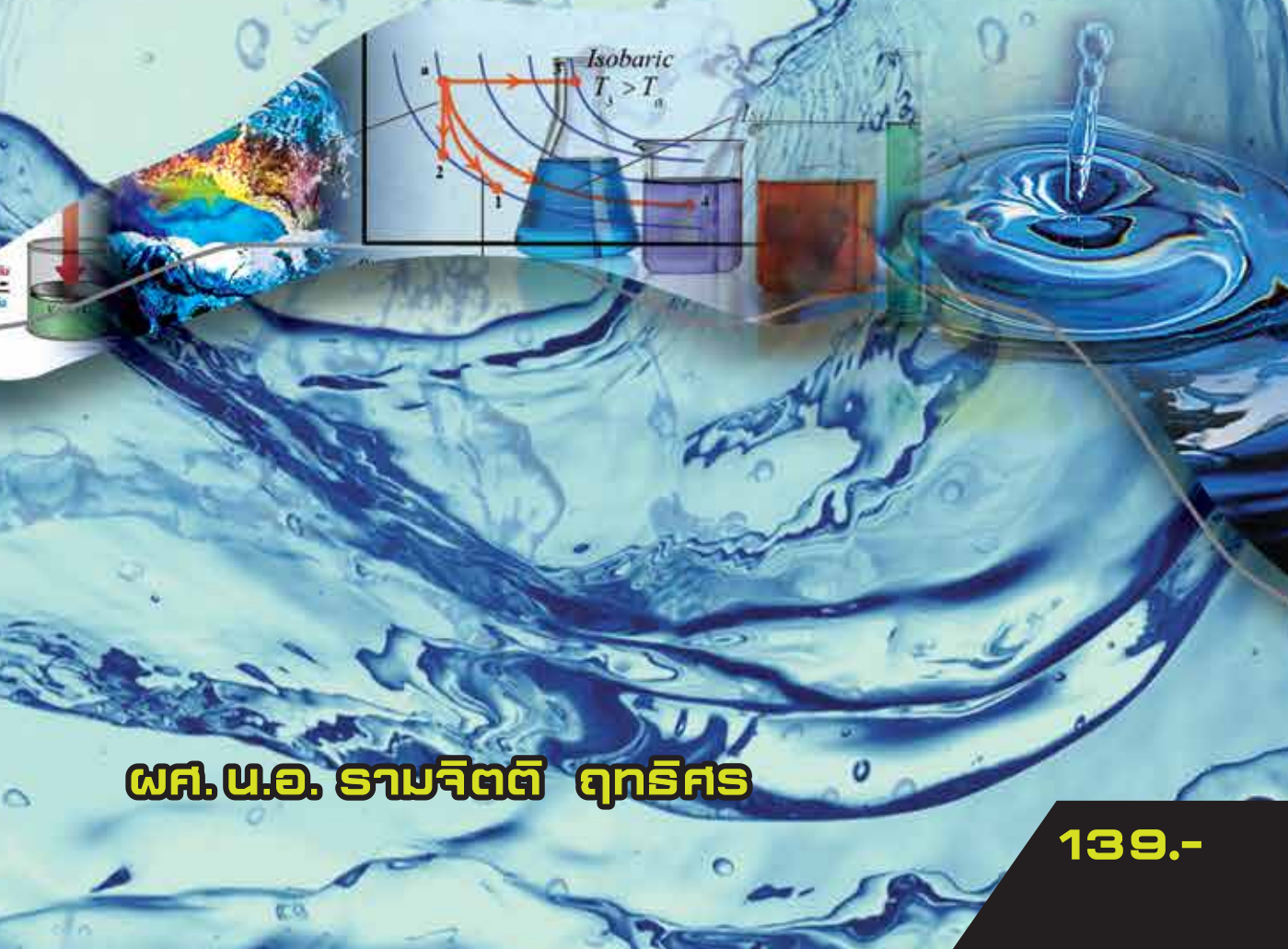




กลศาสตร์ของไหล ในงานเครื่องกล

Fluid Mechanics in Mechanical Work



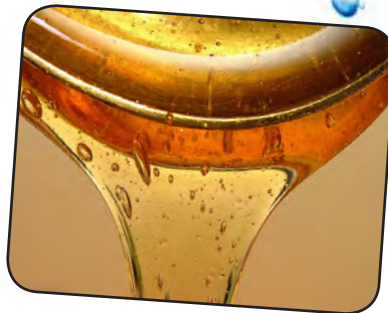
ผศ. น.อ. รามจิตติ ฤทธิศรี

139.-

กลศาสตร์ของไหลในงานเครื่องกล (Fluid Mechanics in Mechanical Work)

รหัสวิชา 30101-2001

หมวดวิชาสมรรถนะวิชาชีพ กลุ่มสมรรถนะวิชาชีพเฉพาะ
ประเภทวิชาอุตสาหกรรม สาขาวิชาเทคนิคเครื่องกล
หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง พุทธศักราช 2563
และใช้ได้กับหลักสูตรปริญญาตรี



เรียบเรียงโดย
ผศ.น.อ. จามจิตติ ฤทธิศร



กลศาสตร์ของไหลในงานเครื่องกล (Fluid Mechanics in Mechanical Work)

คำอธิบายรายวิชา

ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของของไหล การสมดุลของของไหลที่อยู่นิ่ง สถิตยศาสตร์ของไหล การหาแรงกระทำกับวัตถุที่จม แรงพยางและแรงลอยตัว พลศาสตร์ของไหล การไหลในท่อ สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม สมการพลังงาน และการวัดค่าของไหลและการประยุกต์ใช้งานด้านเครื่องกล

พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2563

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของสำนักหอสมุดแห่งชาติ

รามจิตติ ฤทธิศร.

กลศาสตร์ของไหลในงานเครื่องกล.--กรุงเทพฯ : วังอักษร, 2563.
276 หน้า.

1. กลศาสตร์ของไหล. I. ชื่อเรื่อง.

620.106

ISBN 978-616-495-128-0



จัดพิมพ์และจัดจำหน่ายโดย...

บริษัท วังอักษร จำกัด

69/3 ถนนอรุณอมรินทร์ แขวงวัดอรุณ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพฯ 10600

Tel. 0-2472-3293-5 Fax 0-2891-0742 Mobile 08-8585-1521

Facebook : สำนักพิมพ์ วังอักษร

e-Mail : wangaksorn9@gmail.com

<http://www.wangaksorn.com>

ID Line : @wangaksorn



สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537

โดยบริษัท วังอักษร จำกัด ห้ามนำส่วนใดส่วนหนึ่งของหนังสือเล่มนี้ไปทำซ้ำ

ดัดแปลง หรือเผยแพร่ต่อสาธารณชน ไม่ว่ารูปแบบใด ๆ

นอกจากได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรล่วงหน้าจากทางบริษัทฯ เท่านั้น

ชื่อและเครื่องหมายการค้าอื่น ๆ ที่อ้างอิงในหนังสือฉบับนี้

เป็นสิทธิโดยชอบด้วยกฎหมายของเจ้าของแต่ละราย

โดยบริษัท วังอักษร จำกัด มิได้อ้างความเป็นเจ้าของแต่อย่างใด



คำนำ

วิชาหลักสูตรของไหลในงานเครื่องกล รหัสวิชา 30101-2001 จัดอยู่ในหมวดวิชาสมรรถนะวิชาชีพ กลุ่มสมรรถนะวิชาชีพเฉพาะ ประเภทวิชาอุตสาหกรรม สาขาวิชาเทคนิคเครื่องกล **ตามหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง พุทธศักราช 2563** สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา (สอศ.) กระทรวงศึกษาธิการ โดยผู้เขียนได้บริหารสาระการเรียนรู้แบ่งเป็น 5 บทเรียน และได้จัดแผนการจัดการเรียนรู้/แผนการสอนที่มุ่งเน้นฐานสมรรถนะ (Competency Based) และการบูรณาการ (Integrated) ตรงตามจุดประสงค์รายวิชา มาตรฐานรายวิชา คำอธิบายรายวิชา ในแต่ละบทเรียน มุ่งให้ความสำคัญส่วนที่เป็นความรู้ ทฤษฎี หลักการ กระบวนการ และส่วนที่เป็นทักษะประสบการณ์ เร่งพัฒนาบทบาทของผู้เรียนเป็นผู้จัดการแสวงหาความรู้ (Explorer) เป็นผู้สอนตนเองได้ สร้างองค์ความรู้ใหม่ และบทบาทของผู้สอนเปลี่ยนจากผู้ให้ความรู้มาเป็นผู้จัดการชี้แนะ (Teacher Roles) จัดสิ่งแวดล้อมเอื้ออำนวยต่อความสนใจเรียนรู้ และเป็นผู้ร่วมเรียนรู้ (Co-investigator) จัดห้องเรียนเป็นสถานที่ทำงานร่วมกัน (Learning Context) จัดกลุ่มเรียนรู้ให้รู้จักทำงานร่วมกัน (Grouping) ฝึกการยอมรับความคิดเห็นร่วมกัน สามารถนำไปความรู้ไปประยุกต์ใช้ในการทำงานได้ โดยจะต้องมีความเชื่อมั่น ความซื่อสัตย์ (Trust) และเหนือสิ่งอื่นใด เป็นคนดีทั้งกาย วาจา ใจ มีคุณธรรม จริยธรรม และมีจรรยาบรรณต่อวิชาชีพ

ส่งเสริมสนับสนุนยุทธศาสตร์การพัฒนาระบบคุณวุฒิวิชาชีพ (Vocational Qualification System) สอดคล้องตามมาตรฐานอาชีพ (Occupational Standard) สร้างภูมิคุ้มกัน เพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศ กำลังแรงงาน การพัฒนามาตรฐานการปฏิบัติงานระดับชาติ (National Benchmarking) และการวิเคราะห์หน้าที่การทำงาน (Functional Analysis) เพื่อให้เกิดผลสำเร็จในภาคธุรกิจ อุตสาหกรรม ทุกสาขาอาชีพ เป็นการเตรียมความพร้อมของผู้เรียนเข้าสู่สนาม การแข่งขันในประชาคมอาเซียน

หากหนังสือเล่มนี้เป็นประโยชน์สำหรับนักศึกษาและบุคคลทั่วไปที่สนใจ ผู้เขียนขอขอบด้วย ความระลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา ครู อาจารย์ผู้สอนทุกท่าน ที่ประสาทวิชาความรู้ให้กับผู้เขียนไว้ ณ โอกาสนี้

ผศ.น.อ. รามจิตติ ฤทธิศร





สารบัญ



บทที่ 1 แนวคิดพื้นฐานทางกลศาสตร์ของไหล

นิยามของของไหล

ประเภทของของไหล 3

หน่วยและสัญลักษณ์

สมบัติของของไหล (Fluid Properties)

ก๊าซสมมติหรือก๊าซอุดมคติ (Ideal Gas)

แบบทดสอบท้ายบท

1

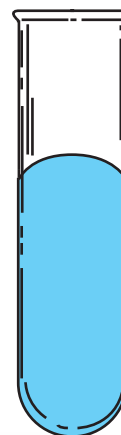
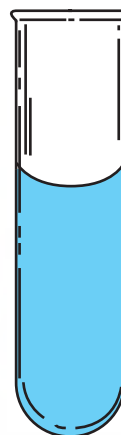
2

3

5

18

21



บทที่ 2 สถิตยศาสตร์ของไหล

23

ของไหลเมื่อหยุดนิ่ง (Fluid at Rest)

24

การวัดความดัน

27

หลักการของปาสคาล (Pascal's Principle)

29

หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes' Principle)

31

แรงกระทำบนพื้นที่ราบที่จมอยู่ภายใต้ของเหลว

33

(Hydrostatic Forces on Submerged Plane Surfaces)

แรงกระทำบนพื้นที่โค้งที่จมอยู่ภายใต้ของเหลว

38

(Hydrostatic Forces on Submerged Curved Surfaces)

แรงกระทำบนวัตถุจม (Forces on Submerged Body)

44

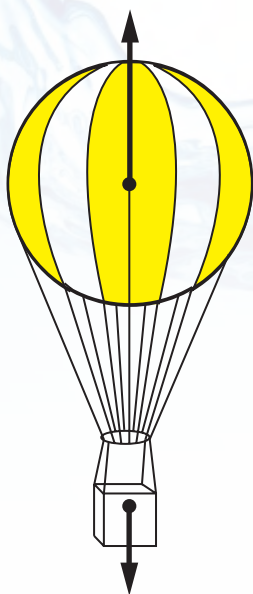
เสถียรภาพของวัตถุจมและวัตถุลอย

49

(Stability of Submerged and Floating Bodies)

แบบทดสอบท้ายบท

54





บทที่ 3 สมการพื้นฐานของกลศาสตร์ของไหล

60

กระแสการไหลและสมการความต่อเนื่อง

61

(Streamlines and The Equation of Continuity)

ประเภทของการไหล

64

ระเบียบวิธีทางปริมาตรควบคุม

67

(Control Volume Application)

สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

71

สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

75

สมการพลังงาน (Energy Equation)

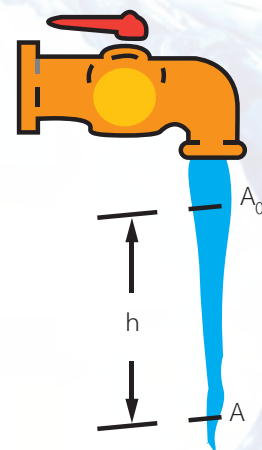
82

สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation)

87

แบบทดสอบท้ายบท

91



บทที่ 4 การพิจารณาการไหลในท่อ

95

สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation)

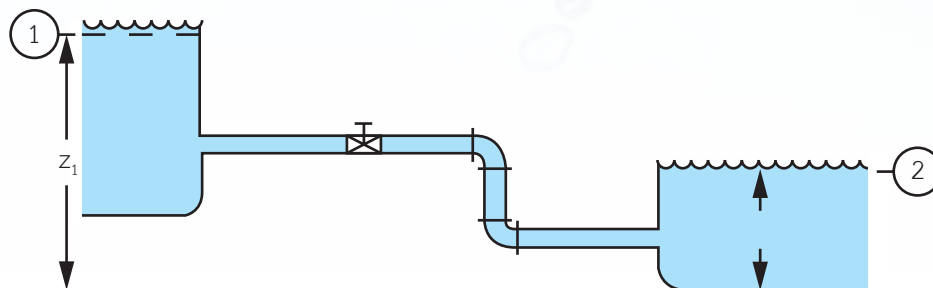
96

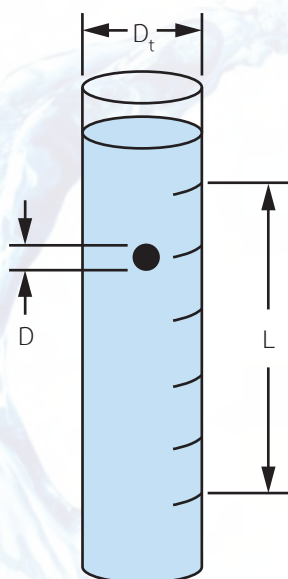
แรงเสียดทานของการไหลในท่อ

97

แบบทดสอบท้ายบท

116





บทที่ 5 การวัดทางกลศาสตร์ของไหล 120

การวัดความหนืด (Measurement of Viscosity) 121

การวัดความดันสถิตและความดันชะงักไหล 127

(Measurement of Static and Stagnation Pressure)

การวัดความเร็วการไหล (Measurement of Velocity) 129

การวัดอัตราการไหลในท่อ 134

(Measurement of Flow Rate in Closed Conduits)

แบบทดสอบท้ายบท 156

ภาคผนวก 160

คำถามเพื่อการทบทวน 263

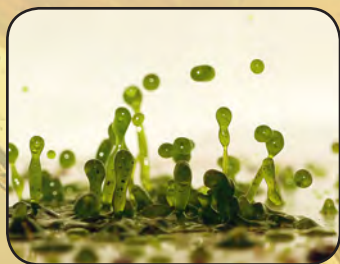
คำศัพท์ 266

บรรณานุกรม



บทที่ 1

แนวคิดพื้นฐานทาง กลศาสตร์ของไหล



จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม (Behavioral Objective)
หลังจากศึกษาจบบทเรียนนี้แล้ว นักศึกษามีความสามารถดังนี้

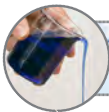
1. บอกนิยามของของไหล
2. จำแนกประเภทของของไหล
3. แสดงความรู้และใช้หน่วยและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา
กลศาสตร์ของไหล
4. บอกสมบัติของของไหล
5. อธิบายและยกตัวอย่างก๊าซสมมติหรือก๊าซอุดมคติ

บทที่ 1

แนวคิดพื้นฐานทาง กลศาสตร์ของไหล

วิชากลศาสตร์ของไหลเป็นสาขาหนึ่งของวิชากลศาสตร์ที่ได้มีการศึกษามาเป็นเวลานานแล้วในอดีต โดยบุคคล 2 กลุ่มด้วยกัน กลุ่มแรกจะเป็นนักคณิตศาสตร์ซึ่งจะศึกษากลศาสตร์ของไหลในเชิงวิเคราะห์ (Analytic) โดยใช้คณิตศาสตร์เป็นพื้นฐาน และกลุ่มที่สองจะเป็นนักไฮดรอลิกซึ่งจะศึกษาโดยการทดลองและบันทึกผล แล้วสร้างเป็นสมการทางเอมพิริคัล (Empirical) เช่น เรโนลด์ (Reynolds) ฟรูด (Froude) แพรนด์ท (Prandtl) เป็นต้น บุคคลทั้งสองกลุ่มนี้ได้ทำการศึกษาและสร้างทฤษฎีต่าง ๆ ไว้มากมาย แต่ในบางครั้งไม่สามารถนำมาใช้ในทางปฏิบัติได้จึงทำให้วิชากลศาสตร์ของไหลเป็นวิชาที่ตายไปช่วงศตวรรษที่ผ่านมา แต่ในปัจจุบันวิทยาการต่าง ๆ ได้ก้าวหน้าไปมากจึงทำให้วิชานี้ได้กลับมาพัฒนาขึ้นมาอีกครั้ง

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงนิยาม ประเภท และสมบัติต่าง ๆ ของของไหล ซึ่งจะใช้เป็นพื้นฐานในการศึกษาต่อไป

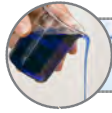


นิยามของของไหล

ของไหล หมายความว่า สสารในสถานะของเหลวและก๊าซ มีบทบาทสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ตลอดเวลา เช่น หายใจเอาอากาศเข้าสู่ร่างกาย ดื่มน้ำซึ่งเป็นของเหลว เป็นต้น นอกจากนี้ มนุษย์ยังนำสมบัติทางกายภาพของของไหลมาใช้ให้เกิดประโยชน์อื่น ๆ เช่น ใช้พลังงานจลน์ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของของไหลมาหมุนกังหันลม ใช้พลังงานศักย์จากของไหลมาสร้างพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น

ของไหลนิยามได้ว่า สสารที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อย่างต่อเนื่องถ้ามีความเค้นเฉือน (Shear Stress) มากพอ แม้จะมีขนาดเพียงเล็กน้อยเพียงใด ดังนั้น ของไหลจึงเป็นสสารที่สามารถไหลได้และเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปตามภาชนะที่บรรจุ ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะตรงกันข้ามกับของแข็ง ทั้งนี้

เนื่องจากว่าของไหลไม่สามารถที่จะทนแรงเฉือน (แรงที่ขนานกับผิวของของไหล) ได้ เมื่อของไหลได้รับแรงเฉือนจะมีความเร็วเกิดขึ้นหรือไหลได้นั่นเอง



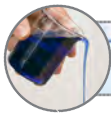
ประเภทของของไหล

ของไหลแบ่งประเภทได้ 3 ชนิดด้วยกันคือ

1. ของไหลอัดตัวได้ (Compressible Fluid) หมายถึง ของไหลที่ปริมาตรหรือความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงตามความดัน ตัวอย่างของไหลประเภทนี้ คือ ก๊าซเกือบทุกชนิดที่พบในปัจจุบัน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน เป็นต้น

2. ของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Fluid) หมายถึง ของไหลที่ปริมาตรหรือความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงน้อยมากหรือไม่เปลี่ยนแปลงตามความดัน ตัวอย่างของไหลประเภทนี้ ได้แก่ ของเหลวเกือบทุกชนิดที่พบในปัจจุบัน เช่น น้ำ น้ำมัน เป็นต้น

3. ของไหลอุดมคติ (Ideal Fluid) หมายถึง ของไหลที่ไม่มีความเสียดทานหรือความหนืด ดังนั้น ความดันของของไหลอุดมคติจะมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่ที่ของไหลนี้ไหลผ่าน



หน่วยและสัญลักษณ์

หน่วยที่ใช้ในการศึกษากลศาสตร์ของไหลในปัจจุบันจะยึดตามระบบ SI เป็นหลัก จะประกอบไปด้วยหน่วยหลัก (Primary Unit) ซึ่งมาจากปริมาณพื้นฐาน 3 ตัวคือ มวล (Mass) ความยาว (Length) และเวลา (Time) และหน่วยรอง (Secondary Unit) ซึ่งเกิดจากการสร้างความสัมพันธ์ของปริมาณพื้นฐานดังกล่าว โดยที่

ปริมาณหลัก	หน่วย	สัญลักษณ์แทนหน่วย
มวล	กิโลกรัม (Kilogram)	Kg
ความยาว	เมตร (Meter)	m
เวลา	วินาที (Second)	s
ปริมาณรอง	หน่วย	สัญลักษณ์แทนหน่วย
แรง	นิวตัน (Newton)	N



ตามกฎข้อที่สองของนิวตันนั้น แรงมีค่าเท่ากับมวลคูณกับความเร่งของวัตถุ ดังนั้น

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \times 1 \text{ m/s}^2$$

ซึ่งหน่วยรอง N เกิดจากการรวมตัวของหน่วยหลักทั้งสามนั่นเอง

สำหรับระบบอังกฤษแบบแรงโน้มถ่วง (British Gravitational) จะมีหน่วยหลักและหน่วยรองดังนี้

ปริมาณหลัก	หน่วย	สัญลักษณ์แทนหน่วย
มวล	สลัก (Slug)	slug
ความยาว	ฟุต (Feet)	ft
เวลา	วินาที (Second)	s
ปริมาณรอง	หน่วย	สัญลักษณ์แทนหน่วย
แรง	ปอนด์ (Pound)	lb

$$\text{ซึ่ง } 1 \text{ lb} = 1 \text{ slug} \times 1 \text{ ft/s}^2$$

สำหรับระบบอังกฤษแบบวิศวกรรมนั้น จะมีปริมาณที่ใช้แตกต่างกันออกไปดังนี้

ปริมาณหลัก	หน่วย	สัญลักษณ์แทนหน่วย
มวล	ปอนด์แมส (Pound – Mass)	lbm
ความยาว	ฟุต (Feet)	ft
เวลา	วินาที (Second)	s
ปริมาณรอง	หน่วย	สัญลักษณ์แทนหน่วย
แรง	ปอนด์ฟอส (Pound – Force)	lbf

หน่วยเหล่านี้จะสัมพันธ์ไปตามกฎข้อสองของนิวตัน ที่ว่า $F \propto ma$ เขียนในรูปสมการที่แทนด้วยค่าคงที่ k ได้เป็น

$$F = kma$$

กำหนดให้ 1 lbf คือ ปริมาณแรงที่ใช้ในการทำให้มวล 1 lbm มีความเร่ง 32.2 ft/s^2 ซึ่งเมื่อแทนลงในสมการความสัมพันธ์จะได้

$$1 \text{ lbf} = k (1 \text{ lbm})(32.2 \text{ ft/s}^2)$$

แก้สมการเพื่อหาค่า k ได้

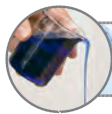
$$g_c = \frac{1}{k} = 32.2 \text{ lbm} \cdot \text{ft} / \text{lb}_f \cdot \text{s}^2$$

โดยที่ค่า g_c เป็นค่าคงที่ที่ถูกเพิ่มเข้าไปในสมการกฎข้อที่สองของนิวตันเพื่อให้หน่วยถูกต้อง ดังนั้น กฎข้อที่สองของนิวตันในระบบหน่วยของอังกฤษจึงเป็น

$$F = \frac{ma}{g_c}$$

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า

$$32.2 \text{ lbm} = 1 \text{ slug}$$



สมบัติของของไหล (Fluid Properties)

1. ความหนาแน่น (Density)

สำหรับของไหลปริมาณหนึ่ง ในการหาความหนาแน่น (ρ) ณ ตำแหน่งใด ๆ ภายในของไหล โดยพิจารณาปริมาตรเล็ก ๆ (ΔV) รอบตำแหน่งนั้น และวัดมวล (Δm) ของของไหลที่บรรจุในปริมาตรเล็ก ๆ ดังกล่าว จะได้ความหนาแน่นเป็น

$$\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V} \dots\dots\dots(1.1)$$

ในทางปฏิบัติ ถ้าวัดของไหลตัวอย่างมีขนาดใหญ่มากเมื่อเปรียบเทียบกับมิติของอะตอม จากข้อสมมติฐานดังกล่าว จึงสามารถที่จะเขียนสมการที่ 1.1 ได้เป็น $\rho = m/V$ โดยที่ m และ V คือ มวลและปริมาตรของของไหลตัวอย่าง

ความหนาแน่นเป็นปริมาณสเกลาร์ มีหน่วยเป็น kg/m^3 หรือ slug/ft^3 ความดันที่เปลี่ยนแปลง มีผลต่อความหนาแน่นของก๊าซแต่ไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นของของเหลว ดังนั้น ก๊าซจึงเป็นของไหลที่อัดตัวได้ และของเหลวเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้

2. ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

ความถ่วงจำเพาะเป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่า สารนั้นมีความหนาแน่นเป็นกี่เท่าของความหนาแน่นของน้ำที่ 4°C เป็นค่าไร้มิติ (ไม่มีหน่วย) เขียนความสัมพันธ์เป็นสมการได้คือ

$$\text{S.G.} = \frac{\rho_{\text{สาร}}}{\rho_{\text{น้ำ}}} \dots\dots\dots(1.2)$$

3. น้ำหนักจำเพาะ (Specific Weight)

น้ำหนักจำเพาะเป็นปริมาณที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง ขณะที่ความหนาแน่น คือ อัตราส่วนระหว่างมวลต่อปริมาตรของวัตถุ น้ำหนักจำเพาะ คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักต่อปริมาตรของวัตถุ

$$\text{ดังนั้น } S.W. = \frac{\text{น้ำหนัก}}{\text{ปริมาตร}} = \frac{W}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad \dots\dots\dots(1.3)$$

มีหน่วยเป็น N/m^3 หรือ lbf/ft^3

4. ปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume)

เนื่องจากปริมาตรเป็นปริมาณที่ขึ้นอยู่กับขนาด (Extensive Property) เพื่อให้เกิดความสะดวกในการพิจารณาในเชิงของกลศาสตร์ของไหลหรือเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับความดันหรืออุณหภูมิอันเป็นปริมาณที่ไม่ขึ้นอยู่กับขนาด (Intensive Property) จำเป็นต้องทำปริมาตรให้เป็นปริมาณที่ไม่ขึ้นกับขนาดเช่นเดียวกัน โดยการพิจารณาเป็นปริมาตรเทียบต่อ 1 หน่วยมวล

$$\text{ดังนั้น } v = \frac{V}{m} \quad \dots\dots\dots(1.4)$$

ใช้สัญลักษณ์ v ตัวเล็กแทนปริมาตรจำเพาะ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ปริมาตรจำเพาะส่วนกลับของความหนาแน่นนั่นเอง

$$\text{ดังนั้น } v = \frac{1}{\rho} \quad \dots\dots\dots(1.5)$$

มีหน่วยเป็น m^3/kg หรือ $ft^3/slug$

5. ความดัน (Pressure)

ของไหลเป็นสสารซึ่งสามารถเคลื่อนที่ในลักษณะการไหลได้ และเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปตามภาชนะที่บรรจุ เนื่องจากของไหลไม่สามารถที่จะทนแรงเฉือนได้ เมื่อมีแรงเฉือนมากระทำจะทำให้ของไหลบริเวณผิวชั้นบนที่รับแรงเกิดความเร็วขึ้น อย่างไรก็ดี ของไหลสามารถที่จะออกแรงกระทำในแนวตั้งฉากกับพื้นที่ผิวของมันได้ ซึ่งแรงกระทำดังกล่าวอธิบายในเทอมของความดัน p ได้ คือ

$$p = \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad \dots\dots\dots(1.6)$$

ซึ่ง ΔF คือ แรงที่กระทำลงบนพื้นที่ ΔA ถ้าแรงมีขนาดคงตัวเหนือพื้นที่ที่กระทำ (แรงมีขนาดเท่ากันทุก ๆ จุดบนพื้นที่) จะได้ว่า $p = F/A$

หน่วยความดันวัดได้ในลักษณะของแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ สำหรับหน่วย SI จะวัดความดันในหน่วยนิวตันต่อตารางเมตรหรือเรียกใหม่ว่า **ปาสคาล (Pascal, Pa)** หรือวัดในลักษณะของความสูง (Head) ก็ได้ เช่น มิลลิเมตรปรอท เมตรน้ำ เป็นต้น ซึ่งความดัน 1 บรรยากาศ (atm) คือ ความดันเฉลี่ยโดยประมาณของบรรยากาศ ที่ระดับน้ำทะเลจะมีค่าเท่ากับ $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ หรือ 760 mmHg หรือ 14.7 lb/in^2

ตัวอย่างที่ 1.1 ห้องพักอาศัยห้องหนึ่งมีขนาดเป็น 3.5 เมตร และ 4.2 เมตร ความสูงเป็น 2.4 เมตร จงหาขนาดน้ำหนักของอากาศภายในห้องนี้ และแรงที่บรรยากาศกระทำกับพื้นห้อง กำหนดให้ความหนาแน่นของอากาศที่ความดัน 1 atm เป็น 1.21 kg/m^3

วิธีทำ กำหนดให้ V คือ ปริมาตรของห้องนี้ และ ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ ดังนั้น น้ำหนักของอากาศ W เท่ากับ

$$\begin{aligned} W &= mg = \rho Vg \\ &= (1.21 \text{ kg/m}^3)(3.5 \text{ m} \times 4.2 \text{ m} \times 2.4 \text{ m})(9.8 \text{ m/s}^2) \\ &= 418 \text{ N} \end{aligned}$$

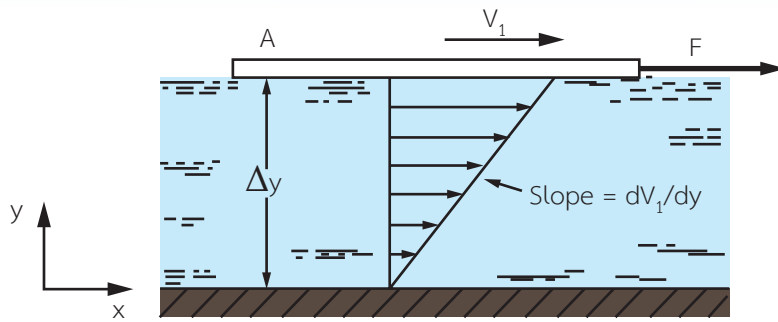
แรงที่อากาศกระทำกับห้อง คือ

$$\begin{aligned} F &= pA = (1.0 \text{ atm}) \left(\frac{1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2}{1 \text{ atm}} \right) (3.5 \text{ m})(4.2 \text{ m}) \\ &= 1.5 \times 10^6 \text{ N} \end{aligned}$$

6. ความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute or Dynamic Viscosity)

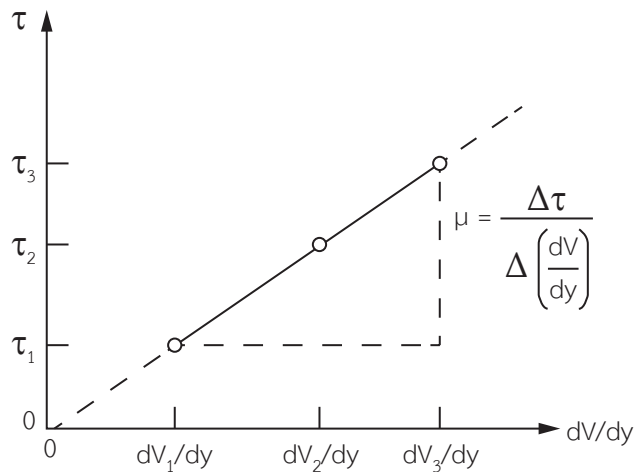
เป็นสมบัติอย่างหนึ่งซึ่งสำคัญมากสำหรับของไหล เนื่องจากเป็นสมบัติที่เกิดขึ้นมาจากนิยามของของไหลโดยตรง ความหนืดสัมบูรณ์ (นิยมเรียกแค่ “ความหนืด”) เป็นปริมาณที่วัดจากความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนภายนอกที่กระทำต่อของไหล

ย้อนถึงนิยามของของไหลที่กล่าวไว้ว่า ของไหลของสสารซึ่งเปลี่ยนรูปร่างอย่างต่อเนื่องภายใต้การกระทำของแรงเฉือน พิจารณารูป 1.1 ซึ่งเป็นการบรรจุของไหลชนิดหนึ่งไว้ระหว่างแผ่นแบนราบสองแผ่น โดยแผ่นบนซึ่งสัมผัสกับของไหลมีพื้นที่ A ถูกดึงให้เลื่อนไปทางด้านขวาด้วยแรง F_1 ด้วยความเร็ว V_1 ถ้าวัดความเร็ว ณ ตำแหน่งใด ๆ ในของไหล จะสามารถเขียนแผนภาพการกระจายความเร็วได้ดังรูปที่ 1.1 เนื่องจากผิวของของไหลด้านบนติดอยู่กับแผ่นที่เคลื่อนที่ ความเร็วของของไหล ณ ตำแหน่งนี้ จะเท่ากับความเร็วเคลื่อนที่ของแผ่น คือ V_1 ขณะที่ผิวตอนล่างของของไหลจะมีความเร็วเป็นศูนย์ เนื่องจากแผ่นด้านล่างไม่ได้เคลื่อนที่ พิจารณาสถานะของไหลไม่มีการเลื่อนตัว (Nonslip) ดังนั้น ความชันของเส้นการกระจายความเร็วจึงมีค่า dV_1/dy



รูปที่ 1.1 แรงเฉือนที่กระทำต่อของไหล

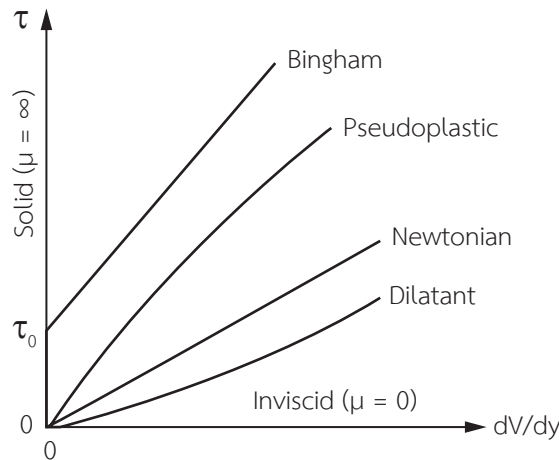
ถ้าทำการทดลองซ้ำอีกครั้งโดยเปลี่ยนขนาดของแรงเฉือนที่ใช้ดึงแผ่นบนเป็น F_2 ก็จะได้เส้นความชันที่แตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปทุก ๆ ขนาดของแรงที่กระทำต่อของไหลจะได้ผลที่สัมพันธ์กันเพียงหนึ่งความเค้นเฉือน (Shear Stress, τ) และหนึ่งความชัน (dV/dy) เสมอ ดังรูปที่ 1.2 ซึ่งเป็นผลจากการทดลองของไหล เช่น น้ำ โดยจุดที่กำหนดได้จากการทดลองสามารถลากเป็นเส้นตรงต่อกันไปผ่านจุดกำเนิด ความชันของเส้นที่เกิดจากการเชื่อมจุดดังกล่าวนี้คือ ความหนืดของของไหลนั่นเอง เนื่องจากเป็นค่าที่มาจากการวัดความสามารถในการต้านแรงเฉือนของของไหล หรืออาจจะกล่าวได้ว่า ความหนืดจะเป็นตัวชี้ให้เห็นว่าของไหลจะเปลี่ยนไปอย่างไร (dV/dy) ภายใต้การกระทำของความเค้นเฉือนภายนอก (τ)



รูปที่ 1.2 แผนภาพรีโอโลจิกของของไหลนิวตันเนียน

การกำหนดจุดแล้วสร้างเส้นตรงที่มีความชันลากผ่านจุดกำเนิดที่กล่าวมานั้น เป็นคุณลักษณะของของไหลที่มีพฤติกรรมแบบนิวตัน เรียกว่า **ของไหลนิวตันเนียน (Newtonian Fluid)** แต่ยังมีของไหล

ชนิดอื่น ๆ ที่มีพฤติกรรมแตกต่างกันออกไปซึ่งจะเรียกว่า **ของไหลนอนนิวตันเนียน (Non – Newtonian Fluid)** กราฟที่เกิดจากการพลอตระหว่าง τ และ dV/dy เรียกว่า **แผนภาพรีโอโลจิก (Rheological Diagram)** ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 แผนภาพรีโอโลจิกของของไหลนิวตันเนียน และนอนนิวตันเนียนแบบไม่ขึ้นกับเวลา

ของไหลนิวตันเนียนที่เป็นไปตามกฎความหนืดของนิวตันเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy} \dots\dots\dots(1.7)$$

โดยที่ τ = ความเค้นเฉือน (N/m^2 หรือ lbf/ft^2)

μ = ความหนืดของของไหล ($N \cdot s/m^2$ หรือ $lbf \cdot s/ft^2$)

dV/dy = อัตราการเยื้อง (Strain Rate) (rad/s)

ตัวอย่างของไหลนิวตันเนียน ได้แก่ น้ำ น้ำมัน และอากาศ ถ้าของไหลใด ๆ ก็ตาม ไม่สามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 1.7 ถือว่าเป็นของไหลนอนนิวตันเนียน

จากพฤติกรรมดังกล่าวของของไหล สามารถที่จะจำแนกของไหลออกได้เป็น 3 ชนิด คือ ชนิดไม่ขึ้นต่อเวลา (Time – Independent) ชนิดขึ้นกับเวลา (Time – Dependent) และชนิดความหนืดยืดหยุ่น (Viscoelastic)

ของไหลชนิดไม่ขึ้นกับเวลา

ทรายเปียกที่ชายหาด และสารละลายน้ำอื่น ๆ ที่ประกอบไปด้วยผงเข้มข้น เป็นตัวอย่างของของไหลพองตัว (Dilatant Fluid) ดังรูปที่ 1.3 ของไหลประเภทนี้จะมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น

มักใช้สมการของ Ostwald – deWaele ในการพิจารณาของไหลประเภทนี้ซึ่งให้ความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้ ดังนี้

$$\tau = k \left(\frac{dV}{dy} \right)^n \quad \text{เมื่อ } n > 1 \quad \dots\dots\dots(1.8)$$

เมื่อ K = ดัชนีความข้น (Consistency Index) มีหน่วยเป็น $N \cdot s^n / m^2$ หรือ $lbf \cdot s^n / ft^2$
 n = ดัชนีพฤติกรรมการไหล (Flow Behavior Index)

จารบี ไขมัน มายองเนส หรือสารประเภทแป้งเปียก เป็นตัวอย่างของของไหลประเภทพลาสติกเทียม (Pseudoplastic) ของไหลประเภทนี้จะมีความหนืดลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ใช้สมการของ Ostwald – deWaele ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาของไหลประเภทนี้อีกครั้ง

$$\tau = k \left(\frac{dV}{dy} \right)^n \quad \text{เมื่อ } n < 1 \quad \dots\dots\dots(1.9)$$

ซีอิ้วโกแลตผสม โคลน สีทาบ้าน สบู่ เนื้อเยื่อ ยาสีฟัน เหล่านี้เป็นตัวอย่างของของไหลแบบพลาสติกบิงแฮม (Binghamplastic) ซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายของแข็งที่ความเค้นที่กระทำกับของไหลไม่เกินความเค้นเฉือนล้าเริ่มต้น τ_0 เมื่อความเค้นเลยจากจุดนี้ไป ของไหลแบบพลาสติกบิงแฮมจะมีพฤติกรรมแบบของไหลนิวตันเนียน สมการที่ใช้ในการอธิบายของไหลประเภทนี้คือ

$$\tau = \tau_0 + \mu_0 \frac{dV}{dy} \quad \dots\dots\dots(1.10)$$

ของไหลชนิดขึ้นกับเวลา

ยิปซัมเหนียวเป็นตัวอย่างของไหลแบบรีโอเพคติก (Rheopectic Fluid) ซึ่งความเค้นเฉือนจะเพิ่มขึ้นตามเวลาทำให้ของไหลประเภทนี้จะมีค่าอัตราเยื้องคองที่ ดังรูปที่ 1.2 τ_1 จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลา เพื่อให้ dV_1/dy มีค่าคงที่

สีแห้งเร็ว อาหารเหลวบางชนิด เป็นตัวอย่างของของไหลแบบธิโซทรอปิก (Thixotropic Fluid) ซึ่งมีพฤติกรรมตรงกันข้ามกับของไหลแบบรีโอเพคติก กล่าวคือ ความเค้นเฉือนจะลดลงตามเวลาทำให้ของไหลประเภทนี้จะมีค่าอัตราเยื้องคองที่ ดังรูปที่ 1.2 τ_1 จะลดลงเรื่อย ๆ ตามเวลาเพื่อให้ dV_1/dy มีค่าคงที่

ของไหลชนิดความหนืดยืดหยุ่น

แป้งโดนต์ ขนมหัน เป็นตัวอย่างของของไหลประเภทนี้ ของไหลจะแสดงคุณสมบัติทั้งความยืดหยุ่นและความหนืดคู่กันไป เมื่อได้รับความเค้นเฉือนของไหลจะเปลี่ยนรูปไปและด้วยสมบัติของความยืดหยุ่นที่มีของไหลจะคืนรูปกลับบ้าง โดยทั่วไปจะมีพฤติกรรมแบบของไหลนิวตันเนียน

สมบัติต่าง ๆ ของของไหลบางชนิดได้แสดงไว้ในตารางภาคผนวก

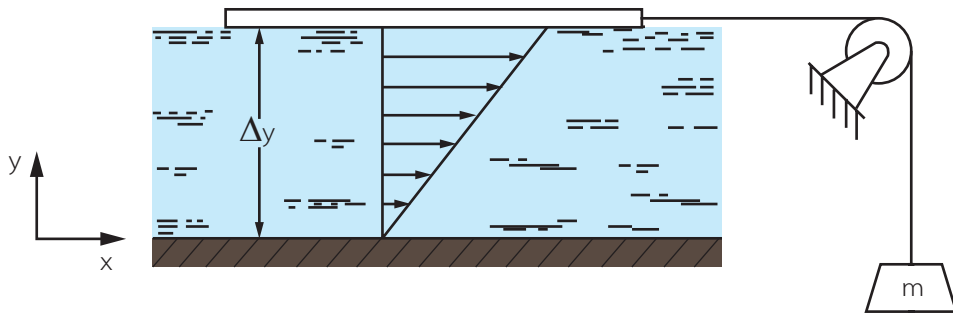
ตัวอย่างที่ 1.2 ของไหลถูกบรรจุไว้ระหว่างแผ่นแบนสองแผ่นขนานกัน แผ่นบนเคลื่อนที่ได้และถูกผูกไว้กับก้อนน้ำหนักด้วยเคเบิลดั่งรูป จงคำนวณหาความเร็วของแผ่นบนสำหรับ 3 กรณีดังนี้

ก) ของไหลเป็นน้ำมันลินสีด (Linseed Oil) พฤติกรรมแบบนิวตันเนียน

ข) ของไหลเป็นน้ำ

ค) ของไหลเป็นไข (Grease) กำหนดค่า $\tau_0 = 4 \text{ N/m}^2$ และ $\mu_0 = 0.004 \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$

ทุกกรณีกำหนดให้ $m = 0.001 \text{ kg}$, $\Delta y = 5 \text{ mm}$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ และพื้นที่สัมผัส $A = 0.5 \text{ m}^2$ สมมติให้สภาวะที่เกิดคงตัว



วิธีทำ ก) จากตารางที่ A.5 ในภาคผนวก สำหรับน้ำมันลินสีด $\mu = 0.0331 \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$

$$\text{แรงที่กระทำ } W = mg = 0.001 \text{ kg} (9.81 \text{ m/s}^2) = 0.0098 \text{ N}$$

$$\text{ความเค้นเฉือน } \tau = F/A = W/A = 0.0098 \text{ N}/0.5 \text{ m}^2 = 0.02 \text{ N/m}^2$$

จากสมการที่ 1.7

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy} \quad \text{เมื่อสภาวะคงตัวจะได้} \quad \tau = \mu \frac{\Delta V}{\Delta y}$$

ที่ $y = 0$ จะได้ $V = 0$ และที่แผ่นบน $y = \Delta y = 0.005 \text{ m}$

$$\text{แทนค่าได้} \quad 0.02 \text{ N/m}^2 = 0.0331 \text{ N}\cdot\text{s/m}^2 \frac{V}{0.005 \text{ m}}$$

$$\text{จะได้} \quad V = 0.00302 \text{ m/s} = 3 \text{ mm/s}$$

ข) จากตารางที่ A.5 ในภาคผนวก สำหรับน้ำ $\mu = 0.89 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$

$$\text{แทนค่าได้} \quad 0.02 \text{ N/m}^2 = 0.89 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s/m}^2 \frac{V}{0.005 \text{ m}}$$

$$\text{จะได้} \quad V = 0.11 \text{ m/s}$$

ค) ความเค้นเฉือนที่กระทำคือ 0.02 N/m^2 ในขณะที่ความเค้นเฉือนเริ่มต้นของไหลเท่ากับ 4 N/m^2 ดังนั้น แผ่นจะไม่เคลื่อนที่ ($V = 0$) จนกว่าจะเพิ่มความเค้นเฉือนให้มีค่าเกินกว่า 4 N/m^2

7. ความหนืดจลน์ (Kinematic Viscosity)

นอกเหนือไปจากความหนืดสัมบูรณ์แล้ว ความหนืดจลน์ (ν) ยังเป็นค่าความหนืดอีกชนิดหนึ่ง ที่นิยมใช้ในการสมการทางด้านกลศาสตร์ของไหล นิยามว่า เป็นอัตราส่วนระหว่างความหนืดสัมบูรณ์กับความหนาแน่นของของไหล หรือ

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \dots\dots\dots(1.11)$$

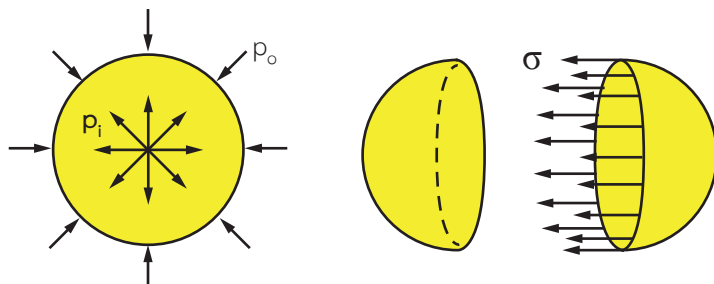
ยกตัวอย่าง จากตารางในภาคผนวก A.5 ความหนาแน่นของ Ethylene Glycol เท่ากับ $1,100 \text{ kg/m}^3$ และความหนืดสัมบูรณ์เป็น $16.2 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$ ดังนั้น ค่าความหนืดจลน์ คือ

$$\nu = \frac{16.2 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s/m}^2}{1,100 \text{ kg/m}^3} = 1.48 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

หน่วยของความหนืดจลน์ คือ m^2/s หรือ ft^2/s ทั้งความหนืดและความหนาแน่นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากตาราง A.3 และ A.4 ในภาคผนวก

8. ความตึงผิว (Surface Tension)

แรงตึงผิวของของเหลวเกิดขึ้นจากแรงระหว่างโมเลกุลของของเหลว จะเรียกว่า **Cohesion** หรือระหว่างสิ่งที่ไม่ใช่โมเลกุลซึ่งจะเรียกว่า **Adhesion** ภายในของเหลวทั่วไปนั้น แรง Cohesion ที่กระทำบนโมเลกุลโดยโมเลกุลข้างเคียงนั้นจะสมดุลกัน เพราะโมเลกุลหนึ่ง ๆ จะถูกล้อมรอบไปด้วยโมเลกุลหลาย ๆ โมเลกุล อย่างไรก็ตาม ใกล้ ๆ พื้นผิวอิสระนั้น แรง Cohesion ระหว่างโมเลกุลของเหลวด้วยกันเองจะสูงกว่าโมเลกุลของอากาศและโมเลกุลของของเหลว ดังนั้น จึงมีแรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นบนโมเลกุลของของเหลวกระทำภายในของเหลวนั้น ๆ แรงนี้เรียกว่า **แรงตึงผิว** ซึ่งแรงนี้จะแปรผันตรงกับผลคูณของค่าคงที่ของแรงตึงผิวและความยาวของพื้นผิวอิสระ



รูปที่ 1.4 แผนผังวัตถุอิสระของหยดน้ำ

พิจารณาแผนผังวัตถุอิสระของหยดน้ำในสภาวะสมดุล ดังรูปที่ 1.4 จะได้ว่าผลต่างของแรงดันระหว่างภายนอกและภายในหยดน้ำจะมีค่าเท่ากับแรงตึงผิวที่กระทำบนพื้นผิวของหยดน้ำ ดังนั้นเมื่อสมดุลแรงทั้งสองจะได้

ผลต่างความดันภายนอก $\times$ พื้นที่หน้าตัดของหยดน้ำ = แรงตึงผิว $\times$ ความยาวของเส้นหน้าตัด หรือ

$$(p_i - p_o) \pi R^2 = \sigma (2\pi R)$$

$$\text{จัดรูปใหม่ได้ } p_i - p_o = \frac{2\sigma}{R} \quad \dots\dots\dots(1.12)$$

- เมื่อ R = รัศมีของหยดน้ำ
 p_o = ความดันภายนอกของหยดน้ำ
 p_i = ความดันภายในของหยดน้ำ
 σ = ค่าคงที่ของแรงตึงผิว

ตัวอย่างที่ 1.3 จงคำนวณหาความดันภายในหยดน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 cm ที่อยู่ในอากาศ บรรยากาศความดัน 101,300 N/m²

วิธีทำ จากตาราง A.5 สำหรับน้ำจะได้

$$\sigma = 71.97 \times 10^{-3} \text{ N/m}$$

$$p_o = 101,300 \text{ N/m}^2 \text{ และรัศมีของหยดน้ำ } R = 0.01/2 = 0.005 \text{ cm} = 0.00005 \text{ m}$$

ดังนั้น ความดันภายในหยดน้ำ

$$p_i = p_o + \frac{2\sigma}{R} = 101,300 \text{ N/m}^2 + \frac{2 (71.97 \times 10^{-3}) \text{ N/m}}{0.00005 \text{ m}}$$

$$p_i = 101,300 \text{ N/m}^2 = 104 \text{ kPa}$$

เมื่อของเหลวสัมผัสกับของแข็ง เช่น การบรรจุของเหลวไว้ในหลอดแก้ว ดังรูปที่ 1.5 แรงที่พิจารณา คือแรง Adhesion ระหว่างของไหลกับของแข็ง (ผิวด้านในของหลอดแก้ว) และแรง Cohesion ภายในของเหลวด้วยกันเอง ถ้าของเหลวที่บรรจุอยู่เป็นปรอทจะพบว่า ผิวด้านบนของปรอทจะโค้งขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากแรง Cohesion ของปรอทมีมากกว่าแรง Adhesion ซึ่งถ้าเปลี่ยนของไหลที่บรรจุอยู่เป็นน้ำ จะพบว่า ผิวด้านบนของปรอทจะโค้งลง อธิบายได้ในทำนองตรงกันข้ามว่าแรง Cohesion ของน้ำมีค่าน้อยกว่าแรง Adhesion นั่นเอง