

ทฤษฎีของเครื่องสูบน้ำ

2.1 คุณสมบัติของของไหล

คุณสมบัติเบื้องต้นของสิ่งที่เข้ามาเกี่ยวข้องกับเครื่องสูบน้ำมีอยู่หลายอย่างด้วยกัน ดังต่อไปนี้

2.1.1 ความหนาแน่น (Density, ρ) เป็นอัตราส่วนของมวลต่อหน่วยปริมาตร

2.1.2 น้ำหนักจำเพาะ (Specific Weight, γ) เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ค่าน้ำหนักจำเพาะขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดของโลกและความหนาแน่น

$$\gamma = \rho g \quad (2.1)$$

ในเมื่อ g เป็นความเร่งที่เกิดจากแรงดึงดูดของโลก

2.1.3 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักจำเพาะ (ความหนาแน่น) ของวัตถุต่อน้ำหนักจำเพาะ (ความหนาแน่น) ของน้ำที่อุณหภูมิมาตรฐาน

2.1.4 ความหนืด (Viscosity) เป็นคุณสมบัติของของไหลที่เนื่องมาจากการเกาะกันระหว่างโมเลกุลชนิดเดียวกัน (Cohesive) แล้วก่อให้เกิดความต้านทานต่อการไหลขึ้น คุณสมบัติข้อนี้จะมีผลหรือเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการไหลเท่านั้น ความหนืดของของไหลจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ความหนืดจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ ความหนืดไดนามิกส์ (Dynamic-Viscosity, μ) มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อเมตร-วินาที (Kg/m-s) ความหนืดไคเนมาติกส์ (Kinematic Viscosity, ν) ซึ่งเท่ากับความหนืดไดนามิกส์

(Dynamic Viscosity) ทหารด้วยความหนาแน่น ($\nu = \mu/\rho$) จะมีหน่วยเป็น ตารางเมตร/วินาที (m^2/s)

2.1.5 ความดันไอ (Vapor pressure) เป็นความดันที่เกิดจากโมเลกุล ในรูปไออิ่มตัว (Saturated vapor) เหนือผิวหน้าของของเหลวที่อุณหภูมิที่กำหนด ให้ เมื่อความดันไอของของเหลวเท่ากับความกดดันของบรรยากาศหรือความกดดันที่อยู่ รอบ ๆ ของเหลวนั้นก็จะเป็นจุด

คุณสมบัติของของเหลวข้อนี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการทำงานของเครื่องสูบล ทางด้านดูด (Suction side) โดยเฉพาะอย่างยิ่งของเหลวที่ต้องการสูบล้ออุณหภูมิ สูง หรือเป็นของเหลวที่ระเหยได้ง่าย ทั้งนี้เพราะว่าถ้าความดันไอของของเหลวในเครื่องสูบล ส่วนนี้ลดลงถึงความดันไอแล้วจะทำให้ของเหลวกลายเป็นไอ และจะเป็นผลให้อัตราการสูบล ลดลงหรือไม่มีของเหลวไหลเข้ามาเครื่องสูบลเลย ดังนั้นจึงต้องกำหนดให้ความดันภายใน เครื่องสูบล (Casing) สูงกว่าความดันไอของของเหลวอยู่ตลอดเวลา

สำหรับคุณสมบัติของน้ำที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณของเครื่องสูบลน้ำได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 2.1 และ 2.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 ความถ่วงจำเพาะ (Sp.gr) และความดันไอน้ำที่
อุณหภูมิขนาดต่าง ๆ ค่าความดันไอน้ำมีหน่วยเป็นมิลลิบาร์ (mb)
และความสูงของแท่งน้ำที่ 4 C มีหน่วยเป็นเมตร

Temp. °C	Sp.gr.	Vapor Pressure		Temp. °C	Sp.gr.	Vapor Pressure	
		mb	m. H ₂ O			mb	m. H ₂ O
0	.99987	6.1078	0.06	50	.98807	123.40	1.26
1	.9993	6.5662	0.07	51	.98762	129.65	1.32
2	.9997	7.0547	0.07	52	.98715	136.17	1.39
3	.9999	7.5753	0.08	53	.98669	142.98	1.46
4	1.00000	8.1294	0.08	54	.98621	150.07	1.53
5	.99999	8.7192	0.09	55	.98573	157.46	1.60
6	.9997	9.3465	0.09	56	.98523	165.16	1.68
7	.9993	10.013	0.10	57	.98473	173.18	1.76
8	.9988	10.722	0.11	58	.98424	181.53	1.85
9	.9981	11.474	0.12	59	.98374	190.22	1.94
10	.99973	12.272	0.12	60	.98324	199.26	2.03
11	.9963	13.119	0.13	61	.98271	208.67	2.13
12	.9952	14.017	0.14	62	.98218	218.45	2.23
13	.9940	14.969	0.15	63	.98165	228.61	2.33
14	.9927	15.977	0.16	64	.98112	239.18	2.44
15	.99913	17.044	0.17	65	.98059	250.16	2.55
16	.9978	18.173	0.18	66	.98003	261.56	2.67
17	.9968	19.367	0.20	67	.97948	273.40	2.79
18	.9956	20.630	0.21	68	.97892	285.70	2.91
19	.9943	21.964	0.22	69	.97837	298.45	3.04
20	.99823	23.373	0.24	70	.97781	311.69	3.18
21	.9970	24.861	0.25	71	.97723	325.42	3.32
22	.9957	26.430	0.27	72	.97664	339.65	3.46
23	.9943	28.086	0.29	73	.97606	354.41	3.61
24	.9928	29.831	0.30	74	.97547	369.71	3.77
25	.99708	31.671	0.32	75	.97489	385.56	3.93
26	.9956	33.608	0.34	76	.97428	401.98	4.10
27	.9940	35.649	0.36	77	.97367	418.98	4.27
28	.9923	37.796	0.38	78	.97305	436.59	4.45
29	.9905	40.055	0.41	79	.97244	454.81	4.64
30	.99568	42.430	0.43	80	.97183	473.67	4.83
31	.9940	44.927	0.46	81	.97119	493.17	5.03
32	.9922	47.551	0.48	82	.97056	513.35	5.23
33	.9903	50.307	0.51	83	.96992	534.22	5.45
34	.9884	53.200	0.54	84	.96928	555.80	5.67
35	.99406	56.236	0.57	85	.96865	578.09	5.89
36	.9922	59.422	0.60	86	.96799	601.13	6.13
37	.9903	62.762	0.64	87	.96732	624.94	6.37
38	.9884	66.264	0.67	88	.96666	649.53	6.62
39	.9864	69.934	0.71	89	.96600	674.92	6.88
40	.99225	73.777	0.75	90	.96534	701.13	7.15
41	.9903	77.802	0.79	91	.96466	728.19	7.42
42	.9884	82.015	0.84	92	.96397	756.11	7.71
43	.9864	86.423	0.88	93	.96329	784.92	8.00
44	.9844	91.034	0.93	94	.96260	814.63	8.31
45	.99025	95.855	0.98	95	.96192	845.28	8.63
46	.9882	100.89	1.03	96	.96121	876.88	8.94
47	.9861	106.16	1.08	97	.96050	909.45	9.27
48	.9840	111.66	1.14	98	.95980	943.12	9.62
49	.9819	117.40	1.20	99	.95909	977.81	9.97
50	.98807	123.40	1.26	100	.95838	1013.25	10.33

ความดันไอน้ำที่เทียบเท่ากับ ความสูงของแท่งน้ำที่เท่ากับ 10.197 เมตร

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ		ความหนาแน่น		Viscosity (μ)		Kinematic viscosity (ν)	
$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{F}$	gm/cm^3	slugs/ft ³	kg/m-sec	lb _f -sec/ft ²	m ² /sec	ft ² /sec
0	32	0.99987	1.940	1.794×10^{-3}	3.746×10^{-5}	1.794×10^{-6}	1.930×10^{-5}
4	39	1.00000	1.941	1.568	3.274	1.568	1.687
5	41	0.99999	1.941	1.519	3.172	1.519	1.634
10	50	0.99973	1.940	1.310	2.735	1.310	1.407
15	59	0.99913	1.940	1.145	2.391	1.146	1.233
20	68	0.996	1.937	1.009	2.107	1.011	1.088
30	86	0.996	1.932	0.800	1.670	0.803	0.864
40	104	0.992	1.925	0.654	1.366	0.659	0.709
50	122	0.988	1.917	0.549	1.146	0.556	0.598
60	140	0.983	1.907	0.470	0.981	0.478	0.514
70	158	0.978	1.897	0.407	0.850	0.416	0.448
80	176	0.972	1.885	0.357	0.745	0.367	0.395
90	194	0.965	1.872	0.317	0.662	0.328	0.353
100	212	0.958	1.858	0.284×10^{-3}	0.593	0.296×10^{-6}	0.318

2.2 ความดันและเฮค

2.2.1 ความดันของบรรยากาศ (Atmopheric Pressure)

ความดันของบรรยากาศจะเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของบรรยากาศต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่บนผิวโลก โดยพิจารณาจากรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความดันของบรรยากาศ

ความดันบรรยากาศที่มีค่าศูนย์อย่างแท้จริงหรือไม่มีความดันเลย ซึ่งเกิดขึ้นได้ โดยการดูดอากาศออกหมดจนเป็นสูญญากาศที่แท้จริงจะเป็นความดันศูนย์สัมบูรณ์ (Absolute Zero Pressure) ค่าความดันใด ๆ ที่วัดจากความดันพื้นฐานนี้เป็นความดันสัมบูรณ์ (Absolute Pressure, P_{abs}) รวมทั้งความดันของบรรยากาศ ซึ่งมีค่าประมาณ 101.325 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร (kN/m^2) หรือ 14.7 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ก็จะเป็นความดันสัมบูรณ์ด้วย

อุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันทั่ว ๆ ไปเป็นเครื่องมือสำหรับวัดค่าที่แตกต่างไปจากความกดดันของบรรยากาศ ค่าที่วัดได้จะเป็นความดันเกจ (Gauge Pressure, P_g) ซึ่งอาจมีได้ทั้งบวกและลบ พิจารณาจากรูปที่ 2.1 สามารถหาความสัมพันธ์ได้โดย

$$\begin{aligned} \text{ความดันสัมบูรณ์} &= \text{ความดันจากบาโรมิเตอร์} + \text{ความดันเกจ} \\ P_{abs} &= P_b + P_g \end{aligned} \quad (2.2)$$

ค่าของความดัน บรรยากาศหรือความดันจากบาโรมิเตอร์อาจคำนวณได้จาก

$$P_b = 1013 - 0.1055 \text{ EL} \quad (2.3)$$

ในเมื่อ P_b ความดันบรรยากาศมีหน่วยเป็นมิลลิบาร์ซึ่งคิดที่ความสูงของแท่งน้ำที่ 4 องศาเซลเซียสเป็น 0.010197 เมตร และ EL เป็นระดับความสูงของพื้นผิวที่ต้องการทราบความกดดันเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางมีหน่วยเป็นเมตร

สำหรับการคำนวณเกี่ยวกับการติดตั้งเครื่องสูบน้ำ ค่าความดันบรรยากาศที่ใช้มีหน่วยเป็นความสูงของแท่งน้ำหรือเฮดเป็นเมตร ค่าดังกล่าวอาจจะคำนวณได้จากสมการ

$$H_p = 10.33 - 0.00108 \text{ EL} \quad (2.4)$$

โดย H_p เป็นความกดดันของบรรยากาศเทียบให้เป็นความสูงของแท่งน้ำที่ 4 องศาเซลเซียส

2.2.2 เฮดความดัน (Pressure Head, H)

ความดันของของเหลวนิยมบอกเป็นแท่งความสูงของของเหลวที่ก่อให้เกิดความดันที่กำหนดบนผิวหน้า ซึ่งรองรับแท่งของเหลวนี้ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความดัน P และเฮดความดัน H คือ

$$H = \frac{P}{\gamma} = \frac{P}{\rho g} \quad (2.5)$$

ในเมื่อ γ = น้ำหนักจำเพาะ

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

2.2.3 เฮดความเร็ว (Velocity Head, H_V)

ของเหลวที่ไหลในท่อด้วยความเร็วใด ๆ นั้นมีพลังงานจลน์อยู่ โดยที่พลังงานส่วนนี้เมื่อบอกอยู่ในรูปของเฮดคือ

$$H_V = \frac{V^2}{2g} \quad (2.6)$$

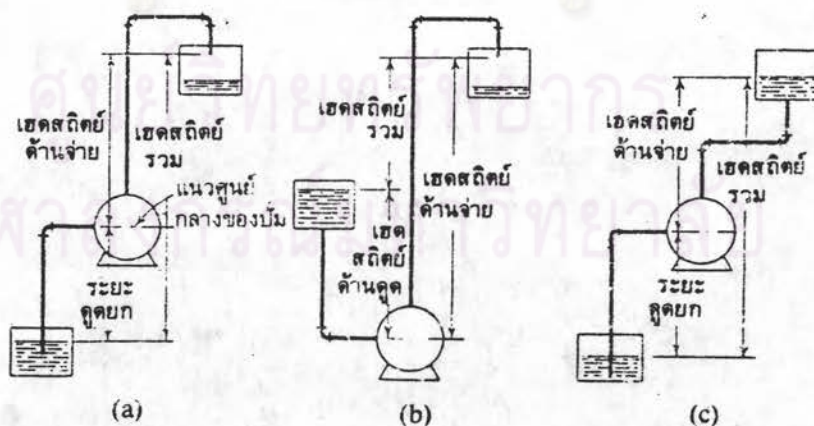
ในเมื่อ

V = ความเร็วของการไหล

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

2.2.4 เฮดสถิตย (Static Head)

ในการทำงานของเครื่องสูบน้ำโดยทั่วไปของเหลวจะถูกเพิ่มพลังงาน เพื่อให้ของเหลวไหลจากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่ง ซึ่งอยู่สูงกว่าดังรูปที่ 2.2 ความดันซึ่งบอกเป็นแท่งความสูงของของเหลวที่กระทำต่อศูนย์กลางของเครื่องสูบน้ำทั้งทางด้านดูดและด้านออก ในขณะที่ความเร็วของการไหลผ่านระบบที่เป็นศูนย์จะเป็นเฮดสถิตย



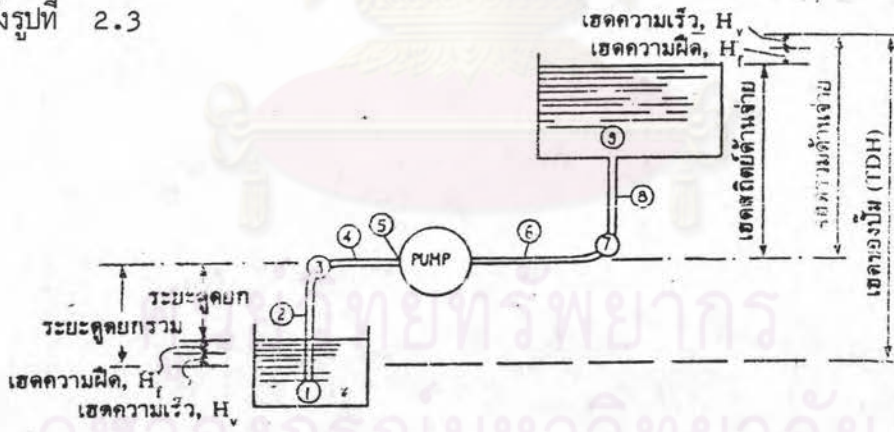
รูปที่ 2.2 คำจำกัดความของเฮดสถิตย (Static Head)

ตามรูปที่ 2.2 ระยะทางในแนวดิ่งที่บอกเป็นแท่งความสูงของของเหลว หรือ เสดจกศูนย์กลางของ เครื่องสูบน้ำถึง ปลายของท่อออกจะเป็น เสดสถิตยทางด้านท่อออก (Static Discharge Head)

ระยะจากจุดศูนย์กลางของ เครื่องสูบน้ำถึงระดับผิวของของเหลวที่ปลายท่อคูด ซึ่งอยู่สูงกว่า (ดังรูป b) จะเป็นเสดสถิตยด้านคูด (Static Suction Head) ถ้าผิวของของเหลวอยู่ต่ำกว่า (ดังรูป a และ c) ความคั่นที่ศูนย์กลางของ เครื่องสูบน้ำมีค่าเป็นลบ ในกรณีนี้จะเป็นระยะคูดยก (Static Suction Lift) แทน

เสดสถิตยรวม (Total Static Head) จะเป็นผลต่างทางพีชคณิตของ เสดสถิตยทางด้านออกกับ ทางด้านคูดและด้านออก พลังงานหรือ เสดในการไหลส่วนหนึ่ง มีการสูญเสียเนื่องจากความฝืดระหว่างของเหลวกับผนังของท่อและส่วนประกอบต่าง ๆ ซึ่ง เป็นเสดความฝืด

ในระบบสูบน้ำทั่ว ๆ ไป การเสดเนื่องมาจากความฝืดอาจเกิดขึ้นได้หลายจุด ดังรูปที่ 2.3



- จุดที่ 1 เป็นการเสดเสดความเร็วเนื่องจากการไหลเข้าท่อ (Entrance loss) ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปทรงและอุปกรณ์ที่ปลายท่อคูด
- จุดที่ 2 เป็นการเสดเสดเนื่องมาจากความฝืดระหว่างของเหลวกับผนังของท่อ
- จุดที่ 3 เป็นการเสดเสดเนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางการไหล
- จุดที่ 4 เป็นการเสดเสดในเส้นท่อดูเหมือนจุดที่ 2
- จุดที่ 5 เป็นการเสดเสดที่อุปกรณ์ทางคานคูดของบ่ม

รูปที่ 2.3 ตำแหน่งที่เกิดการสูญเสียพลังงานหรือเสดในระบบท่อและอุปกรณ์

การเสียเสดทั้งหมดขึ้นอยู่กับอัตราการไหลผ่านระบบท่อ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ดังนั้นในขณะที่เครื่องสูบน้ำกำลังทำงาน ระยะดูดยกรวมที่เกิดขึ้นจริงเท่ากับระยะดูดยก (Static Suction Lift) รวมกับเสดความฝืดทางด้านดูดทั้งหมดตั้งแต่จุดที่ 1 ถึง 5 ในกรณีที่ของเหลวทางด้านดูดอยู่สูงกว่าเครื่องสูบน้ำ เสดด้านดูดรวมที่เกิดขึ้นจริงเท่ากับเสดสถิตยทางด้านดูดลบด้วยเสดความฝืดทั้งหมดทางด้านดูด

สำหรับทางด้านออกก็เช่นเดียวกัน อาจจะรวมการเสียเสดที่จุด 6 ถึง 9 เข้าด้วยกันเป็นเสดความฝืดและเสดรวมด้านออกที่เกิดขึ้นจริงในขณะที่เครื่องสูบน้ำกำลังทำงาน จะเท่ากับเสดสถิตยทางด้านจ่ายรวมกับเสดความฝืดทั้งหมดทางด้านออก

2.2.5 เสดรวมของเครื่องสูบน้ำ (Total Dynamic Head หรือ Total Discharge Head, TDH)

เป็นพลังงานทั้งหมดที่บอกในรูปของเสดที่เครื่องสูบน้ำจะต้องเพิ่มให้แก่ของเหลวนั้น ไหลผ่านระบบท่อยุ่ด้วยอัตราที่กำหนดดังนั้น

$$\text{เสดรวมของเครื่องสูบน้ำ (TDH)} = \text{เสดสถิตยรวม} + \text{เสดความฝืดรวม} \quad (2.7)$$

2.3 การไหลในท่อปิด

ในงานที่มีการใช้เครื่องสูบน้ำขนส่งของเหลวจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งนั้น ท่อเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันมากที่สุด การไหลของของเหลวในท่อเมื่อใช้ร่วมกับเครื่องสูบน้ำ ส่วนมากจะเป็นการไหลเต็มท่อ ลักษณะการไหลในท่ออาจจะจำแนกออกได้โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลเมื่อเทียบกับเวลา สถานที่และแรงเฉื่อย (Forces of Inertia) ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของของเหลวเมื่อเทียบกับแรงหนืด (Forces of Viscosity)

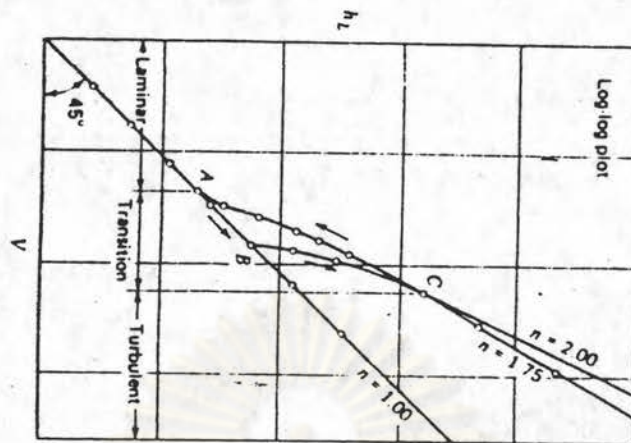
เมื่อความเร็วของการไหลที่จุดใดจุดหนึ่งไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา การไหลนั้นเป็นการไหลแบบคงตัว (Steady Flow) และถ้าเปลี่ยนไปตามเวลาเป็นการไหลแบบไม่คงตัว (Unsteady Flow)

ถ้าความเร็วของการไหลขณะใดขณะหนึ่งไม่เปลี่ยนทั้งขนาดและทิศทางตลอดระยะทางตามเส้นกระแส (Streamline) ของของไหล การไหลนั้นเป็นการไหลแบบสม่ำเสมอ (Uniform Flow) แต่ถ้ามีการเปลี่ยนก็แปลงเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ (Nonuniform Flow)

ในกรณีที่เป็นกรเปรียบเทียบแรงเฉื่อยกับแรงหนืดก็เพื่อจะดูว่ามวลของของไหลนั้นที่อยู่ในท่อมีการไหลวนและกระแทกกระทั้นกันมากน้อยอย่างไร การไหลในลักษณะดังกล่าวเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) แต่หากแรงหนืด มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแรงเฉื่อย การไหลก็จะปั่นป่วน มวลของไหลจะมีการไหลวน การไหลในลักษณะนี้เป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

2.3.1 การไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน

ในการวัดเสดสูญเสีย (Head loss) (3) ของท่อที่มีขนาดสม่ำเสมอในช่วงความยาวที่กำหนดให้ที่ความเร็วต่าง ๆ กันเห็นได้ว่า ทรายโคที่ความเร็วของของไหลยังต่ำเพียงพอที่จะคงการไหลให้เป็นแบบราบเรียบแล้ว เสดสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานก็จะเป็นสัดส่วนกับความเร็วของของไหล ดังรูปที่ 2.4 แต่เมื่อเพิ่มความเร็วจนถึงจุด B ก็เห็นได้ว่าลักษณะการไหลเปลี่ยนจากแบบราบเรียบกลายเป็นแบบปั่นป่วนในช่วงนี้เสดสูญเสียเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ถ้านำค่าลอก (Log) ของเสดสูญเสียกับความเร็วมหาผลคูณบนกระดาษธรรมดา ก็เห็นได้ว่าหลังจากเลยช่วงหัวเลี้ยวหัวตอไปแล้วเส้นกราฟที่ได้มีความความลาดเอียงอยู่ในช่วง 1.75 - 2.0 ซึ่งในช่วงที่ไหลแบบราบเรียบนั้น พลังงานที่ต้องสูญเสียไปกับความเสียดทานแปรตามความเร็ว V ส่วนในช่วงแบบปั่นป่วนจะแปรตาม V^n โดย n มีค่าตั้งแต่ 1.75 - 2.00 ค่า n ของท่อผิวเรียบที่ไหลแบบปั่นป่วนมีค่าเท่ากับ 1.75 แต่เมื่อผิวหนาขึ้นค่า n เพิ่มขึ้นจนมีค่าเท่ากับ 2



รูปที่ 2.4 เส้นสูญเสียของท่อที่มีขนาดสม่ำเสมอที่ความเร็วต่าง ๆ

ค่าต่าง ๆ ที่พลอตในรูปที่ 2.4 นี้ได้มาจากการทดลองของเรโนลด์ (Reynold) ในรูปได้แสดงให้เห็นเส้นกราฟในช่วงหัวเลี้ยวหัวต่อ จะเห็นจากรูปว่าเมื่อค่อย ๆ ลดความเร็วจากสูงมาต่ำแล้วเส้นกราฟจะไม่ลดตามเส้นทาง BC แต่จะลดตามเส้นทาง CA จุด B ในกราฟจะเป็นจุดวิกฤตตัวค้ำมาก และจุด A จะเป็นจุดวิกฤตตัวค้ำน้อย

การที่บอกว่าการไหลในท่อใด ๆ เป็นแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วนนั้นไม่ใช่เพิ่มเติมความเร็วอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับเลขเรโนลด์ (Reynolds Number, N_R) (3) คือ

$$N_R = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \quad (2.8)$$

ในเมื่อ

- ρ = ความหนาแน่นของของไหล
- V = ความเร็วของการไหล
- D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ
- μ = ความหนืดไดนามิกส์ของของเหลว
- ν = ความหนืดไคเนมาติกส์ของของเหลว

โดยที่

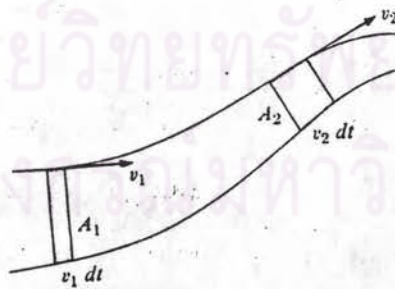
$N_R < 2300$ การไหลเป็นแบบราบเรียบ

$N_R > 2300$ การไหลเป็นแบบปั่นป่วน

2.4 สมการแห่งความต่อเนื่อง (Continuity equation)

พิจารณาพื้นที่ผิวปิดและคงที่ในของไหลซึ่งเคลื่อนที่ โดยทั่วไปแล้วปริมาตรของของไหลที่ไหลผ่านเข้าไปในพื้นที่ผิวดังกล่าว ณ จุด ๆ หนึ่งย่อมไหลออก ณ จุดอีกจุดหนึ่ง จากสมการแห่งการต่อเนื่องเป็นค่ากล่าวทางคณิตศาสตร์ว่า "อัตราการไหลสุทธิของมวลผ่านพื้นที่ภาคตัดขวางในพื้นที่ผิวปิดใด ๆ ย่อมเท่ากับอัตราการเพิ่มของมวลภายในพื้นที่ผิวปิดของมวลนั้น" (4)

ในกรณีของไหลที่ไหลอย่างมีระเบียบ เมื่อไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด A_1 และ A_2 มีความเร็วเป็น V_1 และ V_2 ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.5 ปริมาตรของไหลที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด A_1 ในช่วงเวลา dt คือ $\rho A_1 V_1 dt$ ในทำนองเดียวกันมวลของของไหลที่ผ่านพื้นที่ A_2 ในช่วงเวลาเดียวกันคือ $\rho A_2 V_2 dt$ ดังนั้น



รูปที่ 2.5 พื้นที่แรงเงาแสดงอัตราการไหล Q



$$\rho A_1 V_1 dt = \rho A_2 V_2 dt$$

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (2.9)$$

สมการ 2.9 นี้เรียกว่า สมการแห่งความต่อเนื่อง ผลคูณ AV มีค่าคงตัวตลอดการไหลในท่อที่ต่อเนื่องกัน ปริมาณ AV นี้เป็นอัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยเวลา (Rate of flow) ดังนั้น

$$Q = AV = A_1 V_1 = A_2 V_2 \dots \quad (2.10)$$

2.5 สมการของเบอร์นูลลี (Bernoulli's equation)

เมื่อของไหลไหลผ่านไปตามท่อซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กัน ความเร็วของของไหลจะเปลี่ยนแปลง อาจช้าลงหรือเร็วขึ้น เมื่อเกิดความเร่งทำให้เกิดแรงกระทำ ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$p = \frac{F}{A} \quad (2.11)$$

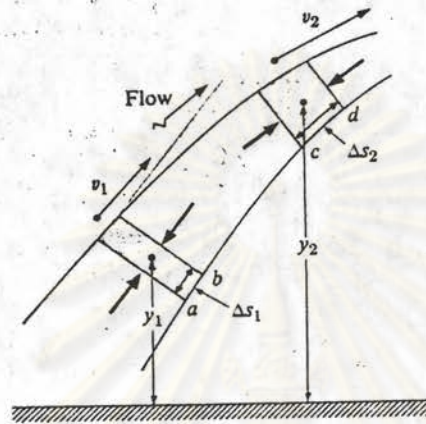
$$P = \text{ความดัน}$$

$$F = \text{แรงที่กระทำ}$$

$$A = \text{พื้นที่หน้าตัดที่ไหลผ่าน}$$

สำหรับจุด 2 จุดที่มีระดับต่างกัน ความดันของของไหลย่อมเปลี่ยนแปลงตลอดแนวการไหลถึงแม้ว่าท่ออยู่ที่ระดับเดียวกัน ความดันของของไหลที่ต่างกันไม่เฉพาะเกิดขึ้นเมื่ออยู่ระดับต่างกันเท่านั้น อาจเกิดจากความเร็วกว่ากันระหว่างจุดทั้งสองด้วย จากรูปที่ 2.6 แทนส่วนหนึ่งของท่อซึ่งมีของไหลไหลผ่าน พิจารณา

เฉพาะส่วนของของไหลในพื้นที่แรงๆ ขณะเคลื่อนที่ไปตามท่อจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง



รูปที่ 2.6 งานสุทธิบนพื้นที่แรงๆมีค่าเท่ากับ การเพิ่มของพลังงานจลน์ และพลังงานศักย์

ให้ y_1 = ส่วนสูงของท่อเหนือแกนอ้างอิง

V_1 = อัตราเร็วของของไหล

A_1 = พื้นที่หน้าตัดของท่อ

P_1 = ความดัน ณ ตำแหน่งที่ 1

ค่าที่กำหนดให้อาจเปลี่ยนแปลงเมื่อของไหลไหลผ่านไปตำแหน่งที่ 2 กำหนดให้เป็น y_2, V_2, A_2 และ p_2 เป็นค่าต่าง ๆ ตามลำดับ ณ ตำแหน่งที่ 2



ของไหลอยู่ภายใต้ความดันคงแสดงด้วยลูกศรดำซึ่งกระทำทั้งสองด้านของเนื้อที่ส่วนที่แรงๆ ขณะที่ของไหลเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง งานที่ได้ออกมาเป็นประโยชน์กระทำที่ผิวทางด้านซ้าย และงานด้านการเคลื่อนที่กระทำที่ผิวด้านขวา งานสุทธิเป็นผลต่างของงานนี้มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงงานจลน์และการเปลี่ยนแปลงงานศักย์

ถ้า A แทนพื้นที่ผิวที่จุดใด ๆ และ p แทนความดันที่จุดนั้น ๆ ฉะนั้นแรงดันที่จุดนั้น $F = pA$ งานจาก a ไป c ก็คือ

$$\int_a^c F ds = \int_a^c p A ds \quad (2.12)$$

เมื่อ ds เป็นระยะทางสั้น ๆ ที่วัดตามท่อ ลิมิตของการอินทิเกรตจาก a ไป c เป็นผิวส่วนทางซ้ายเคลื่อนที่จากตำแหน่ง 1 ไปยังตำแหน่ง 2 ดังนั้น

$$\int_a^c p A ds = \int_a^b p A ds + \int_b^c p A ds \quad (2.13)$$

ในทำนองเดียวกัน งานของผิวด้านขวาของพื้นที่ที่แรงๆ คือ

$$\int_a^d p A ds = \int_b^c p A ds + \int_c^d p A ds \quad (2.14)$$

$$\text{งานสุทธิ} = \int_a^b p A ds + \int_b^c p A ds - \int_b^c p A ds - \int_c^d p A ds$$

$$= \int_a^b p A ds - \int_c^d p A ds \quad (2.15)$$

ระยะทางจาก a ถึง b และจาก c ถึง d เป็นระยะทางสั้น ๆ ซึ่งเป็นความดันและพื้นที่มีค่าคงตัว ดังนั้นเขียนได้เป็น

$$\int_a^b pAd_s = pA(b-a) = p_1 A_1 \Delta s_1 \quad (2.16)$$

$$\int_c^d pAd_s = pA(d-c) = p_2 A_2 \Delta s_2 \quad (2.17)$$

$$A_1 \Delta s_1 = A_2 \Delta s_2 = V$$

$$\text{งานสุทธิ} = (p_1 - p_2)V \quad (2.18)$$

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (2.19)$$

สมการที่ (2.19) แทนลงไปในสมการที่ (2.18) จะกลายเป็น

$$\text{งานสุทธิ} = (p_1 - p_2) \frac{m}{\rho} \quad (2.20)$$

จากสมการ งาน - พลังงานที่กล่าวว่า "งานสุทธิคือผลบวกของการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ของของไหล" ดังนั้น (4)

$$(p_1 - p_2) \frac{m}{\rho} = \left(\frac{1}{2} mV_2^2 - \frac{1}{2} mV_1^2 \right) + (mgy_2 - mgy_1) \quad (2.21)$$

เมื่อตัด m ทั้งคูณด้วย ρ จะได้

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (V_2^2 - V_1^2) + \rho g (y_2 - y_1) \quad (2.22)$$

ค่า $\rho g(y_2 - y_1)$ เป็นผลต่างของความดันเนื่องมาจากน้ำหนักของของไหล ณ ตำแหน่ง 1 และตำแหน่ง 2 และค่า $\frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2)$ เป็นอีกส่วนหนึ่งของความดันที่ต่างกันเนื่องจากการเปลี่ยนความเร็ว ดังนั้นเขียนใหม่ได้เป็น

$$p_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (2.23)$$



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เลข 1 และเลข 2 ที่ห้อยไว้แทนตำแหน่งของของไหลในท่อ นั่นคือ

$$p + \rho gy + \frac{1}{2} \rho V^2 = \text{ค่าคงที่} \quad (2.24)$$

สมการนี้เป็นสมการเบอร์นูลลี ซึ่งได้กล่าวไว้ว่า(2) "พลังงาน ณ จุดใด ๆ ของของไหลตลอดแนวของการไหลเทียบกับระดับสมมติใด ๆ ระดับหนึ่งย่อมมีค่าคงที่เสมอ"

2.6 รัศมีไฮดรอลิก (Hydraulic Radius, R_H)

รัศมีไฮดรอลิกหาได้จากความสัมพันธ์

$$R_H = \frac{A}{p} \quad (2.25)$$

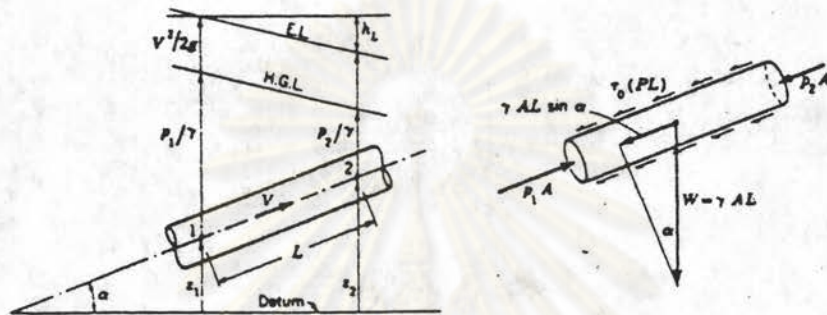
A = พื้นที่หน้าตัดภายในท่อ

p = เส้นขอบเปียก

เส้นขอบเปียกเป็นเส้นขอบนอกของพื้นที่หน้าตัดของของเหลวส่วนที่สัมผัสกับผิวท่อ ในกรณีที่ท่อกลมมีน้ำไหลเต็มท่อ ดังนั้นค่า $R_H = \frac{\pi r^2}{2\pi r} = \frac{r}{2} = \frac{D}{4}$ ซึ่ง R_H ไม่ใช่รัศมีของท่อ

2.7 สมการสำหรับหาพลังงานที่ต้องสูญเสียไปกับความเสียดทาน (General Equation for Friction)

พิจารณาการไหลแบบคงตัว (Steady Flow) (3) ของของไหลในท่อซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงถึงการไหลแบบคงตัวในท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ

- กำหนดให้
- p_1 = ความดันที่หน้าตัด 1
 - p_2 = ความดันที่หน้าตัด 2
 - L = ความยาวของท่อ
 - V = ความเร็วของของไหลในท่อ
 - ρ = ความหนาแน่นที่ผิวในของท่อ
 - A = พื้นที่หน้าตัดที่มีขนาดสม่ำเสมอของท่อ
 - p = เส้นขอบนอกของพื้นที่หน้าตัด

ในสภาวะสมดุล แรงลัพธ์ที่กระทำกับก้อนของไหลที่ไหลแบบคงตัวจะต้อง
เท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$p_1 A - p_2 A - \gamma A L \sin \alpha - \tau_o (pL) = 0 \quad (2.26)$$

เนื่องจากค่า $\sin \alpha = (z_2 - z_1)/L$

$$\text{ดังนั้น } p_1 A - p_2 A - \gamma A L \frac{(z_2 - z_1)}{L} = \tau_o pL \quad (2.27)$$

หารตลอดด้วย γA แล้วจัดสมการใหม่เขียนเป็น

$$\frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} - z_2 + z_1 = \tau_o \cdot \frac{p \cdot L}{\gamma \cdot A} \quad (2.28)$$

จากรูปด้านซ้ายมือของรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่า

$$\begin{aligned} h_L &= \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \right) \\ &= \frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} - z_2 + z_1 \end{aligned} \quad (2.29)$$

จะเห็นว่าสมการ (2.28) = (2.29) ดังนั้น

$$h_L = \tau_o \frac{pL}{A} = \tau_o \frac{L}{R_h V} \quad (2.30)$$

ในกรณีของท่อผิวเรียบ ดังนั้นสามารถตัดค่าความขรุขระของท่อทิ้งได้ นั่นคือ
ความเค้นเฉือนที่ผิวด้านในของท่อเป็นเพียงฟังก์ชันของ ρ, μ, V

$$\tau_o = K R_h^a \rho^b \mu^c V^n \quad (2.31)$$

K เป็นค่าคงที่ เมื่อแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ของสมการที่ 2.30 ด้วยมิติ
พื้นฐาน (Fundamental dimension) ก็จะได้

$$FL^{-2} = KL^a (FL^{-4} T^{-2})^b (FL^{-2} T)^c (LT^{-1})^n \quad (2.32)$$

เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของมิติพื้นฐานแต่ละตัวจะเป็น

$$\text{ของ } F, \quad 1 = b + c \quad (2.33.1)$$

$$\text{ของ } L, \quad -2 = a - 4b - 2c + n \quad (2.33.2)$$

$$\text{ของ } T, \quad 0 = 2b + c - n \quad (2.33.3)$$

เพราะฉะนั้น

$$a = n-2, \quad b = n-1, \quad c = 2-n$$

แทนค่า a, b และ c ในสมการที่ (2.30) ก็จะได้

$$\tau_o = KR_h^{n-2} \rho^{n-1} \mu^{2-n} V^n \quad (2.34)$$

จัดรูปใหม่จะเป็น

$$\begin{aligned} \tau_o &= K \left(\frac{\rho V R_h}{\mu} \right)^{n-2} \rho \cdot V^2 \\ &= 2K(N_R)^{n-2} \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2} \end{aligned} \quad (2.35)$$

จะเห็นว่า $\frac{\rho V R_h}{\mu}$ คือเลขเรโนลด์ จัดคาคงที่ที่อยู่ตามขวามือของสมการที่ (2.34) ใหม่ให้เป็นกลุ่มเดียวกัน และใช้สัญลักษณ์เป็น c_f นั่นคือ

$$c_f = 2KN_R^{n-2} \quad (2.36)$$

$$\tau_o = c_f \rho \frac{V^2}{2} \quad (2.37)$$

$$h_L = c_f \frac{L}{R_h} \frac{V^2}{2g} \quad (2.38)$$

2.8 พลังงานที่สูญเสียไปกับความเสียดทานในท่อกลม (pipe of Circular Cross Section)

ในกรณีของท่อกลมที่มีของไหลไหลเต็มท่อ ค่า $R_h = \frac{D}{4}$ ดังนั้นเมื่อแทน R_h ลงในสมการที่ (2.38) ก็จะได้

$$h_L = 4c_f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.39)$$

เมื่อ $f = 4c_f = 8K \frac{V^{n-2}}{R} \quad (2.40)$

สมการที่ (2.39) จะเป็นสมการสำหรับหาความเสียดทานของท่อ (pipe friction equation) หรือสมการของคาร์ซีไวท์แบค (Dracy-Weisbach equation) (3) โดยที่ค่า f นี้แปรผันตาม R และความหยาบของผิวท่อ

เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างความยาวท่อกับเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อเป็นตัวเพิ่มอัตราส่วนของมิติเชิงเส้นสองค่าและเป็นตัวเลขลอย ๆ ดังนั้นจึงสามารถบอกค่าเสียดทานที่เนื่องจากความเสียดทานในเทอมของเสียดความเร็วได้ถ้าสมการที่ (2.30)

โดยมี $R_h = \frac{D}{4}$ ก็จะได้

$$h_L = \tau_o \frac{L}{\frac{D}{4} \gamma} = \tau_o \frac{2L}{r \gamma} \quad (2.41)$$

ในเมื่อ $r_o =$ รัศมีของท่อ

ในทำนองเดียวกันก่อนของไหลตรงกระบอกใด ๆ ที่มีแกนร่วมกับท่อแต่มีรัศมีเล็กกว่าท่อจะมีเสียดทานเป็น

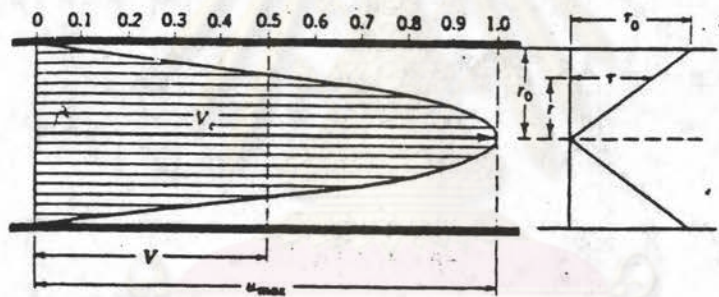
$$h_L = \frac{2L}{r \gamma} \quad (2.42)$$

เนื่องจากเสถียรในในช่วงความยาว L เดียวกัน ดังนั้น

$$\tau \cdot \frac{2L}{r\gamma} = \tau_0 \cdot \frac{2L}{\gamma\gamma_0}$$

$$\tau = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \gamma \quad (2.43)$$

จะเห็นได้จากสมการ (2.41) ความเค้นเฉือนที่กลางท่อจะมีค่าเป็นศูนย์ และจะเพิ่มมากขึ้นตามรัศมี r จนกระทั่งมากที่สุดเป็น τ_0 ที่ผิวท่อ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงการกระจายความเร็วและความเค้นเฉือนของการไหลแบบราบเรียบ

เมื่อแทนค่าจากสมการ (2.40) ลงในสมการ (2.37) จะเป็น



$$\tau_o = \frac{f}{4} \rho \frac{V^2}{2} = \frac{f}{4} \frac{V^2}{2g} \quad (2.44)$$

2.9 การไหลแบบราบเรียบภายในท่อกลม (Laminar Flow in Circular pipes)

จากสัมประสิทธิ์ของความหนืดในกรณีของการไหลแบบราบเรียบโดยมีความเร็วของการไหลอยู่ในตำแหน่งที่ห่างจากผิวในท่อเป็นระยะเท่ากับ y เนื่องจาก

$$y = r_o - r \quad \text{ดังนั้น}$$

$$\tau = -\mu \frac{du}{dy} \quad (2.45)$$

เครื่องหมายลบแสดงว่าความเร็ว u ลดลงเมื่อรัศมี r เพิ่มขึ้น เนื่องจากสัมประสิทธิ์ความหนืด μ ของของไหลที่แต่ละอนุกรมมีค่าคงที่ ดังนั้นความเค้นเฉือนจะมีค่าแปรจากศูนย์ที่กลางท่อจนมีค่ามากที่สุดที่ผิวในของท่อ เขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$h_L = \frac{\tau_{2L}}{r\gamma}$$

$$h_L = -\mu \frac{du}{dr} \frac{2L}{r\gamma}$$

$$du = -\frac{h_L \gamma}{2\mu L} r dr$$

$$u = -\frac{h_L \gamma}{2L} \frac{r^2}{2} + c \quad (2.46)$$

ที่ $r = 0$ นั้นค่า $u = u_{\text{สูงสุด}}$ จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$c = u_{\text{สูงสุด}}$$

$$u = u_{\text{สูงสุด}}$$

ในสมการที่ (2.47) นี้แสดงว่าเส้นลักษณะการเปลี่ยนความเร็วของการไหล มีลักษณะเป็นรูปพาราโบลา ดังรูปที่ 2.8

กรณีที่ความเร็วของของไหลที่ติดกับผิวในของทอมีค่าเป็นศูนย์ แสดงให้เห็นถึง $u = 0$ เมื่อ $r = r_0$ ฉะนั้นความเร็วของการไหลที่กลางทอจากสมการ (2.47) ก็จะเป็น

$$V_c = u_{\text{สูงสุด}} = \frac{h_L r}{4\mu L} \cdot r_0^2 = \frac{h_1 \gamma}{16\mu L} \cdot D^2 \quad (2.48)$$

เมื่อนำเอาพื้นที่เล็ก ๆ รูปวงแหวน $dA = 2\pi r \cdot dr$ มาคูณกับความเร็วในสมการที่ (2.47) ก็ได้อัตราการไหลที่ไหลผ่านพื้นที่เล็ก ๆ รูปวงแหวนนั้นเป็น

$$dQ = u \cdot dA = \left[u_{\text{สูงสุด}} - \frac{h_L \gamma}{4\mu L} r^2 \right] 2\pi r \cdot dr$$

$$Q = \int_0^{r_0} \left[u_{\text{สูงสุด}} - \frac{h_L \gamma}{4\mu L} r^2 \right] 2\pi r \cdot dr$$

$$= u_{\text{สูงสุด}} \cdot \pi r_0^2 - \frac{h_L \gamma \pi r_0^4}{8\mu L} \quad (2.49)$$

อัตราการไหลโดยปริมาตร Q นี้เป็นส่วนโดยตรงกับปริมาตรตันที่ถูกห้อมล้อม โดยเส้นแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ปริมาตรตันในที่นี้ก็คือก้อนของไหลต้นรูปพาราโบลอยด์ ที่มีส่วนสูงมากที่สุดเป็นส่วนกับ $u_{\text{สูงสุด}}$ และมีส่วนสูงเฉลี่ยเท่ากับครึ่งหนึ่งของส่วนสูงมากที่สุด

ฉะนั้นความเร็วเฉลี่ย $V = 0.5 u$ ดังนั้น

$$V = \frac{h_L \gamma}{32 \mu L} D^2 \quad (2.50)$$

เมื่อแทนค่า $r = \rho g$ และ $\mu = \rho \nu$ ลงในสมการ (2.49) แล้วคูณไขว้ก็จะได้ เฮดสูญเสีย ที่เนื่องจากความเสียดทานเป็น

$$h_L = 32 \frac{\mu}{\gamma} \frac{L}{D^2} V = 32 \cdot \frac{L}{g D^2} \cdot V \quad (2.51)$$

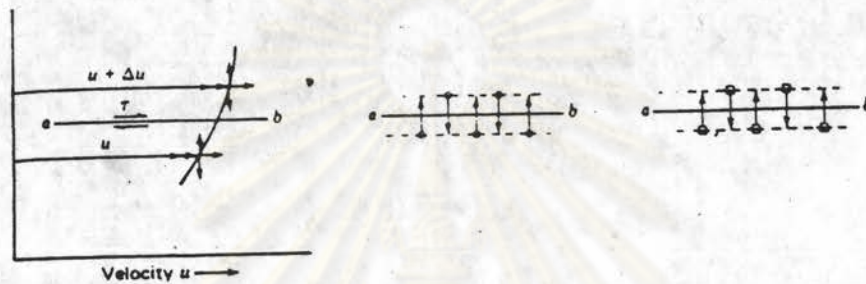
จากสมการที่ (2.51) นี้คือ สมการของฮาเกน ปอยซ์ัว (Hagen-Poiseuille law) (14) ที่ใช้สำหรับการไหลในท่อที่ไหลแบบราบเรียบ ในกรณีนี้ค่าเฮดสูญเสียจะเป็นสัดส่วนกับความเร็วกำลังหนึ่ง หรือ $n = 1$ และจากสมการนี้ความเสียดทานไม่ได้ขึ้นอยู่กับความหนืดของผิวภายในท่อเลย เมื่อนำสมการที่ (2.39) และ (2.51) โดยวิธีการวิเคราะห์หาค่าที่เท่ากันจะได้ค่าคงที่

$$f = 64 \frac{\nu}{VD} = \frac{64}{N_R} \quad (2.52)$$

2.10 การไหลแบบปั่นป่วนในท่อกกลม (Turbulent Flow in Circular Pipes)

ในการไหลแบบปั่นป่วนทิศทางการเคลื่อนที่จะไม่มีรูปแบบที่แน่นอนโดยพิจารณาการไหลแบบราบเรียบจากรูปที่ 2.9 (a) และ (b) โดยที่ความเร็ว u ของของไหลในกรณีแบบราบเรียบนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะ y ถึงแม้ว่าอนุภาคของของไหลจะเคลื่อนที่ตามแนวอนก็ตาม แต่เนื่องจากการเคลื่อนที่วู่วามของโมเลกุล จึงทำให้เคลื่อนที่ข้ามเส้น ab และพาโมเมนตัมข้ามเส้น ab ไปด้วย จากการที่ความเร็วเฉลี่ยของโมเลกุลในชั้นของไหลที่เคลื่อนที่ช้าซึ่งอยู่ใต้เส้น ab ต่ำกว่าความเร็วเฉลี่ยของโมเลกุลในชั้นของไหลที่เคลื่อนที่เร็วซึ่งเหนือเส้น ab จึงทำให้โมเลกุลของของไหลที่ข้ามมาจากใต้เส้น ab

พยายามหน่วงให้ของไหลที่เคลื่อนที่เร็วกว่าให้เคลื่อนที่ช้าลง ทำนองเดียวกันโมเลกุลของของไหลที่ช้ามาจาทิศด้านเหนือของเส้น ab ก็พยายามทำให้ของไหลที่เคลื่อนที่ช้ากว่าให้เคลื่อนที่เร็วขึ้น ทำให้เกิดความเค้นเฉือนบนผิวในแนว ab



(a) เส้นแสดงการกระจายความเร็ว (b) ไหลแบบราบเรียบ (c) ไหลแบบปั่นป่วน

รูปที่ 2.9 แสดงถึงการไหลของของไหล

2.10.1 สมการแรกที่เกี่ยวข้องกับการไหลแบบปั่นป่วน (First Expression)

จากรูป 2.9 c ความเค้นเฉือนในระนาบที่ผ่านเส้น ab ดังนั้น

$$\text{ความเค้นเฉือนปั่นป่วน} = \tau \frac{du}{dy} \quad (2.53)$$

โดยที่ τ = สัมประสิทธิ์ของความหนืดวน (Eddy-Viscosity Coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์ของความหนืดที่แต่ละอนุภาคมีค่าไม่คงที่ แต่ขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของการไหล ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของความหนืดอาจเป็นสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทโมเมนตัมได้ ซึ่งเป็นตัวการแสดงถึงการถ่ายเทโมเมนตัมจากจุดที่มีความเร็วต่ำไปยังจุดที่มีความเร็วสูง หรือจากจุดที่มีความเร็วสูงไปสู่จุดที่มีความเร็วต่ำ ค่าของสัมประสิทธิ์ของความหนืดอยู่ในช่วงศูนย์ถึงพันเท่า

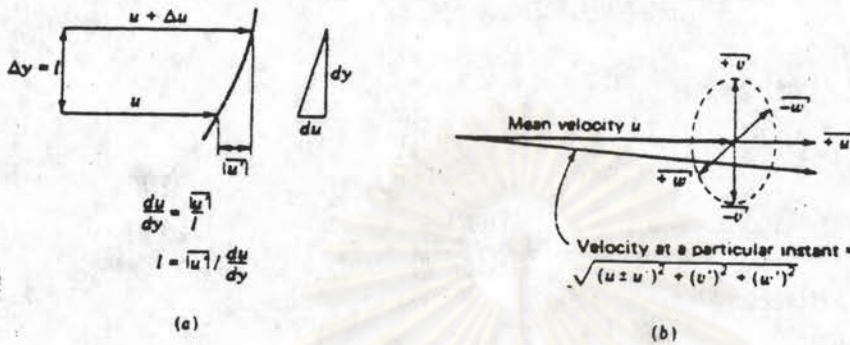
โดยปกติแล้วความเค้นเฉือนรวมเป็นผลรวมของความเค้นเฉือนที่เกิดจากการไหลแบบราบเรียบกับความเค้นเฉือนที่เกิดจากการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้น

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} + \tau' \frac{du}{dy} \quad (2.54)$$

2.10.2 สมการที่สองเกี่ยวกับการไหลแบบปั่นป่วน (Second Expressions)

จากรูป 2.9 a ถ้าหากมวลของของไหลที่อยู่ใต้เส้น ab ที่มีความเร็วเฉลี่ยเป็น u เคลื่อนที่ขึ้นไปในบริเวณที่มีความเร็วเฉลี่ยเป็น $u + \Delta u$ ทำให้ของไหลก่อนนั้นมีโมเมนตัมตามแนวแกนเพิ่มขึ้นเป็นจำนวน m , Δu ทำนองเดียวกันมวลของของไหลที่เคลื่อนที่มาจากด้านบนลงมามีค่าตามแนวแกนลดลงด้วยการถ่ายโมเมนตัมกลับไปที่กลับมา นี่ทำให้เกิดความเค้นเฉือนขึ้นในระนาบที่ทอดผ่านเส้น ab และมีขนาดเป็นสัดส่วนกับ Δu ความเค้นเฉือนดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อระนาบดังกล่าวนั้นมีค่า Δu อยู่ในเส้นแสดงกับ Δu ความเค้นเฉือนดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อระนาบดังกล่าวนั้นมีค่า Δu อยู่ในเส้นแสดงลักษณะการกระจายความเร็วเท่ากัน ถ้าหากเส้นกระจายความเร็วตั้งฉากกับระนาบใดค่า Δu ในระนาบนั้นมีค่าเป็นศูนย์ ก็จะไม่มีความเค้นเฉือนเกิดขึ้นในระนาบนั้น

ในรูปที่ 2.10 ข ทุก ๆ จุดในของไหลที่ไหลแบบปั่นป่วนนั้นมีการขึ้นลงของความเร็วเป็น $+u'$ และ $-u'$ ในแนวแกนมีความเร็วขึ้นลงในแนวที่ตั้งฉากกับผนังทอดด้วย :



รูป 2.10 ก) แสดงการหาความยาวปราน
 ข) ความเร็วขณะใดขณะหนึ่งของการไหลแบบปั่นป่วน

จากรูป 2.10 ก. พิจารณาพื้นที่เล็ก ๆ dA ในระนาบ ab และตั้งฉากกับความเร็ว V' เนื่องจากมีความเร็วชั้นลง ทำให้ของไหลก่อนเล็ก ๆ ที่มีความหนาแน่น ρ ถูกพาผ่านพื้นที่ dA

ในอัตรา $\rho |\bar{V}'| dA$ โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วไปด้วย ดังนั้นโมเมนตัมของของไหลในแนวแกนก็จะเปลี่ยนแปลงไป ในกรณีนี้ V' เป็นความเร็วเฉลี่ยของ $+V'$ ทุกค่าความเร็วเฉลี่ยชั่วขณะของ V' เป็นศูนย์ แต่ความเร็วเฉลี่ยของ $+V'$ มีค่าเป็น

$$\begin{aligned}
 +\bar{V}' &= -(-\bar{V}') \cdot |\bar{V}'| \\
 &= \frac{\int V' dt}{\int dt} \tag{2.55}
 \end{aligned}$$

ในกรณีที่มวลเคลื่อนที่จากใต้เส้น ab ขึ้นสู่ด้านบนของความเร็ว $+v' = |v'|$ มวลดังกล่าวจะพาเอาโมเมนตัมซึ่งมีค่าเฉลี่ยเป็น $\rho |v'| dA(u)$ ขึ้นไปสู่ด้านบนที่มีความเร็วเป็น $u + |u'|$ ด้วย มวลที่เคลื่อนที่เข้าจากทางด้านใต้เส้น ab จะพยายามหน่วงของไหลที่อยู่เหนือเส้น ab ให้เคลื่อนที่ช้าลง ทำให้เกิดแรงเฉือนขึ้นในระนาบ ab ใช้หลักการโมเมนตัม ดังนี้

$$\begin{aligned}
 F &= \rho Q \Delta v \\
 dA &= \rho |v'| dA(u + \Delta u - u') \\
 &= \rho |v'| dA \cdot u \\
 &= -\rho dA \overline{u'v'} \quad (2.56)
 \end{aligned}$$

เมื่อ $\overline{u'v'}$ เป็นผลคูณเฉลี่ยของความเร็วขณะนั้น ดังนั้นความเค้นเฉือนที่เนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วนก็จะเป็น

$$= -\rho \overline{u'v'} \quad (2.57)$$

จากรูปที่ (2.10 ก) ความยาวของปราน (Prandtl Mixing Length, l) เป็นระยะทางเฉลี่ยตามแนวขวางที่อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่จากของไหลชั้นหนึ่งไปยังของไหลที่อยู่ชั้นถัดไปก่อนที่จะมีความเร็วตามของไหลในชั้นใหม่จนกระทั่ง $\Delta u = |u'|$ ดังนี้

$$\Delta u = l \frac{du}{dy}$$

$$|u'| = l \frac{du}{dy}$$

ถ้า $|u'| = |v'|$ แล้ว $\overline{u'v'}$ ก็จะแปรตาม $l^2 \left(\frac{du}{dy}\right)^2$

$$\text{แสดงว่า} \quad \tau = -\rho u^2 v^2 = 1^2 \left(\frac{du}{dy}\right)^2 \quad (2.58)$$

2.11 ความขรุขระของท่อ

จากสมการที่ 2.52 สัมประสิทธิ์ของความฝืด (f) ขึ้นอยู่กับเลขเรโนลด์ไม่ขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างความขรุขระของผนังท่อต่อความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (ϵ/D)

จากการทดลองในน้ำไหลผ่านท่อถึงแม้ว่าการไหลจะเป็นแบบปั่นป่วนก็ตามแต่จะมีชั้นบาง ๆ ติดกับผนังท่อที่การไหลแบบราบเรียบ ความหนาของชั้นจะลดลงเมื่อเลขเรโนลด์เพิ่มขึ้น ถ้าหากความสูงของความขรุขระที่ยื่นออกมาจากผนังท่อน้อยกว่าชั้นความหนาที่การไหลเป็นแบบราบเรียบอัตราส่วน ϵ/D จะไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืดและถือว่าเป็นท่อเรียบ

ในทางตรงกันข้าม ถ้าความสูงของความขรุขระที่ผนังท่อบริเวณที่การไหลเป็นแบบราบเรียบส่วนที่สูงกว่าก็จะก่อให้เกิดการปั่นป่วนในการไหลมากขึ้น และมีผลให้สัมประสิทธิ์ของความฝืดเพิ่มขึ้นโดยตรง และถ้าผนังท่อขรุขระมากค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืดก็จะขึ้นกับอัตราส่วน ϵ/D เพียงอย่างเดียว ไม่ขึ้นกับเลขเรโนลด์

ค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืดของทั้งสองกรณีหาได้จากความสัมพันธ์

ก) เมื่อผนังท่อเรียบ ดังนั้น

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.5 \log \left(\frac{N_R \sqrt{f}}{2.51} \right) \quad (2.59)$$

ข) เมื่อผนังท่อขรุขระจนทำให้การไหลเป็นแบบปั่นป่วนอย่างแท้จริง

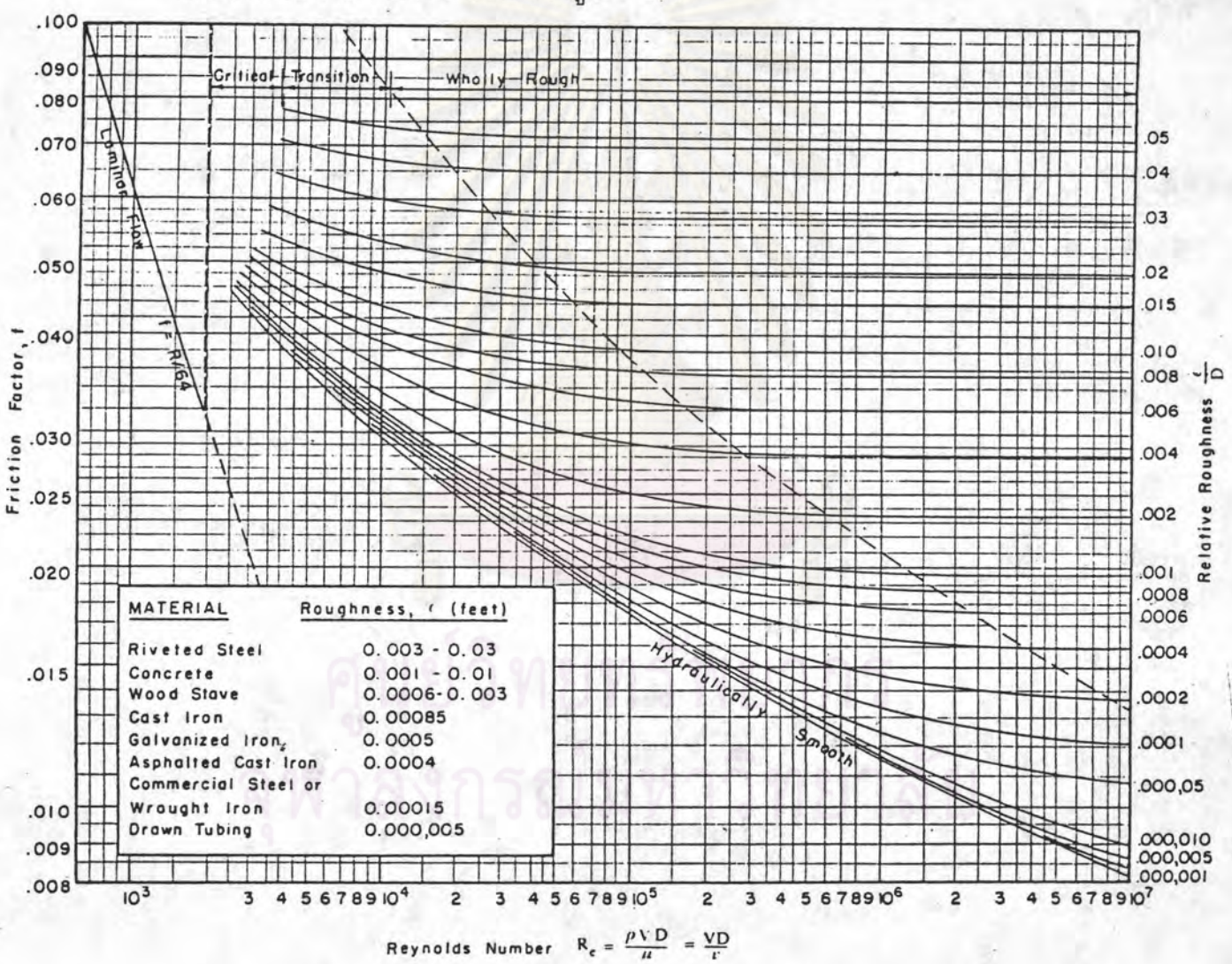
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.5 \log \left(3.7 \frac{D}{\epsilon} \right) \quad (2.60)$$

ค) ในกรณีที่การไหลเป็นแบบปั่นป่วนแต่ความขรุขระของผนังท่ออยู่ระหว่างข้อ ก. และ ข. ค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืดจะขึ้นอยู่กับเลขเรโนลด์และอัตราส่วน ϵ/D ดังนี้



$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{N_R \sqrt{f}} \right) \quad (2.61)$$

ในกรณีที่การไหลเป็นแบบปั่นป่วน จะต้องมีสมการสำหรับคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืดคือ ในกรณีที่ผนังท่อเรียบ ผนังท่อขรุขระมากและผนังของท่ออยู่ระหว่างสองกรณีข้างต้น ดังนั้น คำนวณได้จากตารางของมูดี (Moody Diagram) (1) ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืดดังในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืด

ตารางที่ 2.3 ความขรุขระเฉลี่ยของผนังท่อใหม่

ชนิดของท่อ	ϵ เป็นฟุต	ϵ เป็น ม.ม.
ท่อแก้ว ท่อรัดจากทองเหลือง ทองแดง และตะกั่ว	เรียบ	เรียบ
ท่อเหล็กเหนียว	1.5×10^{-4}	0.045
ท่อเหล็กหล่อ อายวามะตอย	4.0×10^{-4}	0.120
ท่อเหล็กชุบสังกะสี	5.0×10^{-4}	0.150
ท่อเหล็กหล่อธรรมดา	8.5×10^{-4}	0.026
ท่อไม้	2.0×10^{-3}	0.610
ท่อคอนกรีต	4.0×10^{-3}	1.220
ท่อเหล็กม้วนต่อด้วยหมุดย้ำ	6.0×10^{-3}	1.830
ท่อโลหะลูกฟูก	0.10-0.20	3.0-6.0
อุโมงค์ขนาดใหญ่คาดด้วยคอนกรีตหรือเหล็ก	0.002-0.004	0.60-1.20
อุโมงค์ที่เจาะด้วยการระเบิดหิน	1.0-2.0	3.00-6.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.12 การสูญเสียรอง (Minor-Losses)

พลังงานที่สูญเสียกับความเสียดทานภายในท่อนั้นเป็นการสูญเสียหลัก (Major-Loss) สำหรับการสูญเสียที่เกิดจากการที่มีสิ่งรบกวนการไหลในท่อเฉพาะแห่ง เช่นท่อเปลี่ยนขนาดพื้นที่หน้าตัด การที่ประเก็นยื่นเข้าไปกีดขวางการไหล การไหลผ่านข้องอ การไหลผ่านวาล์ว หรือไหลผ่านชิ้นส่วนอื่น ๆ จะเป็นการสูญเสียรอง

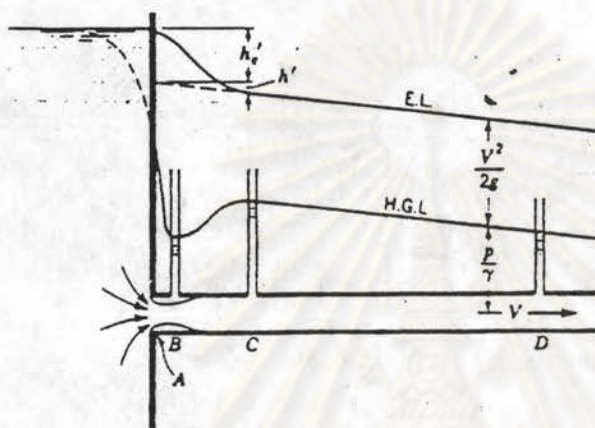
ในกรณีที่ท่อหรือช่องทางที่มีขนาดยาวมาก การสูญเสียรองมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับการสูญเสียหลักที่เกิดจากความเสียดทาน แต่ท่อหรือช่องทางมีขนาดสั้น การสูญเสียรองนั้นอาจมีค่ามากกว่าการสูญเสียหลัก ดังนั้นเหตุสูญเสียที่ปากทางเข้าของท่อดูดของเครื่องสูบน้ำที่มีตะแกรงสำหรับกรองวัตถุใด ๆ และวาล์วกันน้ำไหลกลับ อาจมีค่ามากกว่าพลังงานที่สูญเสียไปกับความเสียดทานของท่อดูด

เมื่อไรก็ตามที่น้ำมีการเปลี่ยนขนาดของความเร็วหรือทิศทางก็จะมีกระแสไหลวนเกิดขึ้น และพลังงานที่สูญเสียไปในชวงนั้นก็มีค่ามากกว่าพลังงานที่ต้องสูญเสียไปกับความเสียดทานภายในท่อดีวกัน ขนาดของการสูญเสียเฉพาะแห่งนี้เป็นสัดส่วนกับความเร็วที่ต้องเปลี่ยนไปอย่างทันทีทันใด ดังนั้นองค์ประกอบที่มากกระทบจึงมักอยู่ในเส้นทางที่มีขนาดสั้นมาก แต่ผลกระทบเหล่านี้จะไม่สิ้นสุดลงเพียงแค่วะทางสั้น ๆ ทางด้านใต้น้ำที่พิจารณาถึงก็ได้ ดังนั้นข้อต่อที่อยู่กับท่อซึ่งมีขนาดเพียงสั้น ๆ ก็จะมีผลกระทบลงไปยังรบกวนการไหลทางด้านใต้น้ำเป็นระยะทางที่ยาวออกไป

2.12.1 การสูญเสียที่ปากทางเข้า (Loss of head at entrance)

จะเห็นได้จากรูปที่ 2.12 ในขณะที่ของไหลไหลจากที่เก็บเข้าสู่ท่อนั้น เส้นกระแสจะพยายามบีบตัวเข้าหากัน จนกระทั่งมีความเร็วสูงสุด และมีความดันต่ำสุดที่จุด B สภาพดังกล่าวนี้คล้ายคลึงกับลำเจ็ตที่ฉีดออกจากกรูของช่องแคบ (Orifice) เป็นอย่างมาก ลำน้ำตรงกลางท่อดูดที่หน้าตัด B นี้ล้อมรอบด้วยของไหลที่มีความปั่นป่วนและเคลื่อนที่ไปทางด้านหน้าใต้เล็กน้อยในช่วง B และ C นั้น ของไหลจะถูกรบกวนอย่างหนักเฉพาะ

ขนาดของลำน้ำขยายโตขึ้นและความเร็วลดน้อยลง ขณะเดียวกันกับความดันเพิ่มมากขึ้น ในช่วง C ถึง D สภาพการไหลจะเป็นไปโดยปกติ



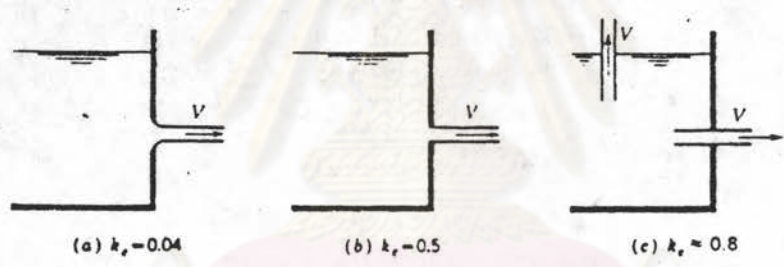
รูปที่ 2.12 สภาพที่ปากทางเข้า

จะเห็นว่าพลังงานที่สูญเสียไปที่ปากทางเข้าแผ่กระจายจาก A ไปยัง C ซึ่งยาวเป็นหลาย ๆ เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ ความปั่นป่วนที่เพิ่มมากขึ้นและการไหลแบบหมุนตัวในช่วงดังกล่าวทำให้พลังงานที่ต้องสูญเสียไปกับความเสียดทานนั้นมากกว่าการสูญเสียเมื่อของไหลนั้นมีสภาพการไหลที่ปกติ ซึ่งเห็นได้จากระดับที่ลดต่ำลงของเส้นพลังงานระยะ h' ที่รวมอยู่ในพลังงานที่สูญเสียรวมนี้เป็นพลังงานที่ต้องสูญเสียปกติที่เนื่องมาจากความเสียดทาน ดังนั้นความแตกต่างระหว่างพลังงานที่สูญเสียรวมกับ h' ก็ต้องเป็นพลังงานสูญเสียพิเศษที่เกิดขึ้นตรงปากทางเข้าของท่อ ซึ่งเป็นค่า h_f โดยที่พลังงานที่ต้องสูญเสียไปตรงปากทางเข้าของท่อนั้นมีค่าเป็น

$$h_1' = K_1 \frac{V^2}{2g} \tag{2.62}$$

ในเมื่อ V = ความเร็วเฉลี่ยของของไหลในท่อ

K_1 = สัมประสิทธิ์ของการสูญเสียพลังงานที่ปากทางเข้า



(a) $K_1 = 0.04$ (b) $K_1 = 0.5$ (c) $K_1 \approx 0.8$

รูปที่ 2.13 ค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียพลังงานที่ปากทางเข้า

การสูญเสียที่เกิดขึ้นนั้นสาเหตุแรกเนื่องมาจากความปั่นป่วนที่เกิดจากการขยายพื้นที่หน้าตัดของลำน้ำหลังจากไหลผ่านหน้าตัด B การขยายตัวที่ขึ้นน้อยอยู่กับลำน้ำที่ไหลเข้าสู่ท่อนั้นตีตัวลงมากน้อยเท่าไร ดังนั้นสภาพปากทางเข้าจึงมีผลกระทบต่อการสูญเสียนี้เป็นอย่างมาก ค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียพลังงานที่ปากทางเข้าหาได้จากการทดลอง

ถ้าปากทางเข้าของท่อได้รับการลบลมให้เป็นส่วนของวงกลมที่เป็นปากกระฉิ่ง (รูป 2.13) แล้วน้ำก็จะสามารถไหลเข้าท่อได้โดยไม่มี การบีบตัวให้ตีบเล็กลง ปากทางเข้าแบบนี้มีค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียพลังงานค่อนข้างต่ำ สำหรับแบบที่ไม่ได้ลบลมและมีปลายเสมอกับผิวในที่เป็นทางเข้าฟลัช (Flush Entrance) ดังรูป 2.13 b นั้น

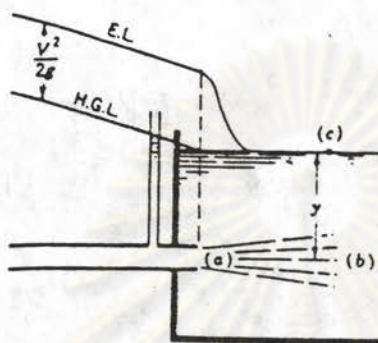
$K_1 \simeq 0.5$ ส่วนปากทางเข้าแบบที่ปลายท่อยื่นเลยผิวในที่เป็นหลอดรีนทรัน (Reentrant Tube) ดังรูปที่ 2.13 c นั้นทำให้น้ำที่ไหลเข้าปากทางเข้าแบบนี้เกิดการตีบตัวมากที่สุด ทั้งนี้เพราะน้ำที่ไหลเข้าท่อแทนที่จะเป็นเฉพาะส่วนที่อยู่ด้านหน้าของปากท่อแต่เพียงอย่างเดียวก็จะมีน้ำจากด้านนอกส่วนที่อยู่รอบ ๆ ปากทางนั้นไหลเข้าสู่ท่อด้วย ขนาดของความตีบตัวนี้ขึ้นอยู่กับความยาวของส่วนที่ยื่นเลยเข้าไปในที่เก็บและขึ้นอยู่กับขนาดความหนาของท่อ ทั้งนี้โดยเปรียบเทียบกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ถ้าหากท่อนั้นมีขนาดหนามากสภาพของท่อก็จะใกล้เคียงกับแบบทางเข้าฟลัช ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้สัมประสิทธิ์ของการสูญเสียพลังงานมีค่าไม่คงที่ สำหรับท่อที่มีผนังบางมากนั้นมีค่า

$$K_1 \simeq 0.8$$

2.12.2 การสูญเสียที่ปลายทางออก (Loss of Head at Discharge)

เมื่อของไหลที่มีความเร็ว V ไหลออกจากปลายท่อเข้าสู่ถังเก็บขนาดใหญ่มากจนสามารถตัดความเร็วของน้ำในถังทิ้งก็จะทำให้พลังงานจลน์ทั้งหมดของลำน้ำนั้นกระจายตัวหายไป ดังนั้นก็จะมีพลังงานสูญเสียไปกับการส่งน้ำออกมาจากปลายท่อ พลังงานที่สูญเสียไปจะเป็น

$$h'_a = \frac{V^2}{2g} \quad (2.63)$$



รูปที่ 2.14 แสดงการสูญเสียที่ปากทางออก

จากรูปที่ 2.14 ที่บริเวณจุด a มีความดันเป็น y ซึ่งเท่ากับระดับความลึกของจุด a ดังนั้น

$$H_a = H_b$$

$$\frac{P_a}{\gamma} + \frac{V_a^2}{2g} + z_a - h'_d = \frac{P_b}{\gamma} + \frac{V_b^2}{2g} + z_b$$

$$y + \frac{V^2}{2g} + 0 - h'_d = 0 + 0 + y$$

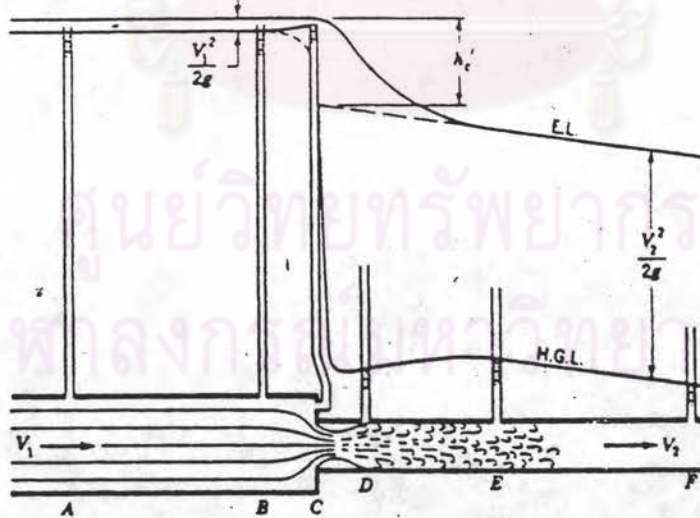
$$h'_d = \frac{V^2}{2g} \quad (2.64)$$

เนื่องจากสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียพลังงานที่ปลายทางออกมีค่าเป็น 1 ทุกกรณี ดังนั้นวิธีที่จะลดการสูญเสียพลังงานที่ปลายทางออกนี้ทำได้โดยการลดค่าของ V ในหน่วยลดความเร็วการไหลที่ปลายทางออกของท่อไหลบานโตออก

2.12.3 การสูญเสียที่เนื่องจากการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด (Loss Due to Contraction)

ก) แบบลดขนาดโดยทันทีทันใด (Sudden Contraction)

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของการไหลโดยทันทีทันใดนี้มีลักษณะดังรูปที่ 2.15 ซึ่งขนาดของความดันนั้นลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของความเร็วเพิ่มขึ้นและเนื่องจากมีพลังงานที่ต้องสูญเสียกับการไหลที่ปั่นป่วนเพราะความดันทางด้านหน้าของน้ำนั้นสูงมาก ทั้งนี้เพราะเส้นกระแสในบริเวณนั้นเป็นเส้นโค้ง ดังนั้นแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจะไปทำให้ความดันตรงผิวท่อสูงกว่าความดันของลำน้ำที่บริเวณกลางท่อ โดยที่เส้นประนั้นแสดงให้เห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความดันตามแนวแกนกลางของลำน้ำจากหน้าตัด B ถึง C



รูปที่ 2.15 แสดงถึงการสูญเสียจากการลดขนาดโดยทันทีทันใด

สถานะต่าง ๆ ของของไหลจากหน้าตัด c ไปยัง E นั้นคล้ายกับสถานะที่ปากทางเข้าของรูปที่ 2.12 เสถียรสูญเสียที่เนื่องจากการลดขนาดโดยทันทีทันใดนั้นมีค่า

$$h'_C = K_C \frac{V_2^2}{2g} \quad (2.65)$$

ในเมื่อ K_C = สัมประสิทธิ์ของการสูญเสียพลังงานที่เนื่องจากการลดขนาดโดยทันทีทันใด

ตารางที่ 2.4 แสดงสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการลดขนาดโดยทันที

D_2/D_1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
K_C	0.50	0.45	0.42	0.39	0.36	0.33	0.28	0.22	0.15	0.06

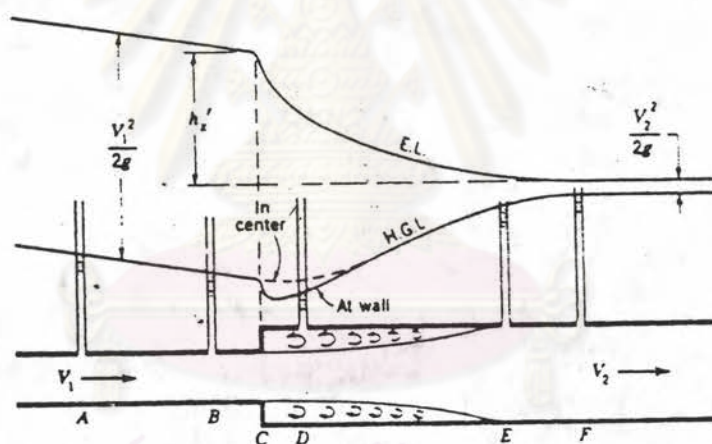
ข) แบบค่อย ๆ ลดขนาด (Gradual Contraction)

เพื่อลดการสูญเสียที่เนื่องจากการลดขนาดโดยทันทีทันใดโดยให้ค่อย ๆ ลดขนาดจากเส้นผ่าศูนย์กลางหนึ่งไปยังอีกเส้นผ่าศูนย์กลางหนึ่งโดยผ่านตัวเชื่อมที่มีผิวโค้งไปตามแนวแกนหรือโดยการเชื่อมด้วยกรวยตัดตัวเชื่อมที่มีผิวโค้งตามแนวแกนนั้น สามารถลดค่า K_C ได้ถึง 0.05 ส่วนต่อเชื่อมรูปกรวยตัดที่มีมุมกรวย 20 องศาถึง 40 องศา นั้นสามารถลดค่า K_C ลงได้ถึง 0.10 กรวยตัดที่มีมุมกรวยเล็กหรือโตเกินไปจะให้ค่า K_C สูง

2.12.4 การสูญเสียที่เนื่องจากการขยายพื้นที่หน้าตัด

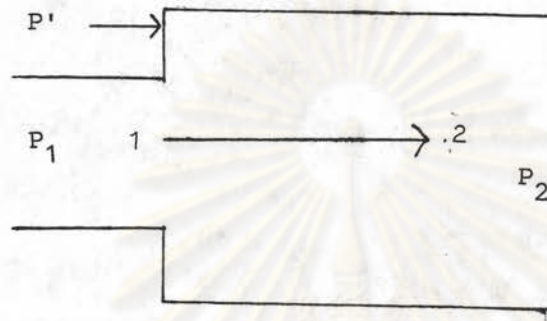
ก) แบบขยายโดยทันทีทันใด

ตามสภาวะต่าง ๆ ของของไหลในท่อที่ขยายขนาดโดยทันทีทันใดนั้นมีลักษณะดังรูปที่ 2.16 ซึ่งความดันในท่อช่วงที่โตนันสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากความเร็วในท่อนั้นต่ำ แต่ขนาดความดันที่เพิ่มขึ้นนี้ไม่มากเท่าที่ควรเมื่อเทียบกับความดันที่เพิ่มขึ้นในกรณีที่ไม่มีการสูญเสียพลังงานช่วง C ถึง F เป็นช่วงที่การไหลของของไหลนั้นมีความปั่นป่วนมากถัดจาก F ไปสภาพการไหลเข้าสู่ปกติ ความดันในช่วงถัดจาก C จะลดน้อยลงเนื่องจากความดันที่ผนังท่อน้อยกว่าความดันตรงกลางท่อ



รูปที่ 2.16 แสดงถึงการสูญเสียเนื่องจากการขยายหน้าตัดโดยทันทีทันใด

ตามรูปที่ 2.17 หน้าตัด 2 จะตรงกับหน้าตัด F ของรูปที่ 2.16 ซึ่ง
เป็นหน้าตัดที่รูปแบบของความเร็วกลับคืนสู่สภาพปกติแล้วและเป็นตำแหน่งของบริเวณที่มีการ
สูญเสียพลังงานที่มากที่สุดที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มขนาดโดยทันทีทันใดได้สิ้นสุดลงแล้ว



รูปที่ 2.17 แสดงถึงการหาเขตสูญเสีย

จากรูป 2.17 นั้นให้ความดันตรงหน้าตัด 2 ในกรณีที่ของไหลไม่มีความเสียดทาน
นั้นเป็น p_0 ดังนั้นสมการของพลังงาน

$$\frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} \quad (2.66)$$

แทนค่า p_2 ด้วย p_0 แล้วย้ายข้างจะได้

$$\frac{p_0}{\gamma} = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \quad (2.67)$$

ในเมื่อของไหลมีความเสียดทาน ดังนั้นให้

p_2 = ความดันที่หน้าตัด 2 ในกรณีที่มีความเสียดทาน

p' = ความดันเฉลี่ยบนพื้นที่รูปวงแหวน

ดังนั้นเมื่อนำแรงรวมที่กระทำกับก้อนของไหลในระหว่างหน้าตัด 1 และ 2 มาเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมในระหว่างหน้าตัด 1 และ 2 จะได้

$$p_1 A + p'(A_2 - A_1) - p_2 A_2 = \frac{\rho}{g}(A_2 V_2^2 - A_1 V_1^2) \quad (2.68)$$

$$\frac{p_2}{\rho} = \left(\frac{A_1}{A_2}\right) \frac{p_1}{\rho} + \frac{(A_2 - A_1)}{A_2} \frac{p'}{\rho} + \left(\frac{A_1}{A_2}\right) \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{g} \quad (2.69)$$

ความแตกต่างระหว่างเสดความดันในกรณีที่ไม่มีความเสียดทานกับเสดความดันจริงที่หน้าตัด 2 นั้นเป็นเสดสูญเสียที่เนื่องจากการขยายขนาดพื้นที่หน้าตัด ดังนั้น

$$h'_x = \frac{p_0}{\rho} - \frac{p_2}{\rho} \quad (2.70)$$

เนื่องจาก $A_1 V_1 = A_2 V_2$

ดังนั้น $A_1 V_1^2 = A_1 V_1 V_1 = A_2 V_2 V_1$

เมื่อแทนค่า p_0 และ p_1 จากสมการที่ (2.67) และ (2.69) ลงในสมการที่ (2.70) ก็จะได้

$$h'_x = \left(\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g}\right) - \left(\frac{A_1}{A_2}\right) \frac{p_1}{\rho} + \frac{(A_2 - A_1)}{A_2} \frac{p'}{\rho} + \left(\frac{A_1}{A_2}\right) \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g}$$

$$h'_x = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} + \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right) \left(\frac{p_1}{\rho} - \frac{p'}{\rho}\right) \quad (2.71)$$

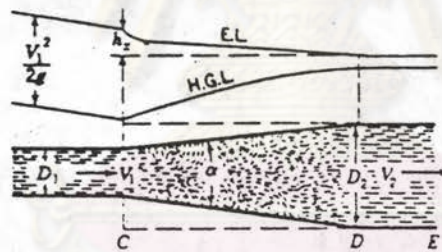


กำหนดให้ $p' = p_1$ ดังนั้น เฮดสูญเสีย ที่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของพื้นที่หน้าตัดก็จะเป็น

$$h'_x = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} \quad (2.72)$$

ข) แบบค่อย ๆ ขยายโตขึ้น (Gradual Expansion)

สามารถลดการสูญเสียให้น้อยลงได้ด้วยการลดความเร็วของของไหลที่ละน้อยด้วยการใช้ตัวการแพร่ (Diffuser) ดังในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงถึงการสูญเสียจากการค่อย ๆ ขยายโตขึ้น

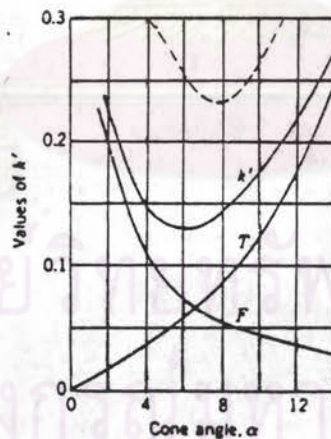
ผิวของตัวแพร่นี้อาจทำเป็นส่วนโค้งของวงกลมตามแนวที่ขนานกับแกนหรืออาจทำเป็นรูปกรวยตัด เฮดสูญเสีย เป็นฟังก์ชันของมุม α และเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนของ

พื้นที่ทั้งสองส่วนขนาดของความยาวของตัวแปรนี้หาได้จากตัวแปรทั้งสองนั้น

พลังงานที่สูญเสียไปกับกาที่ของไหลไหลผ่านตัวแปรนี้ มีสองส่วนด้วยกัน ส่วนแรกเป็นการสูญเสียทั่วไปที่เกิดจากความเสียดทานของท่อ ซึ่งมีค่าเป็น

$$h_L = \int \frac{f}{D} \frac{V^2}{2g} dL \quad (2.73)$$

คั้งนั้นการสูญเสียที่เนื่องจากความเสียดทานนี้แปรตามความยาวของกรวยตัดทั้งนี้ D_1 และ D_2 มีค่าคงที่กรวยที่มีมุมโตก็จะมีขนาดสั้นและการสูญเสียที่เนื่องจากความเสียดทานก็จะมีน้อย ดังแสดงได้ด้วยเส้นโค้ง F ของรูป 2.19 แต่การไหลผ่านตัวแปรนี้มีการสูญเสียพลังงานจากการไหลที่ปั่นป่วนเกิดขึ้นอีกด้วย การสูญเสียนี้เกิดจากกระแสน้ำวนทำให้เกิดการไหลหมุนขึ้นในน้ำก่อนนั้น การสูญเสียพลังงานจากการที่ไหลปั่นป่วนนี้จะเพิ่มขึ้นตามขนาดของมุม α ที่โตขึ้น



รูปที่ 2.19 แสดงสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียพลังงานของตัวแปรรูปกรวย

2.13 การสูญเสียในข้อต่อ (Loss in Pipe Fittings)

การสูญเสียพลังงานเนื่องจากอุปกรณ์ในระบบท่อ เช่น ข้อต่อ ท่อโค้ง ข้อต่อ และประตูน้ำ ดังนั้น เซตสูญเสียแสดงได้ในความสัมพันธ์

$$h_L = K \frac{V^2}{2g} \quad (2.74)$$

โดยที่ K = สัมประสิทธิ์ของการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการไหล

2.14 กราฟเซตของระบบ (System Head Curve)

เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลผ่านระบบกับเซตรวม (TDH) หรือพลังงานที่เครื่องสูบน้ำที่ต้องเพิ่มให้กับของเหลวเพื่อก่อให้เกิดการไหลนั้น พลังงานที่เครื่องสูบน้ำที่ต้องให้ซึ่งบอกเป็นความสูงของแท่งของของเหลวหรือเซตเท่ากับผลรวมของพลังงานสองอย่างด้วยกันคือ

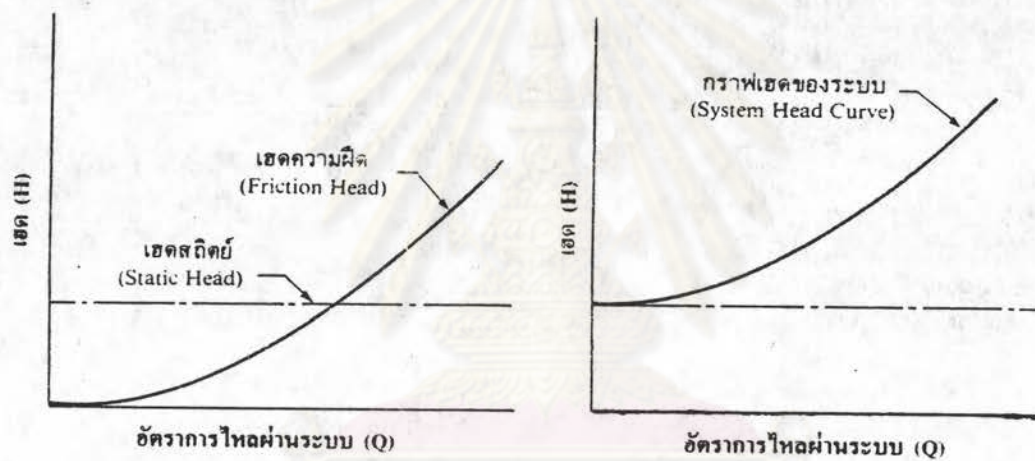
2.14.1 ความต่างระดับของของเหลวที่ปลายของท่อดูดและท่อออกหรือเซตสถิตย์

2.14.2 พลังงานที่สูญเสียไปในการไหลผ่านระบบ เนื่องมาจากความฝืดรวมกับการสูญเสียของระบบท่อ และการสูญเสียอื่น ๆ เช่นการสูญเสียที่ปากทางเข้าและทางออก การสูญเสียพลังงานส่วนนี้เป็นเซตความฝืด

โดยทั่วไปแล้ว ความต่างระดับของของเหลวที่ปลายทั้งสองของระบบจะมีค่าคงที่ ยกเว้นที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับที่ปลายข้างใดข้างหนึ่งหรือทั้งสองข้าง เช่น การสูบน้ำจากแม่น้ำซึ่งมีน้ำขึ้นน้ำลงเป็นต้น ที่ปลายของท่อออกอาจจะไม่ได้อยู่ที่ระดับของเหลว แต่ต้องการให้ความดันคงที่ระดับหนึ่งก็อาจถือได้ว่าอยู่ที่ระดับของเหลว

กราฟเซตของระบบได้แยกเป็นพลังงานที่เครื่องสูบน้ำจะต้องเพิ่มให้แก่ของเหลวตามข้อ 2.14.1 และข้อ 2.14.2 ข้างต้น ในกรณีที่ความต่างระดับของของเหลว

มีค่าคงที่ กราฟของพลังงานส่วนนี้ก็จะเส้นราบขนานไปกับแกน X ซึ่งแทนอัตราการไหล สำหรับการสูญเสียพลังงานหรือเฮดในข้อ 2.14.2 นั้นจะเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของอัตราการไหล ดังนั้นลักษณะของกราฟจะเป็นเส้นโค้งพาราโบลา เมื่อมีการเขียนแยกกัน โดยที่กราฟของข้อ 2.14.1 เป็นกราฟเฮดสถิตย์และกราฟข้อ 2.14.2 เป็นกราฟเฮดความฝืด เมื่อรวมกราฟทั้งสองด้วยกันเป็นกราฟเฮดของระบบ ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 กราฟเฮดของระบบ (System Head Curve)

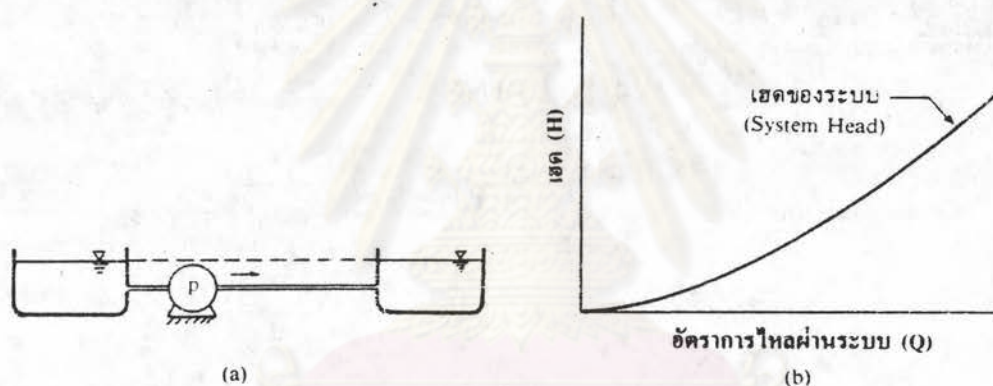
เฮดของระบบที่มีช่วงอัตราการไหลครอบคลุมทุกสภาวะการทำงานจะช่วยให้สามารถเลือกเครื่องสูบน้ำได้อย่างเหมาะสม(1) กล่าวคือเมื่อนำกราฟดังกล่าวไปเขียนบนสเกลเดียวกันกับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูบน้ำกับเฮด (กราฟ H-Q) ของเครื่องสูบน้ำ จุดที่กราฟ H-Q ตัดกับกราฟเฮดของระบบนี้เป็นจุดที่เครื่องสูบน้ำทำงาน

2.15 ลักษณะกราฟเฮดของระบบ

กราฟเฮดของระบบนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของการติดตั้งและส่วนประกอบของระบบซึ่งแบ่งออกได้เป็น

2.15.1 ระบบที่ไม่มีเฮดสถิตย

ลักษณะทั่ว ๆ ไปของระบบนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.21

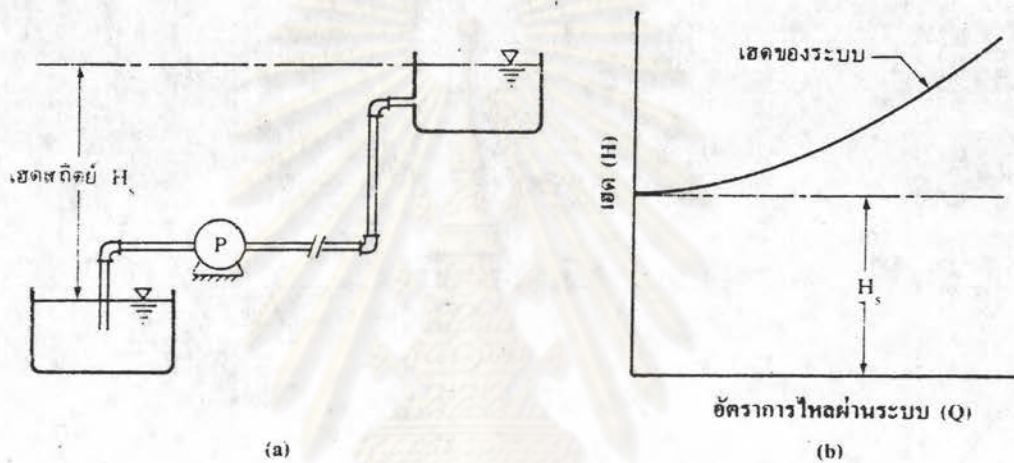


รูปที่ 2.21 ระบบเครื่องสูบลและกราฟเฮดของระบบที่ไม่มีเฮดสถิตย

โดยที่ระดับของของเหลวทางด้านดูดเท่ากับด้านออก ดังนั้นพลังงานที่เครื่องสูบน้ำที่ตองให้แกของเหลวก็จะมีแต่ที่จจะตองเอาชนะความฝืดอยางเดียว ปกติแล้ถ้ออัตราการสูบลของเครื่องสูบน้ำมีค่าคงที่ก็ไมจ่าเป็นตองสร้างกราฟเฮดของระบบ เพียงแต่นำเอาอัตราการสูบน้ำมาคำนวณหาการสูญเสียเฮดรวมทั้งหมดจากปลายทอดูดถึงปลายทอดอก

2.15.2 ระบบที่เสดส่วนใหญ่เป็นเสดสถิตย์

ลักษณะทั่ว ๆ ไปของระบบนี้แสดงไว้ในรูปและกราฟเสดของระบบ ในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ระบบเครื่องสูบน้ำที่มีทั้งเสดสถิตย์และเสดความเส็ด และกราฟเสดของระบบ

ลักษณะของระบบนี้จะมีเสดสถิตย์เป็นหลักมีท่อที่มีความยาวไม่มาก

2.16 วอเตอร์แฮมเมอร์ (Water Hammer)

วอเตอร์แฮมเมอร์เป็นปรากฏการณ์ที่ความดันในท่อกมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และฉับพลัน(8) โดยมีความดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และลดลงจากความดันเดิมในลักษณะเป็นคลื่นขึ้นลงสลับกันไป สาเหตุที่สำคัญในการเกิดวอเตอร์แฮมเมอร์ก็คือมีการเปลี่ยนแปลงความ

เร็วของการไหลในท่ออย่างกระทันหัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในลักษณะ
ดังกล่าว โมเมนตัมของของเหลวได้ถูกเปลี่ยนไปกลายเป็นแรงกระแทกในผนังของ
ท่อ แรงกระแทกที่เกิดขึ้นนี้หากมากเกินไปเกินกว่าความสามารถของท่อที่สามารถรับไว้
ได้ก็จะทำให้ท่อระเบิดหรือทำให้ระบบท่อและอุปกรณ์เสียหายอย่างรุนแรงขึ้นได้ ระดับ
ความเสียหายเนื่องจากวอลเตจอร์แฮมเมอร์ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงและความยืดหยุ่น
(Elasticity)(10)ของท่อ ความเร็วของการไหล การเปลี่ยนแปลง
ความเร็วการไหลและลักษณะการยืดท่อใหญ่กับท่อ

2.16.1 การป้องกันวอลเตจอร์แฮมเมอร์

วิธีป้องกันมิให้วอลเตจอร์แฮมเมอร์ที่เกิดขึ้นมีความรุนแรงมากจนทำให้เกิดความ
เสียหายให้แก่ระบบท่อนั้น อาจกระทำได้โดยการลดความดันลงให้เหลืออยู่ในระดับที่
ยอมให้โดยให้หน้าไหลออกมาจากท่อบางในขณะที่เกิดความดันมาก ๆ หรืออาจจะใช้
อุปกรณ์พวกวาล์วนิรภัย (Safety Valve)(9) ติดตั้งไว้

2.17 เฮดความสูง (Net Positive Suction Head, NPSH)

การทำงานของเครื่องสูบน้ำโดยทั่ว ๆ ไปจะเป็นการลดความดันในห้องสูบลด
ลงให้ต่ำกว่าความดันของบรรยากาศที่ได้เพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลว ดังนั้นถ้าของเหลว
อยู่ระดับเดียวกันกับศูนย์กลางของเครื่องสูบน้ำ แรงที่ขับเคลื่อนให้ของเหลวไหลเข้าไปสู่
ห้องสูบลูกก็จะมีแต่ความดันของบรรยากาศเพียงอย่างเดียว หรือถ้าระดับของของเหลว
อยู่สูงกว่าก็จะมีแรงดันจากของเหลวมาช่วยด้วย ในทางตรงกันข้ามถ้าหากของเหลวอยู่
ต่ำกว่าเครื่องสูบลูก แรงขับเคลื่อนก็จะลดลง เนื่องจากไม่ต้องการให้ของเหลวกลายเป็นไอ
ความดันที่ให้แก่ของเหลวไหลเข้าไปในห้องสูบลูกที่เป็นประโยชน์อย่างแท้จริงจะเป็นความดัน
ที่หน้าห้องสูบลูกเฉพาะส่วนที่มากกว่าความดันไอของของเหลว

เฮดความสูงจะเป็นความดันสมบูรณ์ทั้งหมด โดยบอกเป็นแท่งความสูงของ
ของเหลวหรือเฮดที่หน้าห้องสูบลูกที่เกิดการไหลของของเหลวไหลเข้าไปในห้องสูบลูก
ของเครื่องสูบลูกด้วยความดันไอของของเหลว

เฮดความสูงมีอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ เฮดความสูงที่ต้องการ (Required Net Positive Suction Head, NPSH_r) และเฮดความสูงที่มีอยู่ (Available Net Positive Suction Head, NPSH_a) สำหรับค่าแรกเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับการออกแบบของเครื่องสูบน้ำซึ่งมีเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะอัตราการสูบน้ำ ความเร็ว ส่วนค่าหลังนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพการทำงานที่เครื่องสูบน้ำติดตั้งอยู่โดยเป็นเฮดที่มีอยู่จริงตามลักษณะการติดตั้ง ถ้าหากให้เครื่องสูบน้ำทำงานอย่างมีประสิทธิภาพแล้ว เฮดความสูงที่มีอยู่จริงจะต้องไม่น้อยกว่าค่าที่ต้องการสำหรับเครื่องสูบน้ำนั้น

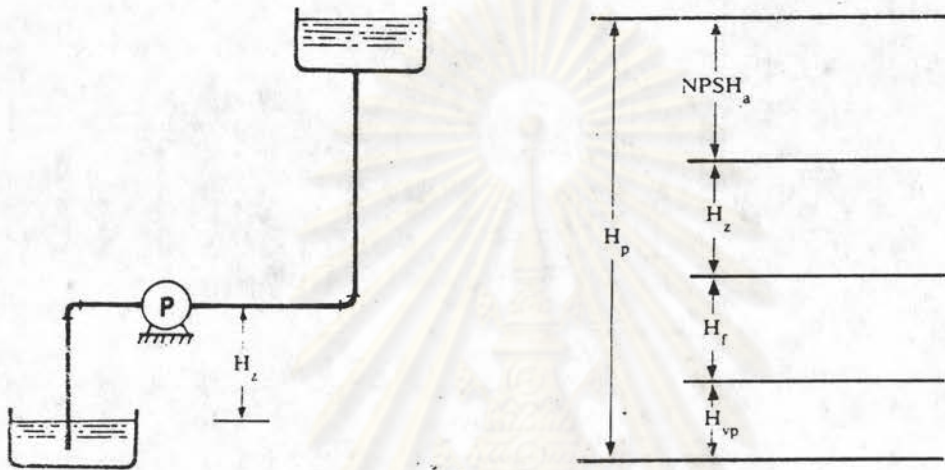
การคำนวณเกี่ยวกับเฮดความสูงอาจพิจารณาจากความดันสูงสุดที่ก่อให้เกิดการไหลเข้าไปสู่ศูนย์กลางของใบพัดมีค่าความดันจริงบนผิวของของเหลว หรือความดันของบรรยากาศเมื่อผิวของของเหลวเปิดสูบบรรยากาศ (ความสูงของแท่งน้ำ 10.33 เมตร ที่ระดับน้ำทะเลปานกลาง) เมื่อมีการไหลในท่อนุดของเครื่องสูบน้ำก็จะมี การสูญเสียพลังงานภายในท่อซึ่งจะต้อนำเอาความดันที่ออกและเนื่องจากไม่ต้องการให้ ของเหลวกลายเป็นไอ ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยจะต้อนำเอาความดันไอของของเหลว มาหักออกไว้เสียก่อน เหลือเท่าใดจึงเป็นความดันที่เหลืออยู่ที่หน้าห้องสูบน้ำ (เฮดความสูงที่มีอยู่) ในกรณีที่ระดับของของเหลวเท่ากับระดับศูนย์กลางของใบพัด แต่ถากระดับของเหลวมีระดับต่ำกว่าก็จะต้องนำเอาความต่างระดับนั้นมาหักออก เหลือเท่าไรจึงเป็นเฮดความสูงที่มีอยู่ และในทางตรงกันข้ามถาของเหลวอยู่สูงกว่าศูนย์กลางของใบพัดก็ต้อนำเอาความต่างระดับนั้นมาบวกจึงจะได้เป็นเฮดความสูงที่มีอยู่

ในกรณีที่เป็นการติดตั้งเครื่องสูบน้ำที่ทราบ เฮดความสูงที่ต้องการความแตกต่างระหว่างความดันของบรรยากาศกับผลรวมของการสูญเสียพลังงานทางท่อนุด (Head Loss) เฮดความสูงที่ต้องการและความดันได้เป็นสิ่งบอกให้ทราบว่า จะสามารถติดตั้งเครื่องสูบน้ำให้อยู่สูงกว่าระดับของเหลวได้มากที่สุดเท่าใด เช่น ถาความดันบรรยากาศมีค่าผลรวมดังกล่าว 5 เมตร ก็ตองตั้งเครื่องสูบน้ำให้สูงกว่าระดับของของเหลวได้ไม่เกิน 5 เมตร แต่ถาความดันบรรยากาศมีค่าน้อยกว่าผลรวมดังกล่าว 3 เมตร ก็ตองติดตั้งเครื่องสูบน้ำให้อยู่ต่ำกว่าผิวของของเหลวไม่น้อย

กว่า 3 เมตร เครื่องสูบน้ำจึงจะมีเสถียรภาพไม่ต่ำกว่าที่ต้องการ

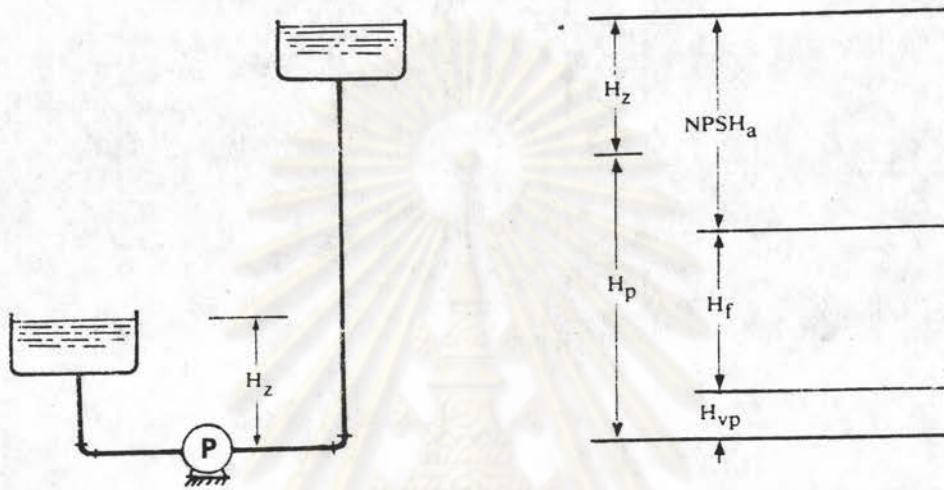
จากหลักดังกล่าวข้างต้นสามารถทำให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นเมื่อพิจารณาจากรูปที่

2.23 และ รูปที่ 2.24



รูปที่ 2.23 เสถียรภาพเมื่อเครื่องสูบน้ำอยู่สูงกว่าระดับของเหลวทางด้านดูด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.24 เขตความสูงที่มีอยู่เมื่อเครื่องสูบอยู่ต่ำกว่าระดับของเหลวทางด้านดูด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.17.1 เครื่องสูบน้ำอยู่สูงกว่าระดับของเหลวทางคานคูด

$$NPSH_a = H_p - H_{vp} - H_f - H_z \quad (2.75)$$

ในเมื่อ H_p = ความดันสมบูรณ์ บนผิวของของเหลวทางคานคูด โดยบอกเป็นแท่งความสูงของของเหลวที่อุณหภูมิเดียวกันกับของของเหลว นั้น ในกรณีที่เป็นการคั้นบรรยากาศ ความดันสมบูรณ์จะเป็นค่าความดันจริงที่ระดับความสูงของของเหลว

H_{vp} = ความดันไอของของเหลวที่อุณหภูมิที่กำหนดบอกเป็นแท่งความสูงของของเหลว

H_f = ผลรวมของเสดที่เสียไปในทอคูดทั้งหมด

H_z = ความสูงต่างระดับระหว่างผิว ของของเหลวกับศูนย์กลางของเครื่องสูบน้ำ

2.17.2 เครื่องสูบน้ำอยู่ต่ำกว่าระดับของเหลวทางคานคูด

$$NPSH_a = H_p + H_z - H_{vp} - H_f \quad (2.76)$$

ค่าความกดดันของบรรยากาศที่ระดับผิวน้ำ (H_p) ซึ่งทอคูดของเครื่องสูบน้ำติดตั้งอยู่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



2.18 การเกิดโพรง (Cavitation)

เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดการกัดกร่อนเนื้อโลหะของใบพัดหรือห้องสูบ โดยมีสาเหตุมาจากการที่เสดความสูงที่มีอยู่ต่ำกว่า เสดความสูงที่ต้องการ สำหรับเครื่องสูบน้ำนั้นค่าต่ำกว่าความดันไอของของเหลวทำให้เดือดเป็นฟองเล็ก ๆ หรือรวมกันเป็นกระเปาะซึ่งมีความดันต่ำ หากความดันในยานั้นกลับเพิ่มขึ้นอย่างกระทันหันหรือฟองนั้นเคลื่อนที่ไป เจอความดันสูงของเหลวจะยุบและหดตัวกระแทกอย่างรวดเร็ว การเกิดและกระแทกของฟองดังกล่าวเป็นไอยิ่งรวดเร็วมาก อาจกินเวลาเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ถ้ามีมากก็จะเกิดเสียงคล้ายกับการเคาะเหล็กดังรัวตลอดและสิ้นสะเทือน โดยที่ประสิทธิภาพของเครื่องสูบลดลง และไม่สามารถทำให้ความดันขาออกออกได้เต็มที่ ยิ่งกว่านั้นหากฟองนี้ไปเกาะที่ส่วนหนึ่งส่วนใดและยุบตัวลง ณ ที่นั้น ผิวโลหะจะกร่อนเป็นรู เริ่มตั้งแต่ขนาดมองดูด้วยตาเปล่าไม่เห็นจนกระทั่งลามเป็นหลุมลึกเต็มไปหมด ความดันในขณะที่ฟองยุบตัวและกระแทกเข้าหากัน มีค่าประมาณหนึ่งหมื่นเท่าของความดันบรรยากาศซึ่งนับว่าสูงมาก (12)

เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดโพรง จะต้องให้ทุก ๆ จุดในระบบของของไหลมีความดันสมบูรณ์สูงกว่าความดันไอของของไหลนั้นและเพิ่มระดับความดันให้สูงขึ้นด้วย อาจติดตั้งอุปกรณ์นี้ให้ต่ำกว่าทางที่ของไหลไหลเข้า จนกระทั่งของไหลสามารถไหลเข้าอุปกรณ์ดังกล่าวได้เอง โดยแรงโน้มถ่วงของโลกแทนที่จะไหลขึ้นโดยการสูบ หรือก็ออกแบบให้เครื่องจักรมีลักษณะที่ไม่เกิดจุดที่มีความเร็วสูงจนทำให้ความดันตรงจุดนั้นต่ำเกินไป

2.19 กำลังงานและประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ

กำลังงานหมายถึงอัตราการทำงานในหน่วยเวลา ดังความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{Whp} = \frac{Q \cdot \text{T.D.H}}{273} \quad (2.77)$$

$$\text{Whp} = \text{แรงมา} \quad (\text{Water Horse power})$$

Q = อัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำมีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

TDH = เส้นรวมของเครื่องสูบน้ำมีหน่วยเป็นเมตร

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร} = \frac{\text{ปริมาตรน้ำที่ได้}}{\text{ปริมาตรการกวาดของลูกสูบ}} \times 100$$

(2.78)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย