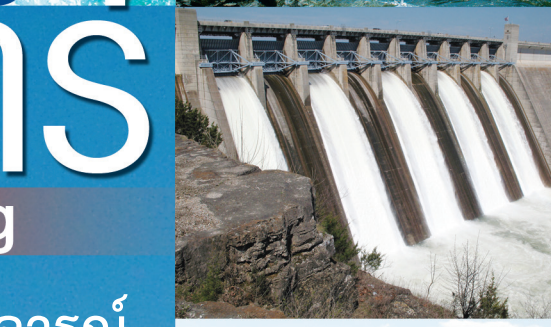
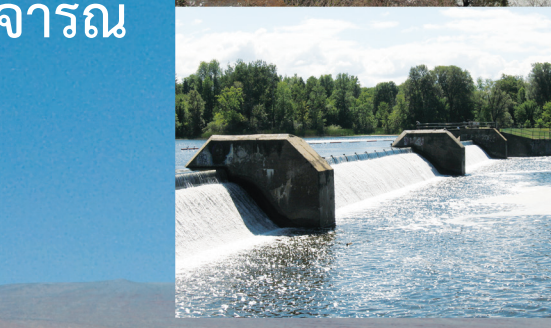
cupress

พิมพ์ครั้งที่ 2





วิศวกรรมชลศาสตร์

Hydraulic Engineering

โชติไกร ไชยวิจารณ์

ศาสตร์แห่งน้ำเพื่อความยั่งยืน

วิศวกรรมชลศาสตร์
Hydraulic Engineering

วิศวกรรมชลศาสตร์

Hydraulic Engineering

โชติไกร ไชยวิจารณ์

สำนักพิมพ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2566

520.-

โชติไกร ไชยวิจารณ์

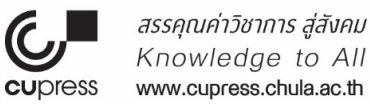
วิศวกรรมชลศาสตร์ / โชติไกร ไชยวิจารณ์

1. วิศวกรรมชลศาสตร์.

627

ISBN (e-book) 978-974-03-4224-3

สพจ. 1677/2



จัดทำโดย สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ครั้งที่ 2 พ.ศ. 2566

www.cupress.chula.ac.th [CUB6605-010F]

โทร. 0-2218-3562-3

บรรณาธิการอำนวยการ : ศาสตราจารย์ ดร.อรัญ หาญสืบสาย นางอรทัย นันทนาดิศัย

กองบรรณาธิการฝ่ายวิชาการ : ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.ปิยนาถ บุนนาค รองศาสตราจารย์ ดร.พิมพันธ์ เดชะคุปต์
รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ชิษณุ พันธุ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์

ผู้ประสานงาน : วาสนา ชำเซ็น

พิสูจน์อักษร : ทัศนีย์ ผิวขำ

ออกแบบปก : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ออกแบบรูปเล่ม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์โชติไกร ไชยวิจารณ์

สั่งซื้อได้ที่ : ศูนย์หนังสือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

http://www.chulabook.com

โทร. 08-6323-3703-4

customer@cubook.chula.ac.th, info@cubook.chula.ac.th

Apps: CU-eBook Store

คำอุทิศ

ความดีของหนังสือเล่มนี้ขออุทิศแด่...

....พ่อ แม่ ผู้ให้กำเนิด เลี้ยงดู และอบรมสั่งสอนตั้งแต่เล็กจนโต

....ครู อาจารย์ ผู้ประสาทความรู้ อบรม สอนสั่ง

....วงการศึกษาไทย

....นิสิต นักศึกษา และผู้สนใจทุกคน

....ภรรยาและลูก ๆ ผู้เป็นกำลังใจในการทำหนังสือจนสำเร็จได้ด้วยดี

คำนำในการพิมพ์ครั้งที่ 2 ของสำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หลังจากหนังสือวิศวกรรมชลศาสตร์ (Hydraulic engineering) พิมพ์ครั้งที่ 1 โดยสำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยออกวางจำหน่ายเมื่อ พ.ศ. 2556 ปรากฏว่าได้รับการตอบรับค่อนข้างดีทำให้หนังสือที่วางจำหน่ายตามร้านหนังสือได้หมดลงในระยะเวลาไม่นานนัก แสดงว่านอกจากผู้เรียบเรียงแล้วยังมีผู้อื่นที่เล็งเห็นประโยชน์จากหนังสือเล่มนี้และมีการนำไปใช้ประกอบการเรียนการสอนกันอยู่

ดังนั้น ผู้เรียบเรียงจึงได้ลงมือตรวจทานหนังสือเล่มนี้เสียใหม่และทำการแก้ไขเนื้อหาบางส่วนที่ผิดพลาดเพื่อให้หนังสือที่จะพิมพ์ออกมาใหม่มีเนื้อหาที่ถูกต้องและสมบูรณ์มากขึ้น โดยหวังที่จะให้นักศึกษาและผู้สนใจได้รับประโยชน์จากหนังสือเล่มนี้เพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม

ผู้เรียบเรียงมีความหวังว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นแนวทางให้นักศึกษาและผู้สนใจสามารถศึกษาค้นคว้าได้ด้วยตนเอง โดยยังยึดถือเนื้อหาตามหลักสูตรที่กระทรวงและสภาวิศวกรกำหนดไว้

หากผู้ศึกษาหรือผู้อ่านพบข้อบกพร่องในหนังสือเล่มนี้กรุณาท้วงติงเพื่อแก้ไข เพื่อให้หนังสือเล่มนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ความตั้งใจนี้จะประสบความสำเร็จไม่ได้เลยหากสำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยไม่ดำเนินการจัดพิมพ์ให้ ขอขอบคุณสำนักพิมพ์ทุกท่านและทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะคุณวาสนา ซำเซ็น ที่ช่วยประสานงาน จนหนังสือเล่มนี้เสร็จเป็นเล่มสมบูรณ์ได้อีกครั้ง

ผศ.โชติไกร ไชยวิจารณ์

1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566

คำนำในการพิมพ์ครั้งที่ 1 ของสำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หลังจากหนังสือวิศวกรรมชลศาสตร์ (Hydraulic engineering) ที่พิมพ์ครั้งแรกออกวางจำหน่ายเมื่อปี 2546 ปรากฏว่าได้รับการตอบรับค่อนข้างดีทำให้หนังสือที่วางจำหน่ายตามร้านหนังสือได้หมดลงในระยะเวลาไม่นานนัก แสดงว่ามีผู้เล็งเห็นประโยชน์จากหนังสือที่ผู้เรียบเรียงได้เรียบเรียงขึ้น จึงเป็นเหตุผลทำให้ผู้เรียบเรียงมีแรงบันดาลใจที่จะตอบสนองความต้องการของผู้ใช้หนังสือเล่มนี้ให้ดียิ่งขึ้น

ดังนั้น ผู้เรียบเรียงจึงได้ลงมือปรับปรุงหนังสือเล่มนี้เสียใหม่โดยการแก้ไข เพิ่มเติม และตัดตอนเนื้อหาบางส่วนของเกือบจะทุกบท เพื่อให้หนังสือที่จะพิมพ์ออกมาใหม่มีเนื้อหาที่สมบูรณ์และมีความกระชับมากขึ้น โดยหวังที่จะให้นักศึกษาและผู้สนใจได้รับประโยชน์จากหนังสือเล่มนี้เพิ่มมากขึ้นกว่าเดิมตามวัตถุประสงค์

ผู้เรียบเรียงมีความหวังว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นแนวทางให้นักศึกษาและผู้สนใจสามารถศึกษาค้นคว้าได้ด้วยตนเองโดยพยายามรวบรวมจากตำราและแหล่งข้อมูลเท่าที่สามารถค้นหามาได้ ในขณะเดียวกันก็ยังยึดถือเนื้อหาตามหลักสูตรที่กระทรวงและสภาวิศวกรกำหนดไว้

หากผู้ศึกษาหรือผู้อ่านพบข้อบกพร่องในหนังสือเล่มนี้กรุณาท้วงติงเพื่อแก้ไข เพื่อให้หนังสือเล่มนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ความตั้งใจนี้จะประสบความสำเร็จไม่ได้เลยหากสำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยไม่ดำเนินการจัดพิมพ์ให้ ขอขอบคุณสำนักพิมพ์ทุกท่านและทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะคุณทัศนีย์ ผิวขำ ที่ช่วยตรวจรูปเล่ม และคุณปกรณ์ ชูจันทึก ที่อดทนทำรูปจนช่วยให้หนังสือเล่มนี้เสร็จเป็นเล่มสมบูรณ์ได้อีกครั้ง

ผศ.โชติไกร ไชยวิจารณ์

พ.ศ. 2556

คำนำในการพิมพ์ครั้งแรก

วิศวกรรมชลศาสตร์ (Hydraulic Engineering) เป็นวิชาหนึ่งในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมแหล่งน้ำ และวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

จากประสบการณ์ที่เคยสอนวิชานี้พบว่า ตำราที่เป็นภาษาไทยและภาษาต่างประเทศที่จะให้ศึกษา ค้นคว้าด้วยตนเองมีน้อย ทำให้ผู้ศึกษาขาดความกระตือรือร้น ประกอบกับหลักสูตรการเรียนในเมืองไทยส่วนใหญ่เน้นผลิตวิศวกรออกแบบโครงสร้าง จึงทำให้ผู้ศึกษาขาดแรงจูงใจและให้ความสำคัญกับวิชาทางด้านนี้น้อยลงไปอีก ทำให้มีปัญหาในการเรียนและการสอนค่อนข้างมาก

ผู้เรียบเรียงได้พยายามเรียบเรียงหนังสือเล่มนี้ขึ้นมาด้วยหวังว่าจะให้เป็นแนวทางในการศึกษาค้นคว้าด้วยตนเอง โดยรวบรวมจากตำราหลาย ๆ เล่มเท่าที่พอจะค้นคว้าได้และยึดถือเนื้อหาตามหลักสูตรที่ทบวงและ ก.ว. กำหนด ซึ่งแบ่งได้ดังนี้ คือ

บทที่ 1 เป็นการทบทวนทฤษฎีขั้นพื้นฐานที่จำเป็นต่อการเรียนวิชาวิศวกรรมชลศาสตร์

บทที่ 2-4 เป็นเนื้อหาเกี่ยวกับทฤษฎีของการไหลในท่อ และการประยุกต์ใช้งานในลักษณะต่าง ๆ ทั้งแบบที่อัตราการไหลคงที่และไม่คงที่

บทที่ 5-7 เป็นเนื้อหาเกี่ยวกับทฤษฎีของการไหลในทางน้ำเปิดและการประยุกต์เพื่อการออกแบบหน้าตัดของทางน้ำเปิด รวมทั้งกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการเกี่ยวกับงานระบายน้ำ ได้แก่ การระบายน้ำฝน และน้ำทิ้งจากอาคารบ้านเรือน และการออกแบบหน้าตัดการไหล

บทที่ 8-11 เป็นเนื้อหาเกี่ยวกับอาคารและโครงสร้างทางชลศาสตร์สำคัญ ๆ ที่ควรทราบ ได้แก่ อ่างเก็บน้ำ เขื่อน ฝาย อาคารสลายพลังงาน เป็นต้น

บทที่ 12 กล่าวถึงเครื่องจักรกลชลศาสตร์ที่สำคัญ ได้แก่ เครื่องสูบน้ำและกังหันพอสังเขป

และบทที่ 13 กล่าวถึงแบบจำลองชลศาสตร์

หวังว่าหนังสือเล่มนี้คงจะให้ประโยชน์แก่วงการศึกษาได้บ้างไม่มากก็น้อย และหากผู้ศึกษาหรือผู้อ่านพบข้อบกพร่องในหนังสือเล่มนี้กรุณาท้วงติงเพื่อแก้ไข ซึ่งผู้เรียบเรียงขอน้อมรับด้วยความยินดียิ่งเพื่อให้หนังสือเล่มนี้มีความสมบูรณ์ยิ่ง ๆ ขึ้นไป

ขอขอบคุณทุกท่าน ทุกฝ่ายที่ช่วยให้หนังสือเล่มนี้เสร็จเป็นเล่มสมบูรณ์ได้ในที่สุด

โชติไกร ไชยวิจารณ์

สารบัญ

บทที่ 1

พื้นฐานวิศวกรรมชลศาสตร์

(Fundamental of Hydraulic Engineering)

1.1 ความหมายและความสำคัญของวิศวกรรมชลศาสตร์

วิศวกรรมชลศาสตร์ เป็นศาสตร์ที่เกี่ยวกับน้ำเพื่อให้ผู้เรียนสามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบอาคารด้านชลศาสตร์ อาทิ อ่างเก็บน้ำ เขื่อน ฝาย ทำนบ ประตูระบายน้ำ คู คลอง ท่อส่งน้ำ ระบบระบายน้ำ ระบบป้องกันน้ำท่วม และอาคารประกอบอื่น ๆ เพื่อการจัดการทรัพยากรน้ำทั้งระบบน้ำใช้และน้ำที่ต้องระบายทิ้ง

ยิ่งปัญหาเรื่องภัยแล้งและน้ำท่วมทวีความรุนแรงมากขึ้นเท่าใด งานทางด้านวิศวกรรมชลศาสตร์ก็จะยิ่งเข้ามามีบทบาทมากขึ้นตามไปด้วยอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้น วิศวกรผู้รับผิดชอบจึงต้องมีความรู้ความสามารถที่จะจัดการกับปัญหาเหล่านั้นได้อย่างดีพอ

1.2 ระบบและหน่วยที่ใช้วัด

ระบบและหน่วยที่ใช้วัดปริมาณในงานวิศวกรรมชลศาสตร์ที่พบในตำราทั่วไป มีอยู่ 2 ระบบ คือ (1) ระบบ SI (international system of unit) และ (2) ระบบอังกฤษ (British engineering or traditional system) ส่วนหน่วยที่ใช้เรียกค่าต่าง ๆ ประกอบด้วย

1.2.1 หน่วยปริมาณฐาน (base unit) เป็นหน่วยปริมาณที่ได้จากเครื่องมือวัดโดยตรงมี 7 ชนิด คือ ความยาว มวล เวลา ปริมาณสาร ความเข้มของการส่องสว่าง อุณหภูมิ และกระแสไฟฟ้า เป็นต้น

นิยามทั่วไปของมวล คือ จำนวนอนุภาคที่บรรจุอยู่ในวัตถุนั้น ๆ อนุภาคที่กล่าวถึง คือ อิเล็กตรอน โปรตอน และนิวตรอน รวมเรียกว่า อะตอม

1.2.2 หน่วยปริมาณอนุพันธ์ (derived unit) ได้จากการคูณหรือหารหน่วยพื้นฐานเข้าด้วยกัน ได้แก่ แรงหรือน้ำหนัก = มวล x ความเร่ง หรือ ความเร็ว = $\frac{\text{ความยาว}}{\text{เวลา}}$ เป็นต้น

ตารางที่ 1.1 ปริมาณฐานในระบบ SI และระบบอังกฤษที่ควรจดจำ

ระบบ SI	ระบบอังกฤษ
10 มิลลิเมตร (mm) = 1 เซนติเมตร (cm) 100 เซนติเมตร (cm) = 1 เมตร (m) 1,000 เมตร (m) = 1 กิโลเมตร (km)	12 นิ้ว (in) = 1 ฟุต (ft) 3 ฟุต (ft) = 1 หลา (yd) 1,760 หลา (yd) = 1 ไมล์ (mi)
1 นิ้ว (in) = 2.54 เซนติเมตร (cm) 1 ฟุต (ft) = 0.3048 เมตร (m)	1 เมตร (m) = 3.28 ฟุต (ft) 1 กิโลเมตร (km) = 0.621 ไมล์ (mi)
มวล 1 กิโลกรัม (kg) = 0.0685 สลัก (slug) มวล 1 กิโลกรัม (kg) = 2.205 ปอนด์มวล (lbm)	

ข้อควรจำ : การแทนค่าต่าง ๆ ในสมการต้องแทนค่าหน่วยลงไปด้วยเสมอ เพราะหากแทนแต่ค่าตัวเลขแต่ไม่ได้ดูว่าหน่วยตัดทอนกันแล้วได้ค่าตามที่ต้องการหรือไม่ ก็จะทำให้ผลลัพธ์ผิดไปได้ จึงต้องระวังเป็นอย่างมาก

ตัวอย่างที่ 1.1 จงแปลงความยาว 10 mi ให้กลายเป็นหน่วย ft และ m

วิธีทำ หลักการ คือการกำจัดหน่วยที่ไม่ต้องการทิ้งไปโดยกฎการคูณหารเศษส่วน

จากตารางที่ 1.1 เมื่อ 1 mi = 1760 yd, 1 yd = 3 ft และ 1 ft = 0.3048 m

ดังนั้น $10\ \text{mi} = 10\ \text{mi} \times \left(\frac{1760\ \text{yd}}{1\ \text{mi}} \right) \times \frac{3\ \text{ft}}{1\ \text{yd}} = 52800\ \text{ft}$ **ตอบ**

และ $52800\ \text{ft} = 52800\ \text{ft} \times \left(\frac{0.3048\ \text{m}}{1\ \text{ft}} \right) = 16093.44\ \text{m}$ **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 1.2 จงแปลงปริมาตร $5\ \text{m}^3$ ให้กลายเป็นหน่วย ft^3

วิธีทำ โดยการเทียบหน่วยเมื่อ 1 m = 3.28 ft ดังนั้น $(1\text{m})^3 = (3.28\ \text{ft})^3$

จะได้ว่า $5\ \text{m}^3 \times \frac{(3.28\ \text{ft})^3}{(1\ \text{m})^3} = 5\ \text{m}^3 \times \frac{(3.28)^3(\text{ft})^3}{(1)^3(\text{m})^3}$

$= 176.4\ \text{ft}^3$ **ตอบ**

ตารางที่ 1.2 ค่าการแปลงหน่วย จากระบบ SI เป็นระบบอังกฤษ

รายการ	การแปลงจากระบบหน่วย SI	คูณด้วย	เป็นระบบหน่วยอังกฤษ
พื้นที่ (area)	m^2	10.76	ft^2
ความหนาแน่น (density)	$kg/m^3 = 10^{-3}$ g/cm^3	0.00194	slug/ft^3
ความหนืดจลน์ (kinematic viscosity)	$m^2/s = (10^4$ St)	10.76	ft^2/s
ความหนืดพลวัต (dynamic viscosity)	N-s /m^2 (10 P)	0.02089	lb-s /ft^2
ความดัน (pressure)	N/m^2 (Pa)	0.000145	psi
น้ำหนักจำเพาะ (specific weight)	N/m^3	0.006365	lb/ft^3
ความเร็ว (velocity)	m/s	3.28	fps
แรง	N	0.225	lb

ตารางที่ 1.3 การแปลงหน่วยปริมาตร

หน่วย	ค่าตัวคูณเทียบเท่า (equivalent)						
	ลูกบาศก์นิ้ว (in^3)	แกลลอนอเมริกา	แกลลอนอังกฤษ	ลูกบาศก์ฟุต (ft^3)	ลูกบาศก์เมตร (m^3)	เอเคอร์-ฟุต (acre-ft)	วินาที-ฟุต-วัน (sfd)
ลูกบาศก์นิ้ว (cubic inch)	1	0.00433	0.00361	5.79×10^{-4}	1.64×10^{-5}	1.33×10^{-8}	6.70×10^{-9}
แกลลอนอเมริกา (U.S.gallon)	231	1	0.833	0.134	0.00379	3.07×10^{-6}	1.55×10^{-6}
แกลลอนอังกฤษ (imperial gallon)	277	1.20	1	0.161	0.00455	3.68×10^{-6}	1.86×10^{-6}
ลูกบาศก์ฟุต (cubic foot)	1728	7.48	6.23	1	0.0283	2.30×10^{-5}	1.16×10^{-5}
ลูกบาศก์เมตร (cubic meter)	61,000	264	220	35.3	1	8.11×10^{-4}	4.09×10^{-4}
เอเคอร์-ฟุต (acre-foot)	7.53×10^7	3.26×10^5	2.71×10^5	43560	1230	1	0.504
วินาที-ฟุต-วัน (second-foot-day)	1.49×10^8	6.46×10^5	5.38×10^5	86400	2450	1.98	1

ตารางที่ 1.4 การแปลงหน่วยของอัตราการไหล

หน่วย	ค่าตัวคูณเทียบเท่า (equivalent)						
	U.S.gpd	ft^3/day	U.S.gpm	imperial gpm	acre-ft /day	cfs	m^3/s
แกลลอนอเมริกา/วัน (U.S.gallon per day)	1	0.134	6.94×10^{-4}	5.78×10^{-4}	3.07×10^{-6}	1.55×10^{-6}	4.38×10^{-8}
ลบ.ฟุต/วัน (cubic foot per day)	7.48	1	5.19×10^{-3}	4.33×10^{-3}	2.30×10^{-5}	1.16×10^{-5}	3.28×10^{-7}
แกลลอนอเมริกา/นาที (U.S.gallon per minute)	1440	193	1	0.833	4.42×10^{-3}	2.23×10^{-3}	6.31×10^{-5}
แกลลอนอังกฤษ/นาที (imperial gallon per minute)	1728	231	1.20	1	5.31×10^{-3}	2.67×10^{-3}	7.57×10^{-5}
เอเคอร์-ฟุต/วัน (acre-foot per day)	3.26×10^5	43560	226	188	1	0.504	0.0143
ลบ.ฟุต/วินาที (cubic foot per second)	6.46×10^5	86400	449	374	1.98	1	0.0283
ลบ.เมตร/วินาที (cubic meter per second)	2.28×10^7	3.05×10^6	15800	13200	70.0	35.3	1

ตัวอย่างที่ 1.3 จงแปลงค่าความดัน 10 kPa หรือ kN/m^2 ให้อยู่ในหน่วย lb/in^2

วิธีทำ หลักการแปลงหน่วยใช้หลักเทียบค่าของสิ่งที่เท่ากันแล้วนำมาคูณและหารเพื่อตัดหน่วยที่ไม่ต้องการทิ้งไปให้เหลือเฉพาะหน่วยที่ต้องการดังนี้

ขั้นที่ 1 แปลง kN เป็น N จาก 1 kN = 1000 N ดังนั้น $\left(10\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right)\left(\frac{1000\text{N}}{1\,\text{kN}}\right) = \left(10000\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)$

(ข้อสังเกต จากเดิมหน่วย kN เป็นเศษ ดังนั้น ตอนเทียบค่าในวงเล็บจึงเอาไว้ข้างล่างเพื่อจะได้ตัดทอนกันแล้วหายไป)

ขั้นที่ 2 แปลง N เป็น lb จากตารางที่ 1.1 จะได้ว่า 1 N = 0.225 lb ดังนั้น

$$\left(1000\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)\left(\frac{0.225\ \text{lb}}{1\ \text{N}}\right) = \left(2250\ \frac{\text{lb}}{\text{m}^2}\right)$$

ขั้นที่ 3 แปลง m^2 เป็น ft^2 จากตารางที่ 1.1 จะได้ว่า 1 m = 3.28 ft

ดังนั้น $\left(2250\frac{\text{lb}}{\text{m}^2}\right)\left(\frac{1\text{ m}}{3.28\text{ ft}}\right)^2 = \left(2250\frac{\text{lb}}{\text{m}^2}\right)\left(\frac{1\text{ m}^2}{10.76\text{ ft}^2}\right) = \left(209.1\frac{\text{lb}}{\text{ft}^2}\right)$

ขั้นที่ 4 แปลง ft^2 เป็น in^2 จากตารางที่ 1.1 จะได้ว่า 1 ft = 12 in ดังนั้น

$$\left(209.1\frac{\text{lb}}{\text{ft}^2}\right)\left(\frac{1\text{ ft}}{12\text{ in}}\right)^2 = \left(209.1\frac{\text{lb}}{\text{ft}^2}\right)\left(\frac{1\text{ ft}^2}{144\text{ in}^2}\right) = \left(1.45\frac{\text{lb}}{\text{in}^2}\right)$$ **ตอบ**

หรือถ้าเข้าใจแล้วจะใช้หลักเทียบค่าของสิ่งที่เท่ากันแล้วนำมาคูณและหารตลอดเลยทีเดียวก็ได้ คือ

$$\left(10\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right)\left(\frac{1000\text{ N}}{1\text{ kN}}\right)\left(\frac{0.225\text{ lb}}{1\text{ N}}\right)\left(\frac{1\text{ m}}{3.28\text{ ft}}\right)^2\left(\frac{1\text{ ft}}{12\text{ in}}\right)^2 = \left(1.45\frac{\text{lb}}{\text{in}^2}\right)$$ **ตอบ**

1.3 คุณสมบัติที่สำคัญของของไหล

คุณสมบัติที่สำคัญของของไหลที่ควรกล่าวถึงและจดจำ ได้แก่

1.3.1 ความหนาแน่น (density, ρ) = $\frac{\text{มวล}}{\text{ปริมาตร}} = \frac{\text{m}}{\forall}$ คือ อัตราส่วนของมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ในระบบ SI ความหนาแน่นของน้ำที่ 4 °C เท่ากับ 1000 kg/m^3 ส่วนในระบบอังกฤษ มีค่าเท่ากับ 1.94 slug/ft^3

1.3.2 น้ำหนักจำเพาะ (specific weight, γ) = $\frac{\text{น้ำหนัก}}{\text{ปริมาตร}} = \frac{\text{W}}{\forall} = \rho g$ (เมื่อ W = mg) คือ อัตราส่วนของน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร น้ำหนักจำเพาะของน้ำที่ 4 °C ในระบบ SI มีค่าประมาณ 9810 N/m^3 (นิวตัน/ลูกบาศก์เมตร) หรือประมาณ 62.4 lb/ft^3 ในระบบอังกฤษ

1.3.3 ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity, S) = $\frac{\text{น้ำหนักจำเพาะ (หรือความหนาแน่น) ของวัตถุ}}{\text{น้ำหนักจำเพาะ (หรือความหนาแน่น) ของน้ำที่ 4 }^{\text{o}}\text{C}}$

$= \frac{\gamma_m}{\gamma_w}$ หรือ $\frac{\rho_m}{\rho_w}$ เป็นค่าบ่งบอกว่าวัตถุชนิดนั้นมีมวลหรือน้ำหนักมากกว่าน้ำกี่เท่าเมื่อปริมาตรเท่ากัน เช่น คอนกรีตมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.4 ส่วนของน้ำมีค่าเท่ากับ 1.0

1.3.4 ความหนืด (viscosity) เกิดจากการเกาะกันระหว่างโมเลกุลชนิดเดียวกันของของเหลว (cohesive) แล้วก่อให้เกิดความต้านทานต่อการไหล โดยปกติความหนืดของของไหลจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความหนืดมี 2 ชนิด คือ

1. ความหนืดพลวัตหรือความหนืดสมบูรณ์ (dynamic or absolute viscosity, μ) หรือ

μ = $\frac{\text{ความเค้นเฉือน (shear stress)}}{\text{อัตราความเครียด (srain rate)}}$ ที่เกิดขึ้นในเนื้อของเหลวที่มีการไหล หรือ = $\frac{\tau}{du/dy}$ มีหน่วยเป็น (N-s) / m^2 ในระบบ SI และ (lb-s) / ft^2 ในระบบอังกฤษ

2. ความหนืดจลน์ (kinematic viscosity, ν)

ν = $\frac{\text{ความหนืดพลวัตหรือความหนืดสมบูรณ์}}{\text{ความหนาแน่นของของเหลว}}$ = $\frac{\mu}{\rho}$ มีหน่วยเป็น m^2/s ในระบบ SI และ ft^2/s ในระบบอังกฤษ

1.3.5 ความดันไอ (vapor pressure) หรือความดันที่ของเหลวกลายเป็นไอ คือความดันที่เกิดจากอนุภาคของของเหลวในรูปไออิ่มตัว (saturated vapor) เหนือผิวหน้าของเหลวที่อุณหภูมิที่กำหนดให้เกิดขึ้นเมื่อของเหลวอยู่ในภาชนะปิด โมเลกุลที่ระเหยจากผิวหน้าของเหลวไม่สามารถออกจากภาชนะได้และจะรวมกันอยู่ในภาชนะเหนือผิวหน้าของเหลว ทำให้เกิดความดัน เมื่ออัตราการระเหยเท่ากับอัตราการควบแน่น ความดันไอที่วัดได้เรียกว่า ความดันไอสมดุล (equilibrium vapor pressure) เรียกสั้น ๆ ว่า ความดันไอ

โดยปกติค่าความดันไอจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของของเหลวที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของของเหลว ของเหลวใดมีแรงดึงดูดหรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้อยความดันไอก็จะสูง ส่วนของเหลวใดที่มีแรงดึงดูดหรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมากความดันไอก็จะต่ำ เช่น น้ำมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมากกว่าเอทานอล ดังนั้น น้ำจึงมีความดันไอต่ำกว่าเอทานอลที่อุณหภูมิเดียวกัน

1.3.6 ความดันบรรยากาศมาตรฐาน (standard atmospheric pressure, P_{atm}) คือ ความดันเฉลี่ยของบรรยากาศวัดที่ระดับน้ำทะเลปานกลาง (mean sea level) มีค่าดังที่แสดงในตารางที่ 1.5

1.3.7 ความดันมาตรหรือความดันเกจ (gauge pressure, P_g) คือ ค่าความดันที่อ่านเทียบจากค่าความดันบรรยากาศ โดยให้ค่าความดันบรรยากาศทุก ๆ ที่มีค่าเป็นศูนย์ (0) เช่น ค่าความดันลมยางของล้อรถ เป็นต้น

1.3.8 ความดันสมบูรณ์ (absolute pressure, P_{abs}) คือ ความดันที่วัดเทียบกับค่าที่เป็นศูนย์ตามสมการ $P_{abs} = P_{atm} \pm P_g$

เมื่อ P_g = ค่าความดันที่อ่านได้จากเกจ (gauge pressure) ซึ่งอาจมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้

P_{atm} = ค่าความดันบรรยากาศ

ตารางที่ 1.5 ปริมาณและคุณสมบัติที่สำคัญ

ปริมาณ	ระบบหน่วย SI	ระบบหน่วยอังกฤษ
ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	9.81 m/s^2	32.2 ft/s^2
ความหนาแน่นของน้ำ (39.4 °F, 4 °C)	1000 kg/m^3 = 1 g/cm^3	1.94 $slug/ft^3$
	or 1.0 mg/m^3	= 1.94 lb. $ft^2 s^{-4}$
น้ำหนักจำเพาะของน้ำ	~ 9810 N/m^3	62.4 lb/ft^3
(50 °F, 15 °C)	or 9.81 kN/m^3	
ความดันบรรยากาศมาตรฐาน	101.32 kN/m^2, abs	14.7 psia
ที่ระดับน้ำทะเลปานกลาง	760 mm Hg	29.92 in, Hg
	10.33 m H_2O	33.9 ft H_2O
	1013.2 millibars	

ตารางที่ 1.6 คุณสมบัติของน้ำในระบบหน่วย SI

อุณหภูมิ	น้ำหนักจำเพาะ	ความหนาแน่น	ความหนืดพลวัตหรือความหนืดสมบูรณ์	ความหนืดจลน์	ความร้อนของการกลายเป็นไอ	ความดันไอ	หัวความดันไอ	มอดุลัสของความยืดหยุ่น
	γ	ρ	$\mu \times 10^{-3}$	$\nu \times 10^{-6}$		P_v	P_v/γ	$E_v \times 10^6$
°C	kN/m^3	kg/m^3	N-s $/m^2$	m^2/s	J/gm	kN/m^2,abs	m (abs)	kN/m^2
0	9.805	999.8	1.792	1.792	2500.3	0.61	0.06	2.02
5	9.807	1000.0	1.518	1.519	2488.6	0.87	0.09	2.06
10	9.804	999.7	1.307	1.306	2476.9	1.13	0.12	2.10
15	9.798	999.1	1.139	1.139	2465.1	1.60	0.17	2.15
20	9.789	998.2	1.002	1.003	2453.0	2.34	0.25	2.18
25	9.777	997.0	0.890	0.893	2441.3	3.17	0.33	2.22
30	9.764	995.7	0.798	0.800	2429.6	4.24	0.44	2.25
40	9.730	992.2	0.653	0.658	2405.7	7.38	0.76	2.28
50	9.689	988.0	0.547	0.553	2381.8	12.33	1.26	2.29
60	9.642	983.2	0.466	0.474	2357.6	19.92	2.03	2.28
70	9.589	977.8	0.404	0.413	2333.3	31.16	3.20	2.25
80	9.530	971.8	0.354	0.364	2308.2	47.34	4.96	2.20
90	9.466	965.3	0.315	0.326	2282.6	70.10	7.18	2.14
100	9.399	958.4	0.282	0.294	2256.7	101.33	10.33	2.07

ตารางที่ 1.7 คุณสมบัติของน้ำในระบบหน่วยอังกฤษ

อุณหภูมิ	น้ำหนักจำเพาะ	ความหนาแน่น	ความหนืดพลวัตหรือความหนืดสมบูรณ์	ความหนืดจลน์	ความร้อนของการกลายเป็นไอ	ความดันไอ	หัวความดันไอ	มอดุลัสของความยืดหยุ่น
$^\circ F$	γ lb/ft^3	ρ slugs/ft^3	$\mu \times 10^{-5}$ lb-s/ft^2	$\nu \times 10^{-5}$ ft^2/s	btu/lb	P_v psi (abs)	P_v/γ ft (abs)	$E_v \times 10^3$ psi
32	62.42	1.940	3.746	1.931	1075.5	0.09	0.20	293
40	62.43	1.940	3.229	1.664	1071.0	0.12	0.28	294
50	62.41	1.940	2.735	1.410	1065.3	0.18	0.41	305
60	62.37	1.938	2.359	1.217	1059.7	0.26	0.59	311
80	62.22	1.934	1.799	0.930	1048.4	0.51	1.17	322
90	62.11	1.931	1.595	0.826	1042.7	0.70	1.61	323
100	62.00	1.927	1.424	0.739	1037.1	0.95	2.19	327
120	61.71	1.918	1.168	0.609	1025.6	1.69	3.91	333
140	61.38	1.908	0.981	0.514	1014.0	2.89	6.67	330
160	61.00	1.896	0.838	0.442	1002.2	4.74	10.95	326
180	60.58	1.883	0.726	0.385	990.2	7.51	17.33	318
200	60.12	1.868	0.637	0.341	977.9	11.52	26.59	308
212	59.83	1.860	0.593	0.319	970.3	14.70	33.90	300

1.4 แรงที่เกิดจากของเหลว

แรงหรือน้ำหนัก (force or weight, F or W) = มวล × ความเร่ง หรือ F or W = mg

ในระบบ SI มีหน่วยเป็น kg-m/s^2 หรือนิวตัน (Newton) และใช้อักษรย่อว่า N โดยแรง 1 N มีค่าเท่ากับมวล 1 kg เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง 1 m/s^2 หรือ 1 N = 1 kg × 1 m /s^2

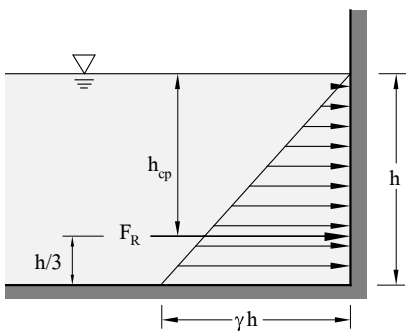
ส่วนในระบบอังกฤษมีหน่วยเป็น ปอนด์ (pound) ใช้อักษรย่อ lb

แรงที่เกิดจากของเหลวสามารถวิเคราะห์ได้ 2 กรณี คือ แรงที่ดันสถิตเกิดขึ้นขณะของเหลวไม่มีการไหลและแรงที่ขณะของเหลวมีการไหล

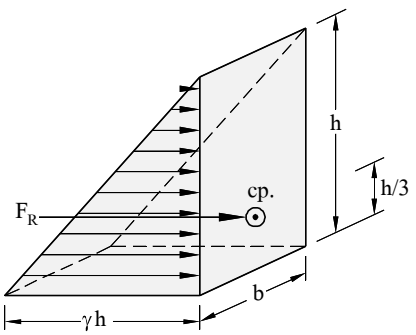
1.4.1 แรงที่เกิดขึ้นขณะของเหลวไม่มีการไหล

1. ความดัน (pressure, P) คือ แรงหรือน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ หน่วยวัดความดันในระบบ SI คือ N/m^2 (นิวตันต่อตารางเมตร) ซึ่งมีชื่อเรียกใหม่ว่า ปาสกาล (Pascal) และใช้ตัวย่อว่า Pa ระบบอังกฤษ หน่วยเป็น lb/ft^2 (ปอนด์/ต่อตารางฟุต) หรือ lb/in^2 (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

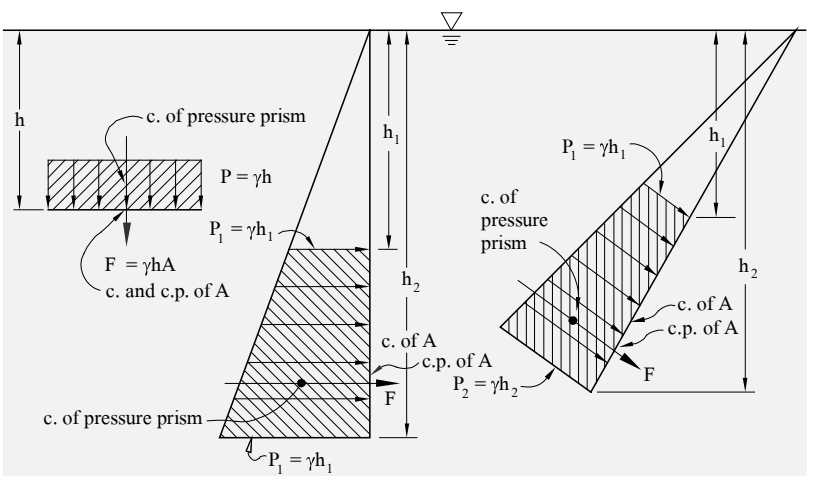
หลักการ : 1. ความดันมีค่าแปรผันตามความลึก ($P \propto h$ หรือ y)
2. ความดันและแรงดันจะกระทำตั้งฉากกับพื้นที่ที่รับแรงเสมอ
3. แรงลัพธ์ที่เกิดจากความดันบนพื้นที่ใด ๆ มีค่าเท่ากับปริมาตรของปริซึมความดัน



(ก) ไดอะแกรมความดันบนระนาบแนวดิ่ง



(ข) ปริซึมความดัน



(ค) ระนาบแนวนอน (ง) ระนาบแนวดิ่ง (จ) ระนาบเอียง

รูปที่ 1.1 ไดอะแกรมความดันและปริซึมความดันบนระนาบตรงที่จมอยู่ในของเหลว

ความดันที่จุดใด ๆ ในเนื้อของเหลวมีค่าเท่ากับ $\frac{\text{แรงหรือน้ำหนักของของเหลว}}{\text{พื้นที่}} = \frac{F}{A}$ หรือ $\frac{W}{A}$ หรือเท่ากับน้ำหนักจำเพาะของของเหลวคูณกับความลึกจากผิวอิสระถึงจุดความลึกนั้น นั่นคือ

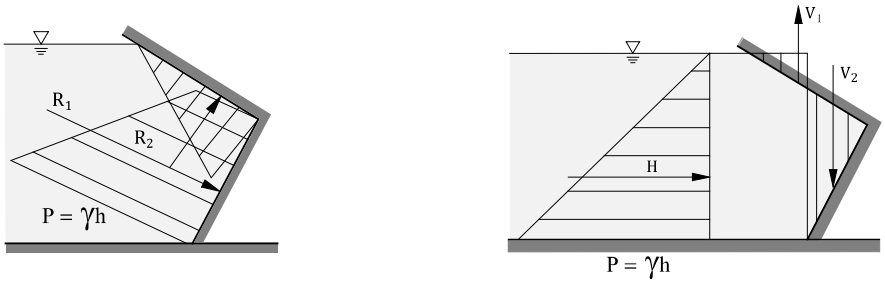
$$p = \gamma h \tag{1.1}$$

เมื่อ P = ความดันใต้ผิวของของเหลวลึก h (N/m^2, lb/ft^2)

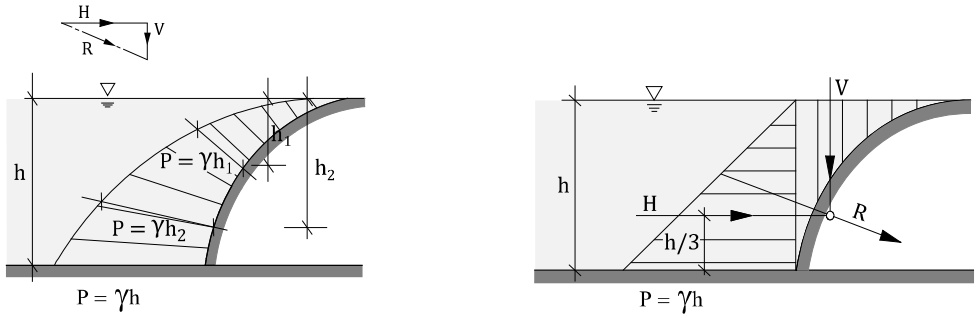
γ = น้ำหนักจำเพาะของของเหลว (N/m^3, lb/ft^3)

h = ระดับความลึก ณ จุดใด ๆ ที่พิจารณาในแนวดิ่ง (m, ft)

2. แรงดันที่ของเหลวกระทำต่อระนาบที่จมบางส่วน

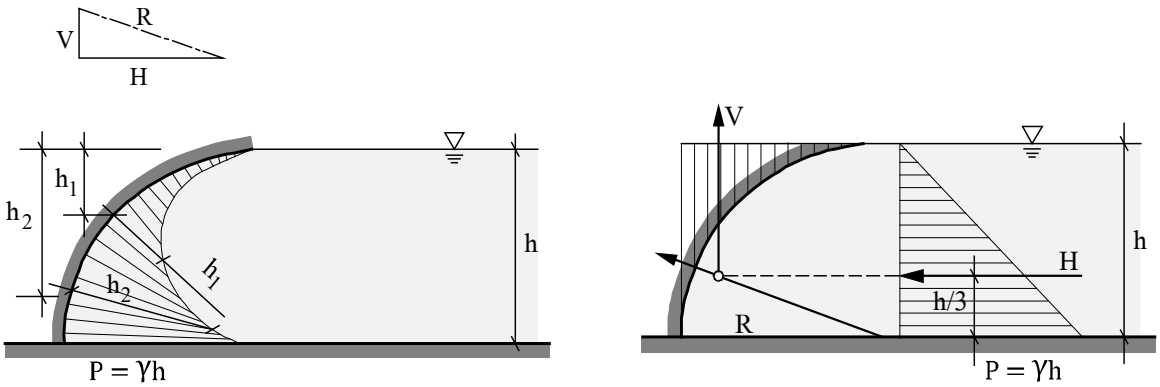


(ก) ระนาบเอียง

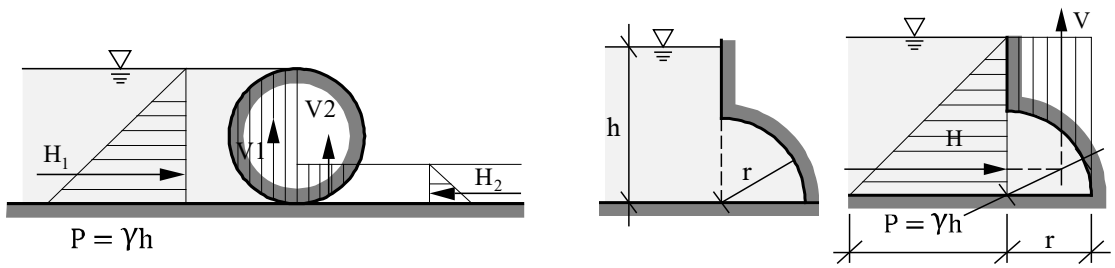


(ข) ระนาบโค้ง

รูปที่ 1.2 แรงดันที่ของเหลวกระทำต่อระนาบสามารถแยกเป็นแรงย่อย 2 แรงตั้งฉากกัน (อ้างอิง 19)



(ค) ระนาบโค้ง



(ง) ระนาบโค้ง (จ) ระนาบโค้ง

รูปที่ 1.2 (ต่อ)

รูปที่ 1.2 ไม่ว่าผนังของภาชนะที่บรรจุของเหลวจะมีลักษณะเอียงหรือโค้ง สามารถหาแรงที่ของเหลวกระทำต่อผนังได้อย่างง่ายโดยแยกแรงเป็น 2 แรงย่อย คือ H และ V ตั้งฉากกัน

โดยที่ H คือ แรงที่ของเหลวกระทำต่อพื้นที่ภาพฉาย (project area) A_y ในแนวแกน y มีค่าเท่ากับปริซึมความดัน (ดูรูปที่ 1.1 ข)

จะได้ว่า $$H = \frac{1}{2}\gamma h\ A_y = \frac{1}{2}\gamma h\ Bh \qquad (1.2)$$

เมื่อ B = ความกว้างของ A_y และ h = ระดับความลึกที่พิจารณาในแนวดิ่ง

เมื่อ h_c = ระดับความลึกในแนวดิ่งจากผิวน้ำถึงจุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่ $A_y = \frac{h}{2}$

จะได้ $$H = \gamma h_c A_y = \gamma h_c Bh \qquad (1.3)$$

จุดศูนย์กลางที่แรง H กระทำต่อพื้นที่ภาพฉาย (A_y) ในแนวแกน y วัดจากผิวล่าง คือ

$$h_{cp} = \frac{h}{3} \tag{1.4}$$

เมื่อ h = ความลึกของของเหลว (m, ft)

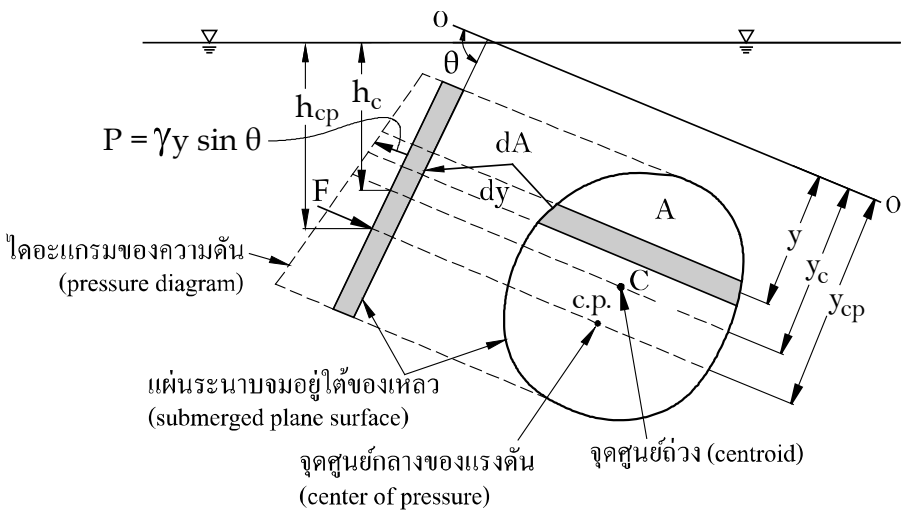
ส่วน V = แรงหรือน้ำหนักในแนวดิ่งหรือแนวแกน y ที่เกิดจากมวลของของเหลวทั้งก้อนที่มีอิทธิพลต่อระนาบที่พิจารณา จะได้ว่า

$$V = \gamma \forall \tag{1.5}$$

เมื่อ $\forall$ = ปริมาตรของของเหลวเหนือระนาบที่พิจารณา (m^3, ft^3)

ตำแหน่งของ V กระทำผ่านจุดศูนย์ถ่วง (center of gravity) ของมวลของเหลวนั้น

3. แรงดันที่กระทำต่อระนาบตรงรูปใด ๆ ที่จมในของเหลว ตามรูปที่ 1.3 วิเคราะห์ได้ดังนี้



รูปที่ 1.3 แรงดันที่กระทำต่อระนาบจมรูปทรงใด ๆ (อ้างอิง 27)

(1) ขนาดของแรงลัพธ์ที่เกิดจากความดันบนระนาบใด ๆ มีค่าเท่ากับปริมาตรของปริซึมความดัน

หรือ $$F = \gamma h_C A \tag{1.6}$$

เมื่อ F = แรงลัพธ์ที่กระทำต่อระนาบ (N, lb)

h_C = ระยะที่วัดในแนวดิ่งจากผิวของเหลวถึงจุดศูนย์ถ่วงของระนาบ (m, ft)

A = พื้นที่ของระนาบ (m^2, ft^2)

(2) ตำแหน่งที่แรงลัพธ์กระทำ

$$y_{cp} = y_C + \frac{I_{cx}}{y_c A} \tag{1.7}$$

เมื่อ y_{cp} = ตำแหน่งที่แรงลัพธ์กระทำต่อระนาบจากแกน 0-0 ไปตามแกน y (m, ft)

y_C = ระยะวัดจากแกน 0-0 ถึงจุดศูนย์ถ่วง (center of gravity) ของระนาบ (m, ft)

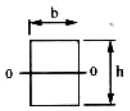
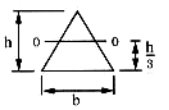
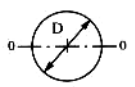
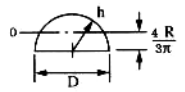
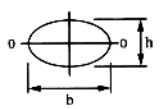
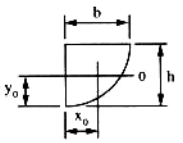
I_{cx} = โมเมนต์เฉื่อย (moment of inertia) ของระนาบรอบจุดศูนย์ถ่วงในแนวแกน x (m^4, ft^4)

A = พื้นที่ของระนาบ (m^2, ft^2)

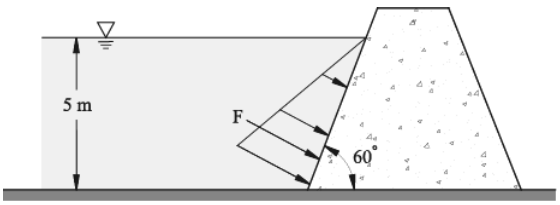
หรือ $$h_{cp} = y_{cp} \sin\theta \tag{1.8}$$

เมื่อ h_{cp} = ตำแหน่งศูนย์กลางที่แรงลัพธ์กระทำต่อระนาบจากผิวน้ำตามแนวดิ่ง

ตารางที่ 1.8 ตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วง พื้นที่ และโมเมนต์เฉื่อยของรูปร่างต่าง ๆ

รูปสี่เหลี่ยม (rectangle)	:		A = b h	$I_0 = b\,h^3/12$
รูปสามเหลี่ยม (triangle)	:		A = b h/2	$I_0 = b\,h^3/36$
วงกลม (circle)	:		$A = \pi D^2/4$	$I_0 = \pi R^4/4$
ครึ่งวงกลม (semicircle)	:		$A = \pi R^2/2$	$I_0 = 0.110\,R^4$
วงรี (ellipse)	:		$A = \pi b\,h/4$	$I_0 = \pi b\,h^3/64$
พาราโบลิก (parabolic section)	:		$y_0 = 3h/5$ $x_0 = 3b/8$	A = 2b h/3	$I_0 = 2b\,h^3/7$

ตัวอย่างที่ 1.4 เขื่อนคอนกรีตยาว 25 m มีความลาดเอียง 60° ดังรูป จงคำนวณหาแรงดันที่เกิดจากน้ำทั้งหมดและตำแหน่งที่แรงดันกระทำต่อเขื่อน กำหนดให้น้ำมีอุณหภูมิ 20 °C



วิธีทำ **กรณีที่ 1** เขียนรูปไดอะแกรมของความดัน (pressure diagram) และแรง F ด้วยลูกศรแทนแรงซึ่งกระทำบนระนาบเอียงผิวด้านหน้าของเขื่อน

จากสมการที่ 1.6 ขนาดของแรงลัพธ์ $F = \gamma_w h_C A$

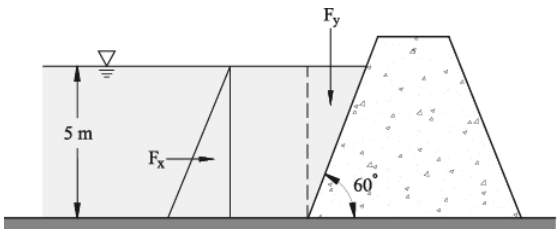
ที่ 20 °C จากตารางที่ 1.6 จะได้ $\gamma_w = 9.79\ kN/m^3$

พื้นที่ระนาบเอียง $A = (5/\sin 60^\circ)(25) = 144\ m^2$

ดังนั้น $F = \left(9.79 \frac{kN}{m^3}\right)(2.5 m)(144\ m^2) = 3532\ kN$

ตำแหน่งที่แรงกระทำ $= h_{cp} = 2\frac{y}{3}$ จากผิวบนในแนวดิ่ง $= (2/3)(5) = 3.33\ m$ **ตอบ**

กรณีที่ 2 เขียนรูปเพื่อการวิเคราะห์โดยแยกพิจารณาเป็นแรง F_x และ F_y



F_x = ปริมาตรของปริซึมความดันรูปสามเหลี่ยม $= \frac{1}{2}\gamma_w h A_y$

$= \frac{(9.79)}{2}(5)(5 \times 25) = 3059\ kN \rightarrow$

F_y = น้ำหนักที่เกิดจากมวลของน้ำรูปลิ่มเหนือระนาบเอียง $= \gamma_w \forall$