สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เอกสารรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงงานวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์

ประจำปี ๒๕๔๕

เรื่อง

เครื่องจำลองการไหลแบบอุดมคติ

(Flow Visualization Equipment)

ดร. พรสวรรค์ กาญจนวณิชย์กุล

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

RCH
TA
357.5
.F55
W284ค

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 84550
วัน,เดือน,ปี 13 ต.ค. 2551

เสนอ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11994578
b.....
1.....

1. ชื่อโครงการวิจัย

เครื่องจำลองการไหลแบบอุดมคติ

2. ผู้รับผิดชอบโครงการ

หัวหน้าโครงการวิจัย ดร.พรสวรรค์ กาญจนวณิชย์กุล

3. วัตถุประสงค์โครงการวิจัย

สร้างเครื่องจำลองการไหลแบบอุดมคติ

4. ชิ้นงานที่ต้องส่งมอบคณะฯ เมื่อสิ้นสุดโครงการ

เครื่องจำลองการไหลแบบอุดมคติ

5. จำนวนเงินวิจัยที่ได้รับอนุมัติ

90,000 บาท

6. สถานที่ทำการวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ลงชื่อ พรสวรรค์ กาญจนวณิชย์กุล หัวหน้าโครงการวิจัย

(ดร. พรสวรรค์ กาญจนวณิชย์กุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 บทนำ.....1
วัตถุประสงค์.....1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....2
2.1 ทฤษฎีการไหล.....2
2.2 สมการแสดงความสัมพันธ์ของการไหล.....4
2.3 กลศาสตร์ของการไหล.....5
2.4 การไหลแบบคงตัวและการไหลแบบไม่คงตัว.....7
2.5 เส้นพาธไลน์(Path line) และเส้นสตรีมไลน์(strem line).....7
2.6 การไหลแบบมิติเดียว 2มิติ และ3มิติ.....8
2.7 ตาข่ายการไหล.....9
2.8 แรงที่กระทำกับวัตถุในของไหล.....10
2.9 แรงต้านจากความเสียดทานของชั้นขอบเขตการไหลในของไหลที่อัดตัวไม่ได้.....11
2.10 ชั้นขอบเขตการไหลแบบราบเรียบของของไหลที่อัดตัวไม่ได้บนแผ่นเรียบ.....12
2.11 การแยกตัวของชั้นขอบเขตการไหล.....13
2.12 แรงต้านของวัตถุ 2 มิติจากของไหลอัดตัวไม่ได้.....15
บทที่ 3 การดำเนินงาน.....18
3.1 การออกแบบและการสร้างเครื่องการไหลแบบอุดมคติ.....22
3.2 การทดลองเครื่องการไหลแบบอุดมคติ.....23
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....24
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....28
เอกสารอ้างอิง.....29
ภาคผนวก.....30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.1 การไหลแบบอุดมคติรอบรูปทรงกระบอกกลม.....24
4.2 การไหลแบบอุดมคติบนปีกเครื่องบิน.....25
4.3 การไหลแบบอุดมคติรอบรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....25
4.4 การไหลแบบอุดมคติรอบรูปทรงสามเหลี่ยม.....26
4.5 การไหลแบบอุดมคติของท่อลดขนาด.....26
4.6 การไหลแบบอุดมคติของท่อลดขนาดอย่างฉับพลัน.....27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

A	=	พื้นที่หน้าตัด (ตารางเมตร)
B	=	ความกว้างในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ (เมตร)
C_f	=	สัมประสิทธิ์แรงต้านจากความเสียดทาน
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (เมตร)
L	=	ความยาวผิวที่ขนานกับทิศทางการไหล (เมตร)
$\dot{m}$	=	มวล (กิโลกรัมต่อวินาที)
N_{Re}	=	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์
V	=	ความเร็วของน้ำ (เมตรต่อวินาที)
X	=	ความยาวของแผ่นที่วางตามแนวยาว (เมตร)
τ_0	=	ความเค้นเฉือนที่ขอบด้านใต้น้ำ
δ	=	เป็นความหนาของชั้นขอบเขตการไหล (เมตร)
μ	=	ความหนืดของน้ำ (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)
ρ	=	ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
F_D	=	แรงต้านทานรวมของแผ่นวัตถุ (นิวตัน)
C_D	=	สัมประสิทธิ์แรงต้านรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ความเป็นมา

การเคลื่อนที่ของของไหลนับได้ว่า เข้ามามีบทบาทสำคัญในวงการอุตสาหกรรมเคมีเป็นอย่างมาก ซึ่งส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการขนถ่ายมวลสารหรือผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยผ่านทางท่อ ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อลักษณะการไหล คือ ความเร็วของของไหลที่ไหลภายในท่อ ความดันลดที่เกิดขึ้น ตลอดจนสิ่งกีดขวางที่ปรากฏอยู่ภายในท่อ สิ่งต่างๆเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น ในบางอุตสาหกรรมมีการไหลแบบราบเรียบที่เรียกว่า Laminar Flow เช่น อุตสาหกรรมสี น้ำมันเตา ซึ่งของไหลจะมีความหนืดสูง หรือในบางอุตสาหกรรมมีการไหลแบบปั่นป่วนที่เรียกว่า Turbulent Flow เช่น การฉีดสีเพื่อทำการผสมในท่อรูปตัวที เพื่อให้มีการผสมกันได้ดีภายในท่อ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาปัจจัยต่างๆดังกล่าวเพื่อให้ทราบและเข้าใจถึงพื้นฐานของการเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ และสามารถนำไปพัฒนาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามต้องการ

วัตถุประสงค์

สร้างเครื่องศึกษาปรากฏการณ์การไหลแบบอุดมคติ ผ่านวัตถุแบบต่างๆ ระบบ 2 มิติ และศึกษาทฤษฎีปรากฏการณ์การไหล แบบอุดมคติเมื่อไหลผ่านสิ่งกีดขวาง ที่มีรูปร่างต่างกันออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

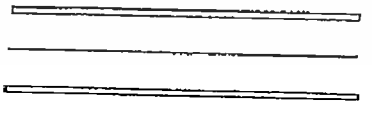
บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ทฤษฎีการไหล [1]

ในการไหลของของไหล (Fluid) ชนิดต่างๆ มีการไหลแบ่งออกเป็นแบบต่างๆกัน การไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา (Steady Flow) หรือการไหลที่ขึ้นกับเวลา (Unsteady Flow) และการไหลยังสามารถแบ่งออกเป็น การไหลแบบราบรื่น (Lamina Flow) และ การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent)

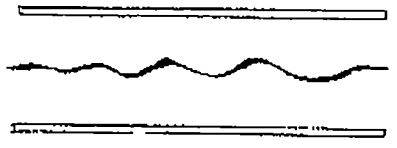
สำหรับการไหลแบบราบรื่น หรือ การไหลแบบปั่นป่วน นั้น ได้แสดงให้เห็นว่าลักษณะการไหลแบบนี้เป็นเช่นไร โดยการฉีดสีเข้าไปในหลอดแก้ว อาจบังคับได้โดยการปรับระดับน้ำในถังหรือการปิด-เปิด วาล์ว ของท่อแก้ว

ความเร็วที่ทำให้เป็น การไหลแบบราบเรียบ ดังรูปที่ 2.1 จะปรากฏให้เห็นว่าเส้นการไหล จะเป็นเส้นตรงไม่ขาดและขนานไปกับท่อ ในขณะที่ความเร็วเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง ซึ่งลักษณะของที่ฉีดเข้าสู่กระแสไหลจะเริ่มแกว่ง อนุภาคของของไหลเริ่มเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบมากขึ้น จนสีไม่เป็นเส้นตรงอีกต่อไป เรียกการไหลช่วงนี้ว่า การไหลในช่วงเปลี่ยน (Transition flow) ดังรูปที่ 2.2 และเมื่ออัตราการไหลของของไหลเพิ่มมากขึ้นจนเลยช่วงเปลี่ยนหรือในช่วงที่อัตราการไหลมีความสัมพันธ์กับค่าความดันลดแบบไม่เป็นเส้นตรง ลักษณะของสีที่ฉีดลงไปจะกระจายตัวออก การไหลของของไหลไม่สม่ำเสมอ อนุภาคของของไหลจะเคลื่อนที่ไปได้ระยะทางสั้นๆและชนกับอนุภาคอื่นๆอย่างไร้เสถียรภาพ ทำให้เกิดการผสมกันจนกระจายเต็มท่อ เรียกลักษณะการไหลแบบนี้ว่า การไหลแบบปั่นป่วน ดังรูปที่ 2.3

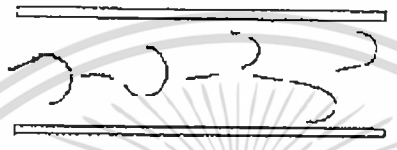


รูปที่ 2.1 การไหลแบบราบเรียบ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การไหลในช่วงเปลี่ยน [4]



รูปที่ 2.3 การไหลแบบปั่นป่วน [4]

เมื่อทำการจัดกลุ่มตัวแปรให้อยู่ในเทอมไร้หน่วย เพื่ออธิบายถึงลักษณะของการไหล จึงได้ว่าเป็นสมการเรย์โนลด์นัมเบอร์ [2]

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

โดย N_{Re} = ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ

μ = ความหนืดของน้ำ

V = ความเร็วของน้ำ

จากสมการที่ 2.1 ตัวแปรในเทอมเศษ (ρV^2) แสดงถึง ค่าโมเมนตัมฟลักซ์ของความเฉื่อยซึ่งเป็นผล จากการเคลื่อนที่ของของไหลภายในท่อในทิศขนานกับแกนท่อ หรือในทิศทางการไหลของของไหล ตัวแปรในเทอมส่วน ($\mu V/D$) แสดงถึง ค่าโมเมนตัมฟลักซ์ของความหนืด ซึ่งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเค้นเฉือนจากความหนืด ที่มีทิศในแนวรัศมีของท่อ โดยจะแสดงถึงการกระทำระหว่างโมเลกุล และแรงที่จะเหนี่ยวนำอนุภาคให้เกิดการเคลื่อนที่แบบไร้เสถียรภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษากับของไหลหลายๆชนิด สามารถสรุปได้ว่า

1 การไหลแบบราบเรียบจะเกิดขึ้นเมื่อมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำคือมีค่าน้อยกว่า 2100 ซึ่งช่วงนี้มีผลของแรงหนืดมาก

2 การไหลในช่วงเปลี่ยน จะเกิดขึ้นเมื่อมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ มีค่าระหว่าง 2100 ถึง 4000

3 การไหลแบบปั่นป่วนจะเกิดขึ้นเมื่อมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูงคือ มีค่ามากกว่า 4000

2.2 สมการแสดงความสัมพันธ์ของการไหลภายในท่อ

ในกรณีที่ลักษณะการไหลของของไหลมีสภาวะคงตัว และพัฒนาเต็มที่แล้วมักจะจัดรูปของสมการสมดุลมวลสาร สมดุลพลังงาน และสมการโมเมนตัมให้อยู่ในรูปแบบที่สะดวกต่อการนำไปใช้งาน ดังนี้

2.2.1 สมการสมดุลมวลสาร [2]

รูปที่ 2.4 ความต่อเนื่องของการไหล

สามารถเขียนสมการสมดุลมวลสารภายในปริมาตรที่กำหนดดังรูปที่ 2.4 ได้ดังนี้

$$\frac{\text{มวลของของไหลที่เข้า}}{\text{ต่อหน่วยเวลา}} = \frac{\text{มวลของของไหลที่ออก}}{\text{ต่อหน่วยเวลา}} + \frac{\text{มวลที่สะสม}}{\text{ต่อหน่วยเวลา}} \qquad (2.2)$$

ที่สภาวะคงตัว มวลของของไหลในปริมาตรที่กำหนดดังรูปที่ มีค่าคงที่ จะได้ว่า

$$\frac{\text{มวลของของไหลที่เข้า}}{\text{ต่อหน่วยเวลา}} = \frac{\text{มวลของของไหลที่ออก}}{\text{ต่อหน่วยเวลา}} \qquad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มวลของของไหลที่เข้า (ณ ตำแหน่ง 1) ต่อหน่วยเวลา = $\rho_1 V_1$

มวลของของไหลที่ออก (ณ ตำแหน่ง 2) ต่อหน่วยเวลา = $\rho_2 V_2$

ณ สภาวะการไหลคงตัวจะได้ว่า

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 = \text{ค่าคงที่} \tag{2.4}$$

ถ้าความเร็ว ณ ตำแหน่ง 1 และ 2 เป็นค่าคงที่ สามารถเขียนสมการได้ว่า

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 = \dot{m} \tag{2.5}$$

ถ้าของไหลที่ใช้เป็นของไหลอัดตัวไม่ได้ ค่าความหนาแน่นจะเป็นค่าคงที่ ดังนั้นจึงเขียนสมการความต่อเนื่อง ได้ดังนี้

$$A_1 V1 = A_2 V_2 \tag{2.6}$$

2.3 กลศาสตร์ของการไหล [5]

เมื่อพูดถึงการไหลของของไหลแล้วก็มักจะหมายถึง การไหลของของไหลในจินตนาการเป็นของไหลที่ไม่มีความหนืด คุณสมบัติดังกล่าวนี้จะไม่มีอยู่ในของไหลจริง

การไหลสามารถแบ่งตามประเภทของของไหลได้เป็น

1. การไหลของของไหลที่อัดตัวไม่ได้
2. การไหลของของไหลที่อัดตัวได้

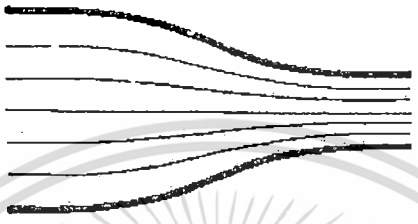
เนื่องจากของเหลวต่าง ๆ นั้นอัดตัวได้น้อยมาก ดังนั้นจึงถือว่าของเหลวทั้งหมดเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ และภายใต้สภาวะบางสภาวะนั้นถือว่าการไหลของแก๊สเป็นการไหลของของไหลที่อัดตัวไม่ได้เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งการไหลตามชนิดของของไหลได้อีกด้วย เช่น การไหลของของไหลจริง การไหลของของไหลในจินตนาการ และสามารถแบ่งตามลักษณะการไหลโดยเปรียบเทียบกับเวลาก็ได้ เช่น การไหลแบบคงตัว การไหลแบบไม่คงตัว

2.3.1 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน

ลักษณะการไหลแบบราบเรียบ และแบบการไหลแบบปั่นป่วน จากการสาธิตแบบแรกของ ออสโบน เร่ย์โนลด์ (Osborne Reynolds) นั้นมีชื่อเรียกว่าการไหลแบบราบเรียบหรือการไหลแบบสตรีมไลน์หรือการไหลของของที่มีความหนืดสูง ลักษณะที่สำคัญของการไหลแบบนี้ก็คือ

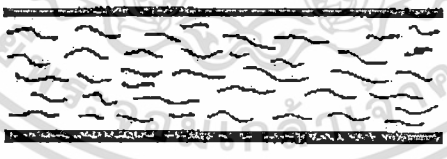
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของไหลในแต่ละชั้นจะเคลื่อนที่โดยการเลื่อนตัวไปบนชั้นที่อยู่ถัดไป และอนุภาคของของไหลในแต่ละชั้นจะเคลื่อนที่ไปในเส้นทางที่แน่นอนและสามารถสังเกตเห็นได้ดังรูปที่ 2.5 การไหลแบบนี้เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่มีความหนืดสูงหรือความหนืดของของไหลนั้นมีอิทธิพลมากกว่าคุณสมบัติอื่นๆ



รูปที่ 2.5 การไหลแบบราบเรียบ [5]

ลักษณะการไหลแบบที่สองคือการไหลแบบปั่นป่วน การไหลแบบนี้มีลักษณะดังรูปที่ 2.6 เป็นการเคลื่อนที่ ที่ไม่เป็นระเบียบของกลุ่มอนุภาคของของไหลจำนวนมากในช่วงเวลาเพียงสั้นๆ ลักษณะการไหลที่สำคัญของการไหลแบบนี้คือ ความไม่เป็นระเบียบที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคต่างๆนั่นเอง ถ้าหากการไหลแบบปั่นป่วนนี้มีคลื่นอยู่ด้วยแล้วคลื่นนั้นจะมีความถี่ไม่คงที่ และถ้าหากมีการไหลวนเกิดขึ้นแล้วก็จะไม่เห็นลักษณะการไหลวนนั้น



รูปที่ 2.6 การไหลแบบปั่นป่วน [5]

การไหลวนขนาดใหญ่ การไหลหมุน และการเคลื่อนที่ที่ผิดปกติของก้อนของไหลขนาดใหญ่ที่มีต้นตอที่ทำให้เกิดการไหลดังกล่าวนั้น ไม่ใช่สาเหตุที่จะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนเลย อาจจะเรียกการไหลแบบนี้ว่าเป็นการไหลที่เกิดจากการถูกรบกวน (Disturbed flow) ก็ได้ ในทางตรงกันข้ามการไหลที่สงบเรียบและไม่มีการถูกรบกวนนั้น ก็อาจจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไปนี้จะมีขนาดค่อนข้างเล็กและจะตรวจพบได้ก็ต่อเมื่อใช้เครื่องมือพิเศษเท่านั้น

2.4 การไหลแบบคงตัวและการไหลแบบไม่คงตัว [6]

2.4.1 การไหลแบบคงรูป เป็นลักษณะการไหล ที่ทุกๆสภาวะของจุดต่างๆในลำของของไหลมีค่าคงที่เมื่อเทียบกับเวลาหรือไม่แปรตามเวลานั้นเอง

2.4.2 การไหลไม่คงรูปเป็น การไหลที่จุดต่างๆภายในก้อน ที่ขณะใดขณะหนึ่งนั้นมีความเหมือนกันทั้งขนาดและทิศทาง

ในบางครั้งอาจมีการดัดแปลงคำนิยามทั้งสองนี้ไปใช้งานอย่างอื่น การไหลไม่คงตัว จะพบแต่ในการไหลแบบราบเรียบเท่านั้น สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนนั้นขนาดของความเร็วและความดันของจุดต่างๆจะเปลี่ยนไปอยู่ตลอดตามเวลาแต่ถ้าหากส่วนของความเร็วที่มีมากกว่าค่าเฉลี่ยนั้นเท่ากับส่วนที่น้อยกว่าค่าเฉลี่ยแล้วการไหลนั้นก็จะเป็นการไหลแบบคงตัว

2.5 เส้นพาธไลน์ (Path line) และเส้นสตรีมไลน์ (stream line) [5]

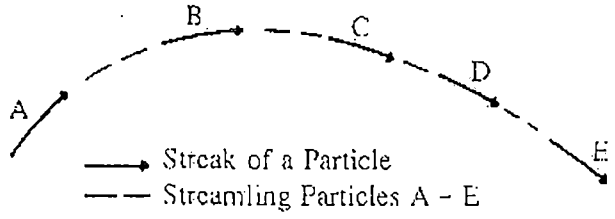
2.5.1 เส้นพาธไลน์

เส้นพาธไลน์ เป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของของไหลเพียงอนุภาคเดียวในหนึ่งช่วงของเวลา ถ้าหากนำกล้องถ่ายรูปมาเปิดหน้ากล้องทิ้งไว้เพื่อถ่ายภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคของของไหลแล้วเส้นทางการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคที่ปรากฏขึ้นในฟิล์มก็คือพาธไลน์นั่นเอง ดังนั้น ดังนั้นพาธไลน์จึงเป็นทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของของไหลเพียงอนุภาคเดียวที่เวลาต่างๆกัน

2.5.2 เส้นสตรีมไลน์

เส้นสตรีมไลน์ เป็นเส้นทางการเคลื่อนที่เฉลี่ยที่ขณะหนึ่งขณะใดของกลุ่มอนุภาคของของไหลที่เคลื่อนที่เรียงกันไปเป็นแถว ถ้าใช้กล้องถ่ายภาพที่มีความไวสูงในการเปิดปิดหน้ากล้องมาถ่ายภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคของของไหลกลุ่มหนึ่งแล้ว ก็จะเห็นเส้นทางสั้นๆ ของแต่ละอนุภาค เส้นทางสั้นๆเหล่านี้เป็นตัวบอกทิศทางการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคในขณะนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 เส้นสตรีมไลน์ของกลุ่มอนุภาค [5]

ในวิชากลศาสตร์ของไหลที่ศึกษาด้วยวิธีทดลองนั้น เรามักจะฉีดสีเข้าไปในของไหลเพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของของไหล ถ้าหากการไหลนั้นเป็นการไหลแบบปั่นป่วนแล้วก็จะมองเห็นแถบของสีนั้น แถบสี นี้เป็นภาพของกลุ่มอนุภาคที่เกิดขึ้นที่ขณะใดขณะหนึ่งในจุดต่างๆ ที่ของไหลไหลผ่าน เช่นที่จุดฉีดสี ในการศึกษาของไหลโดยใช้เทคนิคจากสีที่ฉีดเข้าไปนี้ จะต้องเลือกสีที่มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความหนาแน่นนั้นจะต้องเท่ากับความหนาแน่นของของไหลที่ต้องการศึกษานั้นด้วย

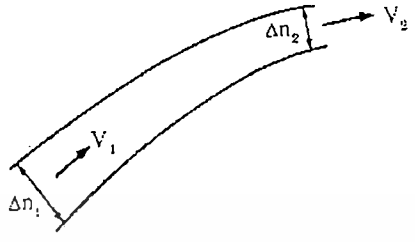
2.6 การไหลแบบมิติเดียว 2 มิติ และ 3 มิติ

การไหลแบบมิติเดียวที่แท้จริงนั้นความเร็วของจุดต่างๆ (สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้) จะต้องมีทิศทางเหมือนกันและมีขนาดเท่าๆกัน การไหลแบบนี้ในสภาพจริงๆจะหาพบได้ยากมาก อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์เกี่ยวข้องกับการไหลภายในเส้นกำหนดขอบเขตการไหล ต่างๆนั้นจะถือว่าการไหลนั้นเป็นการไหลแบบมิติเดียวทั้งๆที่ความจริงแล้วเป็นการไหลแบบ3มิติ มิติเดียวที่ว่านี้เป็นมิติที่วัดไปตามแนวแกนของเส้น สตรีมไลน์ของการไหลโดยนำค่าเฉลี่ยของความเร็ว ความดัน และความสูงตลอดพื้นที่หน้าตัดของการไหลนั้นๆมาใช้

แต่ถ้าหากการไหลมีลักษณะที่ เส้นสตรีมไลน์ ทุกๆเส้นเป็นเส้นโค้งที่อยู่ในระนาบเดียวกัน และ สตรีมไลน์ ในแต่ละระนาบที่ขนานกันนั้นมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันแล้ว เราเรียกการไหลนั้นว่าเป็นการไหลแบบสองมิติ ดังรูปที่ 2.7 นั้นขนาดความกว้างของช่องทางการไหลในแนวที่ตั้งฉากกับหน้ากระดาษนั้นมีขนาดคงที่ ดังนั้นทุกๆหน้าตัดที่ตั้งฉากกับการไหลก็จะต้องทำมุม 90 องศากับความกว้างที่คงที่นี้ถ้าอัตราการไหลรวมถูกแบ่งออกเป็นส่วนที่เท่าๆกันโดย เส้นสตรีมไลน์ เหล่านั้นก็จะต้องมีระยะห่างที่เท่าๆกัน ซึ่งจะมีผลทำให้ความเร็วมีขนาดสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด ซึ่งจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

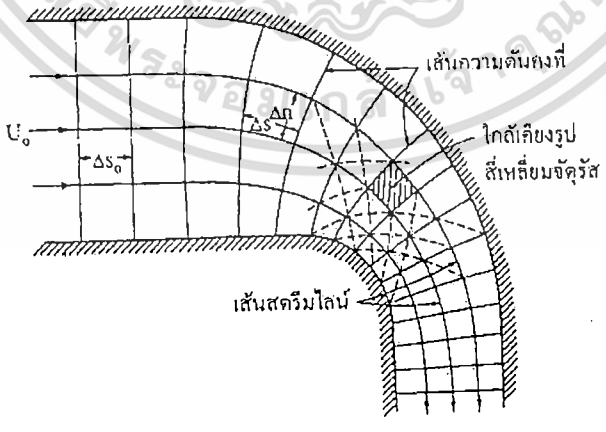
เป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อเป็นการไหลของของไหลในจินตนาการ ยกเว้นเฉพาะหน้าตัดที่เส้นกำหนดขอบเขตเปลี่ยนแนวไป



รูปที่ 2.8 ของไหลในจินตนาการที่ไหลแบบ2มิติ [5]

2.7 ตาข่ายการไหล

สตรีมไลน์ และการกระจายความเร็วของของไหลในจินตนาการที่ไหลแบบคงตัว ภายในเส้นกำหนดขอบเขตใดๆ นั้นสามารถหาได้จากตาข่ายการไหลดังเช่นรูปที่ 2.9 ในรูปเป็นตาข่ายของสตรีมไลน์ กับเส้นที่ตั้งฉากกับสตรีมไลน์ ที่ได้จัดระยะห่างระหว่างเส้นสองชุดนั้น ให้เป็นสัดส่วนตรงกันข้ามกับความเร็วของของไหล ตำแหน่งนั้นสตรีมไลน์ จะเป็นตัวแสดงถึงทิศทางการไหลของของไหลในตำแหน่งต่างๆ คุณสมบัติของตาข่ายการไหลก็คือเป็นเครื่องแสดงการไหลของของไหลในจินตนาการภายในเส้นกำหนดขอบเขต และเมื่อเป็นของไหลในจินตนาการแล้วตาข่ายการไหลนี้ก็จะไม่ขึ้นอยู่กับขนานของความเร็วจริง และจะมีลักษณะเหมือนกันไม่ว่าการไหลนั้นจะเป็นการไหลแบบมิติเดียวหรือหลายมิติ



รูปที่ 2.9 ตาข่ายการไหล [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 แรงที่กระทำกับวัตถุในของไหล

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการไหลของของไหลที่อัดตัวไม่ได้ หรือในของไหลที่อัดตัวได้แต่มีความเร็วต่ำจนกระทั่งสามารถตัดผลกระทบของการอัดตัวได้ทิ้งได้

วัตถุที่อยู่ในของไหลทั้งก้อนนั้นจะมีแรงที่เกิดจากความเร็วสัมพันธ์ระหว่างวัตถุ กับของไหลมากระทำสองแรงด้วยกัน แรงดังกล่าวนี้คือ แรงยกและแรงต้านการเคลื่อนที่ แรงยกตัวจะอยู่ในแนวที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลส่วนแรงต้านจะขนานกับทิศการเคลื่อนที่

แรงต้านที่เกิดจากความเสียดทานนั้น จะมีค่าเท่ากับผลบวกของความเค้นเฉือนตามผิวของวัตถุในทิศทางการเคลื่อนที่ เพื่อความสะดวกจึงมักจะใช้แรงต้านที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานนี้มีค่าอยู่ในรูปแบบเดียว

$$F_f = C_f \rho V^2 / BL \qquad (2.7)$$

เมื่อ C_f = สัมประสิทธิ์แรงต้านจากความเสียดทาน

L = ความยาวผิวที่ขนานกับทิศทางการไหล

B = ความกว้างในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ ถ้าเป็นวัตถุที่ไม่ใช่มีทรงเรขาคณิตแล้วให้หารพื้นที่ผิวทั้งหมดด้วย L

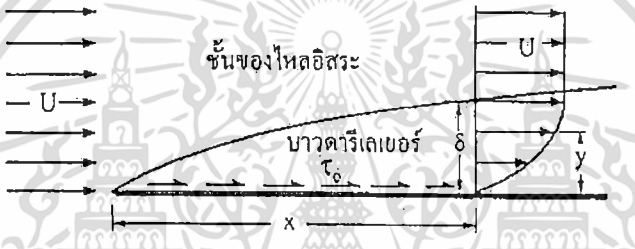
ในกรณีของแผ่นวัตถุที่อยู่ในของไหลทั้งชิ้นนั้น ก็จะต้องคูณค่าด้านขวาของสมการ (2.7) ด้วย 2 ทั้งนี้เพราะค่า F_f ในสมการที่ (2.7) นั้นเป็นแรงต้านที่เกิดจากความเสียดทานของผิวเพียงด้านเดียว

การไหลในชั้นขอบเขตการไหลนี้อาจเป็นการไหลแบบราบเรียบทั้งหมด หรือ ด้านนอกเป็นการไหลแบบปั่นป่วน แต่ละชั้นย่อยที่อยู่ด้านในเป็นแบบราบเรียบ อย่างไรก็ตามจะมีข้อแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนระหว่างการไหลบนแผ่นวัตถุกับการไหลในท่อ นั้นก็คือในกรณีของการไหลในท่อนั้นชั้นขอบเขตการไหลจากผนังที่อยู่ภายในด้านตรงข้ามกัน นั้นจะมาบรรจบเข้าหากัน เมื่อมีระยะห่างจากต้นท่อพอควร สำหรับเครื่องบิน เรือดำน้ำ รถไฟ นั้นถึงแม้จะมีชั้นขอบเขตการไหลที่หนาเป็นเซนติเมตรก็ตาม แต่ถ้าหากเปรียบเทียบกับความหนาของของไหลส่วนที่อยู่ถัดออกมาแล้วก็จะมีค่าน้อยมาก

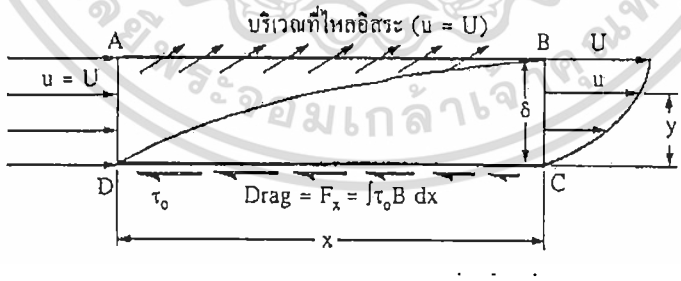
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 แรงต้านจากความเสียดทานของชั้นขอบเขตการไหลในของไหลที่อัดตัวไม่ได้

ในรูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นความหนาของชั้นขอบเขตการไหลที่ค่อยๆเพิ่มขึ้นตามความยาวของแผ่นวัตถุเมื่อเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ ไหลผ่านไปบนวัตถุนั้นอย่างคงที่ ให้พิจารณาระบบควบคุมปริมาตรของของไหลในรูปที่ 2.11 ระบบควบคุมปริมาตรนี้อยู่ถัดออกมาจากผิวของแผ่นวัตถุ เป็นระยะเท่ากับ δ เมื่อค่า δ นี้เป็นความหนาของชั้นขอบเขตการไหลตรงระยะ x ที่วัดจากปลายทางด้านต้นน้ำของแผ่น ระบบควบคุมปริมาตรนี้จะมีความเร็วเป็น u ซึ่งเป็นความเร็วของของไหลอิสระที่ไม่ได้รับผลกระทบจากแรงเสียดทานที่ส่งออกมาจากผนัง



รูปที่ 2.10 การเติบโตของชั้นขอบเขตการไหลตามแนวยาวของแผ่นวัตถุ [5]



รูปที่ 2.11 ระบบควบคุมปริมาตรของของไหลที่เคลื่อนที่ไปบนแผ่นวัตถุ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 ชั้นขอบเขตการไหลแบบราบเรียบของของไหลที่อัดตัวไม่ได้บนแผ่นเรียบ [5]

ความเค้นเฉือนที่ผิวของแผ่นวัตถุก็สามารถหาได้เช่นเดียวกับในกรณีของการไหลในท่อที่มีการไหลเป็นแบบราบเรียบ โดยอาศัยค่าความลาดชันของความเร็ว

$$N_{R,X} = \rho vx / \mu \qquad (2.8)$$

เป็นค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของจุดที่อยู่ห่างจากขอบด้านต้นน้ำของแผ่นวัตถุเป็นระยะทางเท่ากับ x

จะเห็นได้ว่า $N_{R,X}$ นี้เพิ่มขึ้นตามค่า x นั่นก็คือจะเพิ่มขึ้นในลักษณะที่แปรเป็นเส้นตรงกับระยะทางที่วัดไปทางด้านใต้น้ำ ก็ได้มีการพิสูจน์แล้วว่า ความหนาของชั้นขอบเขตการไหลที่มีการไหลแบบราบเรียบนั้นเพิ่มขึ้นตามความยาวที่วัดจากขอบด้านต้นน้ำ

$$\delta / X = 4.91 / (N_{R,X})^{1/2} \qquad (2.9)$$

เมื่อ δ = เป็นความหนาของชั้นขอบเขตการไหล

X = ความยาวของแผ่นที่วางตามแนวยาว

$$\tau_0 = 0.332\ \mu V / X\ (N_{R,X})^{1/2} \qquad (2.10)$$

τ_0 = ความเค้นเฉือนที่ขอบด้านใต้น้ำ

V = ความเร็วของของไหล

X = ความยาวของแผ่นที่ว่างตามแนวยาว

μ = ความหนืดของของไหล

เป็นสมการที่ 2.11ใช้หาแรงต้านจากความเสียดทาน

$$C_f = 1.328/(N_R)^{1/2} \qquad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C_f = แรงต้านจากความเสียดทาน

N_R = ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

2.11 การแยกตัวของชั้นขอบเขตการไหลและแรงต้านจากความดัน [5]

การเคลื่อนที่ของของไหลชั้นบางๆภายในชั้นขอบเขตนั้นเนื่องมาจากแรงสามแรง คือ

1 แรงจากของไหลอิสระที่เคลื่อนที่ อยู่ภายนอกชั้นขอบเขตส่งผ่าน ชั้นขอบเขตการไหลแบบราบเรียบโดยความเค้นเฉือน และผ่านชั้นขอบเขตการไหลแบบปั่นป่วน โดยการถ่ายเทโมเมนตัมไปดึงให้ชั้นของของไหลนั้นเคลื่อนที่ไปข้างหน้า

2 แรงจากความหนืดที่ผิวของวัตถุส่งมาหน่วงชั้นของไหลที่ติดกับผิวให้อยู่นิ่งกับที่

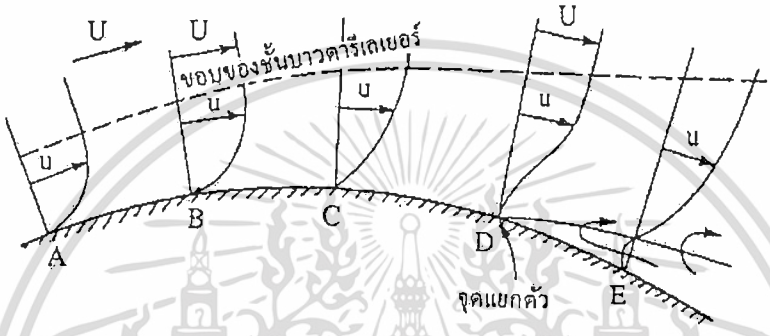
3 แรงที่เนื่องจากความดันภายในชั้นขอบเขตการไหลที่ลดหลั่นกัน ถ้าความดันลดลงในทิศทางการของการไหล ชั้นของของไหลในชั้นขอบเขตการไหลก็จะถูกเร่งให้เร็วขึ้น แต่ถ้าความดันเพิ่มขึ้นตามทิศทางของการไหล ชั้นของของไหลนั้นก็จะถูกหน่วงให้ช้าลง

แรงต้านจากของไหลในหัวข้อที่ผ่านมานั้น เป็นแรงต้านของชั้นของเขตการไหลบนแผ่นวัตถุที่อยู่ในของไหลภายในภาชนะเปิดหรือในกรณีที่ไม่มีการลดหลั่นของความดันในของไหล แต่สำหรับในกรณีที่มีการลดหลั่นของความดันนั้น ถ้าหากอนุภาคของของไหลทางด้านต้นน้ำของวัตถุทรงกระบอก ทรงกลม หรือรูปทรงอื่น มีความเร่งจนสามารถไหลเข้าไปในชั้นขอบเขตของการไหลใกล้จุดที่มีความเร็วเป็นศูนย์ซึ่งอยู่ทางด้านหน้า ด้วยความเร็วที่ต่ำและความดันที่สูงแล้ว อนุภาคของของไหลนั้นก็จะมีความเร็วสูงขึ้นเมื่อไหลไปยังด้านข้างของวัตถุ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความดันต่ำ แต่เนื่องจากมีแรงหน่วงจากความเสียดทานของผิววัตถุแรงจากความหนืดที่ผิวของวัตถุส่งมาหน่วงชั้นของไหลที่ติดกับผิวให้อยู่นิ่งกับที่ ดังนั้นพลังงานรวมที่ได้หรือที่เป็นประโยชน์ก็จะลดน้อยลงตามจำนวนที่ถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นความร้อน

ให้พิจารณาจุด A ในรูปที่ 2.12 ซึ่งเป็นจุดที่อยู่ภายในของไหลที่มีความเร่งและที่มีการกระจายความเร็วในขั้นขอบเขตของการไหล ทั้งการไหลแบบราบเรียบและไหลแบบปั่นป่วน ในแนวดิ่ง ส่วนจุด B นั้นอยู่ตรงตำแหน่งที่ของไหลภายนอกชั้นขอบเขตของการไหลมีความร็วสูงสุด ดังนั้นความเร็วของของไหลที่อยู่ภายนอกชั้นขอบเขตของการไหลตรงจุด C, D และ E ซึ่งอยู่ถัดออกไปทางด้านใต้น้ำก็จะค่อยๆลดน้อยลง ทำให้มีความดันเพิ่มขึ้น ดังนั้นความเร็วของของไหลของ

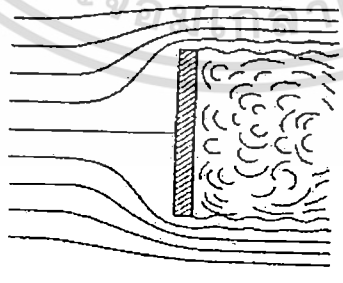
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นที่อยู่ใกล้ผิวตรงจุด C ก็จะลดน้อยลงและจะลดจนเป็นศูนย์ที่จุด D ความดันที่เพิ่มขึ้นนี้จะเพิ่มความหน่วงให้มากขึ้น และเมื่อไม่สามารถทนต่อต่อความหน่วงได้อีกแล้วชั้นขอบเขตของการไหลก็จะแยกตัวออกจากผิว จากรูปที่ 2.12 จะเห็นได้ว่าของไหลส่วนที่ถัดออกมาจากผิวที่จุด E นั้นไหลย้อนกลับ ทั้งนี้เนื่องจากของไหลจะไหลไปทิศทางที่มีความดันต่ำกว่า ดังนั้นจึงป้อนของไหลเข้าไปในช่องว่างที่เกิดจากการแยกตัวของชั้นขอบเขตของการไหลที่จุด D



รูปที่ 2.12 การเติบโตและการแยกตัวของชั้นขอบเขตของการไหล [5]

เนื่องจากถูกบังคับด้วยทฤษฎีการไหลของของไหลในจินตนาการ ดังนั้นพลังงานจลน์ของการหมุนตัวในกระแสไหลวนจึงไม่สามารถที่จะเปลี่ยนรูปไปเป็นความดัน และเนื่องจากความดันนี้มักมีค่าน้อยกว่าความดันของจุดที่มีความเร็วเป็นศูนย์ ซึ่งอยู่ทางต้นน้ำ ดังนั้น ความดันที่แตกต่างจึงพยายามผลักดันให้วัตถุเคลื่อนที่ไปในทิศทางของการไหล



รูปที่ 2.13 การเกิดการไหลวนทางด้านหลังแผ่นวัตถุในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 แรงต้านของวัตถุสองมิติจากของไหลอัดตัวไม่ได้ [5]

แรงต้านรวมที่กระทำกับวัตถุจะมีค่าเท่ากับผลบวกของแรงต้านจากความเสียดทานกับแรงต้านจากความดัน

$$F_D = F_f + F_p \tag{2.12}$$

F_D = แรงต้านรวม

F_f = แรงต้านจากความเสียดทาน

F_p = แรงต้านจากความดัน

แรงต้านรวมส่วนใหญ่จะเป็นแรงต้านจากความเสียดทาน ซึ่งสามารถหาได้โดยวิธีการของชั้นขอบเขตของการไหล ส่วนแรงต้านจากความดันนั้นคำนวณหาได้ยากมาก โดยปกติแล้วเมื่อแรงต้านจากการไหลวนมีค่ามากก็จะหาแรงต้านออกมาในรูปของแรงต้านรวม และมักจะหาแรงต้านรวมนั้นจาก

$$F_D = C_D \rho (V^2/2) A \tag{2.13}$$

C_D = สัมประสิทธิ์แรงต้านรวม

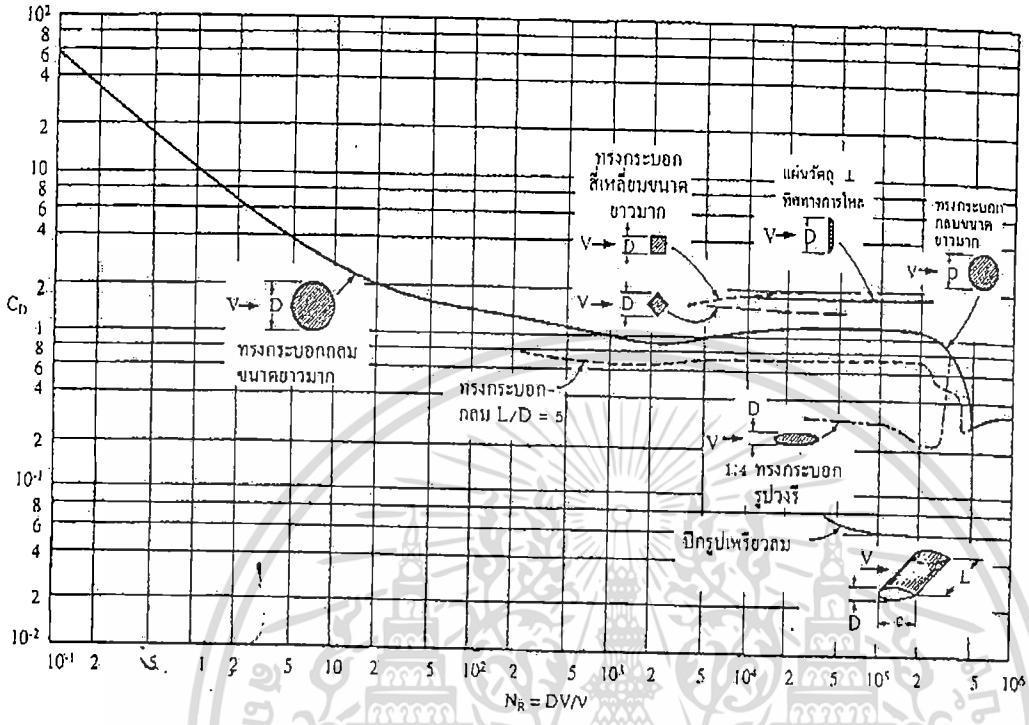
ρ = ความหนาแน่นของน้ำ

V = ความเร็วของน้ำ

A = พื้นที่ของวัตถุ

วัตถุสองมิติก็มีแรงต้านจากความดัน และจากความเสียดทานมากระทำเช่นเดียวกัน แต่สำหรับการไหลรอบวัตถุสองมิตินี้จะมีคุณสมบัติพิเศษบางอย่าง ที่ไม่มีในการไหลรอบวัตถุสามมิติ เช่น การไหลรอบๆวัตถุทรงกลม เป็นต้นว่าถ้ามีค่า ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ น้อยกว่า 1 แล้วการไหลของของไหลรอบๆทรงกระบอกนั้นก็ จะมีสภาพคล้ายกับของไหลที่มีความหนืดสูง และค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะแปรเป็นเส้นตรง ดังเส้นกราฟที่อยู่ทางด้านซ้ายมือของ รูปที่ 2.13 และในขณะที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มจาก 2 ไปยัง 30 นั้นชั้นของกระแสไหลจะแยกตัวออกจากด้านทั้งสองของ วัตถุรูปทรงกระบอกในตำแหน่งที่สมมาตรกัน พร้อมเกิดระลอกน้ำและการไหลวนที่คล้ายกันขึ้นสองแถบ ความสมดุลของการไหลวนนั้นได้รับการประคับประคองโดยชั้นกระแสการไหลที่แยกตัวออกจากผิว และถ้าวัตถุรูปทรงกระบอกนี้มีขนาดที่ยาวมาก ความยาวของกระแสไหลวนก็จะเพิ่มขึ้นตามความเร็วเพื่อสลายพลังงานของการหมุนตัวให้แก่ของไหลอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

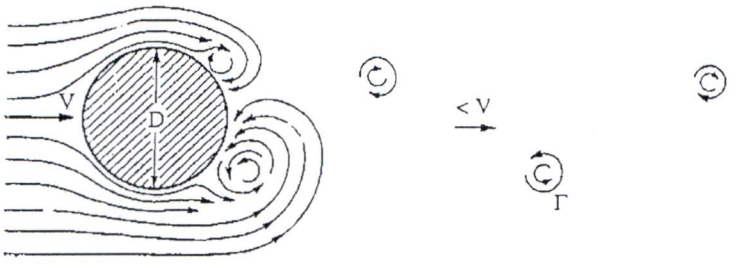


รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์และค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน [5]

ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์บางค่า ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุ ความกว้างของช่องทางไหลและการไหลแบบปั่นป่วนในลำน้ำ การไหลวนนี้จะทอดยาวออกไปทางด้านหลังของวัตถุ และการกระจายหายไปกับสายน้ำ เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Ka'rma'n vortex street และจะเห็นได้ว่าเมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นถึง 120 แล้ว น้ำวนนั้นก็จะถูกเหวี่ยงออกมาจากผิวด้านข้างของวัตถุข้างใดข้างหนึ่งก่อน หลังจากนั้นก็จะถูกเหวี่ยงออกมาจากผิวอีกข้างทำให้น้ำวนที่อยู่ใน ระลอกน้ำ นั้นเรียงเป็นสองแถวในลักษณะที่สลับกันไปดังรูปที่ 2.14 แรงที่เกิดขึ้นพร้อมๆกับน้ำวนที่ถูกเหวี่ยงออกมาในลักษณะที่สลับกัน เช่นนี้จะทำให้วัตถุขาดเสถียรภาพทางด้านแอโรไดนามิค ซึ่งเป็นเรื่องที่สำคัญมากสำหรับการออกแบบทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.15 การเกิดการไหลวน [5]

สำหรับในกรณีที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่ามากกว่า 120 นั้นจะยังสังเกตเห็น กระแสไหลวนได้ยากแต่น้ำวนนั้นก็ยังคงถูกเหวี่ยงออกมาจากผิวแต่ละข้างจนกระทั่ง ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ มีค่าประมาณ 1000 หลังจากนั้นแรงจากความหนืดก็จะมีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้ และไม่สามารถที่บอกได้ว่าเกิดการไหลวนขึ้น และน้ำวนนั้นถูกเหวี่ยงออกจากผิวของวัตถุรูปทรงกระบอกได้อย่างไร เช่นเดียวกับวัตถุรูปทรงกลม ชั้นกระแสการไหลของวัตถุรูปทรงกระบอกกลมจะเปลี่ยนเป็นแบบการไหลปั่นป่วนที่ค่า ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 350,000 และในช่วงดังกล่าวนี้ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดน้อยลงจนเห็นได้ดังรูป 2.15

ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของวัตถุรูปทรงสองมิติ (มีแต่กว้างและยาว) นั้นอยู่ในรูปที่ 2.15 โดยการสังเกตจากเส้นกราฟของวัตถุรูปทรงกระบอกขนาดยาวมากๆนั้น ก็จะเห็นได้ว่าถ้าหากมีการไหลแบบ 3 มิติเกิดขึ้นที่ปลายวัตถุรูปทรงกระบอกแล้วแรงต้านก็จะลดน้อยลง การที่ค่า ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ลดน้อยลงนี้ก็เนื่องจากน้ำวนนั้นสามารถกระจายตัวหายเข้าไปในสนามการไหล และยอมให้พลังงานสลายหายไปในสนามการไหลที่ใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

84550

บทที่ 3
การดำเนินงาน

3.1 การออกแบบและสร้างเครื่องการไหลแบบอุดมคติ

3.1.1 โครงสร้าง

1. ความกว้าง 70 เซนติเมตร
2. ความยาว 130 เซนติเมตร
3. ความสูง 80 เซนติเมตร

3.1.2 วัสดุทำโครงสร้าง

1. สเตนเลสขนาด 5× 5 เซนติเมตร ใช้เป็นขา
2. สเตนเลสขนาด 60× 20× 15 เซนติเมตรใช้สำหรับรองรับน้ำ
3. กระจกใสขนาด 60× 90 เซนติเมตร

3.1.3 วัสดุสำหรับทำโครงสร้างอื่นๆ

1. ท่อพีวีซีขนาด 2×25 เซนติเมตรสำหรับระบายน้ำเข้า
2. ท่อพีวีซีขนาด 2×30 เซนติเมตรสำหรับระบายน้ำสีทดลอง
3. เข็มสเตนเลสขนาด 0.5 มิลลิเมตรใช้สำหรับฉีดสีทดลอง

3.1.4 ชุดควบคุม

1. บอลวาล์วสเตนเลสขนาด 0.5 เซนติเมตร สำหรับเปิด-ปิดน้ำสีทดลอง
2. บอลวาล์วสเตนเลสขนาด 3 เซนติเมตร สำหรับเปิด-ปิดน้ำ

3.1.5 การออกแบบแผ่นราบ

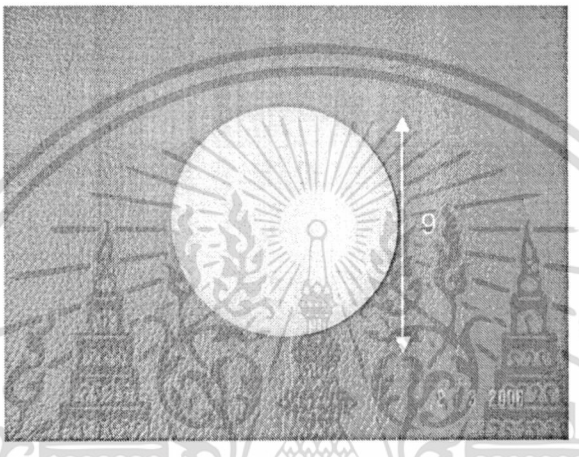
1. ใช้หลักการ คือ การเกิดเส้นกระแสการ ไหลแผ่นราบ ต้องมีขนาดความหนาที่เหมาะสม
2. การออกแบบพิจารณารูปแบบ ให้เหมือนกับลักษณะการไหลผ่านวัตถุรูปทรงต่างๆ

3.1.6 รูปแบบแผ่นราบ

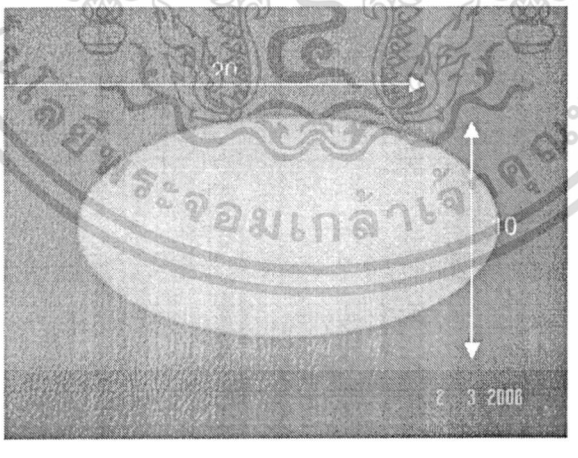
1. แผ่นราบรูปทรงกระบอกกลม
2. แผ่นราบรูปทรงวงรี
3. แผ่นราบรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. แผ่นราบรูปทรงสามเหลี่ยม
5. แผ่นราบรูปปีกเครื่องบิน
6. แผ่นราบรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า
7. แผ่นราบรูปท่อที่ค่อยๆลดขนาด
8. แผ่นราบรูปท่อลดขนาดฉับพลัน

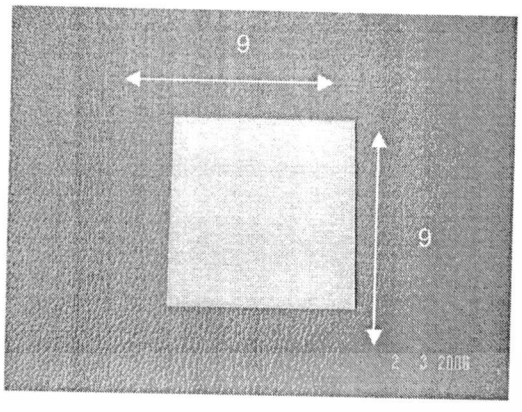


รูปที่ 3.1 แผ่นราบรูปทรงกระบอกกลม



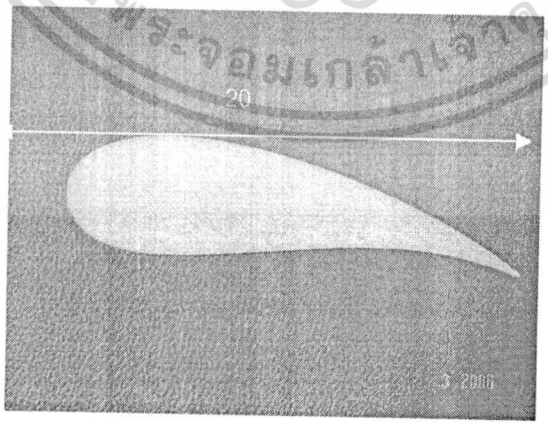
รูปที่ 3.2 แผ่นราบรูปทรงวงรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



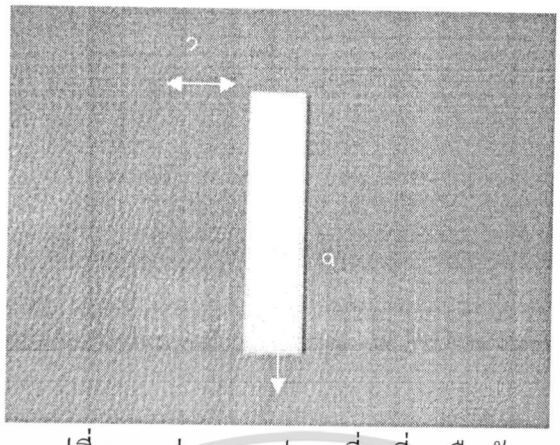
รูปที่ 3.3 แผ่นราบรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

รูปที่ 3.4 แผ่นราบรูปทรงสามเหลี่ยม

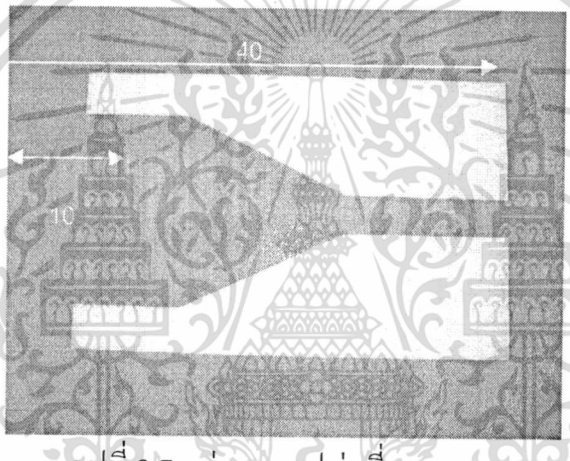


รูปที่ 3.5 แผ่นราบรูปปีกเครื่องบิน

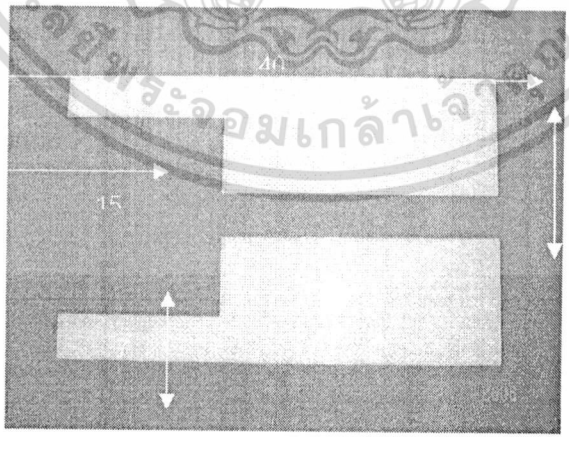
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แผ่นราบรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

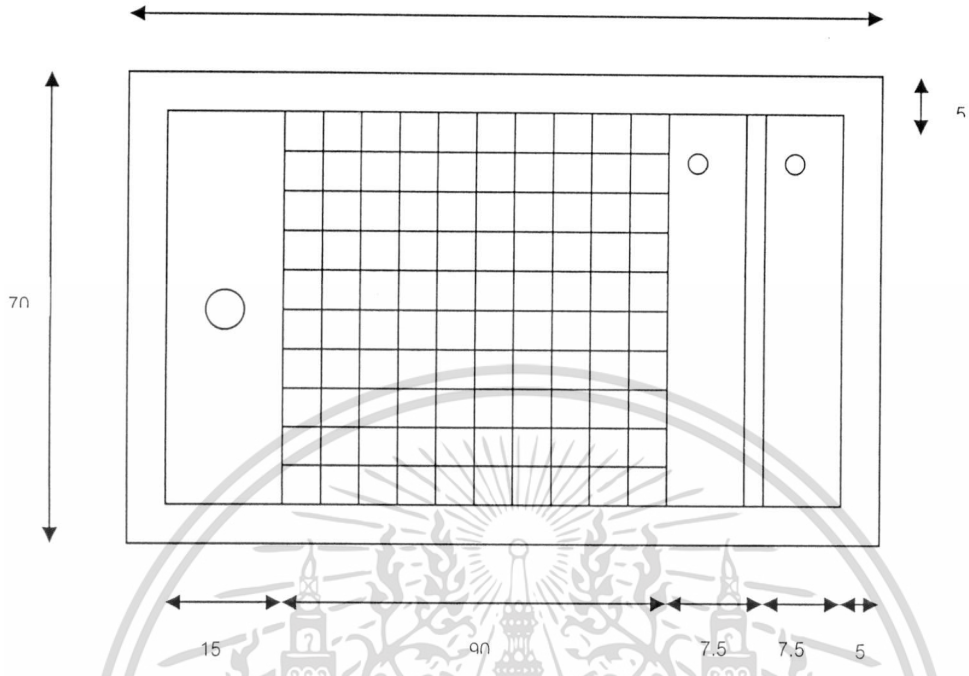


รูปที่ 3.7 แผ่นราบรูปท่อที่ลดขนาด

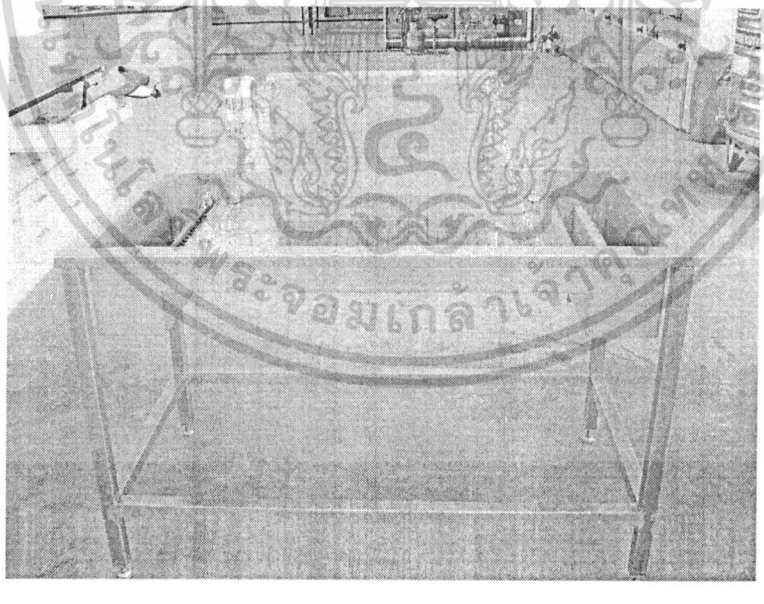


รูปที่ 3.8 แผ่นราบรูปท่อลดขนาดฉับพลัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ภาพฉายด้านบนและด้านหน้าของเครื่องการไหลในอุดมคติมีหน่วยเป็นเซนติเมตร



รูปที่ 3.10 เครื่องการไหลแบบอุดมติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดลองเครื่องการไหลแบบอุดมคติ

3.2.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. ชุดเครื่องการไหลแบบอุดมคติ
2. นาฬิกาจับเวลา
3. กระบอกตวง ปริมาตร 2 ลิตร
4. แผ่นราบรูปทรงต่างๆ

3.2.2 สารเคมี

1. สีผสมอาหารสีแดง

3.2.3 วิธีการทดลอง

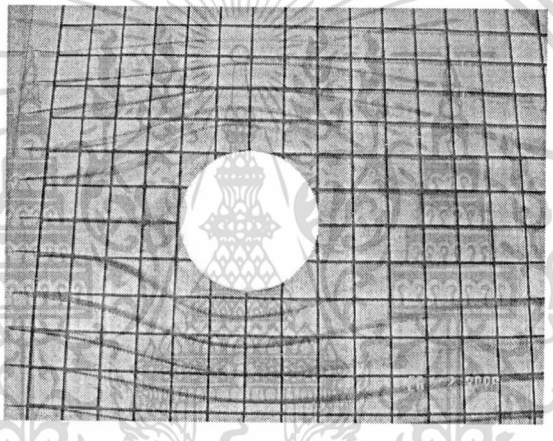
1. นำสีผสมอาหารละลายน้ำ 1 ซอง ให้ละลายน้ำ 2 ลิตร
2. ประกอบชุดเครื่องการไหลแบบอุดมคติ
3. ปิดวาล์วทางออกของ เครื่องเปิดน้ำเข้าเครื่อง ให้ได้ระดับที่เหมาะกับการทดลอง
4. นำน้ำสีใส่ในภาชนะรองรับ เปิดวาล์วน้ำสีให้พอเหมาะกับการ ไหลของ น้ำ
5. ทำการปิดกระจกด้านบนแล้วปรับอัตราการไหลของน้ำ สังเกตเส้นสีให้ลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดแนว
6. ถ้าเส้นสีไม่เป็นเส้นตรงตลอดแนว ให้ปรับขาของเครื่องให้มีระดับที่สมดุล
7. นำแผ่นราบวางไว้ บนกระจกแผ่นล่างปิด กระจกแผ่นบนสังเกตเส้น กระแสการไหลของสี
8. ทำการบันทึกลักษณะเส้นสีการไหลในรูปทรงแผ่นราบ
9. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 5-8 โดยเปลี่ยนรูปแบบของแผ่นราบ ตามลำดับ
10. วัดอัตราการไหลของน้ำขาออก
11. ทำการวัดความหนาของชั้นการไหลของแผ่นราบรูปกระบอกกลม เพื่อไปเปรียบเทียบกับการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลอง

4.2.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลของเครื่องการไหลแบบอุดมคติ

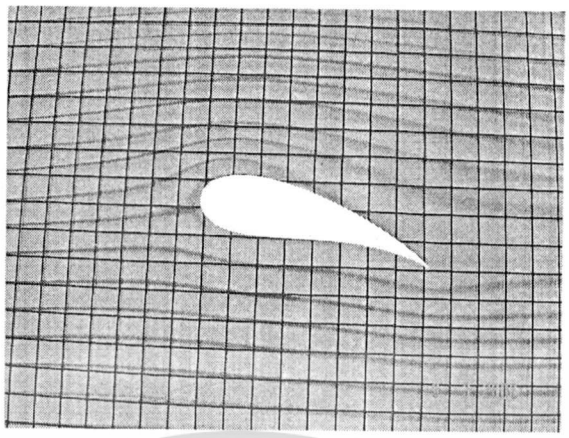
ผลการทดลองวัตถุรูปทรงกระบอกกลมจะวางอยู่ตรงกลางของส่วนทดสอบ โดยที่แนวแกนจะอยู่ในแนวการไหลของสี ผลของรูปแบบของการไหลจะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.1 ซึ่งจะสมมาตรกันและจะไม่มีการไหลวนหรือการไหลย้อนกลับเกิดขึ้นระยะระหว่างเส้นการไหลบริเวณขอบของทรง กระบอกกลมจะแคบลง



รูปที่ 4.1 การไหลแบบอุดมคติรอบรูปทรงกระบอกกลม

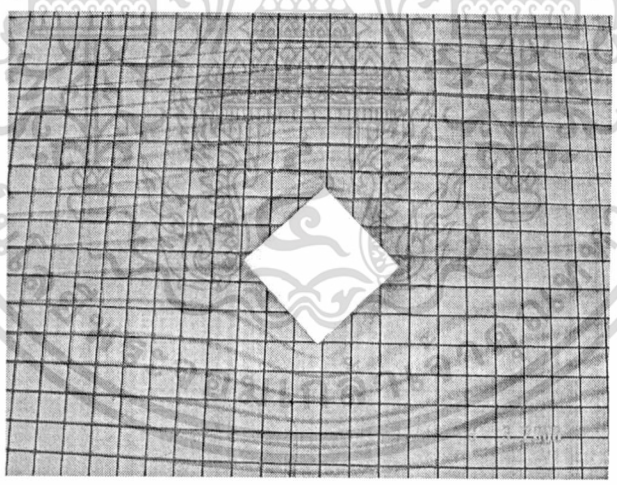
รูปปีกเครื่องบินจะวางอยู่ที่บริเวณตรงกลางของส่วนทดสอบโดยจะมีการเอียงทำมุมเล็กน้อยกับการไหลจุดหยุดนิ่งบนมุมจะอยู่ในตำแหน่งที่ถัดจากเส้นการไหลของสี รูปแบบผลของเส้นการไหลอยู่ในรูปที่ 4.2 เส้นการไหลบริเวณผิวด้านบน ของวัตถุจะแคบลงและบริเวณด้านล่างจะกว้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 การไหลแบบอุดมคติบนปีกเครื่องบิน

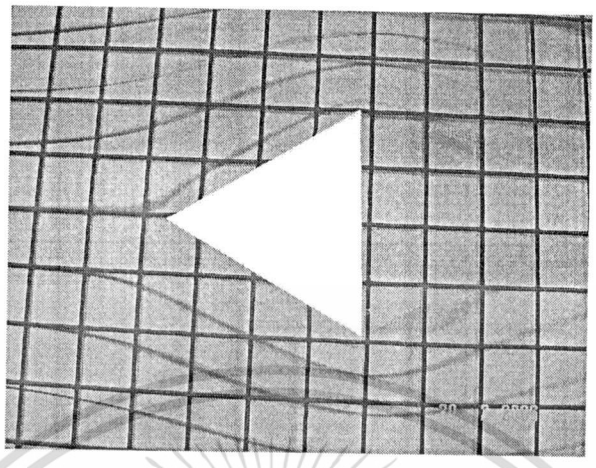
รูปวัตถุทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะวางอยู่ตรงกลางของส่วนทดสอบ โดยที่แนวแกนจะวางในแนวการไหลเส้นการไหลของสีจะอยู่ในแนวแกนเส้นการไหลจะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.3 ซึ่งจะสมมาตรกันทั้งสองระนาบ



รูปที่ 4.3 การไหลแบบอุดมคติรอบรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

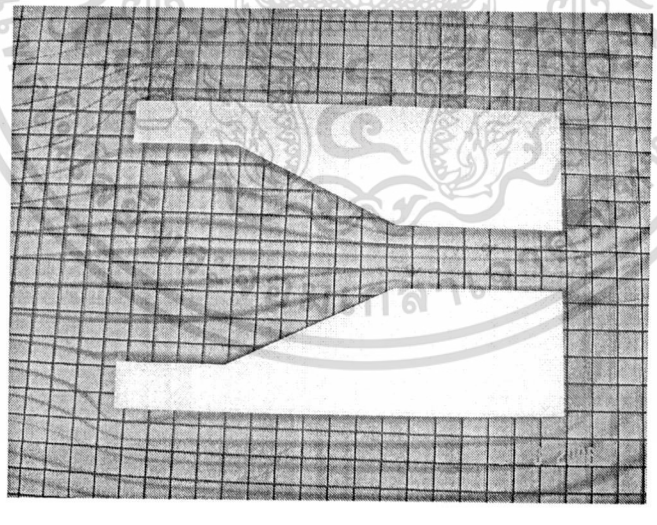
รูปวัตถุทรงสามเหลี่ยมจะวางอยู่ตรงกลางของส่วนทดสอบ โดยที่ด้านมุมยอดของรูปจะมีการแยกของ เส้นการไหลออกจากกันซึ่งจะสมมาตรกันทั้งสองด้าน จะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.4 ด้านหลังของรูปจะเกิดการรวมตัวของเส้นการไหลที่แตกตัวจนเห็นได้ชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การไหลแบบอุดมคติรอบรูปทรงสามเหลี่ยม

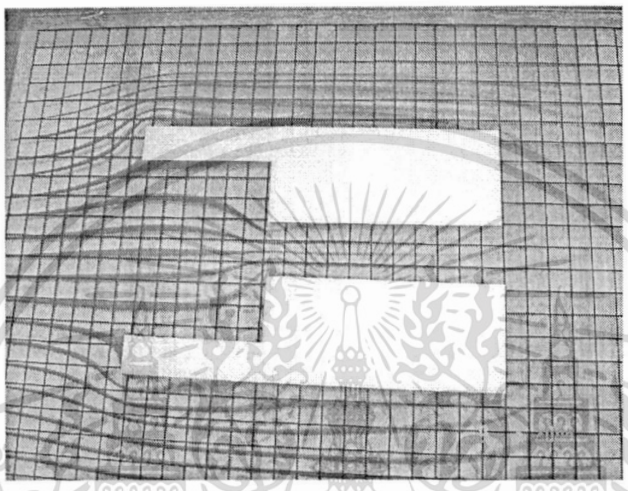
รูปการไหลของท่อที่ลดขนาดลงจะอยู่บริเวณตรงกลางของส่วนทดสอบในแนวทิศทางการไหล รูปแบบของเส้นการไหลในส่วนที่ลดขนาดลงจะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.5 เส้นการไหลจะค่อย ๆ แคบลงจนถึงบริเวณคอแล้วจึงไหลเป็นเส้นตรงตามแนวทางออก



รูปที่ 4.5 การไหลแบบอุดมคติของท่อลดขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปการไหลของท่อลดขนาดอย่างฉับพลันจะอยู่บริเวณตรงกลางของส่วนทดสอบในแนวทิศทางการไหล รูปแบบของเส้นการไหลส่วนแรก จะเป็นเส้นตรงตลอดแนวเมื่อถึงส่วนที่ลดอย่างฉับพลันเส้นการไหลจะแคบลงที่บริเวณคอจะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.6 แล้วจึงไหลเป็นเส้นตรงตามแนวออกไป



รูปที่ 4.6 การไหลแบบอุดมคติของท่อลดขนาดอย่างฉับพลัน

4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล เมื่อคำนวณแรงที่กระทำกับแผ่นราบ

แผ่นราบรูปทรงกระบอกกลม

จากการทดลองและการวิเคราะห์ผลโดยใช้แผ่นรูปทรงกระบอกกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตรมาทำการทดลอง เพื่อศึกษาค่าแรงต้านรวมของแผ่นวงกลมและหาความหนาของชั้นขอบเขตการไหล จากการทดลองความเร็วของน้ำภายในกระจก เท่ากับ 0.01 เมตรต่อวินาที เมื่อคำนวณหาค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ได้ 982 นำค่าค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์หาสัมประสิทธิ์แรงต้านของแผ่นรูปทรงกระบอกกลมได้ 1.1 ซึ่งสามารถนำค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านไปคำนวณค่าแรงต้านรวมของแผ่นราบรูปทรงกระบอกกลมได้ 0.00035 นิวตัน และจากการสังเกตลักษณะของชั้นขอบเขตการไหลวัดความหนาของชั้นขอบเขตการไหลได้ 1.2 เซนติเมตร การคำนวณหาชั้นขอบเขตของไหลจากการคำนวณได้ 1.4 เซนติเมตร ซึ่งค่าความหนาของชั้นขอบเขตการไหลทั้งสอง มีค่าใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ค่าความเร็วของสภาวะที่เหมาะสม กับการทดลองที่ความเร็ว 0.01 เมตรต่อวินาที ซึ่งจะได้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ เท่ากับ 982 ซึ่งเป็นการไหลแบบราบเรียบ เส้นการไหลในอุดมคติจะสมมาตรทั้งสองระนาบเหมือนกัน เกิดชั้นของขอบเขตการไหล ได้ความหนาของขอบเขตการไหลก่อนจะเกิดการไหลวนของการไหลแบบอุดมคติ ซึ่งจากการทดลองใช้แผ่นราบทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร คำนวณแรงต้านรวมของแผ่นรูปทรงกระบอกกลมได้ 0.00035 นิวตัน และคำนวณหาความหนาของชั้นขอบเขตการไหลได้ 1.4 เซนติเมตร จากการทดลองวัดความหนาของชั้นขอบเขตการไหลได้ 1.2 เซนติเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงจากที่คำนวณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] R.L. daugherty , "Fluid Mechanics with Engineering Application " 7th edition Tokyo Kogakusha

[2] Christie John Geankoplis "Transport Processes and Separation Process Priciples" Fourth Edition

[3] Noel de Nevers "Fluid Mechanics for Chemical Engineers" Third Edition

[4]http://www.cartage.org.lb/en/themes/Sciences/Physics/Mechanics/FluidMechanics/RealFluids/Laminar/Laminar.htm

[5] วิศิษฏ์ จาตุรมาน, ขวัญชัย สินทิพย์สมบูรณ์. กลศาสตร์ของไหล. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น. 2533

[6] สมศักดิ์ ไชยภินันท์. กลศาสตร์ของไหล. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์วิทยาลัย 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การคำนวณ

เครื่องการไหลแบบอุดมคติ

การคำนวณหาค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ของแผ่นราบรูปทรงกระบอกกลม

$$N_{Re} = \frac{DV\rho}{\mu}$$

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ = 0.009 เมตร

V คือ อัตราเร็วของน้ำ = 0.01 เมตรต่อวินาที

ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ = 997.8 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

μ คือ ความหนืดของน้ำ = 0.00087 กิโลกรัมต่อวินาทีต่อเมตร

$$N_{Re} = \frac{(0.009)(0.01)(997.8)}{(0.00087)}$$

$$N_{Re} = 982$$

การคำนวณหาแรงต้านทานรวมของแผ่นราบรูปทรงกระบอกกลม

$$F_D = C_D \rho (V^2/2) A \qquad (3)$$

C_D คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านรวม = 1.2

ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ = 997.8 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

V คือ ความเร็วของน้ำ = 0.01 เมตรต่อวินาที

A คือ พื้นที่ของวัตถุแผ่นราบ = 0.00027 ตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_D = \frac{(1.2)\,(997.2)\,(0.01^2)\,(0.00027)}{2}$$

$$F_D = 0.00035\ \text{N}$$

การคำนวณหาความหนาของชั้นขอบเขตของการไหล

$$\delta / X = 4.91 / (N_{R,X})^{1/2} \qquad (4)$$

δ คือ ความหนาของชั้นขอบเขตการไหล = δ เซนติเมตร

X คือ ความยาวของแผ่นที่วางตามแนวยาว = 9 เซนติเมตร

$$\delta / 9 = 4.91 / (982)^{1/2}$$

$$\delta / 9 = 0.16$$

$$\delta = (0.16)\,(9)$$

$$\delta = 1.4 \text{ เซนติเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้