หนึ่งจะมีทั้งหมด 5 คู่อันดับ คือมีที่ระยะห่างจากกึ่งกลางท่อเป็น 1.5, 4.5, 7.5, 10.5, 13.5 เซนติเมตร

7.2.3. นำคู่อันดับของแต่ละชุดความสัมพันธ์มาหาสมการที่แสดงการกระจายตัวที่เหมาะสม (Fit Curve) ของข้อมูลแต่ละชุด โดยใช้โปรแกรม แมทแล็บ (MATLAB) ด้วยคำสั่ง  $\text{Coef2} = \text{polyfit}(x,y,2)$

```
x = [0.015 0.045 0.075 0.105 0.135]
y = [6.35 6.4 6.25 6.15 4.975]
Coef2 = polyfit(x,y,2)
```

ผลจากโปรแกรม

```
Coef2 =
    -77.3810    9.4048    3.3740
```

คือ  $f(x) = -77.381x^2 + 9.4048x + 3.374$

7.2.4. นำสมการการกระจายตัวของแต่ละชุดไปอินทิเกรต ในสูตร

$$\int_0^{0.16} 2\pi r f(x) dx$$

ผลที่ได้จากการอินทิเกรต คือ ปริมาตรของอากาศที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดท่อในช่วงเวลา 1 วินาที หรือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร(Q)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7.2.5. หาค่าความหนาแน่นของอากาศ โดยสมการ

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (7.1)$$

โดยที่ P- ความดันบรรยากาศ ( $N/m^2$ )  
 R- 287 ( $N.m/kg.K$ )  
 T- อุณหภูมิเฉลี่ยจากการทดลอง (K)

7.2.6. หาอัตราการไหลเชิงมวล( $\dot{m}$ ) จากสมการ

$$\dot{m} = \rho Q \quad (7.2)$$



ตัวอย่างการคำนวณหาค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่ความดัน

ก. หาค่าความเร็วเฉลี่ย ณ ตำแหน่งที่มีระยะห่างจากขอบท่อเท่ากัน

	A	B	C	D
1	ระยะห่าง	ความดันสถิตย์หลังใบพัด(mmH <sub>2</sub> O)		
2	จากขอบท่อ	0.0		
3	(แกน-ระยะ(cm))	ความเร็ว	อุณหภูมิ	
4		(m/s)	(c°)	
5	x-2.5	3.0	28.9	
6	x-5.5	5.2	28.9	
7	x-8.5	5.4	29.1	
8	x-11.5	5.9	29.1	
9	x-14.5	6.1	29.1	
10	x-17.5	6.4	28.7	
11	x-20.5	6.8	28.9	
12	x-23.5	6.8	28.7	
13	x-26.5	6.9	28.5	
14	x-29.5	6.7	28.3	
15	y-2.5	4.2	28.9	
16	y-5.5	6.0	28.9	
17	y-8.5	6.5	28.8	
18	y-11.5	6.9	28.9	
19	y-14.5	7.0	28.8	
20	y-17.5	7.4	28.8	
21	y-20.5	7.7	28.6	
22	y-23.5	7.7	28.4	
23	y-26.5	7.8	28.7	
24	y-29.5	7.7	28.7	
25	t-average		28.8	
26	v-0.015	6.725		
27	v-0.045	6.825		
28	v-0.075	6.600		
29	v-0.105	6.475		
30	v-0.135	5.400		
31				

$$=(B9+B10+B19+B20)/4$$

ตารางที่ 7.1 แสดงการหาอัตราการไหลเชิงมวลที่ความดัน

จากตารางใน Excel จะได้คู่อันดับทั้งหมด 5 คู่อันดับ คือ

(0.015,8.525), (0.045,8.625), (0.075,8.400), (0.105,8.275), (0.135,7.200)

ข. นำคู่อันดับของแต่ละชุดความสัมพันธ์มาหาสมการที่แสดงการกระจายตัวที่เหมาะสม (Fit Curve) ของข้อมูลแต่ละชุด โดยใช้โปรแกรม แมทแล็บ (MATLAB)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%2000 rpm 0.0 mmH2O
x=[0.015 0.045 0.075 0.105 0.135]
y=[6.725 6.825 6.600 6.475 5.400]
Coef2 = polyfit(x,y,2)
```

ผลที่ได้

```
>>
```

```
x =
```

```
0.0150 0.0450 0.0750 0.1050 0.1350
```

```
y =
```

```
6.7250 6.8250 6.6000 6.4750 5.4000
```

```
Coef2 =
```

```
-178.5714 16.7857 6.4720
```

สมการที่ได้คือ  $f(x) = -178.5714x^2 + 16.7857x + 6.4720$

(7.3)

ค. นำสมการการกระจายตัวของแต่ละชุดไปอินทิเกรต

$$\int_{0.16}^{0.16} 2\pi x(-178.5714x^2 + 16.7857x + 6.4720)dx = 0.4807 \text{ m}^3/\text{s}$$

ง. หาค่าความหนาแน่นของอากาศ

$$\rho = \frac{101325}{287 \times (273 + 28.8)}$$

$$\rho = 1.1698 \text{ kg/m}^3$$

จ. หาอัตราการไหลเชิงมวล ( $m$ )

$$\text{อัตราการไหลเชิงมวล} = 1.1698 \times 0.4807 = 0.5623 \text{ kg/s}$$

### 7.3 แนวทางในการหาประสิทธิภาพของใบพัดหม้อน้ำ

เนื่องจากมีข้อจำกัดทางเครื่องมือวัดที่ใช้สำหรับวัดแรงโครงานนี้จึงไม่ได้แสดงผลสรุปเกี่ยวกับเรื่องนี้ไว้ แต่จะขอนำเสนอขั้นตอนที่ใช้สำหรับการหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ ดังนี้

7.3.1. นำขนาดของแรง( $F$ )ที่วัดได้คูณกับระยะจากจุดรับแรงถึงแกนมอเตอร์( $r$ )ได้ค่าทอร์ก

( $\tau$ )

ตามสมการ

$$\tau = Fr \text{ N.m} \quad (7.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3.2. หาค่าความเร็วเชิงมุม ( $\omega$ ) จากความเร็วรอบ (N) ของแต่ละความเร็วรอบ ที่ใช้ทดสอบ ตามสมการ

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \text{ rad/s} \quad (7.5)$$

7.3.3. หากำลังที่ให้กับ ใบพัด (Power<sub>in</sub>) ตามสมการ

$$Power_{in} = \tau \omega \text{ Watts} \quad (7.4)$$

7.3.4. หาค่าความดันที่ตกคร่อมใบพัด (P<sub>T</sub>) เนื่องจากไม่สามารถวัดความดันที่ตกคร่อมใบพัดได้โดยตรง เพราะอากาศหลังใบพัดมีการหมุนวน จึงหาโดยใช้ค่าจากการนำความดันสถิตย์ (P<sub>s</sub>) หลังใบรวมกับความดันจลน์ (P<sub>d</sub>) ตามสมการ

$$P_T = P_s + P_d \quad (7.5)$$

โดยที่ความดันสถิตย์สามารถวัดได้โดยตรงจากท่อวัดความดัน ส่วนความดันจลน์หาจากสมการ

$$P_d = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (7.6)$$

ซึ่ง  $v$  คือ ค่าความเร็วเฉลี่ยที่หาได้จากอัตราการไหลเชิงปริมาตรหารด้วยพื้นที่หน้าตัดชุดทดสอบ

7.3.5. หากำลังที่ได้จากใบพัด (Power<sub>out</sub>) ตามสมการ

$$Power_{out} = P_T Q \text{ Watts} \quad (7.7)$$

7.3.6. ประสิทธิภาพของใบพัด ( $\eta$ ) เป็นไปตามสมการ

$$\eta = \frac{Power_{out}}{Power_{in}} \quad (7.8)$$

ความเร็วอากาศทดลองที่ 2000 rpm ครึ่งที่ 1 (m/s)								
ความดัน (mmH <sub>2</sub> O) (cm) ระยะแกน X	0	3.5	3	2.5	2	1.5	1	0.5
1.5	5.3	2.9	3.8	3.8	4.2	4.9	4.8	4.7
4.5	6.8	3.8	4.5	4.7	5.4	6.1	6.4	6.4
7.5	7	4	4.6	5	5.5	6.2	6.6	6.6
10.5	7.3	4.2	5	5.1	5.8	6.5	6.9	6.8
13.5	7.4	4.2	4.9	5.2	6	6.7	6.9	6.9
16.5	7.8	4.3	5.1	5.4	6.1	6.8	7.3	7.1
19.5	8.2	4.5	5.3	5.5	6.5	7.1	7.5	7.3
22.5	8	4.6	5.3	5.5	6.3	6.9	7.5	7.3
25.5	8.2	4.6	5.4	5.6	6.6	7.2	7.6	7.4
28.5	8.2	4.5	5.4	5.6	6.5	7.1	7.3	7.5

ความดัน (mmH <sub>2</sub> O) (cm) ระยะแกน Y	0	3.5	3	2.5	2	1.5	1	0.5
1.5	5.5	3.9	4	4.1	4.8	4.8	5.5	5.1
4.5	7.1	4.2	5	5.1	5.8	6.3	6.7	6.8
7.5	7.6	4.5	5.4	5.5	6	6.8	7.1	7.2
10.5	8.2	4.7	5.4	5.7	6.5	7	7.4	7.1
13.5	8.5	4.7	5.5	5.8	6.5	7.2	7.6	7.6
16.5	8.9	4.9	5.8	5.9	6.7	7.6	8	7.8
19.5	9	4.9	5.8	5.9	6.8	7.7	8.3	7.9
22.5	9.2	5.1	5.9	6.1	6.9	8	8.5	8.2
25.5	9.3	5.3	6.1	6.1	7.2	8.1	8.5	8.4
28.5	8.9	5.2	6	6.2	7.1	8	8.1	8.4

ตารางที่ 7.2 แสดงผลการทดลองที่ความเร็วรอบ 2000 rpm ครึ่งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วอากาศทดลองที่ 2000 rpm ครั้งที่ 2 (m/s)								
ความดัน (mmH <sub>2</sub> O) (cm) ระยะแกน X	0	2.9	2.5	2	1.5	1	0.5	
1.5	3.7	2.4	2.7	3	2.9	4.3	4	
4.5	6.1	3.7	4	4.4	5.4	5.9	6	
7.5	6.4	4	4.1	4.6	5.4	6	6.2	
10.5	6.7	4.1	4.2	4.8	5.7	6.4	6.5	
13.5	6.8	4.2	4.2	4.9	5.6	6.6	6.6	
16.5	7	4.4	4.2	5	5.9	6.7	6.7	
19.5	7.2	4.5	4.4	5.1	6.1	6.9	7	
22.5	7.2	4.5	4.4	5.1	5.9	6.9	7	
25.5	7.2	4.6	4.4	5.2	6.2	7	7.1	
28.5	7.1	4.5	4.6	5.1	6.2	6.9	7	

ความดัน (mmH <sub>2</sub> O) (cm) ระยะแกน Y	0	2.9	2.5	2	1.5	1	0.5	
1.5	4.8	2.9	3.6	3.4	4.2	4.7	4.7	
4.5	6.4	4.1	4.3	4.8	5.7	6.4	6.6	
7.5	7	4.5	4.8	5	6	6.9	6.8	
10.5	7	4.6	4.8	5.1	6.2	7.1	6.9	
13.5	7.4	4.7	4.8	5.4	6.3	7.3	7.3	
16.5	7.7	4.8	4.8	5.5	6.7	7.6	7.6	
19.5	8	5	4.9	5.6	6.8	7.8	7.7	
22.5	8.1	5.2	5	5.7	7.1	7.9	8.2	
25.5	8	5.2	5.1	5.8	7	8	8.1	
28.5	7.8	4.9	4.8	5.6	6.9	7.7	7.8	

ตารางที่ 7.3 แสดงผลการทดลองที่ความเร็วรอบ 2000 rpm ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วอากาศทดลองที่ 2300 rpm ครั้งที่ 1 (m/s)								
ความดัน (mmH <sub>2</sub> O) (cm) ระยะแกน X	0	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1
1.5	5.5	3.2	4	3.7	4.3	4.2	4.4	3.3
4.5	7.5	4.3	4.9	4.9	5.5	6.1	6.8	6.9
7.5	7.8	4.5	5.1	5	5.7	6.2	6.9	7.1
10.5	8.1	4.6	5.4	5.2	5.7	6.7	7.4	7.5
13.5	8.3	4.7	5.4	5.2	5.8	6.5	7.3	7.6
16.5	8.8	5	5.5	5.4	5.9	6.8	7.6	7.8
19.5	9.1	5.1	5.6	5.6	6.2	7	7.9	8
22.5	8.9	5	5.6	5.5	6.2	7	8	7.9
25.5	8.9	5.2	5.8	5.8	6.3	7	8.1	8
28.5	9	5.1	5.9	5.7	6.5	7	8	7.9

ความดัน (mmH <sub>2</sub> O) (cm) ระยะแกน Y	0	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1
1.5	5.7	3.8	4.6	4.2	4.2	4.9	5.5	4.9
4.5	7.8	4.7	5.5	5.4	5.8	6.6	7.3	7.2
7.5	8.8	5	5.8	5.6	6.2	7.2	7.8	7.8
10.5	8.8	5.1	5.7	5.7	6.2	7	8	7.8
13.5	9.4	5.3	6	6	6.5	7.3	8.4	8.3
16.5	9.7	5.5	6.1	6.1	6.6	7.5	8.6	8.7
19.5	9.9	5.7	6.3	6.2	6.9	7.8	8.9	9.2
22.5	10.1	5.9	6.4	6.3	7	8.1	9.2	9.5
25.5	10.2	6	6.5	6.3	7.1	8.1	9	9.3
28.5	9.6	5.9	6.4	6.4	7	8.1	9	9.1

ตารางที่ 7.4 แสดงผลการทดลองที่ความเร็วรอบ 2300 rpm ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วอากาศทดลองที่ 2300 rpm ครั้งที่ 2 (m/s)								
ความดัน (mmH <sub>2</sub> O) (cm) ระยะแกน X	0	3.9	3.5	3	2.5	2	1.5	1
1.5	5.6	3	3.1	3.4	4.1	4.3	4.4	5.1
4.5	7.7	4.3	4.4	5.5	6	6.5	6.8	7.1
7.5	8	4.7	4.6	5.6	6.1	6.6	6.9	7.2
10.5	8.6	4.7	4.6	5.9	6.4	6.9	7.4	7.8
13.5	8.8	4.9	4.7	5.8	6.5	7	7.3	7.8
16.5	9.2	5	4.7	6.1	6.6	7.3	7.6	8.3
19.5	9.6	5.2	4.9	6.3	6.9	7.5	7.9	8.5
22.5	9.4	5.1	4.9	6.2	6.9	7.5	8	8.5
25.5	9.5	5.3	5	6.4	7.1	7.7	8.1	8.5
28.5	9.3	5.3	5.2	6.4	7	7.4	8	8.7

ความดัน (mmH <sub>2</sub> O) (cm) ระยะแกน Y	0	3.9	3.5	3	2.5	2	1.5	1
1.5	6.4	3.7	4.3	4.9	5.1	5.4	5.5	6.3
4.5	8.4	4.7	5	6	6.6	6.9	7.3	7.7
7.5	9.2	5.3	5.3	6.3	7	7.2	7.8	8.3
10.5	9.4	5.4	5.3	6.4	6.9	7.6	8	8.5
13.5	9.6	5.4	5.5	6.5	7.2	7.7	8.4	8.8
16.5	10.3	5.6	5.5	6.8	7.4	8	8.6	9.2
19.5	10.6	5.7	5.5	6.9	7.5	8.3	8.9	9.5
22.5	10.8	6	5.7	7.1	7.8	8.5	9.2	9.7
25.5	10.7	6.2	5.6	7.2	7.9	8.6	9	9.7
28.5	10.4	5.9	5.7	7.1	7.9	8.3	9	9.5

ตารางที่ 7.5 แสดงผลการทดลองที่ความเร็วรอบ 2300 rpm ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วอากาศทดลองที่ 2600 rpm ครั้งที่ 1 (m/s)								
ความดัน (mmH <sub>2</sub> O) (cm) ระยะแกน X	0	4.6	4	3.5	3	2.5	2	1
1.5	6.5	3.4	3.4	4	3.5	4.6	3.7	5.1
4.5	8.3	4.8	5.1	5.8	6.4	7.3	7.5	8.1
7.5	8.7	4.9	5.2	6	6.5	7.5	7.6	8.1
10.5	9.2	5.2	5.4	6.2	6.9	7.7	8.1	8.7
13.5	9.4	5.3	5.4	6.4	7	7.8	8.2	8.9
16.5	9.7	5.4	5.6	6.6	7.1	8.1	8.6	9.2
19.5	10	5.6	5.8	6.6	7.3	8.4	8.9	9.5
22.5	9.9	5.5	5.8	6.4	7.2	8.3	8.8	9.3
25.5	10.1	5.7	5.9	6.8	7.4	8.6	9.1	9.7
28.5	10	5.6	6	6.8	7.4	8.6	8.8	9.6

ความดัน (mmH <sub>2</sub> O) (cm) ระยะแกน Y	0	4.6	4	3.5	3	2.5	2	1
1.5	7.1	3.5	4.4	4.9	5.4	6.3	6.6	6.8
4.5	8.7	5.2	5.6	6.1	7	7.7	8	8.6
7.5	9.5	5.4	5.9	6.8	7.2	8.2	8.7	9.3
10.5	9.5	5.7	6.1	6.8	7.4	8.6	9	9.6
13.5	10.1	5.8	6.2	6.9	7.6	8.8	9.1	10
16.5	10.8	6	6.3	7.3	7.7	9.2	9.4	10.3
19.5	11.3	6.3	6.4	7.4	8	9.5	9.7	10.8
22.5	11.7	6.5	6.6	7.5	8.4	9.7	10.2	11.1
25.5	11.4	6.6	6.5	7.5	8.2	9.8	10.1	11.1
28.5	11	6.4	6.6	7.6	8.3	9.6	9.8	10.6

ตารางที่ 7.6 แสดงผลการทดลองที่ความเร็วรอบ 2600 rpm ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วอากาศทดลองที่ 2600 rpm ครั้งที่ 2 (m/s)								
ความดัน (mmH <sub>2</sub> O) (cm) ระยะแกน X	0	4.6	4	3.5	3	2.5	2	1
1.5	6.2	3.2	4.2	4.6	4.5	5.2	5.2	4
4.5	8.8	4.8	5.8	6.6	6.7	7.3	7.6	8.4
7.5	9.2	5	5.9	6.7	6.8	7.3	7.7	8.6
10.5	9.6	5.3	6.1	7.1	7.2	7.8	8.1	8.8
13.5	9.7	5.2	6.2	7.1	7.3	7.9	8.3	9
16.5	10.2	5.5	6.5	7.3	7.4	8.2	8.5	9.5
19.5	10.4	5.7	6.7	7.6	7.9	8.5	8.9	9.9
22.5	10.5	5.7	6.8	7.6	7.9	8.6	9.1	9.9
25.5	10.8	5.8	6.9	7.8	8.2	8.8	8.9	10
28.5	10.6	5.7	6.8	7.6	8.1	8.8	9.1	10

ความดัน (mmH <sub>2</sub> O) (cm) ระยะแกน Y	0	4.6	4	3.5	3	2.5	2	1
1.5	7.7	4.1	4.9	5.8	5.9	6.4	6.8	6.9
4.5	9.8	5.2	6.2	7.1	7.2	7.8	8.3	8.7
7.5	10.4	5.7	6.8	7.6	7.8	8.7	8.9	9.5
10.5	10.8	5.8	6.9	7.6	7.9	8.7	8.9	9.6
13.5	11.4	5.9	6.9	8	8.1	9	9.3	10.1
16.5	11.9	6.1	7.1	8.2	8.4	9.3	9.6	10.5
19.5	12.1	6.3	7.2	8.4	8.7	9.6	9.9	11.1
22.5	12.3	6.6	7.5	8.7	8.9	9.7	10.3	11.4
25.5	12.2	6.7	7.4	8.8	9	9.7	10.3	11.3
28.5	11.8	6.6	7.7	8.7	9	9.7	10.1	11.2

ตารางที่ 7.7 แสดงผลการทดลองที่ความเร็วรอบ 2600 rpm ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

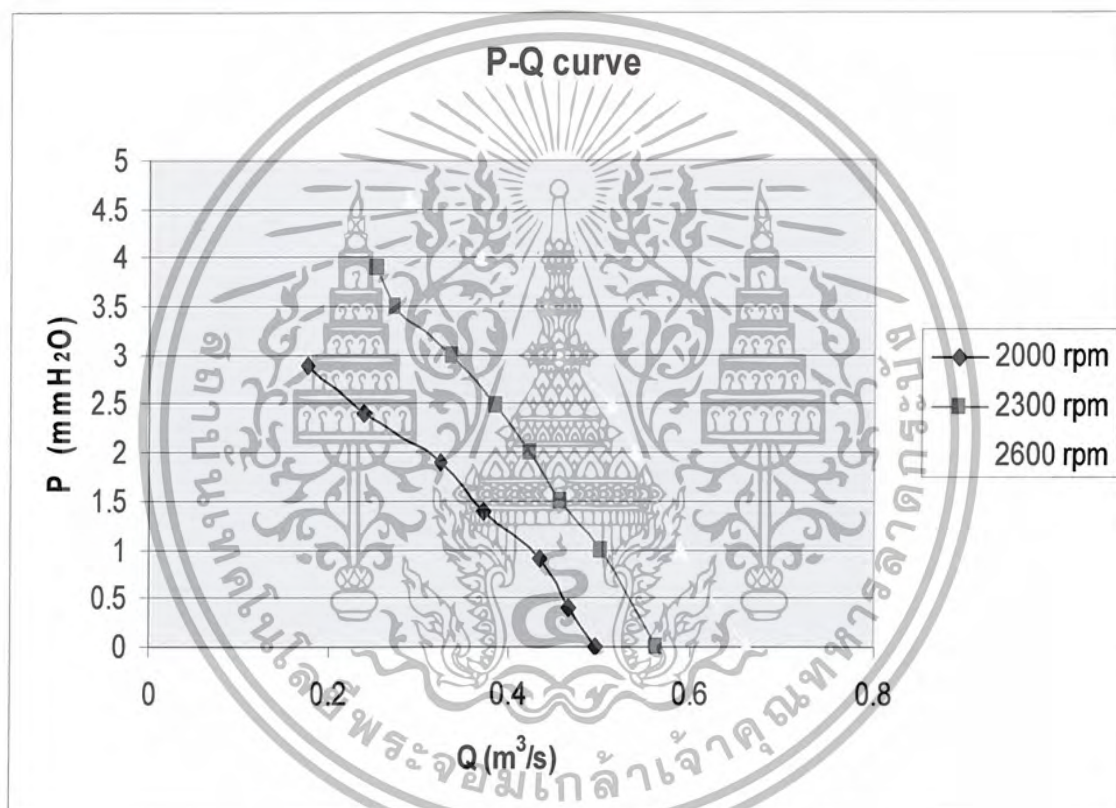
## บทที่ 8

### วิจารณ์และสรุปผล

#### 8.1 ข้อสรุป

จากการทดลองและการคำนวณสามารถสรุปได้ 2 ข้อดังนี้

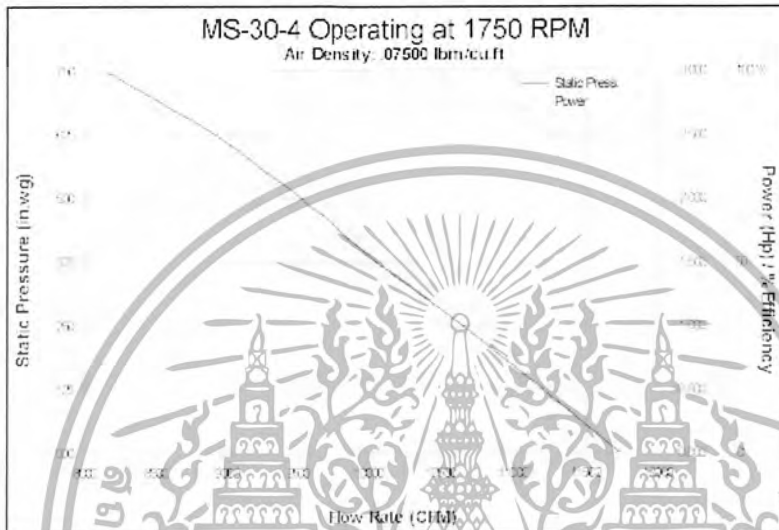
8.1.1 จากการทดสอบใบพัดหม้อน้ำรถยนต์พบว่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความดันสถิตย์ลดลง จะเห็นได้ชัดเจนจากแนวโน้มของกราฟ P-Q curve



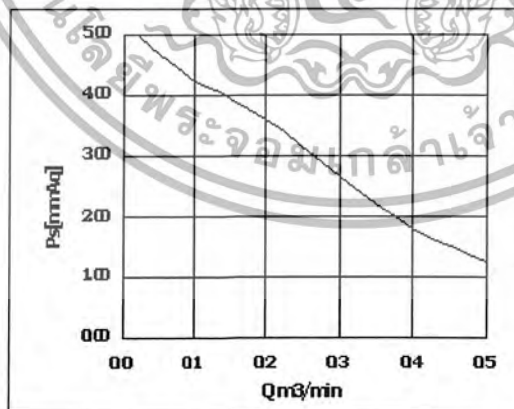
รูปที่ 8.1 กราฟ P-Q curve ที่ความเร็วรอบ 2000,2300,2600 rpm

แนวโน้มของกราฟนั้นถูกต้องตามทฤษฎี เมื่อมีความดันมากจะทำให้อากาศอื่นอยู่ในระบบทำให้การไหลของอากาศนั้นไม่สะดวกจึงทำให้แปรผกผันกับความดันเพราะเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟผลงานวิจัยที่แพร่หลายน่าเชื่อถือ ได้นั้นจะเห็นว่าแนวโน้มคล้ายกัน ทำให้สรุปได้ว่าการทดลองนั้นเป็นการทดลองที่ถูกต้องตามทฤษฎี

## Air Turbine Propeller Company



Data for 30 inch prop for 1750 RPM, 2 Horsepower (up to .625 in.wg)



รูปที่ 8.2 P-Q curve จากงานวิจัยอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 8.1.2 ผลที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีแนวโน้มไปในทางเดียวกับผลที่ได้จากการทดลอง

ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราการไหลเชิงมวล		ค่าความผิดพลาด ระหว่างผลการทดลอง และผลจากโปรแกรม (%)
	จากการทดลอง (kg/s)	จากโปรแกรม (kg/s)	
2000	0.5806	0.4935	15
2300	0.6559	0.5771	12
2600	0.7719	0.6947	10

## ตารางที่ 8.1 ตารางการเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวล

ตามจุดประสงค์หลักของงานวิจัยก็เพื่อจะนำเอาโปรแกรมมาประยุกต์ใช้กับปัญหานี้ จากผลที่ออกมานั้นถือว่าใกล้เคียงกันมากถึงแม้ว่าระดับที่ยอมรับได้ควรจะอยู่ที่ต่ำกว่า 10 %ก็ตาม สามารถนำโปรแกรมนี้ไปประยุกต์ใช้กับปัญหานี้ได้

## 8.2 ข้อวิจารณ์

เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลองนั้นมีข้อจำกัดหลายด้าน เช่น อุปกรณ์วัดบางชนิดต้องมีการ калиเบรตบ่อยครั้ง ข้อจำกัดในความละเอียดแม่นยำของเครื่องมือวัดอาจทำให้ได้ข้อมูลที่คลาดเคลื่อนไปบ้าง หรือแม้แต่สภาพแวดล้อมรอบๆ จะทำการทดลองถึงแม้ว่าผู้ทดลองจะพยายามควบคุมให้ได้ใกล้เคียงกันทุกครั้งของการทดลอง แต่ก็ได้เพียงใกล้เคียงเท่านั้น สุดท้ายที่จะควบคุมลมหรืออากาศขณะทดลองได้ รวมทั้งตัวผู้ทดลองเองที่มีประสบการณ์น้อยในการทำการทดลองซึ่งอาจจะเป็นผลให้ได้ผลที่คลาดเคลื่อนไปได้

อย่างไรก็ตาม ไม่มีงานวิจัยใดที่ทำให้สมบูรณ์แบบได้ งานวิจัยทุกชิ้นสามารถพัฒนาต่อไปได้เรื่อยๆ เพื่อผลลัพธ์ที่หลากหลายจุดประสงค์หรือผลลัพธ์ที่แม่นยำมากขึ้น

สิ่งที่เสนอแนะคือ ควรต้องมีอุปกรณ์ที่มีความทันสมัยขึ้นตอนการใช้งานน้อยและมีความแม่นยำละเอียดมากกว่านี้รวมทั้งอาจต้องปรับปรุงพัฒนาชุดทดลองให้มีความมาตรฐานมากขึ้น ควบคุมสภาพแวดล้อมให้ได้มากที่สุด

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Robert, W.Fox and Alan T. Mcdonald:”Introduction to Fluid Mechanics” ,John Wiley & Sons,Inc. (1994)
- [2] Bruce R. Munson,Donald F. young and Theodore H. Okiishi:”Fundamentals of Fluid mechanics”, John Wiley & Sons,Inc. (1994)
- [3] Nicholas P. Chohey: “Handbook of Chemical Engineering Calculation” ,McGraw-Hill,Inc.(1993)
- [4] Plint & Partners ltd:”TE 81 Three component Balance/Electronic/Slim” Oaklands Park, Wokingham,Berkshire RG41 2FD,England
- [5] eFunda Engineering Fundamental:”www.efunda.com”



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้