

บทที่ 5

การออกแบบระบบท่อที่ถูกที่สุด

5.1 บทนำ

เราได้อธิบายถึงการแก้ปัญหาการไหลในระบบท่อไปแล้วในตอนท้ายของบทที่ 4 ในบทนี้จะเป็นการหาระบบท่อที่ถูกที่สุด ซึ่งได้อธิบายในบทที่ 1 แล้วว่ามีทั้งหมด 3 วิธี คือ วิธีลองผิดลองถูก (trial and error) วิธีโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (mathematical programming approaches) และวิธี Analytical Method สำหรับวิธีลองผิดลองถูกนั้นจะอธิบายโดยใช้ตัวอย่างระบบท่อในรูปที่ 4.4 ที่ได้อธิบายการแก้ปัญหาการไหลในระบบท่อ (หัวข้อที่ 4.4) มาแล้ว ต่อมาเป็นการกล่าวถึงวิธีโปรแกรมทางคณิตศาสตร์โดยสรุป และหัวข้อสุดท้ายเป็นการแนะนำวิธี Analytical Method เบื้องต้น แต่ก่อนที่จะหาระบบท่อที่ถูกที่สุดจะขออธิบายความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการออกแบบระบบท่อและการหาค่าใช้จ่ายของระบบท่อเสียก่อน

5.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการออกแบบระบบท่อ

โดยทั่วไปแล้วการออกแบบระบบท่อจะมีข้อกำหนดต่างๆที่หน่วยงานของทางราชการในท้องถิ่นนั้นๆกำหนดขึ้น ในแต่ละท้องถิ่นหรือแต่ละประเทศก็อาจแตกต่างกันไปบ้าง ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมต่างๆ ดังนั้นในที่นี้จะไม่กล่าวถึงรายละเอียดในเชิงตัวเลข แต่จะอธิบายถึงหลักการกว้างๆ ที่ใช้ในการออกแบบระบบท่อทั่วไป

ตามปกติแล้วจะมีข้อกำหนดหลักๆ ดังต่อไปนี้

1) ความต้องการใช้น้ำ (water demands)

สำหรับความต้องการใช้น้ำนั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนประชากร และในการออกแบบระบบท่อนั้นจะต้องออกแบบให้มีอายุการใช้งานได้หลายปี เช่น 20 ปี 25 ปี หรือ 30 ปี เป็นต้น ซึ่งก็แล้วแต่งบประมาณและข้อกำหนดในการออกแบบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องประมาณจำนวนประชากรในปีที่สิ้นสุดอายุการใช้งาน การประมาณจะหาประชากรสามารถศึกษาได้จากหนังสือเกี่ยวกับการออกแบบระบบประปา (Water supply systems design) ทั่วไปจะไม่ขออธิบายในที่นี้ เมื่อได้จำนวนประชากรมาแล้วก็สามารถนำมาหาอัตราการใช้น้ำได้ ซึ่งอาจจะหาในรูปแบบของ อัตราการใช้น้ำเฉลี่ยในรอบวัน หรือ อัตราการใช้น้ำสูงสุดในรอบวัน เป็นต้น นอกจากนี้ยังอาจจะแบ่งอัตราการใช้น้ำตามพื้นที่ที่จะส่งน้ำได้อีก เช่น เขตที่พักอาศัยชานเมือง เขตที่พักอาศัย

ในเมือง หรือ เขตการค้าและธุรกิจ เป็นต้น เนื่องจากพื้นที่เหล่านี้มีการใช้น้ำไม่เท่ากัน สำหรับความต้องการใช้น้ำที่ใช้ออกแบบก็หาได้โดยการนำสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของแต่ละพื้นที่ไปคูณกับอัตราการใช้น้ำเฉลี่ยต่อวัน เป็นต้น นอกจากความต้องการน้ำสำหรับอุปโภคแล้วยังมีความต้องการน้ำสำหรับการดับเพลิงที่ต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบระบบท่อด้วย ซึ่งความต้องการน้ำสำหรับการนี้ขึ้นอยู่กับพื้นที่แต่ละส่วนด้วย

2) ค่าความดันที่จุดจ่ายน้ำ (nodal pressure head)

โดยปกติค่าความดันที่จุดจ่ายน้ำที่ต้องการจะต้องไม่ต่ำกว่าค่าที่กำหนด เช่น ค่าความดันที่จุดจ่ายน้ำจะต้องไม่ต่ำกว่า 10 เมตร มิฉะนั้นจะไม่สามารถส่งน้ำขึ้นไปยังอาคารที่สูงประมาณ 3 ชั้นได้ เป็นต้น ซึ่งเรียกว่า ค่าความดันต่ำที่สุดที่ยอมให้ได้ โดยในแต่ละพื้นที่ก็อาจจะไม่เท่ากัน หรือ อาจจะต้องพิจารณาค่าความดันในกรณีที่ใช้สำหรับการดับเพลิงด้วย นอกจากค่าความดันต่ำที่สุดที่ยอมให้ได้ แล้วอาจจะมีการกำหนด ค่าความดันสูงที่สุดที่ยอมให้ได้ เพื่อป้องกันท่อแตก และเป็นการสิ้นเปลืองโดยใช้เหตุอีกด้วย

3) ขนาดท่อที่เล็กที่สุด

ขนาดท่อที่เล็กที่สุดต้องสามารถส่งจ่ายน้ำในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการใช้น้ำ และจะต้องมีความดันเพียงพอที่จะส่งน้ำไปยังผู้ใช้น้ำได้ ดังนั้นการกำหนดขนาดท่อที่เล็กที่สุดที่ยอมให้ใช้ในระบบท่อได้ ต้องคำนึงถึงความต้องการใช้น้ำของพื้นที่จ่ายน้ำและความดันใช้งานเป็นหลัก ซึ่งขนาดท่อดังกล่าวกำหนดโดยหน่วยงานของทางราชการ

4) ความเร็ว และ สภาพการไหลในท่อ

ระบบท่อจะต้องออกแบบให้ความเร็วการไหลในท่อไม่ต่ำ หรือ สูงเกินไป ในกรณีที่ระบบท่อกมีความเร็วต่ำเกินไปนั้นจะทำให้เกิดการตกตะกอนในท่อ และยังเป็นการชี้ให้เห็นว่า ขนาดท่อที่ใช้้นั้นใหญ่เกินไป ส่วนกรณีที่ความเร็วในท่อสูงเกินไป ก็จะทำให้เกิดการกัดเซาะผิวด้านในของท่อซึ่งอาจจะทำให้ท่อรั่วได้

5.3 การหาค่าใช้จ่ายของระบบท่อ

ค่าใช้จ่ายหรือราคาของระบบท่อในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะค่าใช้จ่ายของท่อที่นำมาเชื่อมต่อกันเท่านั้น โดยทั่วไปตามท้องตลาดจะคิดราคาท่อตามความยาว และท่อแต่ละขนาดก็มีราคาแตกต่างกันอีกด้วย ซึ่งขนาดท่อที่ผลิตมาขายนั้นเป็นค่าไม่ต่อเนื่อง (discrete) สำหรับการศึกษาครั้งนี้จะถือว่า ขนาดท่อ และ ราคาท่อต่อหน่วยความยาว เป็นตัวแปรแบบต่อเนื่อง (continuous variables) ดังนั้นค่าใช้จ่ายของระบบท่อจึงขึ้นอยู่กับขนาดท่อและความยาวของท่อที่นำมาต่อเชื่อมกัน โดยมีสมการ ดังนี้

$$C = m(L_1D_1 + L_2D_2 + \dots + L_nD_n) \quad (5.1)$$

เมื่อ C เป็นค่าใช้จ่ายของระบบท่อ (total cost) ; บาท

m คือค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของท่อ ; บาท/ม². (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก.)

$D_1, D_2, \dots, D_n$ คือเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อที่ 1, 2, ..., n ตามลำดับ ; เมตร

$L_1, L_2, \dots, L_n$ คือความยาวของท่อที่ 1, 2, ..., n ตามลำดับ ; เมตร.

สมการที่ (5.1) เป็นค่าประมาณในการหาค่าใช้จ่ายของระบบท่อ เนื่องจากรูปของสมการนั้นง่ายต่อการหาค่าอนุพันธ์ของ C เทียบกับ D_i ในวิธี Calculus Method (Analytical Method) อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายของระบบท่อจากสมการที่ (5.1) ก็สามารถนำไปใช้ในการหาระบบท่อที่ถูกต้องที่สุดได้

5.4 วิธีลองผิดลองถูก (Trial and error)

วิธีลองผิดลองถูกก็คล้ายกับวิธีแก้ปัญหาค่าไหลในระบบท่อนั้นเอง ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจได้ง่ายจะขออธิบายวิธีนี้โดยใช้ตัวอย่างในหัวข้อที่ 3.4 อีกครั้งหนึ่ง โดยมีข้อมูลดังนี้

$z_i = [60, 55, 50, 53] \text{ m.}$ โดยที่ $i = a, b, c, d$

$L_i = [100, 80, 120, 75, 140] \text{ m.}$ โดยที่ $i = 1, 2, \dots, 5$

$f_i = 0.02$

ความต้องการน้ำ $Q_i = [0.3, 0.4, 0.3] \text{ cms.}$ โดยที่ $i = b, c, d$

ความดันที่จุดจ่ายน้ำ $H_i = [15, 13, 15] \text{ m.}$ โดยที่ $i = b, c, d$

ความสูงของถังสูง $H_a = 15 \text{ m.}$ และ $m = 20 \text{ Baht/m}^2$

Step ที่ 1 เขียน diagram ของระบบท่อดังรูปที่ 4.4

Step ที่ 2 สมมติขนาดท่อทั้งหมด D_i และหาค่าใช้จ่ายของระบบท่อ (Cost) จากสมการที่ (5.1)

Step ที่ 3 แก้สมการ governing eqs. (สมการที่ 4.7 ถึง 4.17) ในหัวข้อที่ 4.4 ซึ่งมีดังนี้

สมการต่อเนื่องที่ทุกๆ node:

$$Q_a - Q_1 - Q_5 - Q_4 = 0 \quad (5.2)$$

$$Q_1 - Q_b - Q_2 = 0 \quad (5.3)$$

$$Q_2 - Q_c + Q_3 + Q_5 = 0 \quad (5.4)$$

$$Q_4 - Q_3 - Q_d = 0 \quad (5.5)$$

สมการพลังงานภายในวงรอบปิดที่ทุกๆ basic loop:

$$h_1 + h_2 - h_5 = 0 \quad (5.6)$$

$$h_5 - h_3 - h_4 = 0 \quad (5.7)$$

สมการหา head loss ที่ทุกๆท่อ:

$$h_1 = \left(\frac{8f_1}{g\pi^2} \right) \frac{L_1}{D_1^5} Q_1 |Q_1| \quad (5.8)$$

$$h_2 = \left(\frac{8f_2}{g\pi^2}\right) \frac{L_2}{D_2^5} Q_2 |Q_2| \quad (5.9)$$

$$h_3 = \left(\frac{8f_3}{g\pi^2}\right) \frac{L_3}{D_3^5} Q_3 |Q_3| \quad (5.10)$$

$$h_4 = \left(\frac{8f_4}{g\pi^2}\right) \frac{L_4}{D_4^5} Q_4 |Q_4| \quad (5.11)$$

$$h_5 = \left(\frac{8f_5}{g\pi^2}\right) \frac{L_5}{D_5^5} Q_5 |Q_5| \quad (5.12)$$

Step ที่ 4 หาค่าความดันที่จุดจ่าย b,c และ d จากสมการพลังงาน (สมการที่ 4.18 ถึง 4.20) และตรวจสอบความดันที่จุดจ่ายน้ำว่าอยู่ในข้อกำหนดหรือไม่ ในที่นี้คือ ที่จุดจ่ายน้ำ a ต้องมีค่าความดันไม่ต่ำกว่า 15 เมตร ที่จุด b ค่าความดันต้องไม่ต่ำกว่า 13 เมตร และที่จุด d ต้องมีค่าความดันไม่ต่ำกว่า 15 เมตร ทั้งนี้ความดันที่จุดจ่ายน้ำจะต้องไม่เกิน 25 เมตร

สมการพลังงานจากแหล่งจ่ายน้ำไปยังจุดจ่ายน้ำ

$$H_a + z_a = H_b + z_b + h_1 \quad (5.13)$$

$$H_a + z_a = H_o + z_o + h_5 \quad (5.14)$$

$$H_a + z_a = H_d + z_d + h_4 \quad (5.15)$$

Step ที่ 5 ทำซ้ำตั้งแต่ step ที่ 2 ถึง step ที่ 4 เพื่อหาค่า D_i และ Cost หลายๆค่า

เมื่อทำการสมมติขนาดท่อหลายๆชุดแล้วทำการคำนวณได้ค่าแสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าขนาดท่อ, Cost และตรวจสอบค่าความดันที่จุดจ่าย

No.	D_i , m.					Cost , Baht	H_i check ?
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5		
1	0.42	0.25	0.28	0.34	0.25	3122	yes
2	0.35	0.25	0.24	0.28	0.3	2936	yes
3	0.3	0.3	0.15	0.4	0.31	2908	no
4	0.35	0.3	0.15	0.3	0.31	2858	yes
5	0.35	0.28	0.15	0.28	0.25	2628	yes

หมายเหตุ ในคอลัมน์ H_i check ? นั้น yes หมายความว่า ระบบท่อดังกล่าวมีค่าความดันที่จุดจ่าย (H_i) ทุกจุดอยู่ในข้อกำหนด แต่ถ้า no หมายความว่า มีค่าความดันอย่างน้อย 1 จุดไม่อยู่ในข้อกำหนด

Step ที่ 6 เลือกชุด D_i ที่ให้ Cost ต่ำที่สุดและค่าความดันผ่านข้อกำหนด

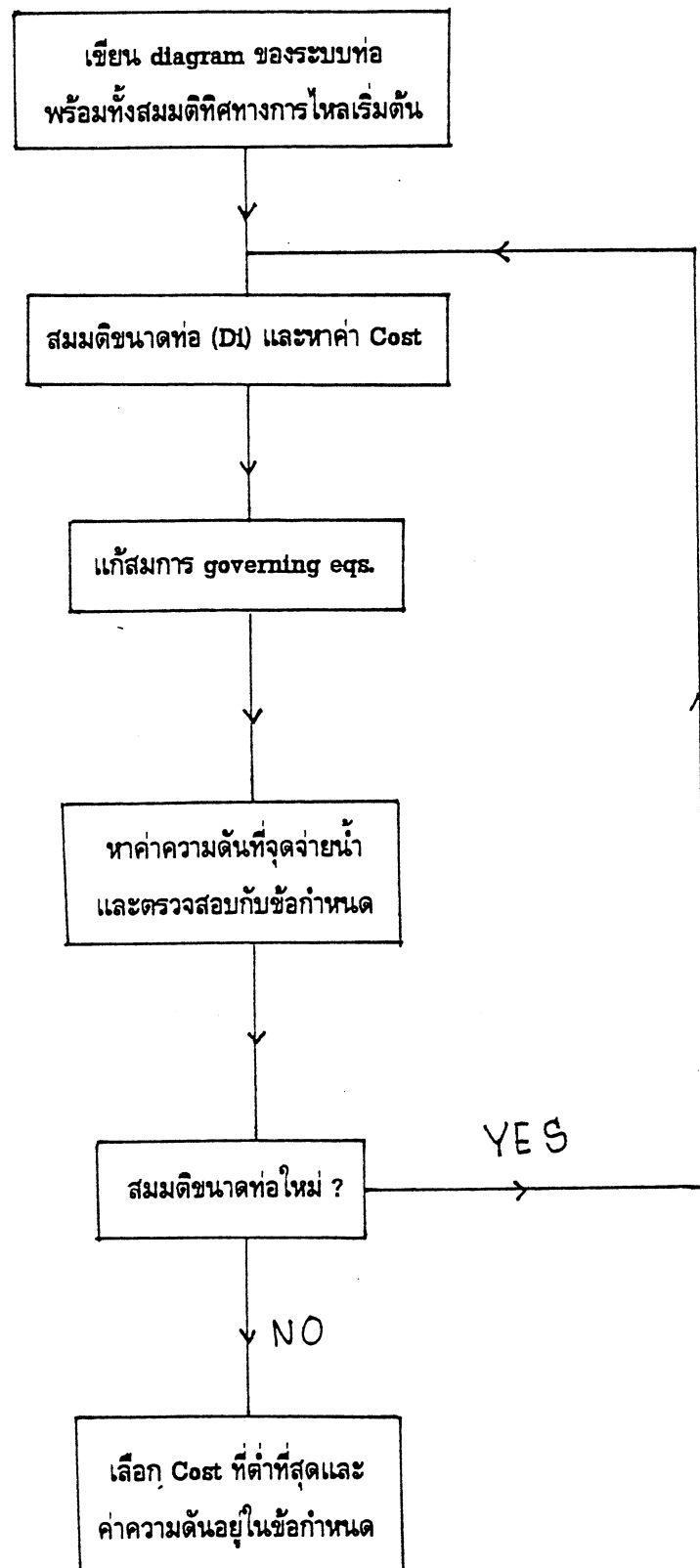
จากตารางที่ 5.1 จะได้ขนาดท่อที่ให้ Cost ต่ำที่สุดดังนี้คือ $D_1 = [0.35, 0.28, 0.15, 0.28, 0.25] \text{ m}$. โดยให้ค่า cost เท่ากับ 2628 บาท จะเห็นได้ว่าขนาดท่อที่คำนวณออกมาได้นั้นอาจจะไม่มีขายในท้องตลาด เพราะในท้องตลาดขนาดท่อจะมีค่าเป็น discrete เช่น 1 นิ้ว (0.025 ม.) 2 นิ้ว (0.05 ม.) เป็นต้น แต่ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่แล้วว่า เราถือว่า ขนาดท่อเป็นตัวแปรแบบต่อเนื่อง ทั้งนี้เพื่อสามารถเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของระบบท่อที่ได้จากวิธี Analytical Method ได้ เพราะขนาดท่อที่ได้จากวิธี Analytical Method นั้นเป็นตัวแปรแบบต่อเนื่อง และถ้าต้องการนำระบบท่อที่ออกแบบไปก่อสร้างก็สามารถใช้ขนาดท่อที่มีขายในท้องตลาด ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดท่อที่ได้จากการออกแบบ

จากขั้นตอนทั้ง 6 ของวิธีลองผิดลองถูกสามารถนำมาเขียนเป็นขั้นตอนทั่วไปได้ดังรูปที่ 5.1

5.5 วิธีโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Programming Approaches)

จากการพัฒนาความรู้เกี่ยวกับการหาค่าที่สุด (ค่าสูงสุดหรือค่าต่ำสุด) โดยใช้วิธีโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ จึงทำให้มีการนำวิธีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการหาระบบท่อที่ถูกที่สุด โดยเริ่มนำวิธีโปรแกรมเชิงเส้นตรง (Linear Programming Method) มาใช้ในการหาระบบท่อที่ถูกที่สุดสำหรับระบบท่อแยก (Branching Systems) เช่น Gupta (1969), Calhoun (1971) และ Gupta et al. (1972) ในขณะเดียวกันก็ได้มีการใช้วิธี Nonlinear Programming (NLP) แก้ปัญหาระบบท่อที่เป็นวงรอบปิด (Looped Systems) เช่น Jacoby (1968), Cembrowicz and Harrington (1973) และ Lam (1973) เป็นต้น และก็ได้พัฒนาวิธี NLP นี้ให้ดียิ่งขึ้นเป็นลำดับ ต่อมาจึงได้นำวิธี Linear Programming Gradient Method หรือ LPG ซึ่งเสนอโดย Alperovits and Shamir (1977) มาใช้สำหรับระบบท่อแยกและระบบท่อที่เป็นวงรอบปิด หลังจากนั้นก็มีผู้สนใจนำวิธีดังกล่าวไปปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้น เช่น Goulter และ คณะ (1986), Fujiwara (1987) และ Kessler and Shamir (1989) อย่างไรก็ตามในปี 1992 Bhawe and Sonak (1992) ได้วิเคราะห์วิธี LPG แล้วพบว่า คำตอบที่ได้จากวิธีดังกล่าวไม่แน่นอน และไม่ใช้คำตอบที่ถูกที่สุดจริงๆ ต่อมา Eiger และคณะ (1994) ได้เสนอว่า วิธีมาตรฐานที่ใช้ในการหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันไม่สามารถนำมาใช้กับการหาระบบท่อที่ถูกที่สุดได้ จะต้องแยกปัญหออกเป็น 2 ส่วนส่วนหนึ่งแก้ปัญหาแบบ NLP และ อีกส่วนหนึ่งแก้ปัญหาแบบ LP ซึ่งจะใช้การคำนวณซ้ำไปซ้ำมาเพื่อให้คำตอบที่ได้ (Local Minimum Solutions) ใกล้เคียงกับคำตอบที่ต่ำที่สุดจริงๆ (Global Minimum Solution) ซึ่งต่อมา Loganathan และคณะ (1995) ก็ให้หลักการคล้ายๆกันในการหาระบบที่ถูกที่สุดจริงๆ

ในปี 1995 Walski ได้สรุปถึงสาเหตุที่วิธีโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ที่มีผู้นำไปหาระบบท่อที่ถูกที่สุดไม่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางว่า ระบบท่อเป็นระบบที่มีความซับซ้อนมากตัวแปรที่เกี่ยวข้องมีมากมาย ตั้งแต่ขนาดท่อ ขนาดถังสูง ขนาดเครื่องสูบน้ำ และอื่นๆอีกมาก นอกจากนี้ผลที่ได้จากวิธีดังกล่าวยังนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้ยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาการหาระบบท่อที่ถูกที่สุดมีหลายระดับ เช่น ระดับการวางแผนแม่บท (Master plan), การออกแบบระบบส่งน้ำหลักเบื้องต้น (transmission main preliminary design)



รูปที่ 5.1 ขั้นตอนของวิธีลองผิดลองถูก

การออกแบบระบบย่อย (subdivision layout) เป็นต้น ดังนั้นวิธีโปรแกรมทางคณิตศาสตร์จึงต้องพัฒนาต่อไป เพื่อให้นำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ และเหมาะสมกับระดับของระบบท่อที่ต้องการ

5.6 วิธี Analytical Method

การแก้ปัญหาระบบท่อ (solving pipe network) นำมาสู่การออกแบบระบบท่อที่ถูกต้องด้วยวิธีลองผิดลองถูก และจากวิธีลองผิดลองถูกก็นำมาสู่วิธี Analytical Method

วิธี Analytical Method ที่เสนอในการศึกษาครั้งนี้คล้ายกับวิธีลองผิดลองถูก ซึ่งต่างก็มีพื้นฐานมาจากการแก้ปัญหาระบบท่อในแบบที่ 4 แต่ก็มีข้อแตกต่างกันที่เห็นได้ชัด 2 ข้อคือ

1. ค่าความดันที่จุดจ่ายน้ำที่คำนวณได้จากวิธีลองผิดลองถูกจะขึ้นอยู่กับขนาดท่อที่สมมติ แต่ค่าความดันที่จุดจ่ายน้ำในวิธี Analytical Method จะเท่ากับค่าที่เรากำหนดขึ้นและขนาดท่อมักขึ้นอยู่กับค่าความดันที่จุดจ่ายน้ำที่กำหนด

2. ขนาดท่อในวิธีลองผิดลองถูกไม่ขึ้นแก่กัน แต่ในวิธี Analytical Method ขนาดท่อส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับขนาดท่อบางตัว

วิธี Analytical Method มีหลักการใหญ่ๆ ดังนี้คือ

- 1) ค่าความดันที่จุดจ่ายน้ำเป็นค่าที่เรากำหนดขึ้น ซึ่งอาจจะใช้ค่าความดันที่ต่ำที่สุดที่ยอมให้ที่หน่วยงานของราชการกำหนดขึ้น
- 2) จำนวนท่อที่สมมติจะเท่ากับจำนวน basic loop ไม่ต้องสมมติขนาดท่อทั้งหมด

วิธีนี้เริ่มด้วยการเขียน diagram ของระบบท่อพร้อมทั้งสมมติทิศทางการไหลเริ่มต้น และเขียน governing eqs. เช่นเดียวกับวิธี ลองผิดลองถูก แต่วิธี Analytical Method นั้นจะกำหนดค่าความดันที่จุดจ่ายน้ำ (H_i) ที่ต้องการ เช่น $H_i = [15, 13, 15]$ m. โดยที่ $i = b, c, d$ เป็นต้น (ดูในหัวข้อที่ 5.4) ซึ่งจะแตกต่างจากวิธีลองผิดลองถูกซึ่งให้ค่าความดันที่จุดจ่ายเป็นตัวแปร ต่อมาก็นำค่า H_i ไปหาการสูญเสียแรงดันในแต่ละท่อ (h_f) ได้ หลังจากนั้นให้สมมติขนาดท่อบางท่อ และเมื่อแก้สมการต่างๆ แล้วก็จะหาค่าตัวแปรต่างๆ ออกมาได้ รวมทั้งขนาดท่อที่ให้ Cost ต่ำที่สุดด้วย วิธีนี้เหมาะสำหรับระบบท่อที่ไม่ใหญ่เกินไป เช่น ระบบท่อของหมู่บ้านจัดสรร เป็นต้น

วิธี Analytical Method นั้นแบ่งได้เป็น 2 วิธีย่อยคือ Brute force Method และ วิธี Calculus ซึ่งจะอธิบายโดยละเอียดในบทต่อไป