

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี

LDA เป็นวิธีการวัดอัตราการไหลหรือความเร็วของของไหลที่ปราศจากการรบกวนของไหล วิธีการนี้จะอาศัยหลักการเกิดปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ของแสง โดยความถี่ของแสงที่เปลี่ยนไปเป็นส่วนโดยตรงกับความเร็วของอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในของไหล ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการไหลหรือความเร็วของของไหล [2-3] ดังนั้นในบทที่ 2 นี้ จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับของไหล การวัดอัตราการไหล ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ของแสง การแทรกสอดกันของแสง และหลักการและเทคนิคของ LDA เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างชุดการทดลองซึ่งจะกล่าวในบทที่ 3

2.1 ของไหล [4-6]

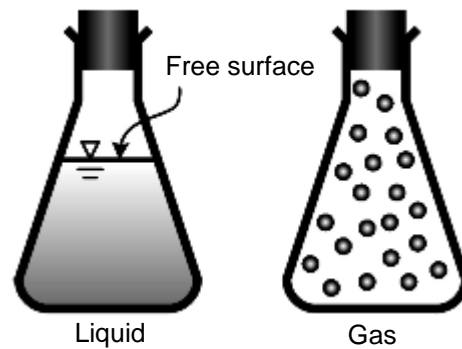
ของไหล (Fluid) หมายถึง สสารที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้อย่างต่อเนื่องเมื่อถูกกระทำด้วยแรงเค้นเฉือน ซึ่งนั่นหมายความว่า เมื่อใดที่มีแรงเค้นเฉือนมากระทำ ของไหลจะเกิดการขยับตัวและเปลี่ยนรูปร่างไป เช่น เมื่อเทของไหลลงในภาชนะ ของไหลจะเปลี่ยนรูปร่างอย่างต่อเนื่องไปชั่วขณะหนึ่ง ซึ่งเป็นเพราะรูปร่างของของไหลในขณะนั้นไม่สอดคล้องกับรูปร่างของภาชนะ จึงทำให้เกิดแรงเค้นเฉือนขึ้นภายในของเหลว กระบวนการปรับตัวนี้จะดำเนินต่อเนื่องไปจนกระทั่งแรงเค้นเฉือนหายไป หรือก็คือสภาวะที่ของไหลมีรูปร่างเดียวกับภาชนะ บริเวณผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับภาชนะจะมีแต่แรงเค้นตั้งฉากเท่านั้น กล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ ในขณะที่ของไหลเคลื่อนที่จะต้องมีแรงเค้นเฉือนเกิดขึ้น ขณะที่ของไหลอยู่นิ่งหรือไม่เคลื่อนที่จะไม่มีแรงเค้นเฉือนกระทำอยู่เลย ของไหลสามารถคงรูปอยู่ได้ในสองสถานะ ได้แก่ ของเหลว (Liquid) และแก๊ส (Gas)

1) ของเหลว

ของเหลวมีรูปร่างไม่แน่นอน เปลี่ยนแปลงได้ตามภาชนะที่บรรจุ แต่จะมีขอบเขตแบ่งระหว่างตัวมันเองกับของไหลอื่นอย่างชัดเจน เรียกว่า “ผิวอิสระ” (Free surface) ตัวอย่างเช่น ถ้านำของเหลวที่บรรจุอยู่ในภาชนะตั้งไว้บนโลก ของเหลวชนิดนั้นจะมีผิวอิสระที่แบ่งระหว่างตัวมันเองกับอากาศ และผิวอิสระนั้นจะวางตัวในแนวราบเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 นอกจากนี้ของเหลวยังมีสมบัติที่ยากต่อการบีบอัด เนื่องจากระยะห่างระหว่างโมเลกุลค่อนข้างน้อย (มากกว่าของแข็ง แต่น้อยกว่าแก๊ส)

2) แก๊ส

แก๊สมีรูปร่างไม่แน่นอน เปลี่ยนแปลงได้ตามภาชนะที่บรรจุ โดยมีลักษณะแพร่กระจายไปทั่วภาชนะ ไม่มีผิวอิสระ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และถูกบีบอัดได้ง่ายกว่าของเหลว เนื่องจากมีระยะห่างระหว่างโมเลกุลมากกว่าของเหลว



รูปที่ 2.1 แสดงความแตกต่างระหว่างของเหลวและแก๊ส [4]

2.1.1 สมบัติทางกายภาพของของไหล

เป็นที่ทราบกันดีว่าการศึกษาของไหลใดก็ตาม จำเป็นต้องทราบสมบัติของมันเป็นอย่างดี สมบัติทางกายภาพของของไหล (Physical fluid properties) ที่มีอาจจะเลยได้ มีดังนี้

1) ความดัน (Pressure)

ของไหลทุกชนิดต้องมีความดัน จะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับสถานะหรือสภาวะ โดยความดันในที่นี้มิได้หมายถึงความดันที่มีค่ามากกว่าหนึ่งบรรยากาศเสมอไป อาจจะน้อยกว่าหนึ่งบรรยากาศก็เป็นได้ การเปลี่ยนแปลงความดันอย่างทันทีทันใดสามารถทำให้การวัดอัตราการไหลเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ เพื่อให้เข้าใจตรงกันจึงกำหนดความดันเอาไว้ว่า ความดันของของไหล หมายถึง แรงที่เกิดจากของไหลกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ดังนั้นหน่วยของความดันจึงออกมาเป็น $\frac{N}{m^2}$, Pa หรือ kPa เป็นต้น ในระบบ SI กำหนดให้ใช้ kPa

2) ความดันแตกต่าง (Differential pressure)

ความดันแตกต่าง หมายถึง ความดันที่เกิดขึ้นจากการเอาความดันสองค่ามาเปรียบเทียบกับ ผลที่ออกมาถือว่าเป็นความดันแตกต่าง หน่วยของความดันแตกต่างจะเป็นหน่วยเดียวกับความดันโดยทั่วไป

3) อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิ หมายถึง หน่วยที่ใช้บอกความร้อนหรือเย็นของของไหลซึ่งมีอยู่หลายหน่วยด้วยกัน เช่น เคลวิน (K) องศาเซลเซียส (°C) และองศาฟาเรนไฮต์ (°F) สำหรับในระบบ SI กำหนดให้ใช้หน่วยเป็นเคลวิน อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณาในการวัดการไหล (Flow measurement) เพราะส่งผลต่อความผิดพลาดสูง โดยเฉพาะการวัดที่อุณหภูมิแตกต่างกันนั้น ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ว่าครั้งใดมากกว่าหรือน้อยกว่ากัน ดังนั้นเมื่อวัดการไหลต้องระบุให้ชัดเจนลงไปว่าทำการวัดที่อุณหภูมิเท่าใด เนื่องจากผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ตัวแปรอื่น เช่น ความหนาแน่น

(Density) น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight) ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume) ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ค่าการอัดตัว (Compressibility) และความหนืด (Viscosity) เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

4) ความหนาแน่น

ความหนาแน่น (ρ) หมายถึง จำนวนมวลของสารนั้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร $\rho = \frac{m}{V}$ ในระบบ SI กำหนดให้ใช้หน่วยเป็น $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ค่าความหนาแน่นของของเหลวจะเปลี่ยนค่าตามอุณหภูมิ แต่เกือบจะไม่ มีผลเมื่อความดันเปลี่ยนไป ยกเว้นช่วงความดันสูงมากๆ โดยปกติเรียกของเหลวว่าเป็นสารประเภท อัดตัวไม่ลง (Incompressible) แต่กรณีที่เป็นแก๊สหรือไอ ความหนาแน่นเปลี่ยนตามทั้งค่าความดันและ อุณหภูมิ

5) น้ำหนักจำเพาะ

น้ำหนักจำเพาะ (γ) หมายถึง จำนวนน้ำหนัก (Weight) ของสารนั้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ในระบบ SI กำหนดให้ใช้หน่วยเป็น $\frac{\text{N}}{\text{m}^3}$

6) ปริมาตรจำเพาะ

ปริมาตรจำเพาะ หมายถึง ปริมาตรของของไหลต่อหนึ่งหน่วยมวล ซึ่งจะเป็นส่วนกลับของความ หนาแน่น ในระบบ SI กำหนดให้ใช้หน่วยเป็น $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$

7) ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะ หมายถึง อัตราส่วนของน้ำหนักจำเพาะของสารใดๆ ต่อน้ำหนักจำเพาะของสาร มาตรฐาน ดังนั้นค่าความถ่วงจำเพาะจึงไม่มีหน่วย สำหรับของเหลวนั้นมักกำหนดให้น้ำเป็นสาร มาตรฐาน เครื่องมือที่นำมาใช้วัดความถ่วงจำเพาะของสารที่เป็นของเหลวที่รู้จักกันดี คือ ไฮโดรมิเตอร์ โดยของเหลวประเภทที่หนักกว่าน้ำจะใช้สมการที่ (2.1) ในการคำนวณ

$$\text{Deg.B} = 145 - \left(\frac{145}{\text{SP.gr}60 / 60^\circ \text{F}} \right) \quad (2.1)$$

และของเหลวประเภทที่เบากว่าน้ำจะใช้สมการที่ (2.2) ในการคำนวณ

$$\text{Deg.B} = \left(\frac{140}{\text{SP.gr}60 / 60^\circ \text{F}} \right) \quad (2.2)$$

เมื่อ Deg.B คือ ค่าความถ่วงจำเพาะในหน่วยของสาบูเม่ (Degree Baume)

SP.gr 60/60° F คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของสารที่ 60 °F (หรือ 15.6 °C)

การอ่านค่าความถ่วงจำเพาะยังมีอีกแบบหนึ่ง เรียกว่า องศาพีไอ (Degree API) กำหนดไว้ดังนี้

$$Deg.API = \left(\frac{141.5}{SP.gr60 / 60^\circ F} \right) - 131.5 \quad (2.3)$$

โดย API คือ American Petroleum Industry

8) ค่าการอัดตัว

ค่าการอัดตัว หมายถึง อัตราส่วนของความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric strain) กับความเค้นอัด (Compressive stress) โดยความเครียดเชิงปริมาตร คือ ปริมาตรที่ลดลงต่อปริมาตรเดิม และความเค้นอัด คือ ความดันที่ใช้ในการอัดหรือความดันที่ทำให้ปริมาตรลดลง ซึ่งเมื่อของเหลวมีความดันเพิ่มขึ้น ปริมาตรนั้นแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นในการคำนวณจึงให้เป็นค่าคงที่ แต่กรณีที่เป็นแก๊สหรือไอ ค่าการอัดตัวนี้ถือเป็นตัวประกอบที่มีความสำคัญมาก โดยความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรของแก๊สจะเป็นไปตามกฎของแก๊ส ในกรณีของแก๊ส ค่าการอัดตัวจึงพิจารณาได้จากอัตราส่วนระหว่างปริมาตรจำเพาะจริงของแก๊สต่อปริมาตรจำเพาะของแก๊สอุดมคติที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน

9) ความหนืด

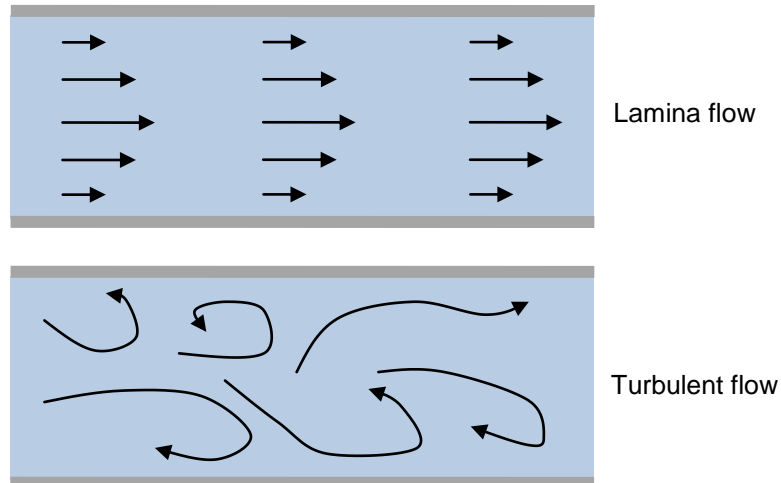
ความหนืด คือ ความต้านทานการไหลของผิวของของไหลหนึ่งเนื่องจากผิวอื่น โดยพบว่าของเหลวที่มีความหนืดมากจะไหลช้ากว่าของเหลวที่มีความหนืดน้อย สมบัติดังกล่าวเกิดจากผลการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของโครงสร้างของของเหลว นั้น ขณะที่อุณหภูมิต่ำๆ โมเลกุลของของเหลวจะยึดเหนี่ยวกันอย่างใกล้ชิดทำให้มีแรงยึดเกาะมาก ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้โมเลกุลของของเหลวจะแยกตัวออกจากกัน ส่งผลให้แรงยึดเกาะน้อยลง ความหนืดก็ลดลง ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ความหนืด คือ ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอันเนื่องมาจากแรงเค้นเฉือนนั่นเอง หน่วยของค่าความหนืดมีอยู่ 2 หน่วย คือ ความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute viscosity, μ) กับความหนืดจลน์ (Kinetic viscosity, ν)

- ความหนืดสัมบูรณ์ หมายถึง หน่วยที่ใช้วัดความต้านทานการไหลของของไหลนั้น ซึ่งพบว่ามีในประเภทของเหลวมากกว่าพวกประเภทแก๊สและไอน้ำ โดยกำหนดให้มวลของของไหล 1 g ที่เคลื่อนที่ได้ระยะทาง 1 cm ในเวลา 1 s เท่ากับ 1 poise หรือ $1 \text{ poise} = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}}$ สำหรับในระบบ SI ใช้หน่วยเป็น Pa·s โดยที่ $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 1000 \text{ centipoise}$
- ความหนืดจลน์ หมายถึง หน่วยที่ได้มาจากความหนืดสัมบูรณ์หารด้วยความหนาแน่นของของไหลนั้น โดยกำหนดให้ $1 \text{ stoke} = 0.01 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ สำหรับระบบ SI ใช้หน่วยเป็น $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

2.1.2 ธรรมชาติของของไหล

จากการทดลองของ ออสบอร์น เรย์โนลด์ (Osborne Reynolds) เมื่อปี ค.ศ. 1883 พบว่าของไหลที่อยู่ ในท่อ มีลักษณะการไหลที่สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ การไหลแบบราบเรียบ (Lamina flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- 1) **การไหลแบบราบเรียบ** เป็นการไหลของของไหลที่มีความหนืดสูง ลักษณะของการไหลมีรูปร่างเป็นชั้น (Laminar or layers) ซึ่งมีความเร็วต่างๆ กัน เรียงซ้อนกัน โดยที่อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงขนานกันไปเป็นชั้นๆ ความเร็วของของไหลในชั้นที่อยู่ใกล้ๆ กันมีค่าไม่เท่ากัน แต่แตกต่างกันบ้างเล็กน้อย ไม่ว่าจะการไหลนั้นมีปริมาณมากหรือน้อยก็ตาม จะเคลื่อนที่ในลักษณะตามกันไปเป็นแผ่นหรือชั้นเรียบๆ โดยที่แผ่นหนึ่งเลื่อนเรียบเหนือแผ่นอื่น เช่น การไหลของน้ำใต้ดิน การไหลของเลือด และการควบน้ำของต้นไม้ เป็นต้น
- 2) **การไหลแบบปั่นป่วน** เป็นการไหลของของไหลชนิดที่อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่ในลักษณะหรือทิศทางไม่แน่นอน กล่าวคือ มีการเคลื่อนที่ขึ้นลง และมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมจากส่วนหนึ่งของของไหลไปยังส่วนอื่นๆ ลักษณะการไหลกว่า 95% เป็นการไหลแบบนี้ เช่น การไหลของน้ำตามแม่น้ำลำคลอง หรือการไหลของอากาศในท่อลม เป็นต้น



รูปที่ 2.2 แสดงรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนและการไหลแบบราบเรียบ

การไหลทั้งสองแบบนี้มีบทบาทสำคัญต่อมาตรวัดการไหลทั้งหลายที่สร้างขึ้นในภายหลังทั้งสิ้น ด้วยเหตุว่าไม่สามารถสร้างมาตรวัดใดๆ ขึ้นมาให้วัดได้ครอบคลุมทุกลักษณะการไหล โดยที่ความคลาดเคลื่อนในการวัดยังคงที่ได้

การไหลของของไหลที่อยู่ในท่อเป็นแบบใดนั้น สามารถทราบได้จากการทดลองซ้ำไปซ้ำมาหลายๆ ครั้ง พบว่ารูปแบบการไหลจำแนกได้ด้วยค่าของแรงเฉื่อยในการไหลของของไหล (Dynamic force) ในท่อต่อแรงหนืด (Viscosity force) หรือที่เรียกกันว่า เลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) [6] โดย

$$R_D = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2.4)$$

เมื่อ	R_D	คือ	Reynolds number
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของของไหล ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)
	v	คือ	ความเร็วของของไหล ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)
	D	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)
	μ	คือ	ความหนืดของของไหล ($\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$)

หาก $R_D < 2,000$ จะเป็นการไหลแบบราบเรียบ

หาก $R_D > 2,000$ จะเริ่มเป็นการไหลแบบปั่นป่วนผสมกับการไหลแบบราบเรียบ

และหาก $R_D > 4,000$ จะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน

2.1.3 อัตราการไหลและความเร็วของของไหล [7]

ในการไหลของของไหลมีปริมาณสำคัญที่ต้องพิจารณาอยู่ 2 ปริมาณ คือ อัตราการไหล (Flow rate) และความเร็วของของไหล (Mean velocity, v)

1) อัตราการไหล

อัตราการไหล คือ ปริมาณของไหลที่ไหลผ่านหน้าตัดใดๆ ในหนึ่งหน่วยเวลา โดยแบ่งออกเป็น

- อัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volumetric flow rate, Q) มีหน่วยเป็น $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$, lpm, $\frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$, cfm หรือ gpm
- อัตราการไหลเชิงน้ำหนัก (Weight flow rate, G) มีหน่วยเป็น $\frac{\text{kN}}{\text{s}}$ หรือ $\frac{\text{lb}}{\text{s}}$
- อัตราการไหลเชิงมวล (Mass flow rate, \dot{m}) มีหน่วยเป็น $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ หรือ $\frac{\text{sl}}{\text{s}}$

ซึ่งในของไหลที่อัดตัวไม่ได้ เช่น ของเหลว นิยมใช้อัตราการไหลเชิงปริมาตร และในของไหลที่อัดตัวได้ นิยมใช้อัตราการไหลเชิงน้ำหนักหรือมวล

2) ความเร็วของของไหล

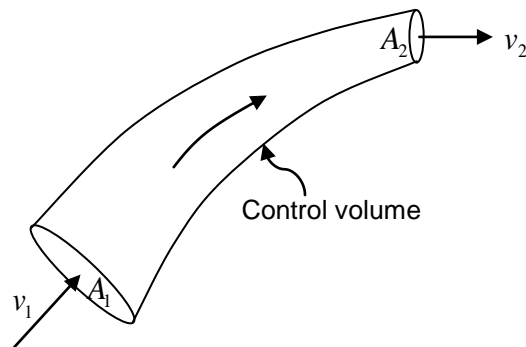
เนื่องจากของไหลมีความหนืด ขณะไหลก็ย่อมมีความเสียดทานและความเค้นเฉือนสามารถเกิดขึ้นได้เสมอ จึงทำให้ความเร็วของของไหลตลอดพื้นที่ภาคตัดขวางของลำการไหลไม่เท่ากัน เช่น ของไหลที่ไหลผ่านท่อกลม บริเวณกึ่งกลางท่อย่อมมีความเร็วสูงสุด และบริเวณผนังท่อจะมีความเร็วต่ำมาก (อาจจะเป็นศูนย์) ดังนั้นการนำความเร็วของของไหลไปคำนวณ ย่อมมีความยุ่งยากและสับสนมาก ด้วยเหตุนี้จึงกำหนดให้ความเร็วของของไหลเป็นความเร็วเฉลี่ยทั่วทั้งพื้นที่ภาคตัดขวางของลำการไหล

2.1.4 สมการพื้นฐานสำหรับการไหลของของไหล [7-8]

สมการพื้นฐานสำหรับการไหลของของไหล มีอยู่ 3 สมการ คือ สมการความต่อเนื่องของการไหล (Continuity equation), สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's equation) และสมการโมเมนตัม (Impulse-momentum equation) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) สมการอนุรักษ์มวลหรือสมการความต่อเนื่องของการไหล

สมการสภาพต่อเนื่องสามารถพิสูจน์ได้จากลำการไหล (Stream tube) ขนาดสั้น ซึ่งไม่มีความเร็วในแนวตั้งฉากกับแนวการไหล และไม่มีของไหลเล็ดลอดผ่านผนังของลำการไหลได้ จะผ่านได้เฉพาะด้านปลายทั้งสองเท่านั้น ปริมาตรที่ถูกจำกัดระหว่างปลายทั้งสองของลำการไหลนี้ คือ ปริมาตรควบคุม (Control volume, V) หรือลำการไหลที่ถูกควบคุมปริมาตรนั่นเอง ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงลำการไหลที่ถูกควบคุมปริมาตร

ปริมาตรของของไหลถูกจำกัดโดยปริมาตรของลำการไหล ถ้ามวลของของไหลถูกบรรจุในลำการไหลในลักษณะปริมาตรควบคุมของปริมาตรที่เวลา t คือ m_t ดังนั้นมวลของของไหลในปริมาตรควบคุมที่เวลา $t + dt$ คือ ผลรวมของมวลของของไหลที่เวลา t กับมวลของของไหลที่ไหลเข้าในช่วงเวลา dt ลบด้วยมวลของของไหลที่ไหลออกในช่วงเวลา dt

$$m_{t+dt} = m_t + \rho_1 v_1 A_1 dt - \rho_2 v_2 A_2 dt \quad (2.5)$$

แต่มวลในปริมาตรควบคุมที่เวลา $t + dt$ หาได้จาก

$$m_{t+dt} = m_t + V \frac{\partial \rho}{\partial t} dt \quad (2.6)$$

เมื่อ $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไหลในปริมาตรควบคุม

แต่เนื่องจากมวลที่เวลา $t + dt$ จากสมการที่ (2.5) และ (2.6) ต้องมีค่าเท่ากัน จะได้

$$\rho_1 v_1 A_1 dt - \rho_2 v_2 A_2 dt = V \frac{\partial \rho}{\partial t} dt \quad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.7) เป็นสมการความต่อเนื่องของการไหลทั่วไป สำหรับการไหลที่จำกัดขอบเขตหรือเป็นอัตราการไหลของมวลเข้าไปยังปริมาตรควบคุม ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราการเพิ่มมวลในปริมาตรควบคุม สมการนี้สามารถลดรูปเพื่อความสะดวกในการใช้งานของแต่ละกรณีได้ว่า

ในกรณีที่เป็นการไหลแบบคงตัว (Steady flow) ซึ่งมีค่า $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ นั้น สมการที่ (2.7) จะลดรูปเป็น

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 = \dot{m} \quad (2.8)$$

หรือ $\gamma_1 v_1 A_1 = \gamma_2 v_2 A_2 = G \quad (2.9)$

เมื่อนำหนักจำเพาะ $\gamma = \rho g$ โดย g คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

และถ้าเป็นกรณีที่เป็นการไหลแบบคงตัวของของไหลที่อัดตัวไม่ได้ ซึ่งจะมีค่า ρ คงที่นั้น สมการที่ (2.7) จะลดรูปได้เป็น

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = Q \quad (2.10)$$

สมการที่ (2.8), (2.9) และ (2.10) ใช้สำหรับหาความสัมพันธ์ของอัตราการไหล ความเร็วของของไหล และพื้นที่ภาคตัดขวางของท่อ แต่จะนิยมใช้กับระบบท่อปิดเท่านั้น

2) สมการอนุรักษ์พลังงานกลหรือสมการเบอร์นูลลี

เมื่อของไหลเกิดการไหล จะมีพลังงานรูปต่างๆ เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของของไหลนั้น ซึ่งพอจะแยกพิจารณาได้ดังนี้

พลังงานจลน์ (Kinetic energy, E_k)

วัตถุที่มีมวล m เมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v จะมีพลังงานจลน์เกิดขึ้น

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.11)$$

ดังนั้น ถ้าของไหลเคลื่อนที่ในลักษณะที่มีอนุภาคของของไหลทั้งหมดเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่เท่ากัน พลังงานจลน์ของของไหลจะมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2}mv^2$ เช่นกัน และเมื่อคิดพลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก (w) ของของไหล ซึ่งเรียกว่า เฮดความเร็ว (Velocity head) ก็จะได้ว่า

$$\frac{E_k}{w} = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{mg} = \frac{v^2}{2g} \quad (2.12)$$

ตามความเป็นจริงแล้ว ความเร็วของอนุภาคของของไหลแต่ละตัวย่อมไม่เท่ากัน ดังนั้นจำเป็นต้องอินทิเกรตตลอดพื้นที่ภาคตัดขวางของการไหล เพื่อให้ได้ค่าพลังงานจลน์ที่ถูกต้องมากขึ้น ซึ่งจะได้ค่าสัมประสิทธิ์จากการอินทิเกรต มีค่าเป็น

$$\alpha = \frac{1}{Av^3} \int v_p^3 dA \quad (2.13)$$

เมื่อ v_p คือ ความเร็วของอนุภาคของของไหลที่ตำแหน่งใดๆ บนภาคตัดขวางของการไหล

จึงได้ว่า เฮดความเร็วที่แท้จริง เขียนได้เป็น

$$\frac{E_k}{w} = \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (2.14)$$

สำหรับการไหลแบบราบเรียบในท่อกลม $\alpha = 2$ และการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลม α จะมีค่าตั้งแต่ 1.01 ถึง 1.15 ซึ่งการไหลในท่อกลมส่วนมากจะเป็นแบบปั่นป่วน เพื่อความสะดวกต่อการใช้งานจึงนิยมให้ค่า α จะมีค่าเป็น 1

พลังงานศักย์ (Potential energy, E_p)

พลังงานศักย์ของอนุภาคของของไหลขึ้นอยู่กับระดับความสูงที่เปรียบเทียบกับระนาบอ้างอิงที่สมมติขึ้น โดยปกติแล้วมักสนใจความต่างระดับของตำแหน่งทั้งสองเท่านั้น ดังนั้นจึงนิยามกำหนดระนาบอ้างอิงให้สอดคล้องกับการใช้งาน ถ้าให้อนุภาคของของไหลหนัก w อยู่สูงจากระนาบอ้างอิง (Reference plane) เป็นระยะ z พลังงานศักย์จะหาได้จาก

$$E_p = wz \quad (2.13)$$

ถ้าคิดต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก พลังงานศักย์ของของไหลต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก ซึ่งเรียกว่า เฮดศักย์ (Potential head) จะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{E_p}{w} = \frac{wz}{w} = z \quad (2.14)$$

พลังงานภายใน (Internal energy, u)

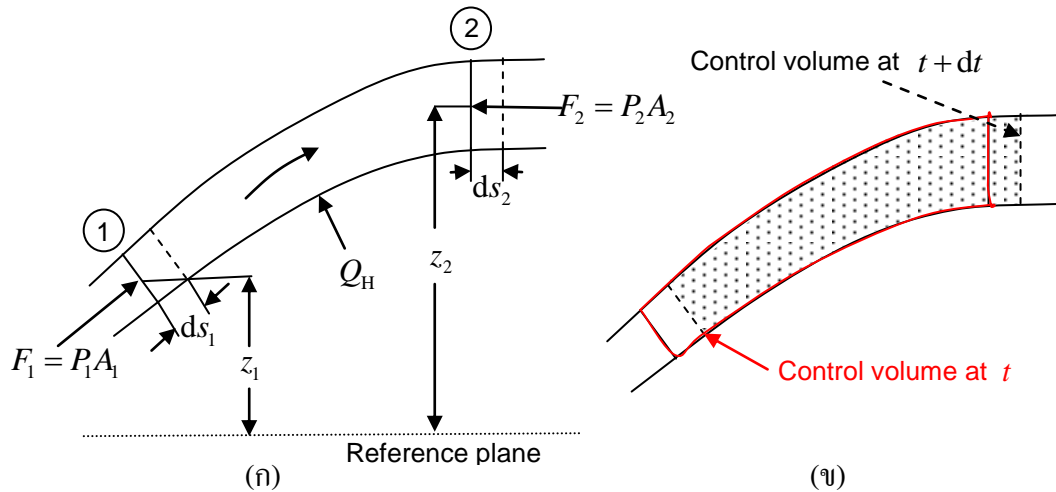
พลังงานภายในทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) ก็คือ พลังงานความร้อน แต่อาจสรุปได้ว่า พลังงานภายในเป็นพลังงานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลและแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล พลังงานภายในจะขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิ และนิยามเขียนเป็นพลังงานต่อหน่วยมวล หรือพลังงานต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก

พลังงานภายในที่อุณหภูมิใดๆ นั้นถือว่ามีค่าเป็นศูนย์ก็ได้ ทั้งนี้เพราะตามปกติแล้วเราต้องการทราบแต่เพียงค่าความแตกต่างของพลังงานภายในเท่านั้น ความแตกต่างของพลังงานภายในต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักในระหว่างอุณหภูมิสองระดับนั้นจะมีค่าเป็น

$$\Delta u = \frac{c_v \Delta T}{g} \quad (2.15)$$

เมื่อ	Δu	คือ	ความแตกต่างของพลังงานภายในต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก
	c_v	คือ	ความร้อนจำเพาะเมื่อปริมาตรคงที่
	ΔT	คือ	ความแตกต่างของอุณหภูมิ
	g	คือ	อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

จากกฎข้อแรกของอุณหพลศาสตร์หรือกฎการอนุรักษ์พลังงานซึ่งกล่าวไว้ว่า พลังงานจะไม่สามารถสร้างขึ้นหรือถูกทำลายได้ กล่าวได้ว่า พลังงานทั้งหมดที่มีอยู่เกิดจากการเปลี่ยนรูปของพลังงานจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่ง ในกรณีของการไหลแบบคงตัว งาน (Work) ภายนอกที่กระทำกับระบบใดๆ รวมกับพลังงานความร้อน (Heat, Q_H) ที่ถ่ายเทเข้าหรือออกจากระบบ ย่อมมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของระบบ



รูปที่ 2.4 แสดงลำการไหลของปริมาตรควบคุมที่เวลา t และ $t + dt$

จากรูปที่ 2.4 มวลของของไหลถูกบรรจุอยู่ในปริมาตรควบคุมที่เวลา t ระหว่างภาคตัดขวางการไหลของตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 ของลำการไหล ปริมาตรควบคุมนี้ถูกกำหนดให้มีตำแหน่งที่แน่นอน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงเลย แสดงดังรูปที่ 2.4 (ข)

จากรูปที่ 2.4 (ก) ระบบของของไหลนี้ประกอบด้วยของไหลที่ถูกบรรจุอยู่ในลำการไหลระหว่างภาคตัดขวางการไหลของตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 ณ เวลา t ระบบของไหลนี้จะเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งใหม่ในช่วงเวลา dt ระหว่างช่วงเวลาน้อยๆ ที่เปลี่ยนไปนี้ สมมติว่าของไหลสามารถเคลื่อนที่ไปได้เล็กน้อยเป็นระยะ ds_1 ที่ภาคตัดขวางการไหลของตำแหน่งที่ 1 และระยะ ds_2 ที่ภาคตัดขวางการไหลของตำแหน่งที่ 2 ซึ่งการเคลื่อนตัวของของไหลไปเพียงเล็กน้อยในระบบนั้นเกิดจากการกระทำของแรงเนื่องจากความดัน ($F = PA$) ของตำแหน่งที่ 1 และ 2 งานที่กระทำกับของไหลนี้เรียกว่า งานของการไหล (Flow work, W) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$W = P_1 A_1 ds_1 - P_2 A_2 ds_2 \quad (2.16)$$

เนื่องจากความร้อนที่ถ่ายเทจากภายนอกเข้าไปในระบบของไหลในช่วงเวลา dt มีค่าเป็น

$$Q_H = \left(\frac{ds_1}{dt} \right) q dt = (\gamma_1 A_1 ds_1) q \quad (2.17)$$

เมื่อ q คือ พลังงานความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักที่ถูกใส่เข้าไปในระบบการไหลของของไหล ซึ่งถ้าความร้อนถูกถ่ายเทออกจากระบบของไหล จะมีเครื่องหมายเป็นลบ

ในการพิจารณาระบบของไหลโดยใช้ปริมาตรควบคุม มวลของของไหลในปริมาตรควบคุมจะเคลื่อนที่จากขอบเขต ณ เวลา t ไปยังขอบเขตใหม่ ณ เวลา $t + dt$ ดังนั้นพลังงานของระบบของไหลที่

เปลี่ยนไป (ΔE) ในช่วงเวลา dt จึงมีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงานที่ไหลเข้าสู่ระบบที่ภาคตัดขวางของการไหลตำแหน่งที่ 1 กับพลังงานที่ไหลออกจากระบบที่ภาคตัดขวางของการไหลตำแหน่งที่ 2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\Delta E = \gamma_2 A_2 ds_2 \left(\alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + u_2 \right) - \gamma_1 A_1 ds_1 \left(\alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + u_1 \right) \quad (2.18)$$

ดังนั้นจากกฎข้อแรกของอุณหพลศาสตร์ $W + Q_H = \Delta E$

จะได้

$$(P_1 A_1 ds_1 - P_2 A_2 ds_2) + (\gamma_1 A_1 ds_1) q = \gamma_2 A_2 ds_2 \left(\alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + u_2 \right) - \gamma_1 A_1 ds_1 \left(\alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + u_1 \right)$$

ซึ่งถ้าการไหลเป็นแบบคงตัว มวลหรือน้ำหนักของของไหลที่เคลื่อนที่ไปนั้นจะไม่มีเปลี่ยนแปลงจะทำให้ $\gamma_1 A_1 ds_1 = \gamma_2 A_2 ds_2$ ดังนั้น

$$\frac{P_1}{\gamma_1} - \frac{P_2}{\gamma_2} + q = \left(\alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + u_2 \right) - \left(\alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + u_1 \right) \quad (2.19)$$

หรือ

$$\left(\frac{P_1}{\gamma_1} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + u_1 \right) + q = \left(\frac{P_2}{\gamma_2} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + u_2 \right) \quad (2.20)$$

เรียกค่า $\frac{P}{\gamma}$ ว่า เสดความดัน (Pressure head)

สมการที่ (2.20) นี้ สามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งของเหลว แก๊ส และไอ นอกจากนี้ยังใช้ได้ทั้งของไหลสถิตและของไหลจริงที่คิดความเสียดทาน แต่มีข้อแม้ว่าต้องเป็นการไหลแบบคงตัวเท่านั้น

สำหรับการไหลแบบคงตัวของของไหลที่อัดตัวไม่ได้ ซึ่งมีค่าน้ำหนักจำเพาะคงที่ $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$ นั้น ถ้าความเสียดทานจากการไหลเพิ่มขึ้นจะทำให้การไหลเป็นแบบปั่นป่วน ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์ α เป็น 1 และหากสมมติว่าความร้อน q ถ่ายเทในอัตราที่จะทำให้อุณหภูมิคงที่แล้วพลังงานภายในก็จะมีค่าคงที่ด้วย $u_1 = u_2 = u$ ซึ่งถือว่าการไหลเป็นแบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal flow) จึงได้ว่า

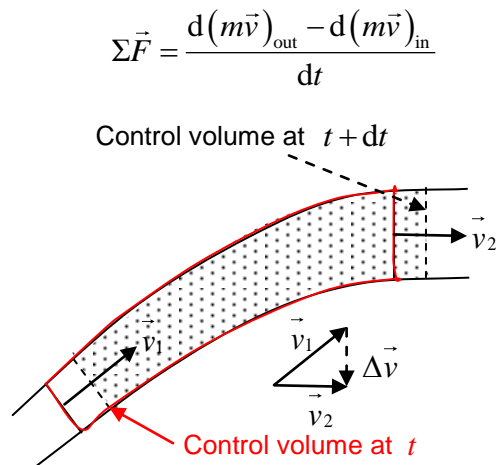
$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (2.21)$$

เรียกสมการที่ (2.21) ว่าสมการเบอร์นูลลี ซึ่งตั้งกล่าวนี้นี้ตั้งขึ้นเพื่อเป็นเกียรติแก่ แดเนียล เฮอร์นูลลี (Daniel Bernoulli) ซึ่งได้เสนอผลงานเรื่องนี้ในปี ค.ศ. 1738 โดยเป็นสมการพลังงานกลสำหรับการ

ไหลไปตามเส้นกระแส ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่คำนึงถึงความหนืด มีการไหลเป็นแบบคงตัวโดยไม่มีการยุบหรืออัดตัว และมีความเร็วสม่ำเสมอตลอดภาคตัดขวางของการไหล

3) สมการโมเมนตัม

ในการไหลที่มีแรงกระทำเข้ามาเกี่ยวข้อง อันเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วของของไหล ทั้งขนาดและทิศทาง โดยการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมจะเกิดในทิศทางเดียวกับแรงที่มากระทำ



รูปที่ 2.5 แสดงทิศทางการไหลของปริมาตรควบคุมที่เวลา t และ $t + dt$

จากรูปที่ 2.5 จะได้ว่า

$$\Sigma \vec{F} = \frac{d(\rho_2 A_2 ds_2 \vec{v}_2) - d(\rho_1 A_1 ds_1 \vec{v}_1)}{dt}$$

$$\Sigma \vec{F} = \rho_2 Q_2 \vec{v}_2 - \rho_1 Q_1 \vec{v}_1$$

จากสมการความต่อเนื่องของการไหลแบบคงตัว จะได้

$$\rho Q = \rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2$$

นั่นคือ

$$\Sigma \vec{F} = \rho Q (\vec{v}_2 - \vec{v}_1) = \rho Q \Delta \vec{v} \quad (2.22)$$

สมการที่ (2.22) นี้ เรียกว่า สมการโมเมนตัม มักถูกนำไปใช้งานร่วมกับสมการอนุรักษ์พลังงานและสมการความต่อเนื่องของการไหล เนื่องจากสมการโมเมนตัมจะแสดงความสัมพันธ์ของแรงภายนอกที่กระทำต่อของไหลและการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมที่ภาคตัดทั้งสองด้าน ดังนั้นสมการนี้จึงเหมาะสมสำหรับแก้ปัญหาเมื่อไม่ทราบข้อมูลการไหลในปริมาตรควบคุม ดังนั้นก่อนนำสมการโมเมนตัมไปใช้ต้องทำการกำหนดปริมาตรควบคุมก่อน ซึ่งขอบเขตของปริมาตรควบคุมนี้สามารถ

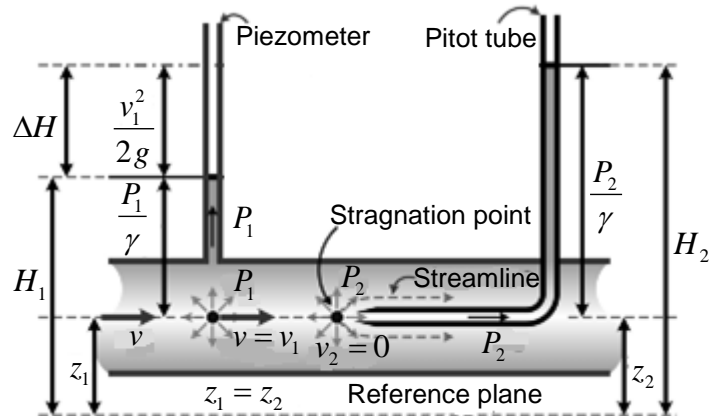
ขยายไปจนถึงบริเวณภาคตัดขวางที่มีการไหลแบบเอกภาพได้ แล้วจึงพิจารณาถึงแรงภายนอกที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม แล้วใช้สมการโมเมนตัมหาค่าที่ต้องการทราบต่อไป

โดยทั่วไป จะใช้สมการโมเมนตัมหาค่าแรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นที่ขอบเขตของช่วงการไหล (Flow passage) ที่มีการเปลี่ยนขนาดหรือทิศทางการไหล หรือมีการเปลี่ยนทั้งขนาดและทิศทางการไหล ปัญหาชนิดนี้ ได้แก่ การไหลในท่อ การขับเคลื่อนของเจ็ต (Jet propulsion) และโมเมนตัมของใบพัดชนิดต่างๆ เป็นต้น

2.1.5 การวัดอัตราการไหลของของไหล [7-10]

อัตราการไหลเป็นปริมาณหนึ่งที่ต้องวัด เพื่อช่วยให้ทราบปริมาณของของไหลที่ถูกใช้ในช่วงขั้นตอนการผลิตต่างๆ ทำให้สะดวกในการควบคุมปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดำเนินการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ อุปกรณ์หรือเครื่องมือที่จะนำมาใช้ในการวัดอัตราการไหลของของไหลมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน การใช้งานให้ได้ประสิทธิภาพก็อยู่ภายใต้เงื่อนไขอันจำกัดและขอบเขตที่กำหนดไว้ของเครื่องมือแต่ละชนิด ดังนั้นผู้ใช้งานจำเป็นต้องทราบขอบเขตของงานที่จะใช้และรู้จักเครื่องมือวัดเป็นอย่างดี จึงจะสามารถเลือกใช้ได้อย่างถูกต้อง เหมาะสม และเกิดประสิทธิภาพในการวัดสูงสุด คุ่มค่าแก่การลงทุน โดยเครื่องมือวัดอัตราการไหลส่วนใหญ่ มิได้วัดค่าอัตราการไหลโดยตรง แต่จะใช้วิธีการวัดค่าตัวแปรของการไหลตัวอื่นแทน เช่น ความเร็วของของไหล หรือ ความดันแตกต่างในระหว่างการไหล แล้วนำมาคำนวณเป็นค่าอัตราการไหล เครื่องมือเหล่านี้บางชนิดก็สามารถวัดการไหลออกมาเป็นปริมาณโดยตรง ซึ่งมีหน่วยเป็นปริมาตรหรือมวลได้เลย บางชนิดก็วัดออกมาในรูปของอัตราการไหล โดยหน่วยที่วัดออกมาเป็นปริมาตรต่อเวลาหรือมวลต่อเวลา ซึ่งเครื่องมือวัดที่ใช้หลักการทำงานตามสมการเบอร์นูลลี ค่าของอัตราการไหลของของไหลไม่ว่าของไหลนั้นจะเป็นของเหลว แก๊ส หรือไอน้ำจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับค่าความดันแตกต่างที่ตกคร่อมเครื่องมือวัดนั้น โดยตัวอย่างของเครื่องมือวัดอัตราการไหลของของไหลที่มีหลักการทำงานตามสมการเบอร์นูลลี มีดังนี้

1) ท่อปีโตด (Pitot-static pressure probe)



รูปที่ 2.6 แสดงอุปกรณ์การวัดอัตราการไหลแบบท่อปีโตด [4]

จากรูปที่ 2.6 ท่อปีโตดจะวัดความดันสถิตและความดันจลน์ ดังนั้นระดับของเหลวในท่อจึงเป็นค่าของผลรวมระหว่างความดันสถิตกับความดันจลน์ ซึ่งก็คือความดันรวมของระบบ โดยการประยุกต์ใช้สมการเบอร์นูลลี จากสมการที่ (2.21)

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2$$

เมื่อแทนค่าเงื่อนไขขอบเขตของระบบ ($v_2 = 0$ และ $z_1 = z_2$) จะได้ว่า

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma}$$

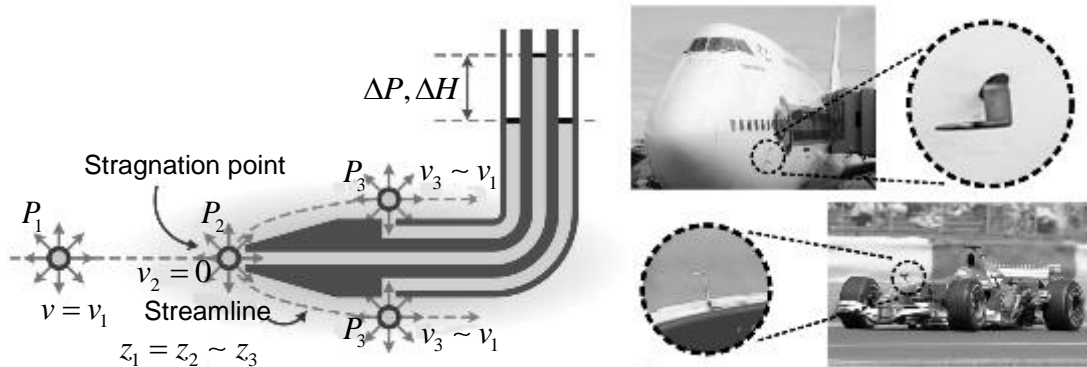
เพื่อให้พิจารณาได้ง่ายขึ้น จึงกำหนดให้ $H = \frac{P}{\gamma}$ เป็นค่าเสดความดัน

จะได้ความสัมพันธ์ของค่าความเร็วการไหลของของไหลดังสมการ

$$v = v_1 = \sqrt{2g(H_2 - H_1)} = \sqrt{2g\Delta H} \quad (2.23)$$

แต่เนื่องจากค่าของความเร็วที่ได้จากสมการที่ (2.23) จะไม่ตรงกับความเป็นจริง ดังนั้นจะต้องมีการปรับแก้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วของท่อปีโตด (C_p) ดังนั้น

$$v_{\text{real}} = C_p \sqrt{2g\Delta H} \quad (2.24)$$

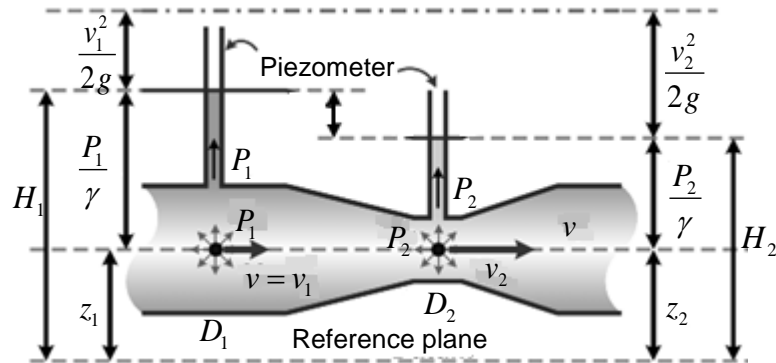


รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างอุปกรณ์ที่ใช้หลักการของท่อปีโตวัดความเร็วของของไหล [4]

- **ลักษณะการใช้งานของท่อปีโต** (ดังแสดงในรูปที่ 2.7)
 - หาค่าความเร็วการไหลของของไหลจากการวัดความดันแตกต่างกัน
 - ใช้ในการวัดความเร็วของของไหลในท่อหรือในอุโมงค์ลม
 - เป็นการวัดความเร็วเฉลี่ยของลำของไหล (Mean flow velocity)
 - ปลายที่ใช้วัดจะถูกสอดเข้าไปในส่วนกลางของท่อที่บรรจุของไหล
 - ใช้วัดความเร็วของอากาศยาน
- **ข้อดีของท่อปีโต**
 - ราคาถูก
 - ติดตั้งง่าย
 - มีผลกระทบกับการไหลน้อย
 - ความดันสูญเสียจากการไหลผ่านหัววัดต่ำ (Less energy consumption)
- **ข้อด้อยของท่อปีโต**
 - มีการตอบสนองไวต่อแนวการไหล เพราะเป็นอุปกรณ์ประเภทกีดขวางการไหล
 - ความเที่ยงตรง $\pm 5\%$ ค่าความผิดพลาดอาจมากขึ้น หาก Velocity profile ของลำการไหลเปลี่ยนแปลง
 - ไม่เหมาะกับการวัดความเร็วของสารที่มีความสกปรกหรือมีความหนืดมาก เพราะอาจทำให้เกิดการอุดตันของท่อปีโต
 - ไม่เหมาะสมกับการไหลที่ค่า Re มากกว่า 500

2) ท่อเวนจูรี (Venturi meter)

ท่อเวนจูรี คือ อุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นท่อลดขนาด ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลของของไหลหรือความเร็วของของไหล โดยอาศัยหลักการของการเปลี่ยนแปลงความเร็วและความดันบริเวณคอขวด



รูปที่ 2.8 แสดงอุปกรณ์วัดการไหลแบบท่อเวนจูรี [4]

จากรูปที่ 2.8 พิจารณาดำแหน่งที่ 1 เทียบกับตำแหน่ง 2 ด้วยสมการเบอร์นูลลี โดยแทนค่าเงื่อนไขขอบเขตของระบบ ($z_1 = z_2$) เมื่อ H_1 และ H_2 เป็นเฮดความดันที่ตำแหน่งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จะได้ว่า

$$H_1 + \frac{v_1^2}{2g} = H_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

จากสมการที่ (2.10) จะได้ว่า $v_2 = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 v_1$ โดย D_1 และ D_2 เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ณ ตำแหน่งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ นั่นคือ ความเร็วการไหลของของไหลในท่อมักจะเป็น

$$v = v_1 = \sqrt{\frac{2g(H_2 - H_1)}{\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^4 - 1}} = \sqrt{\frac{2g\Delta H}{\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^4 - 1}} \quad (2.25)$$

แต่เนื่องจากค่าของความเร็วที่ได้จากสมการที่ (2.25) จะไม่ตรงกับความเป็นจริง ดังนั้นจะต้องมีการปรับแก้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความเร็ว (C_v)

$$v_{real} = C_v \sqrt{\frac{2g\Delta H}{\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^4 - 1}} = C_w \sqrt{2g\Delta H} \quad (2.26)$$

เมื่อ C_w คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของมาตรวัดแบบเวนจูรี ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{C_v}{\sqrt{\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^4 - 1}}$

- ลักษณะการใช้งานของท่อเวนจูรี

- เป็นอุปกรณ์การวัดแบบจำกัดการไหล
- หาค่าความเร็วของของไหลจากการวัดความดันแตกต่าง
- ใช้ติดตั้งระหว่างหน้าแปลน
- ใช้สำหรับการไหลที่มีค่า R_D ไม่ต่ำกว่า 200,000

- ข้อดีของท่อเวนจูรี

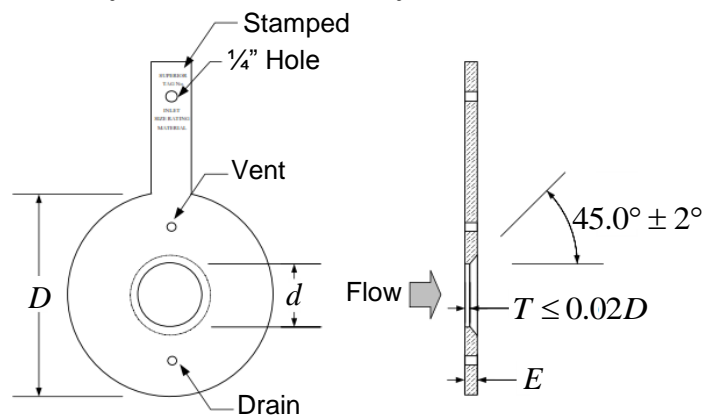
- ความดันตกคร่อมไม่มากนัก เนื่องจากการไหลผ่านนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดแบบค่อยเป็นค่อยไป ทำให้การเปลี่ยนแปลงความเร็วเกิดขึ้นช้า
- ระบบไม่ต้องใช้พลังงานจำนวนมากในการส่งของไหล
- มีความแม่นยำ
- มีค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยสูงกว่า 0.95

- ข้อด้อยของท่อเวนจูรี

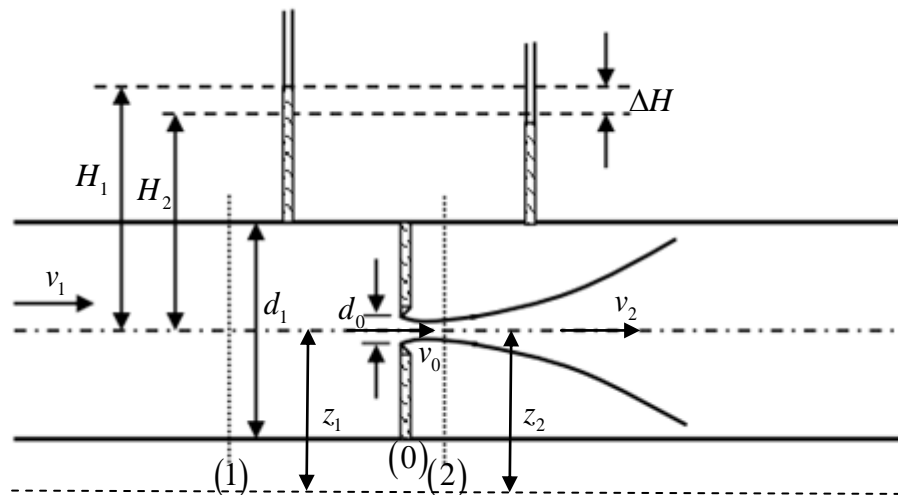
- ราคาแพง
- ต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งมาก
- ต้องทำการติดตั้งแทรกในระบบการไหล
- ไม่ควรใช้กับการไหลที่มีค่า R_D น้อยกว่า 200,000

3) แผ่นออริฟิซ (Orifice plate)

แผ่นออริฟิซ คือ อุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นซึ่งมีการเจาะรูหรือทำเป็นช่องแคบ (ดังแสดงในรูปที่ 2.9) นำไปติดตั้งไว้ในท่อที่ของไหลไหลผ่าน ทำให้เกิดเป็นการจำกัดการไหลขึ้น โดยมีความดันแตกต่างระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นออริฟิซ ซึ่งค่าความดันแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้ จะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของของไหลและขนาดของช่องที่ของไหลไหลผ่าน ค่าของความดันแตกต่างที่ได้สามารถใช้คำนวณการไหลผ่านรูเจาะได้ด้วยสมการเบอร์นูลลี ดังนี้



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์วัดการไหลแบบแผ่นออริฟิซ [9]



รูปที่ 2.10 แสดงการวัดการไหลโดยใช้แผ่นออริฟิซ [7-8]

จากรูปที่ 2.10 กำหนดให้

$$A_1 = \text{พื้นที่หน้าตัดการไหลที่จุด (1)} = \frac{\pi d_1^2}{4}$$

$$A_0 = \text{พื้นที่หน้าตัดรูเจาะของแผ่นออริฟิซ} = \frac{\pi d_0^2}{4}$$

$$A_2 = \text{พื้นที่หน้าตัดการไหลหลังจากผ่านรูเจาะของแผ่นออริฟิซมาแล้ว โดยจะมีค่าน้อยกว่า } A_0 \text{ เนื่องจากหน้าตัดการไหลจะมีสภาพกึ่งตัวลง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Vena contracta ซึ่งไม่สะดวกในการหาค่า แต่อาศัยการเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์กับ } A_0 \text{ ได้ว่า } A_2 = C_c A_0 \text{ (เมื่อ } C_c \text{ คือ สัมประสิทธิ์การหดตัวของ การไหล (Contraction coefficient))}$$

พิจารณาค่าแห่งที่ 1 เทียบกับค่าแห่งที่ 2 ด้วยสมการเบอร์นูลลี โดยแทนค่าเงื่อนไขขอบเขตของระบบ ($z_1 = z_2$) เมื่อ H_1 และ H_2 เป็นเฮดความดันที่ตำแหน่งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จะได้ว่า

$$H_1 + \frac{v_1^2}{2g} = H_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

จากสมการที่ (2.10) จะได้

$$v_2 = \frac{A_0}{A_2} v_0 = \frac{A_0}{C_c A_0} v_0 = \frac{v_0}{C_c}$$

และ

$$v_1 = \frac{A_2}{A_1} v_2 = \frac{C_c A_0}{A_1} \frac{v_0}{C_c} = \frac{A_0}{A_1} v_0$$

ดังนั้น

$$H_1 + \frac{1}{2g} \left(\frac{A_0}{A_1} v_0 \right)^2 = H_2 + \frac{1}{2g} \left(\frac{v_0}{C_c} \right)^2$$

นั่นคือ

$$v_0 = \frac{\sqrt{2g(H_2 - H_1)}}{\sqrt{\left[\frac{1}{C_c^2} - \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2\right]}} = \frac{\sqrt{2g\Delta H}}{\sqrt{\left[\frac{1}{C_c^2} - \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2\right]}} \quad (2.27)$$

แต่เนื่องจากค่าของความเร็วที่ได้จากสมการ (2.27) จะไม่ตรงกับความเป็นจริง ดังนั้นจะต้องมีการปรับแก้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความเร็ว (C_v)

$$v_{real} = C_v \frac{\sqrt{2g\Delta H}}{\sqrt{\left[\frac{1}{C_c^2} - \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2\right]}} = C_o \sqrt{2g\Delta H} \quad (2.28)$$

เมื่อ C_o คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของมาตรวัดแบบแผ่นอริฟิซ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{C_v}{\sqrt{\frac{1}{C_c^2} - \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2}}$

- **ลักษณะการใช้งานของแผ่นอริฟิซ**

- เป็นอุปกรณ์การวัดแบบจำกัดการไหล
- หาค่าความเร็วการไหลของของไหลจากการวัดความดันแตกต่าง
- ใช้ได้ทั้งกับของเหลวและแก๊ส
- ใช้ติดตั้งระหว่างหน้าแปลน
- มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย

- **ข้อดีของแผ่นอริฟิซ**

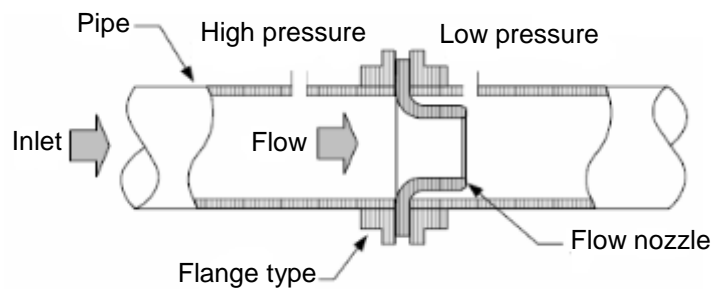
- ราคาถูก
- โครงสร้างไม่ซับซ้อน
- ติดตั้งง่าย
- ใช้ได้ทั้งกับของเหลวและแก๊ส

- **ข้อด้อยของแผ่นอริฟิซ**

- มีการสูญเสียความดันมาก
- เกิดผลกระทบจากการกีดขวางการไหลบางส่วน
- ต้องทำการติดตั้งแทรกในระบบการไหล
- ต้องใช้ช่วงความยาวของท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่มาก ก่อนที่ของไหลจะผ่านแผ่นอริฟิซ
- ไม่ควรใช้กับการไหลที่มีค่า R_D น้อยกว่า 100,000
- ระบบต้องใช้พลังงานจำนวนมากในการส่งของไหล

4) มาตรฐานหัวฉีด (Nozzle)

มาตรฐานหัวฉีดเป็นเครื่องวัดการไหลที่สร้างขึ้นคล้ายรูปทรงกระบอกที่มีปลายด้านหน้าผายออก ในการต่อใช้งานจะใช้ด้านที่ผายออกนี้ต่อเข้ากับหน้าแปลน ด้วยการออกแบบให้โค้งอย่างประณีต ของไหลจึงผ่านคอคอดนี้ไปได้โดยสะดวกโดยปราศจากการหดตัวเมื่อชนปากทางเข้า ดังนั้นจึงทำหน้าที่คล้ายกับกรวยไหลเข้า (Entrance cone) ขณะเดียวกันก็สามารถทำให้เกิดความดันตกคร่อมที่ตัวมันเองได้ตามทฤษฎีของเบอร์นูลลี ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของของไหลแบบหัวฉีด [9]

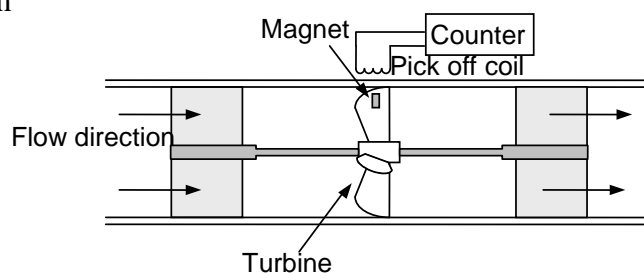
- **ลักษณะการใช้งานของมาตรฐานหัวฉีด**
 - เป็นอุปกรณ์การวัดแบบจำกัดการไหล
 - หาค่าความเร็วการไหลของของไหลจากการวัดความดันแตกต่าง
 - ใช้ได้ทั้งกับของเหลวและแก๊ส
 - ใช้ติดตั้งระหว่างหน้าแปลน
 - เหมาะสำหรับของไหลที่มีความเร็วของของไหลสูง
 - มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย
- **ข้อดีของมาตรฐานหัวฉีด**
 - ราคาถูก
 - ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย
 - มีความถูกต้องและแม่นยำ
 - โครงสร้างไม่ซับซ้อน
 - ทนต่อการกัดกร่อนเสียดสีได้ดี
 - ให้ค่าการไหลสูงกว่าแบบแผ่นออร์ฟิซถึงร้อยละ 65
 - ใช้ได้ทั้งกับของเหลวและแก๊ส

- ข้อดีของมาตรหัวฉีด
 - ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง
 - ไม่เหมาะกับของไหลที่มีสารแขวนลอยอยู่
 - ต้องทำการติดตั้งแทรกในระบบการไหล
 - ระบบต้องใช้พลังงานในการส่งของไหลมากกว่าแบบท่อเวนจูรี

นอกจากเครื่องมือวัดอัตราการไหลของของไหลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังมีเครื่องมือที่ใช้หลักการอื่น นอกจากหลักการของเบอร์นูลลีอีก เช่น

1) เครื่องวัดการไหลแบบกังหัน (Turbine flow meter)

อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของของไหลชนิดนี้มีใบพัดทำมุมเฉียงกับทิศทางของการไหล ขณะที่ของไหลไหลผ่านจะทำให้ใบพัดหมุนไปตามอัตราและทิศทางของการไหล โดยความเร็วในการหมุนมีค่าแปรผันตรงกับความเร็วยของของไหลของของเหลวภายในท่อ ตัวโครง (Housing) มีขดลวด (Pick off coil) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแกนที่อยู่ภายใน ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เมื่อใบพัดที่มีแผ่นแม่เหล็กถาวรขนาดเล็กติดตั้งไว้ที่ปลายใบกังหันหรือติดตั้งไว้ที่เพลาของกังหันหมุนผ่านแกนของขดลวด จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ขึ้นลงของแกนภายในขดลวด ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเปลี่ยนแปลงตาม หากต่อขดลวดดังกล่าวเข้ากับวงจรไฟฟ้า สามารถสร้างเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น และส่งเป็นสัญญาณพัลส์ให้กับวงจรรับ โดยพัลส์ที่เกิดขึ้นเป็นไปตามอัตราการไหลของของไหล ซึ่งค่าอัตราการไหลของของไหลหาได้จากค่าที่นับได้ผ่านวงจรรับต่อหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งสามารถกำหนดหน่วยอัตราการไหลของของไหลได้เป็น $\frac{\text{pulse}}{\text{cc}}$ หรือ $\frac{\text{pulse}}{\text{m}^3}$ หรือหน่วยอื่น



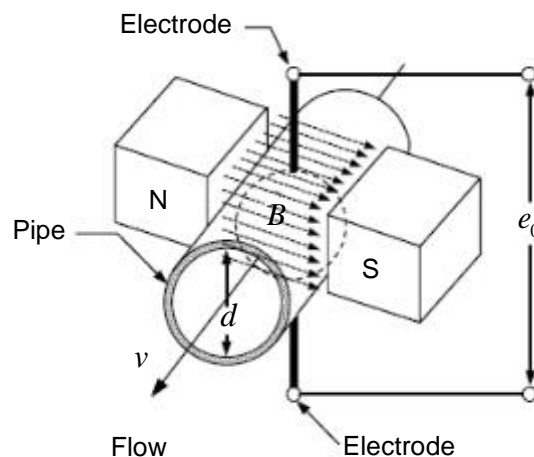
รูปที่ 2.12 แสดงเครื่องวัดการไหลแบบกังหัน [9]

- ลักษณะการใช้งานของเครื่องวัดการไหลแบบกังหัน
 - เป็นอุปกรณ์การวัดแบบกีดขวางการไหล
 - หาค่าความเร็วการไหลของของไหลจากการวัดความเร็วรอบของกังหัน
 - แปลงค่าอัตราการไหลเป็นสัญญาณไฟฟ้า
 - มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย

- ข้อดีของเครื่องวัดการไหลแบบกังหัน
 - มีความไวในการตรวจวัดสูง
 - มีย่านการวัดกว้าง
 - มีความถูกต้องและแม่นยำสูง
- ข้อด้อยของเครื่องวัดการไหลแบบกังหัน
 - ราคาแพง
 - ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง
 - ทำให้ความดันในท่อลดลง
 - ต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์การวัดแทรกในระบบการไหล
 - สัมผัสกับของไหลโดยตรง ทำให้เกิดการรบกวนการไหล
 - ต้องใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่น เช่น วงจรนับ

2) เครื่องวัดการไหลแบบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic flow meter)

อุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิดนี้อาศัยหลักการเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux) มาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบอัตราการไหลของของเหลว โดยให้ของเหลวที่มีไอออน (Ion) ทำหน้าที่เหมือนเป็นตัวนำไฟฟ้า ไหลผ่านเส้นแรงแม่เหล็ก จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) เมื่อตัวนำเคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก (Magnetic field) จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced electromotive force) คร่อมที่ปลายตัวนำนั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความเร็วของตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงเครื่องวัดการไหลแบบแม่เหล็กไฟฟ้า [9]

จากกฎของฟาราเดย์สามารถนำมาสร้างเครื่องมือที่ใช้หาค่าความเร็วของของไหลประเภทตัวนำไฟฟ้าได้ โดยการวัดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น หรือเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$e_0 = Bdv \quad (2.29)$$

เมื่อ	e_0	คือ	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
	B	คือ	ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก
	d	คือ	ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (Electrode) หรือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ
	v	คือ	ความเร็วการไหลเฉลี่ยของของเหลว

- **ลักษณะการใช้งานของเครื่องวัดการไหลแบบแม่เหล็กไฟฟ้า**

- เป็นอุปกรณ์การวัดแบบไม่รบกวนการไหล
- หาค่าความเร็วการไหลของของไหลจากการวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า
- แปลงค่าอัตราการไหลเป็นสัญญาณไฟฟ้า
- มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย
- เหมาะกับการวัดในกระบวนการผลิต เช่น การส่งจ่ายซีเมนต์เหลว อาหารบด และอุตสาหกรรมหลอมโลหะ

- **ข้อดีของเครื่องวัดการไหลแบบแม่เหล็กไฟฟ้า**

- มีความไวในการตรวจวัดสูง
- มีย่านการวัดกว้าง
- มีความถูกต้องและแม่นยำสูง
- โครงสร้างเรียบง่าย ไม่ซับซ้อน แข็งแรง และทนทาน
- ไม่ทำให้ความดันในท่อลดลง
- ปราศจากผลกระทบต่อของเหลวที่ไหลอยู่ภายในท่อ

- **ข้อด้อยของเครื่องวัดการไหลแบบแม่เหล็กไฟฟ้า**

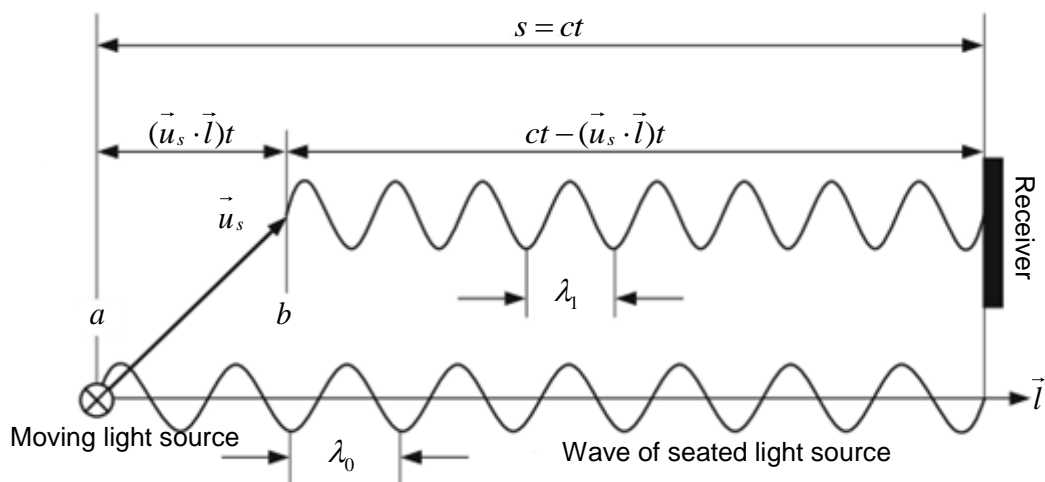
- ราคาแพง
- ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง
- ใช้ได้กับของเหลวประเภทตัวนำไฟฟ้าเท่านั้น
- ของไหลต้องไหลเต็มท่อ
- อาจเกิดปัญหาเรื่องสัญญาณไฟฟ้ารบกวนเกิดขึ้น
- ต้องใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่น เช่น วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า

จะเห็นได้ว่าเครื่องมือที่มีอยู่ในปัจจุบันดังที่กล่าวมาข้างต้น ส่วนใหญ่มีการรบกวนของไหล หรือ มิฉะนั้นก็มีเงื่อนไขเฉพาะทำให้การวัดเป็นไปได้อย่างจำกัด เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวนี้ วิธี LDA ที่

อาศัยปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจยิ่ง โดยมีหลักการพื้นฐาน ดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.2 ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ของแสง [2]

ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ของแสง เป็นปรากฏการณ์ที่แสงมีความถี่เปลี่ยนแปลงไปจากความถี่ต้นกำเนิด เนื่องจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างแหล่งกำเนิดแสง (Light source) กับผู้สังเกต (Receiver) ทั้งจากการเคลื่อนที่ของแหล่งกำเนิดแสง การสะท้อนของแสงจากวัตถุที่เคลื่อนที่ หรือการเคลื่อนที่ของผู้สังเกต โดยสามารถพิจารณาได้ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ ดังนี้



รูปที่ 2.14 แสดงปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ของแสงเนื่องจากการเคลื่อนที่ของแหล่งกำเนิดแสง [2]

จากรูปที่ 2.14 ในตอนเริ่มต้นนั้นแหล่งกำเนิดแสงอยู่ห่างจากผู้สังเกตเป็นระยะทาง s โดยแสงจะใช้เวลาเดินทางถึงผู้สังเกตผ่านระยะทางนี้เป็นเวลา $t = \frac{s}{c}$ เมื่อ c เป็นความเร็วของแสง เพื่อสะดวกต่อการพิจารณาจึงกำหนดให้แสงที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดเป็นเอกรงค์ (Monochrome) คือ มีความยาวคลื่นค่าเดียวเท่ากับ λ_0 เมื่อแหล่งกำเนิดแสงไม่มีการเคลื่อนที่ จำนวนลูกคลื่นของแสงบนเส้นทาง s จึงมีค่าเป็น $\frac{s}{\lambda_0} = \frac{ct}{\lambda_0}$ ต่อมาเมื่อแหล่งกำเนิดแสงเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว \vec{u}_s เข้าหาผู้สังเกต ขณะที่ผู้สังเกตอยู่นิ่งกับที่ จำนวนลูกคลื่นของแสงที่แหล่งกำเนิดแสงปล่อยออกมาจึงมีค่าเป็น $\frac{ct - (\vec{u}_s \cdot \vec{l})t}{\lambda_1}$ เนื่องจากความเร็วของแสงไม่ขึ้นกับการเคลื่อนที่ของแหล่งกำเนิดแสง ภายในช่วงเวลา t ที่แสงเดินทางไปเป็นระยะ s นั้น แหล่งกำเนิดแสงก็เคลื่อนที่จากระนาบ a ไปยังระนาบ b เช่นกัน ทำให้เส้นทางที่แสงเดินทางถูกบีบอัดลงเหลือเพียง $ct - (\vec{u}_s \cdot \vec{l})t$ เท่านั้น นั่นคือ ความยาวคลื่นของแสงจะ

หดสั้นลงกลายเป็น $\lambda_1 = \left(1 - \frac{\vec{u}_s \cdot \vec{l}}{c}\right) \lambda_0$ เพราะจำนวนลูกคลื่นที่ถูกปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดภายในช่วงเวลา t ต้องมีค่าเท่าเดิม

จากความเร็วของแสงในตัวกลางเดิมย่อมมีค่าเท่าเดิม หรือ $c = f_0 \lambda_0 = f_1 \lambda_1$ เมื่อ f_1 คือ ความถี่ของแสงที่ผู้สังเกตได้รับได้เมื่อแหล่งกำเนิดแสงเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$f_1 = \frac{f_0}{1 - \frac{(\vec{u}_s \cdot \vec{l})}{c}} \quad (2.30)$$

ปรากฏการณ์ที่ความถี่ของแสงที่ผู้สังเกตได้รับเลื่อนไปจากความถี่เดิม (f_0) ที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง เรียกว่า ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ โดยขึ้นอยู่กับความเร็วที่สัมพัทธ์ระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและผู้สังเกต

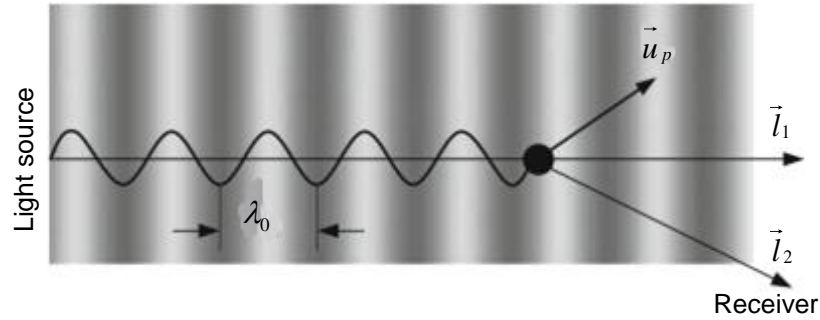
ในกรณีที่ $\frac{(\vec{u}_s \cdot \vec{l})}{c} \ll 1$ สมการที่ (2.30) จะเขียนได้เป็น

$$f_1 = f_0 \left(1 + \frac{\vec{u}_s \cdot \vec{l}}{c}\right) \quad (2.31)$$

สมการที่ (2.30) และ (2.31) ได้จากเงื่อนไขที่ว่า แหล่งกำเนิดแสงเคลื่อนที่ในขณะที่ผู้สังเกตอยู่นิ่ง แต่ในกรณีที่แหล่งกำเนิดแสงอยู่นิ่งในขณะที่ผู้สังเกตเคลื่อนที่นั้น สามารถพิจารณาได้ว่าสมมูลกันเมื่อใช้ทฤษฎีสัมพัทธภาพ โดยกำหนดให้ความเร็วของผู้สังเกตที่เคลื่อนที่เป็น $\vec{u}_r = -\vec{u}_s$ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (2.31) จึงได้ว่าความถี่ของแสงที่ผู้สังเกตได้รับได้ เขียนได้เป็น

$$f_1 = f_0 \left(1 - \frac{\vec{u}_r \cdot \vec{l}}{c}\right) \quad (2.32)$$

สำหรับวิธีการของ LDA มักกำหนดให้แหล่งกำเนิดแสง (Laser source) และหัววัดแสง (Photodetector) อยู่นิ่ง แล้วทำการวัดแสงซึ่งกระเจิงออกมาจากอนุภาคเล็กๆ ที่แขวนลอยอยู่ในของไหล และกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่มีทิศทางและขนาดเป็นไปตามทิศและอัตราเร็วของไหล



รูปที่ 2.15 แสดงปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ของแสงในระบบการวัดของ LDA [2]

จากรูปที่ 2.15 เมื่ออนุภาคที่มีความเร็ว \vec{u}_p เคลื่อนที่ตัดผ่านแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความถี่เป็น f_0 ความถี่ของแสงที่ตกกระทบลงบนอนุภาคจะเลื่อนไปจากเดิมเป็น f_1 ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (2.32) ด้วยการแทนค่า $\vec{u}_r = \vec{u}_p$ และ $\vec{l} = \vec{l}_1$ แสงที่กระเจิงจากอนุภาคมายังหัววัดซึ่งอยู่นิ่งในทิศทาง \vec{l}_2 นั้นจะมีความถี่เลื่อนไปเป็น f_2 ด้วยผลของปรากฏการณ์ดอปเพลอร์

ความสัมพันธ์ระหว่าง f_1 และ f_2 เป็นไปตามสมการที่ (2.31) โดย

$$f_2 = f_1 \left(1 + \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_2}{c} \right) \quad (2.33)$$

เมื่อรวมสมการที่ (2.32) และ (2.33) เข้าด้วยกันจะได้

$$f_2 = f_0 \left(1 - \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_1}{c} \right) \left(1 + \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_2}{c} \right) \quad (2.34)$$

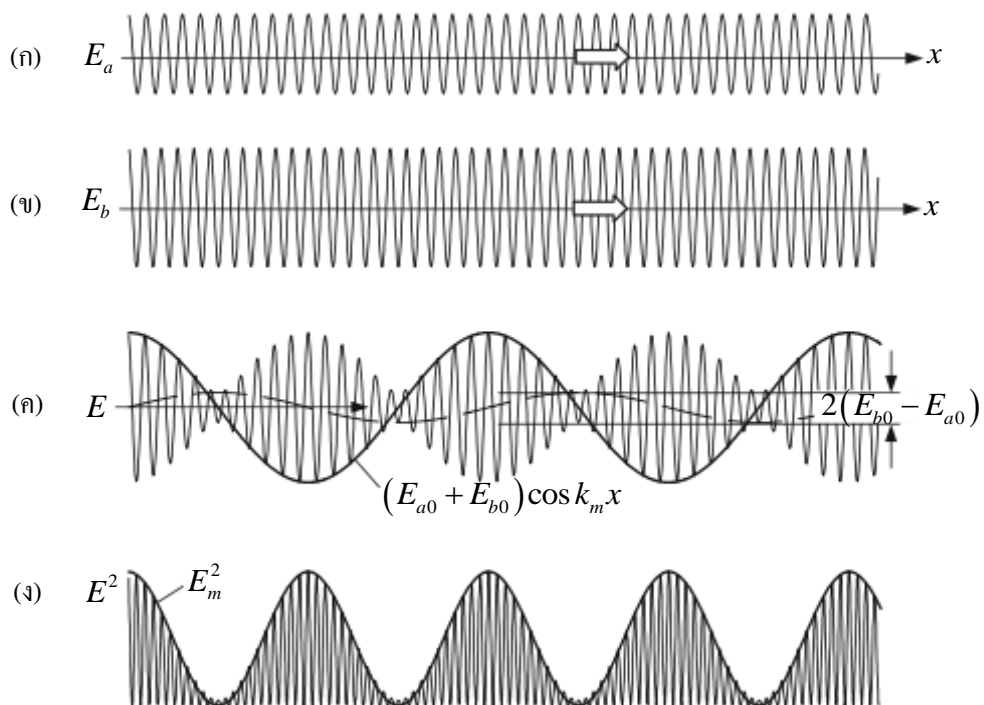
สมการที่ (2.34) เป็นสมการพื้นฐานในหลักการของ LDA โดยความถี่ที่เลื่อนไปเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วของอนุภาคภายในของเหลว ซึ่งเท่ากับความเร็วของของไหลนั่นเอง เนื่องจากความเร็วของของไหลมีค่าน้อยกว่าความเร็วแสงอยู่มาก กล่าวคือ $\frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_1}{c} \ll 1$ และ $\frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_2}{c} \ll 1$ ดังนั้น

$$f_2 \approx f_0 \left(1 - \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_1}{c} + \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_2}{c} \right) \quad (2.35)$$

จะเห็นว่าความถี่ f_2 มีค่าใกล้เคียงกับ f_1 จึงเป็นการยากที่จะวัดโดยใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่ทั่วไปตามห้องปฏิบัติการ ดังนั้นการใช้ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์เพื่อวัดการไหลในปัจจุบันจึงนิยมใช้วิธีการวัดจากความถี่บีต (Beat frequency) ซึ่งสามารถทำการวัดได้ง่ายกว่า และมีประสิทธิภาพสูงกว่ามาก ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.3 การแทรกสอดกันของแสง [2]

การใช้ปรากฏการณ์คือปเฟลอร์เพื่อวัดการไหลโดยใช้วิธีการวัดจากความถี่บีต อาศัยหลักการซ้อนทับกันของแสง ซึ่งมีความถี่ที่เลื่อนไปแตกต่างกันด้วยปรากฏการณ์คือปเฟลอร์ การซ้อนทับกันของแสง 2 ลำ ที่มีความถี่ต่างกัน ถูกเรียกว่า การแทรกสอดของแสง (Optical interference) เป็นปรากฏการณ์ที่คลื่นแสงมาซ้อนทับกัน โดยผลลัพธ์ของการรวมคลื่นจะหาได้จากการรวมกันแบบพีชคณิตโดยตรง ซึ่งการรวมคลื่นมีทั้งการรวมแบบเสริมกันและแบบหักล้างกัน เมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงหลายแหล่งจะเกิดการรวมคลื่นเสมอ แต่อาจไม่เห็นผลของการแทรกสอดเนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงต่างเป็นอิสระจากกัน ทำให้ความต่างเฟสของแสงจากแต่ละแหล่งไม่คงที่และเปลี่ยนไปตามเวลา (ซึ่งเร็วมาก) จึงไม่เห็นผลของการแทรกสอด ดังนั้นเงื่อนไขสำคัญเพื่อสังเกตผลของการแทรกสอดด้วยตาเปล่า ก็คือความต่างเฟสที่คงตัว แม้ว่าเฟสของคลื่นอาจเปลี่ยนตามเวลา แต่แหล่งกำเนิดต้องมีความต่างเฟสคงที่ เรียกว่า แหล่งกำเนิดอาพันธ์ (Coherent) และแหล่งกำเนิดแสงนั้นควรจะมีสีเดียวหรือเป็นเอกรงค์ เพื่อความสะดวกในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะกรณีคลื่นระนาบ (Plane wave) ซึ่งกำลังเคลื่อนที่ไปในทิศทางตามแกน x ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงการรวมกันของคลื่นแสง 2 ขบวน [2]

กำหนดให้ความถี่และแอมพลิจูด (Amplitude) ของแสง a และ b มีค่าแตกต่างกันและเป็นดังนี้

$$E_a = E_{a0} \cos(\omega_a t - k_a x) \quad (2.36)$$

$$E_b = E_{b0} \cos(\omega_b t - k_b x) \quad (2.37)$$

ผลรวมของแสง a และ b จึงมีค่าเป็น

$$E = E_{a0} \cos(\omega_a t - k_a x) + E_{b0} \cos(\omega_b t - k_b x) \quad (2.38)$$

$$E = E_{a0} [\cos(\omega_a t - k_a x) + \cos(\omega_b t - k_b x)] + (E_{b0} - E_{a0}) \cos(\omega_b t - k_b x)$$

โดยใช้สมบัติทางตรีโกณมิติ $\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{(\alpha + \beta)}{2} \cos \frac{(\alpha - \beta)}{2}$ จะได้

$$E = 2E_{a0} \cos\left(\frac{\omega_a + \omega_b}{2} t - \frac{k_a + k_b}{2} x\right) \cos\left(\frac{\omega_a - \omega_b}{2} t - \frac{k_a - k_b}{2} x\right) + (E_{b0} - E_{a0}) \cos(\omega_b t - k_b x)$$

กำหนดให้ความถี่ของการรวมคลื่น (Modulation frequency, ω_m) และเลขคลื่นของการรวมคลื่น (Modulation wavenumber, k_m) เป็นดังนี้

$$\bar{\omega} = \frac{\omega_a + \omega_b}{2}, \quad \omega_m = \frac{\omega_a - \omega_b}{2} \quad (2.39)$$

และ
$$\bar{k} = \frac{k_a + k_b}{2}, \quad k_m = \frac{k_a - k_b}{2} \quad (2.40)$$

จะได้

$$E = (E_{a0} + E_{b0}) \cos(\bar{\omega} t - \bar{k} x) \cos(\omega_m t - k_m x) + (E_{b0} - E_{a0}) \sin(\bar{\omega} t - \bar{k} x) \sin(\omega_m t - k_m x) \quad (2.41)$$

ตามรูปที่ 2.16 (ค) แอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นจากการซ้อนทับกัน (Superimposed wave) มีค่าเป็น $E_{a0} + E_{b0}$ ขณะที่แอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นรอง (Auxiliary wave) มีค่าเป็น $E_{b0} - E_{a0}$ ซึ่งมักจะถูกละทิ้งในกรณีที่แอมพลิจูดของคลื่นที่มาซ้อนทับกันนั้นมีค่าเท่ากัน

คลื่นหลักที่ได้จากการรวมคลื่นจึงมีแอมพลิจูดเป็น $E_m = (E_{a0} + E_{b0}) \cos(\omega_m t - k_m x)$ ซึ่งความเข้มแสงที่คนหรือหัววัดแสงรับรู้ได้นั้น จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นฟลักซ์ (Flux density) ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแอมพลิจูดคลื่นแสงยกกำลังสอง ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ง) และเขียนได้เป็น

$$E_m^2 = (E_{a0} + E_{b0})^2 \cos^2(\omega_m t - k_m x)$$

หรือ
$$E_m^2 = \frac{1}{2} (E_{a0} + E_{b0})^2 [1 + \cos 2(\omega_m t - k_m x)] \quad (2.42)$$

ความหนาแน่นฟลักซ์ซึ่งขึ้นกับ E_m^2 ต้นด้วยความถี่เชิงมุม (Angular frequency) $2\omega_m = \omega_a - \omega_b$ ซึ่งรู้จักกันในชื่อ ความถี่บีต

กล่าวได้ว่าเทคนิคการวัดโดยใช้ LDA นั้นทำการวัดและเปรียบเทียบความถี่บีตของความหนาแน่นฟลักซ์แทนการวัดความถี่จากปรากฏการณ์ดอปเพลอร์โดยตรง เพื่อคำนวณหาความเร็วการไหลเนื่องจากความถี่ที่เลื่อนไปโดยปรากฏการณ์ดอปเพลอร์อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าความถี่ของแสงจากแหล่งกำเนิดมากนั่นเอง

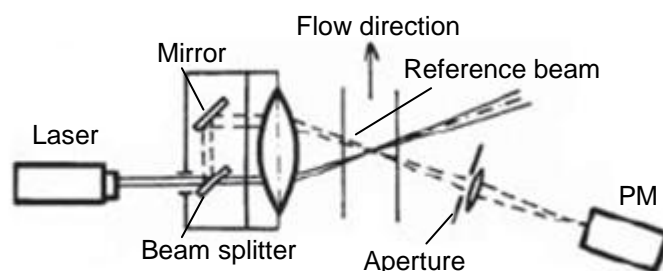
2.4 หลักการและเทคนิคของ LDA [1, 3]

จากหัวข้อที่ 2.2 และ 2.3 จะเห็นว่าหลักการสำคัญของการวัดความเร็วของไหลโดยใช้วิธี LDA มาจากปรากฏการณ์ดอปเพลอร์และการซ้อนทับกันของแสง ดังนั้นการจัดระบบ LDA เพื่อให้เกิดปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ โดยทั่วไปมีรูปแบบ 3 แบบหลักๆ ได้แก่ วิธีลำแสงอ้างอิง วิธีลำแสงเดี่ยว และวิธีลำแสงคู่ ดังนี้

2.4.1 การใช้วิธีลำแสงอ้างอิง

จากที่ทราบแล้วว่าการวัดความถี่ของแสงที่เลื่อนไปจากผลของปรากฏการณ์ดอปเพลอร์โดยตรงนั้นกระทำได้ยาก เนื่องจากความเข้มแสงมีค่าต่ำมาก จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ความถี่อ้างอิง (Reference beam frequency) มาเป็นตัวเปรียบเทียบสร้างให้เกิดความถี่บีตขึ้นมา เพื่อให้สามารถวัดความเข้มแสงได้ง่ายขึ้น

การวัดความเร็วการไหลของไหลโดยวัดความถี่บีตของแสงด้วยลำแสงอ้างอิง เรียกว่า วิธีลำแสงอ้างอิง ซึ่งการจัดวางอุปกรณ์แสดงในรูปที่ 2.17



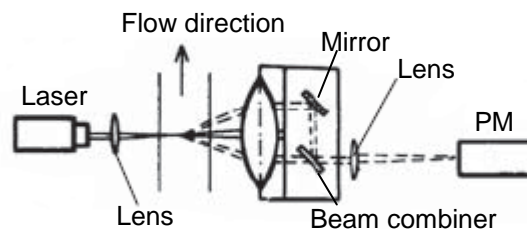
รูปที่ 2.17 แสดงการจัดวางอุปกรณ์สำหรับวิธีลำแสงอ้างอิง [3]

จากรูปที่ 2.17 แสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดแสงจะถูกแยกออกเป็นสองลำด้วยตัวแยกลำแสง โดยความเข้มแสงส่วนใหญ่จะส่องผ่านเข้าไปในท่อโปร่งแสง บริเวณที่ต้องการวัดความเร็วการไหล ซึ่งเรียกว่า ห้วงแห่งการวัด (Measurement volume) (โดยจะกล่าวรายละเอียดในภายหลัง) โดยหัววัดแสง (Photomultiplier tube, PM) จะวัดความเข้มแสงจากการซ้อนทับกันของแสงที่กระเจิงจากอนุภาคที่

เคลื่อนที่อยู่ในของไหล ในทิศทางเดียวกับความเข้มแสงส่วนน้อยที่ความถี่ไม่มีการเลื่อนไปจากเดิม ที่เรียกว่าลำแสงอ้างอิง ซึ่งถูกสะท้อนด้วยกระจกให้ไปตกลงบนหัววัดแสง การซ้อนทับกันของลำแสงทั้งสองจะทำให้เกิดความถี่บีตของแสงขึ้นที่หัววัดแสง ในการจัดอุปกรณ์แบบนี้มีข้อคำนึงที่สำคัญอยู่ว่า ความเข้มแสงที่กระเจิงจากอนุภาคและความเข้มแสงอ้างอิงต้องมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังมีปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวน (Noise) ทำให้วัดได้เฉพาะของเหลวที่มีอนุภาคแขวนลอยอยู่อย่างหนาแน่นเท่านั้น และต้องใช้ช่องผ่านลำแสง (Aperture) ที่แคบมาก

2.4.2 การใช้วิธีลำแสงเดี่ยว

วิธีลำแสงเดี่ยว หรือ วิธีการกระเจิงคู่ (Dual scatter method) เป็นการใชแสงเพียงลำเดียว ฉายเข้าไปยังหัวแห่งการวัด แล้วทำการรวมแสงซึ่งกระเจิงจากอนุภาคในสองทิศทางที่ต่างกัน ให้ซ้อนทับกันบนหัววัดแสง โดยวิธีลำแสงเดี่ยวนี้ จะใช้ตัวรวมลำแสง (Beam combiner) แทนการใช้ตัวแยกลำแสง



รูปที่ 2.18 แสดงการจัดวางอุปกรณ์สำหรับวิธีลำแสงเดี่ยว [3]

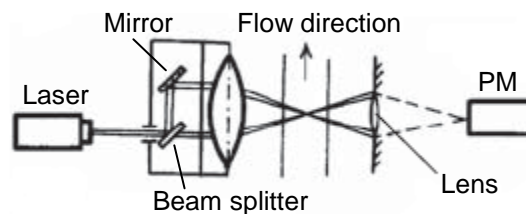
จากรูปที่ 2.18 แสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดแสงฉายเข้าไปยังหัวแห่งการวัด เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ตัดผ่าน ลำแสงจะถูกกระเจิงออกในทิศทางต่างๆ เข้าสู่เลนส์ โดยจัดให้แสงกระเจิงในสองทิศทางที่สนใจ กล่าวคือ ลำหนึ่งพุ่งผ่านตัวรวมลำแสงโดยตรง ส่วนอีกลำหนึ่งใช้กระจกสะท้อนให้ไปตกลงบนตัวรวมลำแสง จากนั้นใช้เลนส์รวมแสงที่ออกมาจากตัวรวมลำแสงไปตกลงบนหัววัดแสง เพื่อทำการวัดความถี่บีตของการรวมแสงทั้งสอง

วิธีการนี้อาจเทียบได้กับอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Interferometer) ที่ใช้อนุภาคเป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบจุด เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านระนาบของการรวมแสง (Focal plane) ความแตกต่างของเส้นทางเดินของแสง (Optical path difference) จากลำแสงที่กระเจิงออกมาจากอนุภาคทั้งสองลำถึงหัววัดแสงจะแปรเปลี่ยนไป เกิดเป็นแถบมืดและแถบสว่างของริ้วการแทรกสอด เป็นที่น่าสนใจว่าความถี่ที่สังเกตได้นี้ ไม่ขึ้นกับทิศทางหรือชนิดของลำแสงที่ฉายมาตกกระทบอนุภาค แต่แหล่งกำเนิดแสงจะต้องเป็นแบบอาพันธ์เท่านั้นจึงจะเกิดริ้วของการแทรกสอดได้

อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ไม่เป็นที่นิยมนักเพราะการจัดวางอุปกรณ์เพื่อติดตั้งนั้นทำได้ยาก ถึงแม้ว่าสามารถใช้ช่องผ่านลำแสงที่มีความกว้างมากได้ก็ตาม แต่ก็มีข้อได้เปรียบที่สำคัญ คือ สามารถทำการวัดความเร็วได้ใน 2 มิติ บนระนาบของการรวมแสง

2.4.3 การใช้วิธีลำแสงคู่

ถึงแม้ว่าวิธีลำแสงอ้างอิงจะใช้งานได้ดีในการวัดของเหลวที่มีอนุภาคแขวนลอยเป็นของแข็ง แต่ยังคงเป็นการวัดที่ไม่สะดวกนัก เพราะต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มแสงของลำแสงอ้างอิงให้ใกล้เคียงกับความเข้มแสงที่กระเจิงมาจากอนุภาคแขวนลอย ซึ่งยังคงทำได้ยากอยู่ในปัจจุบัน ดังนั้นวิธีลำแสงคู่จึงเป็นแนวทางที่จะสามารถช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้



รูปที่ 2.19 แสดงการจัดวางอุปกรณ์สำหรับวิธีลำแสงคู่ [3]

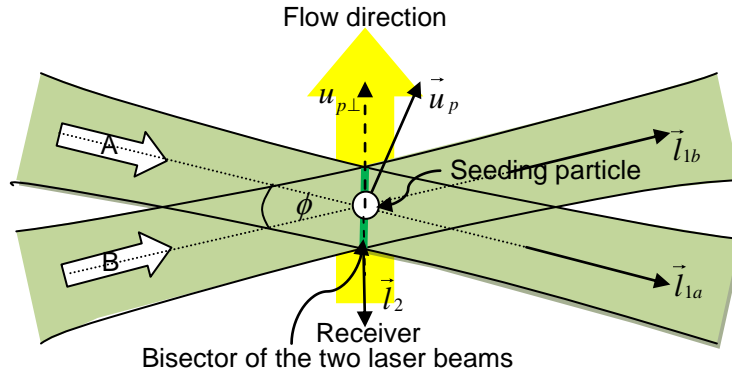
จากรูปที่ 2.19 แสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดแสงจะถูกแยกออกเป็นสองลำด้วยตัวแยกลำแสง โดยความเข้มแสงของทั้งสองลำมีค่าเท่ากัน ใช้เลนส์รวมแสงทั้งสองให้ไปตัดกันที่หัวแห่งการวัด แล้วทำการวัดแสงที่รวมขึ้นจากแสงทั้งสองลำ ที่มีความถี่เลื่อนไปด้วยผลของปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ โดยใช้ช่องผ่านลำแสงกันแสงส่วนที่ไม่ซ้อนทับกันออกไป ซึ่งทำให้สามารถแก้ปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนได้ดีกว่าวิธีลำแสงอ้างอิง รูปแบบนี้จึงสามารถใช้วัดอัตราการไหลของของเหลวที่มีอนุภาคแขวนลอยอยู่น้อย หรือแก๊สได้

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการวัดอัตราการไหลของของเหลวที่มีอนุภาคแขวนลอยอยู่น้อย จึงเลือกใช้วิธีลำแสงคู่ ซึ่งจะกล่าวถึงการคำนวณความเร็วการไหลจากความถี่ปิดอันเป็นผลจากปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ในหัวข้อถัดไป

2.5 การวัดโดยใช้วิธีลำแสงคู่ [2]

ระบบ LDA ที่ใช้วัดการไหลในมิติเดียวแบบมาตรฐานนั้นจะใช้วิธีลำแสงคู่ ซึ่งประกอบด้วยลำแสงสองลำ (A และ B) ที่มีความถี่ (f_0) เท่ากัน ถูกเลนส์รวมแสงให้มาตัดกัน โดยมุมระหว่างลำแสง 2 ลำ ณ จุดตัดมีค่าเท่ากับ ϕ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 เมื่ออนุภาคแขวนลอยภายในของไหล (Seeding particle) เคลื่อนที่ผ่านหัวแห่งการวัด (ปริมาณของบริเวณที่ลำแสงทั้งสองตัดกัน) จะทำให้ลำแสงทั้งสองเกิดการกระเจิงทันที เนื่องจากลำแสงทั้งมีทิศทางที่แตกต่างกัน อนุภาคซึ่งมีความเร็ว \vec{u}_p จึงรับรู้ความถี่ของแสงทั้งสองลำแตกต่างกันไปด้วยผลของปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ โดยแสงที่กระเจิงออกมาจาก

อนุภาคในทิศทาง \vec{l}_2 จะถูกเลนส์รวมให้ไปตกลงบนหัววัดแสง ระบบแบบนี้สอดคล้องกับปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ที่แสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.20 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคตัดผ่านหัวแห่งการวัด

จากสมการที่ (2.35) ความถี่ของลำแสงทั้งสองที่หัววัดแสงรับได้ในทิศทาง \vec{l}_2 มีค่าเป็น

$$f_{2a} \approx f_0 \left(1 - \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_{1a}}{c} + \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_2}{c} \right) \quad (2.43)$$

และ

$$f_{2b} \approx f_0 \left(1 - \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_{1b}}{c} + \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_2}{c} \right) \quad (2.44)$$

ซึ่งลำแสงที่มีความถี่เป็น f_{2a} และ f_{2b} ทั้งสองนี้ ขณะตกลงบนหัววัดแสงจะเกิดการซ้อนทับกัน จากสมการที่ (2.42) ความหนาแน่นฟลักซ์ของแสงที่เป็นผลรวมของแสงทั้งสอง จะแสดงความถี่ต่ำค่าหนึ่งออกมา ซึ่งเรียกว่า ความถี่บีต และมีค่าเท่ากับสองเท่าของความถี่ของการรวมคลื่น ($2\omega_m = \omega_a - \omega_b$) ซึ่งอุปกรณ์โดยส่วนใหญ่สามารถทำการวัดได้ง่าย ในงานที่เกี่ยวข้องกับการวัดอัตราการไหลของของไหลโดยใช้เทคนิค LDA นิยมเรียกความถี่บีตนี้ว่า ความถี่ดอปเพลอร์ (f_D) โดยสามารถคำนวณจากสมการที่ (2.43) และ (2.44) ได้ว่า

$$f_D = |f_{2a} - f_{2b}| = \frac{f_0}{c} \left| \vec{u}_p \cdot (\vec{l}_{1b} - \vec{l}_{1a}) \right| \quad (2.45)$$

เนื่องจาก $c/f_0 = \lambda_0$ และ $\left| \vec{u}_p \cdot (\vec{l}_{1b} - \vec{l}_{1a}) \right| = 2u_{p\perp} \sin \frac{\phi}{2}$ เมื่อ $u_{p\perp}$ เป็นองค์ประกอบของความเร็วของอนุภาคในทิศขนานกับระนาบตัดขวางของหัวแห่งการวัด (Bisector of the two laser beams) ดังนั้นจะได้ว่า

$$f_D = 2 \frac{u_{p\perp}}{\lambda_0} \sin \frac{\phi}{2} \quad (2.46)$$

จะเห็นได้ว่าความถี่ดอปเพลอร์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับองค์ประกอบของความเร็ว $u_{p\perp}$ ของการเคลื่อนที่ของอนุภาค ด้วยการประมาณว่าองค์ประกอบความเร็วของอนุภาคในทิศเดียวกับการไหลมีค่าเท่ากับความเร็วของของไหล ทำให้สามารถทราบความเร็วของของไหล u_{\perp} ได้จากการวัดความถี่ดอปเพลอร์ โดยจัดรูปสมการที่ (2.46) เสียใหม่เป็น

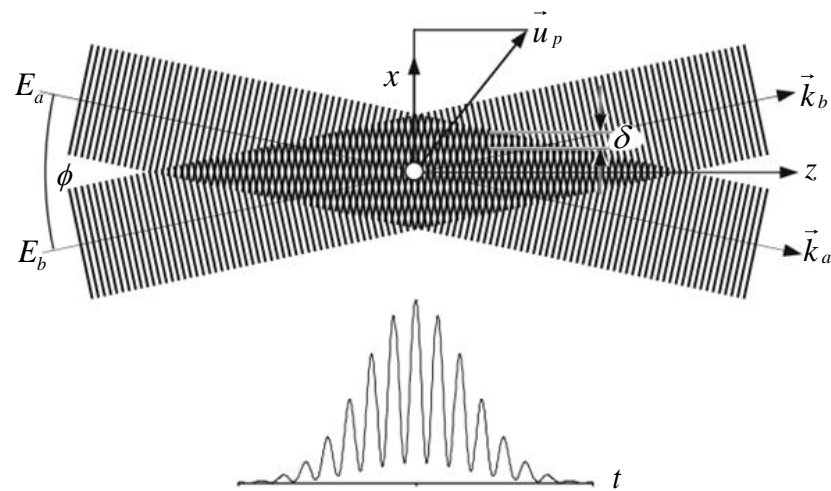
$$u_{\perp} = \frac{\lambda_0}{2 \sin \frac{\phi}{2}} f_D \quad (2.47)$$

พจน์ที่คูณอยู่กับความถี่ดอปเพลอร์เป็นค่าคงที่ ดังนั้นการวัดการไหลโดยวิธีนี้จึงไม่ต้องมีการสอบเทียบระบบ ยิ่งไปกว่านั้นความถี่ดอปเพลอร์ยังไม่ขึ้นกับตำแหน่งของหัววัดอีกด้วย จึงทำให้สามารถจัดวางตำแหน่งของหัววัดในทิศทางใดของระบบก็ได้ แต่ต้องจัดให้หัววัดตรงกับหัวแห่งการวัดเสมอ เพื่อรวมแสงที่กระเจิงจากอนุภาคให้ได้มากที่สุด

2.6 แบบจำลองรีวิการแทรกสอดของแสง [2]

นอกจากการคำนวณหาความถี่ดอปเพลอร์ของแสงที่กระเจิงจากอนุภาคซึ่งเคลื่อนที่ผ่านหัวแห่งการวัด ดังแสดงในหัวข้อที่ 2.5 แล้วนั้น ยังสามารถคำนวณได้จากรีวิการแทรกสอดของแสงในหัวแห่งการวัดได้อีกด้วย โดยเรียกรูปนี้ว่า การพิจารณารีวิ เป็นวิธีที่นิยมในการใช้อธิบายหลักการของ LDA เนื่องจากแสดงได้ด้วยภาพซึ่งง่ายต่อการทำความเข้าใจ ดังนี้

เมื่อแสงที่เป็นคลื่นระนาบสองลำมีแอมพลิจูด E_0 และความถี่ ω เท่ากัน เคลื่อนที่ในทิศทาง \vec{k}_a และ \vec{k}_b ตามลำดับ มาตัดกันทำมุมระหว่างลำแสงเป็น ϕ ดังรูปที่ 2.21 เนื่องจากความถี่ ω ของแสงทั้งสองลำมีค่าเท่ากัน จะได้ว่าความยาวคลื่นของแสงทั้งสองลำต้องเท่ากันด้วย โดยมีค่าเป็น λ_0 เลขคลื่นของแสงทั้งสองลำจึงสามารถเขียนได้เป็น $k = |\vec{k}_a| = |\vec{k}_b| = 2\pi/\lambda_0$ เพื่อสะดวกต่อการพิจารณา ในที่นี้กำหนดให้แกน z เป็นแกนमुखสำคัญ และภาคตัดขวางของหัวแห่งการวัดจากลำแสงทั้งสองอยู่บนระนาบ $z-x$



รูปที่ 2.21 แสดงการเกิดรีวการแทรกสอดและสัญญาณส่งเป็นชุดอย่างรวดเร็ว (Burst signal) [2]

จากรูปที่ 2.21 คลื่นแสงในทิศทาง \vec{k}_a และ \vec{k}_b สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.48) และสมการที่ (2.49) ตามลำดับ

$$E_a = E_0 \cos \left[\omega t - k \left(z \cos \frac{\phi}{2} - x \sin \frac{\phi}{2} \right) \right] \quad (2.48)$$

และ

$$E_b = E_0 \cos \left[\omega t - k \left(z \cos \frac{\phi}{2} + x \sin \frac{\phi}{2} \right) \right] \quad (2.49)$$

จะได้ว่าคลื่นแสงรวมจากการซ้อนทับกันของคลื่นทั้งสองนี้มีค่าเป็น

$$E = E_a + E_b = 2E_0 \cos \left(kx \sin \frac{\phi}{2} \right) \cos \left(\omega t - kz \cos \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.50)$$

ซึ่งคลื่นลัพธ์ในสมการที่ (2.50) นี้ จะมีความถี่ช่วงสูง (High angular frequency) เป็น ω และแอมพลิจูดที่แกว่งกวัดเป็น $2E_0 \cos \left(kx \sin \frac{\phi}{2} \right)$ โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าตามตำแหน่งในแนวแกน x เท่านั้น ไม่ขึ้นกับเวลา ดังนั้นค่าความเข้มของแสงที่ขึ้นกับกำลังสองของแอมพลิจูดของคลื่นแสงนี้มีค่าเป็น

$$E_m^2 = 4E_0^2 \cos^2 \left(kx \sin \frac{\phi}{2} \right) = 2E_0^2 \left[1 + \cos \left(2kx \sin \frac{\phi}{2} \right) \right] \quad (2.51)$$

โดยการแทนค่าเลขคลื่น $k = 2\pi/\lambda_0$ จะได้

$$E_m^2 = 2E_0^2 \left[1 + \cos 2 \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \sin \frac{\phi}{2} \right) x \right] = 2E_0^2 \left[1 + \cos \left(2\pi \frac{x}{\delta} \right) \right] \quad (2.52)$$

ในทิศทางตามแกน x ความเข้มของแสงจะมีค่าแกว่งกวัดทุกค่าระยะ

$$\delta = \frac{\lambda_0}{2 \sin \frac{\phi}{2}} \quad (2.53)$$

ค่าระยะ δ นี้ เป็นที่รู้จักกันในชื่อ ระยะห่างระหว่างริ้วการแทรกสอด (Fringe spacing) ซึ่งอยู่ภายใน ห้วงแห่งการวัด โดยระยะนี้มีค่าน้อยมาก ตัวอย่างเช่น เมื่อใช้แสงที่มีความยาวคลื่น $\lambda_0 = 514.5 \text{ nm}$ และมุมระหว่างลำแสงเป็น $\phi = 6^\circ$ จะได้ระยะ $\delta = 5 \text{ }\mu\text{m}$ เท่านั้น

หากนำสมการที่ (2.53) นี้ ไปแทนในสมการที่ (2.47) จะได้ว่า องค์ประกอบความเร็วของอนุภาคที่ เคลื่อนที่ผ่านห้วงแห่งการวัดมีค่าเป็น

$$u_{\perp} = \delta f_D \quad (2.54)$$

สมการที่ (2.54) นี้ บ่งชี้ว่าความถี่ดอปเพลอร์ คือ ความถี่ของการแกว่งกวัดของความเข้มของแสง ซึ่ง กระจิงจากอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านห้วงแห่งการวัด โดยรูปที่ 2.21 ยังได้แสดงสัญญาณที่สอดคล้องกับ ความถี่ดอปเพลอร์เอาไว้อีกด้วย ซึ่งเรียกว่า สัญญาณส่งเป็นชุดอย่างรวดเร็วของดอปเพลอร์ (Doppler burst signal)

เนื่องจากลำแสงเลเซอร์ที่ใช้ในระบบ LDA มีการแจกแจงความเข้มของแสงแบบเกาส์เซียน (ซึ่งจะ อธิบายในหัวข้อที่ 2.7) ดังนั้นสัญญาณส่งเป็นชุดอย่างรวดเร็วของดอปเพลอร์จะมีแอมพลิจูดสูงสุด เมื่อ อนุภาคกระจิงแสงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของห้วงแห่งการวัดเท่านั้น

2.7 สมบัติของลำแสงเกาส์เซียน [2]

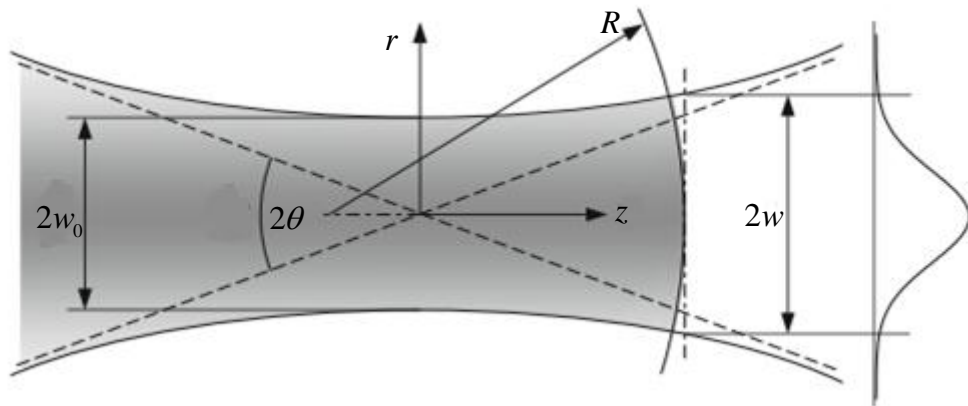
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสมบัติของลำแสงเกาส์เซียน ทั้งในด้านสมบัติเฉพาะเชิงเรขาคณิตและการ ส่งผ่านของลำแสงเกาส์เซียน ซึ่งจะส่งผลต่อห้วงแห่งการวัด ในระบบ LDA ขนาดของห้วงแห่งการวัด จะขึ้นกับความเข้มของแสง เนื่องจากหัววัดแสงจะตอบสนองต่อความเข้มของแสงที่เกินกว่า e^{-2} ของ ความเข้มแสงสูงสุดเท่านั้น

2.7.1 สมบัติเฉพาะเชิงเรขาคณิตของลำแสงเกาส์เซียน

ลำแสงเลเซอร์ที่ถูกใช้ในระบบ LDA โดยทั่วไปนั้น เป็นเลเซอร์ชนิดซิงเกิลโหมด (Single mode laser) ที่มีการแจกแจงความเข้มของแสงในภาคตัดขวางของลำแสงเป็นแบบเกาส์เซียน ซึ่งกำหนดโดย

$$I(r) = I_0 e^{-2\left(\frac{r}{w}\right)^2} \quad (2.55)$$

โดยกำหนดให้ I_0 เป็นค่าความเข้มของแสงที่ตำแหน่งบนแกนของลำแสง (กึ่งกลางของลำแสง) และ $2w$ เป็นความกว้างของลำแสงเกาส์เซียน



รูปที่ 2.22 แสดงสมบัติเฉพาะเชิงเรขาคณิตของลำแสงเกาส์เซียน [2]

จากรูปที่ 2.22 ระดับความเข้มของแสงที่ตำแหน่ง $r = w$ จะลดลงมาอยู่ที่ $e^{-2} = 13.5\%$ ของระดับความเข้มแสงที่ตำแหน่งบนแกนของลำแสง ($r = 0$)

เนื่องจากความเข้มของแสง คือ พลังงานแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดต่อหนึ่งหน่วยเวลา หรือ ความหนาแน่นฟลักซ์ของแสง กำลังแสงรวมของลำแสง (P) จึงหาได้จากการอินทิเกรตการแจกแจงความเข้มของแสงตลอดภาคตัดขวางของลำแสง โดย

$$P = 2\pi I_0 \int_0^{\infty} e^{-2\left(\frac{r}{w}\right)^2} r dr = \frac{1}{2} \pi w^2 I_0 \quad (2.56)$$

ลำแสงที่มีการแจกแจงแบบเกาส์เซียน จะมีเอวของลำแสง (Beam waist) ที่ชัดเจนเสมอ สมบัติเชิงเรขาคณิตของลำแสงเกาส์เซียนจึงมักอธิบายโดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของเอวของลำแสง นอกจากนี้ในรูปที่ 2.22 ยังได้แสดงลักษณะเชิงเรขาคณิตของลำแสงเกาส์เซียน รวมถึงรัศมีความโค้งของหน้าคลื่น R และความกว้างของลำแสง $2w$ เอาไว้ด้วย เพื่อให้เห็นถึงการลู่ออกของลำแสง โดยหน้าคลื่นคือ พื้นผิวที่มีเฟสของคลื่นตรงกัน จากกลศาสตร์คลื่นของแสง รัศมีความโค้งของหน้าคลื่นของลำแสงเกาส์เซียนและความกว้างของลำแสงที่ระยะห่าง z จากเอวของลำแสง ถูกกำหนดโดยสมการที่ (2.57) และสมการที่ (2.58) ตามลำดับ ดังนี้

$$R = z \left[1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right] \quad (2.57)$$

และ

$$w = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2} \quad (2.58)$$

จะเห็นว่าที่ระยะห่าง z ไกลๆ นั้น ความกว้างของลำแสงจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นเทียบกับระยะห่าง โดยมีความกว้างของเอวของลำแสง w_0 เป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณลักษณะเชิงเรขาคณิตทั้งหมดของลำแสงเกาส์เซียน

จากสมการที่ (2.57) รัศมีความโค้งของหน้าคลื่น ทั้งที่ตำแหน่งเอวของลำแสง ($z = 0$) และตำแหน่งที่ระยะไกลๆ ($z = \infty$) จะมีค่านันต์ นั่นคือสามารถพิจารณาได้ว่าลำแสงเป็นคลื่นระนาบ และตำแหน่งที่มีรัศมีความโค้งของหน้าคลื่นน้อยที่สุด R_{\min} หาได้จากเงื่อนไขที่ $\frac{dR}{dz} = 0$ ซึ่งจะได้ระยะห่างที่ทำให้เกิดรัศมีความโค้งของหน้าคลื่นน้อยที่สุดเป็น

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (2.59)$$

ระยะห่างจากเอวของลำแสง z_R นี้ เรียกว่า ความยาวเรย์ลีย์ (Rayleigh length) ซึ่งขึ้นกับค่าความกว้างของเอวของลำแสงเช่นกัน เป็นระยะที่ทำให้รัศมีความโค้งของหน้าคลื่นมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเท่ากับ

$$R_{\min} = 2z_R = \frac{2\pi w_0^2}{\lambda} \quad (2.60)$$

ค่ารัศมีความโค้งที่น้อยที่สุดของหน้าคลื่นนี้ จะสัมพันธ์กับการเกิดริ้วการแทรกสอดแบบสม่ำเสมอในบริเวณห่างแห่งการวัด ซึ่งในกรณีที่ห่างแห่งการวัดไม่ได้เกิดจากการซ้อนทับกันพอดีของเอวของลำแสงทั้งสอง ริ้วการแทรกสอดของแสงที่เกิดขึ้นก็จะเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ และเมื่อห่างแห่งการวัดเกิดจากการตัดกันที่ระยะความยาวเรย์ลีย์ของลำแสงทั้งสองพอดี ริ้วการแทรกสอดของแสงก็จะเกิดการบิดเบือน ผิดเพี้ยน หรือผิดรูป (Distortion) ไปมากที่สุด ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความถูกต้องในการวัดอัตราการไหลของของไหล

ในการใช้ความยาวเรย์ลีย์เป็นตัวแปรคุณลักษณะ (Characteristic parameter) จะทำให้ทั้งค่ารัศมีความโค้งของหน้าคลื่นและความกว้างของลำแสงเกาส์เซียน ที่ระยะห่าง z จากเอวของลำแสง เขียนได้ดังสมการที่ (2.61) และสมการที่ (2.62) ตามลำดับ

$$R = z \left[1 + \left(\frac{z_R}{z} \right)^2 \right] \quad (2.61)$$

และ

$$w = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2} \quad (2.62)$$

ดังนั้นที่ความยาวเรย์ลีย์ ($z = z_R$) จะได้ว่า

$$w_R = \sqrt{2}w_0 \quad (2.63)$$

ที่ระยะไกลมากๆ ($z \gg z_R$) สมการที่ (2.61) จะกลายเป็น

$$R = z \quad (2.64)$$

สมการที่ (2.64) นี้ แสดงนัยว่า หน้าคลื่นของลำแสงเกาส์เซียนเป็นวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่เอวของลำแสง

ความเข้มแสงของลำแสงเกาส์เซียนที่ความยาวเรย์ลีย์ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.56) เนื่องจากกำลังรวมของลำแสงมีค่าคงที่ ถ้าเปรียบเทียบความเข้มแสงที่กึ่งกลางของลำแสง ณ ความยาวเรย์ลีย์ กับความเข้มแสงที่กึ่งกลางของเอวของลำแสง จะได้ว่า

$$\frac{I_{0R}}{I_{0w}} = \frac{w_0^2}{w_R^2} = \frac{1}{2} \quad (2.65)$$

การลู่ออกของลำแสงอธิบายได้โดยมุมของการลู่ออก (Divergence angle, 2θ) ภายใต้เงื่อนไขที่ $z \rightarrow \infty$ โดย $\tan \theta = dw/dz$ ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณโดยใช้สมการที่ (2.62) เนื่องจากขนาดของมุมนี้มักมีค่าเล็กมากๆ จึงสามารถประมาณได้ว่า $\tan \theta \approx \theta$ ซึ่งมีค่าเป็น

$$\theta = \frac{w_0}{z_R} \quad (2.66)$$

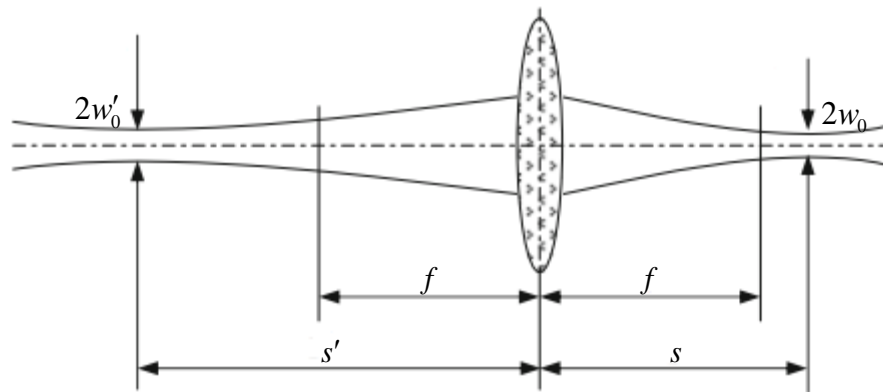
และสามารถจัดรูปใหม่โดยการใช้ค่าความยาวเรย์ลีย์ตามสมการที่ (2.59) ได้ว่า

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (2.67)$$

นั่นคือ มุมของการลู่ออกของลำแสงเกาส์เซียนจะมีค่าน้อยมากจนละทิ้งได้ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเอวของลำแสงมีขนาดใหญ่พอ เช่น เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น $\lambda = 500 \text{ nm}$ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของเอวของลำแสงเป็น $w_0 = 1 \text{ mm}$ จะมีมุมของการลู่ออกเพียงแค่ 0.009° เท่านั้น

2.7.2 การส่งผ่านของลำแสงเกาส์เซียน

การส่งลำแสงเกาส์เซียนผ่านเลนส์ที่มีความยาวโฟกัส f สามารถพิจารณาได้โดยใช้รูปที่ 2.23 โดยกำหนดให้ก่อนผ่านเลนส์ลำแสงมีความกว้างของเอวของลำแสงเป็น $2w'_0$ ซึ่งมีความยาวเรย์ลีย์เป็น z'_R



รูปที่ 2.23 แสดงการส่งลำแสงเกาส์เซียนผ่านเลนส์ [2]

โดยการใช้ความสัมพันธ์ของแสงเชิงเรขาคณิตจะได้ว่า ความกว้างของเอวของลำแสงหลังและก่อนผ่านเลนส์สัมพันธ์กันดังนี้

$$w_0 = \frac{f}{\sqrt{(s' - f)^2 + z_R^2}} w'_0 \quad (2.68)$$

โดยตำแหน่งของเอวของลำแสงหลังผ่านเลนส์ อยู่ห่างจากกึ่งกลางเลนส์เป็นระยะ

$$s = f + \frac{f^2 (s' - f)}{(s' - f)^2 + z_R^2} \quad (2.69)$$

จะเห็นว่าลำแสงเกาส์เซียนหลังผ่านเลนส์ก็ยังคงมีสมบัติเป็นลำแสงเกาส์เซียนเหมือนเดิม

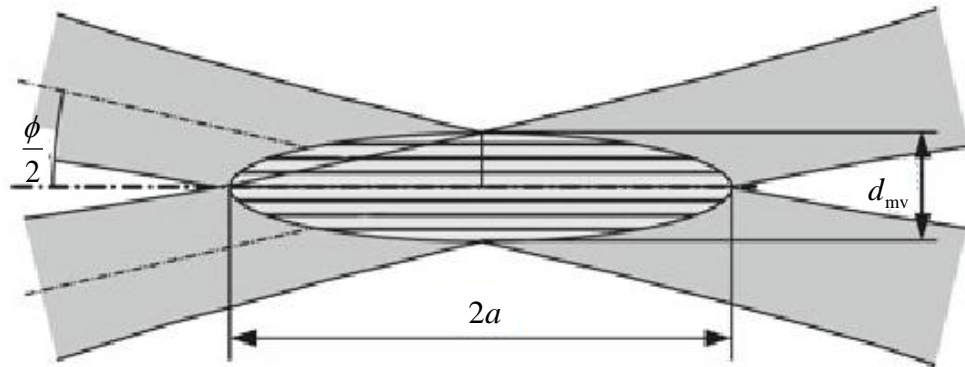
2.8 ขนาดของห้วงแห่งการวัด [2]

ห้วงแห่งการวัดจัดเป็นกุญแจสำคัญในการวัดอัตราการไหลของของไหลด้วยระบบ LDA เนื่องจากทั้งขนาดและการส่งผ่านแสงของระบบ LDA เป็นตัวกำหนดคุณภาพในการวัดการไหล โดยทั่วไปห้วงแห่งการวัดเกิดจากการตัดกันของแสงสองลำที่ตำแหน่งเอวของลำแสงทั้งสอง ซึ่งในบริเวณนี้ควรมีความเข้มของแสงสูงเพื่อใช้ในการตรวจจับอนุภาคขนาดเล็กที่เคลื่อนผ่าน นอกจากนี้หน้าคลื่นระนาบของเลเซอร์ที่เอวของลำแสงจะทำให้เกิดริ้วการแทรกสอดแบบสม่ำเสมอขึ้นภายในห้วงแห่งการวัดนี้ด้วย ซึ่งจะช่วยให้การวัดมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ ในอีกแง่หนึ่ง การบิดเบี้ยวของริ้วการแทรกสอดภายในห้วงแห่งการวัดก็จะนำไปสู่ผลการวัดที่คลาดเคลื่อนนั่นเอง

ด้วยเหตุนี้จึงนิยามสร้างห้วงแห่งการวัดขึ้นที่ตำแหน่งเอวของลำแสงทั้งสอง โดยรูปทรงของห้วงแห่งการวัดจะประมาณได้ว่าเป็นทรงรี ดังแสดงในรูปที่ 2.24 โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้วงแห่งการวัดถูกกำหนดโดยความกว้างของลำแสงที่ตำแหน่งเอวของลำแสง ดังสมการ

$$d_{mv} = \frac{2w_0}{\cos \frac{\phi}{2}} \quad (2.70)$$

โดย ϕ เป็นมุมระหว่างลำแสงที่ตัดกัน



รูปที่ 2.24 แสดงรูปทรงและขนาดของห้วงแห่งการวัด [2]

ขนาดความกว้างของห้วงแห่งการวัดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความกว้างของลำแสง ซึ่งขึ้นอยู่กับการจัดวางเลเซอร์กับเลนส์ตามสมการที่ (2.68) โดยทั่วไปแล้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้วงแห่งการวัดอยู่ในช่วงประมาณ 0.05–0.1 mm ตามที่กล่าวมาแล้วว่าระยะห่างระหว่างริ้วการแทรกสอดภายในห้วงแห่งการวัดเป็นคังสมการที่ (2.53) ดังนั้นจำนวนริ้วการแทรกสอด (Number of fringes, N) ภายในห้วงแห่งการวัดจึงหาได้จาก

$$N = \frac{d_{mv}}{\delta} = 4 \frac{w_0}{\lambda_0} \tan \frac{\phi}{2} \quad (2.71)$$

โดยใช้หลักการเดียวกันกับความกว้างของห้วงแห่งการวัด ความยาวของห้วงแห่งการวัดจึงมีค่าขึ้นกับค่าความกว้างของเอวของลำแสงทั้งสองลำ และมุมระหว่างลำแสงที่ตัดกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.24 ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$2a = \frac{d_{mv}}{\tan \frac{\phi}{2}} = \frac{2w_0}{\sin \frac{\phi}{2}} \quad (2.72)$$

โดยจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.5–3 mm ขึ้นกับการจัดวางเลเซอร์และเลนส์

การพิจารณาขนาดของห้วงแห่งการวัดที่กล่าวมาแล้ว มิได้คำนึงถึงขนาดของอนุภาค แต่ในทางปฏิบัติขนาดของห้วงแห่งการวัดควรมีระยะห่างระหว่างริ้วการแทรกสอดที่ไม่น้อยกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค เพื่อให้การกระเจิงของแสงจากอนุภาคภายในห้วงแห่งการวัดสามารถเกิดเป็น

สัญญาณส่งเป็นชุดอย่างรวดเร็วของคอปเพลอร์ได้ ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงอนุภาคแขวนลอยภายในของไหล

2.9 อนุภาคแขวนลอยภายในของไหล [3, 11-12]

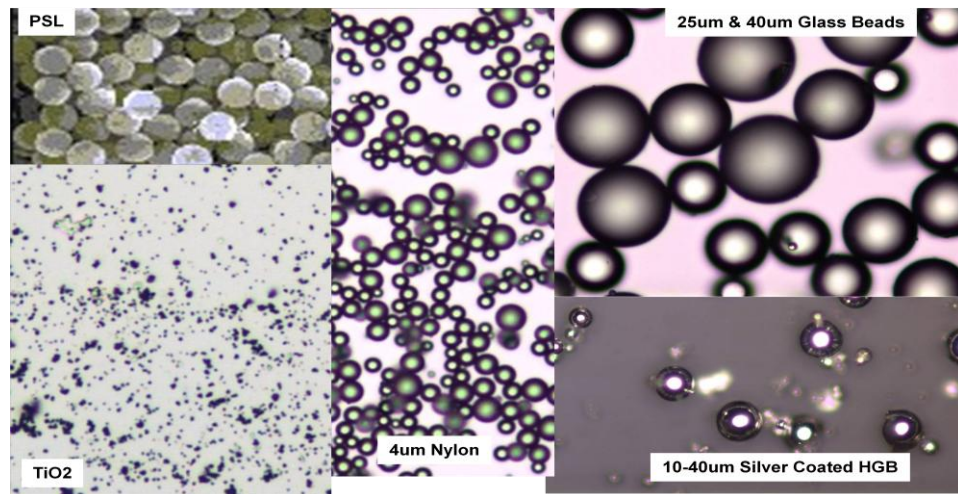
การวัดอัตราการไหลของของไหลโดยใช้ระบบ LDA จำเป็นต้องมีอนุภาคแขวนลอยภายในของไหลเพื่อใช้ในการกระเจิงแสง เนื่องจากความเร็วของอนุภาคที่วัดได้เป็นตัวแทนของความเร็วของของไหล อนุภาคจึงจำเป็นต้องเคลื่อนที่ไปพร้อมกับของไหลหรือแม้กระทั่งกระเพื่อมไปด้วยกัน จึงมีความสามารถของอนุภาคจึงขึ้นกับขนาดและความหนาแน่นของอนุภาค สมบัติเฉพาะของอนุภาคที่ต้องพิจารณามีดังนี้

- มีค่าสมบัติการกระเจิงแสงประมาณ 10^{-12} m^2 ตามหลักการกระเจิงของมี (Mie scattering) ในกรณีที่อนุภาคมีขนาดระดับ $1-100 \mu\text{m}$
- มีสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ สามารถไหลไปกับของไหลได้ มีการกระเจิงแสงที่ดี ผลิตขึ้นได้ง่าย ราคาถูก ไม่เป็นพิษ ไม่กัดกร่อน ไม่เสียดสี ไม่ระเหยง่าย ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ง่าย กระจายตัวเป็นเม็ดเดี่ยว (Monodispersity) และสะอาด
- ในของไหลที่เป็นน้ำ สัดส่วนปริมาตรของอนุภาคต่อปริมาตรของไหลอยู่ระหว่าง $1:50000-1:2000$
- อนุภาคจะต้องมีขนาดเล็กพอที่จะสามารถไหลไปกับของไหลได้ โดยไม่ทำให้พฤติกรรมการไหลของของไหลหรือสมบัติการไหลเปลี่ยนไป

ในปัจจุบันอนุภาคที่นิยมใช้เป็นอนุภาคแขวนลอยภายในของไหลสำหรับการวัดอัตราการไหลของไหลด้วยวิธี LDA แสดงดังตารางที่ 2.1 และในรูปที่ 2.25

ตารางที่ 2.1 แสดงอนุภาคและสมบัติบางประการของอนุภาค [12]

Seeding particles	Fluid medium	Density (g/cm^3)	Refractive index	Diameter (μm)
Silicon Carbide	Air/Water	3.2	2.65	1.5
Nylon	Air/Water	1.14	1.53	4.0
PSL	Air	1.05	1.55 – 1.6	0.5
TiO ₂	Air/Water	4.2	2.6	3 – 5
Hollow Glass Beads (HGB)	Air	1.05 – 1.15	1.5	8 – 12
Silver Coated HGB	Water	1.65	0.21 (R) 2.62 (I)	14
Olive Oil	Air	0.92	1.47	---



รูปที่ 2.25 แสดงตัวอย่างและขนาดของอนุภาคที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน [12]

ทั้งนี้การวัดอัตราการไหลของอากาศจำเป็นต้องใช้อนุภาคเพื่อช่วยในการกระเจิงแสงเสมอ ส่วนการวัดอัตราการไหลของน้ำจะขึ้นอยู่กับการจัดวางตำแหน่งของหัววัดแสง โดยในกรณีการวัดอัตราการไหลของน้ำที่วางหัววัดแสงไว้ฝั่งเดียวกับแหล่งกำเนิดแสง หรือที่เรียกว่า การวัดแบบการกระเจิงกลับ (Back scattering) อนุภาคจะมีความสำคัญมากต่อการสร้างสัญญาณส่งเป็นชุดอย่างรวดเร็วของดีอปเพลอร์ เนื่องจากแสงที่กระเจิงกลับมีความเข้มต่ำจึงต้องอาศัยอนุภาคเหล่านี้ในการช่วยให้สัญญาณมีค่าสูงขึ้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้การวัดแบบการกระเจิงตรง (Forward scattering) ซึ่งวางหัววัดแสงอยู่ตรงข้ามกับแหล่งกำเนิดแสงโดยตรง และเลือกใช้ของไหลตัวอย่างเป็นน้ำประปาที่มีฟองอากาศและจุลินทรีย์แขวนลอย ทำให้ไม่ต้องพิจารณาปัจจัยของอนุภาคแขวนลอยภายในของไหล เนื่องจากวิธีนี้ให้ความเข้มแสงที่สูงมากพอสำหรับการตรวจจับสัญญาณ

จากที่กล่าวมาแล้วในบทนี้ จะเห็นว่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการวัดอัตราการไหลของของไหล โดยวิธีเลเซอร์ดอปเพลอร์ ประกอบด้วย กำลังของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง มุมระหว่างลำแสง ϕ ทิศทางการไหลของของไหล ระยะห่างระหว่างรีวการแทรกสอด δ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวงแห่งการวัด d_{mv} และอนุภาคแขวนลอยภายในของไหล ซึ่งจะต้องนำไปใช้ในการพิจารณาเพื่อออกแบบระบบชุดการทดลองสำหรับวัดอัตราการไหลของของไหลโดยใช้วิธีเลเซอร์ดอปเพลอร์ต่อไป