บทที่2

หลักการและทฤษฎี

2.1 ชนิดของ Open channel

การไหลในท่อซึ่งมีผิวน้ำอิสระหรือน้ำไหลไม่เต็มท่อ เป็น Open channel ทางน้ำที่เป็น Open channel นี้แบ่งออกได้เป็นทางน้ำตามธรรมชาติและทางน้ำที่มนุษย์ได้ขุดขึ้น

ทางน้ำธรรมชาติรวมถึงลำน้ำทุกชนิดที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ซึ่งมีขนาดต่างๆ กัน ตั้งแต่ร่องน้ำเล็กๆ ตามเชิงเขา ลำห้วย ลำธาร จนถึงแม่น้ำ ลำธารใต้ดินซึ่งน้ำไหลด้วยผิวน้ำอิสระก็เป็น Open channel

คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของลำน้ำธรรมชาติไม่แน่นอน การศึกษาถึงคุณสมบัติของการไหลในทางน้ำธรรมชาติต้องการความรู้ในด้านอื่น เช่น ชลศาสตร์ ธรณีวิทยาที่เกี่ยวกับลำน้ำ การเคลื่อนที่ของตะกอนและอื่นๆ ซึ่งรวมกันเรียกว่าชลศาสตร์ของลำน้ำ ทางน้ำที่มนุษย์ได้สร้างขึ้น เช่น ทางที่ใช้ในการคมนาคมทางน้ำ คลองที่นำน้ำมาไปผลิตกระแสไฟฟ้า คลองชลประทาน รางน้ำคูระบายน้ำ ทางป้องกันอุทกภัยและอื่นๆ และรวมถึงแบบจำลองทางน้ำที่ใช้ในห้องทดลอง คุณสมบัติของทางน้ำที่มนุษย์ได้สร้างขึ้นสามารถควบคุมให้ได้ตามที่ออกแบบไว้ การใช้ทฤษฎีทางชลศาสตร์กับทางน้ำที่ได้สร้างขึ้นจะให้ผลใกล้เคียงกับความเป็นจริง ซึ่งละเอียดเพียงพอที่จะนำไปใช้ในทางปฏิบัติ

งานออกแบบทางน้ำในทางปฏิบัติหลายลักษณะใช้ชื่อต่างๆ กัน เช่น คลอง , รางน้ำ , รางลาดชัน , รางลดระดับ , ท่อลอด , อุโมงค์ที่น้ำไหลไม่เต็มและอื่นๆ ชื่อต่างๆ เหล่านี้ใช้กันอย่างหละหลวมซึ่งสามารถให้คำจำกัดความได้โดยทั่วๆไป คลองคือทางน้ำที่ขุดขึ้นยาว มีความลาดชันน้อยซึ่งอาจเป็นคลองดินหรืออาจดาดด้วยหิน , คอนกรีต , ซีเมนต์ , ไม้ หรือดาดด้วยวัสดุอย่างอื่น รางน้ำคือทางน้ำที่ทำด้วยไม้ โลหะ คอนกรีต หินก่อ ซึ่งวางอยู่เหนือพื้นดินด้วยการค้ำยันใช้ในกรณีที่น้ำผ่านที่ต่ำ รางลาดชันเป็นทางน้ำที่มีความลาดชันสูง ส่วนรางลดระดับก็เช่นเดียวกับรางลาดชันผิดกันแต่การลดระดับกระทำในระยะสั้นๆ ท่อลอดที่น้ำไหลไม่เต็ม เป็นทางน้ำเฉพาะส่วนลอดภูเขาหรือเนินดินสูงๆ

รูปร่างลักษณะของทางน้ำ ทางน้ำที่สร้างขึ้นด้วยรูปตัดที่ไม่เปลี่ยนแปลงและท้องน้ำมีความลาดเทคงที่เรียกว่า Prismatic channel ทางน้ำลักษณะอื่นเรียก Nonprismatic

รูปตัดทางน้ำธรรมชาติโดยทั่วไปเป็นรูปที่ไม่แน่นอน ซึ่งจะผันแปรจากรูปคล้ายๆ พาราโบลา ไปจนถึงคล้ายๆ รูปสี่เหลี่ยมคางหมู สำหรับทางน้ำที่มีอุทกภัยเกิดขึ้นบ่อยๆ อาจประกอบด้วยลำน้ำหลักซึ่งน้ำส่วนใหญ่ไหลผ่านกับลำน้ำย่อยบนตลิ่งข้างหนึ่งหรือสองข้าง เพื่อให้น้ำส่วนหนึ่งที่ล้นตลิ่งไหลผ่าน

2.2 ส่วนต่างๆ ของหน้าตัดทางน้ำ

ส่วนต่างๆ ของรูปตัดคือคุณสมบัติของรูปตัดและความลึกของการไหล สำหรับรูปตัดง่ายๆ จะประกอบด้วยความลึกและสัดส่วนอย่างง่ายๆ สำหรับใช้ จึงต้องใช้ curves ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนต่างๆ กับความลึกช่วยในการคำนวณ

ระดับ (Stage) คือ ความสูงหรือระยะทางในแนวดิ่งจากผิวน้ำอิสระถึงเส้นสมมติ (Datum) ถ้าจุดต่ำสุดของรูปตัดทางน้ำถูกเลือกเป็นเส้นสมมติ ระดับ (Stage) ก็เช่นเดียวกับความลึกของการไหล

ความกว้างที่ผิวการไหล T (Top width) คือความกว้างของรูปตัดทางน้ำที่ผิวน้ำอิสระ

พื้นที่การไหล A (Water area) เป็นพื้นที่รูปตัดการไหลซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการไหลของน้ำและอยู่ระหว่างจุดตัดของทางน้ำกับผิวน้ำทั้งสองของรูปตัดที่ตั้งฉากกับการไหล

Hydraulic radius R คืออัตราส่วนของพื้นที่การไหลต่อเส้นขอบเปียก หรือ

$$R = \frac{A}{P} \qquad \text{.....(1)}$$

Hydraulic depth D คืออัตราส่วนของพื้นที่การไหลต่อความกว้างที่ผิวการไหล หรือ

$$D = \frac{A}{T} \qquad \text{.....(2)}$$

Section factor สำหรับคำนวณการไหล Critical Z คือผลคูณของพื้นที่การไหล และ Square root ของ Hydraulic depth

$$Z = A\sqrt{D} = A\sqrt{\frac{A}{T}} \qquad \text{.....(3)}$$

Section factor สำหรับคำนวณการไหล Uniform $AR^{2/3}$ คือผลคูณของพื้นที่การไหลและ Hydraulic radius กำลังเศษสองส่วนสาม

การวัดอัตราความเร็ว รูปตัดทางน้ำถูกแบ่งออกเป็นรูปตัดย่อยๆ ในแนวดิ่งจำนวนรูปตัดย่อยที่แบ่งขึ้นอยู่กับลักษณะท้องน้ำ ความเร็วเฉลี่ยในแต่ละรูปตัดวัดได้จากความเร็วที่ 0.6 ของความลึกโดยวัดจากผิวน้ำของรูปตัดนั้นๆ หรือเพื่อให้แน่นอนยิ่งขึ้นโดยใช้ค่าเฉลี่ยของอัตราความเร็วที่ 0.2 และ 0.88 ของความลึกจากผิวน้ำ เมื่อความลึกน้อยกว่า 1.00 เมตร ถ้าความลึกมากกว่า 3.00 เมตร ใช้ วัดความเร็ว 3 จุด โดยนำอัตราความเร็วเฉลี่ยที่ 0.2 และ 0.8 ของความลึกไปหาอัตราความเร็วเฉลี่ยกับอัตราเร็วที่ความลึก 0.6 หรือ

$$V_{เฉลี่ย} = \{(\frac{1}{2}(V_{0.2}+V_{0.8})+V_{0.6}\}/2 \quad \text{.....(4)}$$

ค่าอัตราความเร็วเฉลี่ยนี้เมื่อคูณกับพื้นที่ในแต่ละรูปตัด ก็จะได้ค่าปริมาณน้ำในแต่ละรูปตัดนั้น ผลรวมของปริมาณน้ำในแต่ละรูปตัดก็จะเป็นปริมาณน้ำของลำน้ำ อัตราเร็วเฉลี่ยของทั้งรูปตัดเท่ากับปริมาณน้ำทั้งหมดหารด้วยพื้นที่รูปตัด

2.3 <u>สูตร Chezy</u>

ปี ค.ศ. 1769 วิศวกรชาวฝรั่งเศสชื่อ Antoine Chezy ได้คิดค้นขึ้น ซึ่งเชื่อกันว่าเป็นสูตรการไหล Uniform สูตรแรก ซึ่งปกติแสดงไว้ดังต่อไปนี้

$$V = C\sqrt{RS} \quad \text{.....(5)}$$

ซึ่ง V = อัตราความเร็วเฉลี่ยเป็นฟุตต่อวินาที

R = Hydraulic radius เป็นฟุต

S = ความลาดเท ของเส้น Energy

C = แฟคเตอร์ของความต้านทานการไหลซึ่งเรียกว่า Chezy's C

การหาค่า Chezy's C อาจหาได้ดังต่อไปนี้คือ

โดยใช้สูตรของ Ganguillet and Kutter ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ค่า C ไว้กับความลาดเท S, Hydraulic radius R และ Roughness coefficient n ในหน่วยอังกฤษ สูตรคือ

$$C = \{1.65+\frac{0.00281}{S}+\frac{1.811}{n}\}/\{1+(41.65+\frac{0.00281}{S})\frac{n}{\sqrt{R}}\frac{n}{\sqrt{R}} \quad \text{.....(6)}$$

2.4 สูตร Bazin

ปี ค.ศ. 1897 นักชลศาสตร์ชาวฝรั่งเศษชื่อ Bazin ได้เสนอสูตรในการหาค่า Chezy'Sc ซึ่งสัมพันธ์กับ R และไม่เกี่ยวกับ Sในหน่วยอังกฤษ คือ

$$C = \frac{157.6}{1+\frac{m}{\sqrt{R}}} \qquad \text{.....(7)}$$

ซึ่ง m คือค่าสัมประสิทธิ์ของความขรุขระ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าของ Bazin's m #2

ลักษณะทางน้ำ	Bazin's m
ไม้ที่ราบเรียบ	0.11
ไม้ไม่ราบเรียบ , คอนกรีต , อิฐ	0.21
หินก่อ หรืออิฐที่ก่อไม่ดี	0.83
คลองดินที่ดี	1.54
คลองดินธรรมดา	2.36
คลองดินขรุขระ	3.17

เนื่องจากสูตร Bazin พัฒนามาจากข้อมูลที่ได้จากทางน้ำในห้องทดลอง เมื่อนำไปใช้งานจึงได้ผลน้อยกว่าสูตร G.K.

#2 ที่มา ฉลอง เกิดพิทักษ์. Open Channel Flow. ขอนแก่น : มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2525 หน้า107

2.5 สูตร Powell

ปี ค.ศ. 1950 Powell ได้เสนอสูตรสำหรับทางน้ำขรุขระที่ได้สร้างขึ้น สูตรเป็นการหาค่า C คือ

$$C = -42 \log \left(\frac{C}{4R_e} + \frac{\varepsilon}{R} \right) \qquad \text{.....(8)}$$

ซึ่ง R คือ Hydraulic radius และ R_e คือRenolds number ส่วน ε คือความขรุขระของผิวทางน้ำ ดังค่าตัวอย่างที่แสดงไว้ในตารางที่

สำหรับทางน้ำขรุขระ การไหลโดยทั่วไปเป็น Turbulent เมื่อ R_e มีค่ามากเปรียบเทียบกับค่า C ดังนั้นสมการ (8) จึงอาจหาประมาณได้จาก $C = 42 \log (R/\varepsilon)$ สำหรับสูตรจึงอาจลดเหลือในรูป $C = 42 \log (4 R_e/C)$ และค่า C นี้หาได้โดยวิธี Trial and error

สำหรับ Powell ได้มาด้วยข้อมูลที่จำกัดจากห้องทดลองของทางน้ำทั้งราบเรียบและขรุขระ จึงทำให้นำไปใช้งานได้ไม่กว้างขวาง ซึ่งต้องการหาค่า ε ที่เหมาะสมเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4 ค่าของ Powell's ε #3

ลักษณะทางน้ำ	Powell's ε	
	ใหม่	เก่า
ผิวราบเรียบ	0.0002	0.0004
รางไม้ที่ไม่ราบเรียบ	0.0010	0.0017
ทางน้ำดาดด้วยคอนกรีต	0.04	-
คลองดินตรงและราบเรียบ	0.10	-
คลองดินขุด	0.04	-

2.6 สูตร Manning

ในปี ค.ศ.1989 วิศวกรชาวอังกฤษ Robert Manning ได้ดัดแปลงให้เป็นที่รู้จักกันดีในรูป

$$V = \frac{1.49}{n} R^{2/3} S^{1/2} \qquad \text{.....(9)}$$

ซึ่ง V คือ อัตราความเร็วเฉลี่ยเป็นฟุตต่อวินาที

R คือ Hydraulic radius เป็นฟุต

S คือ ความลาดเทของเส้น Energy

n คือ สัมประสิทธิ์ความขรุขระหรือเรียกว่า Manning's n

สูตรนี้ได้พัฒนามาจากสูตรต่างๆ 7 สูตร โดยใช้ข้อมูลจากห้องทดลองของ Bazin และข้อมูลอื่นอีก 170 แห่ง เนื่องจากเป็นรูปที่ง่ายและได้ผลเป็นที่พอใจ จึงเหมาะสมที่จะใช้ในทางปฏิบัติ สูตร Manning จึงเป็นสูตรที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับการคำนวณการไหลในทางน้ำที่เป็น Uniform จากสมการของ Manning ;

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \qquad \text{.....(10)}$$

จะได้ $$n = \left(\frac{1}{Q}\right) A^{5/3} s^{1/2} / P^{2/3} \qquad \text{.....(11)}$$

เมื่อ

n = สัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Manning Coefficient)

Q = อัตราการไหลของน้ำ (m^3/s)

V = ความเร็วของการไหล (m/s)

A = พื้นที่หน้าตัดของการไหล (m^2)

S = ความลาดของท้องน้ำ (m/m)

R = รัศมีชลศาสตร์ มีค่าเท่ากับ A/P (m)

P = เส้นขอบเปียก (m)

ตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ ของ Manning (n) #4

ผิวทางน้ำเปิด	n
1. ทางน้ำเปิดธรรมชาติ (Natural Channels)	0.030
- เรียบและตรง	0.040
- ไหลช้าเนื่องจากมีสระลึก เป็นช่วงๆ	0.035
- แม่น้ำสายหลัก	
2. ทางน้ำเปิดดินขุด (Excavated Earth Channels)	
- เรียบ	0.022
- มีกรวดบ้าง	0.025
- เต็มไปด้วยหญ้า	0.030
- ก้อนหิน	0.035
3. ทางน้ำเปิดคาดผิว (Artificially lined channels)	
- คอนกรีตขัดผิว	0.012
- คอนกรีตผิวหยาบ	0.014
- ดินเหนียว	0.014
- หินเรียง	0.025

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#4 ที่มา กีรติ ลีวัจนกุล. ชลศาสตร์. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2536 หน้า 420

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสูตร Chezy และสูตร Manning จะพบว่า

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \qquad \text{.....(12)}$$

สมการนี้แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่าง Chezy's และ Manning's n

2.7 การเลือก Manning's n

ในทางปฏิบัติการใช้สูตร Manning หรือ สูตร G.K. ขึ้นอยู่กับการเลือกค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ n ให้เหมาะสมกับความต้านทานการไหลของทางน้ำที่กำหนดให้ไม่มีเกณฑ์ที่แน่นอน สำหรับวิศวกรที่มีความชำนาญก็สามารถเลือกได้เหมาะสม ส่วนผู้ที่เพิ่งเริ่มงานก็ต้องใช้การเดา และแต่ละคนก็เลือกได้ไม่เหมือนกัน

เพื่อที่จะให้แนวทางในการเลือกค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระจึงควรจะทราบหลักการต่อไปนี้

2.7.1 ต้องเข้าใจถึงแฟคเตอร์ที่มีผลกระทบต่อค่า n

2.7.2 ดูค่า n สำหรับทางน้ำลักษณะต่างๆ จากตาราง

2.7.3 ตรวจและทำให้คุ้นเคยกับสภาพของลำน้ำทั่วๆ ไปที่ทราบค่า n

2.8 แฟคเตอร์ที่มีผลกระทบกับค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning

ทางน้ำที่มีค่า n คงที่ตลอดกาลหาได้ยาก โดยความเป็นจริงค่า n เปลี่ยนแปลงและขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์หลายอย่าง การที่จะเลือกค่า n ที่เหมาะสมไปใช้ในการออกแบบได้จะต้องเข้าใจถึงความรู้เบื้องต้นของแฟคเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

แฟคเตอร์ที่มีผลกระทบสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ความขรุขระของทั้งทางน้ำที่สร้างขึ้นและทางน้ำธรรมชาติมีดังต่อไปนี้

2.8.1 ความขรุขระที่ผิว

2.8.2 วัชพืช

2.8.3 ทางน้ำไม่สม่ำเสมอ

2.8.4 แนวทางน้ำ

2.8.5 การตกตะกอนและการกัดเซาะ

2.8.6 สิ่งกีดขวาง

2.8.7 ขนาดและรูปร่างของทางน้ำ

2.8.8 ระดับและปริมาณน้ำ

2.8.9 ฤดูกาล

2.8.10 ตะกอนที่แขวนลอยและที่ท้องน้ำ

2.9 การคำนวณปริมาณน้ำผ่านประตูระบายน้ำ เมื่อเป็น Submerged flow

การคำนวณปริมาณน้ำผ่านประตูระบายน้ำ เมื่อท้ายน้ำ Submerged ซึ่งมักเป็นกรณีที่เกิดขึ้นทั่วไป เนื่องจากความลาดเทของคลองมีน้อย จึงทำให้การ Operate อาคารที่อยู่ในคลองส่งน้ำสายเดียวกันที่ผลกระทบไปถึงท้ายน้ำของอาคารเหนือน้ำ U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station ได้พัฒนาสูตรสำหรับใช้คำนวณปริมาณน้ำผ่านประตูระบายกรณีที่เป็น Submerged flow โดยได้ดัดแปลงมาจากสูตรของ standard orifice

$$Q = CLG_0\sqrt{2gh} \qquad \text{.....(13)}$$

$$\text{หรือ } Q\,(G_0/h_s) = CLG_0(G_0/h_s)\sqrt{2gh}$$

$$Q = C_sLG_0(h_s/G_0)\sqrt{2gh}$$

$$Q = C_sLh_s\sqrt{2gh} \qquad \text{.....(14)}$$

ซึ่ง $C_s = C(G_0/h_s)$ .....(15)

G_0 = ความสูงของการเปิดบานประตู (m)

Q = ปริมาณน้ำ (m^3/s)

C_s = สัมประสิทธิ์ปริมาณน้ำเมื่อการไหลเป็น Submerged flow

L = ความกว้างของช่องประตูระบาย (m)

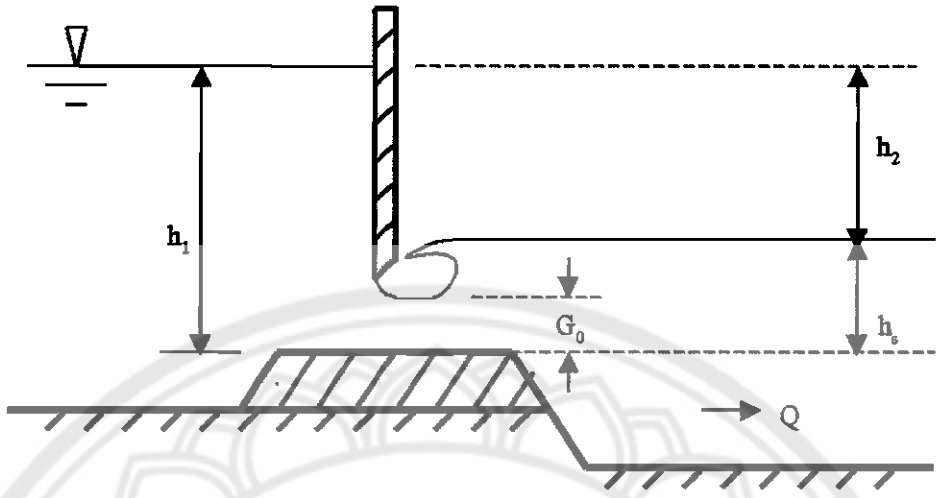
h_s = ระดับน้ำท้ายน้ำ – ระดับธรณีประตู (m)

g = อัตราเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วง (m/s^2)

h = ผลต่างของ head ทั้งหมดระหว่างเหนือน้ำและท้ายน้ำ ซึ่งรวมถึง approach velocity head ด้วย

ซึ่งสูตรดังกล่าวนี้ใช้กับประตูระบายที่มีระดับธรณีประตูต่ำ และระดับน้ำท้ายน้ำอยู่สูงกว่าระดับธรณีประตู ได้ใช้สูตรนี้ทดลองในห้องทดลองกับประตูระบายที่มีบานโค้งโดยการวัดปริมาณน้ำผ่านประตูระบายที่เปิดบานประตูที่ค่าต่างๆ แล้ว จึงคำนวณค่า C_s ในแต่ละปริมาณน้ำที่วัดได้จากสูตร

$$C_s = Q/Lh_s\sqrt{2gh} \qquad \text{.....(16)}$$



รูปที่ 4 แสดงประตูระบายน้ำเมื่อท้ายน้ำเป็น Submerged flow

นำค่า C_s ที่สัมพันธ์กับค่า h_s/G_0 ที่ได้จากการทดลองไป plot ในกระดาษ log – log จะได้ค่าเป็นเส้นตรง

ในระบบชลประทาน อัตราความเร็วของน้ำในคลองมีค่าต่ำ Velocity head จึงมีค่าน้อย กับเพื่อความสะดวกในทางปฏิบัติในสนาม ค่า h จึงใช้ผลต่างระหว่างระดับน้ำเหนือน้ำและท้ายน้ำ

ข้อแนะนำในการใช้สูตร

2.9.1 หาค่าบานประตูเปิด (G_0)

2.9.2 คำนวณค่า h_s = ระดับน้ำท้ายน้ำ – ระดับธรณีประตู

2.9.3 หาค่า h_s/G_0

2.9.4 ใช้ค่า h_s/G_0

2.9.5 หาค่า h = ระดับน้ำเหนือน้ำ – ระดับน้ำท้ายน้ำ

2.9.6 คำนวณค่า $Q = C_s L h_s \sqrt{2gh}$

2.10 การหาอัตราการไหลจากเครื่องวัดอัตราเร็วกระแสน้ำแบบใบพัด

จาก $V = aN + b$ .....(17)

เมื่อ V = ความเร็วของกระแสน้ำ (m/s)

N = จำนวนรอบ/วินาที

a,b = ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับเครื่องวัดอัตราเร็วของน้ำแต่ละเครื่อง

สำหรับเครื่องที่ใช้ $V = 0.16N + 0.01$ .....(18)

2.11 การหา Q loss

$$Q \text{ loss} = Q_{initial} - Q_{terminal} \quad \text{.....(19)}$$