

การเปรียบเทียบต้นทุนประสิทธิผลสำหรับโครงการก่อสร้างวางท่อ PVC กับ ท่อวัสดุอื่น

A Comparison of Cost-Effectiveness for PVC Water Pipeline Construction

with Other Pipe Materials

ภูริชญ์ แก่นสุข*

ผศ.ดร.ณัฐพัชร อารีรัชกุลกานต์**

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบต้นทุนประสิทธิผลของโครงการก่อสร้างวางท่อประปาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตรที่ผลิตจากวัสดุ 4 ชนิด ซึ่งใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบันได้แก่ 1) ท่อโพลีไวนิลคลอไรด์ ชั้น 8.5 [PVC Class 8.5] 2) ท่อโพลีไวนิลคลอไรด์ ชั้น 13.5 [PVC Class 13.5] 3) ท่อโพลีเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูง [HDPE] และ 4) ท่อเหล็กเหนียว [DI] ค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายหลัก 2 อย่างได้แก่ 1) ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างวางท่อ และ 2) ค่าใช้จ่ายในการซ่อมท่อ โดยค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างวางท่อนั้นมีขั้นตอนในการคำนวณที่ชัดเจนอยู่แล้ว แตกต่างจากค่าใช้จ่ายในการซ่อมท่อ เนื่องจากความไม่แน่นอนของการเกิดปัญหาท่อแตกรั่วและขาดแคลนข้อมูลย้อนหลังสำหรับท่อประเภทอื่นๆ ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำเสนอวิธีการประมาณจำนวนจุดแตกรั่วสำหรับท่อแต่ละชนิดโดย 1) ทำการสร้างโมเดลจำนวนท่อแตกรั่วของท่อ PVC จากข้อมูลจำนวนแตกรั่วย้อนหลังด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุนาม (Polynomial Regression) 2) การประมาณจำนวนแตกรั่วสำหรับท่อประเภทอื่น โดยนำจำนวนแตกรั่วของท่อ PVC (ได้จากขั้นตอนที่ 1) คูณกับ ค่าดัชนีโอกาสแตกรั่ว ซึ่งคือค่าโอกาสการแตกรั่วของท่อประเภทอื่นๆเมื่อเทียบกับท่อ PVC Class 8.5 โดยกำหนดให้ค่าดัชนีของ PVC Class 8.5 มีค่าเป็น 1 และสามารถหาค่าดัชนีดังกล่าวจะได้มาจากการหาแรงกระทำสูงสุดที่ท่อแต่ละประเภททนได้ (Yield Point Force) ด้วยการทดสอบและวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) ของแบบจำลอง 3 มิติ ในโปรแกรม SolidWorks หลังจากนั้นจึงทำการคำนวณและเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นทั้งหมดตลอดอายุการใช้งานของท่อแต่ละประเภท

จากผลการเปรียบเทียบระหว่างท่อ 4 ประเภทพบว่าในช่วงอายุการออกแบบของการประปานครหลวง ที่ระยะเวลา 30 ปีนั้น ช่วง 27 ปีแรก ท่อ PVC Class 8.5 มีความคุ้มค่าในการก่อสร้างมากกว่า เนื่องจากมี

* นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการทางวิศวกรรม มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

** ที่ปรึกษาสารนิพนธ์

ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างวางท่อน้อยที่สุด แต่เมื่อครบช่วงอายุการออกแบบท่อที่ 30 ปี ท่อ PVC Class 8.5 มีค่าจำนวนจุดแตกรั่วเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับท่อประเภทอื่น ส่งผลให้ท่อ DI กลายเป็นท่อที่มีความคุ้มค่าในโครงการก่อสร้างมากที่สุด

ABSTRACT

This research aims to compare cost-effectiveness of a water pipeline construction project scoped for only 300 mm. diameter and 4 water pipe materials; 1) Polyvinyl Chloride (PVC) class 8.5, 2) Polyvinyl Chloride (PVC) class 13.5, 3) High-Density Polyethylene (HDPE), and 4) Ductile Iron (DI). The related expenses included in this research are 1) construction and 2) maintenance/repairing expenses. The first expense can be easily calculated and obtained while to calculate the second one is quite a challenge task, stemmed from the facts that, water pipe leakage can happen anytime with uncertainty and lacking of water pipe leakage historical data for other pipe materials. Hence, the researchers present a framework of how to estimate water pipe leakage value for each water pipe material, explained by the following steps: 1) build a mathematical model represent leakage value of PVC water pipe by using Polynomial Regression Analysis with available historical PVC water pipe leakage dataset, 2) estimate the leakage value for remaining pipe materials by multiplying leakage value obtained from previous step with leakage probability index. The leakage probability index is obtained from testing and conduct Finite Element Analysis (FEA) on water pipe 3D model for each material in SolidWorks software. Then, all total costs/expenses are calculated and compared for each water pipe material.

The results show that in 30 year, standard design period used by MWA, in 27th years the most cost-effective water pipe material is PVC class 8.5 which has related minimum construction costs. Somehow, for more than 27 years, the water pipe leakage amounts of PVC class 8.5 are increased tremendously. From this reason, the Ductile Iron pipe turns into the most cost-effective instead of PVC class 8.5 pipe for 30 years design period.

1. บทนำ

โครงข่ายเส้นท่อของการประปานครหลวงที่ใช้ในการส่งน้ำจากโรงงานผลิตไปถึงผู้ใช้น้ำ แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ 1) อุโมงค์ส่งน้ำหรือท่อประธาน มีขนาด สก. 600 มม. - 2700 มม. 2) ท่อจ่ายน้ำ มีขนาด สก. 100 – 400 มม. 3) ท่อบริการ มีขนาด สก. 1/2 - 2 นิ้ว โดยหนึ่งในปัญหาที่มีผลกระทบต่อผู้ใช้น้ำ คือ การแตกรั่วของท่อ

จ่ายน้ำซึ่งส่วนมากจะเป็นท่อ Polyvinyl Chloride หรือ ท่อ PVC Class 8.5 ที่การประปานครหลวงใช้เป็นท่อจ่ายน้ำหลัก

ดังนั้นเพื่อหาแนวทางในการลดปัญหาท่อประปาแตกรั่ว รวมถึงค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น ผู้วิจัยจึงมีความต้องการที่จะศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับคุณสมบัติของท่อชนิดอื่นๆ ที่น่าจะมีคุณสมบัติดีกว่าท่อ PVC Class 8.5 โดยทำการวิเคราะห์ ต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน เพื่อหาว่าการวางท่อชนิดไหนจะมีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานคุ้มค่าที่สุด

2. วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย

- 2.1 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานในการก่อสร้างวางท่อประปา
- 2.2 เพื่อคัดเลือกชนิดของท่อประปาที่เหมาะสมในการใช้งานสำหรับพื้นที่สำนักงานประปา สาขาประชาชื่น

3. ขอบเขตของงานวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้ จำกัดกรอบของการศึกษาเฉพาะพื้นที่ให้บริการน้ำประปาของสำนักงานประปาสาขาประชาชื่น ท่อที่ใช้ในการศึกษาจะมี สก. 300 มม. และเป็นท่อชนิด PVC, HDPE และ DI เท่านั้น โดยอ้างอิงวิธีการวางท่อ ซ่อมบำรุง และราคากลางจากข้อมูลการประปานครหลวงและสำนักงานประมาณ

4. ประโยชน์ที่จะได้รับ

1. เพื่อเป็นข้อมูลในการประมาณค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างวางท่อใหม่
2. เพื่อเป็นข้อมูลค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมท่อและค่าซ่อมผิวจราจร
3. เพื่อใช้ประมาณการสถิติการแตกรั่วที่น่าจะเกิดขึ้นกับเส้นท่อ
4. เพื่อใช้คัดเลือกชนิดท่อประปาที่เหมาะสมจากข้อมูลค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน

5. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

5.1 ทฤษฎี

5.1.1 การออกแบบระบบท่อจ่ายน้ำและท่อบริการ

ท่อจ่ายน้ำและท่อบริการ คือท่อที่รับน้ำจากท่อประธานเพื่อส่งน้ำไปยังผู้ใช้น้ำ โดยทั่วไปท่อจ่ายน้ำจะมีขนาดตั้งแต่ สก. 100 มม. – สก. 400 มม. ส่วนท่อบริการจะมีขนาดตั้งแต่ สก. 50 มม. ลงไป

ขั้นตอนออกแบบท่อจ่ายน้ำและท่อบริการ

1) การตรวจสอบสำรวจ เมื่อได้รับข้อมูลขนาดท่อและเส้นทางแล้ว จะทำการสำรวจพื้นที่จริงเพื่อจัดทำแบบสำรวจ

2) การกำหนดตำแหน่งและชนิดท่อ วิศวกรออกแบบรายละเอียดเส้นท่อว่าจะต้องประกอบด้วยรายละเอียดอะไรบ้าง พร้อมกำหนดแนวท่อตำแหน่งและชนิด พร้อมอุปกรณ์ต่างๆ วิธีการก่อสร้างโดยจัดทำเป็นแบบเบื้องต้น

3) การประสานงานกับเจ้าของกรรมสิทธิ์ที่ดิน กองบริหารกรรมสิทธิ์ที่ดินเป็นผู้ประสานงานกับหน่วยงานเจ้าของที่ดิน เพื่อชี้แจงรายละเอียดต่างๆ และขออนุญาตเบื้องต้นจากเจ้าของที่ดินในการวางผ่านที่ดินผู้อื่น

4) การขออนุญาตกรรมสิทธิ์ที่ดินฝ่ายสำรวจและออกแบบจะต้องนำแบบแปลนที่จะใช้ในการก่อสร้างมอบให้กองบริหารกรรมสิทธิ์ที่ดินเป็นผู้จัดทำแบบขออนุญาตกรรมสิทธิ์ที่ดิน และติดต่อขออนุญาตจากเจ้าของที่ดิน

5) การประมาณราคาเบื้องต้นฝ่ายบริหารงาน โครงการจะประมาณราคาค่างานก่อสร้างเบื้องต้นเพื่อใช้ตั้งงบประมาณค่าก่อสร้าง

6) การคิดระยะเวลาก่อสร้าง การคิดระยะเวลาก่อสร้างขึ้นกับวิธีการก่อสร้างและมาตรการในการก่อสร้างดังกล่าวฝ่ายบริหารโครงการจะเป็นผู้กำหนด

5.1.2 ชนิดของท่อ

5.1.2.1 ท่อ PVC (Polyvinyl Chloride Pipe)

ท่อยูพีวีซี (uPVC) หรือพีวีซียู (PVC-U) ย่อมาจาก Unplasticised Polyvinyl Chloride มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับท่อ PVC ตามมาตรฐาน มอก.17 เป็นท่อPVC แข็งโดยไม่ผสมพลาสติกไซเซออร์โนอิดผลิตเพื่อเป็นท่อบริการต่อเข้าบ้าน แต่ปัจจุบันมีการผลิตท่อขนาดใหญ่ออกมาจนสามารถใช้เป็นท่อจ่ายน้ำได้ มีความเหนียวยืดหยุ่นตัวได้ ทนต่อแรงดันน้ำได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนของกรด/ด่างได้ดี ไม่นำไฟฟ้า เป็นวัสดุไม่ติดไฟ มีผิวเรียบช่วยในการไหลของน้ำได้ดี มีน้ำหนักเบาและราคาถูก แอ่นตัวได้ แต่มีข้อเสียคือ เปราะ กรอบ และแตกหักง่าย ไม่ทนทานต่อแรงกระแทกและแสงแดดหรือรังสียูวี

5.1.2.2 ท่อ HDPE (High Density Polyethylene Pipe)

ท่อเอชดีพีอี (HDPE) มีการใช้อย่างแพร่หลายซึ่งช่วยแก้ปัญหาต่างๆในสภาพหรือสถานการณ์ที่ท่อชนิดอื่นๆไม่สามารถที่จะใช้ได้และวัสดุ HDPE ก็ได้มีการพัฒนาขึ้นมาเรื่อยๆจนถึงปัจจุบัน

ท่อต้องผลิตจากพลาสติกชนิด High Density Polyethylene ที่ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน ISO/TR 9080 หรือเทียบเท่าโดยได้รับใบรับรองจากผู้ผลิตเม็ดพลาสติกว่าเป็นเม็ดที่ได้ตามมาตรฐานและออกแบบให้สามารถทนความดันใช้งานได้สูงสุดไม่เกิน 25 กก./ตร.ซม. ที่อุณหภูมิใช้งาน 20 °C

5.1.2.3 ท่อเหล็กหล่อเหนียว (Ductile Iron)

ท่อเหล็กหล่อเหนียว (DI) คือท่อผลิตจากเหล็กหล่อเหนียวใช้เพื่อส่งและจ่ายน้ำดื่ม โดยมีกรรมวิธีการผลิตโดยวิธี centrifugal casting ในแบบหล่อโลหะ โดยโครงสร้างของเหล็กหล่อเหนียวจะเป็นแกรไฟต์กลม (Spheroidal graphite)

5.1.3 Program Solidworks

Program SolidWorks พัฒนาขึ้นในปี 1995 โดยบริษัท Dassault System ในฝรั่งเศสเป็นซอฟต์แวร์เพื่อให้ นักออกแบบใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบทางวิศวกรรม เพื่อสร้างตัวอย่างผลิตภัณฑ์จำลองใน Computer ก่อนที่จะสร้างผลิตภัณฑ์ต้นแบบจริง โดยตัวซอฟต์แวร์จะจัดอยู่ในตระกูล CAD (Computer Aided Design) ซึ่งสามารถสร้างชิ้นงานจำลองในรูปแบบ 3D Solid Models เป็นแบบงานแยกชิ้น (Part) และแบบงานประกอบ (Assembly) เพื่อนำไปสร้างเป็น 2D Standard Engineering (CADD = Computer Aided Design and Drafting)

5.1.4 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

การถดถอย (Regression) หมายถึง การศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตัวหนึ่งที่เรียกว่า ตัวแปรตาม (Dependent Variable) และอีกตัวแปรหนึ่งหรือตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ที่เรียกว่าตัวแปรอิสระ (Independent Variable)

เป้าหมายของการถดถอย คือ

- (1) ขนาดของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ ที่มีต่อตัวแปรตาม
- (2) แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม

ในการวิเคราะห์การถดถอย มักเรียกตัวแปรอิสระว่า ตัวแปรทำนาย (predictor) หรือตัวแปรกระตุ้น (stimulus variable) ส่วนตัวแปรตาม มักเรียกว่า ตัวแปรตอบสนอง (response variable) หรือตัวแปรเกณฑ์ (criterion variable)

5.1.5 การวิเคราะห์ต้นทุนวงจรอายุ

การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน คือการคำนวณต้นทุนกับค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งานของโครงการ เริ่มตั้งแต่ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง ติดตั้ง ค่าบำรุงรักษารายปีแล้วนำมาทำเป็นมูลค่า

ปัจจุบัน โดยคำนึงถึงค่าของเงินตามเวลา เป็นค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานที่เป็นมูลค่าปัจจุบัน ซึ่งจะทำให้เราทราบค่าใช้จ่ายของแต่ละโครงการ

5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อริยุด จงใจ (2556) ศึกษาเกี่ยวกับการเปรียบเทียบต้นทุนค่าใช้จ่ายของเครื่องปรับอากาศใหม่และเครื่องปรับอากาศเดิม หาจุดคุ้มทุนและความเป็นไปได้ทางการเงินสำหรับลงทุน โดยใช้วิธีวิเคราะห์ต้นทุนวงจรอายุ (Life Cycle Cost, LCC) เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบต้นทุนวงจรอายุของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน แยกตามลักษณะการใช้งาน 4 ประเภท คือ อายุโครงการ 9 ปี จากการศึกษาพบว่าเครื่องปรับอากาศที่มีการปรับเปลี่ยนขนาดใหม่ขนาด 36,000 Btu ประเภทห้องเรียนและห้องทำงาน และขนาด 48,000 Btu ประเภทห้องทำงานมีจุดคุ้มทุนไม่เกินเกณฑ์อายุการใช้งานของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานที่ 8 ปี มีความเป็นไปได้ทางการเงินในการลงทุน ทั้งนี้มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการเท่ากับ 44,112.32 บาท และอัตราผลตอบแทนภายในโครงการเท่ากับ 12.92%

กนกวรรณ รุ่งอินทร์ และศิริชัย ตันรัตนวงศ์ (2560) ศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ทฤษฎี Life Cycle Cost ในการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของถนนคอนกรีตและถนนผิวแอสฟัลติกคอนกรีต เพื่อประเมินค่าความเหมาะสมของโครงการ โดยมีตัวแปรสำคัญได้แก่ ระยะทางระหว่างแหล่งวัสดุกับสถานที่ก่อสร้างถนน ซึ่งแปรผันโดยตรงกับค่าก่อสร้างถนนนั้นๆ โดยเก็บรวบรวมข้อมูลจากบัญชีสายทางและประวัติการซ่อมแซมของถนนในจังหวัดพิษณุโลก จำนวนทั้งหมด 31 เส้น ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน (LCC) ของถนนผิวแอสฟัลติกคอนกรีตและถนนคอนกรีต มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อพิจารณาเทียบค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานแต่ละช่วงของระยะขนส่ง พบว่าในกรณีแหล่งวัสดุมีระยะทางไม่มากนัก (0 - 110 กม.) LCC ของถนนคอนกรีตจะสูงกว่าถนนผิวแอสฟัลติกคอนกรีต แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของ LCC ของถนนผิวแอสฟัลติกคอนกรีตจะสูงกว่าถนนคอนกรีต จนกระทั่งมีค่าเท่าๆกันเมื่อระยะขนส่งมากขึ้น จนมีค่าประมาณ 110 - 120 กม. ที่ระยะทางมากกว่านั้น LCC ของถนนผิวแอสฟัลติกคอนกรีตจะสูงกว่าถนนคอนกรีต สรุปได้ว่า หากใช้ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน (LCC) ในการวิเคราะห์เมื่อแหล่งวัสดุอยู่ใกล้กับสถานที่ก่อสร้างถนน โดยมีระยะทางไม่เกิน 110 กม. ถนนผิวแอสฟัลติกคอนกรีตจะมีความเหมาะสมกว่าถนนคอนกรีต อย่างไรก็ตาม การศึกษาลักษณะดังกล่าว สามารถปรับปรุงให้มีความใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงยิ่งขึ้น หากสามารถรวบรวมข้อมูลและตัวแปรอื่นๆเพิ่มเติมในการวิเคราะห์ต่อไป

ยุทธนา ปัญจนศักดิ์ (2556) ศึกษาเปรียบเทียบความคุ้มค่าระหว่างถนนแอสฟัลต์คอนกรีตและถนนคอนกรีตโดยวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน โดยใช้ข้อมูลประวัติการก่อสร้าง บำรุงรักษา และปริมาณ

การจราจรจากสายทางของกรมทางหลวง และอ้างอิงราคากลางการก่อสร้างและบำรุงรักษา ณ ปี พ.ศ. 2556 โดยใช้พารามิเตอร์แสดงผลเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิในรูปค่าใช้จ่ายเทียบเท่ารายปี (EUAC) ร่วมกับค่าปริมาณเพลามาตรฐาน (NESA) เป็นตัวแทนของปริมาณการจราจรที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ผลการเปรียบเทียบระหว่างสายทางคอนกรีตที่อยู่ในระดับมาตรฐานชั้นทางพิเศษเหมือนกันพบว่า มีค่า EUAC ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากค่าใช้จ่ายหลักของการก่อสร้างถนนแอสฟัลต์ คือ ราคายางแอสฟัลต์ ซึ่งสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ขณะที่ราคาปูนซีเมนต์อันเป็นองค์ประกอบหลักของถนนคอนกรีตกลับค่อนข้างคงที่ จึงทำให้ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานโดยใช้ราคากลาง ณ ปี พ.ศ. 2556 ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตามหากพิจารณาประสิทธิภาพของค่าใช้จ่ายต่อการรองรับการจราจรหรือค่า EUAC/NESA ของผิวทางทั้งสองชนิดโดยเฉลี่ยพบว่า ผิวทางคอนกรีตมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่ามาก แสดงถึงความคุ้มค่าในการใช้จ่ายของถนนคอนกรีตที่มากกว่า นอกจากนี้การวิเคราะห์เปรียบเทียบครั้งนี้ใช้คาบเวลา 15 ปี ถึง 17 ปี ซึ่งโดยปกติถนนคอนกรีตจะมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าถนนแอสฟัลต์ประมาณ 10 ปีขึ้นไป จึงถือเป็นอีกข้อได้เปรียบหนึ่งของถนนคอนกรีต

สิตรินทร์ รัชมฤกษ์พัทธ์ (2557) ศึกษาเพื่อประเมินโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยสายตา, ทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับผลกระทบจากคลอไรด์ในน้ำทะเล และวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของแนวทางซ่อมแซมโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก ตรวจสอบโครงสร้างสะพาน 5 แห่ง ด้วยสายตาและเจาะเก็บผงคอนกรีตสะพานนำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์เพื่อใช้ทำนายระยะเวลาเริ่มต้นการกัดกร่อนโดยใช้กฎข้อที่สองของฟิคและสมการของ Pulvis สำหรับการทำนายการสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมใช้สมการของ JCI และ Markeset จากนั้นคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของแนวทางการซ่อมแซมโครงสร้าง 41 วิธี ผลการศึกษาพบว่าความเสียหายในโครงสร้างสะพานพบที่เสามากกว่าคานและพื้นและพบการเสื่อมสภาพระดับที่ 1 (รอยร้าวเล็กๆหรือเกิดสนิมแบบจุดที่ผิวคอนกรีต) มากที่สุดซึ่งพบมากในเสา การวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์พบว่าปริมาณคลอไรด์ที่เสาคานมีแนวโน้มที่จะลดน้อยลงเมื่อระยะทางจากชายฝั่งเพิ่มมากขึ้น ผลการทำนายการเสื่อมสภาพด้วยสมการ Pulvis (ระยะเวลาเริ่มต้นการกัดกร่อน) ร่วมกับสมการของ Markeset (ระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริม) ได้ผลระดับการเสื่อมสภาพที่ใกล้เคียงกับระดับการเสื่อมสภาพจากการสำรวจด้วยสายตามากที่สุด และจากการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน (100 ปี) พบว่า การป้องกันการเกิดสนิมโดยเคลือบผิวคอนกรีตด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่มีการเสื่อมสภาพน้อย (ระดับที่ 1 หรือ 2) เป็นวิธีที่ให้ค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด

จิรัฐติกาล ทรัพย์สมบูรณ์ (2554) ศึกษาแบบจำลองการกระจายตัวของประชากรด้วยข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินในรูปแบบสมการถดถอยโพลิโนเมียลกำลังสอง: กรณีศึกษาจังหวัดสุพรรณบุรี ข้อมูลประชากรของประเทศไทยเกือบทั้งหมดได้ถูกสำรวจจัดเก็บอ้างอิงกับหน่วยพื้นที่เขตการปกครอง ซึ่งมีความละเอียดเชิง

พื้นที่ไม่เพียงพอที่จะตอบสนองการใช้งานในหลายๆ กรณี ที่ผ่านมามีผู้ศึกษาทดลองสร้างแบบจำลองการกระจายตัวของประชากรเชิงพื้นที่ ในรูปแบบสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความหนาแน่นของประชากรกับประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน โดยอาศัยเทคนิคการวิเคราะห์สถิติเชิงพื้นที่ไว้แล้ว แต่สมการความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ได้ยังให้ค่าการประมาณความหนาแน่นประชากรที่คลาดเคลื่อนพอสมควร โดยเฉพาะเมื่อนำมาใช้กับหน่วยพื้นที่ขนาดเล็ก งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงแบบจำลองการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของประชากรดังกล่าว โดยการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของประชากรกับประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินในรูปแบบสมการถดถอยโพลีโนเมียลกำลังสอง โดยใช้ข้อมูลพื้นที่จังหวัดสุพรรณบุรีเป็นข้อมูลในงานวิจัย ซึ่งผลการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดของสมการถดถอยโพลีโนเมียลกำลังสองที่ได้ มีค่าสูงขึ้นโดยเฉลี่ย 5.0 % เมื่อเทียบกับการใช้สมการเชิงเส้น จึงนับเป็นอีกหนึ่งแนวทางเลือกที่จะสามารถนำไปใช้พัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ประมาณค่าการกระจายตัวของประชากรได้ต่อไป

6. วิธีการดำเนินงานวิจัย

6.1 การคัดเลือกเส้นทาง

ทำการรวบรวมข้อมูลจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง โดยใช้ข้อมูลของท่อขนาด สก. 300 มม. ที่มีการแตกรั่วในปี 2561 ที่ผ่านมามีการวางแผนที่จะทำการปรับปรุงเส้นทางท่อ และมีความยาวของเส้นทางท่อ ประมาณ 1 กม. เพื่อนำมาใช้เป็นเส้นทางตัวอย่าง โดยจากข้อมูลที่ได้มามีเส้นทางที่ตรงตามความต้องการจำนวน 1 เส้นทาง คือ ซอยหมู่บ้านโกสุมนิเวศน์ แขวงวัดณะ 10 เส้นทางอยู่ในถนนคอนกรีต

6.2 การประมาณการแตกรั่วที่จะเกิดขึ้นของท่อแต่ละชนิด

6.2.1 ทำการประมาณการจุดแตกรั่วที่จะเกิดขึ้นกับเส้นทางท่อ โดยใช้ข้อมูลท่อแตกรั่วของเส้นทางตัวอย่างที่ได้ทำการคัดเลือกไว้ ซึ่งเป็นท่อ PVC Class 8.5 เป็นข้อมูลตั้งต้นในการทำการประมาณการ โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) เพื่อหาสมการแทนค่าของท่อแตกรั่วที่จะเกิดขึ้น

6.2.2 นำค่าที่ได้จากข้อ 3.3.1 มาคำนวณกับค่าอัตราส่วนความสามารถในการรับแรงกระทำระหว่างวัสดุท่อแต่ละชนิด ที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองวัสดุเบื้องต้นด้วย Program Solidworks ทำแบบจำลองซ้ำจนได้ขนาดของแรงที่ทำให้แบบจำลองถึงจุด Yield Point เป็นค่าแรก บันทึกข้อมูลแล้วทำการเปลี่ยนทดสอบแบบจำลองใหม่โดยเปลี่ยนชนิดและขนาดของท่อ นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลตั้งต้นเพื่อทำการประมาณจำนวนจุดแตกรั่วที่จะเกิดขึ้นกับท่อชนิดอื่นๆ

6.3 การคิดคำนวณค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างวางท่อตามมาตรฐานของการประปานครหลวง

6.3.1 การคิดปริมาณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจะต้องคำนวณตามข้อมูลทางกายภาพของเส้นทางที่ได้ทำการคัดเลือกไว้โดยคิดตามรายการงานก่อสร้างวางท่อตามมาตรฐานของการประปานครหลวง โดยค่าแรงที่นำมาคำนวณ คิดจาก ราคาแรงงานด้วยค่า Factor $F = 1.3574$

6.4 การคิดคำนวณค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมท่อแตกรั่วและผิวการจราจรตลอดอายุการใช้งาน

การคิดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมท่อประปาแตกรั่วและผิวการจราจรต้องทำการกำหนดกิจกรรมในการซ่อมท่อโดยอ้างอิงข้อมูลจากข้อมูลประวัติการซ่อมบำรุง ดังนี้

6.4.1 รายการประมาณแบบรายการค่าใช้จ่ายซ่อมท่อด้วยวิธีการตัดเปลี่ยนท่อ

- งานขุดซ่อมท่อประปาความ จำนวน 1 จุด โดยการตัดเปลี่ยนท่อใส่แหวน ความยาวท่อ 1.5 ม.
- งานติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์เครื่องหมายและแสงกั้นล้อมบริเวณ จำนวน 1 ครั้ง
- งานซ่อมถาวร ผิวจราจร คสล. หน้า 0.25 ม. จำนวน 1.6 ตร.ม.

6.5 ทำการเปรียบเทียบความคุ้มค่าในโครงการก่อสร้างวางท่อแต่ละชนิด

ทำการเปรียบเทียบข้อมูลค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของเส้นท่อแต่ละชนิดโดยคิดค่าใช้จ่ายเป็นรายปี โดยข้อมูลที่นำมาคิด คือ

- ค่าใช้จ่ายในการลงทุน ได้แก่ ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการก่อสร้าง
- ค่าใช้จ่ายในการใช้งาน ได้แก่ ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการดำเนินการของโครงการ ในที่นี้เป็น 0
- ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ได้แก่ ค่าซ่อมบำรุง ค่าวัสดุและอุปกรณ์ในการซ่อมเปลี่ยน
- มูลค่าซาก ในที่นี้คิดเป็น 0 เนื่องจากการประปานครหลวงไม่มีการคิดค่าการนำท่อเก่ามาคืน

เมื่อได้ข้อมูลค่าใช้จ่ายรายปีมาแล้วนำมาทำเป็นมูลค่าปัจจุบันเนื่องจากเนื่องจากค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นหลังจากปีที่มีการก่อสร้างวางท่อจะพิจารณามูลค่าของเงินที่ลดลงเมื่อเวลาผ่านไปด้วย ทำให้ค่าใช้นั้นมีค่าน้อยกว่าค่าใช้จ่ายในปัจจุบัน ทำให้ต้องคำนวณค่าใช้จ่ายของแต่ละปีเป็นมูลค่าปัจจุบันจึงจะทำการเปรียบเทียบกันได้

7. ผลการศึกษา

7.1 การประมาณการจำนวนจุดแตกร้าวของเส้นทางตัวอย่าง

ใช้ข้อมูลจุดแตกร้าวของเส้นทางตัวอย่าง มาทำการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ด้วยวิธี Linear, Polynomial, Logarithmic, Exponential และ Power เพื่อหาสมการที่จะใช้เป็นตัวแทนข้อมูลของเส้นทางตัวอย่าง โดยเลือกใช้สมการที่มีค่า R Square มากที่สุด โดยกำหนดให้ใช้ความเชื่อมั่นที่ 90% สมการ Polynomial : $y = 0.0287x^2 - 0.0762x + 0.0227$ มีค่า R Square (สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ; Coefficient of Determination) มากที่สุด = 0.9206 หรือ 92.06% ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ผลของ y ที่ได้เป็นผลหรืออิทธิพลจากตัวแปร x 92.06 % ส่วนที่เหลืออีก 7.94% เป็นผลจากตัวแปรหรือปัจจัยอื่นที่ไม่ทราบได้ แล้วปัดค่าที่ได้เป็นจำนวนเต็ม โดยประมาณการจุดแตกร้าวถึงปีที่ 30 ปี ตามช่วงอายุการออกแบบของการประปานครหลวง

7.2 การประมาณการจำนวนจุดแตกร้าวที่จะเกิดขึ้นของท่อแต่ละชนิด

เนื่องจากมีขนาดแคลนข้อมูลสถิติท่อแตกร้าวของท่อชนิดอื่นๆ ผู้วิจัยจึงทำการประมาณการจำนวนจุดแตกของท่อชนิดอื่นๆด้วยการใช้สมการจากเส้นทางตัวอย่างมาคูณกับค่าดัชนีโอกาสแตกร้าวที่หาได้จากการทำการทดสอบตัวอย่างแบบจำลองท่อ

ค่าดัชนีโอกาสแตกร้าวของท่อแต่ละชนิดที่ได้จากแบบจำลอง SolidWorks โดยให้ค่าของท่อ PVC Class 8.5 ที่เป็นท่อของเส้นทางตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 1 และได้ค่าดัชนีโอกาสแตกร้าวตามตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ค่าของแรงและดัชนีโอกาสแตกร้าวของท่อ

ชนิดท่อ	แรงที่ทำให้ถึงจุด Yield Point	ดัชนีโอกาสแตกร้าว
PVC 8.5	21049	1
PVC 13.5	44437	$21049 / 44437 = 0.474$
HDPE	19311	$21049 / 19311 = 1.09$
DI	71251	$21049 / 71251 = 0.295$

ทำการประมาณการจุดแตกร้าวของท่อแต่ละชนิด โดยนำข้อมูลจำนวนจุดแตกร้าวของเส้นทางตัวอย่างที่ได้ประมาณการไว้ หลังจากนั้นมาคูณกับค่าดัชนีโอกาสแตกร้าว ตามตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 จำนวนจุดแตกรั่วที่ประมาณการ

จำนวนท่อแตกรั่ว (จุด)				
ปี ชนิดท่อ	PVC 8.5	PVC 13.5	HDPE	DI
1 - 5	0	0	0	0
6	1	0	1	0
7	1	0	1	0
8	1	0	1	0
9	2	1	2	1
10	2	1	2	1
11	3	1	3	1
12	3	1	3	1
13	4	2	4	1
14	5	2	5	1
15	5	2	5	1
16	6	3	7	2
17	7	3	8	2
18	8	4	9	2
19	9	4	10	3
20	10	5	11	3
21	11	5	12	3
22	12	6	13	4
23	13	6	14	4
24	15	7	16	4
25	16	8	17	5
26	17	8	19	5
27	19	9	21	6
28	20	9	22	6
29	22	10	24	6
30	24	11	26	7

7.3 การคำนวณปริมาณงานก่อสร้างวางท่อของเส้นทางขอยหมู่บ้าน โกสุมนิเวศน์ แจ้งวัฒนะ 10

7.3.1 การคิดคำนวณกิจกรรมและปริมาณของงานที่จะเกิดขึ้นในการก่อสร้างวางท่อ อ้างอิงจากมาตรฐานการก่อสร้างวางท่อของการประปานครหลวงและการสอบถามจากผู้ทำงานก่อสร้างวางท่อจริง โดยจะมีกิจกรรมที่จะเกิดขึ้นดังต่อไปนี้

- งานวางท่อชั่วคราว แบบ ชูดวงในถนนคอนกรีต หรือคอนกรีตปูทับด้วยแอสฟัลต์
- งานเทแทนคอนกรีตรับอุปกรณ์ท่อ
- ค่าแรงวางท่อโดยวิธีเปิดร่องดิน (ราชการ) ตามแบบมาตรฐานเลขที่ TB-1(R2).
- ค่าตัดบรรจบท่อเดิม
- ค่าติดตั้งหัวดับเพลิง
- ค่าทุบและซ่อมผิวจราจรถนน
- งานวางท่อแยกจากท่อวางใหม่พร้อมติดตั้งมาตรวัดน้ำและบรรจบท่อภายในของผู้ใช้น้ำ
- ติดตั้งหัวประตุน้ำ
- งานบรรจบประตุน้ำเดิม หรือหน้างานเดิม
- งานรื้อย้ายแนวท่อเดิม 959 ม.

ค่าใช้จ่ายและค่าอุปกรณ์วัสดุอุปกรณ์ของท่อชนิดต่างๆจะมีขึ้นอยู่กับชนิดของท่อที่ใช้ในการก่อสร้าง โดยราคาที่ใช้มาจากราคากลางของงานก่อสร้างวางท่อคูณกับค่า Factor $F = 1.3563$

7.4 การถอดปริมาณงานซ่อมแซมท่อแตกรั่วและผิวจราจรตลอดอายุการใช้งาน

ปริมาณท่อแตกรั่วตลอดอายุการใช้งานของท่อแต่ละชนิดใช้ข้อมูลจากการประมาณการจุดแตกรั่วตามตารางที่ 7.3 โดยมีเงื่อนไขของราคาค่าใช้จ่ายที่ใช้คือ

- ค่าแรงงานซ่อมท่อคิดจากราคากลางคูณด้วย Factor $F = 1.3574$
- ราคาวัสดุอุปกรณ์เพิ่มขึ้นปีละ 3%

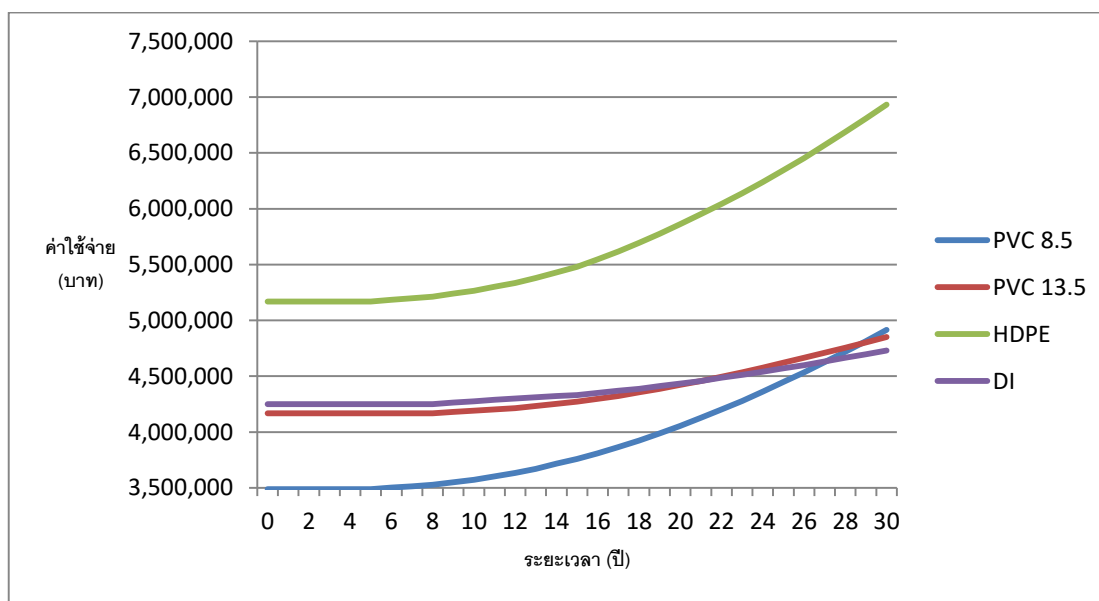
ตารางที่ 7.4 ค่าใช้จ่ายในการซ่อมท่อต่อจุด

ค่าใช้จ่ายในการซ่อมท่อต่อจุด			
ชนิด	ค่าแรงซ่อมท่อ	ค่าวัสดุ	รวม
PVC 8.5	8,344.2	9,508.5	17,852.70
PVC 13.5	8,344.2	10,705.5	19,049.70
HDPE	8,344.2	12,105	20,449.20
DI	8,344.2	12,375	20,719.20

7.5 การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของท่อแต่ละชนิด

เมื่อได้ข้อมูลค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างวางท่อและซ่อมท่อแล้ว นำข้อมูลที่ได้มารวมกันกำหนดให้ปีที่มีการก่อสร้างเป็นปีที่ 0 แล้วคิดค่าซ่อมท่อต่อปีตามจำนวนจุดรั่วที่ประมาณการไว้ โดยราคาของอุปกรณ์ที่ใช้ในการซ่อมท่อจะมีราคาเพิ่มขึ้นปีละ 3% ตามอัตราเงินเฟ้อ และค่าแรงเพิ่มขึ้นปีละ 1% โดยอ้างอิงจากราคากลางค่างานซ่อมท่อประเภทต่างๆของการประปานครหลวง

นำข้อมูลค่าใช้จ่ายต่างๆมาคิดเป็นมูลค่าปัจจุบัน เนื่องจากค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นหลังจากปีที่มีการก่อสร้างวางท่อจะพิจารณามูลค่าของเงินที่ลดลงเมื่อเวลาผ่านไปด้วย ทำให้ค่าใจ่ายนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าใช้จ่ายในปัจจุบัน ทำให้ต้องคำนวณค่าใช้จ่ายของแต่ละปีเป็นมูลค่าปัจจุบันจึงจะทำการเปรียบเทียบกันได้ ตามตารางที่ 4.10 ถึงตารางที่ 4.13 โดยคิดค่าอัตราคิดลดหรือ ค่า i ที่ 6% ตามอัตราเงินกู้ที่การประปานครหลวงกำหนดให้ใช้ในการคิดค่า Factor F และภาพรวมของค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานคิดเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิของท่อแต่ละชนิดตามภาพที่ 7.1



ภาพที่ 7.1 ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของท่อแต่ละชนิดช่วงอายุ 30 ปี

8. สรุปผลการวิจัย

8.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์เปรียบเทียบต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของท่อประปาขนาด 300 มม. ชนิดต่างๆ โดยอ้างอิงจากข้อมูลของท่อ PVC Class 8.5 บริเวณซอยแจ้งวัฒนะ 10 ที่ก่อสร้างเมื่อปี 2549 มีความยาวท่อ 959 เมตร ก่อสร้างวางท่อในถนนคอนกรีต อายุของท่อ 12 ปี ณ ปีพ.ศ. 2561 แล้วทำการประมาณการหาจำนวนจุดแตกรั่วของท่อ ใช้สมการ Polynomial เพื่อใช้เป็นสมการแทนข้อมูลจำนวนจุดแตกรั่วมาคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การรับแรงกระทำของท่อชนิดอื่นๆอีก 3 ชนิด คือ PVC Class 13.5, HDPE Class PN10 และ DI Class K9 ซึ่งได้จากการทดสอบแบบจำลองด้วย Program SolidWorks เพื่อหาแรงกระทำที่ทำให้ท่อแต่ละชนิดสูญเสียคุณสมบัติถึงจุด Yield Point โดยกำหนดให้ค่าดัชนีโอกาสแตกรั่วของ PVC Class 8.5 มีค่าเป็น 1 และประมาณจำนวนจุดแตกรั่วในระยะเวลา 30 ปี เท่ากับอายุการใช้ที่การประปานครหลวงออกแบบไว้ เพื่อหาแนวโน้มการแตกรั่วที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นทำการคำนวณค่าใช้จ่าย โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ 1. ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างวางท่อ ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายในการดำเนินก่อสร้างวางท่อ , ค่าติดตั้งอุปกรณ์อื่นๆตามมาตรฐานของการประปานครหลวง, ค่าใช้จ่ายในการทาบและซ่อมผิวจราจร 2. ค่าใช้จ่ายในการซ่อมท่อ ประกอบด้วย ค่าซ่อมท่อ, ค่าติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์, ค่าซ่อมแซมพื้นผิวจราจร โดยคิดราคาค่าวัสดุและอุปกรณ์เพิ่มขึ้นปีละ 3% ตามอัตราเงินเฟ้อ และค่าแรงเพิ่มขึ้นปีละ 1% แล้วทำเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ นำข้อมูลค่าใช้จ่ายทั้งหมดมารวมกันเพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าของท่อแต่ละชนิด โดยเทียบเป็นข้อมูลรายปี

ผลการวิจัยพบว่าช่วงปีที่ 0 – 27 ท่อ PVC Class 8.5 มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด เนื่องจากค่าก่อสร้างวางท่อของท่อ PVC Class 8.5 มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับท่อชนิดอื่นๆ โดยค่าของท่อ PVC Class 13.5 แพงกว่าท่อ DI โดยที่ท่อ HDPE Class PN10 มีค่าใช้จ่ายมากที่สุดและมีจำนวนจุดแตกรั่วเท่ากับกับ PVC Class 8.5 โดยสาเหตุที่ค่าใช้จ่ายในการวางท่อของท่อ PVC Class 8.5 น้อยที่สุดเนื่องมาจากค่าวัสดุท่อมีราคาต่ำกว่าท่อชนิดอื่นมาก ช่วงปีที่ 28 เป็นต้นไป ท่อ DI มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด เนื่องมาจาก ท่อ PVC Class 8.5 มีจำนวนจุดแตกรั่วเพิ่มมากขึ้นในอัตราที่มากกว่าท่อชนิดอื่นทุกๆปี ทำให้ค่าใช้จ่ายในการซ่อมท่อมีปริมาณมากขึ้นกว่าค่าใช้จ่ายในการซ่อมท่อของท่อชนิดอื่นมาก ท่อ DI มีความคุ้มค่าในการลงทุนมากที่สุดในช่วงอายุการออกแบบท่อในระยะเวลา 30 ปี

8.2 ข้อเสนอแนะ

- ท่อ DI และอุปกรณ์ประกอบท่อเป็นอุปกรณ์ที่มาจากต่างประเทศเนื่องจากยังไม่มีผู้ผลิตในประเทศไทย

- ผลการศึกษาในครั้งนี้ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการ เช่น อุปสรรคในการก่อสร้างได้ดินที่อาจจะทำให้ต้องมีการเพิ่มค่างานก่อสร้าง การเพิ่ม-ลดของแรงดันน้ำในเส้นท่อที่อาจจะมีผลต่อแต่กร่วมมากขึ้น

บรรณานุกรม

- การประปานครหลวง ฝ่ายสำรวจและออกแบบ. (2560). *คู่มือปฏิบัติงานการสำรวจและออกแบบงานวางท่อ*
ประปา. กรุงเทพฯ: การประปานครหลวง
- การประปานครหลวง คณะทำงานโครงการยกระดับมาตรฐานการซ่อมท่อเพื่อสร้างความเชื่อมั่นด้านความ
สะอาด. (2560). *คู่มือปฏิบัติงานการซ่อมท่อประปาสำหรับสำนักงานประปาสาขา*. กรุงเทพฯ: การ
ประปานครหลวง
- อริยุด จงใจ. (2556). *การศึกษาทางเลือกเพื่อใช้เครื่องปรับอากาศของใหม่ และของเดิม โดยวิธีคำนวณต้นทุน*
วงจรอายุ (Life Cycle Cost, LCC) กรณีศึกษา มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต (วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
- กนกวรรณ รุ่งอินทร์ และ ศิริชัย ตันรัตนวงศ์. (2560). *การประเมินความคุ้มค่าของโครงการระหว่างถนน*
คอนกรีตและถนนผิวแอสฟัลติกคอนกรีต โดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎี Life Cycle Cost. รายงาน
สืบเนื่องการประชุมวิชาการ (Proceeding) การนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ เครือข่ายบัณฑิตศึกษา
มหาวิทยาลัยราชภัฏภาคเหนือ ครั้งที่ 17, 2415-2427.
- ยุทธนา ปัญจนศักดิ์. (2556). *การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานระหว่างถนนแอสฟัลต์และ*
ถนนคอนกรีต (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- สิตรินทร์ รัชมฤกษ์. (2557). *แนวทางการซ่อมแซมสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอ*
ไรด์และการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท). กรุงเทพฯ:
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- จิรัฐติกา ททรัพย์สมบูรณ์. (2554). *การศึกษาแบบจำลองการกระจายตัวของประชากรด้วยข้อมูลการใช้ประโยชน์*
ที่ดินในรูปแบบสมการถดถอยโพลีโนเมียลกำลังสอง: กรณีศึกษา จังหวัด สุพรรณบุรี (วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย