

การออกแบบโครงข่ายระบบท่อจ่ายน้ำที่เหมาะสม Optimal Design of water Distribution Network system

อัครเดช สินธุภักดิ์ และ ไพบุญ พิธพันธุ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร. 3269987, โทรสาร 3269053

Akradech Sindhuphak and Paiboon Pittapunt

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut ' institute of Technology Ladkrabang

Chalongkrung Rd. Ladkrabang Bangkok

Tel : 3269987, Fax : 3269053

บทคัดย่อ

บทความนี้จะเสนอวิธีที่เหมาะสมในการออกแบบระบบการจ่ายน้ำแบบโครงข่าย ซึ่งระบบประกอบด้วยโครงข่ายของท่อขนาดต่างๆ ซึ่งสามารถส่งปริมาณน้ำที่ต้องการจากแหล่งจ่าย (source) ด้วยแรงดันที่พอเพียงไปยังผู้บริโภค ซึ่งมีวัตถุประสงค์ให้ราคาของระบบท่อดีมีค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมที่สุดระบบท่อใช้ตามท้องตลาด ด้วยวิธีการ fixed flow rate ในแต่ละ link ภายใต้ความต้องการน้ำในแต่ละ node เมื่อรู้ flow rate ในแต่ละ link สมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไขบังคับก็สามารถจัดให้อยู่ในรูปของ linear ดังนั้นปัญหานี้จึงแก้ด้วยวิธี linear programming เพื่อให้โครงข่ายของระบบท่อดีมีราคาที่เหมาะสม ขั้นตอนในการแก้ปัญหาจะอธิบายด้วยการกำหนดแรงดันที่แหล่งจ่ายน้ำ (source node) 1 แหล่ง และปริมาณความต้องการน้ำที่แต่ละ node ประกอบด้วย 5 node, 2 loops และ 7 links ซึ่งจะแสดงเป็นตัวอย่าง ในการแก้ปัญหานี้จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ

Abstract

This paper presents a method for optimizing the design of a water distribution network system (WDNS). The system is a pipeline network, which delivers known demands from sources to consumers with adequate pressures. The objective that is initially considered for pipe network design is the minimization of the total capital cost of pipe. Since the flow in the links are known, the objective function and constraints can be formulated in the form of linear, thus the network can be optimized by linear programming. The procedure is illustrated through a one-source, 5-demand node, two loops WDNS, 7- links, by which the method was implemented in computer program. Solved examples are presented.

บทนำ

ระบบการจ่ายน้ำโดยปกติหมายถึงแหล่งจ่ายน้ำ(source)กับระบบท่อซึ่งทำหน้าที่นำน้ำจากแหล่งจ่ายไปยังผู้บริโภค นอกจากนั้นระบบท่อแล้ว อุปกรณ์อื่นก็จำเป็นเช่น pump, valve และ reservoirs ซึ่งล้วนแต่มีราคาแพงต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมากเพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายเท่าที่จะทำได้จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบระบบท่อโดยเฉพาะระบบท่อที่อยู่ในเมืองใหญ่หรือเทศบาลเมืองก็ตามย่อมมีความต้องการน้ำที่สะอาดและพอเพียงทั้งในด้านปริมาณและแรงดัน การออกแบบระบบท่อประเภทที่ไม่เหมาะสมไม่ถูกต้องจะเกิดปัญหาปริมาณและแรงดันไม่พอเพียงและยังเกิดปัญหาท่อแตกและท่อรั่ว ซึ่งต้องปิดการจ่ายน้ำบางช่วงเพื่อซ่อมแซมทำให้แรงดันและปริมาณน้ำในระบบลดลง เพราะแหล่งจ่ายต้องลดการสูบน้ำส่ง

ระบบท่อการจ่ายน้ำที่เป็น loop ได้ดึงดูดความสนใจของนักวิจัยมา มากกว่า 2 ทศวรรษ อย่างไรก็ตามมีปัจจัยที่รวมอยู่ในโครงข่ายของการจ่ายน้ำมากและซับซ้อนเกินไปที่จะทำให้คนหนึ่งคนเดียวได้รับความพอใจอย่างสมบูรณ์ในการออกแบบที่เหมาะสม [Licher, 1979; Walski, 1985]. ทั้งๆที่มีข้อจำกัดมาก นักวิจัยก็ยังพยายามที่จะพัฒนารูปแบบต่างๆเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมของโครงข่ายการจ่ายน้ำที่เป็น loop วิธีเหล่านี้สามารถจำแนกอย่างกว้างๆเป็น 2 กลุ่มคือ 1. วิธีที่ทำให้เส้นผ่าศูนย์กลางท่อเป็นแบบต่อเนื่อง(continuous-diameter) 2. วิธีที่ใช้ท่อตามท้องตลาดซึ่งเส้นผ่าศูนย์กลางท่อเป็นแบบแยก (discrete-diameter)

วิธีที่ทำให้เส้นผ่าศูนย์กลางท่อเป็นแบบต่อเนื่อง(continuous-diameter) ได้จัดการให้เส้นผ่าศูนย์กลางท่อเป็นตัวแปรต่อเนื่อง รูปแบบของ optimization จึงเป็น nonlinear และประกอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เป็น nonlinear และสมการเงื่อนไขบังคับเป็นทั้งแบบ linear และ nonlinear

Jacoby[1968], Lai and Schaake[1969], and Watanatada[1973] ได้แก้ปัญหารูปแบบของ optimization โดยการใช้ nonlinear programming(NPL). Alperovits และ Shamir[1977] ได้แก้ปัญหากับ

การใช้วิธี linear programming gradient และ Quindry et al [1981] แก้ปัญหาด้วยการใช้เทคนิค linear programming (LP)

2. รูปแบบสมการที่เหมาะสม (Optimization Model Formulation)

ในการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบการจ่ายน้ำแบบโครงข่าย ซึ่งโครงข่ายการจ่ายน้ำจะต่อกันเป็น n node และ m loop ในระหว่าง node จะต่อกันด้วยท่อขนาดต่างๆเรียกว่า link โดยกำหนดให้ node 1 เป็นแหล่งจ่ายน้ำเพียงแหล่งเดียวโดยกำหนดให้ L_i, q_i, h_i แทนความยาวท่อ อัตราการไหล หัวน้ำสูญเสียของท่อ i ตามลำดับ และ b_k แทนความต้องการน้ำที่ node k, h_s แทนแรงดันที่แหล่งจ่าย และ h_k แทนแรงดันน้อยที่สุดที่ยอมให้ได้ที่ node k สมมุติขนาดท่อที่หาได้อยู่ในกลุ่ม $\{D_1, D_2, \dots, D_s\}$ และอยู่ในกลุ่มของราคาต่อหน่วยความยาวเป็น $\{c_1, c_2, \dots, c_s\}$ ฉะนั้นสิ่งที่ต้องการคือ หาขนาดท่อและความยาวของท่อแต่ละขนาดในแต่ละ Link เพื่อให้ได้แรงดันตามต้องการในแต่ละ node ขณะเดียวกันราคาของระบบก็จะต้องต่ำสุดด้วย

ดังนั้นในแต่ละ link i ($i=1, \dots, t$) จึงแทนด้วยขนาดท่อต่างๆได้ตามความเหมาะสม ซึ่งราคาท่อทั้งหมดกำหนดได้ดังนี้

$$\sum_{j=1}^s c_j x_{ij} \quad (1)$$

ซึ่ง c_j เป็นราคาของท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง D_j และ x_{ij} เป็นความยาวของท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง D_j ใน link i

เพราะฉะนั้นราคาต่ำสุดของระบบท่อเป็น

$$\text{Min } f(x_{11}, \dots, x_{1s}, \dots, x_{ts}) = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^s c_j x_{ij} \quad (2)$$

โดยอยู่ภายใต้เงื่อนไขบังคับดังต่อไปนี้

2.1 ที่แต่ละ node ใด ๆ ในโครงข่าย ผลรวมของอัตราการไหลเข้า node เท่ากับผลรวมของอัตราการไหลออกจาก node นั้น ๆ

$$\sum_{i \in \text{in}(k)} q_i - \sum_{i \in \text{out}(k)} q_i = b_k \quad (k = 1, \dots, n) \quad (3)$$

ซึ่ง q_i คืออัตราการไหลในท่อ i, m^3/s ; b_k เป็นความต้องการน้ำบริเวณใกล้เคียงกับ node k, m^3/s ; in(k) และ out(k) คือชุดของ link ที่ต่อเข้าและออกจาก node k

2.2 แรงดันต่ำสุดที่แต่ละ node k

$$\sum_{i \in r(k)} \sigma \sum_{j=1}^s s_{ij} x_{ij} \leq h_s - h_k + z_s - z_k \quad (k=1, \dots, n) \quad (4)$$

ซึ่ง s_{ij} เป็น slope ของ hydraulic grade line (การเสียดเนื่องจากความฝืดต่อหนึ่งหน่วยความยาว) ของท่อเส้นผ่าศูนย์กลาง D_j ใน link i; x_{ij} เป็นความยาวของท่อเส้นผ่าศูนย์กลาง D_j ใน link i; h_s เป็นแรงดันที่แหล่งจ่าย; h_k เป็นแรงดันต่ำสุดที่ยอมได้ที่ node k; z_s เป็นความสูงของ node ที่เป็นแหล่งจ่ายจากระดับ datum line; z_k เป็นความสูงของ node k ใดๆ จากระดับ datum line, r(k)

เป็นชุดของ link ซึ่งเชื่อมระหว่าง source node กับ node k และ $\sigma = +1$ หมายถึงทิศทางการไหลในแต่ละ link i มีทิศทางเดียวกัน ถ้าตรงข้าม $\sigma = -1$

2.3 สมดุลย์ลูป (loop balance)

$$\sum_{i \in \text{loop}(p)} \sigma \sum_{j=1}^s s_{ij} x_{ij} = 0 \quad (l=1, \dots, m) \quad (5)$$

ซึ่ง s_{ij} เป็น slope ของ hydraulic grade line ของท่อเส้นผ่าศูนย์กลาง D_j ใน link i; x_{ij} เป็นความยาวของท่อเส้นผ่าศูนย์กลาง D_j ใน link i; $\sigma = +$ เมื่อทิศทางการไหลในแต่ละ link ใน loop p มีทิศทางเดียวกัน ถ้าตรงข้าม $\sigma = -1$; loop(p) เป็นชุดของ link ใน loop p

2.4 เงื่อนไขความยาว (Length constraints)

$$\sum_{j=1}^s x_{ij} = l_i \quad (i = 1, \dots, t) \quad (6)$$

ทั้งนี้เพื่อให้ความยาวของท่อขนาดต่างๆที่ต่อกันอยู่ใน link i เมื่อต่อกันแล้วมีความยาวเท่ากับ ความยาวของ link i

2.5 สมการ Hazen-Williams

สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเสียดในท่อกับอัตราการไหลที่นิยมใช้ในการออกแบบระบบท่อแบบโครงข่ายซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$s_{ij} = (a \cdot q_i / c)^\lambda D_j^{-\alpha} \quad (i = 1, \dots, t, j = 1, \dots, s) \quad (7)$$

ซึ่ง s_{ij} เป็น slope ของ hydraulic grade line (การเสียดเนื่องจากความฝืดต่อหนึ่งหน่วยความยาว); $a = 1/3.587 \cdot 10^{-9}$ (เมื่อ q_i เป็น m^3/s และ D_j เป็น mm.; q_i เป็นอัตราการไหลผ่านท่อ D_j , m^3/s ; c เป็นสัมประสิทธิ์ของสมการ Hazen-Williams ขึ้นกับชนิดของท่อ $\lambda = 1.85$, $\alpha = 4.87$

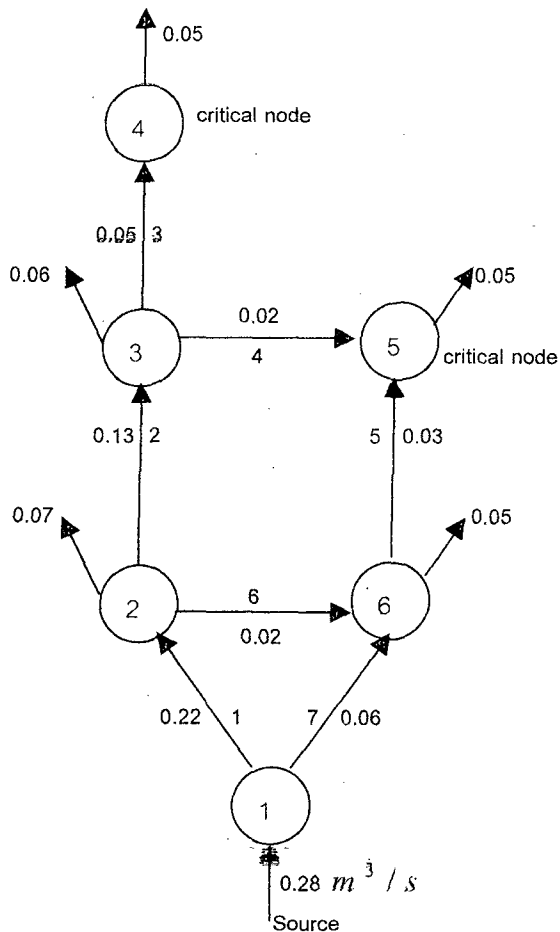
3. ตัวอย่างการออกแบบโครงข่ายอย่างง่ายของระบบท่อมี่ชั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 เลือกใช้ท่อที่มีอยู่ตามท้องตลาด

ตารางที่ 1

ท่อซีเมนไยหิน diameter ((mm.))	ราคาต่อบาท / เมตร (ชั้น 20)
100	59
150	98
200	166
250	229
300	324
400	614
500	1800

3.2 สร้างโครงข่ายตามรูปที่ 1 ประกอบด้วย 7 link และ 6 node จัดเป็น 2 loop แต่ละ links ยาว 1000 m.



รูปที่ 1 โครงข่ายการจ่ายน้ำแบบ 2 loop, 6 node, 7 links

3.3 กำหนดให้ node 1 เป็นแหล่งจ่าย (source node) ด้วยระดับ 22 m. และ node 4, node 5 เป็น critical node มีแรงดันอย่างน้อย 5 m.

3.4 กำหนดให้ node 2, node 3, node 4, node 5, node 6 เป็นจุดจ่ายน้ำ (demand node) โดยมีความต้องการน้ำที่จุดจ่าย 0.07, 0.06, 0.05, 0.05, 0.05 m^3/s ตามลำดับ ซึ่งเป็นความต้องการใช้น้ำสูงสุด (peak hour) ในรอบหนึ่งวัน ส่วนความต้องการใช้น้ำต่ำสุด (off peak) ในที่นี้กำหนดให้น้อยกว่าค่าสูงสุด 50 %

3.5 กำหนดอัตราการไหลของน้ำให้ไหลไปตามเส้นทางในโครงข่ายที่สร้างขึ้นโดยให้สอดคล้องกับความต้องการน้ำที่จุดจ่ายต่างเช่น link 1 มีน้ำไหลผ่าน 0.22 m^3/s , link 7 0.06 m^3/s

3.6 เป็นการคัดเลือกท่อจากตารางที่ 1 เข้ามาใช้ในแต่ละ Link ควรใช้ท่อขนาดเท่าไร ก็ขนาดทั้งนี้ต้องคำนึงถึงความเร็วของน้ำที่ไหลในท่อด้วย ถ้าไหลเร็วเกินไปจะทำให้เกิดการสึกกร่อนของท่อเร็ว และถ้าไหลช้า จะเกิดการตกตะกอน ดังนั้นความเร็วของน้ำควรอยู่ในช่วง 0.4 – 5.0 เมตรต่อวินาที ซึ่งจะทำให้ตัวแปรในการตัดสินใจน้อยลง

3.7 ประยุกต์สมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไขบังคับให้เหมาะสมกับโครงข่ายที่สร้างขึ้น

3.8 แก้ปัญหาด้วยวิธี linear programming

ตารางที่ 2 แสดงอัตราการไหลและขนาดท่อที่เลือกใช้

แต่ละ Link

Link	อัตราการไหล (m^3/s)	ขนาดท่อที่เลือกใช้ diameter(mm.)
1	0.22	250,300,400,500
2	0.13	200,300,400
3	0.05	150,200,250
4	0.02	100,150
5	0.03	100,150,200
6	0.02	100,150
7	0.06	150,200,250,300

ตารางที่ 3 แสดงความยาว Link และความต้องการน้ำที่จุดจ่าย

Link	ความยาว (m.)	Node (จุดจ่ายน้ำ)	ความต้องการ (m^3/s)
1	1000	1	0.28
2	1000	2	0.07
3	1000	3	0.06
4	1000	4	0.05
5	1000	5	0.05
6	1000	6	0.05
7	1000	-	-

4. ผลลัพธ์แสดงตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงความยาวท่อแต่ละขนาดที่ใช้ในโครงข่าย

Link	ขนาดท่อที่ใช้ เส้นผ่าศูนย์กลาง(mm.)	ความยาวท่อ (m.)
1	400	1000
2	400	260.87
	300	739.13
3	250	1000
4	150	991.18
	100	8.82
5	200	1000
6	150	938.27
	100	61.73
7	250	288.46
	200	711.54

ราคาท่อทั้งหมดในโครงข่าย = 1,786,074.00 บาท

5. สรุป

การออกแบบระบบท่อด้วยการกำหนดอัตราการไหลหรือเป็นการบังคับให้อัตราการไหลไหลไปตามเส้นทางและให้สอดคล้องกับความต้องการน้ำของผู้บริโภคตามจุดจ่ายต่างๆแล้วเลือกขนาดท่อที่เหมาะสม

จากห้องตลาดมาใช้ในแต่ละ link ซึ่งหลังจากรันโปรแกรมออกมาแล้ว ผลลัพธ์ที่ได้คือความยาวท่อแต่ละขนาดในแต่ละ link แยกได้อย่างชัดเจน ระบบท่อที่ได้สามารถส่งน้ำได้ตามความต้องการของผู้บริโภค และได้แรงดันที่ปลายทางตามที่ต้องการทำให้ระบบท่อบริโภคเพียงทุกจุดจ่ายน้ำ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jacoby, S.L.S. (1968) "Design of Optimal Hydraulic Network." J. of the hydraulic. Div. Am.Soc.Civ.Eng., 94(HY) 3,641-661.
- [2] Watanatada, T., (1973) "Least cost design of water distribution system." J. hydraulic. Div. Am. Soc. Civ. Eng., 99(HY)9, 1497-1513
- [3] Alperovits, E., and Shamir, U. (1977). "Design of optimal water distribution system." Water Resour. Res., 13(6), 885-900.
- [4] Quindry, G., E.D. Brill, and J.C. Liebman, (1981) "Optimization of looped water distribution system." J. Environ. Eng. Div. Am.Soc.Civ.Eng., 665-679
- [5] Su, Y., Mays, L., Duan, N., and Lansey, K. (1987) "Reliability-based optimization model for water distribution system." J. Hydr. Engrg., ASCE, 113(12), 1539-1556.
- [6] Lansey, K., and Mays, L. (1989). "Optimization model for water distribution system design." J. Hydr. Engrg., ASCE, 115 (10), 1401-1418
- [7] Morgan, D.R., and I.C. Goulter, (1985) "Optimal urban water distribution design." Water Resour. Res., 21(5), 642-652
- [8] Orth, H. (1968). "Model-based Design of Water Distribution and Sewage systems." Wiley Interscience publication, chichester.