

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การทำให้เห็นภาพของการไหล



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 36744
วัน, เดือน, ปี 28 ส.ค. 2543

บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปคัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

FLOW VISUALIZATION



Mr. Jintawat Chaichanawong

Miss Nusara Yaiyaphonsuk

Mr. Sirawit Sirirak

A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of Bachelor of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การทำให้เห็นภาพของการไหล
โดย นายจันทวัฒน์ ไชยชนะวงศ์
นางสาวนุสรรา ไชยะผลสุข
นายศิริวิทย์ ศิริรักษ์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์สันติ วัฒนานุสรณ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์นภกร รัมพิพิธ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์สันติ วัฒนานุสรณ์)

นางกร รัมพิพิธ
.....กรรมการ
(อาจารย์นภกร รัมพิพิธ)


.....กรรมการ
(ดร. ประกอบ กิจไชยา)


.....กรรมการ
(อาจารย์รัตน์ฤดี เบญจางคประเสริฐ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
สัญลักษณ์	ด
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	4
2.1 สมการแสดงความสัมพันธ์ของการไหลภายในท่อ	7
2.1.1 สมการสมดุลมวลสาร	7
2.1.2 สมการสมดุลพลังงาน	9
2.1.3 สมการสมดุลโมเมนตัม	10
2.2 การไหลแบบราบเรียบ	10
2.3 การไหลแบบปั่นป่วน	16
2.3.1 ชั้นขอบเขต	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 โมเมนตัมฟลักซ์ของความปั่นป่วน (Turbulent momentum flux)	18
2.3.3 ทฤษฎีความยาวของการผสม	20
2.4 ผลของทางเข้า	23
2.5 ความเสียดทานของของไหลในการไหลในทิศทางเดียว	24
2.5.1 การทดลองหาค่าความดันลด	25
2.5.2 ความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานในท่อเรียบ	26
2.5.3 การสูญเสียจากการเสียดทานในท่อขรุขระ	28
2.5.4 แฟกเตอร์ความขรุขระ	29
บทที่ 3 การไหลผ่านสิ่งกีดขวาง	31
3.1 แดรกจากแรงเสียดทานที่ผิว	34
3.2 แดรกจากความดัน	34
3.3 การแยกชั้นขอบเขตและการเกิดเวค (Boundary layer separation and wake formation)	36
บทที่ 4 การออกแบบอุปกรณ์เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลภายในท่อ	41
4.1 ขั้นตอนการออกแบบอุปกรณ์เพื่อศึกษาการไหลในท่อเปล่า	42
4.1.1 การเจาะถึงเพื่อติดตั้งระบบท่อชุดที่ 1	42
4.1.2 การเจาะถึงเพื่อติดตั้งลูกกลอย	43
4.1.3 การขยายขนาดท่อ	43
4.1.4 การกำจัดสิ่งรบกวนที่จะส่งผลกระทบต่อลักษณะการไหล	45
4.1.5 อุปกรณ์สำหรับวัดสี	46
4.1.6 เจาะท่อเพื่อใช้ในการวัดผลต่างความดัน	46
4.2 ขั้นตอนการออกแบบอุปกรณ์เพื่อศึกษาการไหลของน้ำในท่อ	
เมื่อไหลผ่านสิ่งกีดขวาง	47
4.2.1 การต่อท่อชุดที่ 2	47
4.2.2 การติดตั้งสิ่งกีดขวาง	48

4.2.3 อุปกรณ์สำหรับฉีดสี	49
4.2.4 เจาะท่อเพื่อใช้ในการวัดผลต่างความดัน	50
4.3 ภาชนะบรรจุสีที่ใช้ในการทดลอง	51
บทที่ 5 การดำเนินการทดลอง	52
5.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	52
5.2 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4)	52
5.3 ขั้นตอนการทดลอง	53
5.3.1 การทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลของน้ำในท่อเปล่า	53
5.3.2 การทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลของน้ำเมื่อไหลผ่าน สิ่งกีดขวางในท่อ	54
บทที่ 6 ผลการทดลอง	56
6.1 ผลการวัดอัตราการไหลของน้ำเมื่อไหลผ่านท่อเปล่า	56
6.2 ผลการทดลองเมื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลในท่อเปล่า	58
6.3 ผลการทดลองเมื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลผ่านแผ่นระนาบเรียบ	59
บทที่ 7 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	64
7.1 สรุปผลการทดลอง	64
7.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง	65
7.3 ข้อเสนอแนะ	66
เอกสารอ้างอิง	68
ภาคผนวก	69
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลอง	70
ภาคผนวก ข การคำนวณ	73
ภาคผนวก ค คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำ	78
ภาคผนวก ง ค่า K factor	80
ภาคผนวก จ อุปกรณ์การทดลองเพื่อใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์การไหลในท่อ	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ ลักษณะเส้นสีที่ได้จากการทดลอง	86
จ.1 ลักษณะเส้นสีที่ได้จากการทดลองเพื่อการศึกษาการปรากฏการณ์ การไหลในท่อเปล่า	86
จ.2 ลักษณะเส้นสีที่ได้จากการทดลองเพื่อการศึกษาการปรากฏการณ์ การไหลในท่อเมื่อไหลผ่านแผ่นระนาบเรียบ	89
ประวัติผู้เขียน	93



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1	ผลของแรงแดรกที่มีต่อแดรกรวมเมื่อวัตถุมีรูปทรงต่าง ๆ กัน	35
ตารางที่ 6.1	ผลการทดลองและการคำนวณความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านท่อ	56
ตารางที่ 6.2	ผลการทดลองการศึกษาปรากฏการณ์การไหลผ่านแผ่นระนาบเรียบ	59
ตารางที่ 6.3	ผลการทดลองการวัดความดันเมื่อองศาของแผ่นระนาบเรียบมีค่าต่าง ๆ กัน	62
ตารางที่ ก.1	ผลการวัดอัตราการไหลของน้ำ เมื่อองศาการเปิดของวาล์วมีค่าต่าง ๆ กัน	71
ตารางที่ ข.1	ผลการคำนวณที่ได้จากการทดลอง	77
ตารางที่ ค.1	ค่าความหนาแน่นของน้ำในสถานะของเหลว [Christi, 1995]	78
ตารางที่ ค.2	ค่าความหนืดของน้ำในสถานะของเหลว [Christi, 1995]	79
ตารางที่ ง.1	ค่าแฟคเตอร์ K สำหรับข้อต่อต่าง ๆ [Victor, 1961]	80
ตารางที่ ง.2	ค่าความขรุขระของผิวท่อหลาย ๆ ชนิด [Victor, 1961]	82

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	อุปกรณ์การทดลองของเรย์โนลด์	4
รูปที่ 2.2	การไหลลักษณะต่าง ๆ	5
รูปที่ 2.3	ความต่อเนื่องของการไหล	7
รูปที่ 2.4	การไหลแบบต่อเนื่องผ่านท่อกระแส (Stream tube)	8
รูปที่ 2.5	การไหลในท่อ	9
รูปที่ 2.6	ของไหลที่เป็นนิวโตเนียน และ นอนนิวโตเนียน	12
รูปที่ 2.7	ลักษณะของโปรไฟล์ของการไหลในท่อ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ	13
รูปที่ 2.8	ลักษณะของโปรไฟล์ของความเร็วของของไหลแบบนิวโตเนียนที่สภาวะคงตัว	15
รูปที่ 2.9	ชั้นขอบเขต	17
รูปที่ 2.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของไหลกับเวลา	18
รูปที่ 2.11	การพัฒนาของชั้นขอบเขตในท่อ	23
รูปที่ 2.12	อุปกรณ์การทดลองหาค่าความดัน	25
รูปที่ 2.13	กราฟแสดงค่าความดันลดสำหรับของไหลชนิดหนึ่งในท่อแต่ละชนิด	26
รูปที่ 2.14	ค่าแฟคเตอร์ความเสียดทานในท่อ	30
รูปที่ 3.1	ลักษณะของท่อก่อนทำการออกแบบ	32
รูปที่ 3.2	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและสัมประสิทธิ์ลีท์สำหรับแผ่นระนาบเรียบ ที่เอียงทำมุมต่าง ๆ กัน	33
รูปที่ 3.3	ชั้นขอบเขตของการแยกไหล	37
รูปที่ 3.4	ลักษณะการเกิดเวค	38
รูปที่ 3.5	แผ่นระนาบเรียบตั้งฉากกับการไหล	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1	ลักษณะของท่อก่อนทำการออกแบบ	41
รูปที่ 4.2	การติดตั้งระบบท่อ	42
รูปที่ 4.3	การติดตั้งลูกกลอย	43
รูปที่ 4.4	การขยายขนาดท่อ	44
รูปที่ 4.5	ลักษณะของข้อต่อที่ใช้ในการขยายขนาดท่อ	45
รูปที่ 4.6	a) การติดตั้งแผ่นกระจายการไหล b) ลักษณะของแผ่นกระจายการไหลที่ใช้	45
รูปที่ 4.7	การเจาะท่อเพื่อทำการฉีดสี	46
รูปที่ 4.8	ตำแหน่งการเจาะรูเพื่อต่อเข้ากับமானอมิเตอร์เพื่อวัดความดัน	47
รูปที่ 4.9	การต่อท่อชุดที่ 2	47
รูปที่ 4.10	ลักษณะข้อต่อ	48
รูปที่ 4.11	การติดตั้งแผ่นระบายเรียบขวางการไหล	48
รูปที่ 4.12	ลักษณะของแผ่นระบายเรียบขวางการไหล	49
รูปที่ 4.13	การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้หมุนเพื่อท่อปรับองศา	49
รูปที่ 4.14	การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับฉีดสี	50
รูปที่ 4.15	ตำแหน่งการเจาะรูเพื่อต่อเข้ากับமானอมิเตอร์เพื่อวัดความดัน	50
รูปที่ 4.16	ลักษณะของท่อที่ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ของการไหลภายในท่อ	51
รูปที่ 6.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วน้ำที่ไหลผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.4 ซม. และปริมาณการเปิดของวาล์ว	57
รูปที่ 6.2	ลักษณะเส้นสีกี่สังเกตได้เมื่อองศาของแผ่นระบายเรียบ มีค่าเท่ากับ 0 ถึง 10 องศา	61
รูปที่ 6.3	ลักษณะเส้นสีกี่สังเกตได้เมื่อองศาของแผ่นระบายเรียบ มีค่าเท่ากับ 10 ถึง 90 องศา	61
รูปที่ 6.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดและปริมาณการเปิดของวาล์ว	63
รูปที่ ข.1	ลักษณะท่อเมื่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน	74
รูปที่ ง.1	ลักษณะข้อต่อลดขนาดแบบคู่	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ง.2	ลักษณะข้อต่อขยายขนาดแบบคู่	81
รูปที่ จ.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์การไหลในท่อ	83
รูปที่ จ.2	การควบคุมระดับของน้ำโดยใช้ตุลกลอย	84
รูปที่ จ.3	ภาชนะบรรจุสี	85
รูปที่ ฉ.1	ลักษณะเส้นสีในช่วงการไหลแบบราบเรียบที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ประมาณ 1171	86
รูปที่ ฉ.2	ลักษณะเส้นสีในช่วงการไหลในช่วงเปลี่ยนที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ประมาณ 2800	87
รูปที่ ฉ.3	ลักษณะเส้นสีในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ประมาณ 6100	88
รูปที่ ฉ.4	ลักษณะเส้นสีเมื่อแผ่นระนาบเรียบเอียงทำมุม 0 องศา	89
รูปที่ ฉ.5	ลักษณะเส้นสีเมื่อแผ่นระนาบเรียบเอียงทำมุม 20 องศา	90
รูปที่ ฉ.6	ลักษณะเส้นสีเมื่อแผ่นระนาบเรียบเอียงทำมุม 45 องศา	91
รูปที่ ฉ.7	ลักษณะเส้นสีเมื่อแผ่นระนาบเรียบเอียงทำมุม 90 องศา	92

สัญลักษณ์

ตัวอักษรตัวใหญ่

A	=	พื้นที่หน้าตัดของท่อ, ตารางเมตร
A_1	=	พื้นที่หน้าตัดของท่อ ณ ตำแหน่ง 1 (รูปที่ 2.4), ตารางเมตร
A_2	=	พื้นที่หน้าตัดของท่อ ณ ตำแหน่ง 2 (รูปที่ 2.4), ตารางเมตร
C	=	ค่าคงที่ (สมการ 2.30)
C_D	=	สัมประสิทธิ์แดก
C_L	=	สัมประสิทธิ์ลิฟท์
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ, ความยาว
D	=	แรงแดรก (สมการ 3.3)
D_p	=	แดรกจากความดัน
D_F	=	แดรกจากแรงเสียดทาน
D_T	=	แดรกรวม
ΣF	=	ผลรวมของความสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ
f	=	fanning friction factor
g	=	แรงโน้มถ่วงของโลก = 9.81 เมตร/วินาที ²
K_c	=	สัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากข้อต่อที่มีลักษณะลดขนาดทันทีทันใด
K_{ex}	=	สัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากข้อต่อที่มีลักษณะขยายขนาดทันทีทันใด
K_f	=	สัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากข้อต่อหรือวาล์วต่าง ๆ ภายในท่อ
k	=	ค่าคงที่
L	=	ความยาวท่อ, เมตร
L	=	แรงลิฟท์ (สมการ 3.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L_c	=	ความยาวที่ทางเข้า, เมตร
l	=	ความยาวของการผสม, เมตร
M	=	อัตราการไหลของมวล, กิโลกรัม/วินาที
N_{Re}	=	ค่าเรย์โนลด์ส์นับเบอร์
P	=	ความดันภายในท่อ ณ ตำแหน่งใด ๆ, ปาสกาล
P_L	=	ความดันสถิตยัที่กระทำต่อผิววัตถุ, ปาสกาล
P_1	=	ความดันภายในท่อ ณ ตำแหน่งที่ 1, ปาสกาล
P_2	=	ความดันภายในท่อ ณ ตำแหน่งที่ 2, ปาสกาล
Q	=	อัตราการไหลของของไหล, ลูกบาศก์เมตร/วินาที
R	=	รัศมีของท่อ, เมตร
r	=	รัศมีของท่อ ณ ตำแหน่งใด ๆ, เมตร
T	=	คาบเวลา, วินาที
t	=	เวลา, วินาที
$\bar{V}$	=	ความเร็วเฉลี่ยของของไหลในท่อ, เมตร/วินาที
$\bar{V}_x$	=	ความเร็วของของไหล ณ ตำแหน่งใด ๆ ในแนวแกน x, เมตร/วินาที
$\bar{V}_1$	=	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล ณ ตำแหน่งที่ 1 (รูปที่ 2.4 และ 2.5), เมตร/วินาที
$\bar{V}_1$	=	ความเร็วเฉลี่ยของของไหลในท่อขนาดเล็ก (สมการที่ 2.10), เมตร/วินาที
$\bar{V}_2$	=	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล ณ ตำแหน่งที่ 2 (รูปที่ 2.4 และ 2.5), เมตร/วินาที
$\bar{V}_2$	=	ความเร็วเฉลี่ยของของไหลในท่อขนาดใหญ่ (สมการที่ 2.10), เมตร/วินาที
V_{max}	=	ความเร็วที่มากที่สุด
V^*	=	ความเร็วของของไหลในเทอมไร้หน่วย
$\dot{V}$	=	ความเร็วของการเสียดทาน, เมตร/วินาที
V'_x	=	ความเร็วเนื่องจาก eddy ในแนวแกน x, เมตร/วินาที
V'_y	=	ความเร็วเนื่องจาก eddy ในแนวแกน y, เมตร/วินาที
V'_z	=	ความเร็วเนื่องจาก eddy ในแนวแกน z, เมตร/วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V	=	ปริมาตรของของไหล (ภาคผนวก ข), ลูกบาศก์เมตร
y'	=	ระยะห่างจากผนังท่อ, เมตร
y^+	=	ระยะห่างจากผนังท่อในเทอมไร้หน่วย, เมตร
z_1	=	ความสูงของท่อ ณ ตำแหน่งที่ 1 จากระดับอ้างอิง (รูปที่ 2.5), เมตร
z_2	=	ความสูงของท่อ ณ ตำแหน่งที่ 2 จากระดับอ้างอิง (รูปที่ 2.5), เมตร
W_s	=	งานของปั๊มที่ใช้ในระบบ, จูล/กิโลกรัม

ตัวอักษรกรีก

α	=	ค่าแฟคเตอร์แก้ไขสมการ
δ_L	=	ชั้นย่อยความหนืด
δ_T	=	ชั้นขอบเขตความปั่นป่วน
θ	=	มุมที่ทำกับแนวระดับ, องศา
μ	=	ความหนืดของของไหล, กิโลกรัม/เมตร/วินาที
μ_e	=	ความหนืดของ eddy, กิโลกรัม/เมตร/วินาที
ρ	=	ความหนาแน่นของของไหล, กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
τ_{rx}	=	ความเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวในแนวรัศมีโดยมีทิศในแนวแกน x
τ_w	=	ความเค้นเฉือนที่กระทำต่อผนังท่อ
τ'_{xx}	=	ความเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวในแนวแกน x โดยมีทิศในแนวแกน x
τ'_{xy}	=	ความเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวในแนวแกน x โดยมีทิศในแนวแกน y
τ'_{xz}	=	ความเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวในแนวแกน x โดยมีทิศในแนวแกน z
τ'_{yx}	=	ความเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวในแนวแกน y โดยมีทิศในแนวแกน x
τ'_{yy}	=	ความเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวในแนวแกน y โดยมีทิศในแนวแกน y
τ'_{yz}	=	ความเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวในแนวแกน y โดยมีทิศในแนวแกน z
τ'_{zx}	=	ความเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวในแนวแกน z โดยมีทิศในแนวแกน x
τ'_{zy}	=	ความเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวในแนวแกน z โดยมีทิศในแนวแกน y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

τ'_{zz} = ความเค้นเฉือนที่กระทำบนพื้นผิวในแนวแกน z โดยมีทิศในแนวแกน z

ตัวห้อย

c = ลดขนาดทันทีทันใด (สมการที่ 2.10)

c = การหมุนวน (สมการที่ 2.29)

ex = ขยายขนาดทันทีทันใด

f = วาล์ว

r = ในแนวรัศมี

s = ระบบ

x = ในแนวแกน x

y = ในแนวแกน y

z = ในแนวแกน z

w = ศนึ่งท่อ

1 = ที่ตำแหน่ง 1

2 = ที่ตำแหน่ง 2

ตัวโหน

' = การหมุนวน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

การเคลื่อนที่ของของไหลนับได้ว่า เข้ามามีบทบาทสำคัญในวงการอุตสาหกรรมเคมีเป็นอย่างมาก ซึ่งส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการขนถ่ายมวลสารหรือผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ โดยผ่านท่อ จากรายงานการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อลักษณะการไหลอย่างมาก คือ ความเร็วของของไหลที่ไหลภายในท่อ ความดันลดยที่เกิดขึ้น ตลอดจนสิ่งกีดขวางที่ปรากฏอยู่ภายในท่อ สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น ในบางอุตสาหกรรมอาจจะมีการไหลที่เป็นไปอย่างราบเรียบที่เรียกว่า Laminar flow เช่น อุตสาหกรรมสี น้ำมันเตา ซึ่งของไหลจะมีความหนืดสูง หรือในบางอุตสาหกรรมอาจจำเป็นต้องมีการไหลแบบปั่นป่วนที่เรียกว่า Turbulent flow เช่น การฉีดสีเพื่อการผสมในท่อรูปตัวที (T-Mixing Injection) เพื่อให้มีการผสมกันได้ดีภายในท่อ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ดังกล่าว เพื่อให้ทราบและเข้าใจถึงพื้นฐานของการเกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ และสามารถนำไปพัฒนาเพื่อให้ได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ตามต้องการ

ในโครงการนี้เป็นการออกแบบลักษณะและขนาดของท่อเพื่อใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของน้ำ เนื่องจากผลกระทบต่าง ๆ ได้แก่ อัตราการไหลหรือความเร็วของน้ำ ความดันลดยที่เกิดขึ้น และการไหลผ่านวัตถุลักษณะต่าง ๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 ออกแบบอุปกรณ์เพื่อศึกษาสภาพการไหลของน้ำในระดับห้องปฏิบัติการ
- 1.2.2 เพื่อให้สามารถเข้าใจ และสามารถอธิบายถึงสภาพการเคลื่อนที่ของของไหล อันเนื่องมาจากผลกระทบของความเร็ว และความดันที่เกิดขึ้น
- 1.2.3 เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ของของไหลเมื่อไหลผ่านสิ่งกีดขวาง

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับปรากฏการณ์ของการไหลของน้ำในท่อทรงกระบอกในแนวนอน และออกแบบระบบท่อเพื่อใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์การไหลของน้ำ โดยให้ครอบคลุมถึงปรากฏการณ์ของการไหลทั้ง 3 แบบ คือ การไหลแบบราบเรียบ การไหลในช่วงเปลี่ยน และการไหลแบบปั่นป่วน
- 1.3.2 ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับปรากฏการณ์ของการไหลของน้ำ เมื่อไหลผ่านสิ่งกีดขวาง และออกแบบระบบท่อเพื่อใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์การไหลของน้ำ เมื่อไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบเรียบทำมุมต่างๆ กัน ภายในท่อ
- 1.3.3 สร้างอุปกรณ์เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลภายในท่อ ตามการออกแบบเพื่อใช้ในการทดลองการศึกษาปรากฏการณ์การไหลของน้ำ
- 1.3.4 ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะการไหล และค่าความดันที่เกิดขึ้น เช่น อัตราเร็วของน้ำและสิ่งกีดขวางลักษณะต่างๆ เป็นต้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 มีความรู้ความเข้าใจในลักษณะการไหลของของไหล
- 1.4.2 มีความรู้ความเข้าใจถึงสมการที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์ของการไหลของของไหลในลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.3 เรียนรู้ขั้นตอนการดำเนินงานในการออกแบบ และการเก็บข้อมูลในการทำงานโดยอาศัยความรู้ที่ได้จากการศึกษาทั้งทางด้านทฤษฎีและปฏิบัติ

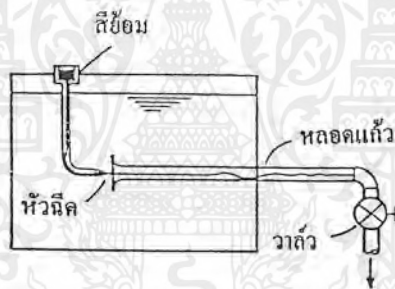
1.4.4 สามารถออกแบบและสร้างอุปกรณ์ในการศึกษาลักษณะการไหลของน้ำ



บทที่ 2

ทฤษฎี

จากการศึกษาถึงปรากฏการณ์การไหลภายในท่อ โดยการทดลองของ Osborn Reynolds ซึ่งใช้เครื่องมือดังรูปที่ 2.1 [Massey, n.d.]

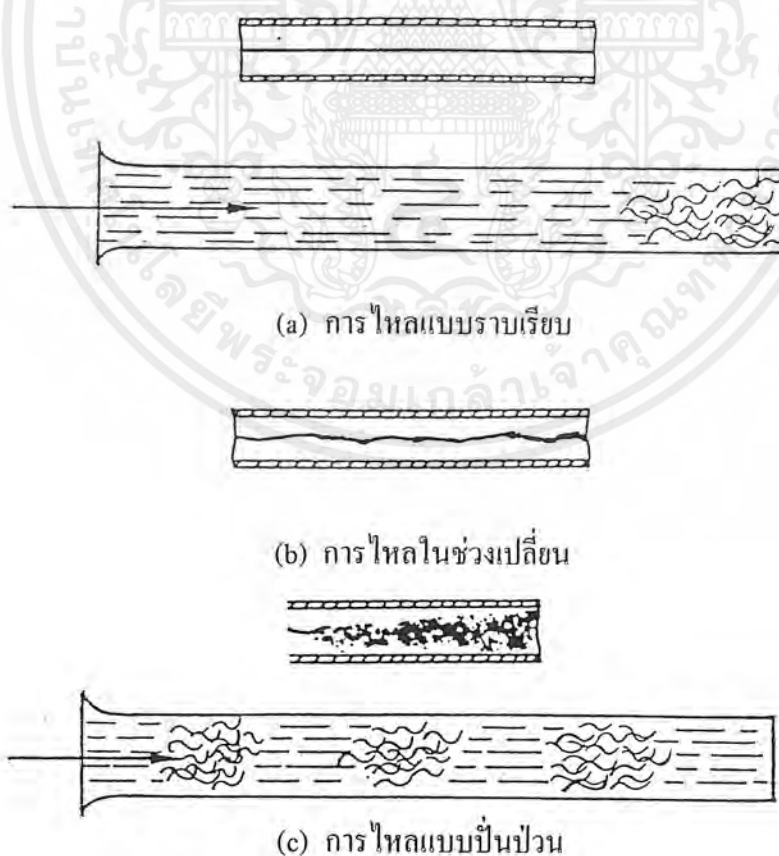


รูปที่ 2.1 อุปกรณ์การทดลองของเรย์โนลด์

เมื่อพิจารณาความดันที่เกิดขึ้นภายในท่อ ที่อัตราการไหลของของไหลต่าง ๆ พบว่า เมื่อของไหลมีอัตราการไหลต่ำ ๆ ค่าความดันจะแปรผัน โดยตรงกับอัตราการไหลยกกำลังหนึ่ง กล่าวคือ สัมพันธ์กับอัตราไหลเป็นแบบเส้นตรง และเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลขึ้นเรื่อย ๆ พบว่า ความดันที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับอัตราไหลแบบไม่เป็นเส้นตรง

เมื่อทำการศึกษาต่อไปโดยทำการฉีดสีย้อมเข้าสู่ของไหล ที่ไหลภายในท่อด้วยสภาวะคงตัว พบว่าที่อัตราการไหลของของไหลต่ำ ๆ คือในช่วงที่มีความสัมพันธ์กับค่าความดันเป็นแบบเส้นตรงนั้น สีย้อมที่ฉีดลงไป จะมีลักษณะราบเรียบ และเป็นเส้นเรียวเล็ก แต่เมื่อเคลื่อนที่ต่อไปอีก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีย้อมจะเกิดการกระจายตัวออก เรียกลักษณะการไหลแบบนี้ว่า การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ดังรูปที่ 2.2 (a) เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งซึ่งลักษณะของสีย้อมที่ฉีดเข้าสู่กระแสน้ำไหลจะเริ่มแกว่ง อนุภาคของของไหลเริ่มเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบมากขึ้น จนกระทั่งลักษณะของสีย้อมไม่เป็นเส้นตรงอีกต่อไป เรียกการไหลช่วงนี้ว่า การไหลในช่วงเปลี่ยน (Transition flow) ดังรูปที่ 2.2 (b) และเมื่ออัตราการไหลของของไหลเพิ่มมากขึ้นจนเลยช่วงเปลี่ยนหรือในช่วงที่อัตราการไหลมีความสัมพันธ์กับค่าความดันตกแบบไม่เป็นเส้นตรง ลักษณะของสีย้อมที่ฉีดลงไปจะกระจายตัวออก การไหลของของไหลไม่สม่ำเสมอ อนุภาคของของไหลจะเคลื่อนที่ไปได้ระยะทางสั้น ๆ และชนกับอนุภาคอื่น ๆ อย่างไรก็ดีสภาพ ทำให้เกิดการผสมกันจนกระจายเต็มท่อ เรียกลักษณะการไหลแบบนี้ว่า การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ดังรูปที่ 2.2 (c) [Massey, n.d.; de Nevers, 1991]



รูปที่ 2.2 การไหลลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการจัดกลุ่มตัวแปรให้อยู่ในเทอมไร้หน่วย เพื่ออธิบายถึงลักษณะของการไหล จะได้ว่า

$$N_{Re} = \frac{D\bar{V}\rho}{\mu} = \frac{\rho\bar{V}^2}{\mu\bar{V}/D} \quad (2.1)$$

โดย N_{Re} = ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

จากสมการที่ 2.1 ตัวแปรในเทอมเศษ ($\rho\bar{V}^2$) แสดงถึง ค่าโมเมนตัมพลักซ์ของความเฉื่อย ซึ่งเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของของไหลภายในท่อในทิศทางกับแกนท่อ หรือในทิศการไหลของของไหล

ตัวแปรในเทอมส่วน ($\mu\bar{V}/D$) แสดงถึง ค่าโมเมนตัมพลักซ์ของความหนืด ซึ่งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเค้นเฉือนจากความหนืด ที่มีทิศในแนวรัศมีของท่อ โดยจะแสดงถึงการกระทำระหว่างโมเลกุล และแรงที่จะเหนี่ยวนำอนุภาคให้เกิดการเคลื่อนที่แบบไร้เสถียรภาพ

จากการศึกษาเกี่ยวกับของไหลหลายๆ ชนิด สามารถสรุปได้ว่า

- 1) การไหลแบบราบเรียบ จะเกิดขึ้นเมื่อมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำ คือมีค่าน้อยกว่า 2100 ซึ่งในช่วงนี้จะมีผลของจากความหนืดอย่างมาก
- 2) การไหลในช่วงเปลี่ยน จะเกิดขึ้นเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าระหว่าง 2100 ถึง 4000
- 3) การไหลแบบปั่นป่วน จะเกิดขึ้นเมื่อมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูง คือ มีค่ามากกว่า 4000 ซึ่งในช่วงนี้ จะมีผลของความเฉื่อยในการเหนี่ยวนำอนุภาคให้เคลื่อนที่ไปตามแนวแกนของท่อ มากกว่าการเคลื่อนที่ในแนวรัศมี โดยสภาวะการไหลจะถูกกำหนดด้วยค่าความหนาแน่นของของไหล และไม่ขึ้นกับค่าความหนืดของของไหล โดยเฉพาะที่ระดับของการปั่นป่วนมีค่ามาก ๆ คือ มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูงมากๆ นั่นเอง

2.1 สมการแสดงความสัมพันธ์ของการไหลภายในท่อ

ในกรณีที่ลักษณะการไหลของของไหลมีสภาวะคงตัว และพัฒนาเต็มที่แล้ว (Fully developed) มักจะจัดรูปของสมการสมการสมดุลมวลสาร สมดุลพลังงาน และสมการโมเมนตัมให้อยู่ในรูปแบบที่สะดวกต่อการนำไปใช้งาน ดังนี้

2.1.1 สมการสมดุลมวลสาร

พิจารณารูปที่ 2.3 [Douglas, Gasiorek, and Swaffiells, 1993]



รูปที่ 2.3 ความต่อเนื่องของการไหล

สามารถเขียนสมการสมดุลมวลสารภายในปริมาตรที่กำหนดดังรูปที่ ได้ดังนี้

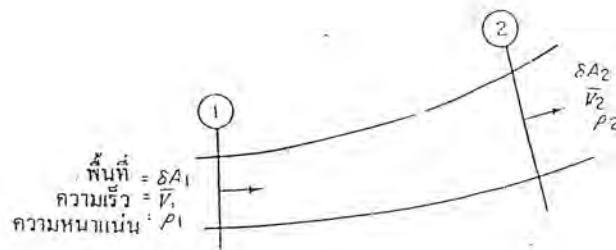
$$\begin{array}{l} \text{มวลของของไหลที่เข้า} \\ \text{ต่อหน่วยเวลา} \end{array} = \begin{array}{l} \text{มวลของของไหลที่ออก} \\ \text{ต่อหน่วยเวลา} \end{array} + \begin{array}{l} \text{มวลที่สะสม} \\ \text{ต่อหน่วยเวลา} \end{array} \quad (2.2)$$

ที่สภาวะคงตัว มวลของของไหลในปริมาตรที่กำหนดดังรูปที่ มีค่าคงที่ จะได้ว่า

$$\begin{array}{l} \text{มวลของของไหลที่เข้า} \\ \text{ต่อหน่วยเวลา} \end{array} = \begin{array}{l} \text{มวลของของไหลที่ออก} \\ \text{ต่อหน่วยเวลา} \end{array} \quad (2.3)$$

พิจารณาระบบดังรูปที่ 2.4 [Douglas, Gasiorek, and Swaffiells, 1993]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การไหลแบบต่อเนื่องผ่านท่อกระแส (stream tube)

มวลของของไหลที่เข้า (ณ ตำแหน่ง 1) ต่อหน่วยเวลา $= \rho_1 A_1 \bar{V}_1$

มวลของของไหลที่ออก (ณ ตำแหน่ง 2) ต่อหน่วยเวลา $= \rho_2 A_2 \bar{V}_2$

ณ สภาวะการไหลคงตัวจะได้ว่า

$$\rho_1 A_1 \bar{V}_1 = \rho_2 A_2 \bar{V}_2 = \text{ค่าคงที่} \quad (2.4)$$

ถ้าความเร็ว ณ ตำแหน่ง 1 และ 2 เป็นค่าคงที่ สามารถเขียนสมการได้ว่า

$$\rho_1 A_1 \bar{V}_1 = \rho_2 A_2 \bar{V}_2 = \dot{m} \quad (2.5)$$

ถ้าของไหลที่ใช้เป็นของไหลอัดตัวไม่ได้ ค่าความหนาแน่นจะเป็นค่าคงที่ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการความต่อเนื่อง ได้ดังนี้

$$A_1 \bar{V}_1 = A_2 \bar{V}_2 \quad (2.6)$$

และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการไหล และความเร็วของของไหล ดังนี้

$$\begin{aligned} Q &= \int_A \bar{V}_x dA \\ &= \pi \int_0^R 2r \bar{V}_x dr \\ &= \pi \int_A \bar{V}_x d(r^2) \end{aligned} \quad (2.7)$$

อินทิเกรตโดยวิธีแยกส่วน (Integrate by part) จะได้

$$Q = -\pi \int_A r^2 d\bar{V}_x = -\pi \int_0^R r^2 \frac{d\bar{V}_x}{dr} dr \quad (2.8)$$

2.1.2 สมการสมดุลพลังงาน

พิจารณาท่อทรงกระบอก ความยาว L รัศมี R ลักษณะเอียงทำมุม θ กับแนวระดับ ดังรูปที่ 2.5 [Darby Ron, 1996]



รูปที่ 2.5 การไหลในท่อ

จากรูปสามารถจัดรูปสมการสมดุลพลังงาน ได้ดังนี้

$$\frac{1}{2\alpha}(\bar{V}_2^2 - \bar{V}_1^2) + g(z_2 - z_1) + \frac{(P_2 - P_1)}{\rho} + \Sigma F + W_s = 0 \quad (2.9)$$

เมื่อ ΣF = ผลรวมของความสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งมีค่าดังนี้

$$\Sigma F = 4f \frac{\Delta L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} + K_{ex} \frac{\bar{V}_1^2}{2} + K_c \frac{\bar{V}_2^2}{2} + K_f \frac{\bar{V}_1^2}{2} \quad (2.10)$$

เรียกสมการ (2.9) ว่า สมการประยุกต์ของ Bernoulli [de Nevers, 1991] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 สมการสมดุลโมเมนต์

พิจารณาปริมาตรของของไหลในท่อความยาว L รัศมี R ดังรูปที่ 2.5 ณ ตำแหน่งกลางท่อ สามารถเขียนสมการสมดุลโมเมนต์ได้ดังนี้

$$\Sigma F_x = (P_1 - P_2)\pi r^2 - \pi r^2 L g \sin\theta + 2\pi r L \tau_{rx} \quad (2.11)$$

โดย
$$\tau_{rx} = \frac{\Delta\phi_r}{2L} = -\tau_w \frac{r}{R} \quad (2.12)$$

$$\Delta\phi = \Delta P + \rho g z = \Delta P + \rho g L \sin\theta$$

$$\tau_w = \text{แรงกระทำของของไหลต่อผนังท่อในทิศ } +x$$

จากสมการ (8) จะเห็นว่า τ_{rx} มีค่าเป็นลบ เนื่องจากความเค้นเนื่องแรงเฉือน (Shear stress) เกิดในทิศ $-x$

2.2 การไหลแบบราบเรียบ

การไหลแบบราบเรียบ เป็นสภาวะการไหลที่มีลักษณะคงที่สม่ำเสมอ โดยในการไหลแต่ละครั้งจะมีลักษณะที่เหมือนกัน คือ อนุภาคของของไหลจะไม่เคลื่อนที่ตัดขวางการไหลของอนุภาคของของไหลอื่น ๆ ที่อยู่รอบๆ ทำให้เกิดสภาวะการไหลที่เป็นระเบียบ ลักษณะดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ที่สภาวะซึ่งมีความเร็วของของไหลต่ำพอที่จะทำให้แรงเนื่องจากความหนืด มีผลมากกว่าความเฉื่อย (พิจารณาจากสมการที่ (2.1)) ซึ่งแรงเนื่องจากความหนืดจะช่วยทำให้อนุภาคของของไหลพยายามรักษาสภาพการเคลื่อนที่ ทำให้ไม่เคลื่อนที่ออกนอกเส้นทางจนไปชนกับอนุภาคอื่น

ความเค้นเนื่องมาจากความหนืด (Viscous stress) จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นของอนุภาคของของไหล โดยที่ความเค้นเนื่องมาจากความหนืดจะเป็นแรงที่จะทำให้เกิดแนวโน้มในการที่จะต้านการเคลื่อนที่ดังกล่าว ซึ่งนิวตันได้แสดงสมการความสัมพันธ์ดังนี้ [Darby Ron, 1996]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

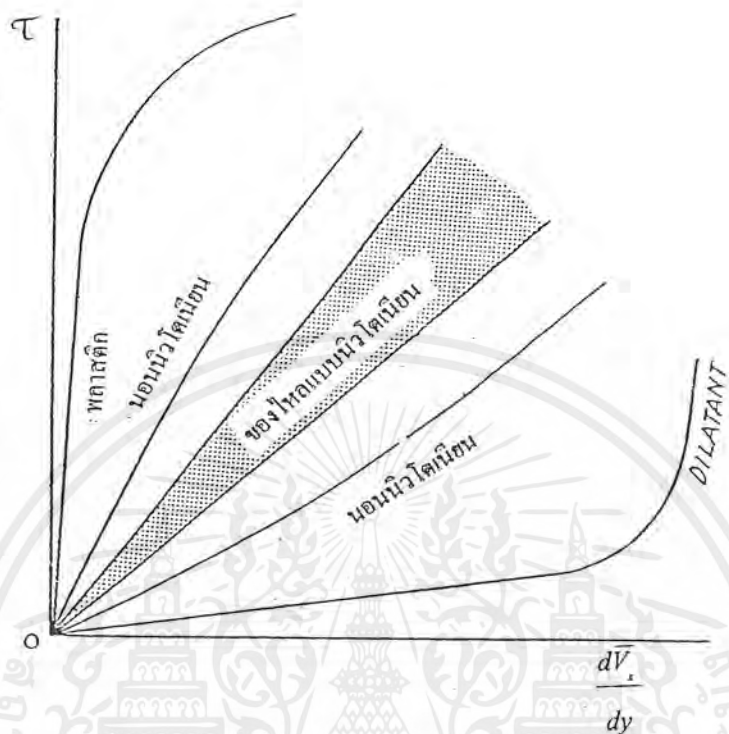
$$\tau_{rx} = \mu \frac{d\bar{V}_x}{dy} \quad (2.13)$$

โดย $\frac{d\bar{V}_x}{dy}$ = อัตราการเพิ่มของความเร็วในทิศทางขนานกับการไหล เมื่อเทียบกับระยะทาง y ซึ่งตั้งฉากกับทิศการไหล

μ = สัมประสิทธิ์ความหนืด

τ_{rx} = ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นที่ผิวที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ โดยมีทิศทางเดียวกับ y

จากสมการ (2.13) เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า τ_{rx} กับค่า $\frac{d\bar{V}_x}{dy}$ ของของไหลชนิดต่าง ๆ แล้ว ได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงผ่านจุดกำเนิดดังรูปที่ 2.6 จะเรียกของไหลนี้ว่าเป็นของไหลแบบนิวโตเนียน [de Nevers, 1991]



รูปที่ 2.6 ของไหลที่เป็นนิวโตเนียนและนอนนิวโตเนียน

แทนค่า τ_{rx} จากสมการ (2.9) ในสมการที่ (2.4) จะได้ว่า

$$Q = -\frac{\pi}{\mu_0} \int_0^R r^2 \tau_{rx} dr \quad (2.14)$$

และสำหรับการไหลภายในท่อ จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{\tau_{rx}}{\tau_w} = \frac{r}{R}$$

และ

$$\tau_w = \frac{R}{2} \frac{dP}{dx}$$

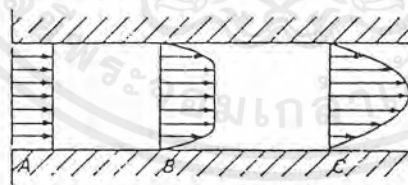
จะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{-\pi\tau_w}{\mu R} \int_0^R r^3 dr \\
 &= \frac{\pi\tau_w R^3}{4\mu} \\
 &= \frac{-\pi R^4}{8\mu} \frac{dP}{dx} \\
 &= \frac{-\pi\Delta P R^4}{8\mu L} \\
 &= \frac{-\pi\Delta P D^4}{128\mu L}
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

เรียกสมการ (2.15) นี้ว่า Hagen-Poiseuille Equation [Darby Ron, 1996]

สมการ (2.15) นี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ และของไหลที่อัดตัวได้ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นน้อยมาก รวมถึงกรณีที่เป็นการไหลแบบราบเรียบที่พัฒนาเต็มที่แล้วเท่านั้น โดยมีสมมติฐานว่าท่อมีลักษณะเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นเส้นตรง นั่นคือรัศมีของความขรุขระในท่อมีน้อยมากเมื่อเทียบกับรัศมีของท่อ R



รูปที่ 2.7 ลักษณะโพรไฟล์ของความเร็วของการไหลในท่อ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ

พิจารณารูปที่ 2.7 [Massey, n.d.] ของไหลที่ไหลเข้าสู่ท่อจะมีความเร็วในแต่ละระนาบเท่ากัน ดังรูป A และเนื่องจากการไหลภายในท่อจะมีการหน่วงเนื่องจากผลของผนังท่อ ซึ่งความเร็วที่ผนังท่อจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นเมื่อของไหลไหลผ่านท่อเข้าไปเรื่อย ๆ จะทำให้เกิดชั้นย่อย (Sublayer) ที่บริเวณใกล้ ๆ กับผนัง ซึ่งจะมีความเร็วลดลงมากกว่าความเร็วในระนาบเดียวกัน ดังรูป B และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากอัตราการไหลของของไหลมีค่าคงที่ ในขณะที่พื้นที่หน้าตัดของท่อมีค่าคงที่ เพื่อที่จะชดเชยความเร็วของชั้นที่ติดกับผนังซึ่งมีความเร็วลดลง ดังนั้นความเร็วที่บริเวณศูนย์กลางท่อซึ่งอยู่ห่างจากผนังท่อมากที่สุดที่จะไม่ได้รับผลกระทบดังกล่าว จึงมีค่าความเร็วสูงขึ้น จนกระทั่งลักษณะโพรไฟล์ของความเร็วในท่อมีลักษณะเป็นพาราโบลา ดังรูป C เรียกว่า “การไหลแบบราบเรียบที่พัฒนาเต็มที่แล้ว” ซึ่งในลักษณะนี้จะเกิดที่ระยะทางห่างจากทางเข้าของท่อก่อนข้างมาก จนไม่ได้รับผลกระทบจากทางเข้า (End effect) เรียกระยะทางนี้ว่า ความยาวที่ทางเข้า (Entrance length) ใช้สัญลักษณ์ L_e ซึ่งเป็นระยะที่ผลต่างของความเร็วสูงสุดของของไหลในท่อและความเร็วของสูงสุดของของไหล ณ ภาวะสุดท้ายซึ่งเป็นค่าคงที่ มีค่าต่างกันประมาณ 1%

จากสมการแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลภายในท่อ

$$Q = \frac{-\pi R^4}{8\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right) \quad (2.16)$$

และสามารถคำนวณหาค่าความเร็วเฉลี่ยของของไหลได้ดังนี้

$$\text{ความเร็วเฉลี่ย} = \frac{\text{อัตราการไหลภายในท่อ}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของท่อ}}$$

$$\frac{Q}{V} = \frac{Q}{\text{Area}}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\left(\frac{-\pi R^4}{8\mu} \frac{dp}{dx} \right)}{\pi R^2} \\ &= \frac{-R^2}{8\mu} \frac{dp}{dx} \end{aligned} \quad (2.17)$$

จากสมการแสดงความเร็วของของไหล ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในท่อ

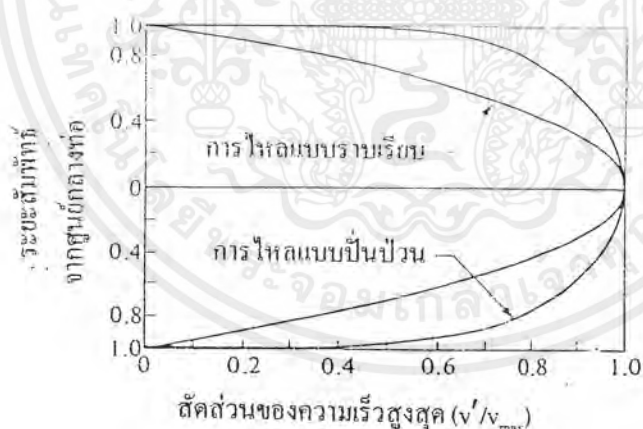
$$\frac{v}{V} = -\frac{1}{4\mu} \frac{dP}{dx} (R^2 - r^2) \quad (2.18)$$

และเนื่องจากการไหลในท่อพบว่าความเร็วของของไหล ณ ตำแหน่งกลางท่อ ($r = 0$) จะมีความเร็วของการไหลมากที่สุด นั่นคือ

$$V_{\max} = \frac{dp}{dx} \frac{R^2}{4\mu} \quad (2.19)$$

$$\frac{v}{V} = \frac{1}{2} \frac{V_{\max}}{V_{\max}}$$

ลักษณะของโปรไฟล์ของความเร็วของของไหลแสดงดังรูปที่ 2.8 [de Nevers, 1991]



รูปที่ 2.8 ลักษณะโปรไฟล์ของความเร็วของของไหลแบบนิวโตเนียนที่สภาวะคงตัว

ต่อไปจะทำการพิจารณา Fanning friction factor สำหรับการไหลในท่อ จากสมการ (2.15)

ถ้าแสดงค่าความเค้นเนื่องจากผนัง (Wall stress, τ_w) ในเทอมของ Fanning friction factor ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau_w = \frac{f \rho V^2}{2} \quad (2.20)$$

ทำการแก้สมการหาค่า f จะได้สมการในเทอมไร้หน่วยของสมการของ Hagen-Poiseuille ดังนี้

$$f = \frac{4\pi D\mu}{Q\rho} = \frac{16\mu}{DV\rho} = \frac{16}{N_{Re}} \quad (2.21)$$

สมการนี้สามารถใช้ได้ในกรณีที่ $N_{Re} < 2100$ เท่านั้น

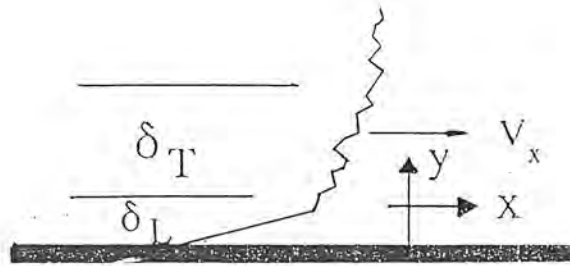
จะเห็นว่าการไหลของของไหลที่เป็นแบบนิวโตเนียน ซึ่งไหลในท่อที่มีลักษณะการไหลแบบราบเรียบนั้น สามารถอธิบายได้โดยอาศัยเทอมไร้หน่วยเพียงกลุ่มเดียว คือ เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ซึ่งมักจะพิจารณาในรูปของ

$$fN_{Re} = 16$$

ซึ่งเป็นค่าคงที่ ดังนั้นถ้าเราทราบเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ก็ไม่จำเป็นต้องทราบคุณสมบัติของของไหล เช่น ความหนาแน่น ความหนืด อัตราการไหล หรือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

2.3 การไหลแบบปั่นป่วน

พิจารณาการไหลในท่อซึ่งมีลักษณะสมมาตร ความเร็วของของไหลจะมีค่าเพิ่มจากศูนย์ที่บริเวณผนังท่อ จนมีค่ามากที่สุดที่บริเวณกลางท่อ ขอบเขตหรือชั้นของการไหลในท่อซึ่งเป็นบริเวณที่ความเร็วของของไหลมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามระยะห่างจากผนังท่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เรียกว่า ชั้นขอบเขต (Boundary layer) [Darby Ron, 1996]



รูปที่ 2.9 ชั้นขอบเขต

2.3.1 ชั้นขอบเขต

จากคุณลักษณะของของไหล 2 ข้อ คือ

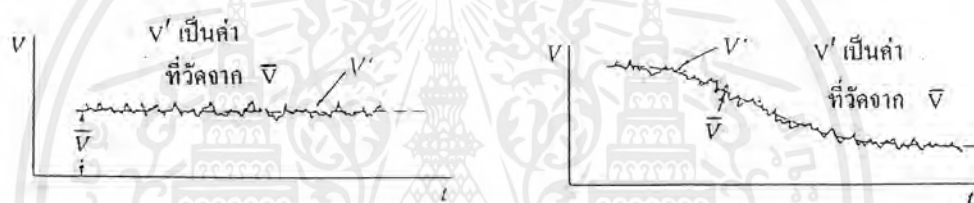
- 1) ความเร็วของของไหลเป็นไปอย่างต่อเนื่อง
- 2) ความเร็วบริเวณที่ของไหลสัมผัสกับผนังท่อ จะมีค่าเท่ากับศูนย์

จะทำให้เกิดชั้นขอบเขตที่บริเวณติดกับผนังท่อ ซึ่งจะมีผลของความเฉื่อยทำให้ความเร็วมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางจากผนังท่อ โดยความเร็วจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ณ บริเวณนี้ของไหลจะมีการไหลแบบราบเรียบเสมอ เรียกชั้นนี้ว่า ชั้นย่อยลามินาร์ (Laminar sublayer) หรือนิยมเรียกว่า ชั้นย่อยความหนืด (Viscous sublayer) จากรูปที่ 2.9 สามารถแสดงด้วยสัญลักษณ์ δ_L สำหรับในกรณีที่การไหลภายในท่อเป็นแบบราบเรียบ ($N_{Re} < 2100$) ค่า δ_L จะเท่ากับรัศมีของท่อ ($\delta_L = R$)

บริเวณที่มีระยะห่างจากผนังท่อ ถัดจากชั้นของ δ_L ออกไป ค่าความเร็วของของไหลจะยังคงเปลี่ยนแปลงไปตามระยะห่างจากผนังท่อ (y) เรียกว่า ชั้นขอบเขตความปั่นป่วน (Turbulent boundary layer) จากรูป 2.9 แสดงด้วยสัญลักษณ์ δ_T ส่วนบริเวณที่นอกเหนือจากชั้นนี้ออกไป ความเร็วของของไหลจะมีค่าคงที่ ไม่ขึ้นกับระยะห่างจากผนัง ของไหลจะมีการผสมกันอย่างสมบูรณ์ เรียกว่า แกนของความปั่นป่วน (Turbulent core) และที่บริเวณรอยต่อระหว่าง δ_L กับ δ_T จะค่อยๆ มีการเปลี่ยนแปลง เรียกส่วนนี้ว่า บริเวณบัฟเฟอร์ (Buffer zone)

2.3.2 โมเมนตัมฟลักซ์ของความปั่นป่วน (Turbulent momentum flux)

จากลักษณะการไหลของของไหลแบบปั่นป่วน ดังรูปที่ 2.10 (a) จะเห็นว่าค่าที่เราวัดได้เป็นค่าความเร็วเฉลี่ยของของไหล ซึ่งเขียนแทนด้วย $\bar{V}$ โดยมีค่าเท่ากับ อัตราการไหลของของไหลต่อพื้นที่หน้าตัด (Q/A) ซึ่งจะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา แต่ในความเป็นจริงการไหลแบบปั่นป่วนจะมีความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ดังรูปที่ 2.10 (b) และมีค่าความเร็วที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เขียนแทนด้วย V' โดยเป็นค่าที่วัดเบี่ยงเบนไปจากค่าความเร็วเฉลี่ย



(a) การวัดความเร็วในกรณีที่เป็น
การไหลแบบปั่นป่วนแบบคงที่

(b) การวัดความเร็วในกรณีที่เป็น
การไหลแบบปั่นป่วนแบบไม่คงที่

รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของไหลกับเวลา

ดังนั้น ในการพิจารณาถึงความเร็วของของไหลในกรณีที่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนสามารถอธิบายโดยอาศัยค่าความเร็วเฉลี่ยโดยตำแหน่ง (Local mean velocity) หรือความเร็วเฉลี่ยตามเวลา (Time average velocity) ซึ่งจะเพิ่มเทอมของการแกว่งที่ขึ้นกับเวลา (Time-dependent fluctuating component) หรือ Turbulent eddy เข้ามาเกี่ยวข้อง

สำหรับการไหลในทิศทางเดียว (One dimensional flow) ซึ่งค่าของความเร็วเฉลี่ยจะมีอยู่เพียงทิศทางเดียว คือทิศของการไหล (พิจารณารูป 2.10) แต่จะมีเทอมของ Turbulent eddy ปรากฏอยู่ในทั้ง 3 แกน ดังนั้นจากรูปที่ 2.10 สามารถแสดงเทอมความเร็วตามตำแหน่งได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_x(y, t) = \overline{V_x(y)} + V'_x(y, t) \quad (2.22)$$

$$V_y(y, t) = 0 + V'_y(y, t) \quad (2.23)$$

$$V_z(y, t) = 0 + V'_z(y, t) \quad (2.24)$$

โดย $\overline{V_x}$ = Time average velocity

$$\overline{V} = \frac{1}{T} \int_0^T V_x dt$$

$$\int_0^T \overline{V_x} dt = 0$$

การเคลื่อนที่ถ่ายเท eddy (Eddy motion momentum transport) ซึ่งขึ้นกับองค์ประกอบของโมเมนตัมฟลักซ์ จะมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของความเค้นเฉือน ดังนี้

$$\begin{aligned} \tau'_{xx} &= -\rho(V'_x)^2 & \tau'_{xy} &= -\rho V'_x V'_y & \tau'_{xz} &= -\rho V'_x V'_z \\ \tau'_{yx} &= \tau'_{xy} & \tau'_{yy} &= -\rho(V'_y)^2 & \tau'_{yz} &= -\rho V'_y V'_z \\ \tau'_{zx} &= \tau'_{xz} & \tau'_{zy} &= \tau'_{yz} & \tau'_{zz} &= -\rho(V'_z)^2 \end{aligned} \quad (2.25)$$

เทอมของ Turbulent momentum flux component เหล่านี้ เรียกอีกชื่อว่า ความเค้นของเรย์โนลด์ (Reynolds stress)

จะได้ว่าความเค้นรวมสำหรับของไหลแบบนิวโตเนียน ซึ่งมีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของทั้งความเค้นเนื่องจากความหนืดและความเค้นเนื่องจากความปั่นป่วน ได้ดังนี้

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \overline{V}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{V}_j}{\partial x_i} \right) - \rho V'_i V'_j \quad (2.26)$$

2.3.3 ทฤษฎีความยาวของการผสม

เมื่อทำการพิจารณาถึง Turbulent eddy (ซึ่งมีองค์ประกอบในเทอมของ V'_x, V'_y, V'_z) จะพบว่า eddy จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและหายไป ในระหว่างที่กระบวนการดังกล่าวนี้เกิดขึ้น จะมีการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกันระหว่าง eddy และการไหลเฉลี่ย

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนของของไหลในท่อเรียบ Prandtl ได้ตั้งสมมติฐานว่า

$$V'_x \approx V'_y$$

จะได้ว่า

$$\tau'_{yx} = -\rho V'_x V'_y \approx -\rho (V'_x)^2 \quad (2.27)$$

และสมมติว่า eddy ที่เกิดขึ้นในแต่ละทศนั้น จะเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทาง l ซึ่งเรียกระยะทางนี้ว่า ความยาวของการผสม (Mixing length) ในขณะที่มีการแลกเปลี่ยน โมเมนตัม ระหว่างการไหลเฉลี่ย นั่นคือ

$$\frac{V'_x}{l} \approx \frac{d\bar{V}_x}{dy} \quad (2.28)$$

แทนสมการ (2.19) ใน สมการ (2.20) จะได้

$$\tau'_{yx} = \mu_e \frac{d\bar{V}_x}{dy} \quad (2.29)$$

เมื่อ
$$\mu_e = \rho l^2 \left| \frac{d\bar{V}_x}{dy} \right|$$

เรียก μ_e ว่า eddy viscosity

ค่า μ_e ไม่ใช่คุณสมบัติของของไหล แต่เป็นฟังก์ชันของลักษณะเฉพาะของ eddy (Eddy characteristics) เช่น ความยาวของการผสม หรือองศาของความปั่นป่วน (Degree of turbulent) กับค่าความแตกต่างของความเร็ว (Velocity gradient)

และเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วนในทุกทิศการเคลื่อนที่ จะมีค่าเป็นศูนย์ที่ผนังท่อ Prandtl จึงตั้งสมมติฐานให้ความยาวของการผสมแปรผันกับระยะห่างจากผนังท่อ คือ

$$l = ky \quad (2.30)$$

และสมมติให้ความเค้น eddy มีขนาดเท่ากับ ความเค้นเนื่องจากผนัง นั่นคือ

$$\tau \approx \tau_w \approx (\mu + \mu_e) \frac{d\bar{V}_x}{dy} \quad (2.31)$$

$$\approx \mu_e \left(\frac{\int d\bar{V}_x}{\int dy} \right)$$

$$\tau'_{yx} \approx \tau_w \approx \rho k^2 y^2 \left(\frac{d\bar{V}_x}{dy} \right)^2 \quad (2.32)$$

อินทิเกรตในช่วงของชั้นขอบเขตของความปั่นป่วน (จาก y_1 ถึง y)

$$\frac{\bar{V}_x}{y_{x1}} - \frac{\bar{V}_x}{y} = \frac{1}{k} \left(\frac{\tau_w}{\rho} \right)^2 \ln \left(\frac{y}{y_1} \right) \quad (2.33)$$

เรียกสมการนี้ว่า von Karman equation หรือกฎของผนัง (Law of the wall) [Darby Ron, 1996]

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเทอมไร้มิติได้ดังนี้

$$V^+ = \frac{1}{k} \ln y^+ + C \quad (2.34)$$

$$\text{เมื่อ } V^+ = \frac{\bar{V}_x}{V_*} = \frac{\bar{V}_x}{V_*} \sqrt{\frac{2}{f}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = V \sqrt{\frac{f}{2}}$$

$$y^+ = \frac{yV^*\rho}{\mu} = \frac{yV\rho}{\mu} \sqrt{\frac{f}{2}}$$

V^* เรียกว่า ความเร็วของการเสียดทาน (Friction velocity)

k และ C ใน von Karman equation หาได้จากการทดลองโดยใช้ของไหลแบบนิวโตเนียน ในท่อเรียบพบว่า $k = 0.4$, $C = 5.5$

สมการ (2.34) สามารถใช้ได้เฉพาะกับช่วงของชั้นขอบเขตของความปั่นป่วน (ไม่รวมบริเวณบัฟเฟอร์) ซึ่งค่า $y^+ \geq 26$

สำหรับในกรณีของชั้นย่อยลามินาร์ (δ_L) จะไม่พิจารณาเทอมของ eddy จะได้ว่า

$$\tau_{yx} \approx \tau_w \approx \mu \frac{dV_x}{dy} \quad (2.35)$$

เขียนในเทอมไร้หน่วย จะได้ว่า

$$\frac{dV^+}{dy^+} = 1$$

หรือ

$$V^+ = y^+ \quad (2.36)$$

สมการนี้สามารถใช้ได้ในช่วงที่เป็นชั้นย่อยลามินาร์ ของของไหลที่เป็นแบบนิวโตเนียน นั่นคือจะสามารถใช้ได้ในช่วง $0 \leq y^+ \leq 5$

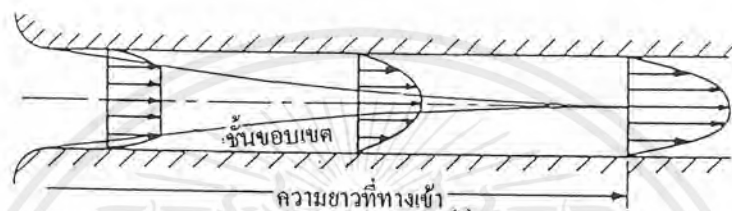
สำหรับในบริเวณบัฟเฟอร์ ซึ่งอยู่ระหว่างชั้นย่อยลามินาร์และชั้นขอบเขตของความปั่นป่วน จะได้ว่า

$$V^+ = -3.05 + 5.0 \ln y^+ \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสมการ (2.37) นี้ ใช้ได้เมื่อ $5 \leq y^+ \leq 26$

2.4 ผลของทางเข้า



(a) การไหลแบบราบเรียบ



(b) การไหลแบบปั่นป่วน

รูปที่ 2.11 การพัฒนาของชั้นขอบเขตในท่อ

พิจารณารูปที่ 2.11 อนุภาคของของไหลทั้งหมดยกเว้นที่บริเวณผนังท่อจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่า ๆ กัน และเมื่อเคลื่อนที่ผ่านท่อเข้าไปเรื่อย ๆ ผลจากแรงเสียดทานที่ผนังจะหน่วงให้ของไหลมีความเร็วช้าลง ทำให้เกิดเป็นชั้นขอบเขตซึ่งจะมีความหนาเพิ่มขึ้น จนกระทั่งหายไปทีละทางหนึ่ง คือ เมื่อขยายขนาดไปจนถึงแกนท่อ และเนื่องจากอัตราการไหลโดยรวมที่ผ่านเข้าไปในท่อ มีค่าเท่ากันในแต่ละระนาบ ดังนั้นความเร็วของของไหลที่ใกล้ ๆ กับแกนท่อ จะต้องมีความเร็วมากขึ้นเพื่อชดเชยกับที่ถูกหน่วงไว้ จนกระทั่งลักษณะของโปรไฟล์ของความเร็วมีลักษณะคงที่

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามทฤษฎี ระยะทางที่เหมาะสมที่ความเร็วมีลักษณะคงที่นั้น จะใช้ระยะทางที่ห่างจากทางเข้าของท่อมาก ดังนั้นเราจึงนิยมใช้การพิจารณาแบบพัฒนาเต็มที่ คือ เมื่อมีความเร็วที่บริเวณแกนท่อ มีค่าต่างจากความเร็วสุดท้าย (คือ ที่ระยะทางไกลจากทางเข้าของท่อมาก ๆ) ประมาณ 1% และระยะทางดังกล่าวนี้ เรียกว่า ความยาวที่ทางเข้า "Entrance length" เขียนแทนด้วย L_e

Langhaar ได้เสนอสมการในการประมาณค่า L_e สำหรับการไหลแบบราบเรียบไว้ว่า

$$L_e = 0.057 (N_{Re}) D \quad (2.38)$$

และถ้าค่า N_{Re} มีค่า 2100 จะได้ว่า

$$L_e = 114 D \quad (2.39)$$

และสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน ระยะทางที่ความเร็วจะเข้าสู่สภาวะคงที่จะใช้ระยะทางสั้นกว่าในกรณีที่เป็นการไหลแบบราบเรียบ และพบว่าค่า Entrance length (L_e) จะมีค่าขึ้นกับ N_{Re} น้อยมาก และจะได้ว่า

$$L_e \approx 50 D \quad (2.40)$$

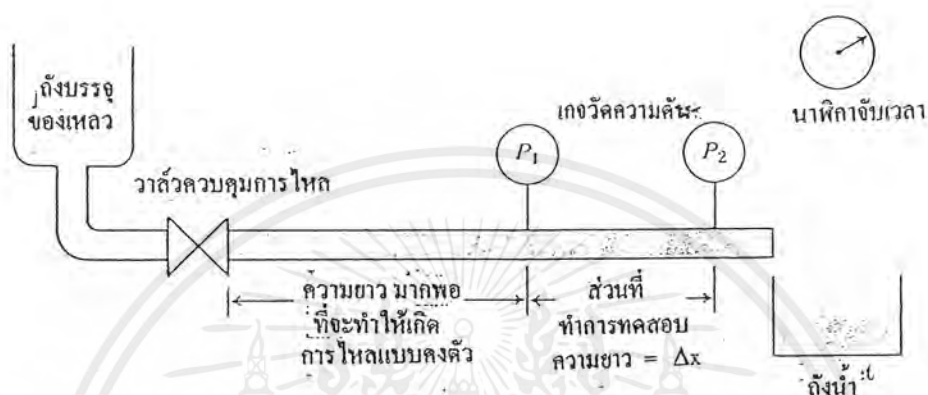
2.5 ความเสียดทานของของไหลในการไหลในทิสทางเดียว

สำหรับของไหลแบบนิวโตเนียน พิจารณาสมการของ Bernoulli

$$\frac{1}{2\alpha} (\overline{V}_2^2 - \overline{V}_1^2) + g(z_2 - z_1) + \frac{(P_2 - P_1)}{\rho} + \Sigma F + W_s = 0$$

เนื่องจากการหาค่าการสูญเสียเนื่องจากความต้านทาน สำหรับการไหลในลักษณะที่เป็น การไหลในทิสทางเดียว เช่น ในกรณีของการไหลในท่อ ดังนั้นในขั้นแรกเราจะทำการพิจารณาถึงค่าความเสียดทานของการไหลในท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ และการไหลมีสภาวะคงตัว

2.5.1 การทดลองหาค่าความดันลด



รูปที่ 2.12 อุปกรณ์การทดลองหาค่าความดันลด

พิจารณารูปที่ 2.12 [Birds; Stewart; and Lightfoot; 1960] ทำการทดลองให้ของไหลไหลผ่านวาล์ว แล้วทำการวัดอัตราการไหลโดยใช้อุปกรณ์รองรับพร้อมทั้งทำการจับเวลา จากนั้นวัดค่าความแตกต่างของความดันที่จุด P_1 และ P_2 แล้วเปลี่ยนอัตราการไหล โดยการปรับวาล์วควบคุมการไหล แล้ววัดค่าความแตกต่างของความดันที่ความเร็วของของไหลนั้น ๆ จากนั้นทำการพล็อตกราฟระหว่าง $\frac{P_1 - P_2}{\Delta x}$ กับอัตราการไหล จะได้ผลแสดงดังรูปที่ 2.13 [Massey, n.d.]



รูปที่ 2.13 ค่าความดันลดสำหรับของไหลชนิดหนึ่งในท่อแต่ละชนิด

จากกราฟดังรูปที่ 2.13 ค่าที่ได้เป็นค่าเฉพาะสำหรับของไหลหนึ่ง ๆ ในท่อหนึ่ง ๆ แต่ลักษณะแนวโน้มสำหรับของไหลต่าง ๆ จะมีลักษณะคล้ายคลึงกัน สามารถสรุปได้ว่า

- 1) ที่สภาวะอัตราการไหลต่ำ ๆ ค่าความดันลดต่อหน่วยความยาวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการไหลยกกำลังหนึ่ง
- 2) ที่สภาวะอัตราการไหลอยู่ในช่วงเปลี่ยนความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดต่อหน่วยความยาว และค่าอัตราการไหลจะมีลักษณะไม่คงที่แน่นอน มีการแกว่ง
- 3) ที่สภาวะอัตราการไหลมีค่ามาก ค่าความดันลดต่อหน่วยความยาวจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการไหล ยกกำลังตั้งแต่ 1.8 (สำหรับท่อเรียบ) จนถึง 2.0 (สำหรับท่อที่มีความขรุขระสูง)

2.5.2 ความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานในท่อเรียบ

สำหรับของไหลแบบนิวโตเนียนในท่อเรียบ พิจารณาสมการต่อไปนี้

$$V = \frac{2}{R^2} \int_0^R \overline{V}_x r dr = 2V^+ \int_0^1 V^+ (1-x) dx \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $x = \frac{y}{R} = 1 - \frac{r}{R}$

อินทิเกรตสมการ (3.37) เพื่อหาค่าความเร็วของของไหลในท่อ โดยแทนค่า V^+ จากสมการ (3.30) และไม่พิจารณาเทอมของ δ_L จะได้ว่า

$$\int_0^1 V^+ (1-x) dx = \frac{1}{\sqrt{f}} = 4.1 \log(N_{Re} \sqrt{f}) - 0.60 \quad (2.42)$$

สมการ (3.42) เป็นสมการที่ได้จากการคำนวณโดย von Karman หลังจากนั้น Nikuradse ได้ทำการทดลองเพื่อสร้างความสัมพันธ์แล้วหาสมการที่สอดคล้องกับการทดลอง ซึ่งได้ผลดังสมการ (3.43)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4.0 \log(N_{Re} \sqrt{f}) - 0.40 \quad (2.43)$$

เรียกว่าสมการนี้ว่า von Karman / Nikuradse equation ซึ่งสามารถใช้ได้ในช่วง

$$5 \times 10^3 < N_{Re} < 5 \times 10^6$$

นอกจากนี้ Blaisus ได้เสนอสมการซึ่งได้จากการทดลอง ได้ความสัมพันธ์ของโพรงไฟล์ของความเร็วของการไหลในท่อดังสมการ (3.36)

$$\bar{V}_x = V_{max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{7}} \quad (2.44)$$

จัดรูปให้อยู่ในเทอมไร้หน่วย แล้วแทนค่าในสมการ (3.41)

จะได้ว่า

$$f = \frac{0.0791}{N_{Re}^{1/4}} \quad (2.45)$$

โดยสมการ (3.44) และสมการ (3.45) ใช้ได้เมื่อ N_{Re} มีค่าประมาณ 10^5 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 การสูญเสียจากความเสียดทานในท่อขรุขระ

เนื่องจากรูปแบบสมการสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน จะได้มาจากข้อมูลการทดลอง ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องทำการทดลองเพื่อหาค่าการสูญเสียจากความเสียดทานของการไหลของของไหลหลายๆ แบบ

สำหรับของไหลแบบนิวโตเนียนในท่อยาว พบว่าค่าแฟคเตอร์ของการเสียดทาน (f) จะมีความสัมพันธ์กับเทอมไร้หน่วย คือ N_{Re} และค่าความขรุขระสัมพัทธ์ (ϵ/D) ของผนังท่อ แสดงดังรูปที่ 2.14 เรียกกราฟความสัมพันธ์นี้ว่า แผนภูมิของมูดี (Moody diagram) [Birds; Stewart; Lightfoot; 1960]

สำหรับที่สภาวะการไหลเป็นแบบราบเรียบ สามารถอธิบายโดยสมการของ Hagen Poiseuille คือ $f = 16/N_{Re}$ ณ สภาวะนี้ ค่าความหนืด (μ) เท่านั้นที่จะส่งผลต่อแฟคเตอร์ของการเสียดทาน และจะเห็นว่า ค่าความขรุขระสัมพัทธ์จะไม่มีผลต่อการไหลในช่วงการไหลแบบราบเรียบ

ที่สภาวะการไหลในช่วงของการเปลี่ยน จะไม่สามารถหาความสัมพันธ์ที่แน่นอนได้ แต่จะเห็นว่า แฟคเตอร์ของการเสียดทานจะขึ้นอยู่กับทั้งค่าของความขรุขระสัมพัทธ์และเรย์โนลด์ส์ นัมเบอร์ เรียกช่วงนี้ว่า บริเวณวิกฤต

สำหรับในช่วงที่มีการไหลแบบปั่นป่วนและท่อมีความขรุขระ จะได้ว่าค่าแฟคเตอร์ของการเสียดทาน ไม่ขึ้นกับค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ แต่จะขึ้นกับค่าความขรุขระสัมพัทธ์เท่านั้น

จากการทำการทดลองโดย Prandtl, von Karman/Nikuradse, Blasius ทั้งในท่อเรียบ และท่อขรุขระ โดยค่าของแฟคเตอร์ของการเสียดทาน จะขึ้นอยู่กับความขรุขระของท่อสัมพันธ์กับความหนาของชั้นย่อยลามินาร์ และเนื่องจากการไหลในชั้นย่อยลามินาร์ การรบกวนจากค่าความขรุขระดังกล่าว จะถูกกำจัดไปเนื่องจากแรงเฉื่อยในช่วงของชั้นย่อยลามินาร์ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อผลการไหลของของไหลในส่วนที่เหลือ แต่ถ้าการรบกวนดังกล่าวส่งผลไปถึงชั้นที่เป็น

ชั้นย่อยของการปั่นป่วน จะทำให้ค่าความเค้นของเรย์โนลด์และการสูญเสียจากความเสียดทาน มีค่าเพิ่มสูงขึ้น

เนื่องจากความหนาของชั้นย่อยลามินาร์จะลดลงเมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นเราสามารถพิจารณาการไหลในท่อซึ่งมีค่าความขรุขระค่าหนึ่งให้เป็นลักษณะราบเรียบ เมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าต่ำ ๆ ส่วนเมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าสูง ๆ จะเกิดลักษณะที่เรียกว่า ความขรุขระแบบไฮโดรลิก (Hydraulically rough)

พิจารณาในกรณีการไหลแบบปั่นป่วน ($N_{Re} > 4000$) Colebrook ได้ทำการประยุกต์สมการของ von Karman โดยรวมพจน์ของความขรุขระของผนังท่อไว้ ดังนี้

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log \left[\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{1.255}{N_{Re} \sqrt{f}} \right] \quad (2.46)$$

เมื่อ

$$N_{Re} \sqrt{f} = \left(\frac{e_f D^3 \rho^2}{2L\mu} \right)^{\frac{1}{2}}$$

จะเห็นว่าสมการดังกล่าวไม่ขึ้นกับอัตราการไหล ดังนั้นสมการนี้เหมาะที่จะใช้ในกรณีที่ ไม่ทราบค่าอัตราการไหล แต่ทราบค่าของการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ และคุณสมบัติของของไหล

2.5.4 แฟกเตอร์ความขรุขระ

ท่อแต่ละชนิดจะมีค่าแฟกเตอร์ความขรุขระแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ปัจจัยที่มีผลต่อค่าดังกล่าว ได้แก่ วัสดุที่ใช้ทำท่อ อายุการใช้งาน สภาวะแวดล้อมการใช้งาน และปริมาณสิ่งสกปรกที่เกาะอยู่ที่ผนังท่อเมื่อผ่านการใช้งานไประยะหนึ่ง สำหรับข้อมูลของค่าความขรุขระในท่อแสดงไว้ในตารางที่ 2.2 ในภาคผนวก

บทที่ 3

การไหลผ่านลึงกีดขวาง

เมื่อมีวัตถุขวางการไหลของของไหล หรือเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ไปในของไหล จะเกิดแรงต้านการเคลื่อนที่กระทำในทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของวัตถุ ซึ่งแรงนี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ (A) ในทิศทางหรือมุมที่เหมาะสมกับการเคลื่อนที่ ความหนาแน่นของของไหล (ρ) และความเร็วสัมพัทธ์ (V) สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านวัตถุ ของไหลจะถูกแยกออกจากทิศทางเดิม เกิดการแบ่งกระแสของไหลขึ้น ซึ่งความเร็วในแต่ละกระแสมีค่าลดลง แรงต้านการเคลื่อนที่นี้มีค่าเท่ากับการถ่ายเทโมเมนตัมต่อหน่วยเวลา

$$\frac{MV}{R} = \rho AV^2 \quad (3.1)$$

$$R = \rho AV^2 \times \text{ค่าคงที่}$$

จากทฤษฎีของนิวตัน เราสามารถนำกฎการชนของวัตถุที่มีความยืดหยุ่น มาประยุกต์ใช้สำหรับความต้านทานของของไหลได้

นอกจากนี้เราสามารถใช้หลักการทางไฮโดรไดนามิกส์ ซึ่งกล่าวว่าความต้านทานประกอบด้วย ความแตกต่างของความดันและค่าความเค้นเนื่องจากแรงเสียดทาน ซึ่งเกิดขึ้นจากการไหลของของไหลรอบ ๆ วัตถุ ในการอธิบายถึงปรากฏการณ์ของการไหล จะได้ความสัมพันธ์คือ ความต้านทานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันพลศาสตร์ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2} \rho v^2$ และพื้นที่หน้าตัดของวัตถุซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการไหล

$$R \propto \frac{1}{2} \rho v^2 \times A$$

$$R = \frac{1}{2} \rho Av^2 \times \text{ค่าคงที่} \quad (3.2)$$

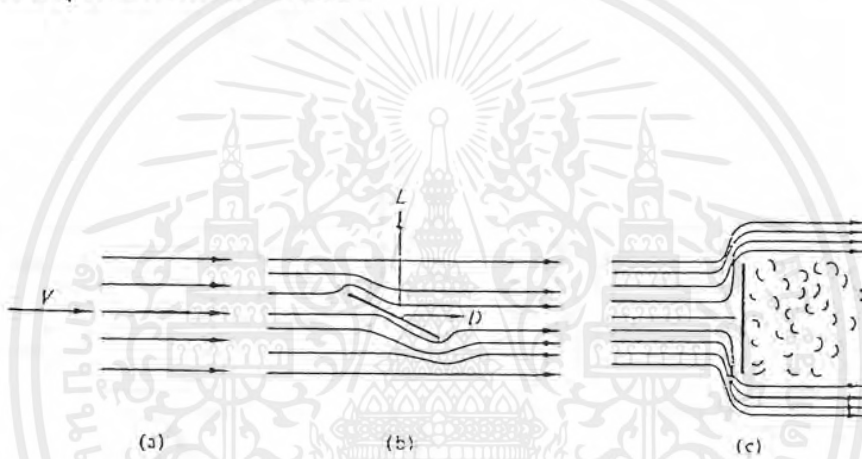
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่นี้เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน เป็นค่าที่ไม่มีหน่วย

ค่าความต้านทานหรือแรงลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุ จะแบ่งออกเป็น 2 องค์ประกอบ คือ

1. แรงในทิศขนานกับการไหล เรียกว่า แรงแดรก (Drag force, D)
2. แรงในทิศตั้งฉากกับการไหล เรียกว่า แรงลิฟท์ (Lift force, L)

พิจารณารูปที่ 3.1 [Massey, n.d.] ซึ่งจะแสดงผลและองค์ประกอบของค่าความต้านทานที่กระทำต่อวัตถุซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ



รูปที่ 3.1 ลักษณะของสิ่งกีดขวาง

จากสมการ (3.1)

$$D = \frac{1}{2} \rho A v^2 \times C_D \quad (3.3)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho A v^2 \times C_L \quad (3.4)$$

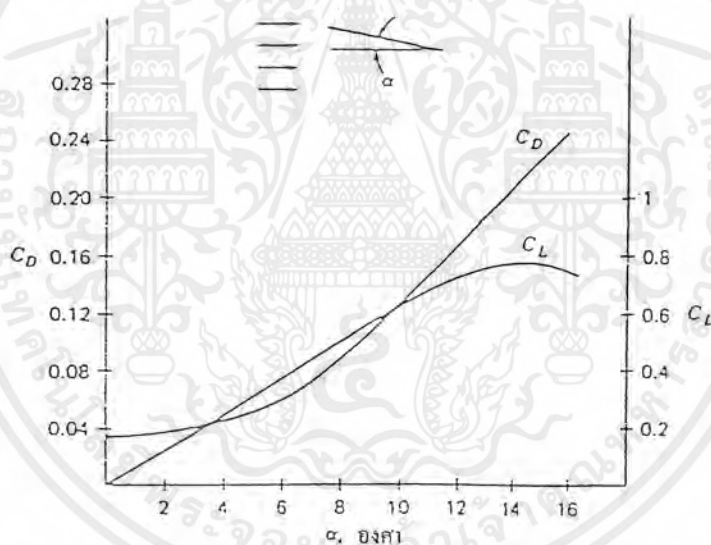
เมื่อ C_D = สัมประสิทธิ์แดรก (Drag coefficient)

C_L = สัมประสิทธิ์ลิฟท์ (Lift coefficient)

โดยค่า C_D , C_L มักจะเป็นฟังก์ชันของค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ [Darby Ron, 1996]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูป 3.2 แสดงค่า C_D และ C_L บนแผ่นระนาบเรียบเอียงทำมุม α กับแนวระดับ [Massey, n.d.] เนื่องจากสถานะที่ทำการทดสอบนี้ไม่ได้ระบุแน่นอน และไม่ทราบค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ ดังนั้นในการออกแบบโดยอาศัยข้อมูลจากกราฟที่ 3.2 จึงควรระมัดระวังเป็นพิเศษ แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถใช้อ้างอิงกราฟนี้ในการอธิบายถึงแนวโน้มของ C_D , C_L ได้ว่า ค่า C_D , C_L จะมีค่า เพิ่มขึ้นเมื่อองศาการเอียงของระนาบเรียบมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อองศาการเอียงมีค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง คือ ประมาณ 15° จะเห็นว่า C_L มีแนวโน้มที่จะมีค่าลดลงในขณะที่ C_D ยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ



รูป 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านและสัมประสิทธิ์ยกสำหรับแผ่นระนาบเรียบที่เอียงทำมุมต่าง ๆ กัน

วัตถุประสงค์ของการศึกษาในครั้งนี้จะเน้นการศึกษาในส่วนของการไหลที่ด้านหลังของวัตถุซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นระนาบเรียบเอียงทำมุมต่าง ๆ ซึ่งติดตั้งในท่อทรงกระบอก ดังนั้นเราจึงพิจารณาเฉพาะแรงต้านเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงแทรกที่กระทำต่อวัตถุ จะประกอบด้วย

3.1 แตรกจากแรงเสียดทานที่ผิว (Skin – friction drag)

3.2 แตรกจากความดัน (Pressure drag)

3.1 แตรกจากแรงเสียดทานที่ผิว

แตรกจากแรงเสียดทานที่ผิวเป็นแรงอันเนื่องมาจากแรงเฉือนหนืดที่เกิดขึ้นบนผิวของวัตถุ

$$\text{ค่าแรงเฉือนในทิศของการไหล} = \tau_w \cos \alpha \, dA \quad (3.5)$$

อินทิเกรตสมการ (3.5) ตลอดพื้นที่ จะได้

$$\text{แตรกจากแรงเสียดทานที่ผิว } (D_f) = \tau_w \cos \alpha \, dA \quad (3.6)$$

สำหรับพื้นที่ผิวที่ตั้งฉากกับทิศการไหล $\alpha = 90^\circ$ ค่าแตรกจากแรงเสียดทานที่ผิว จะมีค่าเป็นศูนย์

3.2 แตรกจากความดัน

แตรกจากความดันเป็นแรงอันเนื่องมาจากความแตกต่างของความดันซึ่งเกิดขึ้นระหว่างบริเวณสายการไหลก่อนผ่านวัตถุซึ่งมีความดันสูงกับบริเวณสายการไหลหลังจากผ่านวัตถุ ซึ่งมีความดันต่ำ อาจเรียกว่า ฟอรั่มแตรก (Form drag)

$$\text{ค่าแรงดันในทิศของการไหล} = P_L \sin \alpha \, dA \quad (3.7)$$

อินทิเกรตสมการ (3.7) ตลอดพื้นที่ผิว จะได้

$$\text{แตรกจากความดัน } (D_p) = P_L \sin \alpha \, dA$$

ความดันที่กระทำต่อพื้นที่ผิวในทิศทางการไหลโดยค่า $\alpha = 0^\circ$ จะไม่มีผลต่อแตรกจากความดัน

แตรกรวม (D_T) ที่กระทำต่อวัตถุ จะเป็นผลรวมของแตรกจากแรงเสียดทาน และแตรก

จากความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_T = D_F + D_p$$

แต่อย่างไรก็ตาม พบว่ามีโอกาสน้อยมากที่ค่าแรงทั้ง 2 ชนิดจะมีขนาดเท่า ๆ กันในเวลาเดียวกัน

สำหรับวัตถุซึ่งไม่มีค่าแรงลิฟท์จะพบว่า ลักษณะของแรงจะเหมือนกับแรงรวมดังตารางที่ 3.1 [Massey, n.d.]

ตารางที่ 3.1 ผลของแรงแรงที่มีต่อแรงรวมเมื่อวัตถุมีรูปทรงต่าง ๆ กัน

วัตถุ	แรงรวม	
	แรงจากแรงเสียดทาน	แรงจากความดัน
1. ทรงกลม	ไม่พิจารณา	+ แรงจากความดัน
2. ทรงกระบอก (แกนตั้งฉากกับการไหล)	ไม่พิจารณา	+ แรงจากความดัน
3. แผ่นเรียบบาง เป็นรูปวงกลม (ตั้งฉากกับการไหล)	ไม่พิจารณา	+ แรงจากความดัน
4. แผ่นเรียบบาง (ขนานกับการไหล)	แรงจากแรงเสียดทาน	+ ไม่พิจารณา
5. Well-streamlined objects	แรงจากแรงเสียดทาน	+ ไม่พิจารณา

* แรงรวม = แรงจากแรงเสียดทาน + แรงจากความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การแยกชั้นขอบเขตและการเกิดเวค (Boundary layer separation and wake formation)

เมื่อของไหลซึ่งมีความหนืดไหลผ่านผิววัตถุจะทำให้เกิดชั้นขอบเขต หรือที่เรียกว่า Boundary layer ซึ่งที่บริเวณนี้ค่าความเร็วของของไหลจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยจะมีค่าเป็นศูนย์ที่บริเวณผิวของวัตถุ และมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจนกระทั่งมีค่าเท่ากับความเร็วของกระแสการไหลที่บริเวณขอบของชั้นขอบเขต เมื่อของไหลไหลผ่านพื้นผิวของแข็งซึ่งมีความนูน เช่น วัตถุทรงกระบอก ชั้นขอบเขตจะมีแนวโน้มแยกออกจากผิวของแข็ง หลังจากตำแหน่งที่มีความหนาแน่นมากที่สุดหรือมีความนูนมากที่สุดตามทิศของการไหล ดังรูปที่ 3.3 [Massey, n.d.] ซึ่งพิจารณาบริเวณชั้นขอบเขตในส่วนก่อนถึงบริเวณที่มีความหนาแน่นมากที่สุด จะมีความเร็วที่เพิ่มขึ้น และเมื่อผ่านจุดนี้ไป ความเร็วจะมีค่าลดลง

ในขณะที่ของไหลไหลผ่านบริเวณที่มีความเร็วเพิ่มขึ้น ชั้นขอบเขตจะมีความหนาแน่นลดลงเล็กน้อย แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อไหลผ่านบริเวณที่มีความเร็วลดลง ขณะที่ของไหลภายนอกชั้นขอบเขตมีความเร็วเพิ่มขึ้น ค่าความแตกต่างของความดัน จะมีค่าเป็นลบ หรือเรียกว่า Favourable ซึ่งจะมีผลทำให้ความหนาแน่นของชั้นขอบเขตลดลง

ที่บริเวณที่มีความหนาแน่นที่สุดค่าความแตกต่างของความดันจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และเมื่อเลยจากจุดนี้ไปจะมีค่าเป็นบวก หรือเรียกว่า Adverse ค่าความแตกต่างของความดันในลักษณะที่เป็น Adverse ความเร็วในชั้นขอบเขตจะมีค่าลดลง และความหนาแน่นของชั้นขอบเขตจะเพิ่มขึ้น

จากผลกระทบทั้งสองประการดังกล่าว ทำให้ค่าความแตกต่างของความเร็วที่ผนังมีค่าลดลง และมีค่าเท่ากับศูนย์ ณ บริเวณที่จะเกิดการแยกการไหล และหลังจากนั้นจะทำให้เกิดย่านการไหล ซึ่งทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนและเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าเวค (Wake)



รูป 3.3 ชั้นขอบเขตของการแยกไหล

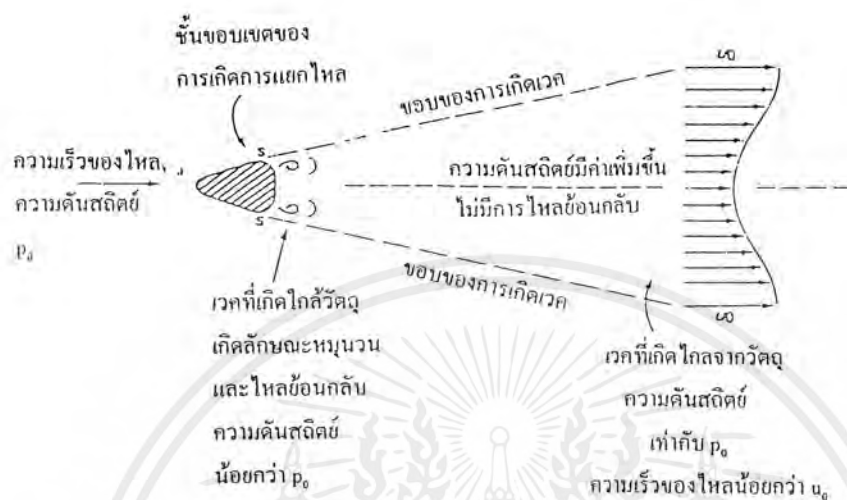
เวกที่เกิดขึ้นบริเวณใกล้กับวัตถุ คือ บริเวณหลังจากวัตถุไปเล็กน้อย จะมีบริเวณขอบเขตที่ค่าความดันสถิตย และ/หรือความเร็วของของไหล มีค่าน้อยกว่าบริเวณที่ไม่มีสิ่งรบกวน และที่บริเวณใกล้ ๆ กับวัตถุ ค่าความดันสถิตยที่บริเวณเวก จะมีค่าใกล้เคียงกับจุดที่เกิดการแยกไหล และการที่มีความดันต่ำนี้จะทำให้เกิดค่าความแตกต่างของความดันระหว่างความดันสูงที่บริเวณด้านหน้าของการไหล กับความดันต่ำที่บริเวณด้านหลังของการไหล ใกล้กับเวกที่เกิดขึ้นใกล้กับวัตถุ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงแทรกจากความดันบนผิววัตถุในทิศทางของการไหล

โครงสร้างของเวก ขึ้นอยู่กับค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์และรูปร่างของวัตถุที่ใช้ ที่บริเวณหลังจากวัตถุเล็กน้อยจะเกิดการหมุนวน ซึ่งอาจจะทำให้เกิดลักษณะที่เรียกว่า von Karman vortex street

ที่บริเวณไกลจากวัตถุค่าความดันสถิตยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเข้าสู่ค่าความดัน ในกรณีไม่มีสิ่งรบกวน แต่ความเร็วของของไหลจะยังคงมีค่าต่ำกว่าในกรณีไม่มีสิ่งรบกวน จนความหนืดจะส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดเวก

รูป 3.4 แสดงคุณลักษณะสมบัติบางประการของสายการไหลด้านหลังวัตถุที่มีรูปทรงเป็นปริซึม [Massey, n.d.]

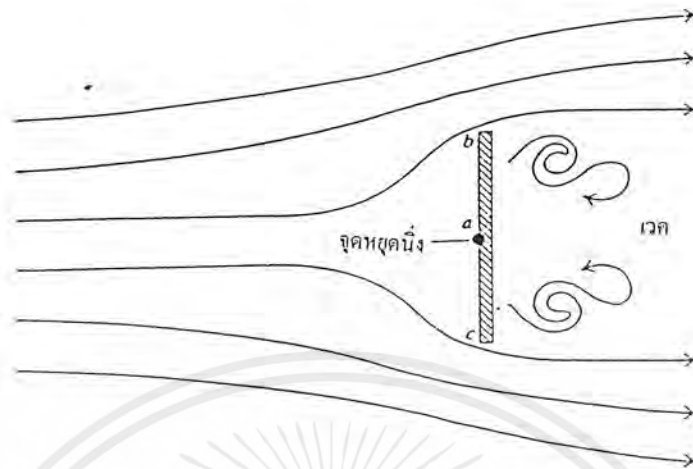
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ลักษณะการเกิดเวก

ในกรณีที่แผ่นระนาบวางขนานไปกับทิศทางการไหล จะเกิดเฉพาะแครงจากแรงเสียดทานที่ผิว และไม่มี ความแตกต่างของความดันแบบ Adverse ดังนั้นจึงไม่มีชั้นขอบเขตของการแยกไหล ซึ่งจะทำให้เกิดแครงเนื่องจากความดัน และเมื่อแผ่นระนาบวางในทิศขวางการไหล ดังรูปที่ 3.5 จะมีค่าแครงเนื่องจากความดันสูงมาก ส่วนค่าแครงเนื่องจากแรงเสียดทานที่ผิวจะมีค่าเป็นศูนย์ นอกจากนี้ยังมีความเค้นเฉือนกระทำบนพื้นผิวหน้าของแผ่นระนาบแต่จะมีทิศทางตั้งฉากกับการไหล จึงไม่มีองค์ประกอบในทิศเดียวกับแครง

แผ่นเรียบที่มีลักษณะลู่ไปกับสายการไหลของของไหล จะทำให้โปรไฟล์ของการไหลมีลักษณะโค้งมากขึ้น ดังรูปที่ 3.5 [Massey, n.d.]



รูปที่ 3.5 แผนระนาบเรียงตั้งฉากกับการไหล

จากรูป 3.5 จุด a เป็นจุดที่อยู่นิ่ง จากจุด a ไปถึงจุด b ซึ่งอยู่ด้านบน หรือจากจุด a ไปถึงจุด c ซึ่งอยู่ขบด้านล่าง อัตราการไหลจะเพิ่มขึ้นส่วนความดันจะมีค่าลดลง ค่าความแตกต่างของความดันจะเป็นลักษณะที่เรียกว่า Favourable แต่อย่างไรก็ตาม ถ้ารูปแบบของการไหลในบริเวณด้านหลังของพื้นผิว มีลักษณะเหมือนกับที่บริเวณด้านหน้าของสายการไหล ที่บริเวณขอบจะมีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความดันที่เพิ่มขึ้น ค่าความแตกต่างของความดันแบบที่เรียกว่า Adverse จะมีค่ามากจนไม่ต้องพิจารณาว่าลักษณะชั้นขอบเขตที่เกิดขึ้นเป็นแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วน การเกิดการแยกการไหลที่บริเวณขอบของแผ่นระนาบทำให้เกิดความดันที่บริเวณที่เกิดเวกมีค่าต่ำมาก และเนื่องจากตำแหน่งของชั้นขอบเขตของการแยกไหลจะไม่ได้รับผลกระทบจากลักษณะการไหล ไม่ว่าจะเป็นแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วน ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงกดก็จะไม่ขึ้นกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ และนอกจากนี้ยังไม่ขึ้นกับค่าความขรุขระบนพื้นผิววัตถุ เนื่องจากไม่มีแรงแรงเนื่องจากแรงเสียดทานที่ผิว และการเหนี่ยวนำให้เกิดการปั่นป่วนก็จะมีผลต่อตำแหน่งที่เกิดการแยกไหล

ลักษณะที่มีตำแหน่งที่เกิดการแยกไหลซึ่งมีค่าคงที่ถือว่า เป็นคุณสมบัติลักษณะเฉพาะ
ของวัตถุที่มีมุมหรือขอบ ยกเว้นสำหรับการเกิดแรงเสียดทานที่ผิว ค่าสัมประสิทธิ์แดรกเก็บบจะไม่
ขึ้นกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ [Massey, n.d.]

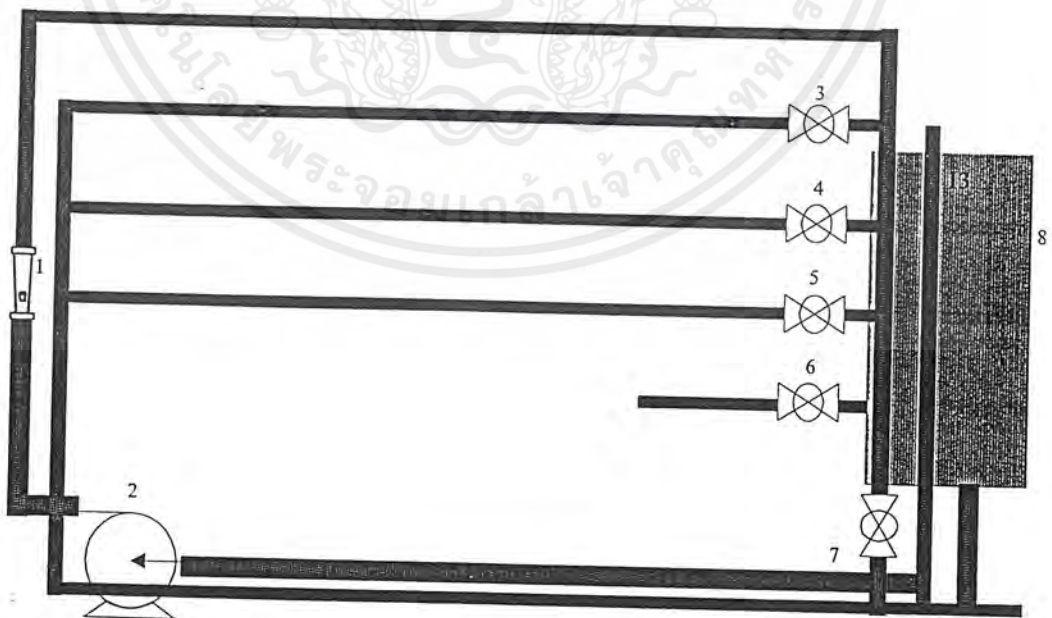


บทที่ 4

การออกแบบอุปกรณ์เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลภายในท่อ

ในการออกแบบอุปกรณ์เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลภายในท่อ ซึ่งของไหลที่ใช้ คือน้ำ ปัจจัยสำคัญที่ต้องทำการศึกษาคือ ความเร็วของของไหล และค่าความดันสถิตที่เกิดขึ้น และปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำไหลผ่านสิ่งกีดขวาง ทั้งนี้ในการสังเกตลักษณะการไหลจะต้องฉีดสีลงไป ในสายการไหลของของไหล แล้วสังเกตการเคลื่อนที่ของสีที่ฉีดลงไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการออกแบบลักษณะของท่อ เพื่อให้สามารถครอบคลุมปัจจัยต่างๆ ที่จำเป็นต่อการศึกษาปรากฏการณ์ของการไหลภายในท่อ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

จากอุปกรณ์เบื้องต้นดังไดอะแกรมรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะของท่อก่อนทำการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการออกแบบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

4.1 ขั้นตอนการออกแบบอุปกรณ์เพื่อศึกษาการไหลในท่อเปล่า

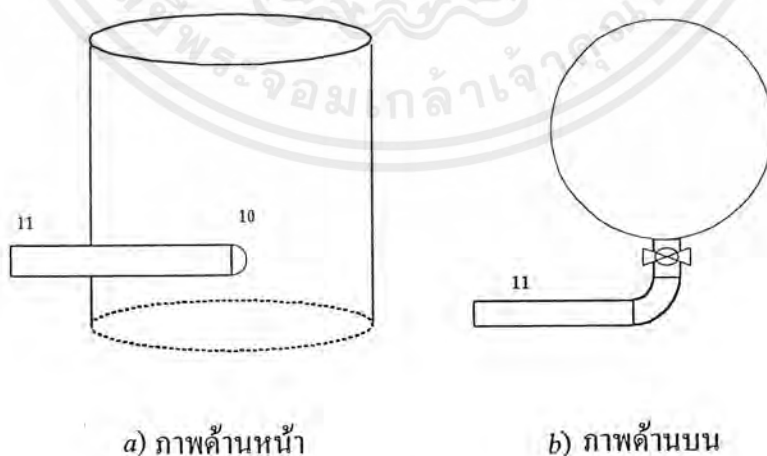
4.2 ขั้นตอนการออกแบบอุปกรณ์เพื่อศึกษาการไหลในท่อเมื่อไหลผ่านสิ่งกีดขวาง

4.1 ขั้นตอนการออกแบบอุปกรณ์เพื่อศึกษาการไหลในท่อเปล่า

สำหรับระบบที่ใช้ศึกษาปรากฏการณ์การไหลในท่อเปล่า มีขั้นตอนการออกแบบระบบดังนี้

4.1.1 การเจาะถังเพื่อติดตั้งระบบท่อชุดที่ 1

ทำการเจาะถังที่บริเวณก้นถัง (หมายเลข 10) เพื่อให้ให้น้ำไหลโดยอาศัยความดันบรรยากาศ และเป็นการลดสิ่งรบกวนการไหลจากการสั่นซึ่งเกิดจากการใช้ปั๊ม รูที่เจาะอยู่สูงจากก้นถังประมาณ 10 เซนติเมตร ความกว้างของรูประมาณ 2.5 เซนติเมตร จากนั้นนำท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.1 เซนติเมตร (หมายเลข 11) มาต่อเข้ากับรูที่เจาะ และต่อวาล์วเข้ากับท่อพีวีซี ลักษณะดังรูปที่ 4.2

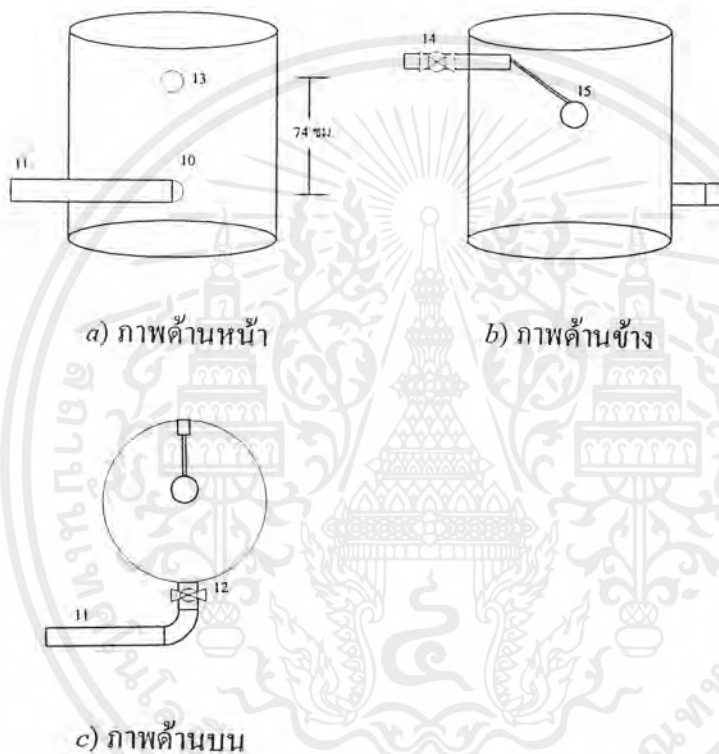


รูปที่ 4.2 การติดตั้งระบบท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การเจาะถึงเพื่อติดตั้งลูกลอย

การติดตั้งลูกลอยมีวัตถุประสงค์เพื่อรักษาระดับน้ำให้คงที่ตลอดการทดลอง โดยทำการเจาะถึงที่ระยะห่างจากกันถึงประมาณ 74 เซนติเมตร (หมายเลข 12) ความกว้างของรูที่เจาะประมาณ 2.5 เซนติเมตร จากนั้นนำลูกลอยซึ่งต่อเชื่อมกับระบบท่อส่งน้ำ มาต่อที่รูที่เจาะไว้ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การติดตั้งลูกลอย

4.1.3 การขยายขนาดท่อ

การขยายขนาดของท่อ มีวัตถุประสงค์เพื่อคุมอัตราการไหลของน้ำให้อยู่ในช่วงที่ครอบคลุมการไหลทั้งแบบราบเรียบ การไหลในช่วงเปลี่ยน และการไหลแบบปั่นป่วน

เนื่องจากความเร็วที่ไหลผ่านท่อที่หมายเลข 11 นั้น ความเร็วต่ำสุดที่สามารถวัดได้ มีค่ามากกว่าความเร็วที่จะทำการศึกษาปรากฏการณ์ของการไหลที่สภาวะความเร็วต่ำ ๆ ดังนั้นจึงทำการขยายขนาดท่อเพื่อให้มีความเร็วลดลง ซึ่งเป็นไปตามสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_1 \overline{V_1} = A_2 \overline{V_2}$$

ท่อขนาดเล็ก (ท่อหมายเลข 11) ดังรูปที่ 4.4 เส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 2.1 เซนติเมตร ดังนั้นจะมีพื้นที่หน้าตัด

$$A_1 = \frac{\pi D_1^2}{4} = \frac{\pi (2.1 \times 10^{-2})^2}{4} = 3.46 \times 10^{-4} \text{ ตารางเมตร}$$

ท่อขนาดใหญ่ (ท่อหมายเลข 16) ดังรูปที่ 4.4 เป็นท่ออะคริลิกใสเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 3.4 เซนติเมตร ดังนั้นจะมีพื้นที่หน้าตัด

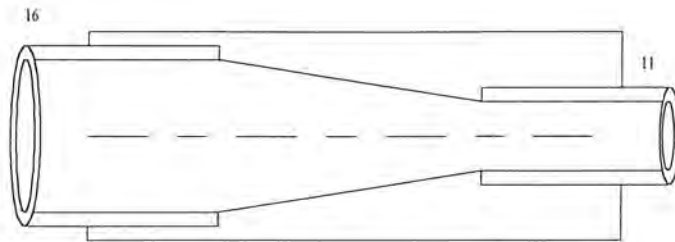
$$A_2 = \frac{\pi D_2^2}{4} = \frac{\pi (3.4 \times 10^{-2})^2}{4} = 9.08 \times 10^{-4} \text{ ตารางเมตร}$$



รูป 4.4 การขยายขนาดท่อ

สำหรับข้อต่อที่ใช้เป็นข้อต่อขยายขนาดแบบร่วมศูนย์กลาง (Concentric expander) คือ การขยายขนาดแบบลาดเอียง โดยเอียงทำมุม $\theta = 10^\circ$ กับแนวระดับ เพื่อให้มีผลรบกวนกับการไหลของของไหลน้อยที่สุด ดังรูปที่ 4.5

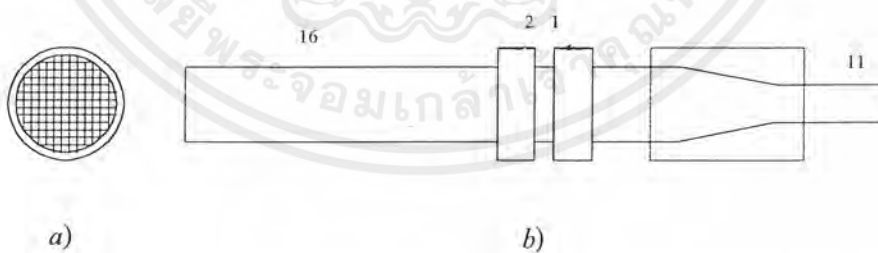
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ลักษณะของข้อต่อที่ใช้ในการขยายขนาดท่อ

4.1.4 การกำจัดสิ่งรบกวนที่จะส่งผลกระทบต่อลักษณะการไหล

การกำจัดสิ่งรบกวน ได้แก่ การติดตั้งตะแกรงกระจายการไหล (Distributor) ดังรูปที่ 4.6 a) จำนวน 2 อัน ที่ตำแหน่ง 1 และ 2 ดังรูป 4.6 b) ตะแกรงกระจายการไหลนี้จะทำหน้าที่ในการควบคุมสภาวะการไหลที่ไหลเข้าสู่ท่อให้มีความสม่ำเสมอมากขึ้น ลักษณะดังรูปที่ 4.6

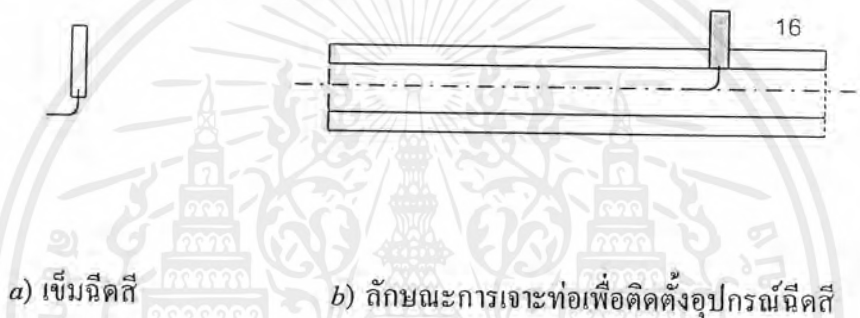


รูปที่ 4.6 a) การติดตั้งแผ่นกระจายการไหล b) ลักษณะแผ่นกระจายการไหลที่ใช้

4.1.5 อุปกรณ์สำหรับฉีดสี

ก) ใช้เข็มฉีดยาต่อกับกระบอกฉีดยาขนาดเล็ก งดปลายเข็มให้มีลักษณะคู่ไปกับกระแสการไหลของน้ำ ดังรูปที่ 4.7 a)

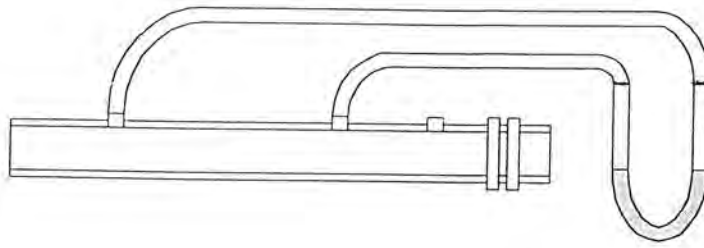
ข) เจาะท่อสำหรับฉีดน้ำสีที่ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.4 เซนติเมตร (หมายเลข 16) เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.6 เซนติเมตร โดยเจาะห่างจากปลายทางเข้า 20 เซนติเมตร เพื่อลดผลกระทบเนื่องจากผลของทางเข้า ดังรูปที่ 4.7 b)



รูปที่ 4.7 การเจาะท่อเพื่อทำการฉีดสี

4.1.6 เจาะท่อเพื่อใช้ในการวัดผลต่างความดัน

การเจาะท่อเพื่อวัดความดันลด กระทำโดยการเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.6 เซนติเมตร จำนวน 2 รู ให้มีระยะห่างระหว่างรูทั้งสอง 65 เซนติเมตร และต่อเข้ากับமானอมิเตอร์ซึ่งบรรจุปรอทไว้ ดังรูปที่ 4.8



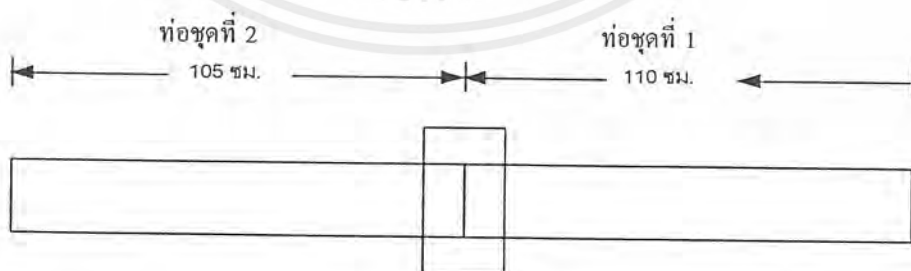
รูปที่ 4.8 ตำแหน่งการเจาะรูเพื่อต่อเข้ากับมานอมิเตอร์เพื่อวัดความดัน

4.2 ขั้นตอนการออกแบบอุปกรณ์เพื่อศึกษาการไหลของน้ำในท่อเมื่อไหลผ่านสิ่งกีดขวาง

จากขั้นตอนการออกแบบเพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลในท่อเปล่า (ขั้นตอน 4.1) จะทำการต่อท่อเพื่อศึกษาถึงปรากฏการณ์การไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบเรียบที่สามารถปรับองศาได้ ขั้นตอนการออกแบบมีดังนี้

4.2.1 การต่อท่อชุดที่ 2

ท่อที่ใช้ต่อจะใช้ท่ออะคริลิกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน คือ เท่ากับ 3.4 เซนติเมตร ความยาว 105 เซนติเมตร นำมาต่อกับท่อชุดที่ 1 ลักษณะดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การต่อท่อชุดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อต่อที่ใช้ทำจากอะคริลิกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3.7 เซนติเมตร ความกว้าง เซนติเมตรลักษณะของข้อต่อที่ใช้ มีลักษณะดังรูปที่ 4.10



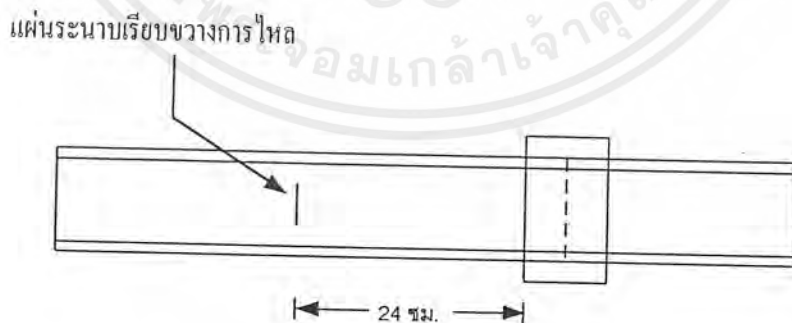
a) ภาพด้านหน้า

b) ภาพด้านข้าง

รูปที่ 4.10 ลักษณะข้อต่อ

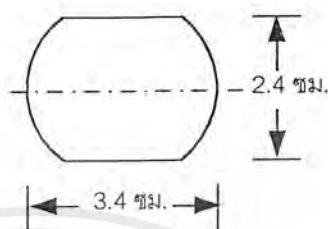
4.2.2 การติดตั้งสิ่งกีดขวาง

ก) ทำการเจาะท่อเพื่อใส่สิ่งกีดขวาง ที่ระยะห่างจากข้อต่อเป็นระยะทาง 24 เซนติเมตร รูที่เจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.6 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 การติดตั้งแผ่นระนาบเรียบขวางการไหล

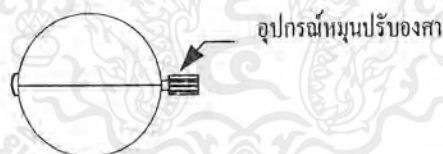
ข) ลักษณะของแผ่นระนาบเรียบที่ใช้มีลักษณะเป็นแผ่นพลาสติกเคลือบด้วยพลาสติกใส เพื่อให้มีความแข็งแรงทนต่อการแตกการไหลของน้ำ ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ลักษณะของแผ่นระนาบขวางการไหล

ค) สอดแผ่นระนาบเรียบเข้าไปในท่อโดยให้ปลายด้านหนึ่งสอดเข้าไปในรูที่เจาะเตรียมไว้

ง) คิดอุปกรณ์ที่ใช้หมุนเพื่อปรับองศา โดยให้ปลายสอดเข้าไปยังบริเวณกลางของแผ่นพลาสติกซึ่งสอดอยู่ในท่อ จะได้อุปกรณ์ที่มีลักษณะดังรูปที่ 4.13



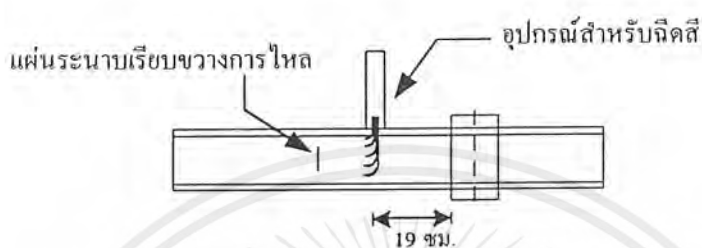
รูปที่ 4.13 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้หมุนเพื่อปรับองศา

4.2.3 อุปกรณ์สำหรับฉีดสี

ก) ใช้เข็มฉีดยาจำนวน 5 อัน เชื่อมติดกันแล้วต่อกับกระบอกฉีดยาขนาดเล็ก งดปลายเข็มให้มีลักษณะดูไปกับกระแสน้ำของการไหลของน้ำ โดยให้มีระยะห่างระหว่างเข็มแต่ละอันประมาณ 0.6 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

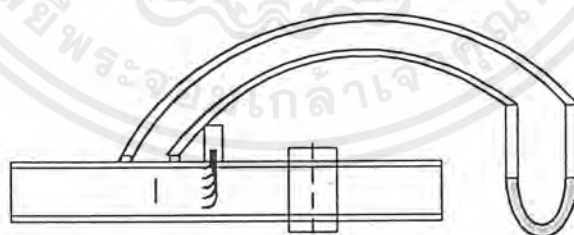
ข) เจาะรูที่ท่อ ระยะห่างจากข้อต่อประมาณ 19 เซนติเมตร รูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.6 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับฉีดสี

4.2.4 เจาะท่อเพื่อใช้ในการวัดผลต่างความดัน

การเจาะท่อเพื่อวัดความดันลด กระทำโดยการเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.6 เซนติเมตร จำนวน 2 รู ให้มีระยะห่างระหว่างรูทั้งสอง 5.5 เซนติเมตร และต่อเข้ากับமானอมิเตอร์ซึ่งบรรจุปรอทไว้ ดังรูปที่ 4.15

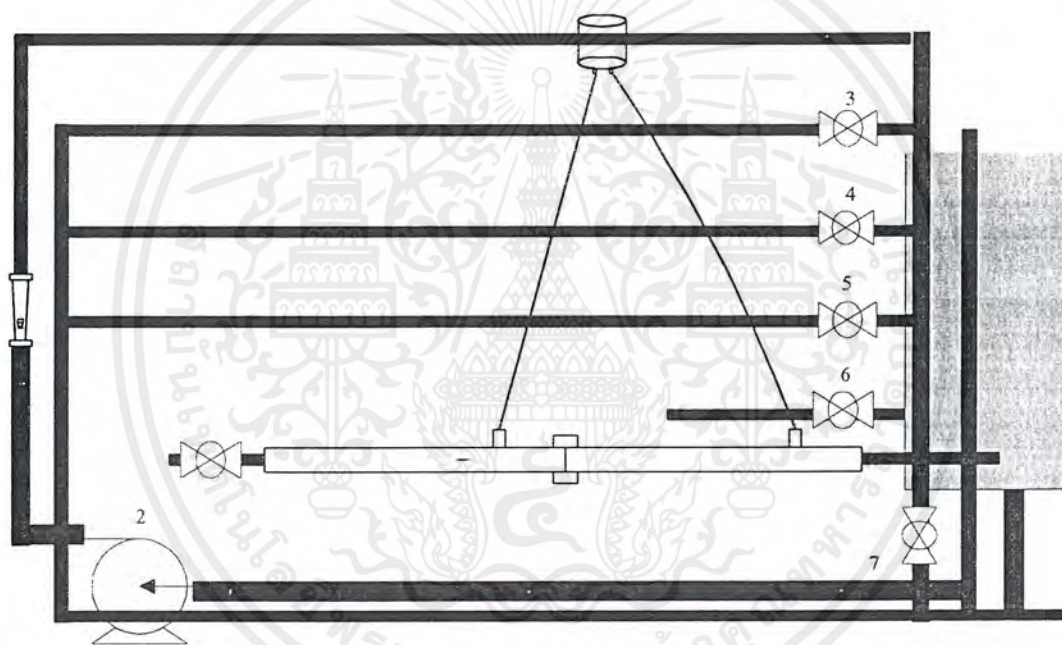


รูปที่ 4.15 ตำแหน่งการเจาะรูเพื่อต่อเข้ากับமானอมิเตอร์เพื่อวัดความดัน

4.3 ภาชนะบรรจุที่ใช้ในการทดลอง

ภาชนะบรรจุที่ใช้ในการทดลองจะใช้กระบอกทำด้วยอะคริลิก ต่อเข้ากับสายยางที่กันกระบอก โดยที่ปลายสายยางอีกด้านต่อเข้ากับอุปกรณ์ฉีดยาสองส่วน ความสูงของภาชนะบรรจุห่างจากท่อประมาณ 60 เซนติเมตร

ลักษณะของระบบท่อหลังจากทำการติดตั้งท่อตามที่ทำการออกแบบไว้แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ลักษณะของท่อที่ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ของการไหลภายในท่อ

บทที่ 5

การดำเนินการทดลอง

การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

- การทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลของน้ำในท่อเปล่า
- การทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลของน้ำ เมื่อไหลผ่านสิ่งกีดขวางในท่อ

5.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 5.1.1 ชุดทดลองการศึกษารากฏการณ์การไหลภายในท่อ ดังแสดงในรูปที่ 4.16
- 5.1.2 น้ำประปา
- 5.1.3 สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4)

5.2 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4)

โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) ซึ่งเป็นสีที่ใช้ในการทดลอง สามารถเตรียมได้โดย

- 5.2.1 เตรียมน้ำประมาณ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 5.2.2 ชั่งผงโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) ประมาณ 0.4 กรัม
- 5.2.3 เติมผงโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) ในน้ำ คนให้ละลายจนหมด

5.3 ขั้นตอนการทดลอง

5.3.1 การทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลของน้ำในท่อเปล่า

ในการทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลของของไหลในท่อ ได้กำหนดตัวแปรที่จะทำการศึกษา ดังนี้

5.3.1.1 ตัวแปรอิสระ ได้แก่ อัตราการไหล

5.3.2.2 ตัวแปรตาม ได้แก่ ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้น

ขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

ก) เปิดวาล์วหมายเลข 12 ในสภาพเปิดสุด (ดูรูปที่ 4.16)

ข) ศึกษาปรากฏการณ์การไหลของน้ำภายในท่อชุดที่ 1

1) ต่อสายยางจากภาชนะบรรจุสี เข้ากับอุปกรณ์ฉีดสีในท่อชุดที่ 1

2) ปรับปริมาณการไหลของน้ำให้เต็มท่อโดยใช้วาล์วหมายเลข 14

3) เปิดวาล์วหมายเลข 14 ค่อยๆ เพิ่มปริมาณการเปิดวาล์วทีละน้อย พร้อมทั้งเปิดวาล์วปล่อยสี โดยปรับปริมาณสีที่ไหลออกจากปากเข็มด้วยปริมาณที่พอเหมาะ สังเกตลักษณะเส้นสีที่เกิดขึ้น และวัดอัตราการไหลของน้ำที่ปริมาณการเปิดวาล์วต่าง ๆ กัน

4) บันทึกอัตราการไหล และลักษณะของเส้นสีที่สังเกตได้ พร้อมทั้งบันทึกลักษณะที่สังเกตได้

5) นำข้อมูลระหว่างปริมาณการเปิดวาล์วและอัตราการไหลที่บันทึกได้ มาทำการพล็อตกราฟ

ค) สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

5.3.2 การทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลของน้ำเมื่อไหลผ่านสิ่งกีดขวางในท่อ

สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลของน้ำเมื่อไหลผ่านแผ่นระนาบเรียบในท่อ จะทำการแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ

ตอนที่ 1 ศึกษาปรากฏการณ์การเกิดการแยกไหลและการเกิดเวค เมื่อองศาของแผ่นระนาบเรียบเปลี่ยนแปลงไป

ตอนที่ 2 ศึกษาค่าความดันลดที่เกิดขึ้นเมื่อองศาของแผ่นระนาบเรียบเปลี่ยนแปลงไป

การทดลองตอนที่ 1

ได้กำหนดตัวแปรที่จะทำการศึกษา ดังนี้

- ก) ตัวแปรอิสระ ได้แก่ องศาการหมุนของแผ่นระนาบเรียบ
 - ข) ตัวแปรตาม ได้แก่ ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นที่ก่อนและหลังแผ่นระนาบเรียบ
- ขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

ก) เปิดวาล์วหมายเลข 12 ในสภาพเปิดสุด (ดูรูปที่ 4.16)

ข) ศึกษาปรากฏการณ์การไหลของน้ำภายในท่อชุดที่ 2

1) ค่อยๆ ปิดวาล์วจากภาชนะบรรจุสี เข้มกับอุปกรณ์จัดสีในท่อชุดที่ 2

2) ปรับปริมาณการไหลของน้ำให้เต็มท่อโดยใช้วาล์วหมายเลข 14

3) เปิดวาล์วหมายเลข 14 ค่อยๆ เพิ่มปริมาณการเปิดวาล์วทีละน้อย อาศัยข้อมูลจาก

การทดลองในหัวข้อ 5.3.1 เลือกอัตราการไหลให้อยู่ในช่วงที่เป็นการไหลแบบราบเรียบ

4) เปิดวาล์วปล่อยสี และปรับปริมาณสีที่ไหลออกจากปากเข็มของท่อชุดที่ 2 ให้มีปริมาณการไหลที่เหมาะสม สังเกตลักษณะเส้นสีที่เกิดขึ้น

5) ปรับแผนระนาบเรียบให้มีองศา 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 และเพิ่มครั้งละ 10 องศา บันทึกลักษณะเส้นสีที่เกิดขึ้นทั้งก่อนและหลังแผนระนาบเรียบที่สังเกตได้ พร้อมทั้งวัดค่าความดันโลหิตที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งองศาดังกล่าว

ค) สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

การทดลองตอนที่ 2

ได้กำหนดตัวแปรที่จะทำการศึกษา ดังนี้

- ก) ตัวแปรอิสระ ได้แก่ องศาการหมุนของแผนระนาบเรียบ
- ข) ตัวแปรตาม ได้แก่ ความดันโลหิต

ขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

- ก) เปิดวาล์วหมายเลข 12 ในสภาพเปิดสุด (ดูรูปที่ 4.16)
- ข) ศึกษาปรากฏการณ์การไหลของน้ำภายในท่อชุดที่ 2
 - 1) ปรับปริมาณการไหลของน้ำให้เต็มท่อโดยใช้วาล์วหมายเลข 14
 - 2) เปิดวาล์วหมายเลข 14 ค่อยๆ ในสภาพเปิดสุด
 - 3) ปรับแผนระนาบเรียบให้มีองศา 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 และเพิ่มครั้งละ 10

องศา วัดค่าความดันโลหิตที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งองศาดังกล่าว

- ค) พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างองศาของแผนระนาบเรียบและค่าความดันโลหิต
- ง) สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

บทที่ 6

ผลการทดลอง

6.1 ผลการวัดอัตราการไหลของน้ำเมื่อไหลผ่านท่อเปล่า

ทำการวัดค่าอัตราการไหลของน้ำ เมื่อปริมาณการเปิดของวาล์วมีค่าต่าง ๆ กัน ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ผลการทดลอง และการคำนวณความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านท่อ

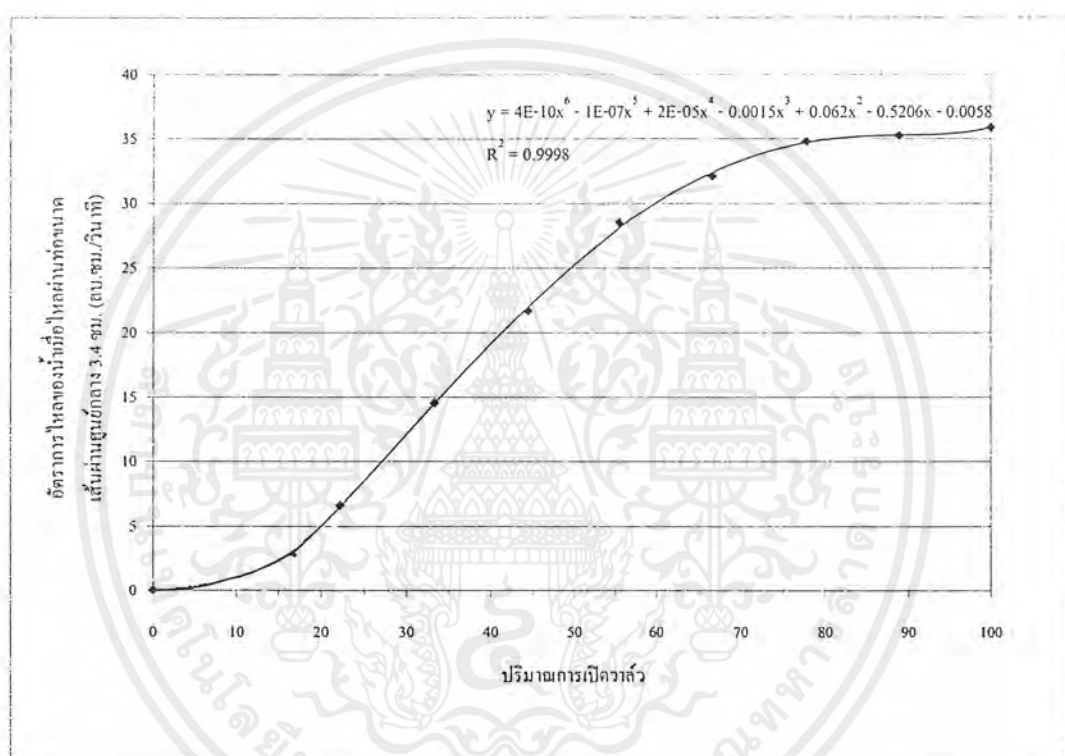
จำนวนรอบของ การหมุนวาล์ว	% การเปิดวาล์ว	อัตราการไหลของน้ำเมื่อ ไหลผ่านท่อขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.1 ซม. (ลบ.ซม./วินาที) ^I	ความเร็วของน้ำที่ไหล ผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.4 ซม. $\times 10^2$ (เมตร/วินาที) ^{II}
0.00	0.00	0.00	0.00
0.75	16.67	25.18	2.77
1.00	22.22	60.33	6.64
1.50	33.33	132.21	14.56
2.00	44.44	196.84	21.68
2.50	55.56	258.90	28.51
3.00	66.67	291.61	32.12
3.50	77.78	316.07	34.81
4.00	88.89	32.38	35.28
4.50	100	325.89	35.89

^I ข้อมูลจากขั้นตอนการทดลองโดยละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ก

^{II} ตัวอย่างการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำผลการทดลองไปทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วน้ำที่ไหลผ่านท่อ กับ ปริมาณการเปิดของวาล์ว แสดงดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วน้ำที่ไหลผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.4 ซม. และปริมาณการเปิดของวาล์ว

6.2 ผลการทดลองเมื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลในท่อเปล่า

จากการทดลองพบว่า

6.2.1 เมื่อปรับปริมาณการเปิดวาล์วในช่วงที่อัตราการไหลของน้ำมีค่าน้อย ๆ ลักษณะเส้นสีที่ติดจะมีลักษณะเป็นเส้นราบเรียบสม่ำเสมอ โดยเคลื่อนที่ไปได้ระยะทางหนึ่ง จากนั้นเส้นสีจะตกลงสู่พื้นท่อ และมีการกระจายตัวและละลายรวมตัวกับน้ำ อัตราการไหลของน้ำในช่วงที่เส้นสีเคลื่อนที่แบบราบเรียบนี้ วัดได้อยู่ในช่วง 0 ถึง 39.47 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งมีปริมาณการเปิดวาล์ว 0% ถึง 16.67% ตามลำดับ

คำนวณค่าเรย์โนลด์ส์นับเบอร์พบว่ามีความอยู่ในช่วง 0 ถึงประมาณ 1840 (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข)

6.2.2 เมื่อเพิ่มปริมาณการเปิดวาล์วให้มากขึ้น ลักษณะเส้นสีที่ติดลงไปจะมีการเคลื่อนที่สั้นขึ้นลงไม่เป็นเส้นตรงอีกต่อไป และเมื่อเคลื่อนที่ไปได้ระยะทางหนึ่งสีจะกระจายและละลายรวมตัวกับน้ำ อัตราการไหลของน้ำในช่วงที่เส้นสีเคลื่อนที่แบบไม่เสถียรนี้ วัดได้อยู่ในช่วง 39.47 ถึง 79.47 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งมีปริมาณการเปิดวาล์ว 16.67% ถึง 27% ตามลำดับ

คำนวณค่าเรย์โนลด์ส์นับเบอร์พบว่ามีความอยู่ในช่วง 1840 ถึงประมาณ 3700

6.2.3 เมื่อเพิ่มปริมาณการเปิดวาล์วขึ้นไปเรื่อย ๆ ลักษณะเส้นสีที่ติดลงไปจะมีการเคลื่อนที่ไม่เป็นระเบียบมากขึ้น สีจะกระจายและละลายรวมตัวกับน้ำอย่างรวดเร็ว อัตราการไหลของน้ำในช่วงที่เส้นสีเคลื่อนที่แบบไม่เสถียรนี้ วัดได้อยู่ในช่วงมากกว่า 79.47 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งมีปริมาณการเปิดวาล์วมากกว่า 27%

คำนวณค่าเรย์โนลด์ส์นับเบอร์พบว่ามีความมากกว่า 3700 และมีค่าสูงสุดถึง 15,174

6.2.4 การวัดค่าความดันลดในท่อเปล่า ระยะความยาวท่อ 65 เซนติเมตร โดยใช้มาตรมิเตอร์บรรจุปรอท พบว่าไม่สามารถอ่านค่าความแตกต่างของค่าความดันลดได้ในทุกช่วงอัตราการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 ผลการทดลองเมื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลเมื่อไหลผ่านแผ่นระนาบเรียบ

ตอนที่ 1 ศึกษาปรากฏการณ์การเกิดการแยกไหลและการเกิดเวกเมื่องสาของแผ่นระนาบเรียบเปลี่ยนแปลงไป

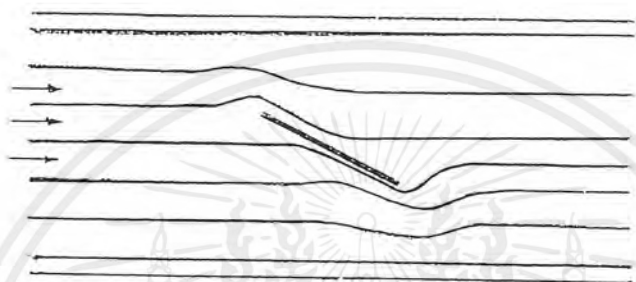
จากการทดลอง เมื่อเลือกทำการทดลองในช่วงการไหลแบบราบเรียบโดยอาศัยการอ้างอิงจากการทดลองในข้อ 6.2 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถสังเกตเห็นลักษณะของเส้นสีได้ชัดเจน และเมื่อทำการปรับองศาของแผ่นระนาบเรียบ ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ผลการทดลองการศึกษาปรากฏการณ์การไหลผ่านแผ่นระนาบเรียบ

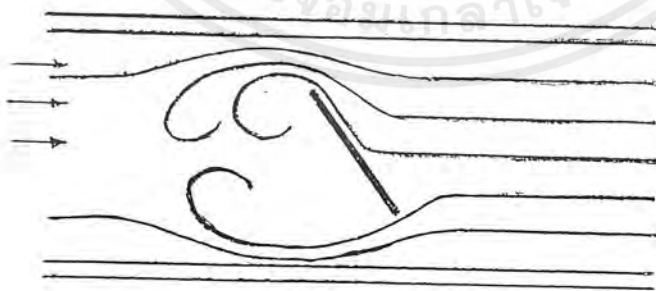
องศาของแผ่นระนาบเรียบ	ลักษณะที่สังเกตได้เมื่อเส้นสีไหลผ่านแผ่นระนาบเรียบ
0-10	ที่บริเวณก่อนและหลังแผ่นระนาบเรียบ เส้นสีเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง โดยเกิดการแยกไหลลู่ออกเล็กน้อย และเมื่อไหลผ่านแผ่นระนาบเรียบไปจะเกิดการถูกลับสู่สายการไหลเช่นเดิม ยังไม่เกิดการหมุนวนบริเวณหลังวัตถุ (ดังรูปที่ 6.2)
10-90	เส้นสีบริเวณก่อนถึงแผ่นระนาบเรียบเส้นสีเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง และเมื่อไหลผ่านแผ่นระนาบเรียบไป (ดังรูปที่ 6.3) พบว่า การเกิดการไหลแบบหมุนวน - ที่องศาของแผ่นระนาบเรียบมีค่าต่ำ ลักษณะการเกิดการหมุนวนจะเห็นได้ชัดเจนและเกิดไม่รุนแรง - เมื่อองศาของแผ่นระนาบเรียบมากขึ้นลักษณะการเกิดการหมุนวนจะเห็นไม่ชัดเจนนัก และเกิดการหมุนวนรุนแรงขึ้น

ตารางที่ 6.2 ผลการทดลองการศึกษาปรากฏการณ์การไหลผ่านแผ่นระนาบเรียบ (ต่อ)

องศาของแผ่น ระนาบเรียบ	ลักษณะที่สังเกตได้เมื่อเส้นสีไหลผ่านแผ่นระนาบเรียบ
10-90	ขอบเขตของการหมุนวนและการเกิดการแยกการไหล - ท้องของแผ่นระนาบเรียบมีค่าต่ำ ขอบเขตของการเกิดการหมุนวนจะมีค่าน้อยคือเกิดขอบเขตเป็นบริเวณน้อย - เมื่อองศาของแผ่นระนาบเรียบมากขึ้นขอบเขตของการเกิดการหมุนวนก็จะมากขึ้น แนวโน้มของการลู่กลับเข้าสู่กระแสของการไหล - ท้องของแผ่นระนาบเรียบมีค่าต่ำ จะมีแนวโน้มที่จะเกิดการรวมตัวเพื่อลู่ไปกับกระแสการไหลอีกครั้งที่ระยะทางหนึ่งแต่ไม่สามารถระบุได้แน่นอนและสังเกตเห็นไม่ชัดเจนนัก - เมื่อองศาของแผ่นระนาบเรียบเพิ่มขึ้นแนวโน้มที่จะเกิดการรวมตัวเพื่อลู่ไปกับกระแสการไหลดังกล่าวจะค่อย ๆ ลดลง และระยะทางที่มีแนวโน้มจะลู่กลับก็จะสั้นลง



รูปที่ 6.2 ลักษณะเส้นสีที่สังเกตได้เมื่อองศาของแผ่นระนาบเรียบมีค่าเท่ากับ 0 ถึง 10 องศา



รูปที่ 6.3 ลักษณะเส้นสีที่สังเกตได้เมื่อองศาของแผ่นระนาบเรียบมีค่าเท่ากับ 10 ถึง 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการวัดค่าความดันโลหิตที่เกิดขึ้น โดยใช้มานอมิเตอร์ พบว่าไม่สามารถอ่านค่าความดันโลหิตได้ ดังนั้นเพื่อการศึกษาปัจจัยที่มีต่อค่าความดันโลหิตที่เกิดขึ้นจึงได้ทำการทดลองในตอน
ที่ 2 ต่อไป

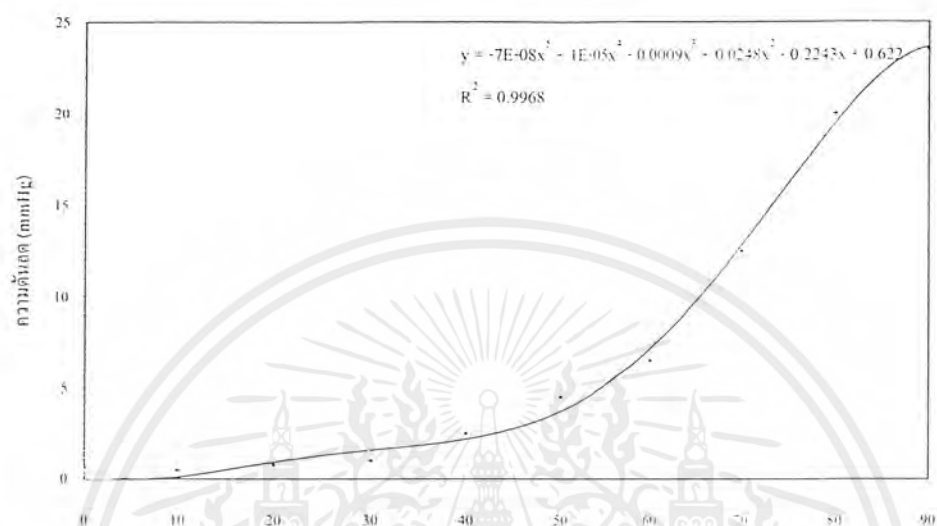
ตอนที่ 2 ศึกษาค่าความดันโลหิตที่เกิดขึ้นเมื่อองศาของแผ่นระนาบเรียบเปลี่ยนไป

ตารางที่ 6.3 ผลการทดลองการวัดความดันเมื่อองศาของแผ่นระนาบเรียบมีค่าต่าง ๆ กัน

องศาของแผ่นระนาบเรียบ	ค่าความดันโลหิต (mmHg)
0	0.50
10	0.50
20	0.75
30	1.00
40	2.50
50	4.50
60	6.50
70	12.50
80	20.00
90	23.50

จากตารางที่ 6.3 นำข้อมูลมาพล็อตกราฟระหว่างองศาของแผ่นระนาบเรียบและค่าความดันโลหิตที่เกิดขึ้นจะได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดและปริมาณการเปิดของวาล์ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการทดลอง

7.1.1 จากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า อุปกรณ์เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลของน้ำที่สร้างขึ้นนี้ สามารถแบ่งช่วงการไหลในท่อได้เป็น 3 ช่วงดังนี้

ช่วงการไหลที่มีค่า $N_{Re} < 1840$ เรียกว่า การไหลแบบราบเรียบ

ช่วงการไหลที่มีค่า $1840 < N_{Re} < 3700$ เรียกว่า การไหลในช่วงเปลี่ยน

ช่วงการไหลที่มีค่า $N_{Re} > 3700$ เรียกว่า การไหลแบบปั่นป่วน

ทั้งนี้ช่วงการไหลดังกล่าวเป็นค่าเฉพาะของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นชุดนี้เท่านั้น ดังนั้นในการปรับปรุงหรือสร้างอุปกรณ์ที่มีลักษณะเดียวกันนี้จะต้องหาความสัมพันธ์ของช่วงการไหลใหม่ทุกครั้ง เพราะขีดความสามารถของอุปกรณ์แต่ละชุดมีค่าไม่เท่ากัน

7.1.2 จากการศึกษาปรากฏการณ์การไหลของน้ำผ่านแผ่นระนาบเรียบ พบว่า

เมื่อองศาของแผ่นระนาบเรียบมีค่า $0-10^\circ$ การไหลจะแยกตัวผ่านแผ่นระนาบแล้วจะกลับไปรวมตัวกันเมื่อผ่านแผ่นระนาบเรียบไป

เมื่อองศาของแผ่นระนาบเรียบมีค่ามากกว่า 10° จะเริ่มเกิดการไหลแบบหมุนวนขึ้นที่บริเวณหลังแผ่นระนาบเรียบเรียกว่า เวก โดยยิ่งองศามากขึ้น ลักษณะของเวกก็จะมี ความรุนแรงมากขึ้น บริเวณขอบเขตของการเกิดเวกจะมากขึ้น แนวโน้มการรวมตัวลู่กลับสู่กระแสการไหลจะน้อยลง และระยะทางของการรวมตัวลู่กลับสู่กระแสการไหลจะมากขึ้น

ทั้งนี้มุมที่เกิดขึ้นเป็นค่าเฉพาะสำหรับอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นชุดนี้เท่านั้น ดังนั้นเมื่อทำการปรับปรุงอุปกรณ์ชิ้นใหม่ค่ามุมที่เกิดขึ้นนี้ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงไปบ้างเล็กน้อย

7.1.3 จากการศึกษาความดันลดที่เกิดขึ้นเมื่อองศาแผ่นระนาบเรียบเปลี่ยนไป พบว่า เมื่อองศาของแผ่นระนาบเรียบเพิ่มขึ้นค่าความดันลดตลอดแผ่นระนาบเรียบจะเพิ่มขึ้นด้วย

7.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

7.2.1 จากการทดลองซึ่งสามารถแบ่งช่วงการไหลได้เป็น 3 ช่วงที่ค่าเรย์โนลด์สดังที่กล่าวในสรุปผลการทดลองนั้น จะเห็นว่าแตกต่างจากทฤษฎีไปบ้าง กล่าวคือ ตามทฤษฎีสามารถแบ่งช่วงของการไหลได้ดังนี้

การไหลแบบราบเรียบ	N_{Re} น้อยกว่า 2100
การไหลในช่วงเปลี่ยน	N_{Re} อยู่ระหว่าง 2100 และ 4000
การไหลแบบปั่นป่วน	N_{Re} มากกว่า 4000

ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการทดลองอาจเกิดสิ่งรบกวนการไหลเกิดขึ้น เช่น การรบกวนจากการขยายหรือการลดขนาดท่อ หรือจากข้อต่อต่าง ๆ แม้ว่าในการออกแบบอุปกรณ์จะมีตระวังและควบคุมไม่ให้เกิดสิ่งรบกวนดังกล่าวแล้ว แต่ในความเป็นจริงจะยังไม่สามารถกำจัดให้หมดไปโดยสิ้นเชิงได้ นอกจากนี้ ในการทดลองเป็นการศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นด้วยตาเปล่า ซึ่งอาจทำให้จุดที่สังเกตเกิดความคลาดเคลื่อนไปบ้าง

7.2.2 ในการแบ่งช่วงของการไหลนอกจากจะการใช้การสังเกตการเคลื่อนที่ของสีแล้ว ยังสามารถหาได้จากผลการทดลองวัดค่าความดันลดที่เกิดขึ้นในท่อเรียบ ที่อัตราการไหลต่าง ๆ กัน ได้อีกด้วย แต่ในการศึกษาในครั้งนี้ไม่สามารถวัดค่าความดันลดที่เกิดขึ้นได้ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความยาวช่วงที่ทำการวัดมีลำน้อยเกินกว่าที่จะทำการวัดโดยใช้مانอมิเตอร์ซึ่งบรรจุปรอทไว้ได้

ได้มีการทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงวิธีการวัดค่าความดันลดที่เกิดขึ้นภายในท่อ โดยได้

เสนอแนวทางไว้ในหัวข้อที่ 7.3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2.3 ในการทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลของน้ำผ่านแผ่นระนาบเรียบ จะเห็นว่า เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า เวค ขึ้นที่บริเวณหลังแผ่นระนาบเรียบซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี แต่อย่างไรก็ตาม ยังไม่สามารถสังเกตลักษณะของเวคที่เกิดขึ้นได้ชัดเจนนัก เนื่องจากข้อจำกัดของสีที่ใช้ในการทดลอง คือ KMnO_4 ซึ่งมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี ทำให้สังเกตเห็นการเกิดเวคเป็นระยะเวลาไม่นานนัก จึงไม่สามารถระบุระยะของการเกิดขึ้นขอบเขตของการแยกไหลที่แน่นอนได้

7.2.4 เมื่อองศาของแผ่นระนาบเรียบเพิ่มขึ้น ค่าความดันลดจะมีค่ามากขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่า เมื่อองศาของแผ่นระนาบเรียบเพิ่มขึ้น ความดันที่บริเวณหลังวัตถุจะลดลง ทำให้เกิดการไหลวนมากขึ้น ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานมากขึ้น ทั้งนี้ สอดคล้องกับผลการทดลองในการศึกษาลักษณะที่เกิดขึ้นเมื่อไหลผ่านแผ่นระนาบเรียบ

7.3 ข้อเสนอแนะ

7.3.1 ควรรักษาระดับน้ำในถังให้คงที่ตลอดเวลา ในบางครั้ง เช่น ในช่วงที่อัตราการไหลของน้ำมีค่าสูง ๆ น้ำที่ไหลเข้าสู่ถังอาจจะไหลไม่ทัน ดังนั้นอาจช่วยโดยการกดลูกกลอยเพื่อให้ น้ำไหลได้เร็วขึ้น

7.3.2 ควรตรวจสอบบริเวณรอยต่อต่าง ๆ ไม่ให้มีรอยรั่ว หากพบว่ามี การรั่วเกิดขึ้นอาจใช้ดินน้ำมันมาอุดรอยรั่วนั้นในระหว่างทำการทดลอง

7.3.3 ในการปรับปริมาณการเปิดวาล์วในช่วงของการไหลแบบราบเรียบควรค่อย ๆ เพิ่มปริมาณการเปิดวาล์วครั้งละน้อย ๆ เพราะในช่วงนี้อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ช่วงการไหลในช่วงเปลี่ยนได้อย่างรวดเร็ว

7.3.4 ในขณะทำการทดลองควรระมัดระวังให้อุปกรณ์การทดลองอยู่ในสภาพคงที่ เช่น อย่าให้สายยางสำหรับฉีดสีขยับไปมา หรือ ระวังไม่ให้ระบบท่อเกิดการสั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3.5 ในการทดลองอาจเปลี่ยนชนิดของสี โดยเลือกใช้สีที่มีคุณสมบัติดังนี้ คือ ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยมาก มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำ ([Massey,n.d.] แนะนำให้ใช้สารจำพวกสีย้อมอินทรีย์ (Organic dye) และ [ขนิษฐา; จันจิรา; และปรัชญา; 2535] แนะนำให้ใช้ C.I.No. 42000 $C_{46}H_{50}N_4O_4 \cdot 2C_2H_2O_4$ มวลโมเลกุล 927.02 กรัมต่อโมล CERTISTAIN)

7.3.6 ถ้าต้องการทราบอัตราการไหลที่ถูกต้อง และแน่นอน ควรทำการติดตั้งเครื่องวัดอัตราการไหลที่ได้มาตรฐาน เช่น โรตاميเตอร์

7.3.7 ถ้าต้องการวัดค่าความดันลงให้ได้ค่าที่ถูกต้อง และแน่นอน อาจเปลี่ยนเครื่องมือวัดความดัน โดยเสนอแนะแนวทางดังนี้

ก) ใช้เป็นมานอมิเตอร์แบบเอียง (Inclined manometer)

ข) เปลี่ยนชนิดของเหลวที่บรรจุในมานอมิเตอร์ โดยเลือกของเหลวที่มีความหนาแน่นแตกต่างจากน้ำค่อนข้างมาก

เอกสารอ้างอิง

- Birds, R. B.; Stewart, W. E.; and Lightfoot, E. N. 1960. **Transport Phenomena**, United States of America: John Wiley & Sons. pp.
- Christi, T.G. 1995. **Transport Processes and Unit Operation**, Singapore: Prentice Hall.
- Douglas, J. F.; Gasiorek, J. M.; and Swaffiells, J. A. 1993. **Fluid Mechanics**, 2nd ed. Singapore: Longman. pp.
- de Nevers, N. 1991. **Fluid Mechanics for Chemical Engineers**, 2nd ed., Singapore: McGraw-Hill. pp.
- Irving, H.S. 1992. **Mechanics of fluids**, 3rd ed., United States of America: McGraw-Hill.
- James, R. W.; Charles, E. W.; and Robert, E. W. 1976. **Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer**, 3rd ed. Singapore: John Wiley & Sons.
- Massey, B.S., n.d. **Mechanics of Fluids**, 4th ed., London: Van Nostrand Reinhold. pp.
- McCabe, W. L.; Smith, J. C.; and Harriott, P. 1993. **Unit Operations of Chemical Engineering**, 5th ed., Singapore: McGraw-Hill. pp.
- Ogawa, A. 1993. **Vortex flow**, CRC Press. pp.
- Robert, S. B., and Harry, C. H. 1988. **Transport Phenomena**, Singapore: McGraw-Hill.
- Ron, D. 1996. **Chemical Engineering Fluid Mechanics**, United States of America: Marcel Dekker. pp.
- Victor, L. S. 1961. **Handbook of fluid dynamics**, 1st ed., United States of America: McGraw-Hill.

พนิชฐา คำวิสัยศักดิ์, จันจิรา วงศ์ไพฑูรย์ปิยะ, และ ปรัชญา สวัสดิ์พานิช. 2535.

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสภาพการไหลของของไหลในท่อ. ปรินูญานพนธ์วิศวกรรม-
ศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลอง

ข้อมูลการทดลองการ วัดอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.1 เซนติเมตร เมื่อปริมาณการเปิดวาล์วมีค่าต่าง ๆ กัน แสดงดังตารางที่ ก.1

สภาวะการทดลอง อุณหภูมิน้ำ 30 องศาเซลเซียส



ตารางที่ ก.1 ผลการวัดอัตราการไหลของน้ำ เมื่อปริมาณการเปิดของวาล์วมีค่าต่าง ๆ กัน

%การเปิดของวาล์ว ครั้งที่	0			16.67			22.22			33.33			44.44		
	V	t	Q	V	t	Q	V	t	Q	V	t	Q	V	t	Q
1	0.00	0.00	0.00	94.00	3.71	25.34	140	2.15	65.12	198.00	1.50	132.00	194.00	0.90	215.56
2	0.00	0.00	0.00	91.00	3.63	25.07	142	2.3	61.74	224.00	1.60	140.00	187.00	0.98	190.82
3	0.00	0.00	0.00	77.00	3.26	23.62	138	2.38	57.98	232.00	1.81	128.18	172.00	0.88	195.45
4	0.00	0.00	0.00	113.00	4.35	25.98	126	2.14	58.88	194.00	1.52	127.63	180.00	1.06	169.81
5	0.00	0.00	0.00	91.00	3.46	26.30	169	2.86	59.09	212.00	1.59	133.33	172.00	0.81	212.35
6	0.00	0.00	0.00	95.00	3.70	25.68	140	2.35	59.57	222.00	1.71	129.82	177.00	0.89	198.88
7	0.00	0.00	0.00	102.00	4.20	24.29	142	2.41	58.92	226.00	1.68	134.52	186.00	0.91	204.40
8	0.00	0.00	0.00	98.00	3.81	25.72	142	2.33	60.94	248.00	1.83	131.91	190.00	0.97	195.88
9	0.00	0.00	0.00	96.00	3.78	25.40	128	2.12	60.38	232.00	1.75	132.57	188.00	0.96	195.83
10	0.00	0.00	0.00	88.00	3.53	24.93	136	2.16	62.96	230.00	1.76	130.68	170.00	0.84	202.38
11	0.00	0.00	0.00	86.00	3.44	25.00	140	2.33	60.09	236.00	1.79	131.84	191.00	0.95	201.05
12	0.00	0.00	0.00	94.00	3.89	24.16	128	2.09	61.24	236.00	1.78	132.58	182.00	0.95	191.58
13	0.00	0.00	0.00	92.00	3.55	25.92	136	2.3	59.13	240.00	1.81	132.60	184.00	0.93	197.85
14	0.00	0.00	0.00	92.00	3.89	23.65	136	2.28	59.65	236.00	1.78	132.58	176.00	0.99	177.78
15	0.00	0.00	0.00	95.00	3.56	26.69	138	2.33	59.23	234.00	1.76	132.95	199.00	0.98	203.06
เฉลี่ย			0.00			25.18			60.33			132.21			196.84

หมายเหตุ V = ปริมาตร (ลบ.ชม.)

t = เวลา (วินาที)

Q = อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.1 ซม. = V/t (ลบ.ชม./วินาที)

ตารางที่ ก.1 ผลการวัดอัตราการไหลของน้ำ เมื่อปริมาณการเปิดของวาล์วมีค่าต่างๆ กัน (ต่อ)

การเปิดของวาล์ว ครั้งที่	55.56			66.67			77.78			88.89			100		
	V'	t	Q	V'	t	Q	V'	t	Q	V'	t	Q	V'	t	Q
1	322.00	1.26	255.56	370.00	1.25	296.00	535.00	1.59	336.48	315.00	1.14	276.32	480.00	1.57	305.73
2	360.00	1.38	260.87	415.00	1.38	300.72	570.00	1.70	335.29	505.00	1.63	309.82	590.00	1.73	341.04
3	355.00	1.39	255.40	415.00	1.48	280.41	580.00	1.77	327.68	505.00	1.66	304.22	590.00	1.74	339.08
4	460.00	1.75	262.86	490.00	1.63	300.61	590.00	1.90	310.53	650.00	1.84	353.26	570.00	1.70	335.29
5	410.00	1.59	257.86	525.00	1.89	277.78	525.00	1.66	316.27	660.00	1.84	358.70	575.00	1.75	328.57
6	412.00	1.60	257.50	455.00	1.54	295.45	516.00	1.65	312.73	550.00	1.69	325.44	580.00	1.78	325.84
7	412.00	1.58	260.76	444.00	1.51	294.04	510.00	1.64	310.98	524.00	1.64	319.51	612.00	1.86	329.03
8	400.00	1.55	258.06	442.00	1.53	288.89	498.00	1.58	315.19	546.00	1.73	315.61	556.00	1.75	317.71
9	380.00	1.48	256.76	442.00	1.53	288.89	518.00	1.66	312.05	526.00	1.66	316.87	548.00	1.76	311.36
10	380.00	1.45	262.07	441.00	1.51	292.05	566.00	1.85	305.95	560.00	1.76	318.18	540.00	1.66	325.30
11	410.00	1.59	257.86	444.00	1.53	290.20	540.00	1.71	315.79	576.00	1.80	320.00	590.00	1.78	331.46
12	410.00	1.58	259.49	460.00	1.57	292.99	544.00	1.74	312.64	570.00	1.78	320.22	556.00	1.69	328.99
13	402.00	1.55	259.35	458.00	1.58	289.87	580.00	1.90	305.26	546.00	1.69	323.08	540.00	1.65	327.27
14	400.00	1.55	258.06	460.00	1.56	294.87	582.00	1.84	316.30	580.00	1.81	320.44	528.00	1.62	325.93
15	402.00	1.54	261.04	440.00	1.51	291.39	582.00	1.89	307.94	580.00	1.79	324.02	562.00	1.78	315.73
เฉลี่ย			258.90			291.61			316.07			320.38			325.89

หมายเหตุ V' = ปริมาตร (ลบ.ชม.)

t = เวลา (วินาที)

Q = อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.1 ซม. = V'/t (ลบ.ชม./วินาที)

ภาคผนวก ข

การคำนวณ

จากตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ผลการวัดอัตราการไหลของน้ำ เมื่อปริมาณการเปิดของวาล์วมีค่าต่าง ๆ กัน

% การเปิดของวาล์ว	อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำที่ไหลผ่านท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.1 เซนติเมตร (cm ³ /s)
0	0.00
16.67	25.18
22.22	60.33
33.33	132.21
44.44	196.84
55.55	258.90
66.67	291.61
77.78	316.07
88.89	320.38
100	325.89

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

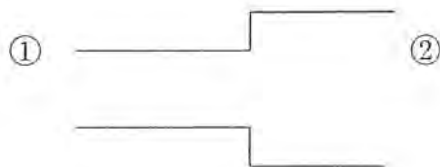
คุณสมบัติของน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ความหนาแน่นน้ำ (ρ) = 995.68 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ความหนืดของน้ำ (μ) = 0.8007×10^{-3} กิโลกรัม/เมตร.วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 ลักษณะท่อเมื่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน

เมื่อให้ 1 แทนสภาวะที่ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.1 ซม.

2 แทนสภาวะที่ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.4 ซม.

จะได้ $A_1 = 3.46 \times 10^{-4}$ ตารางเมตร

$A_2 = 9.08 \times 10^{-4}$ ตารางเมตร

ตัวอย่างการคำนวณ

1. การหาความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.1 เซนติเมตร

จากตาราง ก.1 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

% การเปิดของวาล์ว = 16.67%

อัตราการไหลของน้ำ = 25.18 ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที

จะสามารถหาค่าความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.1 เซนติเมตร

ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V_1 &= Q/A = \frac{25.18 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที}}{3.46 \text{ ตารางเซนติเมตร}} \\ &= 7.28 \text{ เซนติเมตร/วินาที} \\ &= 7.28 \times 10^{-2} \text{ เมตร/วินาที} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การคำนวณความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.4 เซนติเมตร (v_2)

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

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

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

$$\% \text{ การเปิดของวาล์ว} = 16.67\%$$

$$\bar{V}_1 \text{ (จากการคำนวณในข้อ 1)} = 7.28 \times 10^{-2} \text{ เมตรต่อวินาที}$$

$$A_1 = 3.46 \times 10^{-4} \text{ ตารางเมตร}$$

$$A_2 = 9.08 \times 10^{-4} \text{ ตารางเมตร}$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการการคำนวณ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \bar{V}_2 &= \frac{(3.46 \times 10^{-4}) \times (7.28 \times 10^{-2})}{9.08 \times 10^{-4}} \\ &= 2.77 \times 10^{-2} \text{ เมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

3. การคำนวณค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$N_{Re} = \frac{D_2 \bar{V}_2 \rho}{\mu}$$

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

$$\% \text{ การเปิดของวาล์ว} = 16.67\%$$

$$\bar{V}_2 \text{ (จากการคำนวณในข้อ 2)} = 2.77 \times 10^{-2} \text{ เมตรต่อวินาที}$$

ทำการแทนค่าในสมการการคำนวณ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 N_{Re} &= \frac{(3.4 \times 10^{-2}) \times (2.77 \times 10^{-2}) \times 995.68}{0.8007 \times 10^{-3}} \\
 &= 1171.14
 \end{aligned}$$

ผลการคำนวณค่าต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ ข.1



ตารางที่ ข.1 ผลการคำนวณที่ได้จากการทดลอง

จำนวนรอบการหมุนวาล์ว	0	0.75	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
% การเปิดของวาล์ว	0	16.67	22.22	33.33	44.44	55.56	66.67	77.78	88.89	100.00
อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำที่ไหลผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.1 ซม. (cm^3/s)	0	25.18	60.33	132.21	196.84	258.90	291.61	316.07	320.38	325.89
ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.1 ซม. (เมตรต่อวินาที) ($\times 10^2$)	0	7.28	17.44	38.21	56.89	74.83	84.28	91.35	92.60	94.19
ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.4 ซม. (เมตรต่อวินาที) ($\times 10^2$)	0	2.77	6.64	14.56	21.68	28.51	32.12	34.81	35.28	35.89
N_{Re}	0	1171.14	2807.35	6155.88	9166.17	12053.86	13580.15	14717.46	14916.17	15174.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำ

ตารางที่ ค.1 ค่าความหนาแน่นของน้ำในสถานะของเหลว [Christi, 1995]

อุณหภูมิ		ความหนาแน่น	
K	$^{\circ}\text{C}$	g/cm^3	kg/m^3
273.15	0	0.99987	999.87
277.15	4	1.00000	1000.00
283.15	10	0.99973	999.73
293.15	20	0.99823	998.23
298.15	25	0.99708	997.08
303.15	30	0.99568	995.68
313.15	40	0.99225	992.25
323.15	50	0.98807	988.07
333.15	60	0.98324	983.24
343.15	70	0.97781	977.81
353.15	80	0.97183	971.83
363.15	90	0.96534	965.34
373.15	100	0.95838	958.38

ตารางที่ ค.2 ค่าความหนืดของน้ำในสถานะของเหลว [Christi, 1995]

อุณหภูมิ		ความหนืด [(Pa·s) 10 ³ , (kg/m·s) 10 ³ , or cp]	อุณหภูมิ		ความหนืด [(Pa·s) 10 ³ , (kg/m·s) 10 ³ , or cp]
K	°C		K	°C	
273.15	0	1.7921	323.15	50	0.5494
275.15	2	1.6728	325.15	52	0.5315
277.15	4	1.5674	327.15	54	0.5146
279.15	6	1.4728	329.15	56	0.4985
281.15	8	1.3860	331.15	58	0.4832
283.15	10	1.3077	333.15	60	0.4688
285.15	12	1.2363	335.15	62	0.4550
287.15	14	1.1709	337.15	64	0.4418
289.15	16	1.1111	339.15	66	0.4293
291.15	18	1.0559	341.15	68	0.4174
293.15	20	1.0050	343.15	70	0.4061
293.35	20.2	1.0000	345.15	72	0.3952
295.15	22	0.9579	347.15	74	0.3849
297.15	24	0.9142	349.15	76	0.3750
298.15	25	0.8937	351.15	78	0.3655
299.15	26	0.8737	353.15	80	0.3565
301.15	28	0.8360	355.15	82	0.3478
303.15	30	0.8007	357.15	84	0.3395
305.15	32	0.7679	359.15	86	0.3315
307.15	34	0.7371	361.15	88	0.3239
309.15	36	0.7085	363.15	90	0.3165
311.15	38	0.6814	365.15	92	0.3095
313.15	40	0.6560	367.15	94	0.3027
315.15	42	0.6321	369.15	96	0.2962
317.15	44	0.6097	371.15	98	0.2899
319.15	46	0.5883	373.15	100	0.2838
321.15	48	0.5683			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

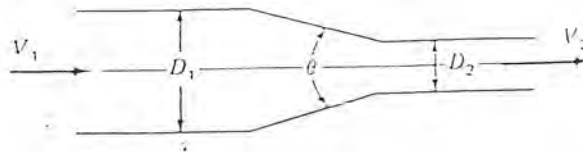
ภาคผนวก ง

ค่าแฟกเตอร์ K

ตารางที่ ง.1 ค่าแฟกเตอร์ K สำหรับข้อต่อต่าง ๆ [Vector, 1961]

ชนิดของข้อต่อหรือวาล์ว	ความสูญเสียเนื่องจากการเสียดทาน, K_f
ข้อต่อ 45 องศา	0.35
ข้อต่อ 90 องศา	0.75
ข้อต่อรูปตัวที	1
วาล์วประตู	
เปิด 100%	0.17
เปิด 50%	4.5
โกลบวาล์ว	
เปิด 100%	6.0
เปิด 50%	9.5
แองเกิลวาล์ว, เปิด 100%	2.0
เช็ควาล์ว	
แบบบอล	70.0
แบบสวิง	2.0
มิเตอร์น้ำแบบจาน	7.0

ค่าแฟกเตอร์ K สำหรับท่อลดขนาด ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.1 ลักษณะข้อต่อลดขนาดแบบตู่

1.1 ถ้า $\theta \leq 45^\circ$, $K = \frac{0.8 \sin (\theta/2) [1 - (D_2/D_1)^2]}{(D_2/D_1)^4}$

1.2 ถ้า $45^\circ < \theta \leq 180^\circ$, $K = \frac{0.5 [1 - (D_2/D_1)^2] \sqrt{\sin \frac{\theta}{2}}}{(D_2/D_1)^4}$

ค่าแฟกเตอร์ K สำหรับข้อต่อขยายขนาด ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ ง.2



รูปที่ ง.2 ลักษณะข้อต่อขยายขนาดแบบตู่

1.1 ถ้า $45^\circ < \theta \leq 180^\circ$, $K = \frac{[1 - (D_1/D_2)^2]^2}{(D_1/D_2)^4}$

1.2 ถ้า $\theta \leq 45^\circ$, $K = \frac{2.6 \sin (\theta/2) [1 - (D_1/D_2)^2]^2}{(D_1/D_2)^4}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

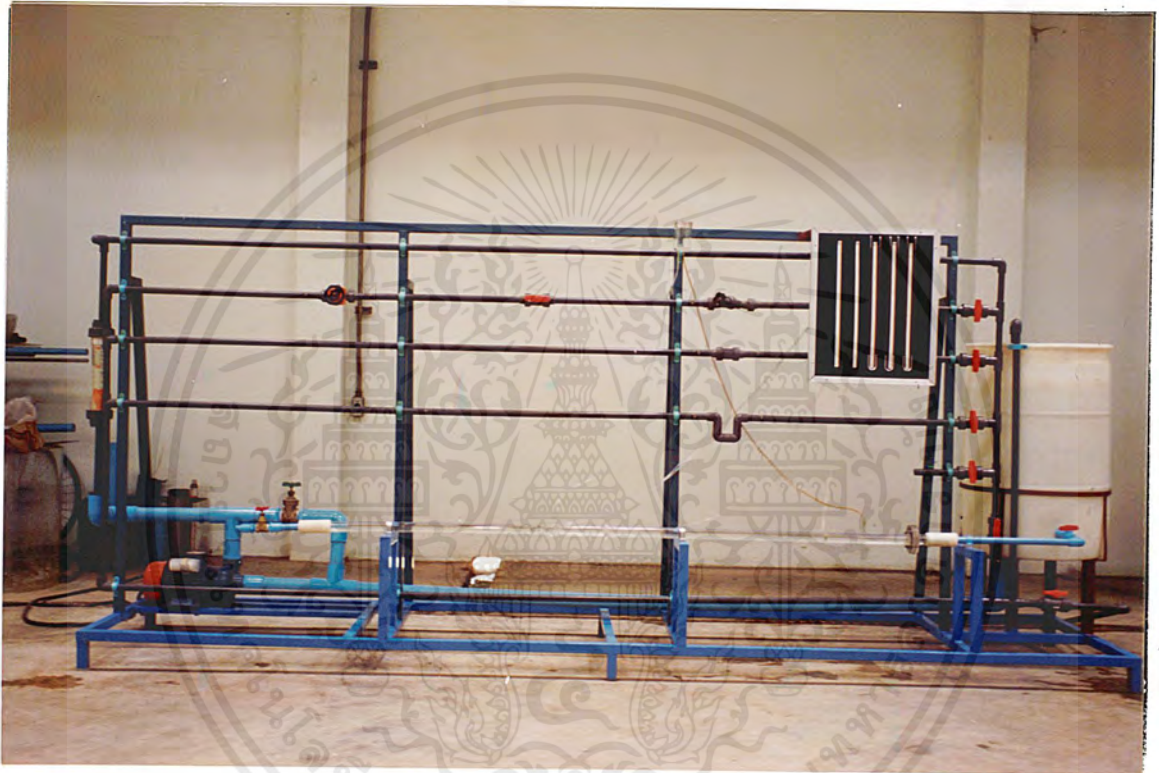
ตารางที่ ง.2 ค่าความขรุขระของผิวท่อหลาย ๆ ชนิด [Vector, 1961]

Material	Condition	Roughness Range	Recommended
Drawn brass	New	0.01-0.0015 mm	0.002 mm
Copper , stainless		0.0004-0.00006 in	0.00008 in
Steel			
Commercial steel	New	0.1-0.02 mm	0.045 mm
		0.004-0.008 in	0.0018 in
	Light rust	1.0-0.15 mm	0.3 mm
		0.04-0.006 in	0.015 in
	General rust	3.0-1.0 mm	2.0 mm
		0.1-0.04 in	0.08 in
Iron	Wrought , new	0.0045 mm	0.045 mm
		0.002 in	0.002 in
	Cast , new	1.0-0.25 mm	0.30 mm
		0.04-0.01 in	0.025 in
	Galvanized	0.15-0.025 mm	0.15 mm
		0.006-0.001 in	0.006 in
	Asphalt-coated	1.0-0.1 mm	0.15 mm
		0.04-0.004 in	0.006 in
Sheet metal	Ducts	0.1-0.02 mm	0.03 mm
	Smooth joints	0.004-0.0008 in	0.0012 in
Concrete	Very smooth	0.18-0.025 mm	0.04 mm
		0.007-0.001 in	0.0016 in
	Wood floated ,	0.8-0.2 mm	0.3 mm
	Brushed	0.03-0.007in	0.0012 in
	Rough , visible	2.5-0.8 mm	2.0 mm
	From marks	0.1-0.03 in	0.08 in
Wood	Stave , used	1.0-0.25 mm	0.5 mm
		0.035-0.01 in	0.02 in
Glass or plastic	Drawn tubing	0.01-0.0015 mm	0.002 mm
		0.0004-0.00006 in	0.0008 in
Rubber	Smooth tubing	0.07-0.006 mm	0.01 mm
		0.0003-0.00025 in	0.0004 in
	Wire-reinforced	4.0-0.3 mm	1.0 mm
		0.15-0.01 in	0.04 in

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

อุปกรณ์การทดลองเพื่อใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์การไหลในท่อ



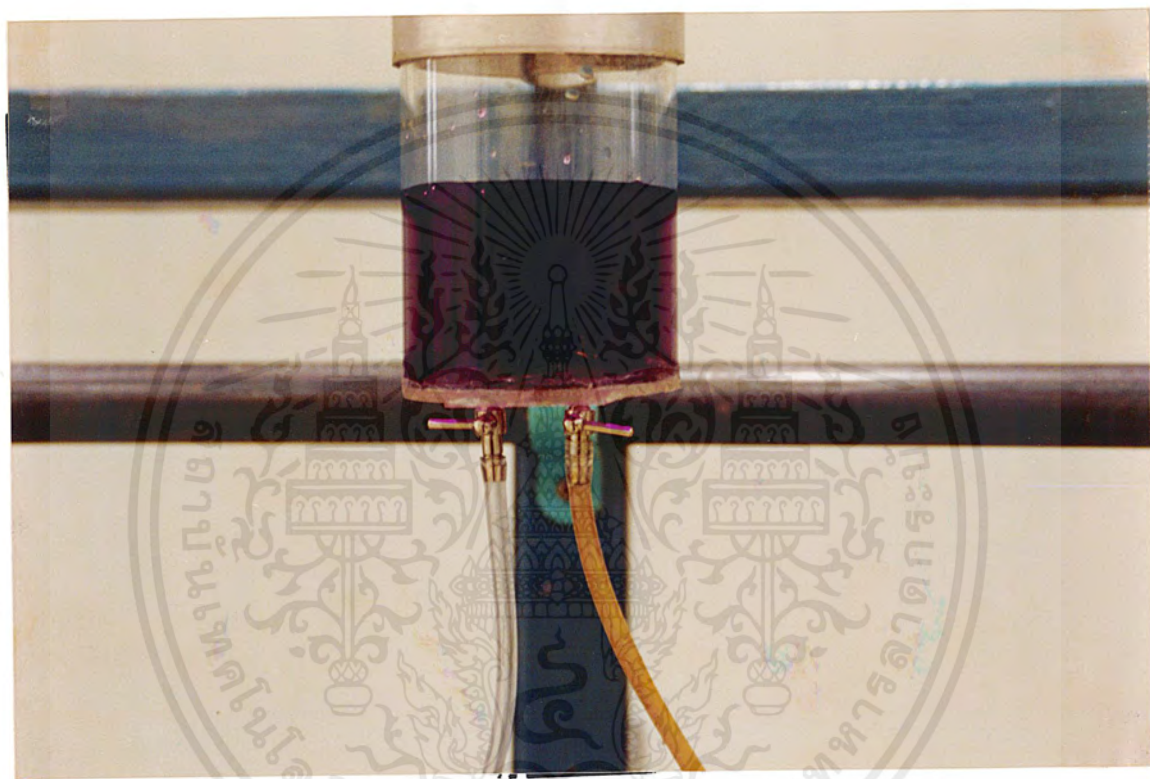
รูปที่ จ.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการศึกษารากฏการณ์การไหลในท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.2 การควบคุมระดับของน้ำโดยใช้ตุ๊กลอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



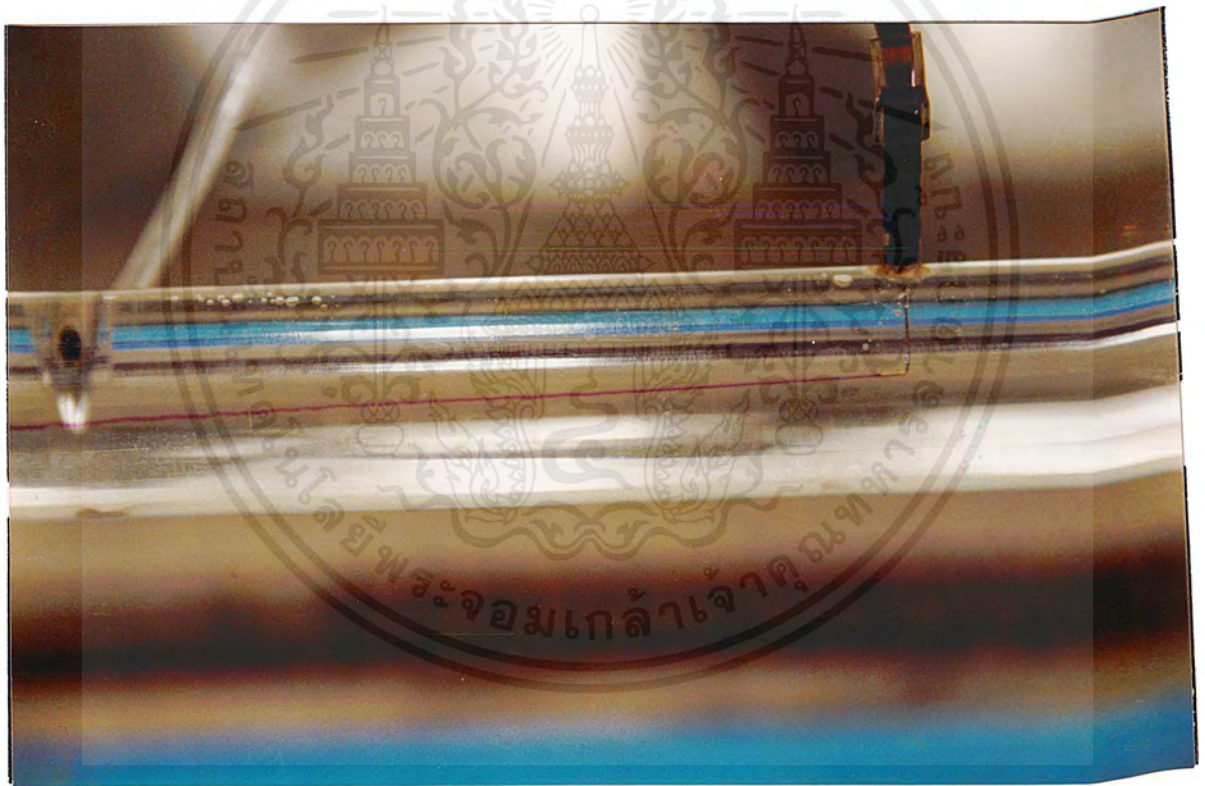
รูปที่ จ.3 ภาพระบรรจู้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

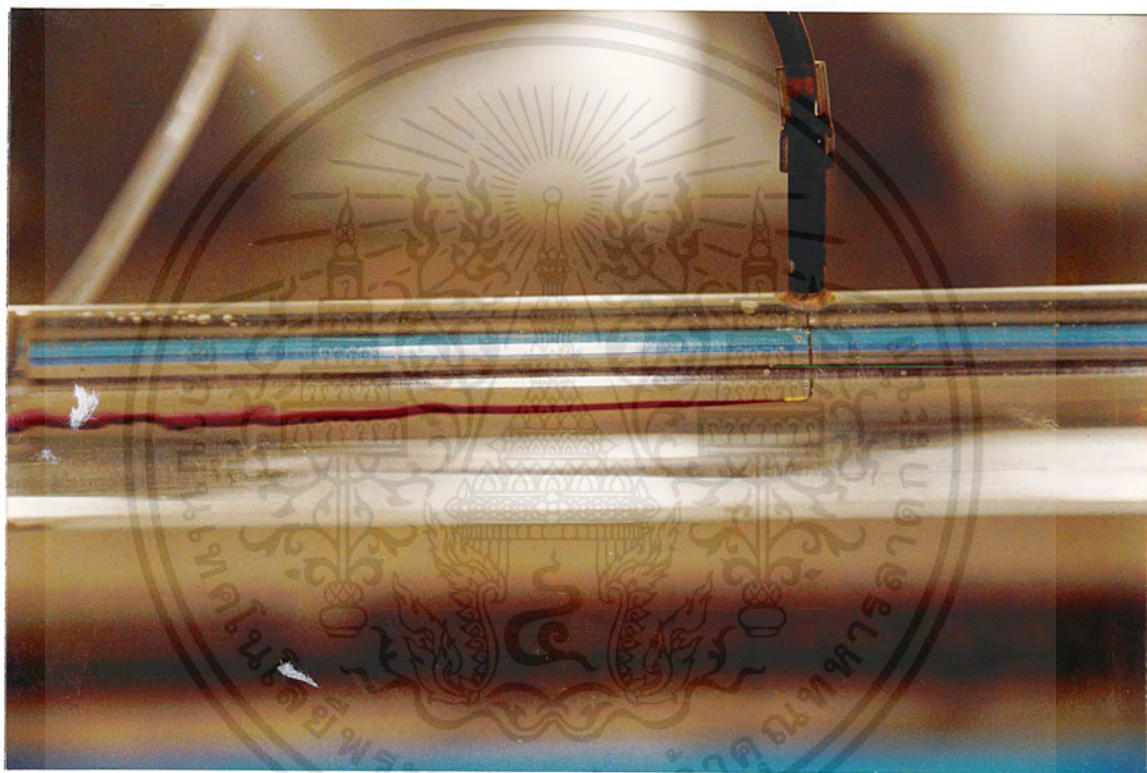
ภาคผนวก จ

ลักษณะเส้นสีที่ได้จากการทดลอง

จ.1 ลักษณะเส้นสีที่ได้จากการทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลในท่อเปล่า

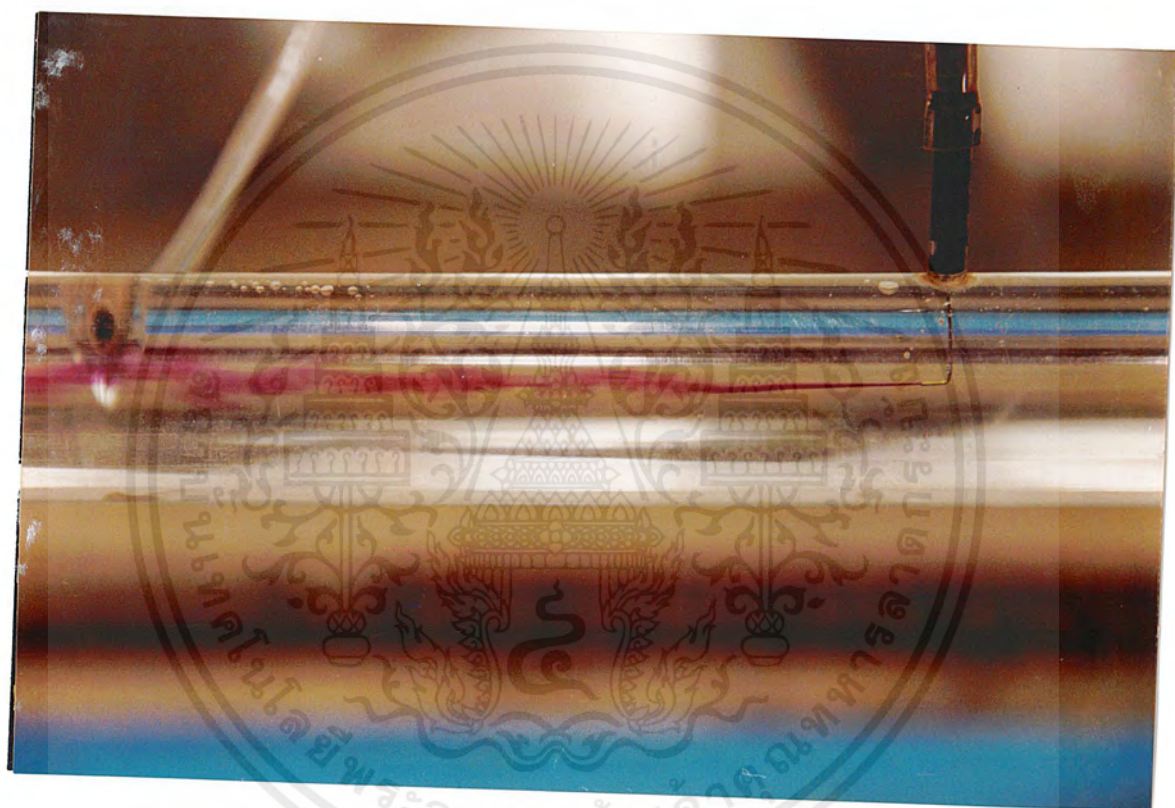


รูปที่ จ.1 ลักษณะเส้นสีในช่วงการไหลแบบราบเรียบที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ประมาณ 1171



รูปที่ ๑.๒ ลักษณะเส้นสีในช่วงการไหลในช่วงเปลี่ยนที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ประมาณ 2800

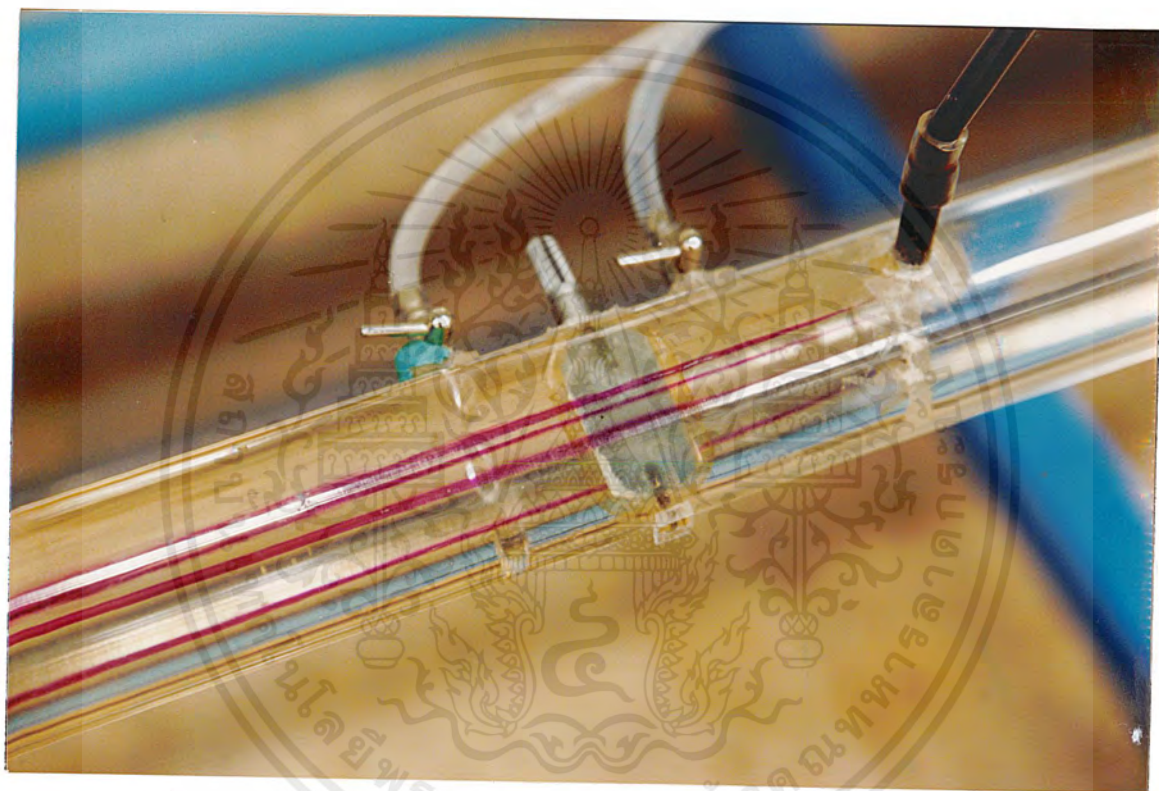
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.3 ลักษณะเส้นสีในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ประมาณ 6100

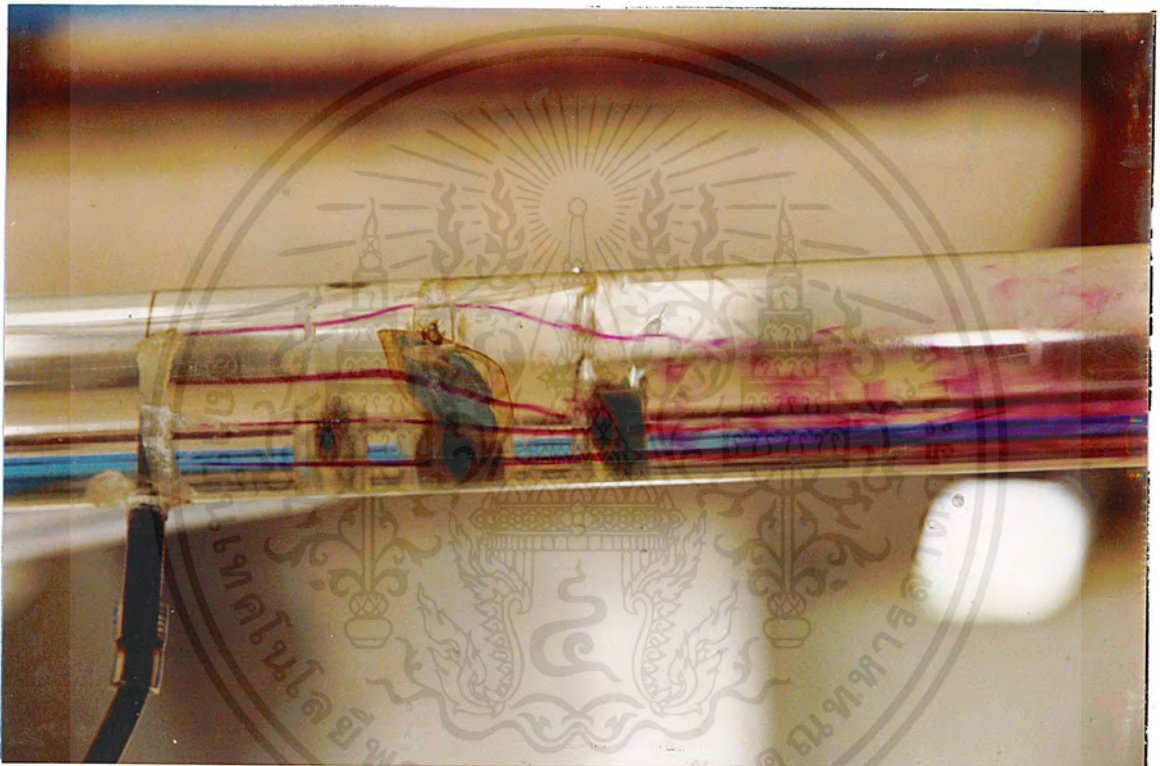
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ.2 ลักษณะเส้นสีที่ได้จากการทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลในท่อเมื่อไหลผ่านแผ่นระนาบเรียบ



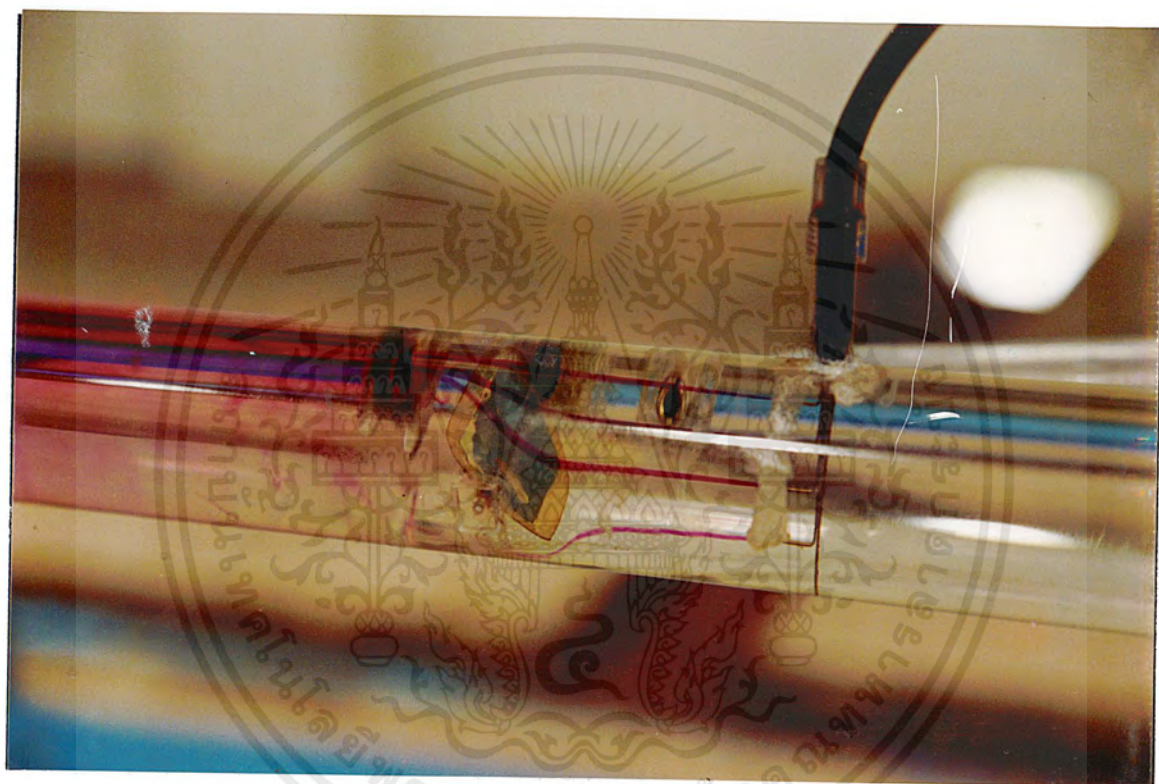
รูปที่ จ.4 ลักษณะเส้นสีเมื่อแผ่นระนาบเรียบเอียงทำมุม 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



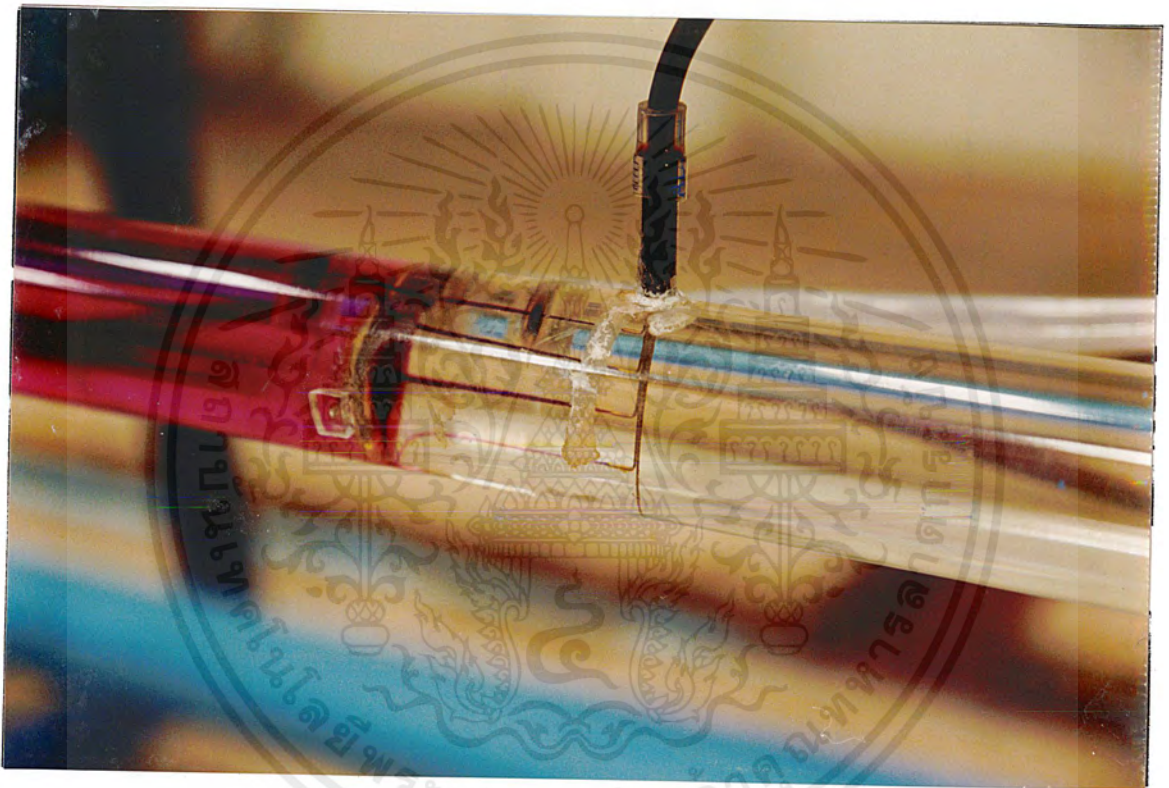
รูปที่ จ.5 ลักษณะเส้นสีเมื่อแผ่นระนาบเรียบเอียงทำมุม 20 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ น.6 ลักษณะเส้นสีเมื่อแผ่นระนาบเรียบเพียงทำมุม 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.7 ลักษณะเส้นสีเมื่อแผ่นระนาบเรียบเอียงทำมุม 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

1. นายจันทวัฒน์ ไชยชนะวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 7 เมษายน พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดบุรีรัมย์ ดำเนินการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จากศูนย์การศึกษานอกโรงเรียน อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ ปีการศึกษา 2538 จากนั้นได้เข้าศึกษาระดับอุดมศึกษาที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2539 และดำเนินการศึกษาระดับปริญญาตรี ในปีการศึกษา 2542

2. นางสาวนุสรา ไชยะผลสุข เกิดเมื่อวันที่ 9 เมษายน พ.ศ. 2522 ที่จังหวัดชลบุรี ดำเนินการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาต้นและมัธยมศึกษาปลายจากโรงเรียนสิงห์สมุทร จังหวัดชลบุรี ในปีการศึกษา 2538 จากนั้นได้เข้าศึกษาระดับอุดมศึกษาที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2539 และดำเนินการศึกษาระดับปริญญาตรี ในปีการศึกษา 2542

3. นายศิริวิทย์ สิริรักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2522 ที่จังหวัดภูเก็ต ดำเนินการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษา จากศูนย์การศึกษานอกโรงเรียน ภูเก็ตวิทยาลัย จังหวัดภูเก็ต ในปีการศึกษา 2538 และได้เข้ารับการการศึกษาที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปีการศึกษา 2539 และดำเนินการศึกษาในปีการศึกษา 2542