บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ จะกล่าวถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ทางกายภาพรวมทั้งเกณฑ์ในการพิจารณา ซึ่งก็จะนำไปสู่ถึงคุณสมบัติของของไหลที่จะต้องพิจารณาในส่วนของการไหลในอุโมงค์ลม นอกจากนี้จะกล่าวถึงความสามารถในการกดอัดได้และความยืดหยุ่น(Compressibility and Elasticity) ซึ่งเกี่ยวข้องกับโมดูลัสความยืดหยุ่นของของไหล ตลอดจนความหนืด (Viscosity) ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของของไหลแต่ละประเภท และรายละเอียดอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์ของไหลที่เกิดขึ้นและนำไปพิจารณาในอุโมงค์ลม

2.1 คุณสมบัติเกี่ยวกับของไหล

2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของของไหล (Physical Properties of Fluid)

สสารดำรงตัวอยู่ใน 3 สถานะ คือของแข็ง (Solid) ของเหลว (liquid) และแก๊ส (Gas) ซึ่งทั้งของเหลวและแก๊สรวมเรียกว่า ของไหล (Fluid) ความแตกต่างระหว่างสถานะทั้งสามอยู่ที่ช่องว่างและแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล กล่าวคือ ของแข็งมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลน้อย ของเหลวมีช่องว่างมากขึ้น ส่วนแก๊สมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลมากที่สุด ในทางตรงข้ามกัน แก๊สมีแรงดูดระหว่างโมเลกุลน้อย ของเหลวมีแรงดึงดูดมากขึ้น และแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลจะมีมากในของแข็ง

คำ จำกัดความเชิงกลอย่างละเอียดของสถานะของของแข็งและของไหลสามารถพิจารณาได้จากปฏิกิริยาพื้นฐานของสสารที่เกิดจากแรงต่าง ๆ เช่น แรงดึง(Tension) แรงอัด (Compression) และแรงเฉือน (Shear force) จะพบว่า เมื่อของแข็งไดรับแรงเฉือนจะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างยืดหยุ่น (Elastic Deformation) และถ้าแรงกระทำมีค่ามากจนเกินขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limit) แล้วของแข็งจะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Permanent Deformation) ส่วนของไหลไม่สามารถรับแรงเฉือนได้เลยไม่ว่าจะมีขอนาดเท่าใดก็ตาม เพราะเมื่อได้รับแรงเฉือนแล้วของไหลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเกิดการไหล (Flow) ทันที การที่กล่าวว่าของไหลไม่สามารถรับแรงดึงได้นั้นในทางกายภาพแล้วของไหลสามารถรับแรงดึงได้บ้างเล็กน้อยเพราะมีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion)

ระหว่างโมเลกุล แต่มีค่าต่ำมากจึงถือเสมือนว่าของไหลไม่สามารถรับแรงดึงได้ ซึ่งเป็นสมมติฐานทางวิศวกรรมที่ใช้กันทั่ว ๆ ไป

2.1.2 ของไหลที่กดอัดได้และที่กดอัดไม่ได้ (Compressible and Incompressible Fluid)

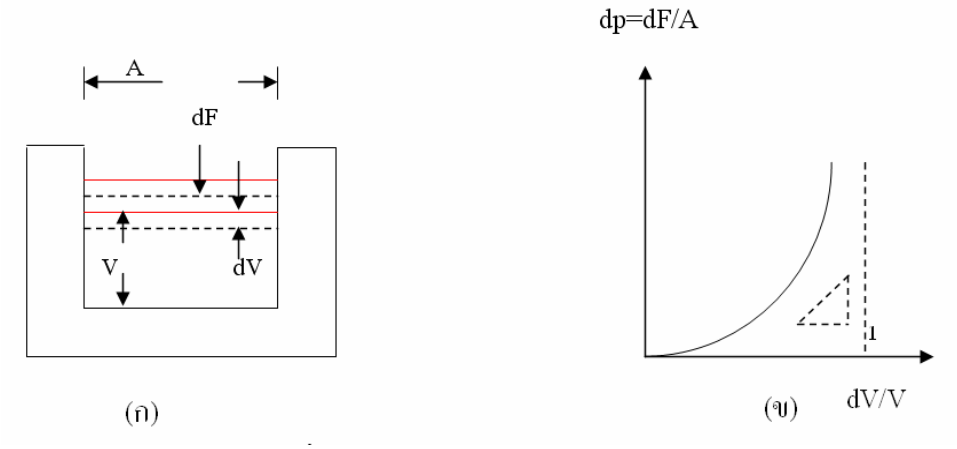
ของไหลที่กดอัดได้ (Compressible Fluid) หมายถึงของไหลชนิดที่มีปริมาตรเปลี่ยนแปลงไปมากเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าของไหลที่กดอัดได้คือของไหลที่มีค่าความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงไปมากเมื่อความดันเปลี่ยนแปลงไป

ของไหลที่กดอัดไม่ได้ (Incompressible Fluid) หมายถึงของไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรน้อยมากเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถที่จะไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าของไหลที่กดอัดไม่ได้คือของไหลที่มีค่าความหนาแน่นคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง โดยทั่ว ๆ ไปถือว่าของเหลวเป็นของไหลที่กดอัดไม่ได้ ซึ่งเป็นของไหลส่วนใหญ่ที่จะกล่าวในเนื้อหาของวิชากลศาสตร์ของไหล

2.1.3 การกดอัดและความยืดหยุ่น (Compressible and Elasticity)

ของไหลทุกชนิดถูกกดอัดได้ถ้าใช้ความดัน ซึ่งจะเป็นผลให้เกิดพลังงานความยืดหยุ่น (Elastic Energy) อยู่ภายในตัวของไหลนั้น ถ้าหากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานเป็นไปอย่างสมบูรณ์ (ไม่มีการสูญเสียพลังงาน) เมื่อเอาความดันที่กระทำนั้นออกไป ของไหลที่ยุบตัวลงนั้นจะขยายตัวกลับไปในปริมาตรเท่าเดิม จึงกล่าวได้ว่าของไหลเป็นสสารที่มีความยืดหยุ่น โดยทั่ว ๆ ไปลักษณะความยืดหยุ่นจะกำหนดได้โดยโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus Of Elasticity) แต่เนื่องจากของไหลมีรูปร่างไม่แน่นอนเหมือนแข็ง ดังนั้นจึงต้องให้คำจำกัดความของโมดูลัสความยืดหยุ่นในรูปของปริมาตรซึ่งเรียกว่า โมดูลัสความยืดหยุ่นเชิงปริมาตร (Bulk Modulus Of Elasticity)

ลักษณะการคืนตัวและโมดูลัสความยืดหยุ่นเชิงปริมาตรอาจแสดงให้เห็นได้โดยการพิจารณากระบอกสูบและลูกสูบ ดังในรูปที่ 2.1 (ก) ภายในกระบอกสูบบรรจุไว้ด้วยของไหลปริมาตร V เมื่อแรง dF กระทำที่ก้านสูบ ทำให้เกิดความดัน dp เป็นผลให้ปริมาตรของการไหลลดลง dV เมื่อเขียนกราฟระหว่างความดัน dp และสัดส่วนการยุบตัว dV/V จะได้กราฟหน่วยแรงและความเคลียด (Stress-Strain) ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ข)



รูปที่ 2.1 การกดอัดและโมดูลัสความยืดหยุ่น

ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของของไหลที่จุดใด ๆ หาได้จากความลาดชัน (Slope) ของเส้นทีสัมผัสกับจุดนั้น ๆ นั่นคือ

$$E = \frac{-dp}{dV/V} \tag{2.1}$$

โมดูลัสความยืดหยุ่นของของไหลไม่ค่าคงที่ แต่จะขึ้นอยู่กับความดันที่กระทำและปริมาตรเริ่มต้น

สำหรับแก๊ส การกดอัดและการขยายตัวจะเป็นไปตามกฎต่าง ๆ ทางอุณหพลศาสตร์ เช่น กระบวนการทางความร้อนคงตัว (Isothermal) ซึ่งเป็นไปตามกฎของบอยล์ กล่าวคือ

$$\frac{P}{\rho} = \text{ค่าคงที่} \tag{2.2}$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับกระบวนการที่ปราศจากความเสียดทานและไม่มีการแลกเปลี่ยนพลังงาน (Isentropic) การกดอัดและการขยายตัวจะแปลเปลี่ยนไปตามความสัมพันธ์พลังงานคงตัว (Adiabatic) คือ

$$\frac{P}{\rho^k} = \text{ค่าคงที่} \tag{2.3}$$

โดยที่ k คือสัดส่วนของความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ (c_p) ต่อความร้อนที่ปริมาตรคงที่ (c_v) ซึ่งเรียกว่า ดัชนี Adiabatic

ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของแก๊ส ในกระบวนการความร้อนคงตัวและพลังงานคงตัวอาจหามาได้โดยการเขียนสมการที่ (2.3) ในรูปของ ρ หรือ γ ทั้งนี้เนื่องจากการแปรเปลี่ยนสัมพัทธ์ของ ρ และ γ มีค่าเท่ากับการแปรเปลี่ยนสัมพัทธ์ของปริมาตร

$$E = \frac{-dp}{d\rho/\rho} = \frac{-dp}{d\gamma/\gamma} \tag{2.4}$$

2.2 จลศาสตร์ของของไหล

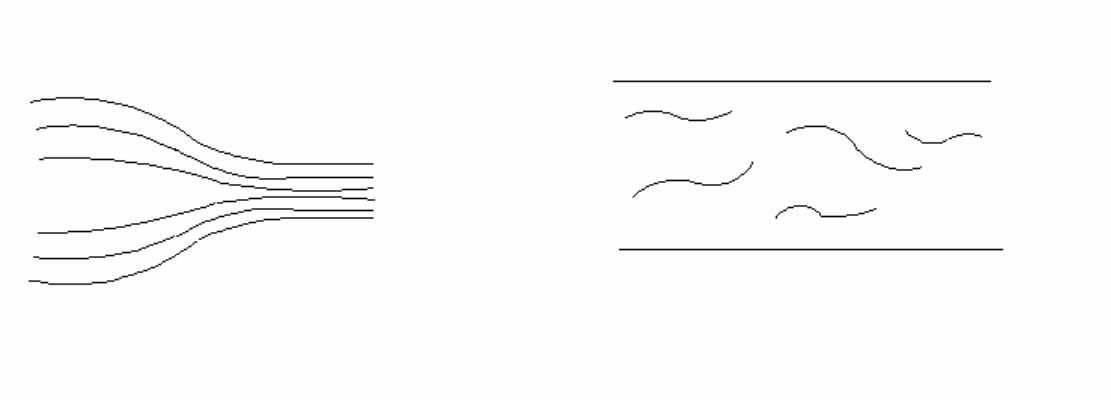
จลศาสตร์ (Kinematics) เป็นแขนงวิชากลศาสตร์ที่อธิบายเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของสสารโดยไม่คำนึงถึงแรงกระทำอันเป็นสาเหตุของการเคลื่อนที่ ในที่นี้จะกล่าวถึงส่วนของวิธีการอธิบายการเคลื่อนที่ของของไหล การอธิบายการเคลื่อนที่ในที่นี้ประกอบด้วย การเปลี่ยนตำแหน่ง (Displacement) ความเร็ว (Velocity) และความเร่ง (Acceleration) การเคลื่อนที่ของของไหลมักเรียกว่าการไหล (Flow) การอธิบายการไหลโดยการเปลี่ยนสภาพของการไหลสามารถทำได้หลายวิธีการ เช่น การไหลเป็นแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วน (Laminar or Turbulent Flow) การไหลเป็นแบบคงตัวหรือไม่คงตัว (Steady or Unsteady Flow) การไหลแบบสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอ (Uniform or Non-uniform Flow) และอธิบายว่าการไหลเป็นแบบหมุนวนหรือแบบไม่หมุนวน (Rotational or Irritational Flow) เป็นต้น

2.2.1 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน (Laminar and Turbulent Flow)

จากการทดลองของ Osborne Reynolds ในปี ค.ศ. 1883 [1] โดยเปิดให้น้ำไหลผ่านท่อแก้วใส แล้วฉีดสีเข้าไปเพื่อให้มองเห็นสภาพการไหลในท่อแก้ว เมื่อเปิดวาล์วให้มีการไหลผ่านท่อแก้วน้อย ๆ (อัตราการไหลต่ำ ๆ และความเร็วของการไหลน้อย ๆ) เส้นสีจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดท่อและเมื่อเปิดวาล์วให้มีอัตราส่วนการไหลเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เส้นสีจะเริ่มแปรปรวนเป็นลูกคลื่นจนในที่สุดเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้นไปอีก เส้นสีจะแตกและกระจายออกทั่วหน้าตัดท่อ

การไหลในช่วงแรก ๆ ที่เส้นสีมีลักษณะเป็นเส้นตรงนั้นเรียกว่าการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ซึ่งอนุภาคของของไหลจะเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบและมีลักษณะเหมือนเป็นชั้นบาง ๆ มีการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างชั้นน้อย ดังแสดงในรูปในรูปที่ 2.2(ก) ส่วนการไหลในช่วงหลังที่เส้นสีเริ่มแปรปรวนเป็นลูกคลื่นจนกระทั่งแตกกระจายในที่สุดเรียกว่าการไหลแบบปั่นป่วน

(Turbulent Flow) ดังแสดงในรูปที่ 2.2(ข) การไหลแบบนี้อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบและมีการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างโมเลกุลมาก



รูปที่ 2.2 (ก) รูปที่ 2.2 (ข)

รูปที่ 2.2 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน

-การไหลแบบราบเรียบสามารถอธิบายโดยกฎความหนืดของนิวตัน (Newton ‘s low of Viscosity) คือ

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

-ส่วนการไหลแบบปั่นป่วนสามารถอธิบายได้ด้วยสมการในลักษณะเดียวกันคือ

$$\tau = \eta \frac{du}{dy}$$

โดยที่ η คือความหนืดคลื่นวน (Eddy Viscosity) ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการไหลและความหนาแน่นของของไหล

จากวิชากลศาสตร์ของไหลนั้นพารามิเตอร์ ที่ใช้เชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและแรงจากความเฉื่อยที่มาทำให้การไหลเปลี่ยนจาก Laminar ไปเป็น Turbulent คือ Reynolds Number มีค่าเป็น

$$\mathrm{Re}_x = \frac{\rho v_\infty x}{\mu} = \frac{v_\infty x}{\nu} \qquad (2.5)$$

เมื่อ Re_x คือ Reynolds Number ตรงจุดที่อยู่ห่างจากต้นของไหลเป็นระยะทาง x, ไร้ มิติ

v_∞ คือ ความเร็วของของไหลอิสระ, m/s

x คือ ระยะที่วัดจากขอบทางด้านต้นของของไหล, m

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3

μ คือ ความหนืดไดนามิกส์, $N.s/m^2$

ν คือ ความหนืดเนแมติคส์ , m^2/s

การไหลในท่อเป็นการไหลที่สำคัญมาก การไหลในท่อจะเป็น Laminar หรือ Turbulent ขึ้นกับค่า Reynolds Number

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu} \qquad (2.6)$$

เมื่อ Re คือ Reynolds number ที่หาจากเส้นผ่านศูนย์กลาง D ของท่อ, ไร้มิติ

v คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ, m

กรณีการไหลในท่อจะเปลี่ยนจาก Laminar เมื่อ Re_D = 2,300 และเมื่อ Re_D = 6,000 แล้วการไหลจะเป็น Turbulent โดยสมบูรณ์และ 2,000 < Re_D < 4,000 เป็นช่วง Transition ปกติค่า Reynolds Number ขึ้นอยู่กับความเรียบของผิวท่อ และระดับความเป็น Turbulent ของของไหล

ในกรณีที่ไม่ใช่ท่อกลม จำเป็นต้องใช้รัศมีชลศาสตร์ R_h (Hydraulic Radius) ในการหาค่า Reynolds Number โดยที่

$$R_h = \frac{A}{P} \qquad (2.7)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของการไหล

P คือ เส้นขอบเปียก(Wetted Parameter) ซึ่งเป็นความยาวของเส้นขอบหน้าตัดที่ของเหลวสัมผัสกับผิวของท่อ

ในกรณีท่อกลมจะได้ว่า

$$R_h = \frac{\pi r^2}{2\pi r} = \frac{r}{2} \text{ หรือ } \frac{D}{4} \qquad (2.8)$$

จะเห็นได้ว่ารัศมีชลศาสตร์ไม่ใช่รัศมีของท่อ ดังนั้นถ้าหากไม่เป็นท่อกลมจะคำนวณค่า R โดยแทนค่า D ด้วย 4 R_h

หรือ $$R_h = \frac{D_H}{4}$$

หรือ $$D_H = 4\frac{A}{P} \qquad (2.9)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัด

P คือ เส้นขอบเปียก

2.2.2 การไหลแบบคงตัวและการไหลแบบสม่ำเสมอ (Steady And Uniform Flow)

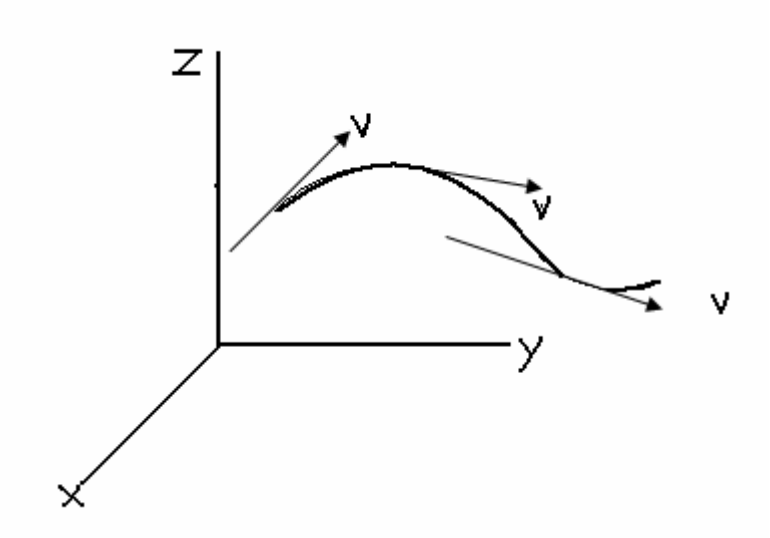
การไหลแบบคงตัว (Steady Flow) คือการไหลที่มีสภาพการไหล ณ จุดใดจุดหนึ่งในสนามการไหลคงที่ ไม่เปลี่ยนตามกาลเวลา ทั้งนี้ที่ตำแหน่งอื่นอาจแตกต่างจากตำแหน่งนี้ก็ได้ ส่วนการไหลแบบสม่ำเสมอ (Uniform Flow) คือการไหลที่มีความเร็ว ณ ทุก ๆ จุดในสนามการไหลคงที่ทั้งขนาดและทิศทางในเวลาใดเวลาหนึ่ง กล่าวคือ การไหลแบบสม่ำเสมอมีสภาพการไหลที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง ส่วนการไหลแบบไม่คงตัว (Unsteady Flow) และการไหลแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform Flow) คือ การไหลที่มีสภาพแตกต่างจากที่กล่าวข้างต้น ตามลำดับ อาจกล่าวได้ว่าการไหลแบบคงตัวจะเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อสภาพการไหลเป็นแบบราบเรียบเท่านั้น

จากคำจำกัดความข้างต้น จะพบว่าการไหลในสภาพทั่ว ๆ ไปจะเกิดจากการผนวกการไหลทั้ง 4 ประเภทเข้าด้วยกันคือ การไหลแบบคงตัว การไหลแบบไม่คงตัว การไหลแบบสม่ำเสมอ และการไหลแบบไม่สม่ำเสมอ เกิดเป็นการไหล 4 สภาพดังนี้

1. การไหลคงตัวแบบสม่ำเสมอ (Steady Uniform Flow) เช่น การไหลด้วยอัตราคงที่ผ่านท่อตรงที่ยาวมาก
2. การไหลคงตัวแบบไม่สม่ำเสมอ (Steady Non-uniform Flow) เช่น การไหลด้วยอัตราคงที่ผ่านท่อที่มีขนาดค่อย ๆ ขยายใหญ่ขึ้น
3. การไหลไม่คงตัวแบบสม่ำเสมอ (Unsteady Uniform Flow) เช่นการไหลในท่อตรงที่มีอัตราการไหลไม่คงที่
4. การไหลไม่คงตัวแบบไม่สม่ำเสมอ (Unsteady Non-uniform Flow) เช่น การไหลในอัตราไม่คงที่ผ่านท่อที่ค่อย ๆ ขยายใหญ่ขึ้น

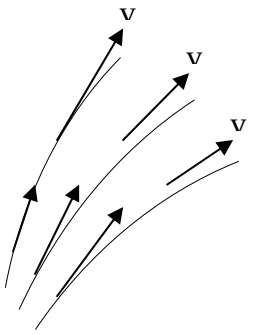
2.2.3 รูปแบบการไหล (Flow Pattern)

รูปแบบการไหลสามารถอธิบายด้วยเส้นการไหล (Streamline) เส้นทางไหล (Part Line) และเส้นใยการไหล (Streak Line) โดยที่เส้นการไหลคือเส้นต่าง ๆ ที่ลากสัมผัสกับเวคเตอร์ความเร็ว (Velocity Vector) ของการไหลทุก ๆ จุดในช่วงเวลาขณะหนึ่งของการไหล สำหรับการไหลแบบคงตัว เส้นการไหลคือเส้นที่แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามการไหลนั่นเอง และเนื่องจากไม่มีความเร็วในแนวตั้งฉากกับเส้นการไหล ดังนั้นจึงไม่มีการไหลข้ามเส้น เมื่อพิจารณาเส้นการไหลของอนุภาคทั้งหมดก็จะได้เส้นการไหลจำนวนมาก ซึ่งรูปแบบการไหลที่มีเส้นการไหลประกอบกันเป็นจำนวนมากนี้เรียกว่า สนามการไหล (Flow Field) ดังแสดงในรูป 2.3 (ก)



รูปที่ 2.3(ก) เส้นการไหลในสนามการไหล [1]

ถ้าหากพิจารณากลุ่มของเส้นการไหล จะพบว่าเนื้อที่ระหว่างเส้นการไหลจะมีลักษณะเป็นลำท่อ (Tube) คล้าย ๆ กับท่อน้ำซึ่งเรียกว่า ลำการไหล (Steam Tube) ดังแสดงในรูปที่ 2.3(ข) ลำการไหลอาจจะได้หยิบยกออกมาจากสนามการไหลเพื่อพิจารณาคุณสมบัติการไหลเป็นพิเศษได้ ทั้งนี้เพราะลำการไหลประกอบขึ้นด้วยผนังเส้นการไหล และไม่มีความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับเส้นการไหลจึงไม่มีการไหลผ่านผนังของลำการไหล ดังนั้นของไหลที่ไหลเข้าลำการไหลเป็นจำนวนเท่าใดก็ย่อมจะต้องไหลออกเป็นปริมาณเท่าเดิม จะเห็นว่าลำการไหลมีประโยชน์ในการวิเคราะห์การไหลในหลาย ๆ ด้านแต่จะต้องเป็นเฉพาะกรณีของการไหลแบบคงตัวเท่านั้นจึงจะมีลำการไหลคงที่



รูปที่ 2.3 (ข) สนามการไหลและลำการไหล [1]

เส้นการไหล (Path Line) คือ เส้นซึ่งเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคของของไหลเพียงอนุภาคเดียวในเวลาที่กำหนด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า เส้นทางไหลแสดงให้เห็นถึงทิศทางของ

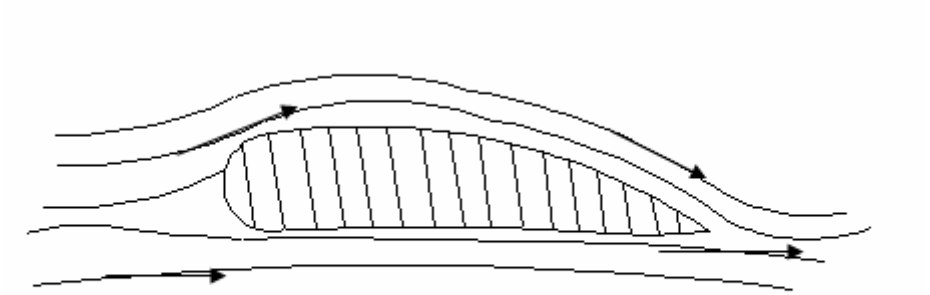
ความเร็วของอนุภาคใดอนุภาคหนึ่งในช่วงเวลานั้น ในการไหลแบบคงตัวนั้นจะมีเส้นทางไหลและเส้นการไหลที่เป็นเส้นเดียวกันเพราะอนุภาคเคลื่อนที่ตามเส้นการไหล และเส้นการไหลนี้ก็แสดงให้เห็นทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในเวลาเดียวกันด้วย ส่วนในกรณีการไหลแบบไม่คงตัวนั้น เวคเตอร์ความเร็วที่จุดต่าง ๆ จะเปลี่ยนแปลงไปตามกาลเวลา เส้นการไหลจึงเปลี่ยนตำแหน่งไปเรื่อย ๆ ทำให้เส้นการไหลกับเส้นทางไหลแตกต่างกันออกไป

เส้นใยการไหล (Steak Line หรือ Filament Line) เป็นเส้นซึ่งให้ภาพการไหลในชั่วขณะใด ๆ ที่แสดงตำแหน่งของอนุภาคของไหลที่ผ่านจุดกำหนด เปรียบเสมือนกับการถ่ายรูป เส้นใยการไหลมักจะได้มาจากการทดลองโดยการปล่อยสีหรือสารอื่น ๆ ออกจากจุดที่กำหนดจุดใดจุดหนึ่งเข้าไปในสนามการไหล หากการไหลเป็นแบบคงตัวหรือราบเรียบเส้นใยการไหลหรือเส้นสีที่ปรากฏจออกมาจะยาวติดต่อกันเหมือนเส้นริบบิ้นยาว

2.2.4 การไหลสองมิติและสามมิติ (Two – and Three-Dimensional Flow)

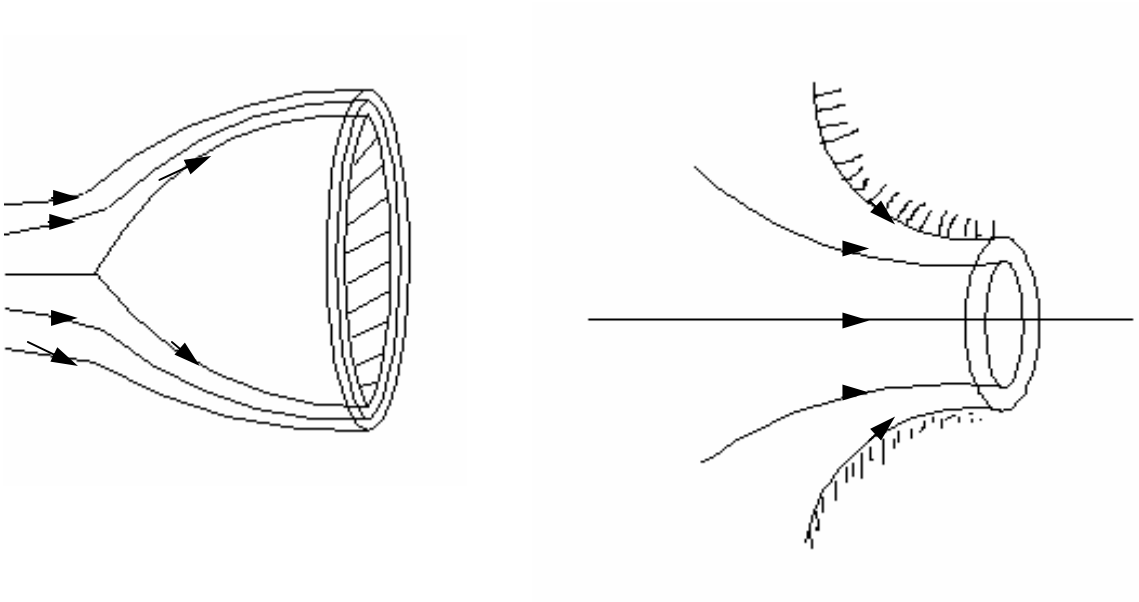
การไหลตามเส้นการไหลใด ๆ ถือว่าเป็นการไหลมิติเดียว (One-dimensional Flow) โดยจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการไหล เช่น ความดัน ความเร็ว หรือคุณสมบัติอื่น ๆ เฉพาะในทิศทางของเส้นการไหลเท่านั้นไม่คำนึงคุณสมบัติดังกล่าวในทิศทางตั้งฉากกับเส้นกรไหล ตัวอย่างเช่นการไหลในท่อจะเป็นการไหลแบบมิติเดียว หลักการของการไหลมิติเดียวนี้ช่วยให้สามารถแก้ไขปัญหาทางกลศาสตร์ของไหลได้ว่ายและแม่นยำค่อนข้างสูง

การไหลสองมิติ (Two-dimensional Flow) คือการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติใน 2 แนวแกน การอธิบายสภาพการไหลทำได้โดยใช้เส้นการไหลในสนามการไหลระนาบเดียว ตัวอย่างเช่น การไหลผ่านฝาย (weir) หรือ การไหลรอบปีกเครื่องบน (airfoil) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สนามการไหล 2 มิติ ผ่านปีกเครื่องบิน [1]

การไหลสามมิติ (Three-dimensional Flow) คือ การไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพทั้ง 3 แกนซึ่งเป็นการไหลโดยทั่วไปทางธรรมชาติ การอธิบายสภาพการไหลจะต้องใช้ภาพสนามการไหลแบบ 3 มิติ เช่น การไหลในลักษณะที่มีแกนสมมาตร (Axis of Symmetry) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 การไหลที่เกิดขึ้นจะเป็นผิวของลำการไหลที่ให้ภาพตัดขวางเป็นรูปวงแหวน ถ้ามองในระนาบที่ตัดผ่านแกนของการไหลจะได้ภาพที่มีสภาพการไหลเป็น 2 มิติ ซึ่งภาพสนามการไหลดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ในการมองในลักษณะของเส้นการไหล



รูปที่ 2.5 สนามการไหล 3 มิติ [1]

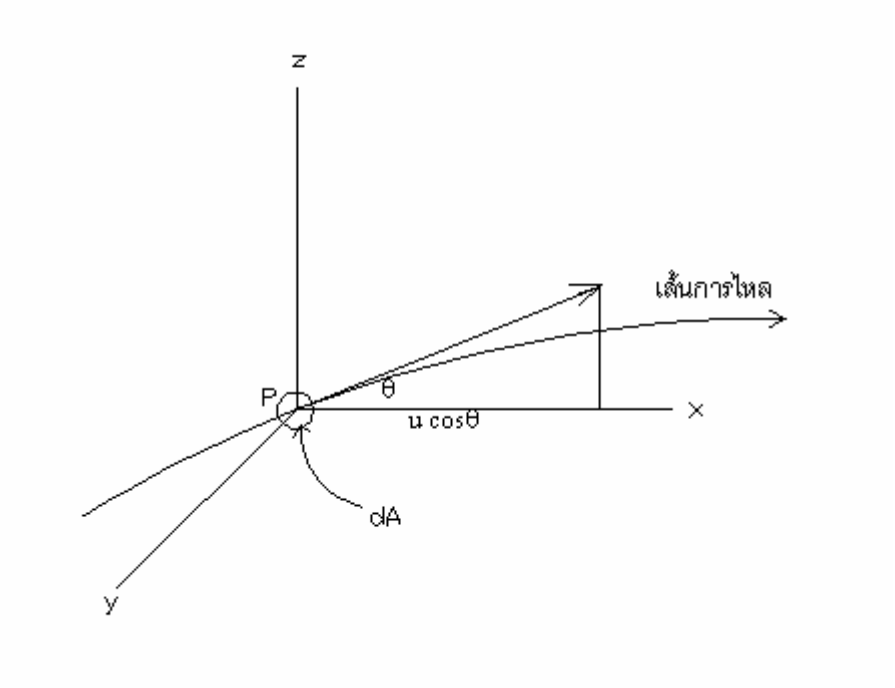
2.2.5 อัตราการไหลและความเร็วเฉลี่ย (Flow Rate and Mean Velocity)

อัตราการไหล คือ ปริมาณของของไหลที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดใด ๆ ที่กำหนดต่อหนึ่งหน่วยเวลา ดังนั้นหน่วยของอัตราการไหลอาจเป็นหน่วยเชิงปริมาตร เช่น ลบ.ฟุต/วินาที (cfs.) ,แกลลอน/นาที (gpm), แกลลอน/วัน (gpd),และ ลบ.เมตร/วินาที (cms) หรืออาจจะเป็นหน่วยเชิงน้ำหนักและมวลสาร เช่น ปอนด์/วินาที, นิวตัน/วินาที,สลั๊ก/วินาที,และกิโลกรัม/วินาที เป็นต้น โดยทั่ว ๆ ไป อัตราการไหลเชิงปริมาตรมักจะใช้กับของไหลที่กดอดไม่ได้ (Incompressible Fluid) ในขณะที่อัตราการไหลเชิงน้ำหนักและมวลสารนิยมกับของไหลที่กดอัดได้ (Compressible Fluid) เพื่อความสะดวกและเป็นไปตามมาตรฐาน

พิจารณารูปที่ 2.6 คือส้นการไหลในการไหลแบบคงตัวอยู่บนระนาบ xz พื้นที่ย่อย dA อยู่ในระนาบ yz ความเร็วเฉลี่ยที่จุด P คือ u ดังนั้นอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ไหลผ่านพื้นที่ย่อย dA คือ

$$
\begin{aligned}
dQ &= \bar{u}dA \\
&= (u\cos\theta)dA \\
&= (u\cos\theta\, dA) \\
&= udA' \qquad (2.10)
\end{aligned}
$$

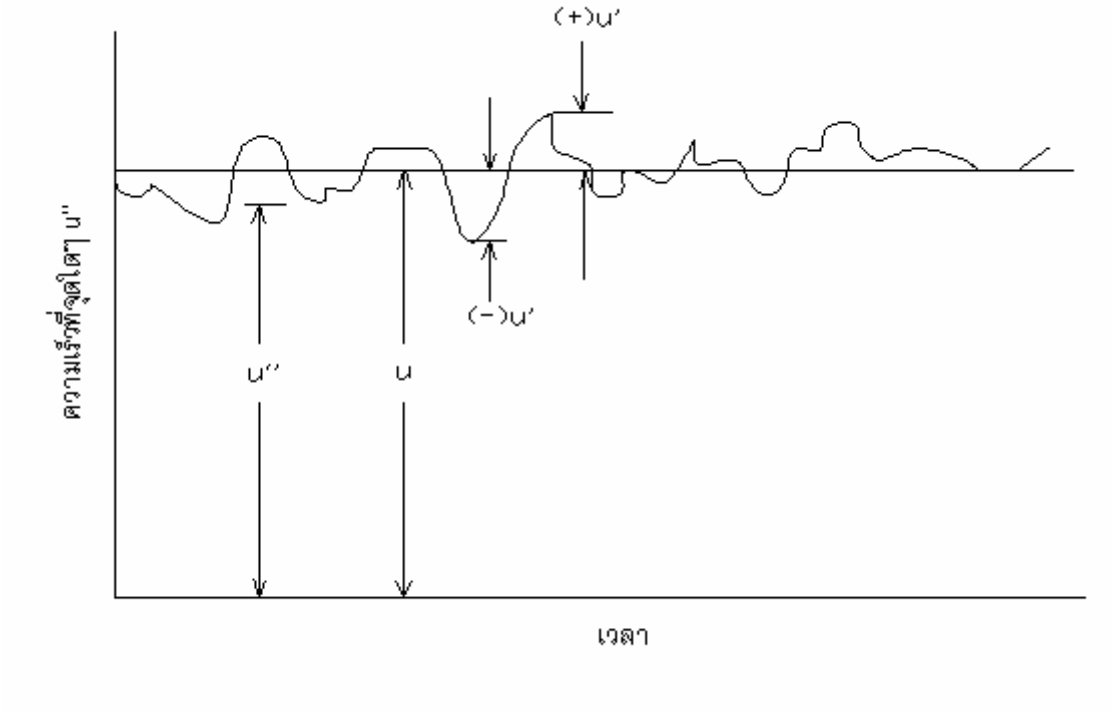
โดยที่ dA' คือพื้นที่ทาบของ dA บนระนาบที่ตั้งฉากกับความเร็ว u แสดงว่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรมีค่าเท่ากับขนาดของความเร็วคูณกับพื้นที่หน้าตัดที่คูณกับขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางของความเร็ว ในขณะเดียวกันอัตราเชิงน้ำหนักและมวลสารสามารถคำนวณได้จากการคูณอัตราการไหลเชิงปริมาตรด้วยน้ำหนักจำเพาะ และความหนาแน่นของของไหล ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 การไหลแบบคงตัวตามเส้นการไหลพื้นที่ dA (Daugherty, 1989)

ในกรณีการไหลแบบปั่นป่วน ความเร็ว ณ เวลา ใด ๆ ตามเส้นการไหล (u'') จะมีค่าขึ้นลงตลอดเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยมี u เป็นความเร็วเฉลี่ยตลอดช่วงเวลาที่พิจารณาให้ u' คือความแตกต่างระหว่าง u'' และ u ซึ่ง u' นี้เรียกว่า Turbulent Function ดังนั้นที่เวลาใด ๆ จะได้

$$u'' = u + u' \qquad (2.11)$$



รูปที่ 2.7 กราฟความเร็วในการไหลแบบปั่นป่วน

ในที่นี้ผลรวมของความแตกต่างความเร็ว u ตลอดช่วงเวลา t จะต้องเป็นศูนย์และค่าของความเร็วเฉลี่ยครอบคลุมช่วงเวลา t สามารถคำนวณได้จาก

$$u = \frac{1}{t}\int_0^t u''dt$$

การไหลในสภาพความเป็นจริง ความเร็ว u จะไม่คงที่ตลอดพื้นที่หน้าตัดของการไหล ดังนั้นอัตราการไหลเชิงปริมาตรสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Q = \int_A udA = vA$$

หรือในกรณีที่ทราบค่าอัตราการไหล หากต้องการหาค่าความเร็วเฉลี่ยที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดของการไหลสามารถคำนวณได้จาก

$$V = \frac{Q}{A}$$

2.2.6 ความเร็วและความเร่ง (Velocity and Acceleration)

ในสนามการไหล 3 มิติ ความเร็วจะแปรเปลี่ยนทั้งขนาดและทิศทาง นอกจากนี้ ความเร็วในสนามการไหลยังอาจเปลี่ยนแปลงไปตามการเวลาอีกด้วย สำหรับในกรณีการไหลแบบคงตัวซึ่งคุณสมบัติการไหลไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา ถ้าให้ u, v และ w เป็นความเร็วตามแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ จะได้

$$u_{st} = u(x,y,z) \tag{2.12a}$$

$$v_{st} = v(x,y,z) \tag{2.12b}$$

$$w_{st} = w(x,y,z) \tag{2.12c}$$

เมื่อนำหลักการของอนุพันธ์เชิงส่วนมาใช้ เพื่อหาสมการของความเร่ง จะได้

$$a_{st} = \frac{d}{dt}\,\overline{V}\,(x,y,z) \tag{2.13}$$

$$= \frac{\partial \overline{V}}{\partial x}\frac{dx}{dt} + \frac{\partial \overline{V}}{\partial y}\frac{dy}{dt} + \frac{\partial \overline{V}}{\partial z}\frac{dz}{dt} \tag{2.14}$$

โดยที่ $$\left|\overline{V}\right| = \frac{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}}{1} \tag{2.15}$$

$$\frac{dx}{dt} = u,\ \frac{dv}{dt} = v \text{ และ } \frac{dw}{dt} = w$$

ดังนั้น $$a_{st} = u\frac{\partial \overline{V}}{\partial x} + v\frac{\partial \overline{V}}{\partial y} + w\frac{\partial \overline{V}}{\partial z}$$

(2.16)

สมการที่ 2.16 สามารถเขียนในรูปของปริมาณสเกลาร์ได้ดังนี้

$$(a_x)_{st} = u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} \qquad (2.16a)$$

$$(a_y)_{st} = u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} \qquad (2.16b)$$

$$(a_z)_{st} = u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z} \qquad (2.16c)$$

สมการที่ 2.16 แสดงให้เห็นว่าในการไหลแบบคงตัว ความเร่งของการไหลจะแปรเปลี่ยนไปตามการเปลี่ยนตำแหน่งหรือระยะทาง ซึ่งความเร่งที่แปรเปลี่ยนตามตำแหน่งนี้เรียกว่า ความเร่งคอนเวคทีฟ (Convective ฤcceleration)

ในกรณีที่การไหลเป็นแบบไม่คงตัว (Unsteady Flow) คุณสมบัติการไหลจะแปรเปลี่ยนไปตามตำแหน่งและเวลา จึงสามารถเขียนสมการที่ 2.12a ได้เป็น

$$U = u(x,y,z,t) \qquad (2.17a)$$

ในทำนองเดียวกัน สมการที่ 2.12b และ 2.12c สามารถเขียนได้เช่นเดียวกับสมการ 2.17a และเมื่อหาสมการของความเร่งจะได้

$$a_x = \left(u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{\partial u}{\partial t} \qquad (2.18a)$$

$$a_y = \left(u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{\partial v}{\partial t} \qquad (2.18b)$$

$$a_z = \left(u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{\partial w}{\partial t} \qquad (2.18c)$$

ในสมการที่ 2.18 ทั้งสาม จะมีเทอมที่แปรตามเวลาซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่คงตัวของการไหล ความเร่งที่แปรผันตามเวลานี้เรียกว่า ความเร่งโลคัล (Local Acceleration)

ในกรณีของการไหลแบบสม่ำเสมอ (Uniform Flow) ซึ่งมีเส้นการไหลที่ขนานกัน ไม่ข้ามเส้น ค่าของความเร่งคอนเวคทีฟจะเป็นศูนย์ นั่นคือ

$$\bar{a} = \frac{\partial \overline{V}}{\partial t} \tag{2.19}$$

จากสมการที่ 2.19 ทำให้เกิดแนวความคิดที่ว่า น่าจะสร้างสมการของความเร่งที่สามารถครอบคลุมการไหลทุกประเภทได้ เมื่อให้ s แทนตำแหน่งใดๆ บนเส้นการไหล ซึ่ง โดยทั่วไปความเร็วจะเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งและเวลานั่นคือ

$$\overline{V} = \overline{V}\,(s,t) \tag{2.20}$$

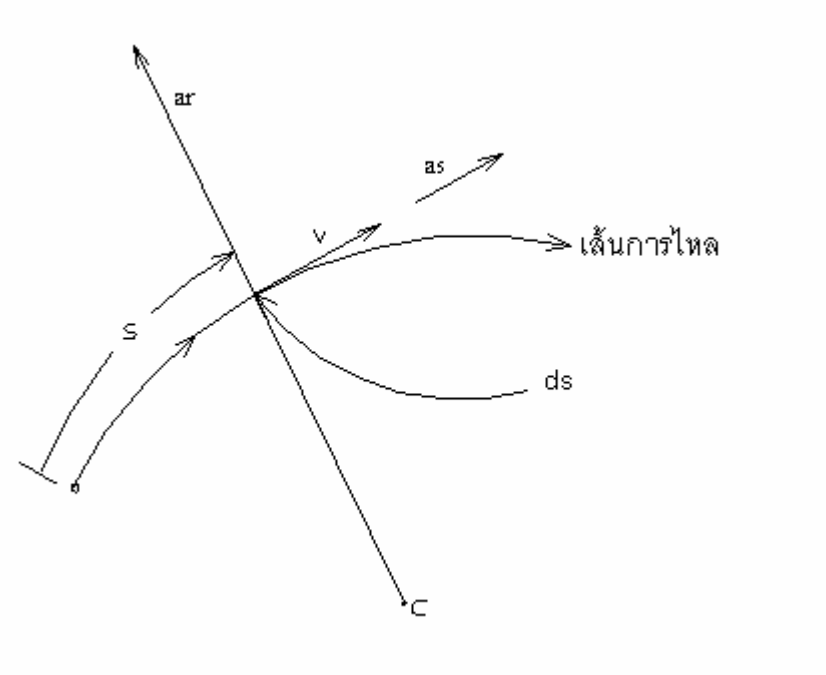
และ

$$\bar{a} = V\frac{\partial \overline{V}}{\partial s} + \frac{\partial \overline{V}}{\partial t} \tag{2.21}$$

สมการที่ 2.21 สามารถคอบคลุมความเร่งในการไหลทุกประเภท โดยที่การไหลแบบสม่ำเสมอค่าของเทอมแรกจะเป็นศูนย์ และถ้าการไหลเป็นแบบคงตัวจะได้ค่าของเทอมหลังเป็นศูนย์ เป็นต้น

ค่าของ $\bar{a}$ ในสมการที่ 2.21 คือความเร่งของอนุภาคของไหลตามเส้นการไหล ถ้าหากการเคลื่อนที่เป็นแนววิถีโค้งตามรูปที่ 2.8 ความเร่ง $\bar{a}$ เรียกว่าความเร่งในแนวสัมผัส (Tangential Acceleration, a_s) นอกจากนี้ยังมีความเร่งในแนวตั้งฉากกับแนวสัมผัสซึ่งก่อให้เกิดความเร่งในแนววิถีโค้ง ซึ่งเรียกว่าความเร่งในแนวตั้งฉากหรือแนวรัศมี (Normal Acceleration, a_r) หาค่าได้โดย

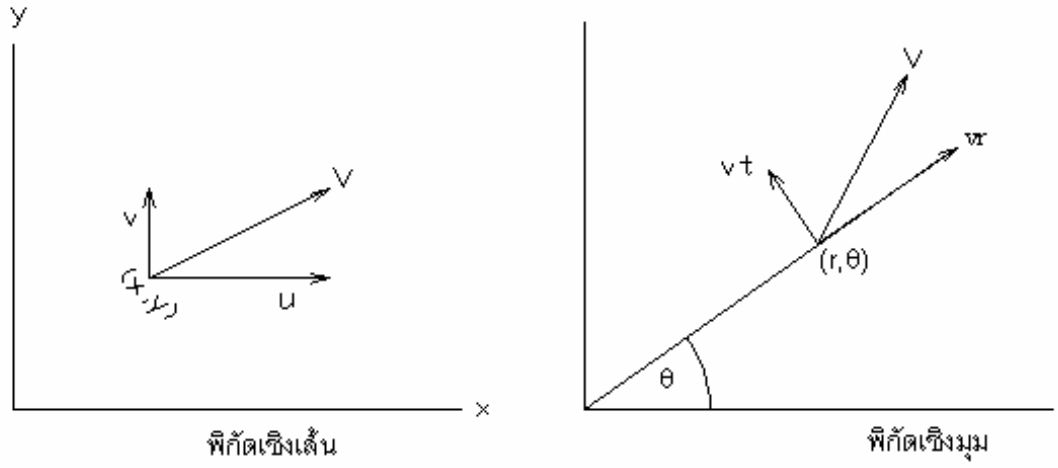
$$a_r = \frac{v^2}{r} \tag{2.22}$$



รูปที่ 2.8 ความเร็วและความเร่งของอนุภาคตามเส้นการไหล [1]

ในที่นี้ r คือรัศมีส่วนโค้งของเส้นการไหลที่ตำแหน่งระยะทาง s และเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เป็นวิถีโค้งจะต้องมีความเร่งในแนวต้องฉากเสมอ แม้ว่าความเร่งในแนวสัมผัสจะเป็นศูนย์ก็ตาม

ในกรณีของการไหลแบบคงตัวที่อนุภาคเคลื่อนที่เป็นวงกลม จะมีทั้งความเร็วในแนวสัมผัสและในแนวตั้งฉากหรือแนวรัศมี ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งความเร็วดังกล่าวจะเป็นฟังชันก์ชั่นของรัศมี r และตำแหน่งเชิงมุม θ นั่นคือ



รูปที่ 2.9 การเคลื่อนที่เชิงมุมของอนุภาค [1]

$$V_r = \frac{dr}{dt} \text{ และ } V_t = r\frac{d\theta}{dt} \quad (2.23)$$

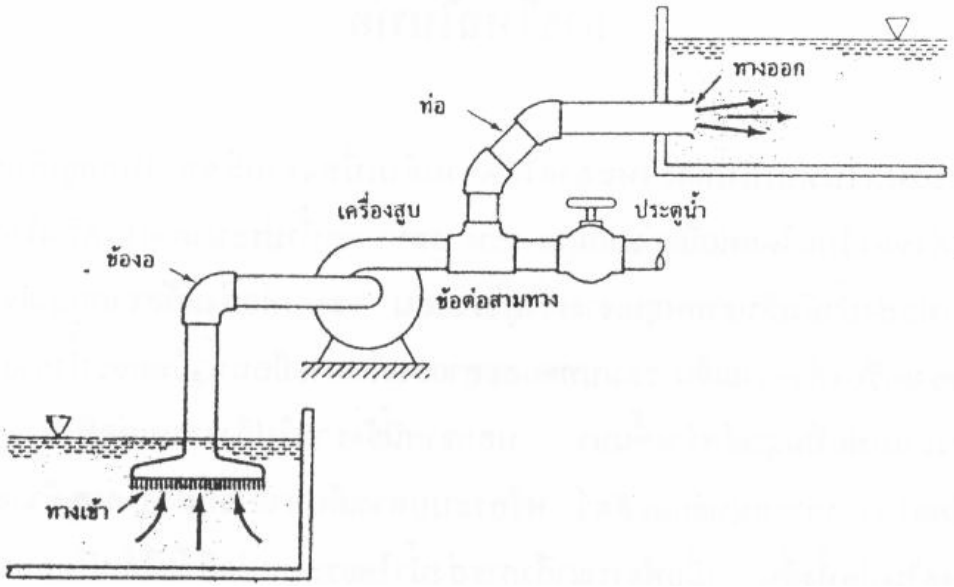
ความเร่งของอนุภาคในพิกัดเชิงมุม คือ

$$a_r = v_r\frac{\partial v_r}{\partial r} + v_t\frac{v_r}{r\partial\theta} - \frac{v_r^2}{r} \quad (2.24)$$

$$a_t = v_r\frac{\partial v_r}{\partial r} + v_t\frac{vt}{r\partial\theta} - \frac{v_r v_t}{r} \quad (2.25)$$

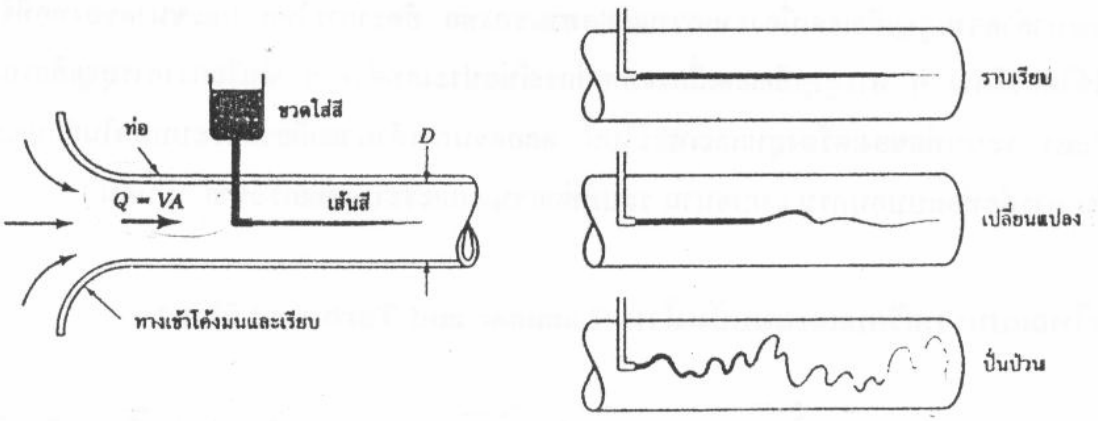
2.3 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน (Laminar and Turbulent Flow)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า สภาพการไหลที่อนุภาคของไหลเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบมีลักษณะเหมือนชั้นบางๆวางซ้อนกันนั้นเรียกว่า การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ในทางตรงกันข้าม ถ้าหากอนุภาคของไหลเคลื่อนที่ไม่เป็นระเบียบจะเรียกว่า การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ซึ่งได้มาจากการทดลองของนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษชื่อ Osborne Reynolds โดยใช้อุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ก) เมื่อน้ำไหลผ่านท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง D ด้วยความเร็วเฉลี่ย v โดยมีการควบคุมอัตราการไหลที่ปลายท่อ และมีท่อเล็กๆเป็นตัวปล่อยสีเข้าไปในน้ำเพื่อสังเกตสภาพการไหลของน้ำในท่อจากเส้นใยการไหล (Streak Line) จากการทดลองพบว่า เมื่อมีอัตราการไหลน้อยๆ เส้นสีจะเรียบเป็นเส้นตรงนิ่ง เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่งเส้นสีจะเริ่มแกว่งทางด้านซ้าย และเมื่อมีอัตราการไหลเพิ่มขึ้นอีกสันสีก็จะแกว่งมากขึ้นโดยตำแหน่งของเส้นสีที่



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างองค์ประกอบต่างๆ ในระบบท่อ [1]

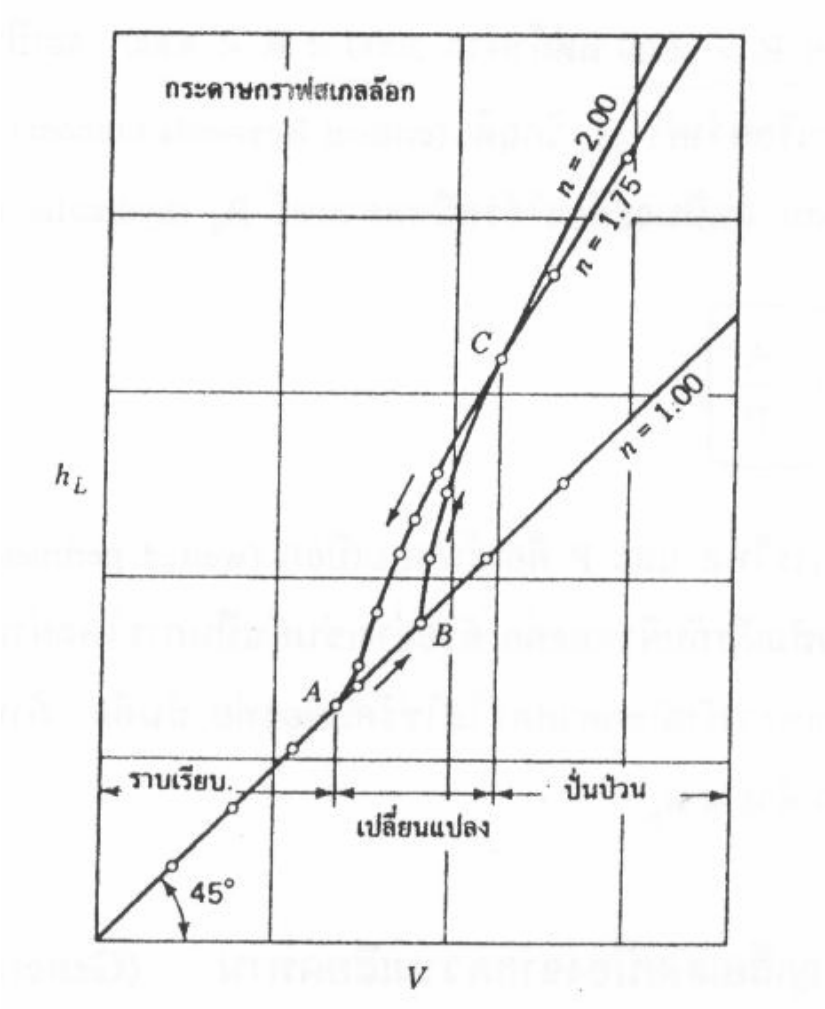
แกว่งจะเลื่อนเข้ามาใกล้ปลายท่อปล่อยเส้นสีมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2..2 (ข) ลักษณะดังกล่าวทั้ง 3 กรณี จะเรียกว่า สภาพการไหลแบบราบเรียบ การไหลแบบเปลี่ยนแปลง (transition flow) และการไหลแบบปั่นป่วน ตามลำดับ



(ก) (ข)

รูปที่ 2.11 การทดลองของ Reynolds และลักษณะของเส้นใยการไหลแบบต่าง ๆ [1]

ถ้าหากมีการวัดการสูญเสียเฮดของท่อน้ำช่วงใดช่วงหนึ่ง ที่ความเร็วต่างๆ กันจะพบว่าในช่วงที่ความเร็วต่ำๆ ที่จะทำให้เกิดการไหลแบบราบเรียบนั้น การสูญเสียเฮดเนื่องจากการเสียดทานของท่อ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วในการไหล ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เมื่อความเร็วของการไหลสูงขึ้นถึงตำแหน่งจุด B ซึ่งการไหลเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วนนั้นจะมีอัตราการสูญเสียเฮดมากขึ้น มานำความเร็วของการไหลมาพล็อตกราฟสัมพันธ์กับการสูญเสียเฮดบนกระดาษกราฟสเกลล็อก (Log-Log Graph) จะพบว่า หลังจากผ่านช่วงการไหลแบบเปลี่ยนแปลงไปแล้วเส้นกราฟจะมีความลาดชันอยู่ระหว่าง 1.75 ถึง 2.00 ส่วนในช่วงการไหลแบบราบเรียบมีความลาดชันเท่ากับ 1.00



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการไหลในท่อกับการสูญเสียเฮด [1]

จากความลาดชันของเส้นกราฟ แสดงว่าการสูญเสียเฮดเนื่องจากการเสียดทานในการไหลแบบราบเรียบจะแปรผันตาม v ส่วนในการไหลแบบปั่นป่วน จะแปรผันตาม v^n โดยที่ n มีค่าอยู่ระหว่าง 1.75 ถึง 2.00 ทั้งนี้ ค่า n = 1.75 นั้นจะเกิดในท่อที่ผนังเรียบมาก และเมื่อผนังของท่อมีความขรุขระมากขึ้นก็จะมีค่า n มากขึ้นด้วย

พิกัดของเส้นกราฟต่างๆ ในรูปที่ 2.11 นั้น ได้มาจากการทดลองโดยใช้เครื่องมือ Osborne Reynolds ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่า ในช่วงการไหลแบบเปลี่ยนแปลงนั้นเส้นกราฟจะมีค่าความลาดชันมากกว่า 2.00 เมื่อพิจารณาที่จุด C ถ้าหากลดความเร็วของการไหลลงมาจากจุด C แล้ว จะได้เส้นกราฟที่ไม่ทับกับเส้น BC แต่จะเกิดเป็นเส้น CA ซึ่งจุด B นี้เรียกว่า จุดวิกฤติบน (Higher Critical Point) และจุด A เรียกว่าจุดวิกฤติล่าง (Lower Critical Point)

อย่างไรก็ตาม ความเร็วมิได้เป็นองค์ประกอบเดียวที่จะชี้วัดว่าการไหลเป็นแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วน สิ่งที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้คือ Reynolds Number โดยที่จะใช้เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ (D) แทนมิติเชิงเส้นของวัตถุ (L) นั่นคือ

$$R = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu}$$

ทั้งนี้เนื่องจาก R เป็นเทอมไร้มิติ ดังนั้น ตัวแปรต่างๆ ในสมการที่ (6.1) จะต้องมีหน่วยที่อยู่ในระบบเดียวกัน คือ ระบบอังกฤษ หรือระบบ SI โดยที่การไหลจะเป็นแบบราบเรียบก็ต่อเมื่อค่า R < 2000 และจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วนเมื่อ R > 4000 แต่ถ้าหาก 2000 < R < 4000 จะเป็นการไหลแบบเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเมื่อ R = 2000 จะเรียกว่าค่า R วิกฤติ (Critical Reynolds Number)

ในกรณีที่ท่อไม่กลม จำเป็นจะต้องใช้รัศมีชลศาสตร์ R_h (Hydraulic Radius) ในการหาค่า Reynolds Number

$$R_h = \frac{A}{P}$$

ในที่นี้ A คือพื้นที่หน้าตัดของการไหล และ P คือ เส้นขอบเปียก (Watted Perimeter) ซึ่งเป็นความยาวของเส้นขอบหน้าตัดที่ของเหลวสัมผัสกับผิวของท่อ ตัวอย่างเช่น ถ้าเป็นการไหลผ่านท่อกลม จะได้ $R_h = \pi r^2/2\pi r = r/2$ หรือ D/4 แสดงว่ารัศมีชลศาสตร์ ไม่ใช่รัศมีของท่อ นั่นคือ ถ้าหากเป็นท่อไม่กลมจะคำนวณค่า R โดยการแทนค่า D ด้วย $4 R_h$

2.4 ความต้านทานในท่อ

2.4.1 ในท่อตรง

ในขณะที่อากาศไหลในท่อตรง ความดัน ที่สูญเสียส่วนใหญ่มาจากความเสียดทานซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการของ

$$h_L = f_D\left(\frac{L}{D}\right)\left(\frac{v^2}{2g}\right) \qquad (2.26)$$

แต่ $$h_L = \frac{\Delta p}{\gamma}$$

ดังนั้น $$\Delta p = f_D\left(\frac{L}{D}\right)\left(\frac{v^2}{2g}\right)\gamma \qquad (2.27)$$

เมื่อ Δp คือ ความดันรวมที่สูญเสีย , Pa

h_L คือ ความเสียดทานของการไหลในท่อ ซึ่งระบุค่าการสูญเสียเฮดในรูปของเฮดความเร็ว (velocity head ; $\frac{v^2}{2g}$)

v คือ ความเร็ว , m/s

f_D คือ แฟคเตอร์ความเสียดทาน, ไร้หน่วย

L คือ ความยาวท่อ , m

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ , m

γ คือ Specific weight N/m^3

หากว่าการไหลเป็นแบบราบเรียบ(ตัวเลขเรย์โนลดส์, Re มีค่าน้อยกว่า 2000) จะสามารถคำนวณค่าแฟคเตอร์ความเสียดทานได้จาก

$$f_D = \frac{64}{\mathrm{Re}_D} \qquad (2.28)$$

ในกรณีของการไหลแบบปั่นป่วนสามารถคำนวณหาแฟคเตอร์ความเสียดทานได้จาก

$$\frac{1}{f_D^{0.5}} = -2\log\left[\left(\frac{\varepsilon}{3.7D}\right)+\left(\frac{2.51}{\mathrm{Re}\, f_D^{0.5}}\right)\right] \qquad (2.29)$$

เมื่อ ε คือ แฟกเตอร์ความขรุขระของผิวท่อ , mm

เนื่องจากความไม่สะดวกในการใช้สมการทำให้มีการพัฒนาแผนภูมิ เพื่อใช้หาค่าความดันที่สูญเสียในท่อ สำหรับความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 20 $^{\circ}c$ ความหนาแน่นอากาศ 1.204 kg/m^3 แฟกเตอร์ความขรุขระของผิวท่อ 0.15 mm

ค่าอุณหภูมิแตกต่าง 20 $^{\circ}c$ สามารถแก้ความคลาดเคลื่อนได้โดยคูณค่า K กับค่าความดันที่สูญเสียที่หาได้ซึ่งค่า K หาได้จากสมการ

$$K = \left[\frac{294.4}{(273.2+T)}\right]\left[\frac{\nu}{1.514\times10^{-5}}\right]^{0.1} \qquad (2.30)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิอากาศ , $^{\circ}c$

ν คือ ความหนืดคิเนมาติก , m^2/s

2.4.2. การสูญเสียรอง

1. การสูญเสียเนื่องจากการลดพื้นที่หน้าตัดของท่อ

การสูญเสียรองที่เกิดจากาการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อมีอยู่ 2 กรณี คือ การลดขนาดโดยฉับพลัน กับการค่อยๆลดขนาดในลักษณะของทรงกรวยเมื่อพิจารณาการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดโดยฉับพลันจะพบว่าความดันตรงช่วงที่ลดขนาดนั้น ลดลงอย่างมากเนื่องมาจากความเร็วเพิ่มขึ้นและเกิดการสูญเสียเฮดเนื่องจากความปั่นป่วนของการไหล ในลักษณะเช่นนี้สามารถเขียนสมการของการ

สูญเสียเฮดเนื่องจากการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อโดยฉับพลันได้โดย

$$h_c' = k_c\frac{v^2}{2g} \qquad (2.31)$$

แต่ $$h_c = \frac{\Delta p}{\gamma}$$

ดังนั้น $$\Delta p = k_c \frac{v^2}{2g}\gamma \qquad (2.32)$$

โดยที่ k_c คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียเฮดเนื่องจากการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อโดยฉับพลัน ซึ่งขึ้นอยู่กับสัดส่วนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อเล็ก (D_2) ต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อใหญ่ (D_1) ดังแสดงในตารางที่ 1

ในกรณีที่พื้นที่หน้าตัดของท่อค่อยๆลดลงในลักษณะทรงกรวยนั้น สามารถลดการสูญเสียเฮดลงไปจากกรณีข้างต้นได้อย่างมาก ซึ่งการค่อยๆลดลงของพื้นที่หน้าตัดนี้อาจลดลงในลักษณะโค้งมนเป็นปากแตร หรือจะลดลงในลักษณะทรงกรวยก็ได้ ในกรณีที่ลดลงโดยผนังท่อโค้งมนเป็นปากแตรนี้จะมีค่าสัมประสิทธิ์ $k_c = 0.05$ ส่วนกรณีที่ลดลงโดยมีช่วงต่อทรงกรวยตรงซึ่ง มีมุมยอด 20° - 40° จะมีค่า k_c ประมาณ 0.10 แต่ถ้ามุมยอดของทรงกรวยเล็กกว่าหรือใหญ่กว่าพิสัยดังกล่าวแล้ว จะทำให้ค่า k_c สูงขึ้นทั้งสองกรณี

2.การสูญเสียเนื่องจากการขยายพื้นที่หน้าตัดของท่อ(Loss due to Expansion)

การสูญเสียรองที่เกิดจากการขยายขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อมีอยู่ 2 กรณี คือ การขยายขนาดโดยฉับพลัน กับการค่อยๆขยายขนาดในลักษณะของทรงกรวยความดันในท่อที่ขยายขึ้นนั้นจะมากกว่าเดิมเพราะความเร็วลดลงและจะมีการสูญเสียเนื่องจากาการไหลเป็นแบบปั่นป่วน เมื่อเปรียบเทียบการสูญเสียเฮดพบว่า การสูญเสียเนื่องจากการขยายพื้นที่หน้าตัดโดยฉับพลันมีค่ามากกว่ากรณีของการลดพื้นที่หน้าตัดโดยฉับพลัน

สมการการสูญเสียเฮดเนื่องจากการขยายขนาดพื้นที่หน้าตัดโดยฉับพลันอยู่ในรูปของ

$$h'_x = (v_1 - v_2)^2/2g \qquad (2.33)$$

และ $$h_x' = \frac{\Delta p}{\gamma}$$

ดังนั้น $$\Delta p = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}\gamma \qquad (2.34)$$

โดยที่ v_1 คือความเร็วของของไหลที่ท่อเล็ก

v_2 คือความเร็วของของไหลที่ท่อใหญ่

h'_x คือเฮดความสูญเสียระหว่างความแตกต่างของความดัน

ในกรณีที่พื้นที่หน้าตัดของท่อค่อยๆขยายขึ้นในลักษณะทรงกรวย กรณีนี้สามารถลดการสูญเสียที่เกิดจากการลดลงของความเร็วได้การสูญเสียเฮดจะขึ้นอยู่กับขนาดมุมยอดของทรงกรวยและสัดส่วนของพื้นที่หน้าตัดของท่อทั้งสอง แต่ถ้าหากกำหนดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ D_1 และD_2 แล้วเมื่อมุมยอดของทรงกรวยเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ความยาวของช่วงต่อลดลงและหากพิจารณาสมการการสูญเสียเฮดเนื่องจากความเสียดทานของท่อ ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูปของ

$$h_L = \int \frac{fv^2}{D2g} dL \qquad (2.34)$$

จากสมการข้างต้น เมื่อความยาวของช่วงต่อลดลงก็จะทำให้การสูญเสียเฮดลดลงดังแสดงด้วยเส้นกราฟ F ดังรูป ผ-2 และเมื่อของเหลวไหลผ่านช่วงต่อทรงกรวยจะเกิดการไหลแบบปั่นป่วนทำให้เกิดการสูญเสียเฮดเพิ่มขึ้นตามขนาดมุมยอดของทรงกรวย ดังแสดงได้ด้วยเส้นกราฟ T ในรูปที่ 1 ดังนั้นเมื่อรวมการสูญเสียทั้งสองกรณีเข้าด้วยกันก็จะได้เส้นกราฟ k' ทั้งนี้จะมีจุดต่ำสุดของเส้นกราฟอยู่ที่มุมประมาณ 6° สำหรับท่อที่มีผนังเรียบมาก เมื่อผิวของท่อขรุขระมากขึ้นจะมีความเสียดทานมากขึ้นทำให้ค่าของ k' สูงขึ้นด้วย ดังแสดงด้วยเส้นประข้างบนในรูปที่ 1 โดยมีค่าต่ำสุดที่มุมยอดประมาณ 8° สมการการสูญเสียเฮดในกรณีนี้คือ

$$h' = k' \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} \qquad (2.35)$$

และ $$h' = \frac{\Delta p}{\gamma}$$

ดังนั้น $$\Delta p = k' \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} \gamma \qquad (2.36)$$

โดยที่ k' คือสัมประสิทธิ์ซึ่งขึ้นอยู่กับมุมยอดของทรงกรวย ดังแสดงในรูป ผ-2

3. การสูญเสียตรงปากทางเข้า

เมื่อของเหลวไหลจากถังเก็บกักเข้าสู่ท่อ ตรงปากทางเข้าของท่อนั้นจะเกิดการหดตัวของลำการไหล ซึ่งการหดตัวที่เกิดขึ้นที่ปากทางเข้านี้เป็นตำแหน่งที่มีความเร็วสูงสุดแต่มีความดัต่ำที่สุดจึงทำให้เกิดการสูญเสียเฮด ซึ่งคำนวณเฮดการสูญเสียเนื่องจากความปั่นป่วนตรงปากทางเข้าท่อ คือ

$$h'_e = k_e \frac{v^2}{2g} \qquad (2.37)$$

แต่ $$h'_e = \frac{\Delta p}{\gamma}$$

ดังนั้น $$\Delta p = k_e \frac{v^2}{2g}\gamma \qquad (2.38)$$

เมื่อ h'_e คือ การสูญเสียเนื่องจากความปั่นป่วนตรงปากทางเข้าท่อ

k_e คือ สัมประสิทธิ์ของการสูญเสียเฮดตรงปากทางเข้าท่อซึ่งหาได้จากรูป ผ-3

4. การสูญเสียที่ปลายท่อ

เมื่อของเหลวไหลออกจากท่อด้วยความเร็ว v เข้าสู่ถังเก็บกักขนาดใหญ่พลังงานจลน์ของลำการไหลจากท่อจะสลายไปทั้งหมดเมื่อไหลเข้าสู่ถัง ดังนั้นการสูญเสียเฮดตรงทางออกที่ปลายท่อคือ

$$h'_d = \frac{v^2}{2g} \qquad (2..39)$$

แต่ $$h'_d = \frac{\Delta p}{\gamma}$$

ดังนั้น $$\Delta p = \frac{v^2}{2g}\gamma \qquad (2.40)$$

หากต้องการลดการสูญเสียจำเป็นต้องลดความเร็วโดยการให้ปลายของท่อยื่นเข้าไปในผนังของถัง

5. การสูญเสียเนื่องจากอุปกรณ์ท่อ

อุปกรณ์ท่อหมายถึงส่วนต่างๆที่จำเป็นต้องใช้ในการติดตั้งระบบท่อ เช่น ข้อต่อต่างๆ ข้องอ วาล์ว และประตูน้ำ เป็นต้น อุปกรณ์ท่อเหล่านี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของการไหลดังนั้นการสูญเสียเฮดเนื่องจากอุปกรณ์ท่อจึงสามารถระบุได้ในรูปของ

$$h_L = k\frac{v^2}{2g} \qquad (2.41)$$

แต่ $$h_L = \frac{\Delta p}{\gamma}$$

ดังนั้น $$\Delta p = k\frac{v^2}{2g}\gamma \qquad (2.42)$$

โดยที่ v คือ ความเร็วในท่อซึ่งมีขนาดเท่ากับอุปกรณ์นั้นๆ

k คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียเฮดของอุปกรณ์ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2

2.5 แรงต้าน (Drag Force, F_D)

คือ แรงที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของวัตถุ ผ่านในตัวกลางที่เป็นของเหลว (รวมถึงอากาศ) มีทิศในทางตรงกันข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ แรงต้านนี้เกิดเนื่องจากความแตกต่างของความเร็วที่ผิวสัมผัสของของแข็ง ในระหว่างที่มันเคลื่อนตัวผ่านไปในของเหลว ดังนั้นทุกๆส่วนของวัตถุจึงมีผลในการก่อให้เกิดแรงด้านนี้ ดังนั้นในการออกแบบจรวด หรืออากาศยานใดๆ จำเป็นต้องพิจารณาถึงรูปร่างของวัตถุนั้นด้วย ขนาดของแรงเสียดทานที่กระทำต่ออนุภาคแปรผันตรงกับความเร็ว ($v^2/2$) ของของไหลซึ่งถูกแทนที่ด้วยอนุภาคที่เคลื่อนที่ ความเร็วของของไหลนี้จะ ต้องคูณด้วยความหนาแน่นของของไหล (ρ_f) และ Projected Area (A) ของอนุภาคที่สัมผัสกับของไหล

$$F_D = \frac{C_D \rho v^2 A}{2} \qquad (2.42)$$

โดยที่ คือ สัมประสิทธิ์ต้าน C_D

2.6 สัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag coefficient,C_D)

ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน(C_D) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงลักษณะ ของการไหลของอากาศและปริมาณ ของแรงต้านอากาศซึ่งเกิดจากการไหลเวียนของของเหลว ซึ่งนำไปใช้ในสมการแรงต้านอากาศและมีสมการเป็น

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \quad (2.43)$$

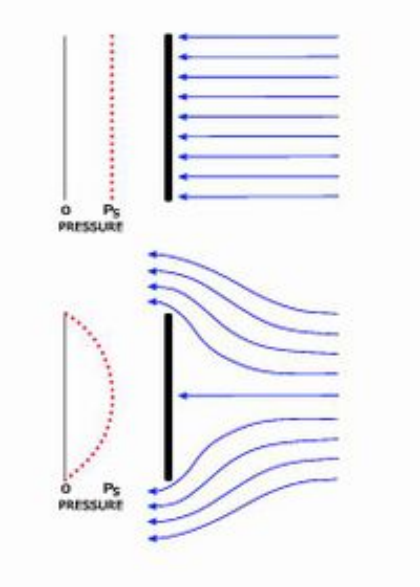
โดยที่ ค่า C_D สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$C_D = f(\mathrm{Re})$$

และ $$C_D = f(\mathrm{Re}, Fr, M)$$

เมื่อ Re คือ Reynolds Number
Fr คือ Froude Number
M คือ Mach Number

วัตถุสองชิ้น มีพื้นที่ด้านหน้าเท่ากัน แต่มีความเรียบต่างกันเมื่อเคลื่อนโดยมีความเร็วเดียวกันผ่านของเหลวชนิดเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับวัตถุที่มีผิวขรุขระสามารถใช้ค่า C_D เท่ากับหรือมาก 1 , ส่วนที่ผิววัตถุราบเรียบใช้ค่า C_D น้อยกว่า 1 [6]



รูปที่ 2.13 ภาพการไหลผ่านแผ่นระนาบ

กรณีที่ ค่า C_D เท่ากับหนึ่งอาจจะเกิดขึ้นในกรณีที่ของเหลวทั้งหมดที่เข้าใกล้ผิวของวัตถุทดสอบที่นำมาวางขวางทางการไหลของอากาศ การเพิ่มความดันแบบคงที่และสม่ำเสมอไว้ทางด้านหน้าของวัสดุทดสอบ

รูปแสดงลักษณะของของเหลวที่เคลื่อนที่เข้ามาทางด้านขวาของวัสดุทดสอบและหยุดที่ระนาบของผิววัสดุทดสอบกราฟด้านซ้ายแสดงของความดันที่เท่ากันของด้านหน้าและด้านหลังของวัสดุทดสอบตามความเป็นจริงที่แผ่นระนาบเรียบจะเกิดการหมุนของของไหลโอบล้อมแผ่นระนาบและความดันที่คงที่จะพบเฉพาะบริเวณตรงกลางของแผ่นระนาบเมื่อของเหลวเคลื่อนที่ผ่านแผ่นระนาบความดันจะค่อยๆลดลงที่ตำแหน่งห่างออกไปจากจุดศูนย์กลางของแผ่นระนาบดังรูปและกราฟด้านล่าง

ค่า C_D ของแผ่นระนาบเรียบ จะมีค่าน้อยกว่า 1,ยกเว้นความดันดันที่บริเวณผิวด้านหลังของวัสดุทดสอบจะมีค่าเป็นลบโดยทั่วไป ค่า C_D ของของแผ่นระนาบเรียบรูปสี่เหลี่ยมจะให้เท่ากับ 1.17 ดังนั้นลักษณะของการไหล และ ค่า ของรูปทรงต่างๆจะเปลี่ยนตามค่า Reynolds Number และ ความหยาบของพื้นผิววัสดุทดสอบ

2.7 พัดลม (Fans)

พัดลมคือเครื่องสูบซึ่งใช้อากาศเป็นของไหลทำงาน โดยจะทำการขับเคลื่อนอากาศหรือแก๊สต่างๆให้เคลื่อนที่ด้วยค่าความกดดันต่ำๆ พัดลมแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ

พัดลมกรงกระรอก (Centrifugal Fan) ซึ่งดูดลมเข้าทางด้านข้าง จากนั้นส่งลมผ่านใบพัดออกด้านหน้า พัดลมกรงกระรอกยังสามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ตามลักษณะของใบพัดอีก คือ Forward-curved, Backward-curved และ Radial หรือ Straight พัดลมกรงกระรอก

พัดลมแบบใบพัด (Axial Fan) ซึ่งดูดลมเข้าทางด้านหลังใบพัด จากนั้นส่งผ่านใบพัดออกไปตามแนวแกนใบพัด พัดลมแบบใบพัดนี้ยังสามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ คือ แบบ Propeller, Tube axial และ Vane axial

สำหรับการนำไปใช้งานนั้น ถ้าเป็นการส่งลมที่มีระบบท่อลมก็ใช้พัดลมกรงกระรอกหรืออาจจะใช้แบบ Tube axial และ Vane axial ก็ได้ ถ้าเป็นการส่งลมที่ไม่มีระบบท่อลมและความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของลมมีน้อย ก็ให้ใช้แบบใบพัดธรรมดา เป็นที่น่าสังเกตว่าในเครื่องส่งลมเย็นแบบ self-contained จะใช้พัดลมกรงกระรอกโดยไม่จำเป็นต้องมีระบบท่อลม พัดลมกรงกระรอกนิยมใช้กันมาก เนื่องจากส่งลมได้เงียบและประสิทธิภาพในการส่งลมมีมาก การควบคุมปริมาณการส่งลมของพัดลมทำได้โดยปรับสายพานปรับสายพาน หรือระบบที่ขับเคลื่อนพัดลม สำหรับพัดลมแบบใบพัดเหมาะสำหรับใช้งานกับการส่งลมปริมาณลมมากๆ ซึ่งความสำคัญเรื่องเสียงเป็นอันดับรองลงมา

กำลังงานของพัดลม(W_s)

หาได้จากสมการ

$$w_s = \frac{\Delta p \times Q}{E_m E_f} \tag{2.44}$$

โดย E_m คือ ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า

E_f คือ ประสิทธิภาพของพัดลม

Q คือ อัตราการไหลของอากาศ(Av), m^3/s

จากทฤษฎีที่ได้กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด สามารถนำมาประกอบการวิเคราะห์การแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการพิจารณาความเข้าใจในลักษณะต่าง ๆของของไหล ที่มีผลและเกิดขึ้นใน

อุโมงค์ลมความเร็วต่ำได้ เป็นอย่างดี โดยหลักการดังกล่าวยังเป็นส่วนหนึ่งเท่านั้นที่จะใช้ในการวิเคราะห์ แต่ทว่ายังมี หลักการต่างๆ ที่สามารถนำมาประกอบการแก้ปัญหา ได้อีกมากมาย ซึ่งไม่สามารถนำมาเสนอได้หมดอย่างละเอียด เนื่องจากความละเอียดของการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับการพิจารณาของผู้ศึกษาเอง ดังนั้นจึงขอนำเอาเพียงหลักการที่เป็นพื้นฐานมานำเสนอเท่านั้น ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ที่เหลือสามารถค้นคว้าได้จากเรื่องกลศาสตร์ของไหลได้ [1]