

บทที่ 2  
หลักการและทฤษฎี

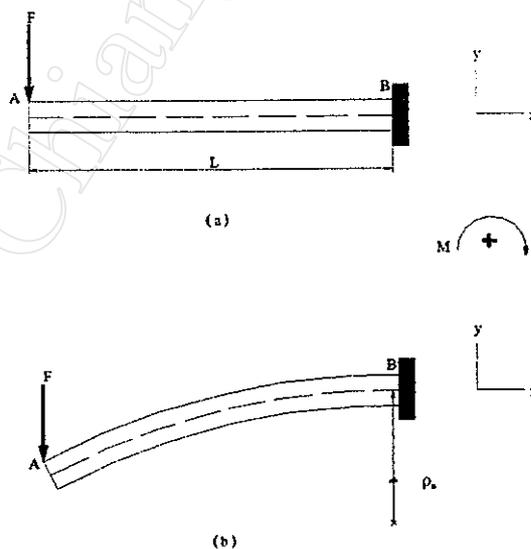
2.1 คานยื่น

จากที่ทราบกันมาแล้วว่าคานที่อยู่ภายใต้โมเมนต์คดเพียงอย่างเดียว ในช่วงยืดหยุ่นของคาน คานจะโค้งเป็นส่วนหนึ่งของเส้นรอบวงที่มีรัศมีเท่ากับ  $\rho_b$  [สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ 2541] กล่าวถึงความโค้งของผิวเป็นกลาง คือ

$$\frac{1}{\rho_b} = \frac{M}{EI} \quad (2.1)$$

เมื่อคานอยู่ภายใต้แรงกระทำตามขวางของคาน ซึ่งค่าของโมเมนต์คดและค่าความโค้งของคานจะแปรไปตามระยะ  $x$  โดยวัดจากปลายคานด้านใดด้านหนึ่ง [สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ 2541] ในที่นี้จะวัดด้านซ้าย

$$\frac{1}{\rho_b} = \frac{M(x)}{EI} \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.1 คานยื่นที่มีแรง  $F$  กระทำที่ปลายคานและการ โค้งลงของคานยื่น  
[สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ 2541]

พิจารณาว่าเป็นคานายึดปลายข้างเดียว AB ยาว  $L$  มีแรง  $F$  กระทำที่ปลายอิสระ ดังรูปที่ 2.1(a) จะได้

$$M(x) = -F \cdot x \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{\rho_b} = \frac{-F x}{EI} \quad (2.4)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความโค้งของผิวเป็นกลางจะแปรไปตามระยะ  $x$  เป็นเชิงเส้นตรงจากศูนย์ที่ A เมื่อ  $\rho_A = \infty$  ถึง  $\frac{-EI}{FL}$  ที่ B เมื่อ  $|\rho_b| = \frac{EI}{FL}$  ดังรูปที่ 2.1(b)

การโก่งลงของคานายึดรูปที่ 2.1(b) ซึ่งจะสัมพันธ์กับแรง  $F$  ที่กระทำ [Beer and Johnston, 1992] จะได้

$$F = \frac{-3EI}{L^3} y \quad (2.5)$$

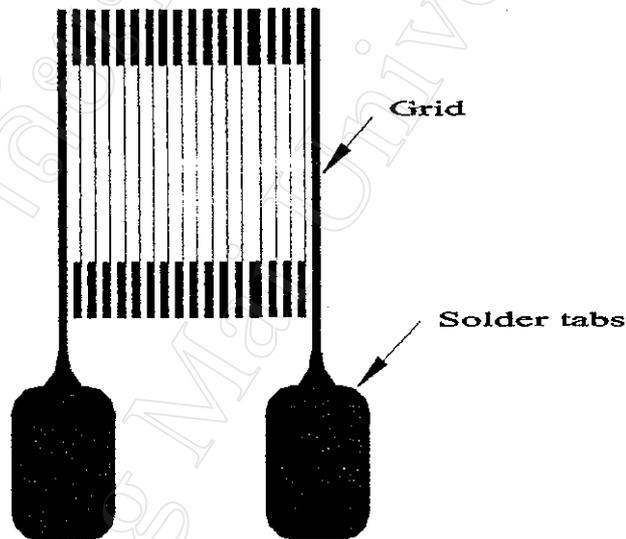
## 2.2 โครงสร้างของสเตรนเกจ

ทฤษฎีที่กล่าวว่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าของโลหะจะเกิดขึ้น เมื่อโลหะนั้นถูกกระทำภายใต้โหลด เป็นทฤษฎีที่นิยมใช้ในการวัดค่าความเครียด [ปิยะเทพ 2541] จนกระทั่งปลายคริสต์ทศวรรษ 1930 ได้มีการวัดความเครียดให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการใช้เส้นโลหะขนาดเล็กนำมาขดม้วนกันเป็นกลุ่ม Bond Metallic Wire Strain Gauge หรือ Piezoresistive Sensor

สเตรนเกจไม่เพียงจะสามารถนำมาใช้วัดค่าความเครียดสำหรับหาค่าความเค้นได้เพียงอย่างเดียว แต่ยังสามารถนำมาใช้เป็นทรานสดิวเซอร์ (Transducer) สำหรับวัดค่าต่าง ๆ ได้อีกหลายชนิด เช่น โหลดเซลล์ (Load Cell) สำหรับวัดแรง ทรานสดิวเซอร์สำหรับวัดแรงดัน และวัดแรงบิด เป็นต้น

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น จึงทำให้สเตรนเกจซึ่งเป็นเครื่องส่งสัญญาณ ชนิดหนึ่งสามารถพบเห็นได้ในโรงงานอุตสาหกรรมเกือบทุกแห่ง ดังนั้น การศึกษา โครงสร้าง คุณสมบัติ หลักการทำงาน การนำไปใช้งาน และรายละเอียดอื่นๆ ที่สำคัญของสเตรนเกจ จึงเป็นสิ่งสำคัญต่อการปฏิบัติงานในโรงงานอุตสาหกรรม

เส้นโลหะตัวนำเส้นเดียวไม่สามารถนำมาใช้เป็นสเตรนเกจได้ ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยของความต้านทานรวมของเกจและพื้นที่ที่รับแรง ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มความยาวของตัวนำและลดขนาดพื้นที่ของเกจเส้นโลหะตัวนำของสเตรนเกจ จึงได้ถูกผลิตให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กลง สามารถขดรวมกันเป็นกลุ่มได้ ขดลวดนี้จะมีชื่อเรียกว่ากริด (Grid) สำหรับขบวนการในการผลิตกริดที่นิยมใช้คือ Photo-etching Process เนื่องจากกระบวนการนี้สามารถผลิต กริดที่มีรูปร่างและขนาดหลากหลายความต้องการ จากเส้นโลหะที่มีขนาดเล็กๆ ได้ ส่วนหัวและส่วนปลายของขดลวดตัวนำจะถูกออกแบบให้มีขนาดใหญ่ เพื่อให้ง่ายต่อการเชื่อมต่อเข้ากับวงจรทางไฟฟ้า หรือเรียกว่า จุดต่อเชื่อม (Solder Tab)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของสเตรนเกจ [ปิยะเทพ 2541]

เนื่องจากกริดภายในสเตรนเกจมีคุณสมบัติเปราะบางและง่ายต่อการเสียหาย ดังนั้นในขบวนการผลิตจะมีการนำแผ่นพลาสติกบางๆ มาใช้เป็นพื้นรองหรือตัวนำพา (ทำให้สเตรนเกจคงรูป ป้องกันการเสียหายและยังช่วยให้กาวที่นำมาทำการติดตั้งมีความหนาที่เท่ากัน) โดยมีการทำเครื่องหมายที่กึ่งกลางของความยาวของเกจ ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการติดตั้งและยังทำหน้าที่เป็นฉนวนให้กับเกจและวัสดุที่นำไปติดตั้งได้อีกด้วย

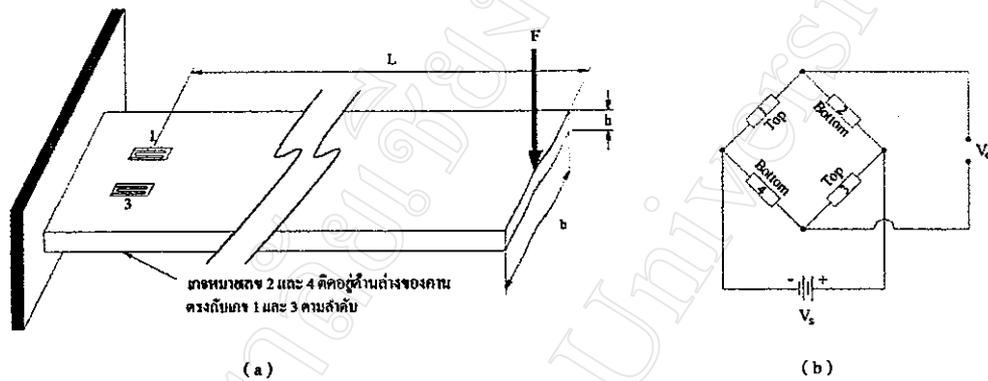
วัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวนำพา มีอยู่หลายชนิดขึ้นอยู่กับงานที่นำไปใช้ ได้แก่

- Polyamid Plastic ใช้กับงานทั่วไป
- Epoxy (อีพ็อกซี่) ใช้กับงานที่ต้องการความแม่นยำและความเป็นเชิงเส้นสูง
- Glass Reinforced Epoxy ใช้กับงานที่มีความเครียดสูง และอุณหภูมิสูง ประมาณ

400°C

ถ้าในงานที่มีอุณหภูมิสูงมากๆ ตัวนำพาสามารถเอาออกได้ในขณะติดตั้ง แล้วใช้ กาวเซรามิกทาเพื่อรักษาโครงร่างของกริด และขณะเดียวกันยังเป็นฉนวนของกริดกับวัสดุที่ใช้ ติดตั้งได้อีกด้วย

2.3 บีมีโทไพโหลดเซลล์ (Beam Type Load Cell)



รูปที่ 2.3 การติดตั้งสเตรนเกจบนคานยื่นและการต่อวงจรของสเตรนเกจ [Doebelin, 1990]

จากรูปที่ 2.3(a) เป็นรูปคานยื่นซึ่งมีสเตรนเกจสองอันติดอยู่ที่ผิวด้านบนของคานและอีก สองอันติดที่ผิวด้านล่างของคาน สเตรนเกจทั้งหมดติดอยู่ในแนวขนานกับแกนของคาน ซึ่งทำหน้าที่ เป็นชิ้นส่วนยึดหยุ่นและเป็นเครื่องส่งสัญญาณสำหรับการทดลองนี้ ซึ่งสเตรนเกจจะต่อกันเป็น วงจรวิสต์ ไคนบริดจ์ดังรูปที่ 2.3(b)

การที่เลือกใช้วิสต์ ไคนบริดจ์แบบนี้จะเป็นแอคทีฟเกจ (Active Gage) ทั้งสี่ตัว โดยที่ สเตรนเกจจะต่อเข้ากับแขนบริดจ์แขนละเกจ ดังนั้นอัตราส่วนความต้านทาน  $r = \frac{R_2}{R_1} = 1$  ขณะที่เกจติดตั้งอยู่บนคาน เมื่อคานยื่นเกิดการโก่งลงด้วยแรง  $F$  จะเกิดความเครียดดึง (Tensile Strain) บนแกงหนึ่งและแกงสามซึ่งติดอยู่ที่ผิวด้านบนของคาน และความเครียดอัด (Compressive Strain) บนแกงสองและแกงสี่ซึ่งติดอยู่ที่ผิวด้านล่างของคาน [Dally et al., 1993] จะได้

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{-\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = \frac{-\Delta R_4}{R_4} \tag{2.6}$$

จาก 
$$\Delta V_o = \frac{r}{(1+r)^2} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) V_s \tag{2.7}$$

จะได้

$$\Delta V_o = \frac{1}{4} V_s \left( 4 \frac{\Delta R_s}{R_s} \right) \quad (2.8)$$

$$\Delta V_o = V_s \frac{\Delta R_s}{R_s} \quad (2.9)$$

วิสโตนบรีดจ์ใช้ความต้านทานเปลี่ยนค่าได้ทั้งสี่ตัวทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากวิสโตนบรีดจ์มีค่าเพิ่มขึ้น [Dally et al., 1993] กล่าวว่าการไวของวิสโตนบรีดจ์ คือ

$$S_s = \frac{1}{2} \left( 4 S_s \sqrt{P_s R_s} \right) \quad (2.10)$$

$$S_s = 2 S_s \sqrt{P_s R_s} \quad (2.11)$$

ค่า  $P_s$  จะขึ้นอยู่กับ การนำความร้อน ความสามารถในการรับความร้อนของตัวอย่างที่จะนำเคจไปติด [Dally et al., 1993] จึงนิยามความหนาแน่นกำลัง  $P_D$  ขึ้นมาเพื่อใช้ในการพิจารณาดังนี้

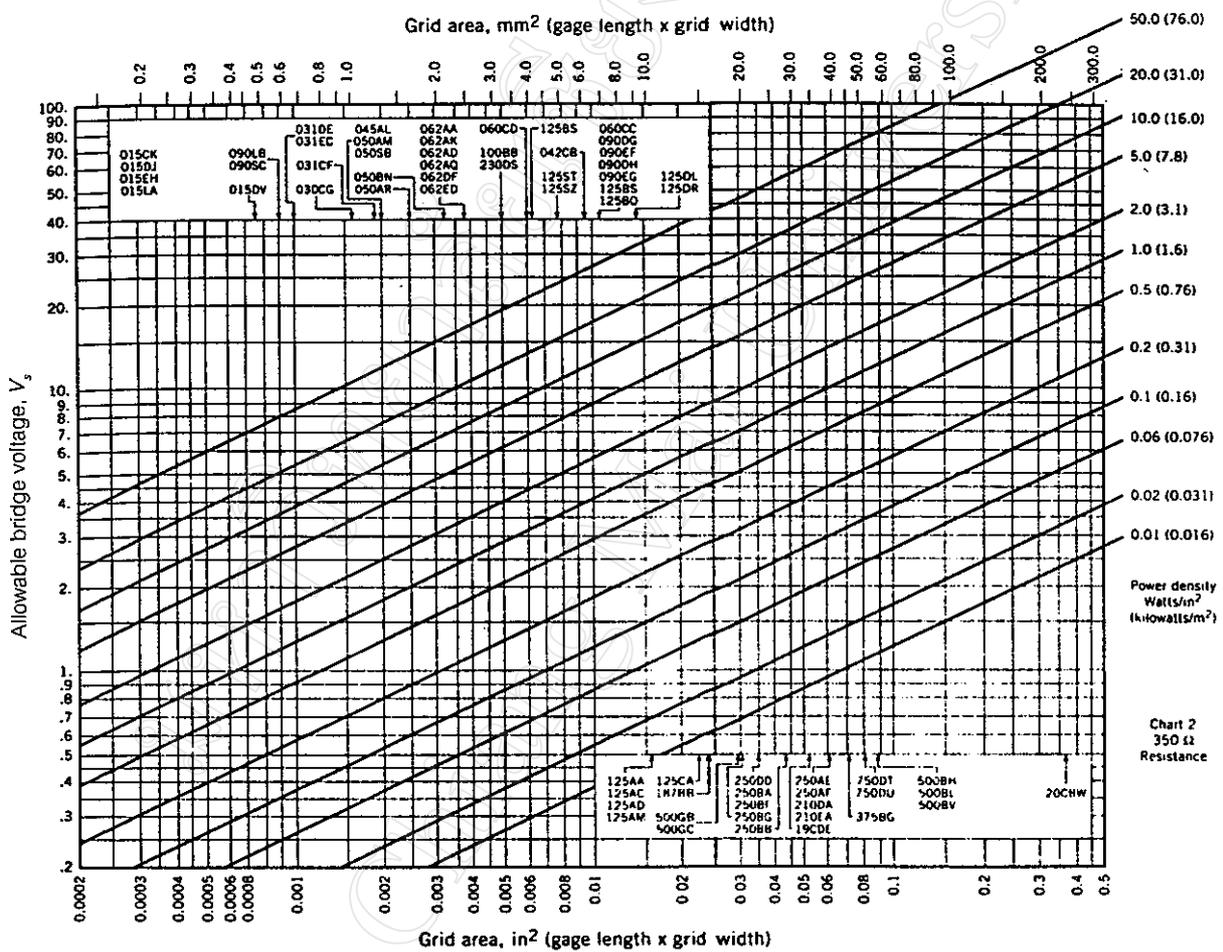
$$P_D = \frac{P_s}{A_s} \quad (2.12)$$

ตารางที่ 2.1 ความหนาแน่นกำลัง ( $P_D$ ) สำหรับวัสดุต่างๆ [Dally et al., 1993]

ความหนาแน่นกำลัง, $P_D$		Specimen condition
W/in <sup>2</sup>	W/mm <sup>2</sup>	
5 - 10	0.008 - 0.016	Heavy aluminum or copper section
2 - 5	0.003 - 0.008	Heavy steel section
1 - 2	0.0015 - 0.003	Thin steel section
0.2 - 0.5	0.0003 - 0.0008	Fiberglass, glass, ceramics
0.02 - 0.05	0.00003 - 0.00008	Unfilled plastics

จากรูปที่ 2.4 แรงดัน  $V_g$  ที่ป้อนให้กับวงจรวีดิโตนบรีดจ์จะเป็นฟังก์ชันของพื้นที่กริด สำหรับสเตรนเกจรูปแบบต่างๆ แต่สำหรับแขนของวงจรวีดิโตนบรีดจ์ทั้งสี่ที่มีความต้านทานของสเตรนเกจที่เท่ากันทั้งสี่แขนนั้นคือ จะมีค่า  $r = 1$  แรงดัน  $V_g$  อธิบายได้จาก [Dally et al., 1993]

$$V_g = 2 \sqrt{A_g P_D R_g} \tag{2.13}$$



รูปที่ 2.4 กราฟหาค่าแรงดันป้อนให้กับวงจรวีดิโตนบรีดจ์ สำหรับ  $R_g = 350 \Omega$  [Dally et al., 1993]

แต่ถ้าค่า  $r \neq 1$  แรงดันไฟ  $V_g$  ที่ป้อนให้กับวงจรวีดิโตนบรีดจ์ อธิบายได้โดย [Dally et al., 1993] คือ

$$V_g = (1+r) \sqrt{A_g P_D R_g} \tag{2.14}$$

ความหนาแน่นกำลังที่ถูกปล่อยออกมาโดยสเตรนเกจจะเปลี่ยนแปลงในขอบเขตที่กว้างมาก ขึ้นอยู่กับขนาดของสเตรนเกจและวัสดุหรือตัวอย่างที่นำสเตรนเกจไปติดตั้ง ความไวของระบบสามารถทำให้มีค่าสูงสุดได้โดยเลือกสเตรนเกจที่มีความต้านทานสูงๆ และมีพื้นที่กริดของสเตรนเกจ ( $A_g$ ) มากๆ

เมื่อภาระ  $F$  กระทำที่คานยื่นจะทำให้เกิดโมเมนต์  $M = Fx$  ที่ตำแหน่ง  $x$  ทำให้เกิดความเครียด ( $\mathcal{E}$ ) ขึ้นในคานยื่น [Dally et al., 1993] จะได้

$$\mathcal{E}_1 = -\mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_3 = -\mathcal{E}_4 = \frac{6M}{Ebh^2} = \frac{6Fx}{Ebh^2} \quad (2.15)$$

การตอบสนองของสเตรนเกจอธิบายได้จาก  $\frac{\Delta R}{R} = S_g \mathcal{E}$  และสมการที่ (2.15)

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{-\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = \frac{-\Delta R_4}{R_4} = \frac{6S_g Fx}{Ebh^2} \quad (2.16)$$

แรงดัน  $V_o$  ที่ออกจากวิสโคนบรีดจ์ซึ่งเป็นผลจากการกระทำของภาระ  $F$  และสมมุติว่าสเตรนเกจทั้งสี่ตัวมีคุณสมบัติทางกายภาพเหมือนกันทุกประการ (ความต้านทานของสเตรนเกจ พื้นที่กริดของสเตรนเกจ) อธิบายได้โดย [Dally et al., 1993]

$$V_o = \frac{6S_g Fx}{Ebh^2} V_r \quad (2.17)$$

ความไวของบีมไทป์โพลีเซลล์ของ [Dally et al., 1993] หาได้จาก

$$S = \frac{V_o}{F} = \frac{6S_g x}{Ebh^2} V_r \quad (2.18)$$

จากสมการ (2.18) แสดงว่าค่าความไวของบีมไทป์โพลีเซลล์จะขึ้นอยู่กับขนาดหน้าตัดของคานยื่น ( $b, h$ ) โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ ( $E$ ) ตำแหน่งที่ภาระกระทำ ( $x$ ) เกจเฟลคเตอร์ ( $S_g$ ) และแรงดันที่ป้อนวงจรบริดจ์ ( $V_r$ )

## 2.4 ลักษณะการไหลของของไหล

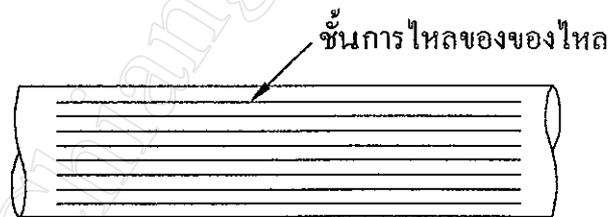
การแบ่งชนิดของการไหลของของไหล [ชัยสวัสดิ์ เทียนวิบูลย์ 2526] สามารถแบ่งได้หลายอย่าง ดังนี้

2.4.1 การไหลสม่ำเสมอ (Steady Flow) หมายถึง การไหลของของไหลชนิดที่ความเร็วในการไหล ณ จุดใดๆ ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เช่น เมื่อคำนึงถึงการไหลของไหลที่ผ่านจุด A ไม่ว่าจะเป็นเวลาใด ของไหลที่ผ่านจุด A นั้นจะมีความเร็วคงที่เสมอ และเมื่อพิจารณาที่จุด B ความเร็วของการไหลของของไหลผ่านจุด B ก็คงจะเท่าด้วย แต่ความเร็วที่จุด A และจุด B ไม่จำเป็นต้องเท่ากัน เนื่องจากเหตุผลดังกล่าวของไหลไม่สามารถจะขาดช่วงได้ เพราะจะทำให้ความเร็วของของไหล ณ จุดนั้นๆ เปลี่ยนแปลง

2.4.2 การไหลไม่สม่ำเสมอ (Unsteady Flow) หมายถึง การไหลของของไหลชนิดที่ความเร็วในการไหล ณ จุดใดๆ มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาหรือมีการขาดช่วงได้

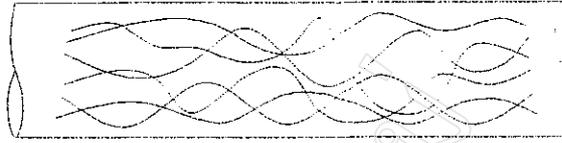
2.4.3 การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) หมายถึง การไหลของของไหลชนิดอนุภาคของของไหลไม่ว่าจะเห็นอนุภาคเล็กหรือใหญ่ เคลื่อนที่ในลักษณะตามกันไปเป็นแผ่นหรือชั้นเรียบๆ โดยที่ชั้นของของไหลแต่ละชั้นจะเคลื่อนที่อย่างมีระเบียบราบเรียบเหนือชั้นอื่นซึ่งกันและกัน ลักษณะการเกิดการไหลแบบราบเรียบคือ การไหลของน้ำใต้ดิน การไหลของเลือด และการดูดน้ำของต้นไม้ เป็นต้น ลักษณะการไหลแบบราบเรียบนี้ เป็นไปตามกฎของนิวตันที่เกี่ยวกับ

$$\text{ความหนืดของของไหล} \left( \tau = \mu \frac{dv}{dy} \right)$$



รูปที่ 2.5 การไหลแบบราบเรียบ [ชัยสวัสดิ์ เทียนวิบูลย์ 2526]

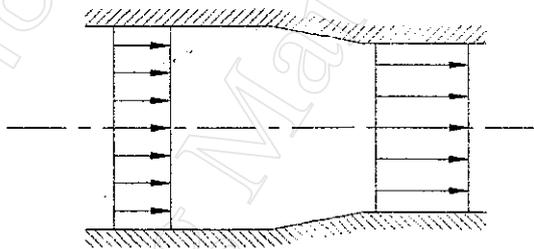
2.4.4 การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) หมายถึง การไหลของของไหลชนิดอนุภาคของของไหล เคลื่อนที่ในลักษณะหรือทิศทางไม่แน่นอน มีการเคลื่อนที่ขึ้นลงและมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมจากส่วนหนึ่งของของไหลไปยังอีกส่วนอื่นๆ ลักษณะการไหลของของไหลทั่วไปเกือบ 95% จะเป็นการไหลแบบนี้ ตัวอย่างเช่น การไหลของน้ำตามแม่น้ำลำคลอง การไหลของอากาศในท่อลม เป็นต้น



รูปที่ 2.6 การไหลแบบปั่นป่วน [ชัยสวัสดิ์ เทียนวิบูลย์ 2526]

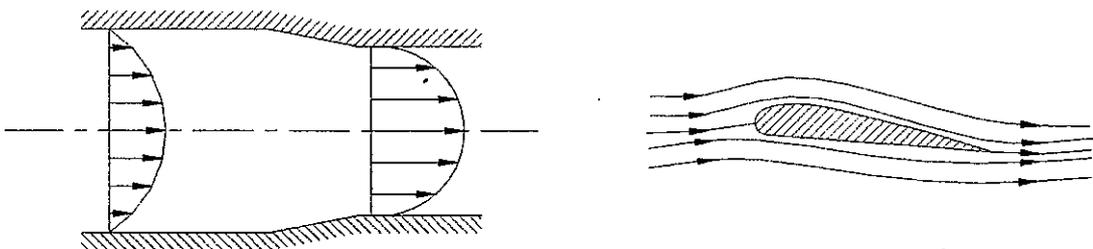
การไหลจะเป็นการไหลแบบราบเรียบหรือการไหลแบบปั่นป่วนจะขึ้นอยู่กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number)

2.4.5 การไหลแบบมิติเดียว (One Dimensional Flow) หมายถึง การไหลชนิดที่เส้นสัมผัสสของทิศทางของความเร็วที่จุดต่างๆ (Streamlines) เคลื่อนที่ไปทางเดียวซึ่งในการไหลชนิดนี้ การเปลี่ยนแปลงของความดัน ความเร็ว ฯลฯ จะไม่เกิดการขึ้นในทิศทางอื่น นอกจากเกิดขึ้นใน Streamline เท่านั้น การไหลแบบมิติเดียวปกติจะพิจารณาในบริเวณที่ Streamline เป็นเส้นตรงและขนานกัน



รูปที่ 2.7 การไหลแบบมิติเดียว [ขวัญชัยและวิศิษฎ์ 2521]

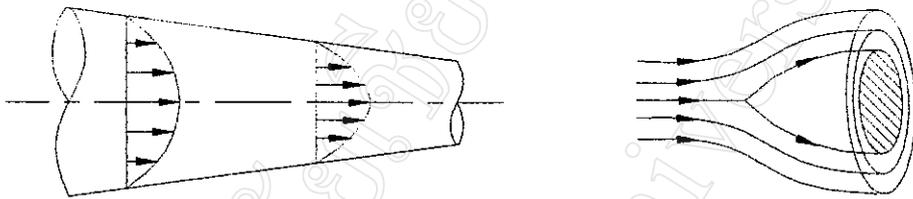
2.4.6 การไหลแบบสองมิติ (Two Dimensional Flow) หมายถึง การไหลโดยที่ Streamline เคลื่อนที่ไปบนระนาบอันเดียวกันแต่มีการเคลื่อนที่ขึ้นลงได้



รูปที่ 2.8 การไหลแบบสองมิติ [ขวัญชัยและวิศิษฎ์ 2521] และ [ชัยสวัสดิ์ เทียนวิบูลย์ 2526]

ตัวอย่างของการไหลแบบสองมิติ เช่น การไหลของน้ำที่ล้นเขื่อน หรือการไหลของอากาศผ่านปีกของเครื่องบิน เป็นต้น ในการไหลแบบสองมิตินี้ ความเร็ว ความดัน ฯลฯ เปลี่ยนแปลงไปตามจุดที่พิจารณา

2.4.7 การไหลแบบสามมิติ (Three Dimensional Flow) หมายถึง การไหลโดยที่ Streamline มีการเปลี่ยนแปลงไปทั้งสามทิศทาง เมื่อมองตัดขวาง Streamline แล้วจะออกมาในรูปของวงแหวน

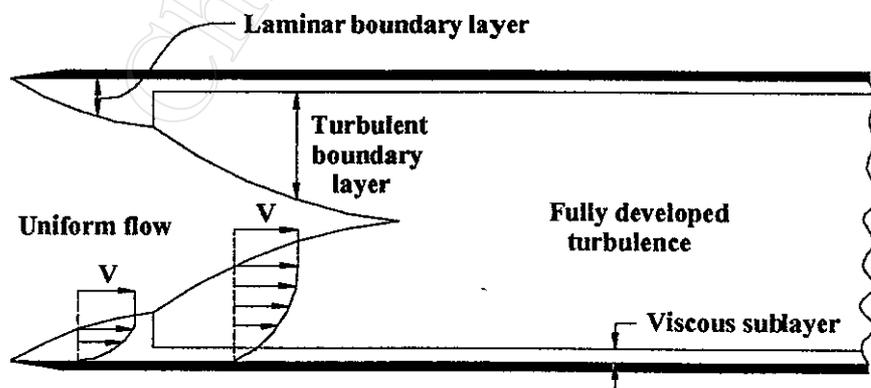


รูปที่ 2.9 การไหลแบบสามมิติ [ขวัญชัยและวิศิษฐ์ 2521] และ [ชัยสวัสดิ์ เทียนวิบูลย์ 2526]

ลักษณะการเกิดการไหลแบบสามมิตินี้ เช่น บริเวณที่ของไหลกำลังไหลเข้าสู่ท่อหรือเมื่อของไหลปะทะวัตถุที่ขวางของการไหล เช่น อากาศปะทะลูกปืน เป็นต้น

## 2.5 ชั้นการไหลของของไหล

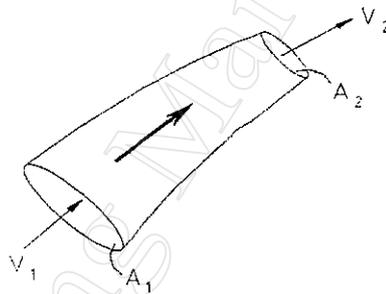
เมื่อของไหลไหลผ่านผิวของของแข็งความเร็วของของไหลที่จุดสัมผัสกับของแข็งจะเป็นศูนย์ Velocity Gradient ที่จุดนี้จะมากที่สุด และความเค้นเฉือนจะสูงที่สุด ทั้งนี้ถ้าหากของไหลไม่มีความหนืดเลย ( $\mu = 0$ ) ความเค้นเฉือนก็ไม่มีและไม่มีการไหลระหว่างชั้นของของไหล



รูปที่ 2.10 ชั้นการไหลของของไหลในท่อ [Daugherty et al., 1989]

พิจารณารูปที่ 2.10 ซึ่งเป็นการไหลที่ความเร็วของไหลผ่านเข้าสู่ท่ออันหนึ่ง การไหลของของไหลเกิดขึ้นที่ผนังท่อตอนเริ่มเข้า และความหนาจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ไปจนกระทั่งเจอกับชั้นที่เกิดจากผนังตรงข้ามของท่อ ณ จุดศูนย์กลางของท่อ โดยเรียกจุดนี้ว่าจุด Fully Developed Turbulence ซึ่งจะพบที่ประมาณ 50 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ ความหนาสูงสุดของชั้นการไหลของของไหลในกรณีของท่อนี้จะเป็นรัศมีภายในท่อนั่นเอง ลักษณะการไหลเมื่อเกิดเป็นชั้นการไหลของของไหลที่จุดต่างๆ ภายในท่อ อาจจะเป็นการไหลแบบราบเรียบหรือการไหลแบบปั่นป่วน ย่อมขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของของไหล ความหนืดของของไหล เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ และความเร็วของของไหล ของไหลอาจจะไหลเข้าไปในท่อในรูปของการไหลแบบราบเรียบ แล้วยังไม่ทันเกิดชั้นการไหลของของไหลหมดทั่วทั้งหน้าตัดท่อก็อาจจะเป็นชั้นการไหลของของไหลที่ปั่นป่วนก่อนก็ได้และการไหลในท่อถึงแม้จะเกิดเป็นการไหลแบบปั่นป่วนเต็มท่อแล้วก็ตามก็ยังจะมีชั้นการไหลแบบราบเรียบอยู่ในแนวการไหลชั้นชิดผิวท่อ

## 2.6 สมการการไหลต่อเนื่อง



รูปที่ 2.11 ถ้าการไหลที่ถูกควบคุมปริมาตร

สมการการไหลต่อเนื่องสามารถพิสูจน์ได้จากถ้าการไหลขนาดสั้น ซึ่งประกอบขึ้นด้วยเส้นที่ไหลจำนวนมากเป็นผนังของการไหล ไม่มีความเร็วในแนวตั้งฉากกับเส้นการไหล และไม่มีของไหลเล็ดลอดผ่านผนังของถ้าการไหลได้ จะผ่านได้เฉพาะด้านปลายทั้งสองเท่านั้น บริเวณที่ถูกจำกัดระหว่างปลายทั้งสองของถ้าการไหลนี้คือ ปริมาตรควบคุม (Control Volume) หรือถ้าการไหลที่ถูกควบคุมปริมาตรนั่นเองซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.11 หรือกล่าวได้ว่าปริมาณมวลสารในระบบไม่มีการสูญหาย

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 \quad (2.19)$$

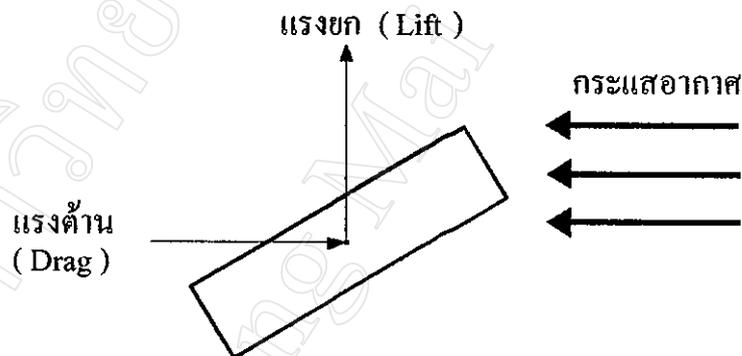
## 2.7 แรงที่เกิดกับวัตถุที่จมอยู่ในของไหล

แรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นต่อวัตถุที่จมอยู่ในของไหลซึ่งของไหลอาจจะมีลักษณะการไหลเป็นแบบราบเรียบ หรือ ปั่นป่วน หรือเป็นแบบผสมของทั้งสองอย่างก็ได้ แรงที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

2.7.1 แรงต้านเป็นแรงในทิศตรงข้ามกับแนวการเคลื่อนที่ของของไหล

2.7.2 แรงยกเป็นแรงที่มีทิศทางตั้งฉากกับการเคลื่อนที่นั้น

ในการศึกษานี้จะศึกษาเฉพาะแรงต้านที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากผลของความเฉื่อยและความหนืด แรงต้านที่เกิดจากความเฉื่อยจะเรียกว่า Form Drag หรือ Pressure Drag ซึ่งแรงนี้จะเกิดจากผลรวมของแรงที่วัตถุต้านขวางต่อการเคลื่อนที่ของของไหลที่ไหลผ่านในแนวการไหลนั้น ส่วนแรงต้านที่เกิดจากความหนืดของของไหลที่ไหลผ่านเรียกว่า Friction Drag หรือ Surface Drag แรงนี้ขึ้นอยู่กับความหนืดของของไหล ความเร็วของการไหล และพื้นที่ของวัตถุที่สัมผัสกับของไหลซึ่งพื้นที่นี้จะเป็นพื้นที่ที่ขนานกับชั้นของไหลที่ไหลติดผิวมัน



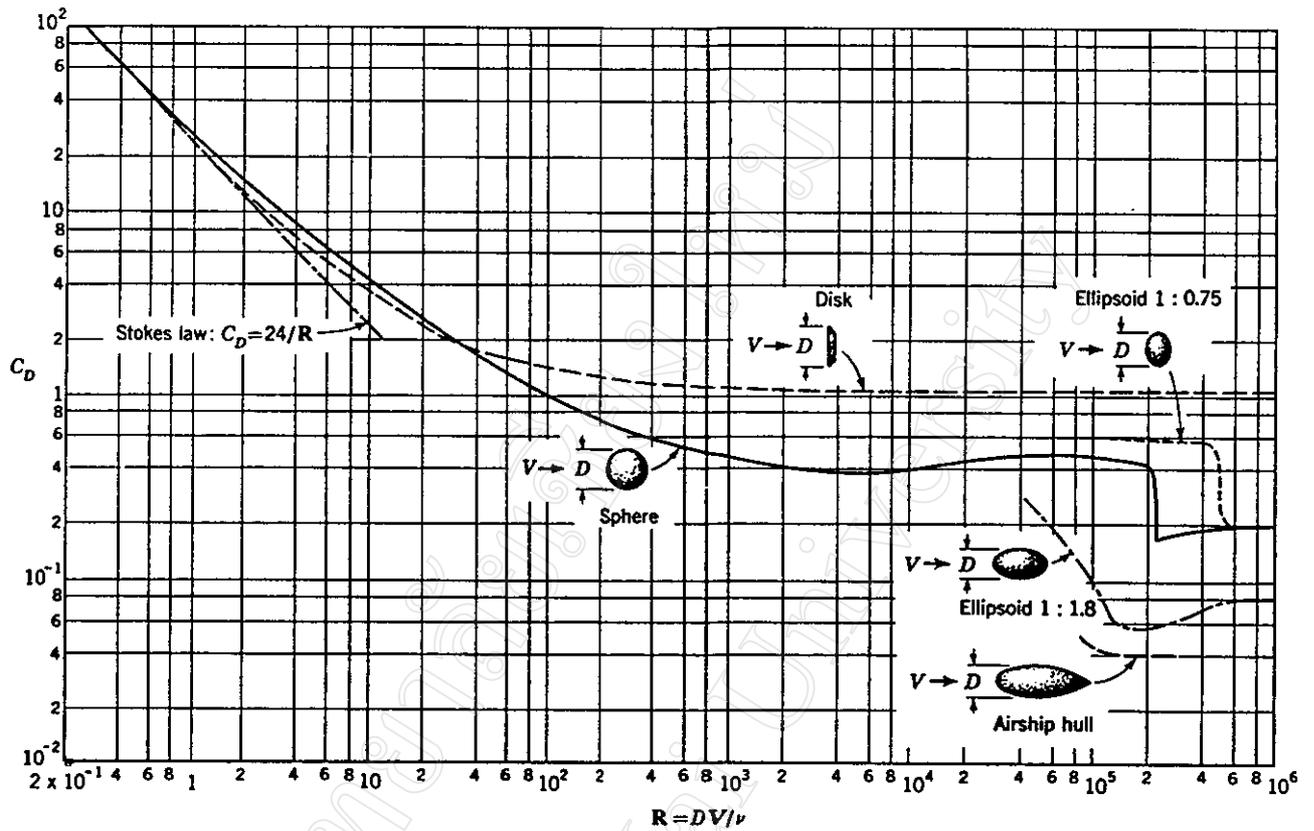
รูปที่ 2.12 แรงที่เกิดกับวัตถุที่จมอยู่ในของไหล [สัมพันธ์ ไชยเทพ 2524]

สัมประสิทธิ์แรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ อธิบายได้

$$C_D = \frac{2F_D D}{AV Re \mu} \quad (2.20)$$

ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์  $Re$  อธิบายได้จาก สัมพันธ์ ไชยเทพ (2524)

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{DV}{\nu} \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.13 กราฟแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ของทรงกลม [Daugherty et al., 1989]

## 2.8 อุโมงค์ลม

อุโมงค์ลมเป็นเครื่องมือที่สร้างการไหลของอากาศที่สามารถควบคุมการไหลทั้งความเร็วของการไหลและการบังคับให้การไหลเกิดความราบเรียบมีความปั่นป่วนน้อยที่สุด โดยอุโมงค์ลมที่ออกแบบและสร้างขึ้นนี้จะเป็แบบดูดอากาศทางด้านบน ซึ่งอากาศจะเข้าทางด้านบนโดยแรงดูดของพัดลมเป่าอากาศ อากาศที่ถูกดูดเข้ามาในอุโมงค์ลมโดยผ่านปากกรวยเพื่อบีบเส้นกระแสของอากาศเข้าหากันเป็นการลดความปั่นป่วนของอากาศ อากาศผ่านห้องทดสอบแล้วถูกดูดออกไปโดยพัดลมเป่าอากาศ ด้านทางของท่อที่ดูดอากาศออกจากอุโมงค์ลมซึ่งอยู่ในอุโมงค์ลมนั้นจะเจาะเป็นรูเล็กๆ รอบๆ ท่อไว้เพื่อลดการควงของอากาศในช่วงห้องทดสอบ ความเร็วของอากาศสามารถปรับได้โดยการควบคุมความเร็วของพัดลมเป่าอากาศ