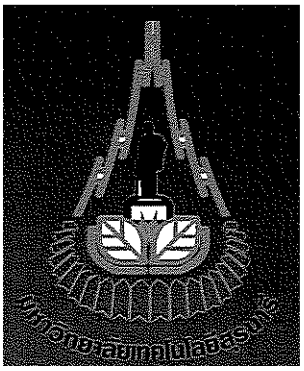


ชลศาสตร์
(Hydraulics)

เรียบเรียงโดย

ผศ.ดร.ปรียาพร โกษา

คำนำ

ชลศาสตร์ (Hydraulics) เป็นความรู้เชิงวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ประยุกต์ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติเชิงกลของของไหล หนังสือเล่มนี้ ผู้เขียนได้ศึกษา รวบรวม และเรียบเรียงมาจากหนังสือหลายเล่ม โดยประกอบด้วยเนื้อหาที่สำคัญ 9 บท คือ บทนำ แรงเนื่องจากของไหลสถิต จลนศาสตร์และสมการของของไหล การวิเคราะห์มิติและความคล้ายคลึง ระบบท่อ เครื่องสูบน้ำ การไหลในทางน้ำเปิด การวัดการไหล แรงจากการเคลื่อนที่ของของไหล แรงยก และแรงหน่วง ทั้งนี้ได้เริ่มอธิบายจากบทที่เป็นความรู้พื้นฐานซึ่งผู้อ่านควรที่จะทราบและเข้าใจในเบื้องต้น ต่อจากนั้นจะกล่าวถึงการนำชลศาสตร์ไปประยุกต์ใช้ในรูปแบบต่าง ๆ ด้วยคำอธิบายที่ละเอียด พร้อมทั้งตัวอย่างเชิงตัวเลข และแบบฝึกหัดท้ายบทที่ครอบคลุมเนื้อหาอย่างครบถ้วน ผู้อ่านจึงสามารถศึกษาเนื้อหาโดยส่วนใหญ่ได้ด้วยตนเอง

ท้ายสุดนี้ หวังเป็นอย่างยิ่งว่า หนังสือชลศาสตร์เล่มนี้ จะเป็นหิตประโยชน์ต่อผู้สอน นิสิต นักศึกษา และบุคคลทั่วไปที่สนใจ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรียาพร โกษา

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ระบบหน่วย	1
1.2 คุณสมบัติของของเหลว	4
1.3 ความดัน	6
1.4 การอัดตัวได้ของของไหล	8
1.5 ความหนืดของไหล	10
1.6 ความตึงผิว	11
1.7 การวัดความดันของไหล	12
1.8 มาโนมิเตอร์	15
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 1	19
บทที่ 2 แรงเนื่องจากของไหลสถิต	23
2.1 แรงเนื่องจากของไหลสถิต	23
2.2 แรงลอยตัว	37
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 2	45
บทที่ 3 จลนศาสตร์และสมการของของไหล	51
3.1 รูปแบบการไหล	52
3.2 สมการต่อเนื่อง	52
3.3 สมการพลังงานและสมการเบอร์นูลลี่	55
3.4 สมการทั่วไปของสมการพลังงาน	68
3.5 กำลังงานที่ได้จากปั๊ม	71
3.6 สมการโมเมนตัมเชิงเส้น	74
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 3	80
บทที่ 4 การวิเคราะห์มิติและความคล้ายคลึง	89
4.1 ความคล้ายคลึงเชิงเรขาคณิต	89
4.2 ความคล้ายคลึงเชิงจลน์	90
4.3 ความคล้ายคลึงเชิงพลวัต	90
4.4 มิติของปริมาณ	93
4.5 ทฤษฎี Buckingham π	94

	หน้า
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 4	98
บทที่ 5 ระบบท่อ	**100**
5.1 ตัวเลขเรย์โนลด์	100
5.2 สมการดาร์ซี	102
5.3 การสูญเสียพลังงานในการไหลแบบราบเรียบ	103
5.4 การสูญเสียพลังงานในการไหลแบบปั่นป่วน	104
5.5 สมการสำหรับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	108
5.6 การสูญเสียรอง	109
5.7 สมการของ Hazen-Williams	115
5.8 การต่อท่อแบบอนุกรม	117
5.9 การต่อท่อแบบขนาน	120
5.10 ระบบท่อเครือข่าย	123
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 5	125
บทที่ 6 เครื่องสูบน้ำ	**130**
6.1 ปัจจัยในการเลือกปั๊ม	132
6.2 ชนิดของปั๊มน้ำ	132
6.3 กฎความคล้ายคลึงของปั๊มน้ำชนิดแรงเหวี่ยง	133
6.4 ข้อมูลสำหรับปั๊มน้ำชนิดแรงเหวี่ยง	136
6.5 ปรากฏการณ์การเกิดโพรงไอ และแรงดันไอ	139
6.6 เฮดความดันด้านดูดสุทธิ	140
6.7 การเลือกปั๊มและความเร็วจำเพาะของปั๊ม	143
6.8 การต่อปั๊มแบบขนานและแบบอนุกรม	145
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 6	146
บทที่ 7 การไหลในทางน้ำเปิด	**148**
7.1 การจำแนกประเภทของการไหล	148
7.2 การแบ่งประเภทของการไหลในทางน้ำเปิด	153
7.3 สมการแมนนิ่ง	154
7.4 พลังงานจำเพาะ	159

หน้า

7.5 ปรากฏการณ์น้ำกระโดด 163

7.6 การวัดอัตราการไหลในทางน้ำเปิด 166

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 7 170

บทที่ 8 การวัดการไหล 174

8.1 เวนจูรี่ 174

8.2 หัวฉีด 178

8.3 ช่องเปิดขอบคม 179

8.4 หลอดปิโตร 180

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 8 183

บทที่ 9 แรงจากการเคลื่อนที่ของของไหล แรงยก และแรงหน่วง 187

9.1 แรงกระทบของลำของไหลบนใบจักร 187

9.2 สมการแรงหน่วง 196

9.3 แรงยกและแรงหน่วงของปีกเครื่องบิน 199

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 9 201

รายการอ้างอิง 204

ภาคผนวก ก คุณสมบัติทางกายภาพของของไหล 206

ภาคผนวก ข การแปลงหน่วย 214

ภาคผนวก ค คำตอบแบบฝึกหัดท้ายบท 217

ภาคผนวก ง ดัชนี 223

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1.1	หน่วยอนุพันธ์	2
ตารางที่ 1.2	อักษรนำหน้าหน่วย	2
ตารางที่ 1.3	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสำหรับของเหลวชนิดต่าง ๆ ที่ความดันบรรยากาศ และที่อุณหภูมิ 20 °C	9
ตารางที่ 2.1	โมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับหน้าตัดแบบต่าง ๆ	30
ตารางที่ 4.1	มิติของปริมาณทางกายภาพและหน่วยในระบบ SI	93
ตารางที่ 5.1	ค่าสัมประสิทธิ์ของ Hazen-William (C_h)	115
ตารางที่ 5.2	สมการของ Hazen-William ในรูปแบบต่าง ๆ	116
ตารางที่ 7.1	ลักษณะทางเรขาคณิตของทางน้ำ	149

สารบัญตารางภาคผนวก

		หน้า
ตารางภาคผนวก ก-1	คุณสมบัติเชิงกายภาพของน้ำที่ความดันสัมบูรณ์ 101 kPa (หน่วย SI)	206
ตารางภาคผนวก ก-2	คุณสมบัติเชิงกายภาพของน้ำที่ความดันสัมบูรณ์ 14.7 psi (หน่วยอังกฤษ)	207
ตารางภาคผนวก ก-3	คุณสมบัติเชิงกายภาพของของเหลวที่ความดันสัมบูรณ์ 101 kPa และ 25 °C (หน่วย SI)	208
ตารางภาคผนวก ก-4	คุณสมบัติเชิงกายภาพของของเหลวที่ความดันสัมบูรณ์ 14.7 psi และ 77°F (หน่วย อังกฤษ)	209
ตารางภาคผนวก ก-5	คุณสมบัติเชิงกายภาพของ Petroleum Lubricating Oils	210
ตารางภาคผนวก ก-6	คุณสมบัติเชิงกายภาพของอากาศที่ความดันบรรยากาศ 1 บรรยากาศ (หน่วย SI)	211
ตารางภาคผนวก ก-7	คุณสมบัติเชิงกายภาพของอากาศที่ความดันบรรยากาศ 1 บรรยากาศ (หน่วย อังกฤษ)	212
ตารางภาคผนวก ก-8	คุณสมบัติเชิงกายภาพของบรรยากาศ	213

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 1.1	การกระจายความดัน ณ รูปทรงวัตถุต่าง ๆ	7
ภาพที่ 1.2	การอัดตัวและโมดูลัสความยืดหยุ่น	8
ภาพที่ 1.3	หลักการของความหนืดพลวัต	10
ภาพที่ 1.4	หลอดคาพิลาลี	11
ภาพที่ 2.1	ความดันบนพื้นผิวและแรงที่กระทำต่อพื้นผิวเรียบ	25
ภาพที่ 2.2	แรงที่กระทำต่อพื้นผิวเรียบที่จมในของเหลว	28
ภาพที่ 2.3	หลักการของความสูงพีโซมิเตอร์ สำหรับแรงที่กระทำต่อพื้นผิวเรียบที่จมในของไหล	31
ภาพที่ 2.4	การกระจายแรงดันบนพื้นผิวโค้ง	33
ภาพที่ 2.5	ความเสถียรของวัตถุลอยในของไหล	40
ภาพที่ 3.1	สมการการไหลต่อเนื่องในการไหลคงตัวมิติเดียว	53
ภาพที่ 3.2	สมการพลังงานในการไหลในท่อ	55
ภาพที่ 3.3	แรงที่กระทำต่อของไหลในท่อ	56
ภาพที่ 3.4	สมการพลังงานสำหรับการไหลในท่อ	56
ภาพที่ 3.5	สมการทั่วไปของสมการพลังงานของระบบท่อ	68
ภาพที่ 3.6	สมการโมเมนตัมของของไหล	75
ภาพที่ 5.1	ความขรุขระเฉลี่ยและเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ	104
ภาพที่ 5.2	การต่อท่อแบบอนุกรม	117
ภาพที่ 5.2	Moody Diagram	124
ภาพที่ 6.1	ปั๊มน้ำติดตั้งไว้สูงกว่าระดับน้ำในถังเก็บกักน้ำ	130
ภาพที่ 6.2	ปั๊มน้ำติดตั้งไว้ต่ำกว่าระดับน้ำในถังรับน้ำ	130
ภาพที่ 6.3	ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะกับความสูง สำหรับปั๊มแรงเหวี่ยงขนาดต่าง ๆ	136
ภาพที่ 6.4	คุณสมบัติของปั๊มที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใบพัดที่แตกต่างกัน สำหรับปั๊มแรงเหวี่ยง ในที่นี้สำหรับ 2 x 3 – 10 ณ 3500 rpm	137
ภาพที่ 6.5	คุณสมบัติของปั๊มแรงเหวี่ยง สำหรับ 2 x 3 – 10 ณ 1750 rpm	138
ภาพที่ 6.6	ความเร็วจำเพาะกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางจำเพาะสำหรับปั๊มแรงเหวี่ยง	144
ภาพที่ 7.1	หน้าตัดการไหลแบบต่าง ๆ	148
ภาพที่ 7.2	ตัวอย่างความลึกการไหลแบบการไหลคงตัว	149
ภาพที่ 7.3	ตัวอย่างความลึกการไหลแบบการไหลไม่คงตัว	150
ภาพที่ 7.4	ตัวอย่างความลึกการไหลแบบการไหลสม่ำเสมอ	150

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 7.5	ตัวอย่างความลึกการไหลแบบการไหลไม่สม่ำเสมอ	151
ภาพที่ 7.6	ตัวอย่างความลึกการไหลแบบการไหลคงตัว สม่ำเสมอ	152
ภาพที่ 7.7	ตัวอย่างความลึกการไหลแบบการไหลคงตัว ไม่สม่ำเสมอ	152
ภาพที่ 7.8	ตัวอย่างความลึกการไหลแบบการไหลไม่คงตัว สม่ำเสมอ	152
ภาพที่ 7.9	ตัวอย่างความลึกการไหลแบบการไหลไม่คงตัว ไม่สม่ำเสมอ	153
ภาพที่ 7.10	การไหลสม่ำเสมอการไหลในทางน้ำเปิดที่มีหน้าตัดคงที่	154
ภาพที่ 7.11	พลังงานจำเพาะ	159
ภาพที่ 7.12	กราฟพลังงานจำเพาะ ณ อัตราการไหลต่าง ๆ	159
ภาพที่ 7.13	ท้องคลองอยู่ในแนวระนาบเดียวกัน	160
ภาพที่ 7.14	ท้องคลองถูกยกระดับขึ้น	160
ภาพที่ 7.15	ปรากฏการณ์น้ำกระโดด	163
ภาพที่ 7.16	ปรากฏการณ์น้ำกระโดดและแรงที่เกิดขึ้น	163
ภาพที่ 7.17	ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยม	166
ภาพที่ 7.18	ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมที่มีส่วนด้านข้างที่ขวางทางน้ำ	167
ภาพที่ 7.19	ฝายสันคมรูปสามเหลี่ยม	168
ภาพที่ 7.20	ฝายสันคมรูปสี่เหลี่ยมคางหมู	168
ภาพที่ 8.1	เครื่องมือวัดการไหลแบบเวนจูรี่	175
ภาพที่ 8.2	การไหลในท่อผ่านหัวฉีด	178
ภาพที่ 8.3	การไหลในท่อผ่านช่องเปิดขอบคม	179
ภาพที่ 8.4	เครื่องมือวัดการไหลแบบหลอดปิโตร	180
ภาพที่ 8.5	เครื่องมือวัดการไหลแบบหลอดปิโตรที่ต่อเข้ากับมานอมิเตอร์	181
ภาพที่ 9.1	การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมจากลำน้ำไหลพุ่งกระทบใบจักร	187
ภาพที่ 9.2	ลำของไหลพุงเข้ากระทบกับใบจักรเคลื่อนที่	188
ภาพที่ 9.3	การแปลงความเร็วของลำของไหลกับความเร็วของใบจักรเป็นความเร็วสัมพัทธ์	189
ภาพที่ 9.4	แผนภาพเวคเตอร์ความเร็ว	189
ภาพที่ 9.5	รูปร่างของปีกเครื่องบิน	199

อักษรย่อและสัญลักษณ์

A	พื้นที่
a	ความเร่ง
E	พลังงาน
F	แรง
P_A	กำลังงาน
P	ความดัน
Q	อัตราการไหล
T	อุณหภูมิ
v	ความเร็ว
V	ปริมาตร
ρ	ความหนาแน่น
μ	ความหนืด
υ	ความหนืดจลน์
γ	น้ำหนักจำเพาะ
°C	องศาเซลเซียล
°F	องศาฟาเรนไฮ
°K	องศาเคลวิน
°R	องศาโรเมอร์
m	มวล
W	น้ำหนัก
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
kg	กิโลกรัม
m^2/s	ตารางเมตรต่อวินาที
m^3/s	ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
lb	ปอนด์
Slug	สลัก
N	นิวตัน
V_s	ปริมาตรจำเพาะ
S	ความถ่วงจำเพาะ
Pa	พาสคัล
E	โมดูลัสความยืดหยุ่น
P_{abs}	ความดันสัมบูรณ์
P_{atm}	ความดันบรรยากาศ
P_{gage}	ความดันเกจ
P_{vac}	ความดันสุญญากาศ
ΔP	ความดันที่เปลี่ยนไป
P_{avg}	ความดันเฉลี่ยกระทำที่จุดศูนย์กลางมวล
F_R	แรงลัพธ์ที่เกิดจากความดันของของไหล
L_p	ระยะจากผิวของของเหลวจนถึงจุดศูนย์กลางความดันในแนวขนานกับพื้นเอียง
h_p	ระยะจากผิวของของเหลวจนถึงจุดศูนย์กลางความดันในแนวดิ่ง
L_c	ระยะจากผิวของของเหลวจนถึงจุดศูนย์กลางมวลในแนวขนานกับพื้นเอียง
h_c	ระยะจากผิวของของเหลวจนถึงจุดศูนย์กลางมวลในแนวดิ่ง
h_a	ความสูงพีโซมิเตอร์
I	โมเมนต์ความเฉื่อย
F_b	แรงลอยตัว
mc	จุดศูนย์เสถียร
MG	ความสูงเมตาเซนตริก
Q	อัตราการไหลเชิงปริมาตร
Q_w	อัตราการไหลเชิงน้ำหนัก
Q_M	อัตราการไหลเชิงมวล
PE	พลังงานศักย์
KE	พลังงานจลน์
FE	พลังงานการไหล
$\frac{P}{\gamma}$	เฮดความดัน
z	เฮดระดับ
$\frac{v^2}{2g}$	เฮดความเร็ว
D	เส้นผ่าศูนย์กลาง
h_A	พลังงานที่เพิ่มเข้าไป
h_R	พลังงานที่ถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานกล
h_L	คือ พลังงานที่สูญเสียไปจากระบบ

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

e_m	ประสิทธิภาพ
ℓ_p	ความของด้านใด ๆ ที่พิจารณาของต้นแบบ
ℓ_m	ความยาวของด้านใด ๆ ที่พิจารณาของหุ่นจำลอง
ℓ_r	สัดส่วนความยาว
a_p	ความเร่งของต้นแบบ
a_m	ความเร่งของหุ่นจำลอง
v_r	สัดส่วนความเร็ว
T_r	สัดส่วนเวลา
a_r	สัดส่วนความเร่ง
F_g	แรงเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก
F_p	แรงเนื่องจากความดัน
F_v	แรงเนื่องจากความหนืด
F_e	แรงเนื่องจากความหยืดหยุ่น
F_t	แรงเนื่องจากความตึงผิว
F_i	แรงเนื่องจากความเฉื่อย
Re	ตัวเลขเรย์โนลด์
F_r	ตัวเลขฟรุด
M	ตัวเลขมัค
W_n	ตัวเลขวีเบอร์
E_n	ตัวเลขออยเลอร์
h_L	พลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากแรงเสียดทาน
f	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
ε	ความขรุขระเฉลี่ย
h_L/L	ความลาดเชิงชลศาสตร์
C_h	ค่าสัมประสิทธิ์ของ Hazen-William
R	รัศมีชลศาสตร์ของท่อ
K	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย
Le	ความยาวท่อสมมูลย์
El.	ค่าระดับความสูงจากระดับอ้างอิง
TDH	เฮดจากปั๊ม
N	ความเร็วรอบ
NPSH	เฮดความดันด้านดูดสุทธิ
$NPSH_R$	เฮดความดันด้านดูดสุทธิที่ปั๊มต้องการ
$NPSH_A$	เฮดความดันด้านดูดสุทธิที่มีอยู่จริง
N_s	ความเร็วจำเพาะ
P	เส้นขอบเปียก
B	ความกว้างผิวบนหน้าตัดการไหล
D	ความลึกชลศาสตร์
RVF	ความลึกของการไหลเปลี่ยนทันทีทันใด
GVF	ความลึกของการไหลที่ค่อย ๆ เปลี่ยน
n	สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง
S	ความลาดชัน
E	พลังงานจำเพาะ
y	ความลึกการไหล
y_c	ความลึกวิกฤต
v_c	ความเร็ววิกฤต
Q_c	อัตราการไหลวิกฤต
S_c	ความลาดชันวิกฤต
E_c	พลังงานวิกฤต
q	อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง
C_d	สัมประสิทธิ์อัตราการไหลขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการไหลข้ามฝาย
L'	ความยาวประสิทธิผลของสันฝาย
C_o	สัมประสิทธิ์การหดตัว
C_D	สัมประสิทธิ์แรงหน่วง เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุและการเคลื่อนที่ของของไหล
F_L	แรงยก
C_L	ค่าสัมประสิทธิ์การยกตัว

บทที่ 1
บทนำ

ชลศาสตร์ (Hydraulics) คือ แขนงวิชาหนึ่งของวิศวกรรมศาสตร์ที่ว่าด้วยคุณสมบัติและคุณลักษณะของของเหลว ที่ประยุกต์แนวคิด หลักการ และกฎต่าง ๆ เช่น กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน หลักการอนุรักษ์มวลสาร กฎของความร้อนพลศาสตร์ กฎความหนืดของนิวตัน และหลักการเกี่ยวกับชั้นขอบเขตของของไหล เป็นต้น

คุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวในคำจำกัดความเชิงกล สามารถพิจารณาได้จากปฏิกิริยาพื้นฐานของสสารที่เกิดจากแรงตึง (Tension) และแรงเฉือน (Shear force) กล่าวคือ

- ของเหลวสามารถรับแรงตึงได้เพียงเล็กน้อย เนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion) ระหว่างโมเลกุล ที่มีค่าต่ำมาก จนสามารถตั้งสมมุติฐานได้ว่าไม่สามารถรับแรงตึงได้
- ของเหลวไม่สามารถรับแรงเฉือน (Shear force) ได้ไม่ว่าจะมีขนาดเท่าใด เนื่องจากเมื่อของเหลวได้รับแรงเฉือน ของเหลวจะเกิดการเปลี่ยนรูป หรือเกิดการไหล (Flow)

ของเหลวจัดว่าเป็นของไหล ที่กดอัดไม่ได้ (Incompressible fluid) คือ เมื่อความดันเปลี่ยนแปลง ของเหลวจะมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรน้อยมาก ซึ่งสามารถไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรได้

1.1 ระบบหน่วย

โดยทั่วไป ระบบหน่วยใหญ่ ๆ มีอยู่ 2 ระบบ คือ ระบบหน่วยสากล (International system, SI) และ ระบบหน่วยอังกฤษ (English system) ทั้งสองระบบนี้มีหน่วยพื้นฐานที่สำคัญ คือ

	ระบบหน่วย SI	ระบบหน่วยอังกฤษ
- ความยาว (Length)	เมตร (m)	ฟุต (ft)
- เวลา (Time)	วินาที (s)	วินาที (s)
- มวล (Mass)	กิโลกรัม (kg)	ปอนด์ (lb)
- แรง (Force)	นิวตัน (N)	สลัก (Slug หรือ lb s^2/ft)

สำหรับการนำหน่วยพื้นฐานมาคูณหรือหารกัน เรียกว่า หน่วยอนุพันธ์ (Derived unit) ดังตารางที่ 1.1 และเพื่อความสะดวกในการเขียนเลขจำนวนมาก ๆ หรือน้อย ๆ ในทางวิศวกรรมได้ใช้อักษรนำหน้าหน่วย (Prefix) สำหรับระบบ SI ดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.1 หน่วยอนุพันธ์

ปริมาณ	สัญลักษณ์	ระบบหน่วย SI	ระบบหน่วยอังกฤษ
พื้นที่	A	m^2	ft^2
ความเร่ง	a	m/s^2	ft/s^2
พลังงาน	E	$N \cdot m$	$ft \cdot lb$
แรง	F	N	lb
กำลังงาน	P_A	$N \cdot m/s$	$ft \cdot lb/s$
ความดัน	P	N/m^2 (Pa)	psi
อัตราการไหล	Q	m^3/s	cfs
อุณหภูมิ	T	Kelvin (^oK)	Rankine (^oR)
ความถี่	f	Hz	Cycle/s
ความเร็ว	v	m/s	Ft/s
ปริมาตร	V	m^3	ft^3
ความหนาแน่น	ρ	kg/m^3	$slug/ft^3$
ความหนืด	μ	$N \cdot s/m$	$lb \cdot s/ft^2$
ความหนืดจลน์	υ	m^2/s	ft^2/s
น้ำหนักจำเพาะ	γ	N/m^3	lb/ ft^3

ตารางที่ 1.2 อักษรนำหน้าหน่วย

ทศดัชนี	คำนำหน้า	อักษรย่อ	ทศดัชนี	คำนำหน้า	อักษรย่อ
10^{18}	exa	E	10^{-1}	deci	d
10^{15}	peta	P	10^{-2}	centi	c
10^{12}	tera	T	10^{-3}	milli	m
10^{9}	giga	G	10^{-6}	micro	μ
10^{6}	mega	M	10^{-9}	nano	n
10^{3}	kilo	k	10^{-12}	pico	p
10^{2}	hector	h	10^{-15}	femto	f
10	deca	da	10^{-18}	atto	a

นอกจาก หน่วยพื้นฐาน หน่วยอนุพันธ์ และอักษรนำหน้าหน่วยแล้ว การแปลงหน่วยจากระบบหนึ่งไปยังอีกระบบหนึ่ง หรือจากหน่วยหนึ่งไปอีกหน่วยหนึ่ง ก็มีความสำคัญเช่นกัน ตัวอย่างเช่น

- วัตถุชิ้นหนึ่งมีมวล (m) เท่ากับ 10.0 kg สามารถหาค่าน้ำหนัก (W) ของวัตถุชิ้นนี้ได้จากกฎของนิวตัน ($\sum F = ma$) เมื่อ a คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g = 9.81 m/s^2 = 32.2 ft/s^2) ดังนั้น

$$W = mg = 10.0\,kg \times 9.81\frac{m}{s^2} = 9.81\ N$$

หรือ มวล 10.0 kg เท่ากับ 10.0 kg x 2.21 lb / kg = 22.1 lb

จะได้ $$W = 22.1\,lb \times 32.2\frac{ft}{s^2} = 712\ \frac{lb \cdot ft}{s^2}$$

- น้ำที่อุณหภูมิ 20 °C สามารถแปลงจากหน่วย °C เป็น °F ได้ดังนี้

$$T(^oF) = 1.8T(^oC) + 32 \quad \text{หรือ} \quad T(^oC) = \frac{T(^oF) - 32}{1.8}$$

ดังนั้น $$T(^oF) = 1.8(20) + 32 = 68\ ^oF$$

หรือสามารถเปลี่ยนจากหน่วย °C เป็น °K ได้ดังนี้

$$T(^oK) = T(^oC) + 273.15$$

ดังนั้น $$T(^oK) = 20\ ^oC + 273.15 = 293.15\ ^oK$$

หรือสามารถเปลี่ยนจากหน่วย °F เป็น °K ได้ดังนี้

$$T(^oK) = \frac{T(^oF) + 459.67}{1.8}$$

$$T(^oK) = \frac{68\ ^oF + 459.67}{1.8} = 293.15\ ^oK$$

น้ำจะแข็งตัวเมื่อ 0 °C (32 °F) และเดือดเมื่อ 100 °C (212 °F)

ตัวอย่างที่ 1.1 จงแปลงหน่วย ดังต่อไปนี้

1,725	mm	=	1.725	m
9.33	in	=	237	mm
30.0	ft	=	9.15	m
1.50	mile	=	2,414	m
1500	mm^2	=	0.0015	m^2
8490	cm^2	=	0.849	m^2
7.89	m^2	=	7.89×10^6	mm^2
2.65×10^2	mm^3	=	2.65×10^{-7}	m^3
7.89	m^3	=	7.89×10^9	mm^3
500.0	ft^3	=	14.16	m^3
90	km/hr	=	9.0×10^4	m/hr
33	ft^3/s	=	0.93	m^3/s
300	liter	=	0.300	m^3
44.0	gallons	=	0.167	m^3

1.2 คุณสมบัติของของเหลว

คุณสมบัติของของเหลวที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้ ประกอบด้วย ความหนาแน่น น้ำหนักจำเพาะ ปริมาตรจำเพาะ และความถ่วงจำเพาะ ดังรายละเอียด ต่อไปนี้

1.2.1 **ความหนาแน่น** (Density; ρ) คือ ปริมาณมวลของสสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของสสาร ดังนั้น หน่วยของความหนาแน่นจึงเป็นหน่วยของมวลต่อปริมาตร

ความหนาแน่น = มวลสาร / ปริมาตร หรือ $\rho = \frac{m}{V}$

เนื่องจาก $m = \frac{W}{g}$

ดังนั้น $\rho = \frac{m}{V} = \frac{W}{gV}$ (1.1)

เมื่อ g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

$= 9.81\ m/s^2 = 32.2\ ft/s^2$

ρ ของน้ำ (ที่ 4 °C) $= 1000\ kg/m^3 = 1\ g/cm^3 = 1.937\ slug/ft^3$

1.2.2 **น้ำหนักจำเพาะ** (Specific weight; γ) คือ น้ำหนักของสสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของสสารนั้น ดังนั้น หน่วยน้ำหนักจำเพาะจึงเป็นหน่วยของน้ำหนักต่อปริมาตร

น้ำหนักจำเพาะ = น้ำหนัก / ปริมาตร หรือ $\gamma = \frac{W}{V}$

เนื่องจาก $W = mg$ และ $\rho = \frac{m}{V}$

ดังนั้น $$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \qquad (1.2)$$

γ ของน้ำ (ที่ 4 $^{\circ}$C) = 9.81 kN/m^3 = 62.4 lb/ft^3

1.2.3 **ปริมาตรจำเพาะ** (Special volume; V_s) คือ ปริมาตรของสสารต่อหนึ่งหน่วยมวลของสสาร หรือปริมาตรจำเพาะ คือส่วนกลับของความหนาแน่น นั่นคือ

$$V_s = \frac{V}{m} = \frac{gV}{W} = \frac{1}{\rho} \qquad (1.3)$$

1.2.4 **ความถ่วงจำเพาะ** (Specific gravity; S) คือ อัตราส่วนระหว่างมวลสสารต่อมวลของน้ำ หรืออัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นสสารต่อความหนาแน่นของน้ำ หรืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักจำเพาะของสสารต่อน้ำหนักจำเพาะของน้ำ เมื่อมีปริมาตรที่เท่ากัน ความถ่วงจำเพาะเป็นตัวเลขที่ไม่มีหน่วย

S = m สสาร / m น้ำ (เมื่อมีปริมาตรเท่ากัน)

เนื่องจาก $\rho = \frac{m}{V} = \frac{\gamma}{g}$

ดังนั้น S = ρ ของสสาร / ρ ของน้ำ = γ ของสสาร / γ ของน้ำ (1.4)

S ของน้ำ (ที่ 4 $^{\circ}$C) = 1

ตัวอย่างที่ 1.2 ของเหลวชนิดหนึ่งมีปริมาตร 7 m^3 หนัก 3500 kg จงคำนวณหาน้ำหนักจำเพาะ ความหนาแน่น ปริมาตรจำเพาะ และความถ่วงจำเพาะ ของของเหลวชนิดนี้

วิธีทำ

น้ำหนักจำเพาะ; $\gamma = \frac{W}{V} = \frac{3{,}500\,kg \times 9.81\frac{m}{s^2}}{7\,m^3} = 4{,}905\,N/m^3$ ตอบ

ความหนาแน่น; $\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{4{,}905\frac{N}{m^3}}{9.81\frac{m}{s^2}} = 500\,N\cdot s^2/m^4 = 500\,kg/m^3$ ตอบ

ปริมาตรจำเพาะ; $V_s = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{500\frac{kg}{m^3}} = 0.002\,m^3/kg$ ตอบ

ความถ่วงจำเพาะ; $S = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{500\frac{kg}{m^3}}{1000\frac{kg}{m^3}} = 0.2$ ตอบ

ตัวอย่างที่ 1.3 น้ำมันชนิดหนึ่งมีความถ่วงจำเพาะ 0.90 และหนัก 5 N จงคำนวณหาปริมาตรของน้ำมันชนิดนี้

วิธีทำ

จาก $S = \frac{\gamma}{\gamma_w}$

ดังนั้น $\gamma = S\cdot\gamma_w = 0.90\times 9.81\,kN/m^3 = 8.829\,kN/m^3$

จาก $\gamma = \frac{W}{V}$

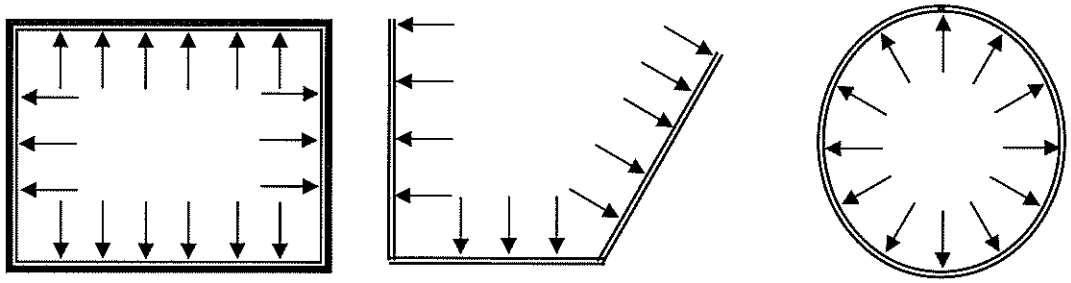
จะได้ $V = \frac{W}{\gamma} = \frac{5\,N}{8.829\frac{kN}{m^3}} = 0.566\times 10^{-3}\,m^3$ ตอบ

1.3 ความดัน (Pressure; P)

ความดัน คือ ปริมาณแรงดันที่กระทำตั้งฉากต่อพื้นที่ หน่วยของความดัน คือ พาสคัล (Pascal; Pa) โดย 1 Pa เท่ากับ แรง (F) 1 N กระทำบนพื้นที่ (A) 1 m^2 ดังสมการต่อไปนี้

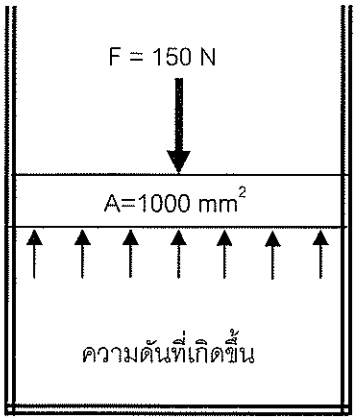
$$P = \frac{F}{A} \qquad (1.5)$$

โดยการกระจายความดันของของเหลวจะกระทำตั้งฉากกับพื้นที่ผิวที่กระทำอย่างสม่ำเสมอ ดังภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 การกระจายความดัน ณ รูปทรงวัตถุต่าง ๆ

ตัวอย่างที่ 1.4 ภายในลูกสูบบรรจุด้วยของเหลวชนิดหนึ่ง เมื่อมีแรงมากระทำที่ลูกสูบ 150 N และลูกสูบนี้มีพื้นที่หน้าตัด 1,000 mm^2 จงคำนวณหาความดันที่เกิดขึ้น



วิธีทำ

จาก $P = \frac{F}{A}$

ดังนั้น $P = \frac{150\,N}{1{,}000\,mm^2} = 0.150\,N/mm^2$ ตอบ

ตัวอย่างที่ 1.5 จากภาพในตัวอย่างที่ 1.4 เมื่อ F = 1000 lb และ ลูกสูบมีพื้นที่หน้าตัด 1,200 in^2 จงคำนวณหาความดันที่เกิดขึ้น

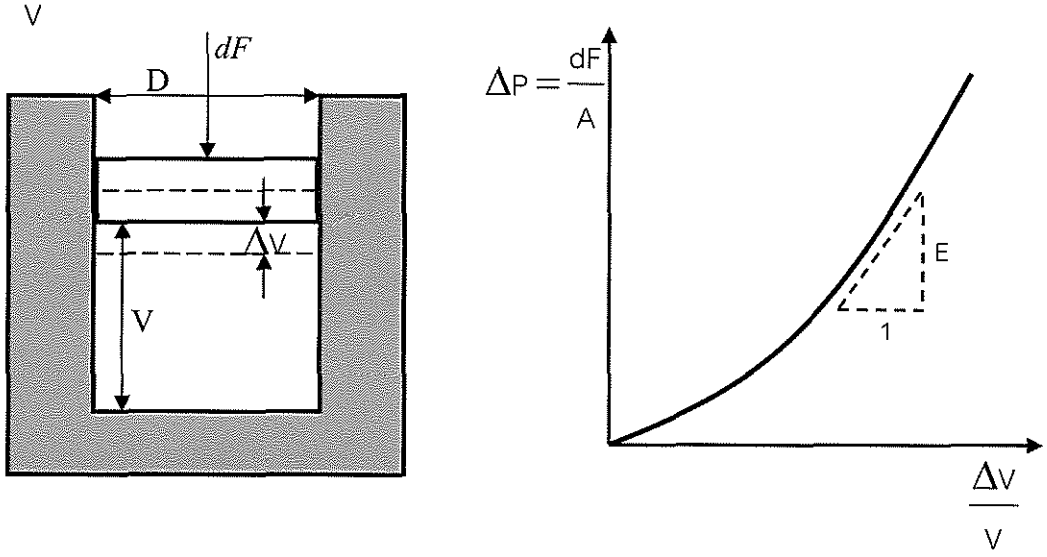
วิธีทำ

จาก $P = \frac{F}{A}$

ดังนั้น $P = \frac{1000\,lb}{1{,}200\,in^3} = 0.833\,lb/in^3$ ตอบ

1.4 การอัดตัวได้ของของไหล (Compressibility)

เมื่อของไหลทุกชนิดได้รับความดัน จะก่อให้เกิดพลังงานความยืดหยุ่น (Elastic energy) ภายในของไหลนั้น ๆ หากพิจารณาว่าไม่มีการสูญเสียพลังงานจากกระบวนการดังกล่าว เมื่อนำความดันที่มากระทำออกไป พบว่า ของไหลที่เกิดยุบตัวลงมาจะขยายตัวกลับไปในปริมาตรเท่าเดิม ลักษณะเช่นนี้แสดงให้เห็นว่าของไหลมีความยืดหยุ่น ซึ่งโดยทั่ว ๆ ไปจะถูกกำหนดด้วยโมดูลัสความยืดหยุ่นเชิงปริมาตร (Bulk modulus of elasticity) ดังภาพที่ 1.2 (ก) แสดงกระบอกลูกสูบที่มีปริมาตรภายใน V ได้รับแรง dF กระทำที่ก้านสูบ เป็นผลให้ปริมาตรของของไหลลดลง ΔV และเกิดความดัน ΔP เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ΔP และสัดส่วนการยุบตัว $\frac{\Delta V}{V}$ ดังภาพที่ 1.2 (ข)



(ก) (ข)

ภาพที่ 1.2 การอัดตัวและโมดูลัสความยืดหยุ่น

สำหรับของไหล ณ จุดใด ๆ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (E) สามารถหาค่าได้จากความลาดชันของกราฟในภาพที่ 1.2 (ข) ที่จุดสัมผัสกับจุดนั้น ๆ ดังสมการต่อไปนี้

$$E = \frac{-\Delta P}{\Delta V / V} \qquad (1.6)$$

ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของของไหลขึ้นอยู่กับความดันที่มากระทำและปริมาตรเริ่มต้น ดังนั้น ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นนี้จึงไม่ใช่ค่าคงที่ ดังตารางที่ 1.3 แสดงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสำหรับของเหลวชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 1.3 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสำหรับของเหลวชนิดต่าง ๆ ที่ความดันบรรยากาศและที่อุณหภูมิ 20 °C

ชนิดของเหลว	โมดูลัสความยืดหยุ่น (E)	
	(psi)	(MPa)
เอทิลแอลกอฮอล์	130,000	896
เบนซีน	154,000	1,062
น้ำมันสำหรับหยอด	189,000	1,303
เครื่องจักร	316,000	2,179
น้ำ	654,000	4,509
กลีเซอริน	3,590,000	24,750
ปรอท		

ตัวอย่างที่ 1.6 จงคำนวณหาความดันที่เปลี่ยนแปลงไป สำหรับน้ำที่ได้รับความดัน แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรไป 1% กำหนดให้ E = 2,179 MPa

วิธีทำ

จาก $E = \frac{-\Delta P}{\Delta V / V}$

ดังนั้น $-\Delta P = E \cdot \frac{\Delta V}{V} = (2{,}179\,\text{MPa})(\frac{1}{100}) = 21.79\,\text{MPa}$ ตอบ