พระบรมราชูปถัมภ์ สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

วิทยาการและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แนวความคิดเกี่ยวกับปริมาณน้ำสูญเสีย

จากการที่การประปานครหลวงได้ดำเนินกิจการประปาตามกระบวนการผลิต การสูบจ่ายน้ำ และบริการจัดจำหน่ายสู่ผู้ใช้น้ำ มีคำจำกัดความของคำว่าปริมาณน้ำสูญเสียในปัจจุบัน เป็น 2 แนวทาง คือ

แนวทางแรก แบ่งเป็น น้ำที่เรียกเก็บเงินได้ (Accounted for Water) และน้ำสูญเสีย (Unaccounted for Water) หรือน้ำที่เก็บเงินไม่ได้

แนวทางที่สอง แบ่งเป็น น้ำใช้ประโยชน์ (Effective Water) และน้ำที่ไม่ใช้ประโยชน์ (Non-effective Water)

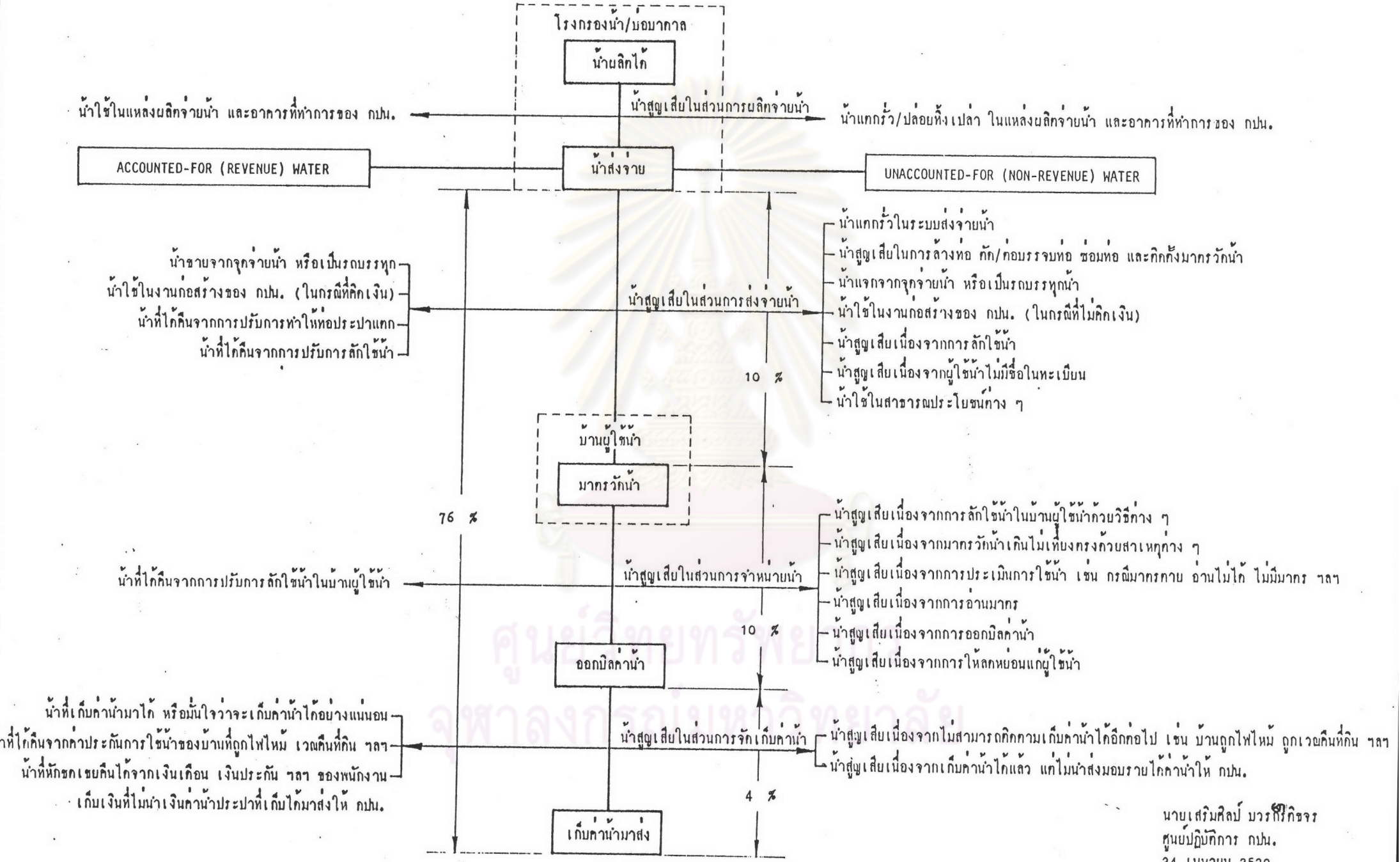
ในการศึกษาวิจัยนี้จะได้ศึกษาในแนวทางแรก ซึ่งปริมาณน้ำสูญเสียในระบบแสดงได้ตามรูปที่ 2.1

เป้าหมายเกี่ยวกับปริมาณน้ำสูญเสียที่การประปานครหลวงได้ตั้งไว้ใน ปี พ.ศ. 2543 คือ ร้อยละ 25 ได้แก่ น้ำสูญเสียในส่วนการผลิตจ่ายน้ำ น้ำสูญเสียในส่วนการส่งจ่ายน้ำ น้ำสูญเสียในส่วนของมาตรวัดน้ำ และน้ำสูญเสียในส่วนการจัดเก็บค่าน้ำ โดยทั้งหมดนี้ได้กำหนดประเภทของการสูญเสียเป็น 3 ประเภท คือ

1. น้ำสูญเสียในระบบท่อ (Leakage thru Pipe)
2. น้ำสูญเสียเนื่องจากมาตรวัดน้ำ (Customer Meter)
3. น้ำสูญเสียเนื่องจากการใช้น้ำผิดระเบียบ (Illegal Connection)

ทั้งนี้ในการวิจัยได้ทำการศึกษาในประเภทแรก คือ น้ำสูญเสียในระบบท่อ

COMPONENTS OF ACCOUNTED-FOR (REVENUE) AND UNACCOUNTED-FOR (NON-REVENUE) WATERS



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของน้ำที่เรียกเก็บเงินได้ กับ น้ำสูญเสีย

นายเสริมศิลป์ บวรกิจจร
ศูนย์ปฏิบัติการ กปน.
24 เมษายน 2529

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ก. การจำลองแบบปัญหา (Simulation)

ในการศึกษาวิจัยได้ใช้เครื่องมือในการศึกษาออกแบบระบบคือ การจำลองแบบปัญหา(Simulation) ซึ่งมีคำจำกัดความและขั้นตอนโดย ศ.ดร.ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ (2532) คือ กระบวนการออกแบบจำลอง(Model) ของระบบงานจริง (Real System) แล้วดำเนินการทดลองใช้แบบจำลองนั้น เพื่อการเรียนรู้พฤติกรรมของระบบงานหรือเพื่อประเมินผลการใช้กโลบาย(Strategies) ต่าง ๆ ในการดำเนินงานของระบบภายใต้ข้อกำหนดที่วางไว้ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. การตั้งปัญหาและการให้คำจำกัดความของระบบงาน (Problem Formulation and System Definition) ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการจำลองแบบปัญหา ขั้นตอนนี้เป็นการกำหนดวัตถุประสงค์ของการศึกษาระบบ การกำหนดขอบเขต ข้อจำกัดต่าง ๆ และวิธีการวัดผลของระบบงาน

2. การสร้างแบบจำลอง (Model Formulation) จากลักษณะของระบบงานที่จะต้องทำการศึกษาเขียนแบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบงานตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา

3. การจัดเตรียมข้อมูล (Data Preparation) วิเคราะห์หาข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับแบบจำลอง และจัดเตรียมให้อยู่ในรูปแบบที่จะนำไปใช้งานกับแบบจำลองได้

4. การแปรรูปแบบจำลอง (Model Translation) แปลงแบบจำลองไปอยู่ในรูปของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

5. การทดสอบความถูกต้อง (Validation) เป็นการวิเคราะห์เพื่อช่วยให้ผู้เขียนและผู้ใช้แบบจำลองมั่นใจว่าแบบจำลองที่ได้นั้นสามารถใช้แทนระบบงานจริงตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาได้

6. การออกแบบการทดลอง (Strategic Planning) เป็นการออกแบบการทดลองที่ทำให้แบบจำลองสามารถให้ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์หาผลลัพธ์ตามที่ต้องการ

7. การวางแผนการใช้งานแบบจำลอง (Tactical Planning) เป็นการ

วางแผนว่าจะใช้งานแบบจำลองในการทดลองอย่างไร จึงจะได้ข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ผลเพียงพอ(ด้วยระดับความเชื่อมั่นในผลการวิเคราะห์ที่เหมาะสม) ความแตกต่างระหว่างขั้นตอนนี้กับขั้นตอนการออกแบบการทดลองมีอยู่ว่า ในการออกแบบการทดลองเป็นแต่เพียงการบอกเงื่อนไขของการทดลอง ส่วนขั้นตอนนี้เป็นการบอกว่าจะต้องดำเนินการทดลองตามเงื่อนไขดังกล่าวกี่ครั้งจึงจะได้จำนวนข้อมูลที่เหมาะสม กล่าวคือได้ความมีนัยสำคัญทางสถิติที่ยอมรับได้ในราคาที่เหมาะสม

8. การดำเนินการทดลอง (Experimentation) เป็นการคำนวณหาข้อมูลต่าง ๆ ที่ต้องการและความไวของการเปลี่ยนแปลงข้อมูลจากแบบจำลอง

9. การตีความผลการทดลอง (Interpretation) จากผลการทดลอง ตีความว่าระบบงานจริงมีปัญหาอย่างไร และการแก้ปัญหาจะได้ผลอย่างไร

10. การนำไปใช้งาน (Implementation)) จากผลการทดลอง เลือกวิธีการที่จะแก้ปัญหาได้ดีที่สุดไปใช้กับระบบงานจริง

11. การจัดทำเป็นเอกสารใช้งาน (Documentation) เป็นการบันทึกกิจกรรมในการจัดทำแบบจำลอง โครงสร้างของแบบจำลอง วิธีการใช้งานและผลที่ได้จากการใช้งาน เพื่อประโยชน์สำหรับผู้ที่จะนำแบบจำลองไปใช้งาน และเพื่อประโยชน์ในการปรับปรุงดัดแปลงแบบจำลองเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงระบบ

ข. ทฤษฎีชลศาสตร์ของท่อ (Hydralics of Pipeline))

1. ชลศาสตร์แรงดันในท่อ (Hydralics of Pressure Conduits) มีสมการพลังงานระหว่างตำแหน่ง A และ B คือ

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + Z_A = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + Z_B + h_L$$

$\frac{P_A}{\gamma}$ & $\frac{P_B}{\gamma}$ = Pressure head ที่ หน้าตัด A & B

$\frac{V^2}{2g}_A$ & $\frac{V^2}{2g}_B$ = Velocity head ที่ หน้าตัด A & B

Z_A & Z_B = Elevation head ที่ หน้าตัด A & B

h_L = Head loss (Energy loss)) เนื่องจากการไหล A ถึง B

2. การสูญเสียแรงดันน้ำเนื่องจากความฝืดท่อ (Head loss by pipe friction)

โดยใช้สูตรของ Darcy Weisbach จะได้

$$h_f = \frac{fLv^2}{D.2g}$$

L & D คือ ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

f คือ ค่า friction factor ซึ่งมีค่าสัมพันธ์กับความขรุขระ และค่า Reynold number Re = VD/v ถ้า Re < 2,000 การไหลปกติ (laminar) ถ้า Re > 3,000 เป็นการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent)

สูตรที่ใช้สำหรับการไหลในท่อ ของ Hazen-Williams คือ

English Unit $V = 1.318\ C_H\ R^{0.63}\ S^{0.54}$

SI Unit $V = 0.85\ C_H\ R^{0.63}\ S^{0.54}$

C_H เป็นค่า coefficient และ S เป็นค่าความลาดชันของเส้นพลังงาน(Slope of energy grade line) ค่า C_H แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงค่า C_H ของท่อแต่ละชนิด

ชนิดท่อ	C_H
Concrete	130
Cast Iron New	130
5 yr.old	120
Welded Steel new	120
Asbestos Cement	140

3. Minor losses in pipe lines

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงการไหลจากสาเหตุเช่น เปลี่ยนแปลงขนาดท่อ ท่อโค้ง ประตูน้ำ

ก) การสูญเสียแรงดันเนื่องจาก sudden contraction

$$h_L = K_L V_2^2/2g$$

ข) การสูญเสียแรงดันเนื่องจาก sudden enlargement

$$h_L = \left[\frac{v1 - v2}{2g}\right]^2$$

ค) การสูญเสียแรงดันน้ำเนื่องจากท่อโค้งงอ

$$h_L = K_L V^2/2g$$

ง) การสูญเสียแรงดันน้ำเนื่องจาก pipe fitting

$$h_L = K_L V^2/2g$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. โครงข่ายของระบบท่อ (Pipe Networks) มีเงื่อนไข 2 กรณีที่ต้องเหมาะสม คือ

ก) การไหลเข้าจุดร่วมต้องเท่ากับการไหลออก

ข) ผลรวมของแรงดันน้ำที่ลดลงรอบวงรอบใดต้องเท่ากับศูนย์

$$\Delta Q = \frac{\Sigma KQ_n^2}{\Sigma 2KQ_n}$$

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

FRANK C.PENTECOST

รายงานเรื่องการออกแบบระบบจ่ายน้ำ หลักเกณฑ์ต่าง ๆ เกี่ยวกับ การออกแบบระบบการจ่ายน้ำ มาตรฐานท่อและอุปกรณ์ระบบท่อประปา และการวางท่อ ขนาด ที่ตั้งประตูน้ำ

CDM

สำรวจการรั่วไหลของระบบท่อประปา เมื่อปี พ.ศ.2511-2512 เป็นเวลา 18 เดือน ใช้ Pisometer Associats ศึกษาอัตราการไหลและรั่วของระบบท่อ โดยคาดการณ์จากการรั่วของท่อบริการ 558 ครั้ง ท่อจ่ายน้ำ 360 ครั้ง และการรั่วจากหัวดับเพลิง 23 ครั้ง

FUJI TECHICAL TRAINING CENTER

รายงานผลการดำเนินงานในด้านการควบคุมและการสำรวจการรั่วไหลของระบบท่อประปาในประเทศญี่ปุ่น ได้แยกวิธีการสำรวจออกเป็น 3 วิธีการคือ Acoustic method, Measurement method และ Special method (leak noise correlation)

LINAWEAVER & CLARK

ได้วิเคราะห์ค่าถดถอยของต้นทุนของท่อจากการใช้งานต่าง ๆ กัน เช่น ท่อน้ำมัน ท่อแก๊ส และท่อน้ำ สามารถรายงานออกเป็นค่าใช้จ่ายต่อความยาวเป็นฟุต ได้ดังนี้

$$C_{pipe} = 0.358\ D^{1.20}$$

โดยที่ C_{pipe} คือ ต้นทุนของท่อที่มีขนาด D ต่อความยาวท่อ 1 ฟุต

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (นิ้ว)

THOMAS M. WALSKI AND ANTHONY PELLICCIA

จัดทำทฤษฎีสำหรับการหาท่อประปาที่จำเป็นต่อการเปลี่ยนท่อบนพื้นฐานของประวัติการบันทึกการแตกของท่อประปาโดยเตรียมตารางสำหรับคุณลักษณะของระบบ และรายงานผลสรุปของการแตกของท่อประปาที่เกิดขึ้น เช่น การแตกเนื่องจากอากาศเย็นจัดในระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนเมษายน หรือการแตกเนื่องจากท่ออยู่ในพื้นที่ที่มีการจราจรแออัด ได้ทำการศึกษาระบบจ่ายน้ำของเมือง Binghamton, N.Y. ซึ่งมีอายุมากกว่า 100 ปี และมีประสบการณ์เกี่ยวกับการเสียหายของท่อในแต่ละปี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ หาท่อใดควรเปลี่ยนหรือซ่อมแซม คาดการณ์ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนท่อ คาดการณ์ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม

หากต้องซ่อมแซมท่อประปาจำเป็นต้องปิดระบบบางส่วนและทำการซ่อมแซมดังกล่าว จำนวนเวลาที่ใช้ในการซ่อมแซมจะขึ้นอยู่กับหลาย ๆ ปัจจัยรวมทั้งขนาดของท่อด้วย สามารถหาได้จากสูตร

$$\text{Time} = 6.5\ \text{Diameter}^{.0285}$$

โดย Time มีหน่วยเป็น ชั่วโมง

diameter มีหน่วยเป็น นิ้ว

ส่วนอัตราการแตกของท่อประปาจะเป็นฟังค์ชั่นของเวลา สามารถอธิบายด้วยสมการเส้นตรงหรือสมการ exponential ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมแต่ละประเทศ คือ

$$N(t) = N(t_o)\ e^{A(t - t_o)}$$

และ $$N(t) = N(t_o) + A(t - t_o)$$

โดย N เป็น จำนวนของท่อประปาที่แตกในปีที่ t (จำนวนท่อแตก/ความยาว/เวลา)

t_o เป็น ปีที่ทำการติดตั้ง (เวลา)

A เป็น อัตราคงที่ของการแตก (จำนวนท่อแตก/ความยาว/เวลา^2)

t เป็น ปีปัจจุบัน (เวลา)

และค่าอายุของท่อที่ทำการเปลี่ยนเหมาะสมที่สุดได้จากสูตร

$t - k = \ln\{ L.C .5280.\ln(1+R)/C_b.a.c_1.C_2\}/b$

โดย a เป็น สัมประสิทธิของการถดถอย (regression coefficient) มีค่าเท่ากับ 0.02577 สำหรับท่อ pit cast iron, 0.0627 สำหรับท่อ sand span cast iron (จำนวนท่อที่แตก/ปี/ไมล์)

b เป็น สัมประสิทธิของการถดถอย มีค่า 0.0207 สำหรับท่อ pit cast iron, 0.0137 สำหรับท่อ sand spun cast iron (ปี/ไมล์)

C_1 เป็น ตัวประกอบที่เลือกสำหรับชนิดของการแตก

C_2 เป็น ตัวประกอบสำหรับท่อ pit cast iron ใหญ่

C_b เป็น ค่าใช้จ่ายของการแตกของท่อ

C_r เป็น ค่าใช้จ่ายของการเปลี่ยนท่อ

k เป็น ปีของการติดตั้งท่อ

L เป็น อัตราส่วนของท่อที่ทำการเปลี่ยนกับความยาวท่อทั้งหมด

R เป็น interest rate

t เป็น ปีที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนท่อ

การตัดสินใจในการเปลี่ยนท่อ จะมีผลลัพธ์แตกต่างมาก เมื่อค่าของ L และ b ได้เปลี่ยนแปลงไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ELLEN E.MOYER, JAMES W.MALE, I.CHRISTINA MOORE AND JOHN G.HOCK

ได้ศึกษากรณีเกี่ยวกับเศรษฐศาสตร์การป้องกันการรั่วไหลและการซ่อมแซมท่อ (LD & R) ของ Westchester Joint Water Works ใน MAmatoneck, N.Y. ซึ่งจ่ายน้ำให้กับผู้ใช้น้ำ 50,000 ราย มีการวางท่อชนิด primarily tar-lined cast iron ที่มีอายุระหว่าง 10-80 ปี มีความยาว 348 กิโลเมตร , หัวดับเพลิง 1,334 หัว และสถานี

สูบจ่ายน้ำ 2 สถานีสามารถจ่ายน้ำได้วันละ 37.8 ล้านลิตร โดยแหล่งน้ำส่วนใหญ่ได้จากใต้ดินทำให้ค่าใช้จ่ายของปั๊มน้ำ และ การกรองน้ำต่ำ ได้ทำการวิเคราะห์ชนิดของการรั่วไหลของท่อรวมทั้งการวิธีการของ sonic leak detection สามารถหาขนาดของท่อรั่วและตำแหน่งได้อย่างแม่นยำ

SHOUVANAVIRAKUU

ได้ศึกษาอิทธิพลที่มีต่อการใช้น้ำขึ้นอยู่กับเหตุผลเหล่านี้คือ ฤดูกาลของแต่ละปี ความสามารถในการจ่ายน้ำส่งไปยังผู้ใช้น้ำ การคิดราคาค่าน้ำ

CDM-MEC

ได้ศึกษาและสำรวจปริมาณน้ำสูญเสียโดยการสำรวจในสนามเกี่ยวกับ

1. แหล่งน้ำดิบที่ได้จากใต้ดิน สถานีสูบจ่าย และโรงกรองน้ำ
2. น้ำที่นำมาใช้และสูญเสียจากพื้นที่ย่อย 5 พื้นที่ของระบบการจ่ายน้ำ
3. การสูญเสียจากมาตรโดยการสุ่มจากผู้ใช้น้ำ 338 ราย และการลักใช้น้ำ 1,014 ราย
4. การลักใช้น้ำของผู้ใช้น้ำรายใหญ่ 105 ราย จากการสำรวจ 1,200 ราย
5. การสึกกร่อนของท่อโลหะทั้งภายในและภายนอก
6. ธรรมชาติและสาเหตุของการเสียหายของท่อบนพื้นฐานของรายงานการซ่อมแซมท่อที่รั่ว 168 ครั้ง สำหรับท่อประธานและท่อจ่ายน้ำและรายงาน 1,248 ครั้ง สำหรับท่อบริการและท่อเข้าบ้าน

CDM

ได้สร้างรูปแบบของ WATmodel โดยสมการสำหรับการหาปริมาณน้ำรั่วไหลอยู่ในรูปของค่าความดัน และ flow exponent (b) ดังนี้

$$L = 2 R_o^2 C (H_o^{b+2}/H^2) I$$

โดย $$I = J - X^{(b+1)}(1/(b+1 - x/(b+2))$$

$J = (1/(b+1)) - (1/(b+2))$

$X = (H_o - H) / H_o$

ค่า L คือ ปริมาณน้ำรั่วไหล

R_o คือ รัศมีของรูรั่ว

C คือ ค่าคงที่สำหรับการรั่วไหล

b คือ flow exponent

H_o คือ ความดันที่ออกจากพื้นที่บล็อก

$^{\circ}H$ คือ ผลต่างระหว่างความดันเข้ากับความดันออกจากพื้นที่วัด

NIHON SUIDO

ได้ปรับปรุงแผนงานหลักของปี พ.ศ.2513 โดยบันทึกความรู้เกี่ยวกับการเปลี่ยนท่อ รวมทั้งการทดสอบท่อซีเมนต์ใยหินที่ซีเมนต์ได้หลุดออกจากท่อโดยการสึกกร่อนของสภาพ clay soils และโดยน้ำที่มี low-alkalinity

MWA STUDIES

การประปานครหลวงได้ทำรายงานสาเหตุการเสียหายของท่อ PVC และการศึกษาและกำหนดมาตรฐานการคิดปริมาณน้ำเนื่องจากท่อแตกรั่ว โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การคำนวณหาอัตราความเร็วของน้ำที่ควรใช้สำหรับชนิด ขนาดของท่อประปาและแรงดันน้ำที่มีค่าต่าง ๆ กัน ในกรณีที่ท่อขาด รวมทั้งการคำนวณหาอัตราน้ำสูญเสีย ในกรณีที่ท่อขาดน้ำไหลจากปลายท่อข้างเดียว และทั้งสองข้าง ใช้สูตร Hazen & Williams ตามสูตร

$V = 0.35464\ C.D^{0.63}\ .\ I^{0.54}$

$Q = V.A$

เมื่อ V คือ อัตราความเร็วของน้ำ มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที

C มีค่าดังนี้ ; ท่อใหม่มาก C = 140

ท่อใหม่ C = 130

ท่อกลางเก่ากลางใหม่ C = 120

ท่อเก่า C = 100

ท่อเก่ามาก C = 80

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อประปา มีหน่วยเป็น เมตร

I คือ ค่าการสูญเสียแรงดันน้ำ มีหน่วยเป็น เมตรต่อกิโลเมตร

โดยจะได้ผลการคำนวณหาอัตราความเร็วของน้ำในขนาดท่อ ตั้งแต่เส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 มม.(1/2 นิ้ว) ถึง 4,000 มม.

2. พิจารณาหาค่า Cd (ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล)ที่ควรใช้สำหรับแรงดันน้ำต่าง ๆ กันในกรณีที่ท่อทะลุ

3. คำนวณหาอัตราน้ำสูญเสียในกรณีท่อรั่วที่ข้อต่อหรือหักโดยรอบท่อ

4. คำนวณหาอัตราน้ำสูญเสียในกรณีท่อรั่วใต้เหล็กรัดท่อ

5. พิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างสูตรต่าง ๆ เพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงข้อเท็จจริง

6. คำนวณหา HEAD LOSS ต่อความยาวท่อ 1 กิโลเมตรของท่อชนิดและขนาดต่างๆ โดยสมมุติว่าท่อวางเป็นแนวตรงและไม่มีจุดตัดบรรจบทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการวางท่อ การควบคุมแรงดันน้ำ และการสำรวจหาท่อรั่ว

MWA

เป็นโครงการเปลี่ยนท่อของการประปานครหลวง ได้ปรับปรุงระบบจ่ายน้ำ โดยเน้นหนักระบบท่อที่อยู่ใกล้กับสถานีสูบจ่ายน้ำซึ่งมีความดันสูง

1. เปลี่ยนท่อข้ามคลอง 20 ท่อ

2. เคลือบท่อด้วย Polyethyleneยาว 8.64 กิโลเมตร สำหรับท่อประธานขนาด 400 - 800 มม.

3. เปลี่ยนท่อบริการและท่อเข้าบ้านยาว 937 กิโลเมตร โดยเน้นการใช้ท่อ PVC ที่มี solvent cement joint

4. ปรับปรุงท่อเข้าบ้านของผู้ใช้น้ำ 100,000 ราย โดยเน้นที่การย้ายตำแหน่งของมาตรวัดน้ำ

5. จัดซื้ออุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการซ่อมท่อ