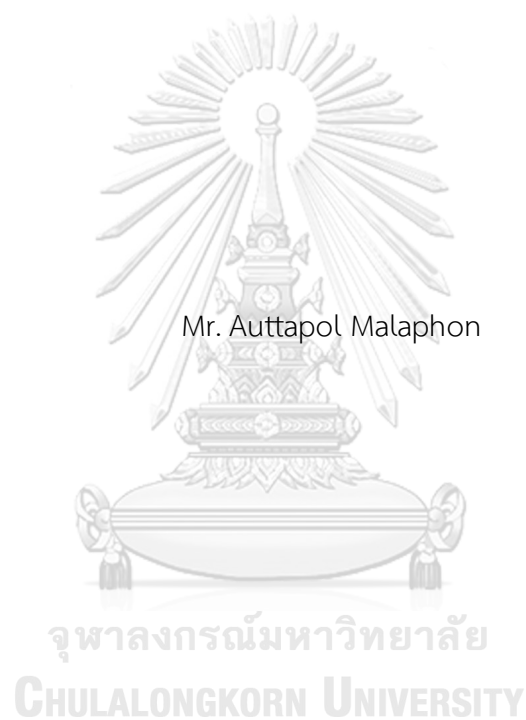


การศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองคาดการณ์การแพร่ระบาดของท่อประปา: กรณีศึกษาการประปาส่วน
ภูมิภาคสาขาลาดยาว



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPARATIVE STUDY OF PIPE BREAKAGE PREDICTION MODELS: A CASE STUDY OF
LATYAO PROVINCIAL WATERWORKS AUTHORITY



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Survey Engineering
Department of Survey Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2018
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองคาดการณ์การแตกตัวของ
ท่อประปา: กรณีศึกษาการประปาส่วนภูมิภาคสาขาลาดยาว
โดย นายอรรถพล มาลาพร
สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร.ชนินทร์ ทินนโชติ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
..... ประธานกรรมการ
(ดร.ชัยโชค ไวกาษา)
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนินทร์ ทินนโชติ)
..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บรรเจิด พละการ)
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.สุวัฒน์ จิตตลดากร)

อรรถพล มาลาพร : การศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองคาดการณ์การแตกรั่วของท่อประปา:
กรณีศึกษาการประปาส่วนภูมิภาคสาขาลาดยาว. (COMPARATIVE STUDY OF PIPE
BREAKAGE PREDICTION MODELS: A CASE STUDY OF LATYAO PROVINCIAL
WATERWORKS AUTHORITY) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ชนินทร์ ทิพนนโชติ

การฟื้นฟูและเปลี่ยนแปลงทดแทนเส้นท่อประปาที่เสื่อมสภาพและมักมีการแตกรั่ว นับเป็นภารกิจหลักที่มีความสำคัญอย่างมากของหน่วยงานผู้ให้บริการน้ำประปาทุกแห่งรวมถึงการประปาส่วนภูมิภาค (กปภ.) ด้วย เพราะการที่สามารถเปลี่ยนท่อทดแทนท่อที่เสื่อมสภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพจะช่วยลดปัญหาน้ำสูญเสียอันเนื่องจากการแตกรั่วของท่อ ลดผลกระทบต่อการให้บริการและลดงบประมาณที่ต้องใช้ดำเนินการในการค้นหาจุดรั่วและทำการซ่อมแซมลงได้อย่างมาก ที่ผ่านมา กปภ.ได้ดำเนินการเปลี่ยนท่อทดแทนท่อที่เสื่อมสภาพมาอย่างต่อเนื่อง แต่ไม่สามารถลดน้ำสูญเสียได้อย่างที่ควรจะเป็น ทำให้เกิดคำถามถึงความแม่นยำของแบบจำลองที่ใช้ในการคัดเลือกเส้นท่อที่เสื่อมสภาพที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอผลการศึกษาแบบจำลองทางสถิติหลากหลายรูปแบบสำหรับอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการเสื่อมสภาพของเส้นท่อประปากับปัจจัยประเภทท่อ อายุการใช้งาน ประวัติการแตกรั่ว รวมทั้งปัจจัยสภาพแวดล้อมอื่น ๆ อีกหลายประการ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะเปรียบเทียบแบบจำลองทางสถิติเหล่านั้น เพื่อใช้คาดการณ์อัตราการแตกรั่วของเส้นท่อประปาของ กปภ.สาขาลาดยาว ด้วยแบบจำลองการถดถอย 5 รูปแบบ ได้แก่ แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น แบบจำลองการถดถอยทวิกำลัง แบบจำลองการถดถอยปัวส์ซอง แบบจำลองการถดถอยโลจิสติกและแบบจำลองการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการคัดเลือกเส้นท่อที่เสื่อมสภาพ พบว่า แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น มีความเหมาะสมกับพื้นที่ศึกษามากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนด (R^2) เท่ากับ 0.50 มีค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (S) เท่ากับ 0.2058 เมื่อนำแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นที่ได้มาตรวจสอบความถูกต้องโดยทดลองใช้คาดการณ์อัตราการแตกรั่วระหว่างปี 2559-2561 พบว่าให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองความคลาดเคลื่อน (RMSE) ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.2755 และนำไปใช้ประเมินความเสื่อมสภาพของเส้นท่อสามารถคาดการณ์ได้แม่นยำที่อัตราการแตกรั่วน้อยและลดลงเมื่ออัตราการแตกรั่วเพิ่มสูงขึ้น

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5970357821 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORD: Prediction model, Pipe breaks, Break rate, Regression model

Auttapol Malaphon : COMPARATIVE STUDY OF PIPE BREAKAGE PREDICTION MODELS: A CASE STUDY OF LATYAO PROVINCIAL WATERWORKS AUTHORITY.

Advisor: Assoc. Prof. Chanin Tinnachote, Ph.D.

Pipe rehabilitation and replacement is one of the main activities of all water utility organizations including Provincial Waterworks Authority (PWA). As efficient selection and replacement of proper deteriorated pipes can significantly reduce water loss that caused by leakages and breaks of pipes and therefore improving quality of service and reducing budget required to seek and repair the leak points. After all the past years, PWA has continuously performed pipe rehabilitation and replacement but still cannot lower the water loss to the figure expected. This has raised question on the accuracy of the pipe selection model being used. Currently, a number of studies on various statistic models are proposed for describing relationship between pipe deterioration and pipe type, pipe age, pipe leak history, and many other environmental factors. This research aims to compare those statistical models. With 5 regression models including linear regression models model, exponential regression model, poisson regression model, logistic regression model and nonlinear regression model. Found that the linear regression model is most suitable for this study area give a coefficient of determination (R^2) is 0.50 and a standard error of regression (S) is 0.2058. When applying the linear regression model that has been validated by using predictions for the rate of breakage between 2016 and 2018, it is found that the Root Mean Square Error (RMSE) is as low as 0.2755. Used to estimate the deterioration of the pipe can be predicted to have good accuracy at low breakage rate and decrease when the rate of breakage is high.

Field of Study: Survey Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนจากบุคคลหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชนินทร์ ทินนโชติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่เสียสละเวลา ให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำ ความรู้ แนวคิด ตลอดจนเทคนิควิธีการดำเนินงานวิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ชัยโชค ไวกาษา ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. บรรเจิด พละการ และ ศาสตราจารย์ ดร. สุวัฒนา จิตตลดากร ที่ได้สละเวลาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ พร้อมทั้งให้คำแนะนำและแนวทางในการทำงานให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ ที่ได้มอบความรู้และคำแนะนำแก่ข้าพเจ้า ตลอดจนถึง เพื่อน พี่ น้อง ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คอยให้คำปรึกษา กำลังใจ และ ช่วยเหลือกันตลอดมา

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนและกำลังใจเสมอมา ทั้งนี้ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจและเกิดประโยชน์แก่ประเทศชาติต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

อรรถพล มาลาพร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง	ง
กิตติกรรมประกาศ.....จ	จ
สารบัญ.....ฉ	ฉ
สารบัญตาราง.....ฉ	ฉ
สารบัญรูป.....ฐ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ..... 1	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา..... 1	1
1.2 วัตถุประสงค์..... 3	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย..... 3	3
1.3.1 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา..... 3	3
1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา..... 3	3
1.3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา..... 4	4
1.3.3.1 ข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ของ กปภ.สาขาลาดยาว..... 4	4
1.3.3.2 ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน..... 6	6
1.3.3.3 ข้อมูลชนิดของดิน..... 8	8
1.3.3.4 ข้อมูลแรงดัน..... 9	9
1.3.4 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย..... 9	9
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 10	10
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 11	11
2.1 แนวคิดเบื้องต้น..... 11	11

2.2 สาเหตุของความล้มเหลวของเส้นท่อ.....	12
2.3 แนวคิดวิธีการสร้างแบบจำลองความล้มเหลวของเส้นท่อที่ผ่านมา	13
2.3.1 แบบจำลองทางสถิติ (Statistical Models).....	15
2.3.1.1 Statistical Deterministic Models	15
2.3.1.2 Statistical Probabilistic Models	18
2.3.2 แบบจำลองกายภาพ (Physical Models).....	20
2.4 เอกสารและงานวิจัยด้านแบบจำลองความล้มเหลวของเส้นท่อ.....	22
2.5 ทฤษฎีและเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูล	29
2.5.1 แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Model).....	29
2.5.2 แบบจำลองการถดถอยทวีกำลัง (Exponential Regression Model).....	30
2.5.3 แบบจำลองการถดถอยปัวส์ซอง (Poisson Regression Model).....	31
2.5.4 แบบจำลองการถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression Model).....	32
2.6 เครื่องมือในการวิเคราะห์สถิติ.....	33
2.6.1 วิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระ.....	33
2.6.2 สถิติสำหรับทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง.....	37
2.6.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (Coefficient of determination, R^2).....	37
2.6.2.2 ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานการถดถอย (Standard error of the regression, S)	38
2.6.2.3 Akaike Information Criterion (AIC)	38
2.6.3 วิธีการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	39
2.6.4 ค่าสถิติ Cook's distance, D.....	39
2.7 ความรู้และข้อมูลพื้นฐาน.....	39
2.7.1 ความแตกต่างระหว่างการแตกเร็วและการรั่วไหล	40
2.7.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสื่อมสภาพของท่อ	40
2.7.2.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสื่อมสภาพท่อและการแตกเร็ว.....	41

2.7.2.2	ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อทอรั่ว	43
2.7.3	ข้อมูลพื้นฐาน กปภ.สาขาลาดยาว.....	44
บทที่ 3	ขั้นตอนดำเนินการวิจัย.....	46
3.1	การศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	49
3.2	การรวบรวมข้อมูล.....	49
3.3	การจัดเตรียมข้อมูล.....	54
3.4	การสร้างสมการสำหรับแบบจำลองการถดถอยทั้ง 5 รูปแบบ	55
3.4.1	รูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Model).....	56
3.4.2	รูปแบบสมการถดถอยทวีกำลัง (Exponential Regression Model).....	56
3.4.3	รูปแบบสมการถดถอยปัวส์ซอง (Poisson Regression Model).....	56
3.4.4	รูปแบบสมการถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression Model).....	57
3.4.5	รูปแบบสมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Regression Model).....	57
3.5	การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอย ด้วยซอฟต์แวร์ Minitab 17	57
3.6	การประเมินความเหมาะสมของแบบจำลอง.....	61
3.7	การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สมการถดถอย 5 รูปแบบ	62
3.8	การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองค่าการถดถอยการแตกตัวของเส้นท่อประปา	62
3.9	การวิเคราะห์และทดลองแนวทางการปรับปรุงแบบจำลอง.....	62
3.9.1	การจัดค่าผิดปกติ	63
3.9.2	การเพิ่มตัวทำนายอื่น ๆ.....	63
3.10	การประเมินความเสถียรภาพของเส้นท่อประปา.....	63
3.11	การสรุปผลการวิจัย.....	63
บทที่ 4	ผลการดำเนินงาน	64
4.1	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอยทั้ง 5 รูปแบบ.....	64
4.1.1	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Model).....	64

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอยทวีกำลัง (Exponential Regression Model)	71
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอยปัวส์ซอง (Poisson Regression Model)..	73
4.1.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression Model)...	76
4.1.5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Regression Model).....	79
4.2 ผลการเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอย	82
4.3 ผลตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยข้อมูลการแพร่จริงปี 2559-2561.....	83
4.4 ผลการทดลองเพื่อหาแนวทางสำหรับปรับปรุงแบบจำลองคาดการณ์การแพร่ของเส้นท่อ ประปา	84
4.4.1 ผลการทดลองหาค่าผิดพลาดโดยใช้วิธี Cook' s distance, D	84
4.4.2 ผลการทดลองเพิ่มจำนวนตัวแปรข้อต่อ (Joint).....	85
4.4.3 ผลการทดลองเพิ่มตัวแปรในแบบจำลองการถดถอยทวีกำลัง.....	86
4.5 ผลการเปรียบเทียบกับผลการประเมินความเสื่อมสภาพของเส้นท่อที่ กปภ.ดำเนินการอยู่ใน ปัจจุบัน.....	87
4.5.1 การประเมินความเสื่อมสภาพของเส้นท่อด้วยเกณฑ์ของ กปภ.	87
4.5.2 ประเมินความเสื่อมของเส้นท่อด้วยแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น	89
4.5.3 การเปลี่ยนแปลงปรับปรุงเส้นท่อจริงระหว่างปี 2559-2561	92
บทที่ 5 อภิปราย สรุปผล และข้อเสนอแนะ	94
5.1 อภิปรายผลการศึกษา.....	94
5.1.1 อภิปรายผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอยทั้ง 5 รูปแบบ	94
5.1.2 อภิปรายผลการทดลองปรับปรุงแบบจำลอง	96
5.1.3 อภิปรายการประเมินความเสื่อมสภาพของท่อระหว่างวิธีของ กปภ.และการใช้ แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น	96
5.2 สรุปผลการศึกษา	97

5.3 ข้อเสนอแนะ	98
บรรณานุกรม.....	100
ประวัติผู้เขียน.....	103



สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 คำอธิบายข้อมูลเชิงบรรยายของชั้นข้อมูลการซ่อมท่อรั่ว (LEAKPOINT)	5
ตารางที่ 1.2 คำอธิบายข้อมูลเชิงบรรยายของชั้นข้อมูลท่อประปา (PIPE).....	6
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างเกณฑ์ความล้มเหลวของท่อ.....	12
ตารางที่ 2.2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาของ Yamijala.....	23
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการถดถอยปัวส์ซอง (Poisson Regression).....	24
ตารางที่ 2.4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาของ Bublina.....	26
ตารางที่ 2.5 ลักษณะทั่วไปของการรั่วไหลและการแตกรั่ว.....	40
ตารางที่ 2.6 รายละเอียดพื้นที่บริการ กปภ.สาขาลาดยาว.....	44
ตารางที่ 2.7 ข้อมูลกำลังการผลิต กปภ.สาขาลาดยาว.....	45
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา.....	51
ตารางที่ 3.2 การให้รหัสตัวแปรหุ่น (Dummy Code Variable).....	52
ตารางที่ 3.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ของตัวแปรบางตัวแปรจาก การประมวลผลใน Minitab 17.....	53
ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับใช้ในการวิเคราะห์การถดถอย.....	54
ตารางที่ 4.1 ผลการคัดเลือกตัวแปรอิสระที่มีระดับนัยสำคัญกับอัตราการแตกรั่วด้วยวิธี Stepwise	66
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นที่ได้จากการคัดเลือกตัวแปรด้วยวิธี None/ Enter, Forward, Backward และ Stepwise ในซอฟต์แวร์ Minitab 17.....	67
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกรั่วของท่อประปา	68
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์การถดถอยทวิกำลังด้วยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกรั่วของท่อประปา	71
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์การถดถอยปัวส์ซองด้วยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกรั่วของท่อประปา	74

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกด้วยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกรื้อของท่อประปา
..... 77

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกรื้อของ
ท่อประปา..... 80

ตารางที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สมการถดถอยทั้ง 5 รูปแบบ 83

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลการแตกรื้อจริงระหว่างปี 2559-2561
..... 83

ตารางที่ 4.10 ผลการปรับปรุงแบบจำลองด้วยจำกัดค่าผิดพลาดโดยใช้วิธี Cook' s distance, D..... 85

ตารางที่ 4.11 ผลการปรับปรุงแบบจำลองด้วยการเพิ่มตัวแปรจำนวนข้อต่อ (Joint)..... 86

ตารางที่ 4.12 ผลการปรับปรุงแบบจำลองด้วยการเพิ่มตัวแปรในแบบจำลองการถดถอยทวิกำลัง.... 87

ตารางที่ 4.13 การประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองจากการจำแนกอัตราการแตกรื้อเป็น 4 ระดับ. 91



สารบัญรูป

รูปที่ 1.1	ขอบเขตพื้นที่ศึกษา.....	4
รูปที่ 1.2	พื้นที่ซ้อนทับระหว่างข้อมูลเส้นท่อกับข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน.....	7
รูปที่ 1.3	พื้นที่ซ้อนทับระหว่างข้อมูลเส้นท่อกับข้อมูลชนิดของดิน	9
รูปที่ 2.1	สรุปภาพรวมของแบบจำลองทางสถิติ.....	14
รูปที่ 2.2	สรุปภาพรวมปัจจัยเชิงกายภาพหรือปัจจัยเชิงกล.....	15
รูปที่ 2.3	เส้นโค้งรูปร่างอ่างอาบน้ำ (bathtub curve) ของวงจรชีวิตของท่อที่ถูกฝัง.....	20
รูปที่ 2.4	เปรียบเทียบระหว่างค่าจริง ค่าคาดการณ์และค่าที่เพิ่มประสิทธิภาพการคาดการณ์	28
รูปที่ 2.5	แผนภาพจำนวนผู้ใช้น้ำ.....	45
รูปที่ 3.1	แผนการดำเนินงาน.....	47
รูปที่ 3.2	ขั้นตอนประมวลผลแบบจำลองคาดการณ์การแตกร้าวของท่อประปา	48
รูปที่ 3.3	ตัวอย่างข้อมูล GIS เส้นท่อประปาและจุดซ่อมท่อ (สถิติการแตกร้าว).....	50
รูปที่ 3.4	แสดงฮิสโตแกรมของบางตัวแปร.....	52
รูปที่ 3.5	ขั้นตอนการคำนวณเปอร์เซ็นต์ต่อความยาวในซอฟต์แวร์ ArcGIS 10.2.....	55
รูปที่ 3.6	การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นด้วย Fit Regression Model.....	58
รูปที่ 3.7	วิธีการคัดกรองตัวแปรอิสระด้วย Stepwise.....	58
รูปที่ 3.8	ค่าต่าง ๆ จากการคำนวณโดยซอฟต์แวร์ Minitab 17.....	59
รูปที่ 3.9	Boxplot ระหว่างค่าที่คาดการณ์ได้จากแบบจำลอง (FITS1) กับค่าการแตกร้าวจริง(BR_Y)61	
รูปที่ 3.10	แสดง Scatterplot ของค่า Cook's Distance.....	61
รูปที่ 4.1	เปรียบเทียบอัตราการแตกร้าวที่คาดการณ์ได้ (Predicted) กับอัตราการแตกร้าวที่เกิดขึ้นจริง (Actual) ด้วยแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น.....	70
รูปที่ 4.2	ค่าเศษเหลือ (Residual) ของเส้นท่อแต่ละเส้นในแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น	71
รูปที่ 4.3	เปรียบเทียบอัตราการแตกร้าวที่คาดการณ์ได้ (Predicted) กับอัตราการแตกร้าวที่เกิดขึ้นจริง (Actual) ด้วยแบบจำลองการถดถอยทวิกำลัง.....	72

รูปที่ 4.4 ค่าเศษเหลือ (Residual) ของเส้นท่อนแต่ละเส้นในแบบจำลองการถดถอยทวิกำลัง.....	73
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบอัตราการแปรผันที่คาดการณ์ได้ (Predicted) กับอัตราการแปรผันที่เกิดขึ้นจริง (Actual) ด้วยแบบจำลองการถดถอยปีวส์ของ.....	75
รูปที่ 4.6 ค่าเศษเหลือ (Residual) ของเส้นท่อนแต่ละเส้นในแบบจำลองการถดถอยปีวส์ของ	76
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบโอกาสของการเกิดการแปรผันที่คาดการณ์ได้ (Predicted) กับเหตุการณ์การเกิดการแปรผันที่เกิดขึ้นจริง (Actual) ด้วยแบบจำลองการถดถอยโลจิสติก.....	78
รูปที่ 4.8 ค่า Residual ของเส้นท่อนแต่ละเส้นในแบบจำลองการถดถอยโลจิสติก.....	79
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบอัตราการแปรผันที่คาดการณ์ได้ (Predicted) กับอัตราการแปรผันที่เกิดขึ้นจริง (Actual) ด้วยแบบจำลองการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น	81
รูปที่ 4.10 ค่า Residual ของเส้นท่อนแต่ละเส้นในแบบจำลองการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น	82
รูปที่ 4.11 การประเมินความเสื่อมของเส้นท่อด้วยวิธีการประเมินเดิมของการประปาส่วนภูมิภาค ..	88
รูปที่ 4.12 อัตราการแปรผันของแต่ละเส้นท่อที่คาดการณ์ได้จากแบบจำลองการถดถอยเวลาเชิงเส้น	90
รูปที่ 4.13 อัตราการแปรผันของแต่ละเส้นท่อที่เกิดขึ้นจริงระหว่างปี 2559-2561	91
รูปที่ 4.14 อัตราการแปรผันของแต่ละเส้นท่อที่เกิดขึ้นจริงระหว่างปี 2555-2558	93
รูปที่ 4.15 การปรับปรุงเส้นท่อที่เกิดขึ้นจริงในปี 2559-2561	93

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การประปาส่วนภูมิภาคเรียกโดยย่อว่า “กปภ.” เป็นรัฐวิสาหกิจบริการด้านสาธารณูปโภค พื้นฐานด้านน้ำประปาให้บริการใน 74 จังหวัด (ยกเว้นกรุงเทพฯ นนทบุรี และสมุทรปราการ) กำหนดโครงสร้างการบริการประชาชนโดยมีสายปฏิบัติการ 5 ภาค 10 เขต 234 สาขา และมีหน่วยบริการย่อย 356 หน่วย (การประปาส่วนภูมิภาค, 2559) มีความยาวท่อส่งและท่อจ่ายน้ำรวมกันประมาณ 50,000 กิโลเมตร ประกอบด้วยท่อชนิด PVC, HDPE, PB, GRP และ A/C ซึ่งท่อบางส่วนที่เป็นท่อเก่ามักเกิดปัญหาการแตกรั่วบ่อยครั้ง จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดน้ำสูญเสียสูงตลอดระยะเวลา 30 ปีที่ผ่านมา (การประปาส่วนภูมิภาค, 2552)

หนึ่งในกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพในการลดน้ำสูญเสีย คือ การเปลี่ยนเส้นท่อที่เสื่อมสภาพออกไป แต่เนื่องด้วยงบประมาณที่มีอยู่อย่างจำกัด การเปลี่ยนเส้นท่อที่เสื่อมสภาพให้ครบทุกเส้นจึงเป็นไปได้ยาก การคัดเลือกเส้นท่อจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้การเปลี่ยนเส้นท่อในแต่ละครั้งเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ที่ผ่านมามี กปภ. มีกลยุทธ์ที่ใช้พิจารณาและประเมินสำหรับการเปลี่ยนปรับปรุงเส้นท่อด้วยการประเมินสภาพท่อจากหน่วยงาน และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญร่วมกับการพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกรั่วของท่อประปา 7 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยที่หนึ่งชนิดของท่อเป็นท่อแข็งเปราะ ไม่ยืดหยุ่น ปัจจัยที่สองอายุการใช้งานมากกว่า 10 ปี ปัจจัยที่สามเป็นช่วงท่อที่มีแรงดันน้ำสูง เช่น ช่วงที่อยู่ใกล้สถานีจ่ายน้ำ สถานีเพิ่มแรงดันหรือวางอยู่ในระดับต่ำกว่าต้นทางหรือปลายทางค่อนข้างมาก ปัจจัยที่สี่คุณภาพการวางท่อไม่ได้มาตรฐาน เช่น เป็นท่อช่วงที่วางเบี่ยงเบนไปมาทั้งแนวราบหรือแนวตั้ง หรือวางโดยใช้จำนวนข้อต่อมาก เพื่อหลีกเลี่ยงอุปสรรคในการวางท่อ หรือไม่มีการใช้วัสดุรองรับท่อ หรือหุ้มท่ออย่างเหมาะสม ปัจจัยที่ห้าเป็นท่อที่ช่วงที่วางบริเวณที่มียานพาหนะขนาดใหญ่วิ่งผ่านประจำ หรือบริเวณที่วางท่อโดยรอบเป็นดินอ่อน ปัจจัยที่หกเป็นพื้นที่ที่เกิดภัยธรรมชาติซ้ำซากที่มีผลกับแนวท่อประปา เช่น แผ่นดินไหว และปัจจัยสุดท้าย คือ เกิดจากการกระทำจากบุคคลภายนอก เช่น การก่อสร้างอื่น ๆ ใกล้แนวท่อ เภณท์ทั้งหมดเหล่านี้จะถูกให้ค่าคะแนนเท่าๆ กัน อีกทั้งบางเณท์ยังยากที่จะระบุหรือยังไม่มีข้อมูลไว้ หลายครั้งพบว่า

หลังจากมีการเปลี่ยนแปลงปรับปรุงเส้นท่อแล้ว อัตราน้ำสูญเสียไม่ได้ลดลงอย่างที่ควรจะเป็น จึงมีข้อสันนิษฐานว่ายังคงมีเส้นท่อที่เสื่อมสภาพมากกว่า และยังไม่ถูกเลือกในการเปลี่ยนทดแทนไป

การสร้างแบบจำลองทางกายภาพของเส้นท่อในระบบจำหน่ายน้ำเป็นไปได้ยาก มีความซับซ้อนและค่าใช้จ่ายสูง อีกทั้งในความเป็นจริงยากที่จะทำการขุดเส้นท่อขึ้นมาตรวจสอบ เพื่อเก็บข้อมูลสภาพแท้จริงของเส้นท่อได้ การประปาต้องทำการตัดสินใจบำรุงรักษาเส้นท่อในระบบด้วยข้อมูลสภาพของท่อที่ไม่ครบถ้วนสมบูรณ์ ดังนั้นการวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพของท่อด้วยข้อมูลสถิติประวัติการแตกรั่ว ข้อมูลคุณลักษณะของท่อและเงื่อนไขสภาพแวดล้อมภายนอก จึงถูกนำมาใช้คาดการณ์อัตราการแตกรั่วของเส้นท่อ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายวัตถุประสงค์ เช่น กลยุทธ์ในการทดแทนและฟื้นฟู งบประมาณที่ใช้ซ่อมแซมในอนาคต การประเมินประสิทธิภาพทางเศรษฐกิจ เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับทดแทนท่อจ่ายน้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับกฎเกณฑ์ที่ใช้กำหนดในแต่ละระบบจำหน่ายน้ำ (Yamijala, Guikema และ Brumbelow, 2009) วิธีการทางสถิติถูกนำมาใช้กำหนดรูปแบบการแตกรั่วของท่อประปาในอนาคต ภายใต้สมมุติฐานที่ว่ารูปแบบทางประวัติศาสตร์เหล่านี้ยังคงดำเนินต่อเนื่องไปในอนาคต (Yehuda Kleiner และ Rajani, 2001)

สำหรับประเทศไทยยังไม่พบการศึกษาที่มีการนำค่าสถิติของการแตกรั่วมาใช้ในการวิเคราะห์และพัฒนาเป็นแบบจำลองคาดการณ์การแตกรั่วของเส้นท่อในระบบจำหน่ายน้ำ และปัจจุบันมีการพัฒนาแบบจำลองทางสถิติในการคาดการณ์การแตกรั่วอยู่หลายแบบจำลอง ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองคาดการณ์การแตกรั่วของเส้นท่อประปาในพื้นที่ศึกษาด้วยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกรั่วของท่อประปาด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย ทำให้เห็นถึงแนวโน้มของการแตกรั่วที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัยที่บ่งบอกถึงความเสื่อมสภาพหรือความล้มเหลวของเส้นท่อในระบบจำหน่ายน้ำ เพื่อนำไปประกอบการตัดสินใจสำหรับการทดแทนและบำรุงรักษาเส้นท่อในอนาคตให้มีประสิทธิภาพและความถูกต้องยิ่งขึ้น โดยใช้ข้อมูลประวัติการแตกรั่วในช่วงเวลาระยะเวลาหนึ่งของการประปาส่วนภูมิภาคสาขาลาดยาว ซึ่งข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแบบของข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ดังนั้นจึงเป็นประโยชน์อีกด้านหนึ่งที่จะได้นำข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ที่การประปาส่วนภูมิภาคได้พัฒนาขึ้นมาใช้เกิดประโยชน์เพื่อช่วยในการวิเคราะห์และตัดสินใจการดำเนินงานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองคาดการณ์การแตกตัวของเส้นท่อประปาในพื้นที่ศึกษาด้วยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของท่อประปาด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย

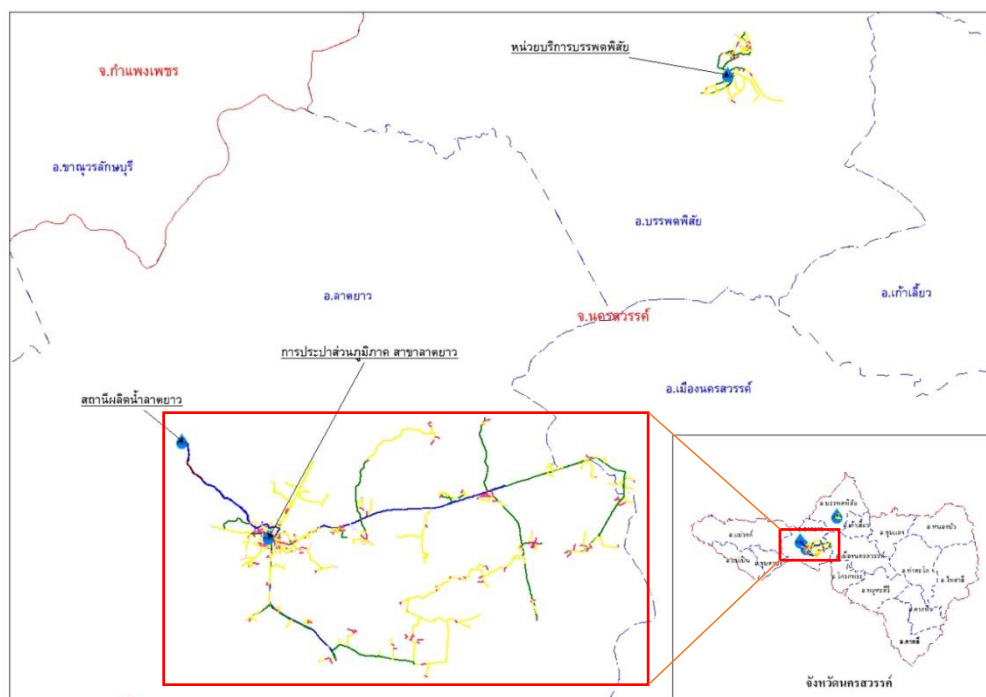
1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา

ขอบเขตเนื้อหาที่ศึกษา ได้แก่ การศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองคาดการณ์การแตกตัวของท่อประปา ทั้ง 5 รูปแบบ ได้แก่ แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Model) แบบจำลองการถดถอยทวีกำลัง (Exponential Regression Model) แบบจำลองการถดถอยปัวส์ซอง (Poisson Regression Model) แบบจำลองการถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression Model) และแบบจำลองการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Regression Model) โดยใช้ปัจจัยที่เป็นลักษณะทางกายภาพของเส้นท่อ ได้แก่ ชนิดวัสดุ ขนาด อายุ และความยาวของเส้นท่อ เป็นปัจจัยหลักในการสร้างแบบจำลองเบื้องต้น และทดลองใช้ปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อมภายนอกอื่น ๆ เช่น แรงดันน้ำในเส้นท่อ เนื้อดิน และการใช้ประโยชน์ที่ดินมาใช้ปรับปรุงแบบจำลองการแตกตัวของเส้นท่อ

1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

ขอบเขตพื้นที่ศึกษาที่ใช้ในการวิจัยครอบคลุมระบบจำหน่ายน้ำของ กปภ.สาขาลาดยาว ซึ่งแบ่งเป็น 2 หน่วยบริการ มีพื้นที่บริการรวม 3.25 ตารางกิโลเมตร สำหรับในการศึกษานี้จะวิเคราะห์เฉพาะแม่ข่ายลาดยาวตามกรอบสีแดงในรูปที่ 1.1 เท่านั้น ประกอบด้วยท่อจ่ายน้ำหลัก 323 เส้น ความยาวรวมประมาณ 178 กิโลเมตร ให้บริการลูกค้า 5,907 ราย ตั้งอยู่ในเขตเทศบาลตำบลลาดยาว อำเภอลาดยาว จังหวัดนครสวรรค์



รูปที่ 1.1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

1.3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย เป็นข้อมูลภูมิสารสนเทศ ที่ครอบคลุมพื้นที่ กปภ.สาขาลาดยาว ซึ่งได้มาจาก กปภ.สาขาลาดยาว และกรมแผนที่ดิน ซึ่งมีมาตราส่วนแผนที่ต่างกัน ดังนั้นจะใช้ข้อมูลท่อประปา (PIPE) เป็นแผนที่ฐาน (Base Map) เนื่องจากมีมาตราส่วนใหญ่ที่สุด คือ 1:4,000 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.3.1.1 ข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ของ กปภ.สาขาลาดยาว

สำหรับข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ของ กปภ.สาขาลาดยาว ประกอบด้วย ประวัติการซ่อมท่อและแนวเส้นท่อประปา ซึ่งถือว่าเป็นข้อมูลหลักที่สำคัญ สำหรับการวิเคราะห์ในงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ข้อมูลการซ่อมท่อรั่ว (LEAKPOINT) หรือต่อไปจะเรียกว่า สถิติการแตกรั่ว โดยเลือกเฉพาะประวัติการแตกรั่วในช่วงเวลาปี 2555-2561 เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่ กปภ.สาขาลาดยาว เริ่มบันทึกข้อมูลสถิติการแตกรั่วอย่างครบถ้วนในรูปแบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ จึงเป็นข้อมูลที่ค่อนข้างครบถ้วนสมบูรณ์ที่จะนำมาใช้วิเคราะห์ในครั้งนี้ ข้อมูลการซ่อมท่อรั่ว เป็นข้อมูลแบบจุด แสดงตำแหน่งของจุดที่ได้ทำการซ่อมท่อที่แตกรั่วในแต่ละครั้ง ซึ่งจะซ้อนทับบนตำแหน่งชั้นข้อมูลท่อ

ประปา (PIPE) เส้นที่เกิดการแตกรั่ว นั้น ๆ ในข้อมูลเชิงบรรยายประกอบด้วยข้อมูลสำคัญ คือ วันที่ได้รับแจ้ง (LEAKDATE) สาเหตุที่ท่อรั่ว (LEAKCAUSE) และวันที่ซ่อมเสร็จ (REPAIRDATE) โดยมีรายละเอียดของแต่ละ Field ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 คำอธิบายข้อมูลเชิงบรรยายของชั้นข้อมูลการซ่อมท่อรั่ว (LEAKPOINT)
ที่มา: กองภูมิสารสนเทศ กปภ.

Table Name : LEAKPOINT		
Table Description : ชั้นข้อมูลจุดซ่อมท่อประปา		
Feature Class : POINT		
No.	Field Name	Description
1	LEAK_ID	เลขที่คำสั่งงานซ่อมท่อ
2	LEAKDATE	รับแจ้งเมื่อวันที่
3	LEAKTIME	รับแจ้งเมื่อเวลา
4	LOCATE	สถานที่อ้างอิงจุดซ่อม
5	LEAKCAUSE	สาเหตุที่ท่อรั่ว
6	LEAKDEPTH	ความลึกของท่อ(ม.)
7	PICTUREPATH	ชื่อไฟล์ภาพถ่าย
8	REPAIRBY	ผู้ซ่อม
9	REPAIRCOST	ค่าใช้จ่ายงานซ่อม
10	REPAIRDATE	วันที่ซ่อมเสร็จ
11	REPAIRTIME	เวลาที่ซ่อมเสร็จ
12	LEAKDETAIL	รายละเอียดงานซ่อม
13	LEAKCHECKER	ผู้ตรวจงานซ่อม
14	PWA_CODE	รหัสสำนักงานประปา
15	REC_DATE	วันที่บันทึกข้อมูล
16	PASSWORD	ผู้บันทึกข้อมูล
17	REMARK	หมายเหตุ

2) ข้อมูลท่อประปา (PIPE) ในงานวิจัยนี้จะนำเฉพาะท่อจ่ายน้ำหลัก (ท่อประธาน) ที่มีขนาดตั้งแต่ 100 มิลลิเมตรขึ้นไป มาใช้ในการวิเคราะห์สร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ เนื่องจากเป็นขนาดของเส้นท่อที่จะส่งผลกระทบเป็นบริเวณกว้างหากมีการแตกรั่ว ตลอดจนมีค่าใช้จ่ายในซ่อมบำรุงสูง และส่งผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพของระบบจำหน่ายน้ำ ชั้นข้อมูลท่อประปาจัดทำมาจากแบบก่อสร้างจริง (As-built drawing) มาตรฐาน 1:4,000 เส้นท่อแต่ละเส้นจะแสดงด้วยพีเจอร์

ของเส้น (Polyline) หนึ่งเส้น ซึ่งถูกกำกับด้วยรหัสท่อประปา (PIPE_ID) ของแต่ละเส้นท่อ และในแต่ละเส้นท่อจะประกอบด้วยข้อมูลเชิงบรรยายที่สำคัญ ได้แก่ ชนิดของท่อ (PIPE_TYPE), ขนาดของท่อ (PIPE_SIZE), ความยาวเส้นท่อ (LONG) และปีที่ทำการติดตั้งท่อ (YEARINSTALL) โดยมีรายละเอียดของแต่ละ Field ดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 คำอธิบายข้อมูลเชิงบรรยายของชั้นข้อมูลท่อประปา (PIPE)

ที่มา: กองภูมิสารสนเทศ กปภ.

Table Name : PIPE		
Table Description : ชั้นข้อมูลท่อจ่ายน้ำประปา		
Feature Class : LINE		
No.	Field Name	Description
1	PIPE_ID	รหัสท่อประปา
2	PROJECT_NO	เลขที่สัญญา
3	ASSET_CODE	รหัสครุภัณฑ์
4	PIPE_TYPE	ชนิดของท่อประปา
5	PIPE_SIZE	ขนาดท่อ (ม.ม.)
6	CLASS	ชั้นมาตรฐานท่อ
7	PIPE_FUNC	หน้าที่ของท่อ
8	LAYING	ลักษณะการวางท่อ
9	PRODUCT	ชื่อผลิตภัณฑ์ท่อ
10	DEPTH	ความลึก (ม.)
11	LONG	ความยาวท่อ (ม.)
12	YEARINSTALL	ปีพ.ศ. ที่ทำการวางท่อ
13	LOCATE	บริเวณที่วางท่อ
14	PWA_CODE	รหัสสำนักงานประปา
15	REC_DATE	วันที่บันทึกข้อมูล
16	PASSWORD	ผู้บันทึกข้อมูล
17	REMARK	หมายเหตุ

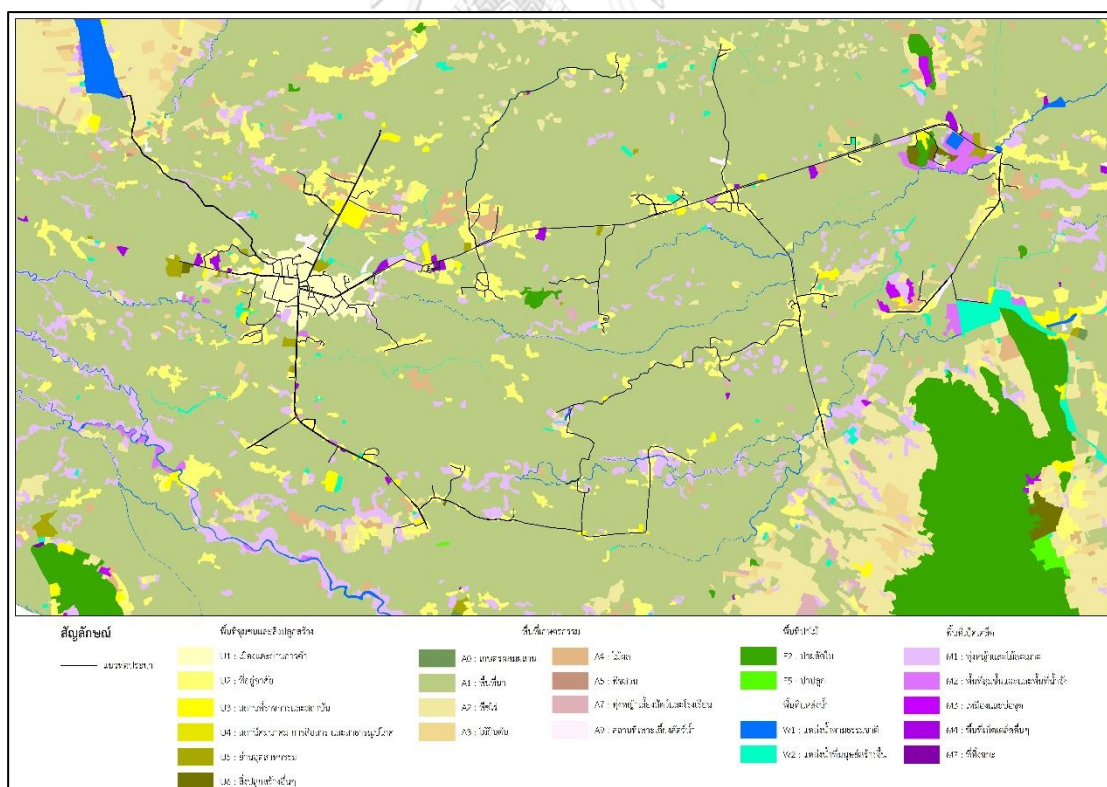
1.3.3.2 ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน

โดยกรมพัฒนาที่ดินปี พ.ศ. 2555-2560 มาตราส่วน 1:25,000 ซึ่งได้จากการแปลแผนที่ภาพถ่ายออร์โธรีซีเชิงเลขมาตราส่วน 1:4,000 มีลักษณะเป็นข้อมูลพื้นที่รูปปิด (Polygon) แบ่งเป็นประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินสัญลักษณ์ของประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน และ พื้นที่

การใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทต่าง ๆ กรมพัฒนาที่ดินได้แบ่งระดับการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินเป็น 3 ระดับ พร้อมด้วยรหัสเพื่อใช้กับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์แต่ในบางประเภทการจำแนกอาจจะได้เพียงระดับที่ 1 หรือที่ 2 เท่านั้น โดยข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินของจังหวัดนครสวรรค์ระดับที่ 1 สามารถจำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินได้ดังนี้

- 1) พื้นที่อยู่อาศัยจำแนกเป็นตัวเมือง และย่านการค้า หมู่บ้าน สถานที่ราชการ และสถาบันต่าง ๆ สถานีกมนาคม ย่านอุตสาหกรรม สถานที่พักผ่อนหย่อนใจ
- 2) พื้นที่เกษตรกรรมจำแนกเป็นนาข้าว พืชไร่ ไม้ยืนต้น ไม้ผล พืชสวน พืชหญ้าเลี้ยงสัตว์ โรงเรือนเลี้ยงสัตว์ สถานที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำพืชน้ำ
- 3) พื้นที่ป่าไม้
- 4) พื้นที่แหล่งน้ำ
- 5) พื้นที่เบ็ดเตล็ด

ในรูปที่ 1.2 แสดงพื้นที่ซ้อนทับระหว่างข้อมูลเส้นท่อประปาที่แสดงด้วยสีดำ ซึ่งมีมาตราส่วน 1:4,000 กับข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน มาตราส่วน 1:25,000

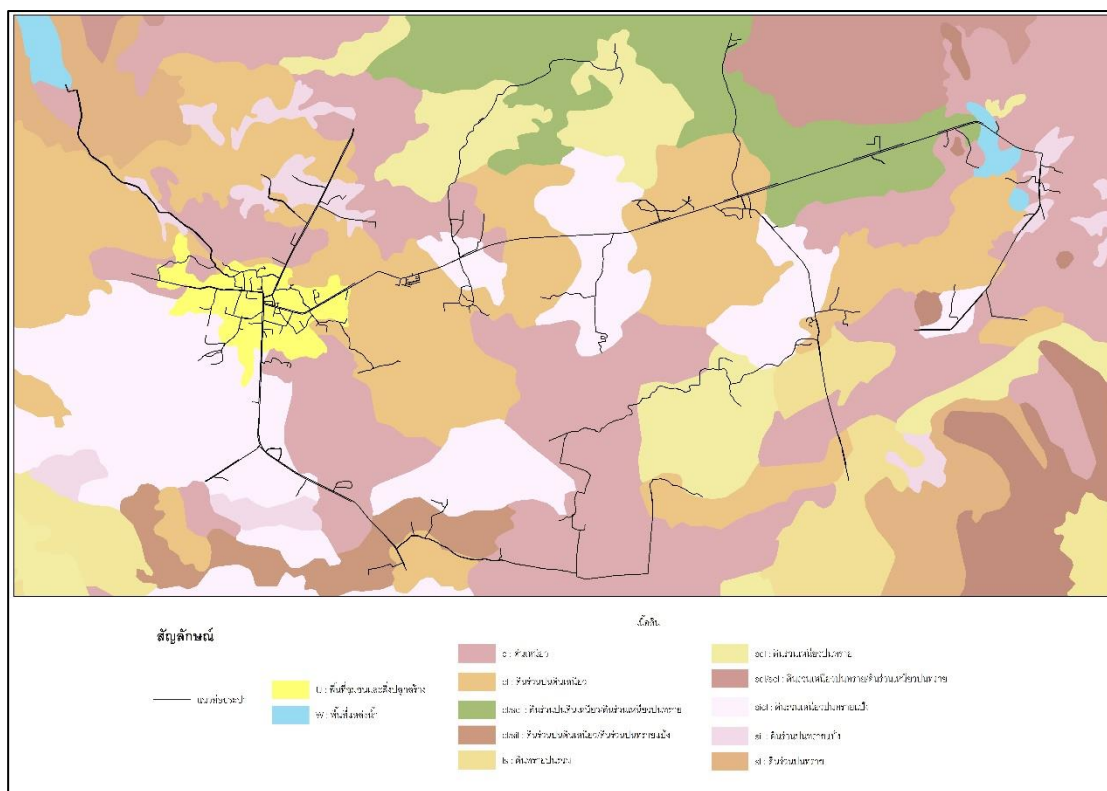


รูปที่ 1.2 พื้นที่ซ้อนทับระหว่างข้อมูลเส้นท่อประปาที่แสดงด้วยสีดำ ซึ่งมี

1.3.3.3 ข้อมูลชนิดของดิน

การศึกษาและสำรวจทรัพยากรดิน ภายใต้โครงการการปรับปรุงฐานข้อมูลทรัพยากรดินเบื้องต้นลงบนภาพถ่ายออร์โธรี ซึ่งมีการปฏิบัติงานในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคเหนือ ภาคกลาง และภาคใต้ ตามลำดับ มาตั้งแต่ปีงบประมาณ 2554 และสิ้นสุดในปีงบประมาณ 2559 เป็นการสำรวจ จำแนกดิน และจัดทำแผนที่ทรัพยากรดิน โดยมีหน่วยแผนที่อยู่ในระดับชุดดิน (soil series) ซึ่งเป็นการจำแนกดินขั้นต่ำสุด ในการจำแนกดินระบบอนุกรมวิธานดิน (soil taxonomy) แผนที่ดินมีขนาดมาตราส่วน 1:25,000 ประกอบกับความลาดชันของสภาพพื้นที่ (slope phase) รวมทั้งได้จัดทำข้อมูลฐานทรัพยากรดินเพื่อการเรียกใช้งานด้วย ที่ผ่านมารกรมพัฒนาที่ดินได้ดำเนินการสำรวจ จำแนก และทำแผนที่ดินในขนาดมาตราส่วน 1:25,000 แล้วเสร็จทั้งประเทศในปี 2553 โดยมีหน่วยแผนที่ในระดับกลุ่มชุดดิน (62 กลุ่มชุดดิน) แต่เนื่องจากข้อมูลดินที่มีอยู่เป็นฐานข้อมูลในระดับกว้าง ๆ สามารถนำไปใช้วางแผนการใช้ที่ดินเพื่อความเหมาะสมสำหรับการปลูกพืชเศรษฐกิจ และกิจกรรมอื่น ๆ ได้ในระดับหนึ่ง แต่เมื่อนำแผนที่ดินนี้ไปขยายเพื่อให้ลงในระดับไร่นา หรือแผนที่ตำบล ซึ่งเป็นระดับที่ต้องการความถูกต้องสูงเป็นปัจจุบัน และมีลักษณะจำเพาะของแต่ละพื้นที่ (specific area) ก็ยังคงขาดข้อมูลที่สำคัญ และจำเป็นอีกหลายประการ เช่น ทางด้านภูมิสารสนเทศ (ลักษณะสารสนเทศ) (landform) ชนิดวัตถุต้นกำเนิดดิน (parent material) การกำเนิดดิน การจำแนกดินตามระบบสากล รวมถึงลักษณะ และสมบัติเฉพาะของดินบางประการที่จะมีผลต่อการจัดการทรัพยากรดินอย่างเข้มข้น จำเพาะเจาะจง อันจะนำไปสู่การแก้ไขปัญหา ให้คำแนะนำ เสนอแนะแนวทางการจัดการ เกี่ยวกับทรัพยากรดินได้อย่างถูกต้อง เหมาะสม และยั่งยืนตลอดไป นอกจากนี้เส้นขอบเขตหน่วยแผนที่ยังมีคลาดเคลื่อนไปจากลักษณะพื้นที่จริงอยู่บ้าง ทำให้เกิดปัญหาการใช้แผนที่ในระดับกลุ่มชุดดิน จึงเป็นสาเหตุให้มีการปรับปรุงฐานข้อมูลดินดังกล่าว

ในรูปที่ 1.3 แสดงพื้นที่ซ้อนทับระหว่างข้อมูลเส้นท่อประปาที่แสดงด้วยสีดำ ซึ่งมีมาตราส่วน 1:4,000 กับข้อมูลชนิดของดินมาตราส่วน 1:25,000



รูปที่ 1.3 พื้นที่ซ้อนทับระหว่างข้อมูลเส้นท่อกับข้อมูลชนิดของดิน

1.3.3.4 ข้อมูลแรงดัน

ข้อมูลแรงดันในเส้นท่อ อาศัยการจำลองด้วยแบบจำลองชลศาสตร์ที่ได้จำลองในซอฟต์แวร์ EPANET 2.0 ของพื้นที่แม่ข่ายลาดยาว ข้อมูลจาก กปภ.สาขาลาดยาวที่ได้จัดทำขึ้น เป็นแรงดันน้ำเฉลี่ยรายชั่วโมงของช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำสูงสุดของวัน (8.00 น.) ประจำเดือนเมษายนของของทุกปี ระหว่างช่วงปี 2555-2561 สำหรับซอฟต์แวร์ EPANET 2.0 เป็นซอฟต์แวร์ซึ่งสามารถจำลองพฤติกรรมทางด้านชลศาสตร์ (Hydraulics) และคุณภาพน้ำ (Water Quality) กับโครงข่ายเส้นท่อภายใต้แรงดันแบบต่อเนื่องตามช่วงเวลา โครงข่ายประกอบด้วย ท่อ จุดบรรจบของเส้นท่อ (Node) เครื่องสูบน้ำ วาล์ว และถังเก็บน้ำหรืออ่างเก็บน้ำ แบบจำลองนี้ สามารถหาอัตราการไหลในแต่ละเส้นท่อและแรงดันในแต่ละบัพ (Node)

1.3.4 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

ArcGIS 10.2 ใช้สำหรับวิเคราะห์เชิงพื้นที่ (Spatial Analysis) การคำนวณพื้นที่ซ้อนทับ (Overlay) การจัดเตรียมข้อมูลตัวแปรต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้วิเคราะห์ รวมทั้งจัดเตรียมข้อมูลเชิงบรรยายเบื้องต้น

Microsoft Excel นำมาใช้จัดเตรียมข้อมูลเชิงบรรยายเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ในขั้นต่อไป
Minitab 17 ใช้สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยด้วยวิธีการทางสถิติ
MATLAB ใช้สำหรับประมวลผลในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ทราบถึงเทคนิค วิธีการและข้อจำกัดต่าง ๆ ในการสร้างแบบจำลองคาดการณ์การแตกตัวของท่อประปาของ กปภ.สาขาลาดยาว

2) สามารถนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้คาดการณ์อัตราการแตกตัวของเส้นท่อแต่ละเส้นในระบบจำหน่ายน้ำของ กปภ.สาขาลาดยาว เพื่อเป็นข้อมูลเฝ้าระวังติดตามและประกอบการตัดสินใจในบำรุงรักษาระบบจำหน่ายน้ำประปา



บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึง แนวคิดเบื้องต้น สาเหตุของความล้มเหลวของท่อ แนวคิดวิธีการสร้างแบบจำลองความล้มเหลวของท่อที่ผ่านมา เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทฤษฎีและเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูล เครื่องมือในการวิเคราะห์สถิติ ตลอดจนความรู้และข้อมูลพื้นฐาน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 แนวคิดเบื้องต้น

เป็นที่ทราบกันว่าน้ำสะอาดเป็นสาธารณูปโภคขั้นพื้นฐานที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งของมนุษย์ หากปราศจากแหล่งน้ำสะอาดและระบบการจำหน่ายน้ำที่ดี เมืองจะไม่สามารถพัฒนาให้เจริญเติบโตได้อย่างทุกวันนี้ น้ำสะอาดที่ใช้ในชีวิตประจำวันนั้น ถือเป็นทรัพยากรที่ขาดแคลน เนื่องจากต้องผ่านกระบวนการผลิต ที่ยุ่งยากซับซ้อน ตลอดจนน้ำสะอาดที่ผลิตได้จะถูกส่งผ่านโครงข่ายของท่อ เพื่อกระจายน้ำไปยังครัวเรือนให้ทั่วถึงมากที่สุด จึงต้องมีการลงทุนมหาศาลเพื่อสร้างโครงข่ายจำหน่ายน้ำให้ครอบคลุมตามความต้องการของประชาชน อย่างไรก็ตาม เทศบาลขนาดเล็กซึ่งมีงบประมาณน้อยมักเผชิญกับปัญหาการเสื่อมสภาพของสาธารณูปโภคหรือในที่นี้ จะเรียกว่าระบบจำหน่ายน้ำ หรือโครงข่ายเส้นท่อที่มีอายุมาก เริ่มชำรุดและเสื่อมสภาพ ทำให้การกระจายน้ำสู่ครัวเรือนมีปัญหา ท่อเหล่านี้เสื่อมสภาพตามกาลเวลา ความล้มเหลวส่งผลให้เกิดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมที่สูง การขาดรายได้ระหว่างการหยุดซ่อมแซม ประชาชนเดือนร้อนจากการไม่ได้ใช้น้ำ ตลอดจนความเสียหายที่เกิดขึ้นกับทรัพย์สินอื่น ๆ ซึ่งในต่างประเทศนั้นเส้นท่อบางเส้นมีอายุมากถึง 100 ปี ยังคงใช้งานอยู่ เช่น สหรัฐอเมริกา การเปลี่ยนเส้นท่อและอุปกรณ์ประกอบท่อที่ชำรุดมีมูลค่าสูงถึง 250 พันล้านเหรียญสหรัฐ ในช่วงระยะเวลา 30 ปี (AWWA, 2008) การเปลี่ยนเส้นท่อเป็นงานที่ใช้งบประมาณสูงมาก แต่เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งและไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เพื่อให้การจัดสรรเงินอย่างมีประสิทธิภาพสำหรับการบำรุงรักษาระบบจำหน่ายน้ำของเมืองต่าง ๆ การประเมินความเสี่ยงของโครงข่ายเส้นท่อประจำปีด้วยวิธีที่เหมาะสมสำหรับเทศบาลเมืองแต่ละแห่ง จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง การมีแบบจำลองความเสี่ยงจะช่วยลดความผิดพลาดที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนซ่อมบำรุงเส้นท่อที่ยังคงมีสภาพดีออกโดยพลการ การมีแบบจำลองที่ดีจะช่วยในการประเมินและช่วยจัดลำดับความสำคัญในการบำรุงรักษาระบบ

จำหน่ายน้ำ อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการสร้างแผนการบำรุงรักษาระบบโครงข่ายประปาในระยะยาวได้อีกด้วย เพื่อให้เข้าใจเงื่อนไขพื้นฐานในการประเมินอย่างครบถ้วน จำเป็นจะต้องเข้าใจถึงลักษณะทางกายภาพ และสภาพการใช้งานที่ทำให้ท่อล้มเหลว หรือเป็นสาเหตุของความล้มเหลวของท่อ ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.2 สาเหตุของความล้มเหลวของเส้นท่อ

ความล้มเหลวของท่ออาจเกิดจากปัจจัยหลายประการที่ส่งผลต่อความสมบูรณ์ของเส้นท่อมักเกิดจากการรวมกันของหลาย ๆ เงื่อนไขที่นำไปสู่ความล้มเหลวของท่อ ดังตารางที่ 2.1 แสดงเกณฑ์ที่ส่งผลต่อความล้มเหลวของท่อ ยกตัวอย่างเช่น ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำท่อ (Pipe Material) ระหว่าง โลหะ (Metallic) และพลาสติก (Plastic) ส่งผลให้เกิดความล้มเหลวที่แตกต่างกัน หรือ ตำแหน่งที่ตั้งที่ท่อวางอยู่ (Location) ทำให้เกิดความล้มเหลวที่แตกต่างกันออกไป เช่น วางท่อไว้ในที่เป็นกรด-ด่างสูงหรือวางไว้บนพื้นที่ที่มีแรงกระทำจากภายนอกสูง เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างเกณฑ์ความล้มเหลวของท่อ (Cortez, 2015)

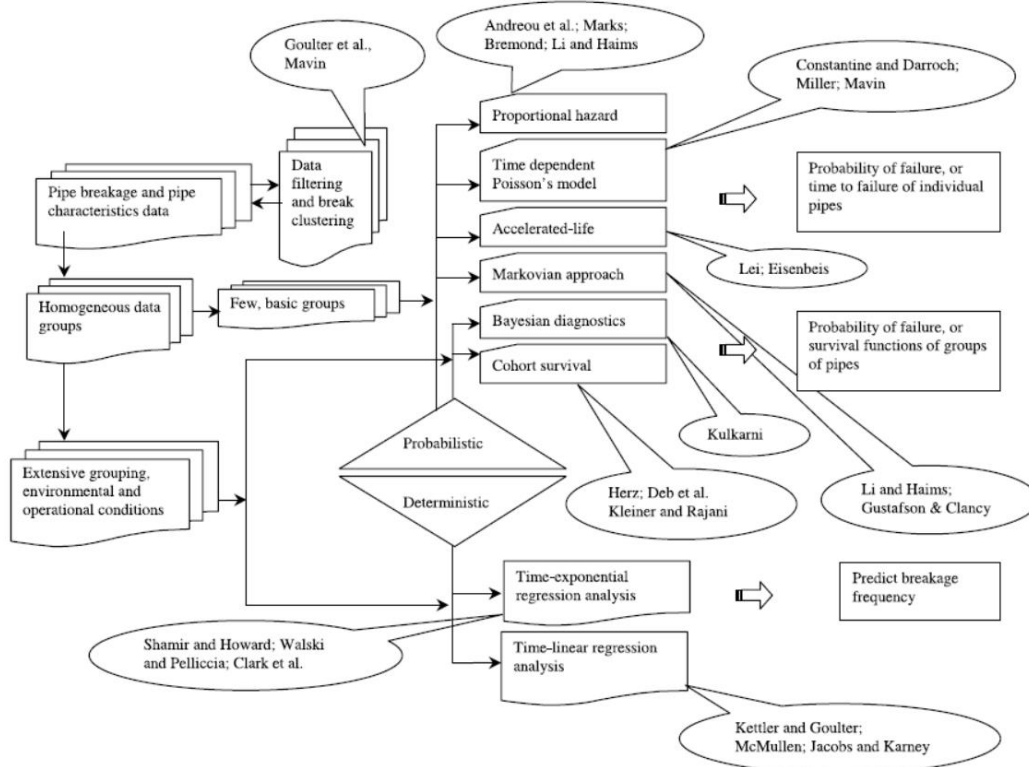
Failure Criteria	Examples
Pipe Material	Metallic vs. plastic
Pipe Dimensions	Diameter and length
Pipe Age	Time since installation
External Forces	Loading from buildings, traffic, or soil.
Internal Forces	Internal pressure and flow velocity
Soil Conditions	Moisture content and acidity
Location	Susceptibility to seismic loading and proximity to active faults
Manufacturing	Defects and irregularities of the pipe
Temperature	Variation in temperature that cause contraction/expansion

ความล้มเหลวของเส้นท่อไม่ได้จำกัดอยู่เพียงแค่เกณฑ์ในตารางด้านบนนี้เท่านั้น แต่ยังมีเงื่อนไขอื่น ๆ อีกมากมายที่อาจส่งผลให้ท่อเกิดความล้มเหลวก่อนอายุการใช้งาน เช่น การจัดเก็บและการจัดการท่อนก่อนการติดตั้งที่ไม่ดี การติดตั้งที่ไม่เหมาะสม การพังทลายของดิน และการกัดกร่อนของท่อ (Mavin, 1996) การจัดเก็บและการจัดการที่ไม่ดีอาจส่งผลให้เกิดการเสียรูป หรือเกิดความเสียหายทางกายภาพก่อนการติดตั้ง การติดตั้งที่ไม่เหมาะสม เช่น ดินคลุมปิดท่อหรือฐานดินที่รองรับท่อที่ไม่เหมาะสม สามารถนำไปสู่แรงกดทับที่เกิดขึ้นกับท่อ อาจเกิดแรงเค้น แรงเครียดต่อท่อมากกว่า

วัสดุท่อที่ได้ออกแบบมา การพังทลายของดินจากการไหลบ่าของน้ำบนพื้นผิวหรือการเพิ่มขึ้นของน้ำใต้ดิน เมื่อสัมผัสโดยตรงกับท่อ ทำให้ท่ออาจถูกแรงภายนอกเหล่านี้กระทำจนเกิดความเสียหาย การกัดกร่อนของท่อทั้งภายในภายนอกส่งผลเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วเช่นกัน เงื่อนไขเหล่านี้รวมถึงเงื่อนไขที่แสดงในตารางที่ 2.1 นั้น สามารถพบได้ในท่อของทุกระบบประปา โดยอาจเกิดขึ้นจากการรวมกันของหลายเงื่อนไข ซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานจริงของท่อ

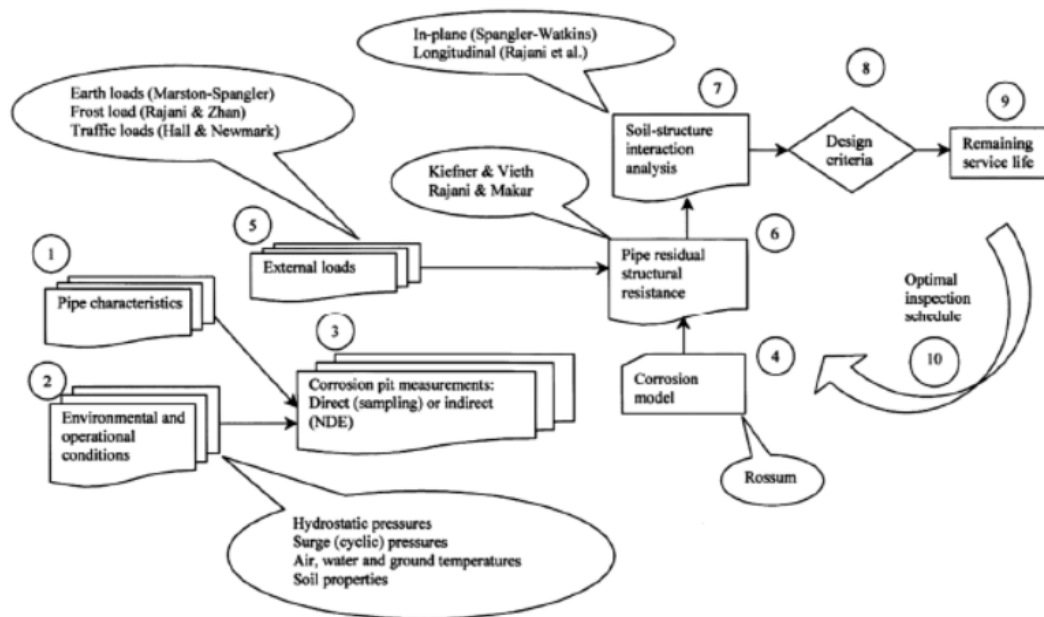
2.3 แนวคิดวิธีการสร้างแบบจำลองความล้มเหลวของเส้นท่อที่ผ่านมา

มีแนวคิดและวิธีการต่าง ๆ ในการคำนวณความน่าจะเป็นของความล้มเหลว หรืออายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของท่อใต้ดิน บางแบบจำลองขึ้นอยู่กับกลไกทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมสภาพของท่อ ซึ่งคำนึงถึง 3 ด้านต่อไปนี้ ด้านที่หนึ่งด้านคุณสมบัติโครงสร้างท่อ ด้านถัดมาด้านแรงจากภายในและภายนอก และด้านสุดท้ายด้านการเสื่อมสภาพของวัสดุอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมภายในหรือภายนอก เช่นเคมีชีวภาพและสภาพแวดล้อมทางเคมีไฟฟ้า (Yehuda Kleiner และ Rajani, 2001) แบบจำลองอื่น ๆ มีการใช้วิธีการทางสถิติและพิจารณาข้อมูลในอดีตเกี่ยวกับความล้มเหลวในการจำลองความน่าจะเป็นของความล้มเหลว จากรูปที่ 2.1 แสดงการสรุปภาพรวมสำหรับแบบจำลองทางสถิติที่เคยมีมา แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ Deterministic และ Probabilistic ทั้ง 2 กลุ่ม มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาความล้มเหลวของเส้นท่อเหมือนกัน แต่มีการใช้แบบจำลอง และการเลือกใช้ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน โดยกลุ่ม Deterministic เน้นศึกษาเพื่อใช้คาดการณ์ความถี่ของการแตกหัก โดยอาศัยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) และนิยมใช้แบบจำลองทั้ง Time-exponential และ Time-linear เพื่อวิเคราะห์เส้นท่อทั้งระบบ ด้วยปัจจัยสภาพแวดล้อมและเงื่อนไขจากการดำเนินงาน สำหรับกลุ่ม Probabilistic เน้นการศึกษาความน่าจะเป็นของความล้มเหลวของเส้นท่อเป็นหลัก โดยแยกออกเป็น 2 แนวทาง ได้แก่ กลุ่มที่ศึกษา Time to failure of individual pipes และกลุ่มที่ศึกษา Survival functions of groups of pipes ทั้ง 2 กลุ่มเลือกใช้แบบจำลองและข้อมูลตัวแปรที่แตกต่างกัน คือ กลุ่มแรกวิเคราะห์ข้อมูลจากข้อมูลพื้นฐาน จะแยกรายละเอียดเฉพาะกลุ่มย่อยลงไป เช่น ขนาด ความยาว ชนิดของท่อ มีการใช้แบบจำลอง Proportional hazard, Time dependent Poisson's model, Accelerated-life และ Markovian approach ในการวิเคราะห์ข้อมูล เป็นต้น กลุ่มที่สองนิยมใช้ข้อมูลเช่นเดียวกับกลุ่ม Deterministic แต่มีเป้าหมายสำคัญเพื่อหาฟังก์ชันความอยู่รอดหรืออายุคงเหลืออยู่ของกลุ่มเส้นท่อนั้น ๆ



รูปที่ 2.1 สรุปภาพรวมของแบบจำลองทางสถิติ(Yehuda Kleiner และ Rajani, 2001)

สำหรับในรูปที่ 2.2 เป็นการสรุปภาพรวมของปัจจัยเชิงกายภาพหรือปัจจัยเชิงกลที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ความล้มเหลวของเส้นท่อ ในวงกลมที่ 1 คือ ปัจจัยลักษณะของท่อ วงกลมที่ 2 คือ ปัจจัยสิ่งแวดล้อม และเงื่อนไขการดำเนินงาน ได้แก่ แรงดัน แรงกระชาก อากาศ น้ำภายในเส้นท่อ สำหรับปัจจัยสิ่งแวดล้อม ได้แก่ อุณหภูมิใต้ดิน และคุณสมบัติของดิน ปัจจัยเหล่านี้เป็นการพิจารณาในเรื่องที่เกี่ยวกับการวัดการกัดกร่อน ทั้งทางตรง และทางอ้อม ส่วนแรงกระทำจากภายนอก เมื่อมีการสร้างแบบจำลองการกัดกร่อนแล้ว ปัจจัยแรงภายนอกถูกพิจารณาเพิ่มเติม ได้แก่ แรงกระทำจากพื้นโลก แรงกระทำจากน้ำแข็ง และแรงกระทำจากคมนาคม จะถูกนำมาใช้หาความต้านทานคงเหลือของท่อที่เหลืออยู่ และเมื่อมีการนำปัจจัยเชิงพื้นที่หรือเชิงตำแหน่งมาพิจารณาจะได้ปฏิสัมพันธ์ของโครงสร้างของดินที่กระทำต่อเส้นท่อ ปัจจัยเหล่านี้จะต้องมีการออกแบบเกณฑ์ เพื่อนำไปสร้างกระบวนการหาอายุการใช้งานคงเหลือของท่อ จนนำไปสู่ตารางการตรวจสอบประสิทธิภาพของเส้นท่อที่ดีที่สุด



รูปที่ 2.2 สรุปภาพรวมปัจจัยเชิงกายภาพหรือปัจจัยเชิงกล (Yehuda Kleiner และ Rajani, 2001)

จะเห็นว่าแบบจำลองในรูปที่ 2.1 และ 2.2 นั้น การศึกษาความล้มเหลวของท่อมีความแตกต่างกันไปตามปัจจัยที่เลือกใช้ และความซับซ้อนของแบบจำลองในหัวข้อต่อไปจะอธิบายรายละเอียดของแบบจำลองทางสถิติ และแบบจำลองกายภาพที่สำคัญ เพื่อให้ทราบความเป็นมาในการพัฒนาแบบจำลองทั้ง 2 รูปแบบ

2.3.1 แบบจำลองทางสถิติ (Statistical Models)

แบบจำลองทางสถิติ ส่วนใหญ่พยายามที่จะคาดการณ์การแตกร้าวของท่อ โดยการใช้ข้อมูลประวัติที่มีอยู่ของรูปแบบการแตกร้าวที่ผ่านมา รูปแบบที่คาดว่าจะดำเนินต่อไปในอนาคต จะช่วยให้สามารถคำนวณหาความน่าจะเป็นของความล้มเหลว ซึ่งแบบจำลองทางสถิติ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ 1. Statistical Deterministic Models และ 2. Statistical Probabilistic Models รายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1.1 Statistical Deterministic Models

Statistical Deterministic Models เป็นรูปแบบที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจ มีการเผยแพร่และทดสอบข้อมูลอย่างกว้างขวาง ความซับซ้อนของแบบจำลองเหล่านั้นถูกเปลี่ยนแปลงปรับปรุงพัฒนาต่อเติมอยู่ตลอดเวลา เช่น (Kettler และ Goulter, 1985) ได้พัฒนา

ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างจำนวนการแตกรั่วแต่ละเส้นท่อกับอายุของเส้นท่อ ซึ่งได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.1)

$$N = K_0A \quad (2.1)$$

เมื่อ N = the number of breaks on a given pipe segment per year

K_0 = the unknown regression parameter

A = the age of the pipe at the time of the first break

ต่อมา Kettler และ Goulter (1985) ได้วิเคราะห์เส้นท่อที่คล้ายกัน ซึ่งติดตั้งภายในระยะ 10 ปี ของเมือง Winnipeg Manitoba การวิเคราะห์ของพวกเขาพบว่ามีความสัมพันธ์เชิงลบระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อและอัตราการแตกรั่ว ซึ่งบ่งชี้ว่าท่อเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กมีแนวโน้มที่จะแตกรั่วมากกว่าท่อขนาดใหญ่ (Yamijala และคณะ, 2009) แม้ว่าวิธีนี้จะกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับอัตราการแตกรั่วได้ แต่การได้มาของพารามิเตอร์การถดถอยนั้น จะต้องมีข้อมูลมากเพียงพอ จึงทำให้วิธีนี้ไม่เหมาะสมสำหรับระบบจำหน่ายน้ำจริงที่ยังมีการเก็บข้อมูลไม่มากนัก สำหรับแบบจำลองเชิงเส้นที่พัฒนาโดย (McMullen, 1982) เป็นตัวอย่างวิธีการง่าย ๆ ในการกำหนดว่าท่อจะเกิดความล้มเหลวครั้งแรกเมื่อมีอายุเท่าไร แบบจำลองอาศัยคุณสมบัติของดินเป็นปัจจัยเงื่อนไขพื้นฐานที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.2)

$$\text{Age} = 0.028(\text{SR}) - 6.44(\text{pH}) - 0.049(r_d) \quad (2.2)$$

เมื่อ Age = age of pipe at the first break (years)

SR = saturated Soil resistivity (Ω cm)

pH = soil pH, and

r_d = redox potential (mV)

McMullen (1982) สรุปว่าความต้านทานของดินเป็นปัจจัยสำคัญในการแตกรั่วของท่อเนื่องจากเขาสังเกตเห็นว่า 94% ของความล้มเหลวของท่อเกิดขึ้นในดินที่มีความต้านทานอิมิตีวน้อยกว่า 2,000 Ω cm แบบจำลองนี้สะท้อนให้เห็นถึงผลกระทบของคุณสมบัติของดินต่อการเสื่อมสภาพของท่อ แต่ยังไม่สามารถสะท้อนภาพรวมโครงข่ายที่เพียงพอ ซึ่งอาจมีปัจจัยอื่น ๆ อีกหลายประการที่มีอิทธิพลต่อการเสื่อมสภาพที่ยังไม่ได้นำมาคำนวณด้วย นอกจากนี้ยังต้อง

มีการทดสอบดินอย่างละเอียดเพื่อวิเคราะห์ว่า โครงข่ายนั้นการกระจายตัวอย่างใดในพื้นที่ซึ่งยากต่อการกำหนดและอาจเป็นไปได้ที่จะระบุได้ชัดเจน

Clark, Stafford และ Goodrich (1982) พวกเขาได้พัฒนาแบบจำลองเชิงเส้นเพื่อคำนวณจำนวนปีที่คาดว่าจะใช้งานได้ของท่อ (anticipated number of serviceable years) ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยแบบจำลองนี้เป็นการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น ซึ่งพวกเขาได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.3)

$$NY = X_1 + X_2D + X_3P + X_4I + X_5RES + X_6LS + X_7T \quad (2.3)$$

เมื่อ NY = number of years from installation to first repair

X_i = regression parameters

D = Diameter of pipe (in)

P = Absolute internal pressure of the pipe (psi)

I = Percentage of pipe covered by industrial development

RES = Percentage of pipe covered by residential development

LH = Length of pipe exposed to corrosive soil conditions

T = Pipe material (0 = reinforced concrete, 1 = metallic)

การคาดการณ์เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นครั้งแรกของความล้มเหลว ซึ่งเป็นข้อมูลพิเศษในขณะนั้นมักมีการบันทึกไว้ แม้ว่าแบบจำลองนี้จะรวมองค์ประกอบของปัจจัยหลายอย่างที่เอื้อต่อการเสื่อมสภาพของท่ออย่างรวดเร็ว แต่ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองนั้นได้ค่า R^2 เพียง 0.23 เท่านั้น ซึ่งหลังจากนั้นพวกเขาได้พยายามพัฒนาแบบจำลองสำหรับคาดการณ์ความล้มเหลวที่ตามมา ได้แก่ แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งแตกต่างจากแบบจำลองก่อนหน้านี้ ตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียลถูกนำมาใช้ประเมินความล้มเหลวที่ตามมาในขณะที่ยังคงรวมเงื่อนไขปัจจัยหลายประการที่ทำให้การเสื่อมสภาพของท่อ ได้ดังสมการที่ (2.4)

$$REP = (0.1721)(e^{0.1797T})(e^{0.0044PRD})(e^{0.0865A})(e^{0.0121DEV})(SL^{0.014})(SH^{0.069}) \quad (2.4)$$

เมื่อ REP = Number of repairs

T = Pipe Type (0 = reinforced concrete, 1 = metallic)

A = Pipe age from first break (years)

PRD = Pressure differential before and after first failure (lbs/in²)

DEV = Percent of pipe in low and moderately corrosive soil

SL = Surface area of pipe in low corrosive soil

SH= surface area of pipe in highly corrosive soil

แบบจำลองนี้ให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.47 ซึ่งค่า R^2 ที่ได้ต่ำของแบบจำลองทั้ง 2 แบบจำลองนี้ บ่งชี้ว่ายังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของท่อและต้องมีการวิจัยเพิ่มเติมเพื่อพิจารณาความเหมาะสมของแบบจำลองเหล่านี้ (Yehuda Kleiner และ Rajani, 2001)

Shamir และ Howard (1979) ได้พัฒนาแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นที่เกี่ยวข้องกับอัตราการแตกรั่วของท่อกับเลขชี้กำลังของอายุ ซึ่งจากการศึกษาพบความสัมพันธ์และได้นำเสนอแบบจำลองดังสมการที่ (2.5) และ (2.6)

$$N(t) = N(t_0)e^{A(t - t_0)} \quad (2.5)$$

$$N(t) = N(t_0) + A(t - t_0) \quad (2.6)$$

เมื่อ N = the number of pipe breaks per year per unit length
 t = time in years
 t_0 = base reference year
 A = growth rate coefficient (0.01-0.15)

แม้ว่าแบบจำลองเหล่านี้ง่ายและสามารถนำไปใช้กับสภาพเศรษฐกิจต่าง ๆ ได้ แต่แบบจำลองเหล่านี้ยังขาดความสามารถในการกำหนดปัจจัยสภาพการทำงานที่สำคัญอื่น ๆ ในโครงข่ายท่อประปา แบบจำลองนี้ไม่ได้คำนึงถึงเงื่อนไขสภาพแวดล้อมอื่น ๆ เช่น ประวัติการแตกรั่วและแรงดันน้ำพร้อมกับลักษณะทางกายภาพอื่น ๆ ที่มีอิทธิพลในกระบวนการเสื่อมสภาพของท่อ

2.3.1.2 Statistical Probabilistic Models

Probabilistic statistical models สามารถอธิบายปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของท่อและความล้มเหลวในการวิเคราะห์ เนื่องจากความสามารถในการพิจารณาตัวแปรส่วนใหญ่สามารถคาดการณ์ความล้มเหลวหรือคาดการณ์การแตกได้ดี แบบจำลองเหล่านี้มีความซับซ้อนมากกว่า Deterministic models เนื่องจากมีความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์มากกว่า การได้มาซึ่งข้อมูลนั้นมีความเข้มข้นมากกว่าและต้องการใช้ข้อมูลทางกายภาพหรือทางกลแทน

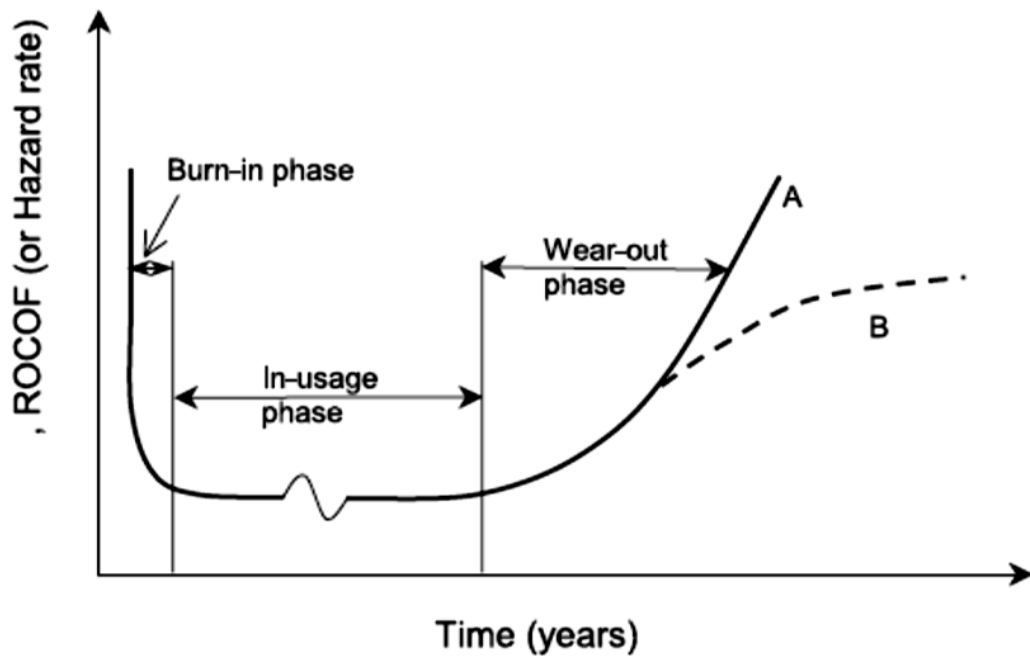
ลักษณะของท่อทั่วไปที่ใช้ใน Deterministic models ตัวอย่างของแบบจำลองความน่าจะเป็นหลายตัวแปร ที่พัฒนาโดย Marks และคณะ (1985) อ้างอิงจาก (Yehuda Kleiner และ Rajani, 2001), Marks เป็นคนแรกที่เสนอการใช้ Proportional Hazard Model เพื่อทำนายการหยุดไหลของการแตกรั่วในท่อจ่ายน้ำหลักโดยการคำนวณความน่าจะเป็นของเวลาระหว่างการแตกรั่วติดต่อกัน Proportional Hazard Model เป็นแบบจำลองการทำนายความล้มเหลวทั่วไปที่เสนอโดย Cox (1972) ซึ่งเกี่ยวข้องกับอัตราความล้มเหลวทันทีต่อแรงกดดันด้านสิ่งแวดล้อมและการปฏิบัติงาน ซึ่งได้ให้แบบจำลองดังสมการที่ (2.7) และ (2.8)

$$h(t,Z) = h_0(t)e^{btZ} \quad (2.7)$$

$$h_0(t) = 2 \times 10^{-4} - 10^{-5}t + 2 \times 10^{-7}t^2 \quad (2.8)$$

เมื่อ $h(t,Z)$ = Hazard function
 $h_0(t)$ = Baseline hazard function
 b = Vector of coefficients to be estimated by maximum likelihood
 T = Time to next break
 Z = Vector of covariates
 t = Survival time

ในรูปแบบเครื่องหมาย The hazard function ($h_0(t)$) สามารถตีความได้ว่าเป็นองค์ประกอบที่ขึ้นกับเวลาและตัวแปร เป็นตัวแทนของแรงกดดันด้านสิ่งแวดล้อมและการปฏิบัติงาน แบบจำลองชี้ให้เห็นว่าความน่าจะเป็นของการแตกรั่วจะลดลงเมื่อท่อ “burns-in” หรือ “matures” หลังจากการติดตั้งหรือหลังการแตกรั่วก่อนหน้านี้ หลังจากนั้นประมาณ 28 ปีที่มีการให้บริการท่อจะเริ่มเสื่อมสภาพ และความน่าจะเป็นที่จะเกิดความล้มเหลวเพิ่มขึ้น (Y. Kleiner และ Rajani, 2010) แนวโน้มของการลดความน่าจะเป็นที่จะเกิดความล้มเหลวและเพิ่มขึ้นหลังจากช่วงเวลาหนึ่งเรียกว่า “bathtub curve” ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เส้นโค้งรูปร่างอ่างอาบน้ำ (bathtub curve) ของวงจรชีวิตของท่อที่ถูกรัด (Y. Kleiner และ Rajani, 2010)

2.3.2 แบบจำลองทางกายภาพ (Physical Models)

แบบจำลองทางกายภาพขึ้นอยู่กับพฤติกรรมทางกายภาพของท่อกับแรงกระทำ (การใช้งานและสิ่งแวดล้อม) และพยายามสะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพเชิงกลที่ดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ตัวอย่างของแบบจำลองทางกายภาพนั้นพัฒนาโดย (Doleac, Lackey และ Bratton, 1980) ซึ่งมีพื้นฐานมาจากฟังก์ชันของ Rossum (1969) ที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของการสึกกร่อนกับอายุของท่อ เพื่อประเมินความหนาของผนังที่เหลือ จากนั้นความสัมพันธ์นี้จะถูกนำไปใช้กับสมการของ Barlow เพื่อกำหนดความล้มเหลวของท่อ (Doleac และคณะ, 1980) ได้เสนอแบบจำลองดังสมการที่ (2.9)

$$P = K_n K_a (10 - pH)^n p^{-n} A^a \quad (2.9)$$

เมื่อ p = Average pit depth

K_n, K_a, a = Empirical constants derived from field or lab tests

A^a = Pipe surface area exposed to corrosion

pH = Soil pH

ρ = Soil resistivity

n = Soil aeration constant, and

t = time in years

สำหรับโมเดลนี้ความล้มเหลวของท่อถูกกำหนดให้เป็นการลดความหนาของผนังท่อ ถึงจุดที่แรงดันเพิ่มขึ้นในท่อซึ่งเท่ากับ 50% ของความกดดันในการทำงานจะเพิ่มขึ้น เป็นขีดจำกัด ยืดหยุ่นของวัสดุ Yehuda Kleiner และ Rajani (2001) มีการศึกษาน้อยมากที่ใช้ฟังก์ชันยกกำลังของ Rossum และ Doleac การทดสอบมีเพียง 5 ตัวอย่างเท่านั้นที่ให้ผลลัพธ์ที่หลากหลาย ปรากฏว่าไม่ ว่าแบบจำลองจะมีข้อจำกัด ข้อจำกัดบางประการเหล่านั้นก็จะได้รับการแก้ไขในส่วนต่อไป

จนถึงปัจจุบันยังไม่มีการพัฒนาแบบจำลองที่สามารถคำนวณความล้มเหลวของท่อ ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ แม้ว่าจะมีหลาย ๆ แบบจำลองที่พยายามรวมหลายตัวแปรในแบบจำลอง แต่ก็ ยังไม่เพียงพอในการทำนายความล้มเหลวของท่อในแบบจำลองของพวกเขา นอกจากความถูกต้อง แล้ว บางแบบจำลองต้องการข้อมูลจำนวนมาก ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้ได้ เช่น ระดับ pH ระดับ ความต้านทานของดินที่ต้องการการทดสอบทางกายภาพที่เหมาะสมที่จะสามารถนำมาสร้าง แบบจำลองนั้นมีข้อจำกัด ดังนั้นไม่ว่าจะเป็นเรื่องของความถูกต้องของข้อมูล จำนวนข้อมูลที่ครบถ้วน สมบูรณ์ หรือความเข้มและความซับซ้อนในการคำนวณ ข้อจำกัดเหล่านี้ คือ เหตุผลที่ต้องเปรียบเทียบ แบบจำลองทางสถิติและศึกษาอย่างเพียงพอ ก่อนนำแบบจำลองเหล่านั้นไปใช้ในการศึกษาต่อไป (Cortez, 2015)

สำหรับงานวิจัยนี้เลือกศึกษา Statistical Deterministic Models เนื่องจาก ข้อจำกัดด้านข้อมูลทางกายภาพ ที่ต้องทำการเก็บสำรวจข้อมูลจากเส้นท่อที่อยู่ใต้ดินในพื้นที่จริง ซึ่ง ต้องอาศัยการขุดเจาะเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลของการเสื่อมสภาพของเส้นท่อจริง การดำเนินการเหล่านี้ ต้องอาศัยระยะเวลาในการสำรวจติดตาม และยังมีค่าใช้จ่ายการดำเนินการสูงมาก อีกทั้งการประปา ส่วนภูมิภาคมีการเก็บข้อมูลเส้นท่อและประวัติการแตกรั่วไว้ในรูปแบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ซึ่งยังไม่มีเมื่อนำข้อมูลเหล่านั้นมาใช้ในการวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองทางสถิติ เพื่อ ใช้ในการคาดการณ์หรือทำนายการแตกรั่วของเส้นท่อ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่ เกี่ยวข้องและพบว่า Yamijala และคณะ (2009) และ Bутбуtiena, ElShafie และ Jaafar (2011) ได้มี การนำข้อมูลสถิติเหล่านี้มาสร้างเป็นแบบจำลองทางสถิติในการคาดการณ์การแตกรั่วของท่อ โดย อาศัยการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อให้ได้มาซึ่งแบบจำลอง รายละเอียดจะได้กล่าวให้หัวข้อถัดไป

2.4 เอกสารและงานวิจัยด้านแบบจำลองความล้มเหลวของเส้นท่อ

ในงานวิจัยของ Yamijala และคณะ (2009) และ Bubtien และคณะ (2011) ทั้ง 2 งานวิจัย มีจุดมุ่งหมายเดียวกัน คือ การศึกษาและจัดทำแบบจำลองทำนายการแตกร้าวของเส้นท่อประปา ตลอดจนการเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองฯ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านของการปรับปรุงบำรุงรักษาระบบจำหน่ายน้ำประปาให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น โดยทั้ง 2 งานวิจัยนี้ เน้นศึกษาจากข้อมูลการแตกร้าวในช่วงเวลาสั้น ๆ ซึ่งการประปาส่วนใหญ่เพียงมีการจัดเก็บข้อมูลสถิติการแตกร้าวเมื่อไม่นานมานี้ ทำให้มีข้อมูลไม่เพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์เหมืองข้อมูล (Data mining) หรือโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks)

Yamijala และคณะ (2009) ศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองทางสถิติ 4 รูปแบบ สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลการแตกร้าวช่วงเวลาสั้น ๆ (ค.ศ. 2000-2005) ของระบบจำหน่ายน้ำของเมืองใหญ่ในรัฐเท็กซัสซึ่งบริการลูกค้า 100,000 รายบนพื้นที่ 100,000 เอเคอร์ มีความยาวท่อจ่ายน้ำหลักมากกว่า 1,000 ไมล์ โดยมีอายุของท่อเฉลี่ย 22 ปี ท่อฝังตัวอยู่ภายใต้ดินเหนียวขยายตัว (expansive clay soils) ซึ่งจะได้รับอิทธิพลของหดและขยายตัวของดินเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นตลอดทั้งปี ลักษณะพื้นที่ตั้งอยู่บนสภาพอากาศแห้งแล้งในช่วงฤดูร้อนของแต่ละปีที่ผ่านมา ท่อที่วางอยู่ในดินเหนียวขยายตัวเช่นนี้ อาจพัฒนาไปสู่ความตึงเครียดต่อเส้นท่อที่เกิดจากการหดขยายตัวของความชื้นในดิน โดยเฉพาะดินเหนียวการหดและการขยายตัวของดินเหนียว (expansive clay) มีผลให้เพิ่มแรงกดในแนวตั้งต่อท่อที่ฝังอยู่บริเวณนั้น ในการศึกษาของ Yamijala และคณะ (2009) ใช้แบบจำลองการวิเคราะห์การถดถอยทั้งหมด ได้แก่ Time Linear Regression, Time Exponential Regression และ Poisson Generalized linear model ในการคาดการณ์จำนวนการแตกร้าวของท่อแต่ละเส้น และได้ทำการศึกษาดัชนีตัวแปรต่าง ๆ ที่มีนัยสำคัญต่อการเกิดแตกร้าวของท่อประปา ตัวอย่างตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ดังตารางที่ 2.2 มีการใช้ตัวแปรทั้งหมด 34 ตัวแปร ที่สามารถรวบรวมมาได้ มาวิเคราะห์การถดถอยและคัดเลือกเฉพาะตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญต่อการคาดการณ์การแตกร้าว โดยศึกษาเปรียบเทียบ 3 แบบจำลอง รายละเอียดจะได้กล่าวถัดไป

ตารางที่ 2.2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาของ Yamijala(Yamijala และคณะ, 2009)

Variable	Description	Units	Mean	Standard deviation
NBRKS	Number of breaks	-	0.12	0.34
DIA	Diameter	Inches	7.67	3.48
AC	Asbestos cement	NA	0.44	0.49
CI	Cast iron	NA	0.34	0.47
CSC	Concrete steel cage	NA	0.01	0.1
DI	Ductile iron	NA	0.19	0.39
PVC	Polyvinyl chloride	NA	0.02	0.14
STL	Steel	NA	0.003	0.05
L	Length	Feet	721.37	548.26
INSTYR	Year of installation	NA	1973.33	18.42
TIME	Time since last break	Years	0.39	1.22
PRE	Pressure	Pounds per square inch	72.31	10.77
LU1	Residential land cover	Percentage	68.41	44.36
LU2	commercial service land cover	Percentage	0.08	21.95
LU3	Industrial land cover	Percentage	0.28	4.79
LU4	Transportation and communications land cover	Percentage	2.5	14.38
LU5	Built up land	Percentage	4.16	18.33
LU6	Agricultural land	Percentage	8.35	26.74
LU7	Rangeland	Percentage	3.25	16.51
LU8	Forest land	Percentage	4.24	19.62
LU9	Reservoirs	Percentage	0.04	1.62
LU10	Bare exposed rock	Percentage	0.22	4.17
LU11	Transitional areas land cover	Percentage	2.46	14.7
ST1	0-15% clay	Percentage	2.62	13.96
ST2	15-35% clay	Percentage	1.73	12.04
ST3	35-55% clay	Percentage	30.3	43.47
ST4	55-65% clay	Percentage	65.15	45.51
ST5	65-80% clay	Percentage	0.2	4.05
TEMP	Temperature	Degrees Fahrenheit	69.47	10.43
RAIN	Rainfall	Hundredth of inches	1685.33	929.92
SMAX	Maximum soil moisture	Millimeters	246.85	23.01
MX-MN	(Max-Min) soil moisture	Millimeters	60.82	17.71
PC1	Principal component1	NA	-0.76	0.63
PC2	Principal component2	NA	-0.19	4.79
PC3	Principal component3	NA	0.01	0.54

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการถดถอยปัวส์ซอง (Poisson Regression) (Yamijala และคณะ, 2009)

Model	Description	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Intercept		N	N	N	N	N	N	N	***	***	***
DIA	Diameter	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
AC	Asbestos cement	N	**	**	**	**	**	**	**	**	**
CI	Cast iron	N	N	-	-	-	N	N	N	N	
CSC	Concrete steel cage	N	N	N	N	N					
DI	Ductile iron	N									
PVC	Polyvinyl chloride	N									
STL	Steel	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
L	Length	N	N								
INSTYR	Year of installation	N	N	N	N	N	N	N	N		
TIME	Time since last break	N	N	N	N	N	N	N			
PRE	Pressure	N	N	N	N	N	N				
LU3	Industrial land cover	N									
LU4	Transportation and communications land cover	N	N	N	N	-	-	N	N	N	
LU5	Built up land	N	N	N	N	-	-	-	-	-	-
LU6	Agricultural land	N	N	N	N	**	**	**	**	**	**
LU7	Rangeland	N	N	N	N	-	-	N	N	-	-
LU8	Forest land	N	-	-	-	**	**	**	**	*	**
LU9	Reservoirs	N	N	N	N						
LU10	Bare exposed rock	N	N	N	N	N					
LU11	Transitional areas land cover	N	-	-	-	**	**	*	*	*	*
ST1	0-15% clay	N	N	N	N	N	N	N	N		
ST2	15-35% clay	N	N	N	N	N	N	N	N		
ST3	35-55% clay	N	N	N	N	N	N	N	N		
ST4	55-65% clay	N	N	N	N	N	N	N	N		
ST5	65-80% clay	N	N	N	N	N	N	N			
TEMP	Temperature	**	**	**	**	**	**	***	***	***	***
RAIN	Rainfall	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
SMAx	Maximum soil moisture	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
MX-MN	(Max-Min) soil moisture	N	N	N	N	N	N				
PC1	Principal component1	N	N	N							
PC2	Principal component2	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-
PC3	Principal component3	N	N	N							
Residual deviance		10,343	10,343	10,344	10,344	10,345	10,347	10,348	10,348	10,353	10,360
AIC		14,961	14,958	14,954	14,950	14,946	14,943	14,941	14,938	14,931	14,932
DF		20,511	20,513	20,215	20,517	20,519	20,521	20,525	20,525	20,531	20,534

จากตารางที่ 2.3 เป็นการศึกษาตัวแปรที่มีนัยสำคัญเพื่อใช้สร้างแบบจำลองการวิเคราะห์การถดถอยปัวส์ซอง (Poisson Regression) แสดงด้วยเครื่องหมาย ‘***’ พารามิเตอร์มีนัยสำคัญที่ค่า

p-value ระหว่าง 0.0-0.001 , ‘***’ พารามิเตอร์มีนัยสำคัญที่ค่า p-value ระหว่าง 0.001-0.01, ‘**’ พารามิเตอร์มีนัยสำคัญที่ค่า p-value ระหว่าง 0.01-0.05, ‘-’ พารามิเตอร์มีนัยสำคัญที่ค่า p-value ระหว่าง 0.05-0.1 ‘N’ ตัวแปรถูกรวมอยู่ในแบบจำลองแต่ไม่มีนัยสำคัญ และ ‘ ’ ช่องว่างแสดงตัวแปรที่ไม่ถูกใช้ในแบบจำลอง

วิธีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ได้แบ่งตัวแปรออกเป็น 2 ชุด โดยชุดข้อมูลทั้งหมดประกอบด้วย 20,544 ข้อมูลสังเกตการณ์ ซึ่งได้แบ่งเป็นข้อมูลชุดที่หนึ่ง คือ ข้อมูลสังเกตการณ์ระหว่างปี 2000 ถึง 2004 ใช้สำหรับการศึกษาและสร้างแบบจำลอง และชุดที่สอง คือ ข้อมูลสังเกตการณ์ปี 2005 ใช้สำหรับการตรวจสอบกับค่าที่คาดการณ์ได้

จากผลการศึกษาของ Yamijala และคณะ (2009) พบว่า Time exponential model มีความเหมาะสมและสอดคล้องกับข้อมูลชุดนี้ของพื้นที่ศึกษาดีกว่าอีก 2 วิธี โดย Time linear model ให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.12 ซึ่งมีค่าต่ำมาก แสดงถึงความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ได้สมการความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (2.10) แต่ไม่ได้มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนอย่างเฉพาะเจาะจงกันของทั้ง 3 แบบจำลอง พวกเขาขยายผลการทดลองโดยใช้ตัวแบบ Logistic Generalized linear model มาวิเคราะห์การถดถอย มีความสามารถในการจัดการกับข้อมูลที่เป็นค่าศูนย์จำนวนมาก อีกทั้งในหลาย ๆ กรณีมีความสนใจเฉพาะความน่าจะเป็นของการแตกรั่วมากกว่าจำนวนการแตกรั่วที่แม่นยำ ซึ่งวิธีการนี้เป็นการคำนวณหาความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่จะเกิดการแตกรั่วหรือไม่เกิดการแตกรั่ว ซึ่งเพียงพอที่จะใช้สำหรับวางแผนการปรับปรุงเส้นท่อ

$$y = -0.0027DIA - 0.44AC - 0.45CI - 0.43CSC - 0.46DI - 0.45PVC + 2.6 \times 10^{-5}L - 0.00027LU_6 - 0.00032LU_8 - 0.00035LU_{11} - 0.0018TEMP + 3.7 \times 10^{-5}RAIN + 0.0015SMAX \quad (2.10)$$

จากสมการที่ (2.10) Intercept จะไม่ถูกนำมาใช้ในสมการ พวกเขากล่าวว่า จากการทบทวนวรรณกรรมก่อนหน้าไม่นิยมนำ Intercept มาใช้สำหรับสร้างแบบจำลองคาดการณ์การแตกรั่ว จะเห็นได้ว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นทั้ง 4 รูปแบบนั้น ให้ผลลัพธ์ในการทำนายที่ค่อนข้างต่ำโดยเฉพาะ Time linear model ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจาก ขนาดของพื้นที่ศึกษาที่ใหญ่มาก ทำให้มีความซับซ้อนของโครงข่ายสูง มีโอกาสที่ตัวแปรที่นำมาใช้วิเคราะห์จะมีความแปรปรวนสูง ตลอดจนความละเอียดถูกต้องของตัวแปรที่นำมาวิเคราะห์ อาจส่งผลต่อความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองโดยตรง ทำ

ให้แบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นไม่เหมาะสมกับพื้นที่ขนาดใหญ่ ดังนั้นหากมีการทดลองนำแบบจำลองเหล่านี้ มาวิเคราะห์กับโครงข่ายที่มีขนาดเล็กแบบจำลองเหล่านี้ อาจสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของการแตกร้าได้ดีขึ้น แต่อาจจะต้องระมัดระวังเกี่ยวกับกำหนดเบื้องต้นของการวิเคราะห์การถดถอย พหุคูณเชิงเส้นที่ตัวแปรตาม (y) มีการกระจายเป็นโค้งปกติ (สำราญ มีแจ้ง, 2557) ดังนั้นการเลือกใช้ Poisson GLM และ Logistic GLM คาดว่าน่าจะเหมาะสมกับข้อมูลที่เป็นสถิติการแตกร้า ซึ่งไม่ได้เป็นการกระจายปกติ สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาที่เป็นเงื่อนไขทางสถิติได้ดีกว่า และยังเหมาะสำหรับตัวแปรตามที่เป็นจำนวนนับ หรือตัวแปรกลุ่ม

ในส่วนของ Bublina และคณะ (2011) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการคาดการณ์ให้กับแบบจำลองคาดการณ์การแตกร้าของท่อประปา โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อสร้างแบบจำลองโดยใช้ตัวแปร 7 ตัว ได้แก่ ความยาวเส้นท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง อายุ วัสดุท่อ ชนิดของดิน ความลึกของการวางท่อ และคุณภาพของน้ำ เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับคาดการณ์การแตกร้าของท่อในระบบจำหน่ายน้ำโดยอาศัยข้อมูลจริงของระบบจำหน่ายน้ำแห่งหนึ่ง ที่มีบันทึกสถิติการแตกร้าระหว่างปี ค.ศ. 2005 ถึง 2009 ซึ่งระบบจำหน่ายน้ำนี้ ประกอบด้วยเส้นท่อ 418 ส่วน ความยาวรวม 373.147 กิโลเมตร รับน้ำมาจาก 2 แห่ง ที่มีคุณภาพน้ำแตกต่างกัน ชนิดของดินในพื้นที่ประกอบด้วยดินเหนียวและ ดินเหนียวปนทรายและปัญหาการกัดกร่อนเป็นปัญหาหลักของท่อจ่ายน้ำ รายละเอียดดังตารางที่ 2.4 ประกอบด้วยตัวแปรอิสระ 7 ตัวแปร ได้แก่ ความยาว (Length) เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) ความลึก (Depth) อายุ (Age) วัสดุของท่อ (Material) ประเภทของดิน (Soil type) และคุณภาพของน้ำ (Water quality)

ตารางที่ 2.4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาของ Bublina(Bublina และคณะ, 2011)

S/N	Covariates	Variables	Mean	Variance	SD.	Median	Minimum	Maximum	Skewness	Kurtosis
1	Length, L (m)	418	893	1950008	1396.4	633.4	8.67	15020	6.5	53.2
2	Diameter, D(mm)	418	446	76300	276.23	400	150	2500	4.3	24.8
3	Depth (m)	418	0.58	0.035	0.187	0.6	0.4	1	0.852	-0.205
4	Age (year)	418	26.3	145.52	12.1	32	5	40	-0.904	-0.708
5	Material	418	1.58	0.278	0.527	2	1	3	0.017	-1.247
6	Soil type	418	1.29	0.206	0.454	1	1	2	0.932	-1.137
7	Water quality	418	2.3	0.412	0.642	2	1	3	-0.366	-0.701
8	Number of breaks, Br	418	1.59	14.479	3.805	3.8	0	66	12.76	207

จากการศึกษานี้ได้สมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.11)

$$Br_{pred} = -0.15547 + 0.34819*x_1 - 0.09071*x_2 - 0.39804*x_3 + 0.30425*x_4 + 0.26425*x_5 + 0.14131*x_6 + 0.22553*x_7 \quad (2.11)$$

โดยที่ Br_{pred} แทน การคาดการณ์จำนวนการแตกร้ว $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ และ x_7 แทน ความยาวเส้นท่อ (เมตร) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร) ความลึกของการวางท่อ (เมตร) อายุท่อ (ปี) วัสดุของท่อ ชนิดของดิน และคุณภาพของน้ำ ตามลำดับได้ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) เท่ากับ 0.74 โดยพวกเขาได้การปรับปรุงแบบจำลองให้มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) ที่สูงขึ้นโดยนำสมการที่ (2.11) ที่ได้มาปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคาดการณ์ ดังสมการที่ (2.12)

$$Br_{imp} = [-0.15547 + 0.34819*x_1 - 0.09071*x_2 - 0.39804*x_3 + 0.30425*x_4 + 0.26425*x_5 + 0.14131*x_6 + 0.22553*x_7] + R \quad (2.12)$$

และ

$$R = \mu f + \gamma \quad (2.13)$$

โดยที่ Br_{imp} แทนค่า ที่คาดการณ์การแตกร้วที่เพิ่มประสิทธิภาพในแต่ละกรณี

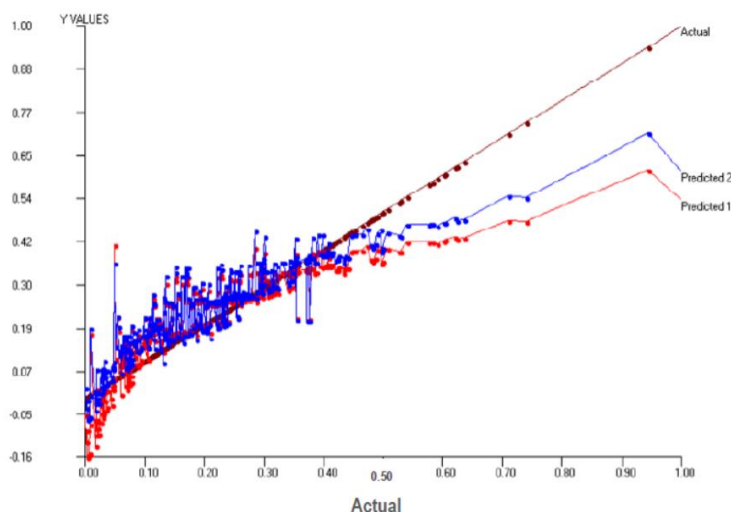
μ แทนความชัน (slope)

γ แทนจุดตัดแกน (intercept) และ

f แทนค่าที่คาดการณ์ไว้

การเพิ่มประสิทธิภาพแบบจำลองสามารถทำได้ โดยการเอาค่าเศษเหลือที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองก่อนหน้านี้มาพล็อตหาความสัมพันธ์กับค่าที่คาดการณ์ได้ จากนั้นจะนำความชันและจุดตัดแกนไปคำนวณค่า R ดังสมการที่ (2.13)

ซึ่งสามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) เป็น 0.9 หรือเพิ่มขึ้น 4.6% จากรูปที่ 2.4 เปรียบเทียบระหว่างค่าจริง ค่าคาดการณ์และค่าที่เพิ่มประสิทธิภาพการคาดการณ์ พบว่าการคาดการณ์มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบระหว่างค่าจริง ค่าคาดการณ์และค่าที่เพิ่มประสิทธิภาพการคาดการณ์
(Bubtiena และคณะ, 2011)

จากการทบทวนวรรณกรรมทั้ง 2 พบว่า เป็นการศึกษาแบบ Statistical Deterministic Models ซึ่งอาศัยข้อมูลประวัติการแตกรั่วในช่วงระยะเวลาหนึ่งมาใช้ในการวิเคราะห์การถดถอย เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแตกรั่วกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกรั่วของท่อประปา ทั้งนี้ งานวิจัยทั้ง 2 มีความแตกต่างกันในเรื่องของขนาดของพื้นที่ศึกษาและความซับซ้อนของโครงข่ายจำหน่ายน้ำ รวมไปถึงวิธีการคัดเลือกตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกรั่วของเส้นท่อ เทคนิคการสร้างตัวแปรกลุ่ม (Categorical variable) ถูกสร้างเป็นเชิงปริมาณตามลักษณะความรุนแรงของผลกระทบต่อการแตกรั่ว โดยการจัดลำดับความรุนแรงจึงเป็นไปตามความรู้ความเข้าใจสภาพของระบบโครงข่ายประปานั้น ๆ ซึ่งจะมีความแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ ทั้งในด้านการบริหารจัดการที่ต่างกัน จนกระทั่งสภาพแวดล้อมของพื้นที่นั้น ๆ ตลอดจนตัวแปรที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์การถดถอยที่แตกต่างกัน ซึ่งได้กล่าวไว้ในก่อนหน้า งานวิจัยนี้ได้ทดลองทำตามเทคนิคและวิธีการของทั้ง 2 วรรณกรรมเพื่อศึกษาทำความเข้าใจเทคนิคและวิธีการ นำมาใช้พัฒนาปรับปรุงแบบจำลองให้เหมาะสมกับพื้นที่การประปาส่วนภูมิภาคสาขาลาดยาว ซึ่งเป็นพื้นที่เมืองขนาดเล็กและความซับซ้อนของโครงข่ายไม่มาก เพื่อที่นำแบบจำลองที่เหมาะสมกับข้อมูลของพื้นที่ มาใช้ประโยชน์สำหรับการคัดเลือกเส้นท่อที่เสื่อมสภาพที่สุดเพื่อเปลี่ยนบำรุงรักษาได้อย่างถูกต้อง มีประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

2.5 ทฤษฎีและเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูล

รูปแบบทางสถิติ สำหรับการกำหนดความเสี่ยงหรือความเสียหายของท่อประปา มีการนำเสนอไว้มากมายในอดีตที่ผ่านมา มี 3 เหตุผลหลักในการเลือกใช้รูปแบบสถิติที่แตกต่างกันของนักวิจัยทางด้านนี้ได้แก่ การเลือกฟังก์ชันที่มีความเหมาะสมกับลักษณะของข้อมูลที่มีอยู่ แบบจำลองคาดการณ์ควรจะต้องคำนึงเบื้องต้นของงานที่ทำการศึกษา และสุดท้ายสมมติฐานของอัตราความล้มเหลวจะต้องสอดคล้องกับประสบการณ์ของเจ้าหน้าที่ (Scheidegger, Leitao และ Scholten, 2015) Yamijala และคณะ (2009) กล่าวว่าความซับซ้อนของแบบจำลองที่นำมาใช้นั้น มีตั้งแต่ Simple linear regression model ตลอดจนถึง Proportional hazards models และ Generalized Linear Model (GLM) ซึ่ง Proportional hazards models ถูกนำไปใช้สำหรับสาธารณสุขที่มีการจัดเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่อง จนได้ข้อสรุปที่มีความน่าเชื่อถือของปัจจัยที่ทำให้เกิดการแตกรั่ว สาธารณูปโภคหลายแห่งกำลังเริ่มมีระบบจัดเก็บข้อมูลที่ติดตั้งกล่าว ดังนั้น Proportional hazards models จึงมีประโยชน์น้อยสำหรับสาธารณสุขเหล่านี้ รวมถึง กปภ.สาขาลาดยาว ซึ่งมีการเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบในระยะเวลา 5-10 ปี ที่ผ่านมา ดังนั้นรูปแบบ Proportional hazards models จึงไม่นำมาพิจารณาในงานนี้ โดยจะเน้นการศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Model) แบบจำลองการถดถอยทวีกำลัง (Exponential Regression Model) แบบจำลองการถดถอยปัวส์ซอง (Poisson Regression Model) แบบจำลองการถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression Model) และแบบจำลองการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Regression Model) เพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของทั้ง 5 รูปแบบสำหรับใช้เป็นแบบจำลองคาดการณ์อัตราการแตกรั่วเฉลี่ยต่อปีของเส้นท่อประปาที่เหมาะสมกับพื้นที่ กปภ.สาขาลาดยาว ซึ่งเป็นประชาชนขนาดเล็ก ตั้งอยู่บริเวณเทศบาลตำบลลาดยาว อำเภอลาดยาว จังหวัดนครสวรรค์ บนพื้นฐานของข้อมูลการแตกรั่วในช่วงเวลาหนึ่งปี ระหว่างปี 2555-2561

2.5.1 แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Model)

แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Model) เป็นการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียวกับตัวแปรตาม 1 ตัว เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้ง 2 ตัว รูปแบบสมการ หากเป็นการวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นตรง โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม 1 ตัวกับตัวแปรอิสระที่ทำหน้าที่พยากรณ์ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวแปรอิสระแต่ละตัวที่มีผลต่อตัวแปรตาม

และสร้างรูปแบบสมการพยากรณ์ตัวแปรตามด้วยกลุ่มของตัวแปรอิสระที่ศึกษา เรียกว่า การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้น (Multiple linear regression) ดังสมการที่ (2.14)

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (2.14)$$

โดยที่ y คือ ตัวแปรตอบสนอง (response variable) หรือ ตัวแปรตาม (dependent variable)

$x_1 \dots x_n$ คือ ตัวแปรทำนาย (predictor variable) หรือ ตัวแปรอิสระ (independent variable)

$\beta_1 \dots \beta_n$ คือ สัมประสิทธิ์การถดถอย (coefficient) อันดับที่ 1 ถึงอันดับที่ n

β_0 คือ ค่าคงที่ (constant)

สำหรับการประมาณค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยพหุคูณเชิงเส้น จะใช้วิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ที่เรียกว่า วิธีการกำลังสองน้อยที่สุด (Least square)

2.5.2 แบบจำลองการถดถอยทวีกำลัง (Exponential Regression Model)

เป็นรูปแบบหนึ่งของการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear regression) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์การถดถอยที่รูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม สามารถแทนได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear model) Shamir และ Howard (1979) เป็นคนแรก ๆ ที่แนะนำใช้การวิเคราะห์การถดถอยทำนายการแตกตัวของท่อประปาที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างท่อที่แตกรั่วกับเวลาเอกซ์โพเนนเชียล ให้สมการความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (2.15)

$$N(t) = N(t_0) \cdot e^{A(t+g)} \quad (2.15)$$

โดยที่ $N(t)$ คือ จำนวนการแตกรั่วต่อความยาวต่อปี

$N(t_0)$ คือ $N(t)$ ของปีปัจจุบันกับปีที่มีการแตกรั่วก่อนหน้า

t คือ เวลาระหว่างปีที่เกิดการแตกรั่วถึงปัจจุบัน

g คือ อายุของท่อ ณ เวลา t

A คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราเติบโตของการแตกรั่ว

ต่อมา Yamijala และคณะ (2009) ได้ดัดแปลงใช้ Time since last break และปีที่ติดตั้งท่อ ได้สมการความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (2.16)

$$y = \beta_0 * \exp(\beta_1(TIME) + \beta_2(INSTYR)) \quad (2.16)$$

โดยที่ y คือ จำนวนการแตกร้าว

$TIME$ คือ เวลานับจากการแตกร้าวครั้งสุดท้าย (Time since last break)

$INSTYR$ คือ ปีที่ติดตั้ง

β_0 คือ ค่าคงที่

β_1, β_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์

สำหรับ Bubtiena และคณะ (2011) พบความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของตัวแปรอิสระ 7 กับตัวแปรตาม คือ จำนวนการแตกร้าวและให้สมการความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (2.17)

$$f = a + b_1 \ln(x_1) + b_2 \ln(x_2) + b_3 \ln(x_3) + \dots + b_n \ln(x_n) \quad (2.17)$$

โดยที่ f คือ จำนวนการแตกร้าว

$x_1 - x_n$ คือ พารามิเตอร์

a คือ ค่าคงที่

$b_1 - b_n$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์

2.5.3 แบบจำลองการถดถอยปัวส์ซอง (Poisson Regression Model)

ตัวแบบการถดถอยปัวส์ซอง เป็นตัวแบบการถดถอยที่ใช้กันโดยทั่วไปสำหรับข้อมูลจำนวนนับ ซึ่งเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนอง Y_i ที่มีการแจกแจงแบบปัวส์ซอง และมีตัวแปรอิสระ x_i อย่างน้อย 1 ตัวที่เป็นตัวแปรต่อเนื่อง โดยเชื่อมความสัมพันธ์ของตัวแปรตามและตัวแปรอิสระด้วย log link function ผ่านค่าเฉลี่ย μ_i ดังสมการที่ (2.18) (ประเสริฐ เรือนนระการ, 2560)

หมายเหตุ : log link function หมายถึง ฟังก์ชันเชื่อมโยงลอการิทึมฐานธรรมชาติ

$$f(y; \mu) = \frac{\mu^y e^{-\mu}}{y!}, y = 0, 1, 2, \dots \quad (2.18)$$

โดยที่ μ แทน ค่าเฉลี่ยของการเกิดจำนวนครั้งที่สำเร็จจากขอบเขตที่กำหนดให้ เช่น ช่วงเวลาสั้น ๆ หรือในบริเวณที่กำหนดให้

e แทน 2.71828....

y แทน จำนวนครั้งที่สำเร็จจากขอบเขตที่กำหนดให้ เช่น ในช่วงเวลาสั้น ๆ หรือในบริเวณที่กำหนดให้ ซึ่งค่าเฉลี่ยหรือค่าคาดหวังของ y คือ μ และความแปรปรวนของ y คือ μ

ดังนั้นตัวแบบการถดถอยปัวส์ซอง คือ ตัวแบบชนิดหนึ่งของตัวแบบนัยเชิงเส้นทั่วไป (GLM) ที่มี 3 องค์ประกอบ ดังนี้

องค์ประกอบที่ 1 คือ ให้ Y_1, Y_2, \dots, Y_n เป็นตัวแปรสุ่มที่เป็นตัวแปรตามหรือตัวแปรตอบสนอง (response variable) ซึ่งอิสระต่อกันและตัวแปรสุ่ม $Y_i; i = 1, 2, 3, \dots, n$ มีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปัวส์ซอง ซึ่งอยู่ในตระกูลเอ็กซ์โปเนนเชียล

องค์ประกอบที่ 2 คือ ตัวแบบที่เป็นฟังก์ชันของตัวแปรพยากรณ์ หรือตัวแปรอิสระ x_i (เชิงเส้นในเทอมของพารามิเตอร์) จะได้สมการที่ (2.19)

$$E(Y_i) = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} \quad (2.19)$$

องค์ประกอบที่ 3 คือ องค์ประกอบฟังก์ชันเชื่อมโยง g กล่าวคือ เป็นฟังก์ชันที่เชื่อมระหว่างผลรวมเชิงเส้นของตัวแปรอิสระ กับ ค่าเฉลี่ยหรือค่าคาดหวังของตัวแปรตามหรือตัวแปรตอบสนอง ให้ $g(\mu_i) = \mu_i$ หรือฟังก์ชันเชื่อมโยงเอกลักษณ์ ดังนั้นตัวแบบการถดถอยปัวส์ซอง คือ สมการที่ (2.20)

$$g(\mu_i) = \mu_i = E(Y_i) = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} = x_i' \beta \quad (2.20)$$

ซึ่งฟังก์ชันเชื่อมโยงที่นิยมใช้ คือ ฟังก์ชันเชื่อมโยงลอการิทึมฐานธรรมชาติ (log link) หรือ $g(\mu_i) = \ln(\mu_i)$ ดังนั้นตัวแบบการถดถอยปัวส์ซอง อีกรูปแบบหนึ่งที่นิยมใช้ คือ สมการที่ (2.21)

$$g(\mu_i) = \ln(\mu_i) = E(Y_i) = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} = x_i' \beta \quad (2.21)$$

2.5.4 แบบจำลองการถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression Model)

การวิเคราะห์สมการถดถอยโลจิสติก หรือเรียกว่าการวิเคราะห์โลจิส (Logit Analysis) เป็นการวิเคราะห์สมการทำนาย เมื่อต้องการศึกษาผลของตัวแปรทำนาย (Predictor Variable) ที่มีต่อตัวแปรเกณฑ์ ซึ่งเป็นทวิภาค (Dichotomous Variable) หรือพหุวิภาค (Polytomous Variable) โดยฟังก์ชันโลจิสติก (Logistic Function) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรทำนายกับความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ที่สนใจตัวแปรเกณฑ์ (ศิริชัย กาญจนวาสี, 2554)

ถ้าการวิเคราะห์การถดถอยประกอบด้วยตัวแปรต้น 1 ตัว สำหรับทำนายตัวแปรตาม 1 ตัว ซึ่งวัดเป็นค่าในเชิงปริมาณ เรียกว่าการวิเคราะห์สมการถดถอยอย่างง่าย (Simple Regression) แต่ถ้าใช้ตัวแปรต้นมากกว่า 1 ตัว ทำนายตัวแปรตามที่วัดในเชิงปริมาณ 1 ตัว เรียกว่า การวิเคราะห์สมการถดถอยพหุ (Multiple Regression)

โมเดลการวิเคราะห์ เมื่อตัวแปรตามหรือตัวแปรเกณฑ์ (Y) มีลักษณะเป็นทวิภาค เช่น เกิดเหตุการณ์ (Y=1) หรือไม่เกิดเหตุการณ์ (Y=0) ตัวแปรเกณฑ์ (Y) จะมีรูปแบบความสัมพันธ์กับตัวแปรทำนาย (X's) ฟังก์ชันโลจิสติก ซึ่งเป็นฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรรูปคล้ายตัว S รูปแบบฟังก์ชันการถดถอยโลจิสติกเป็นดังสมการที่ (2.22)

$$P = \frac{e^{(\alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i)}}{1 + e^{(\alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i)}} \quad (2.22)$$

โดยที่ α คือ ค่าคงที่ของสมการถดถอย

β คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับตัวแปรทำนาย

x_i คือ ตัวแปรอิสระ

ซึ่งเขียนได้อีกรูปแบบหนึ่งดังสมการที่ (2.23)

$$\text{logit}[P(x)] = \log \left[\frac{P(x)}{1-P(x)} \right] = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 \dots + \beta_n x_n \quad (2.23)$$

2.6 เครื่องมือในการวิเคราะห์สถิติ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือทางสถิติที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ วิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระ สถิติสำหรับทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง และวิธีการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.6.1 วิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระ

สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้ซอฟต์แวร์ Minitab 17 สำหรับวิเคราะห์ทางสถิติ เนื่องจากมีเครื่องมือทางสถิติที่เลือกใช้จำนวนมากและง่ายต่อการประมวลผล โดรนในซอฟต์แวร์ Minitab 17 มีเครื่องมือวิเคราะห์ทางสถิติมากมาย หนึ่งในนั้น คือ การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ซึ่งเป็นวิธีทางสถิติที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น หนึ่งในนั้นมีเครื่องมือชื่อ Fitted Line Plot ใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองถดถอยเชิงเส้น สามารถให้ซอฟต์แวร์คัดเลือกตัวแปรอิสระที่มีจำนวนมาก ด้วยวิธีการคัดกรองตัวแปร 3 วิธี (ปรัชญา พละพันธุ์, 2560) ได้แก่

1) Forward selection จะคัดเลือกตัวแปรต้นเข้ามาในสมการทีละตัว โดยเริ่มจากตัวแปรต้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์กับตัวแปรตามสูงที่สุดก่อน และทดสอบว่าตัวแปรที่เข้ามานั้นมีความสามารถในการพยากรณ์ตัวแปรตามได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ หากไม่ใช่ก็จะคัดเลือก

ตัวแปรต้นนั้นออก และ จะคัดเลือกตัวแปรที่สำคัญรองลงมาต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งไม่มีตัวแปรต้น เหลืออีก

2) Backward elimination เป็นวิธีที่ตรงข้ามกับวิธี Forward selection นั้น คือ ตอนแรกจะนำตัวแปรต้นทุกตัวเข้ามาในสมการ และดำเนินการพิจารณาตัวแปรต้นทีละตัว ด้วยการกำจัดตัวแปรต้นออกทีละตัว หากทดสอบพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ จนกระทั่งค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์มีนัยทางสถิติก็จะหยุดการคัดกรอง

3) Stepwise เป็นวิธีการทดสอบแบบผสมระหว่าง Forward selection และ Backward elimination โดยจะเพิ่มหรือลดตัวแปรต้น จนกระทั่งได้ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ที่มีค่าสูงที่สุด จึงจะหยุดการทดสอบ วิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระด้วยวิธีการเพิ่มตัวแปรอิสระแบบ ขั้นตอน (Stepwise) ซอฟต์แวร์ไม่ได้แสดงรายละเอียดของการวิเคราะห์ให้เห็น แต่จะแสดงผลเฉพาะผลลัพธ์สุดท้ายที่ผ่านวิเคราะห์อย่างเป็นขั้นตอนโดยอาศัยค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติของแต่ละตัวแปร มาเป็นเกณฑ์เพิ่มหรือลดจนกระทั่งได้ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ที่มีค่าสูงที่สุด จึงจะหยุดการทดสอบ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกวิธี Stepwise ในการคัดเลือกตัวแปรอิสระเนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการคัดเลือกเมื่อมีตัวแปรอิสระจำนวนมาก

วิธีการถดถอยแบบขั้นตอน (Stepwise) เป็นวิธีการเลือกตัวแปรอิสระเข้าในตัวแบบ การถดถอยครั้งละหนึ่งตัวแปร ตัวแปรอิสระใดที่ถูกเลือกเข้ามาอยู่ในตัวแบบการถดถอยแล้ว จะต้องมีการทดสอบว่าตัวแปรอิสระที่อยู่ในตัวแบบการถดถอยแล้ว มีส่วนในการอธิบายความผันแปรของ ตัวแปรตาม ขณะที่ตัวแปรอิสระอื่นอยู่ในตัวแบบการถดถอย (Efronson, 1960) นั่นคือ ตัวแปรอิสระใดที่ถูกเลือกเข้าอยู่ในตัวแบบการถดถอยแล้วอาจจะถูกนำออกไปได้ภายหลัง ถ้าพบว่า ตัวแปรอิสระนั้นไม่มีนัยสำคัญ โดยขั้นตอนของวิธีการถดถอยแบบขั้นตอน แบ่งได้ ดังนี้

1) เหมือนกับวิธี Forward selection คือ เริ่มต้นพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม โดยเลือกตัวแปรอิสระซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับตัวแปรตามสูงที่สุด เข้าสู่ตัวแบบเป็นครั้งแรก

2) ภายหลังจากที่ตัวแปรอิสระถูกนำเข้าไปในตัวแบบแล้วจะมีการทดสอบนัยสำคัญของตัวแปรอิสระที่นำเข้าไปเป็นครั้งแรก โดยใช้ค่าสถิติ t (t - value) หรือ ค่าสถิติ F (F -value)

3) พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์บางส่วนระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม โดยจะเลือกตัวแปรอิสระที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์บางส่วนกับตัวแปรตามสูงที่สุด เข้ามาอยู่ในตัวแบบเป็นตัวต่อมา

4) หลังจากนั้น จึงทำการทดสอบความมีนัยสำคัญของตัวแปรที่เข้ามาเป็นตัวสุดท้ายก่อน โดยพิจารณาจากค่าสถิติ F บางส่วน ถ้ามีค่าน้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ จะต้องนำตัวแปรนั้นออกจากตัวแบบ แต่ถ้าค่าสถิติ F บางส่วนมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ก็จะย้อนกลับไปทดสอบตัวแปรอิสระตัวก่อนหน้าที่เข้ามาอยู่ในตัวแบบ โดยพิจารณาจากค่าสถิติ F บางส่วนเช่นเดียวกัน

ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 3) และ 4) ต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งไม่สามารถนำตัวแปรอิสระใดออกจากตัวแบบได้หรือไม่สามารถนำตัวแปรอิสระใดเข้าสู่ตัวแบบได้อีก จะพบว่า วิธีการถดถอยแบบขั้นตอนใช้การพิจารณาค่าสถิติ F บางส่วน ดังนั้นการกำหนดระดับนัยสำคัญของค่าสถิติ F สำหรับเลือกตัวแปรอิสระเข้า (enter α) และนำตัวแปรอิสระออก (stay α) จึงมีความสำคัญ ซึ่งถ้ามีการกำหนดให้แตกต่างกัน จะทำให้การเลือกตัวแปรอิสระเข้ามาในตัวแบบลดลงหรือทำให้หน้าตัวแปรอิสระออกจากตัวแบบเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงควรกำหนดระดับนัยสำคัญของการเลือกตัวแปรอิสระเข้าในตัวแบบ (enter α) กับระดับนัยสำคัญของการนำตัวแปรอิสระออกจากตัวแบบ (stay α) ให้มีค่าเท่ากัน (Draper และ Smith, 2014) แต่ไม่ได้มีการระบุว่า stay α ควรจะมีค่าน้อยกว่า enter α อย่างไรก็ตาม มีเหตุผลที่เลือก stay α มากกว่า enter α เนื่องจากทำให้ตัวแปรอิสระมีระดับนัยสำคัญลดลงและทำให้ตัวแปรอิสระตัวปัจจุบันที่เข้ามาอยู่ในตัวแบบมีโอกาสมากขึ้นในการอยู่ในตัวแบบต่อไป

นอกจากนี้ มีข้อเสนอแนะว่า ควรกำหนดค่าระดับนัยสำคัญของการเลือกตัวแปรอิสระเข้าในตัวแบบ (enter α) กับระดับนัยสำคัญของการนำตัวแปรอิสระออกจากตัวแบบ (stay α) ให้อยู่ระหว่าง 0.05 กับ 0.10 เพราะถ้ามีค่ามากกว่า 0.10 จะทำให้ตัวแปรอิสระที่ถูกเลือกไว้ในตัวแบบมีมากเกินไปจนเกินไป อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าตัวแบบที่ผ่านการคัดเลือก โดยวิธีการถดถอยแบบขั้นตอน จะมีความน่าเชื่อถือ แต่การเลือก stay α และ enter α ยังไม่มีหลักเกณฑ์ที่ชัดเจน จึงอาจทำให้ขาดความน่าเชื่อถือและมีการใช้วิธีการถดถอยแบบขั้นตอนในการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความผิดพลาดทั้งประเภทที่ 1 (Type I Error) กับความผิดพลาดประเภทที่ 2 (Type II Error) หรืออาจกล่าวได้ว่าบางครั้งขั้นตอนวิธี Stepwise อาจรวมตัวแปรอิสระที่ไม่มีความสำคัญอยู่ในตัวแบบและนำตัวแปรอิสระที่มีความสำคัญออกจากตัวแบบ แต่มีข้อดี คือ ตัวแปรอิสระบางตัวอาจไม่มีนัยสำคัญ เมื่ออยู่ในตัวแบบ แต่เมื่อมีตัวแปรอิสระอื่นเข้าไปอยู่ในตัวแบบด้วย อาจทำให้ตัวแปรอิสระทั้งคู่มีนัยสำคัญ และตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลร่วม (Interaction) จะมีการนำมาพิจารณาในวิธีการถดถอยแบบขั้นตอนด้วย ซึ่งวิธีอื่นไม่ได้นำมาใช้ในการพิจารณา ดังนั้นจึงทำให้วิธีนี้มีตัวแปรอิสระที่นำมาพิจารณามากขึ้น ซึ่งอาจจะส่งผลให้มีตัวแปรอิสระที่ไม่เหมาะสมมากขึ้นที่อยู่ในตัวแบบแต่ในทางตรงกันข้ามเป็นการช่วยป้องกันปัญหาการนำตัวแปรอิสระที่มีความสำคัญออกจากตัวแบบ ดังนั้นอาจกล่าวโดยสรุปได้ว่าวิธี Stepwise เป็นวิธีการที่ช่วยในการค้นหาตัวแบบที่มีความเหมาะสม โดยไม่ใช้ตัวแปรอิสระมากเกินไป แต่อย่างไรก็ตาม ผู้วิเคราะห์ควรมีการตรวจสอบ โดยการใช้วิธีการเลือกตัวแปรอิสระแบบอื่น ๆ

มาร่วมในการพิจารณาประกอบกันด้วย นอกจากนี้มีข้อสังเกตเพิ่มเติมเกี่ยวกับวิธีการเลือกตัวแปรอิสระข้างต้น (Berk, 1978) คือ วิธีการเพิ่มตัวแปรอิสระ มีแนวโน้มสอดคล้องกันกับวิธีพิจารณาทุกตัวแบบที่เป็นไปได้ในกรณีที่จำนวนตัวแปรอิสระมีขนาดเล็ก ขณะที่วิธีการลดตัวแปรอิสระมีแนวโน้มสอดคล้องกันกับวิธีพิจารณาทุกตัวแบบที่เป็นไปได้ในกรณีที่จำนวนตัวแปรอิสระมีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตาม การพิจารณาที่ผ่านการพิจารณา โดยใช้วิธีที่แตกต่างกันอาจได้ตัวแปรอิสระที่เข้ามาอยู่ในตัวแบบแตกต่างกันด้วย ในส่วนของแนวทางในการเลือกค่าระดับนัยสำคัญ (α) Bendel และ Afifi (1977) แนะนำให้ใช้ค่าระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.25 ในวิธีเพิ่มตัวแปรอิสระ ซึ่งเป็นค่าที่มีการกำหนดไว้ในซอฟต์แวร์ MINITAB นอกจากนี้ Kennedy และ Bancroft (1971) แนะนำให้ใช้ค่าระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.25 ในวิธีเลือกตัวแปรอิสระแบบไปข้างหน้าและแนะนำให้ใช้ค่าระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.10 สำหรับวิธีตัดตัวแปรอิสระออกแบบถอยหลัง ดังนั้นแนวทางในการเลือกค่าระดับนัยสำคัญ (α) จึงเป็นการพิจารณาโดยใช้ประสบการณ์และแนวความคิดของผู้วิเคราะห์ ตลอดจนข้อมูลที่นำมาใช้ในการพิจารณาเลือกตัวแบบ

สำหรับเครื่องมือ Regression tools in the Minitab17 ยังมีการสรุปผลลัพธ์ค่าตัวชี้วัดที่สำคัญต่าง ๆ ดังนี้

1) Analysis of Variance ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน ในส่วนนี้ให้พิจารณาค่า P-Value ของค่า Regression และตัวแปรต้น หากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าสมการของตัวแปรต้นมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม

2) Model of Summary จะแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) ให้พิจารณาค่า R-Sq (adj) หากค่า R-Sq (adj) สูง แสดงถึงความถูกต้องและน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

3) Coded Coefficients จะแสดงค่า VIF (Variance Inflation Factor) เป็นการวัดความแปรปรวนของค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อตัวแปรต้นมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งหมายถึง การพิจารณาว่าตัวแปรต้นแต่ละตัวมีความสัมพันธ์กันหรือไม่ โดยค่า VIF สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.24)

$$VIF_i = \frac{1}{1-R_i^2} \quad (2.24)$$

โดยที่

เมื่อ R_i^2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของตัวแปรที่ไม่รวมตัวแปรอิสระตัวที่ i กับตัวแปรต้นที่เหลือทั้งหมด โดยมีหลักเกณฑ์การตัดสินใจดังนี้

VIF = 1	แสดงว่า ไม่มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรต้น
1 < VIF < 5	แสดงว่า ตัวแปรต้นมีความสัมพันธ์กันระดับปานกลาง
5 < VIF < 10	แสดงว่า ตัวแปรต้นมีความสัมพันธ์กันมาก
VIF > 10	แสดงว่า ตัวแปรต้นมีความสัมพันธ์กันสูงมาก และไม่ยอมรับ โดยควรนำตัวแปรต้นที่มีค่า VIF สูงออกไปจากการวิเคราะห์

4) Regression Equation in Uncoded Units แสดงสมการถดถอยระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม

5) Fits and Diagnostics for Unusual Observations แสดงตำแหน่งการทดลองที่มีค่าความผิดพลาดสูง (Large residual)

6) Residual Plots for Thickness เป็นการวิเคราะห์ค่าเศษเหลือ

- กราฟ Normal Probability Plot และกราฟ Histogram ใช้ตรวจสอบการแจกแจงปกติของค่าเศษเหลือ โดยข้อมูลที่ผิดปกติจะมีการกระจายตัวของค่าเศษเหลือเป็นการแจกแจงปกติ
- กราฟ Versus Fits ใช้ตรวจสอบความแปรปรวนคงที่ของค่าเศษเหลือ โดยข้อมูลที่ผิดปกติต้องมีความแปรปรวนของค่าเศษเหลือต้องสม่ำเสมอ
- กราฟ Versus Order ใช้ตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกัน โดยข้อมูลที่ผิดปกติต้องมีลักษณะของแผนภูมิควบคุมที่ดี

2.6.2 สถิติสำหรับทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง

เมื่อทำการหาตัวแบบด้วยการวิเคราะห์การถดถอย จำเป็นจะต้องมีการประเมินตัวแบบว่ามีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานหรือไม่ ซึ่งในซอฟต์แวร์ Minitab มีตัวสถิติที่ใช้ทดสอบความสมบูรณ์ของตัวแบบ (Goodness of fit statistics) ให้เลือกนำมาใช้ในการประเมินตัวแบบหลายตัว ในงานวิจัยนี้จะใช้ตัวสถิติ 3 ตัว ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (S) และ Akaike Information Criterion (AIC) ที่ได้จากประมวลผลในขั้นตอนที่ 3.5 ในบทที่ 3 ซึ่งเพียงพอที่จะสามารถเปรียบเทียบความเหมาะสมของตัวแบบทั้ง 5 รูปแบบได้ รายละเอียดดังต่อไปนี้

2.6.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (Coefficient of determination, R^2)

คือ ค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนอง (Response variable) ที่สามารถอธิบายได้ มีอยู่ในตัวแบบเชิงเส้นนี้ที่เปอร์เซ็นต์ หรือ ความผันแปรที่สามารถอธิบายได้ / ความผันแปรทั้งหมด ดังสมการที่ (2.25)

$$R^2 = 1 - \frac{SS \text{ Error}}{SS \text{ Total}} = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (2.25)$$

โดยที่ y_i = ith observed response value

\bar{y} = mean response

\hat{y}_i = ith fitted response

2.6.2.2 ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานการถดถอย (Standard error of the regression, S)

เมื่อ $S^2 = \text{MSE}$ (Mean Square Error)

เป็นการวัดความแปรปรวนการถดถอย สามารถใช้ได้คล้ายคลึงกับ standard deviation ซึ่งบ่งบอกถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการนำตัวแปรอิสระมาใช้ในการประมาณค่าตัวแปรตาม นั้นหมายความว่าหากค่า S มีค่าน้อย ๆ แสดงว่าค่าสังเกตการณ์อยู่ใกล้กับเส้น Regression ดังสมการที่ (2.26)

$$\text{MSE} = \frac{SS \text{ Error}}{DF \text{ Error}} = \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p - 1} \quad (2.26)$$

โดยที่ y_i = i^{th} observed response value

\hat{y}_i = i^{th} fitted response

n = number of observations

p = number of terms in the model

2.6.2.3 Akaike Information Criterion (AIC)

เป็นสถิติที่ใช้สำหรับเปรียบเทียบแบบจำลองที่ต่างกัน ยิ่งค่า AIC เล็กลง จะบ่งชี้ว่าแบบจำลองถูกปรับให้เข้ากับข้อมูลได้ดีเท่านั้น ดังสมการที่ (2.27)

$$\text{AIC} = 2[(p + 1) - L_c] \quad (2.27)$$

เมื่อ $L_c(y, \mu, \theta) = \sum_{i=1}^n l_i$

และ $l_i = \ln(f(y_i, \hat{\mu}_i, \theta))$

โดยที่ p = Degrees of freedom of regression

L_c = Log likelihood of the current model

y_i = Number of events for the i^{th} line

m_i = Number of trials for the i^{th} line

$\hat{\mu}_i$ = estimated mean of the response variables for the i -th line

2.6.3 วิธีการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ค่าเฉลี่ยกำลังสองความคลาดเคลื่อน (Root mean square error : RMSE) ดังสมการที่ (2.28)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}} \quad (2.28)$$

โดยที่ $X_{obs,i}$ = observed values at time/place i

$X_{model,i}$ = modelled values at time/place i

2.6.4 ค่าสถิติ Cook's distance, D

การขจัดค่าผิดปกติ โดยใช้วิธี Cook's distance, D เป็นวิธีบ่งบอกถึงค่าผิดปกติหรือจุดที่มีอิทธิพลที่มีแนวโน้มที่จะบิดเบือนผลลัพธ์ที่พอดี โดยจะวัดอิทธิพลของจุดข้อมูลที่มีอยู่ในจุดข้อมูลอื่นๆ ทั้งหมด สูตรคำนวณ คือ สมการที่ (2.29)

$$D_i = (\hat{\beta}_i - \hat{\beta})^T X^T X (\hat{\beta}_i - \hat{\beta}) / ps^2 = \left(\frac{1}{p}\right) r_i' \left(\frac{h_i}{1-h_i}\right) \quad (2.29)$$

โดยที่ $\hat{\beta}_i$ is the least squares estimate of the i^{th} value of any parameter estimate β

X^T is the transpose of an $n \times p$ matrix of explanatory variables X

p is the number of parameters in the model

s^2 is the residual mean square estimate of the population variance σ^2

r_i' is the vector of standardized residuals

h_i is a measure of leverage.

2.7 ความรู้และข้อมูลพื้นฐาน

สำหรับการศึกษานี้ ควรทำความเข้าใจเกี่ยวกับความแตกต่างระหว่างการแตกรั่ว (Breaks) และการรั่วไหล (Leaks) ซึ่งเป็นคำที่มักพบบ่อยครั้งในงานด้านประปา และมักใช้ผสมกันจนอาจเข้าใจว่ามีความหมายเช่นเดียวกัน ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ตรงกัน จึงได้อธิบายความแตกต่างไว้ในหัวข้อ 2.7.1 และหัวข้อ 2.7.2 เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสื่อมสภาพของท่อ ซึ่งทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศได้มีการศึกษาไว้พบว่า ปัจจัยเหล่านี้มีความคล้ายคลึงกัน เช่น วัสดุท่อ อายุการใช้งาน แรงดันภายใน การทรุดตัวของดิน เป็นต้น สำหรับหัวข้อ 2.7.3 ได้อธิบายข้อมูลพื้นฐานการประปาส่วนภูมิภาคสาขาลาดยาว เพื่อสร้างความเข้าใจถึงลักษณะของพื้นที่ศึกษา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.7.1 ความแตกต่างระหว่างการแตกรั่วและการรั่วไหล

โดยทั่วไปท่อประปานในระบบจำหน่ายน้ำส่วนใหญ่ มักพบกับรูปแบบความล้มเหลว 2 รูปแบบ ภายใต้การทำงานปกติ แม้ว่าขนาดของความล้มเหลวของท่อ อาจแตกต่างกันในแต่ละกรณี แต่มักเกิดขึ้นในรูปแบบของการแตกรั่ว (Breaks) หรือการรั่วไหล (Leaks) ตามโครงสร้างทางกายภาพของท่อ จากการศึกษาของ Texas A&M University วิศวกรใช้คำว่า "break" และ "leak" เพื่อแยกแยะความฉุกเฉินของระดับความล้มเหลวของท่อแตก (Pipe breaks) และท่อรั่ว (Pipe leaks) โดยหากเป็นการแตกรั่ว การตรวจพบมักสามารถระบุได้ง่ายตามสภาพพื้นดิน และแรงดันของน้ำ จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดแตกต่างจากการเกิดการรั่วไหลจะตรวจเจอได้ยากกว่า และต้องใช้อุปกรณ์ตรวจจับพิเศษ ในส่วนของผลกระทบด้านการบริการนั้น การแตกรั่วทำให้การบริการหยุดชะงักทันที เนื่องจากการซ่อมแซมต้องได้รับความสนใจทันที การแตกรั่วจะเกิดขึ้นตามความยาวของเส้นท่อ ส่วนการรั่วไหลนั้น โอกาสที่จะเกิดการหยุดชะงักของการบริการต่ำ จึงไม่จำเป็นต้องซ่อมแรงดันการซ่อมสามารถซ่อมตามกำหนดแผนการได้ คำอธิบายเปรียบเทียบดังตารางที่ 2.5 ดังนั้นในการศึกษานี้ จึงใช้คำว่าท่อแตกรั่ว (Breaks) ด้วยเหตุผลดังที่กล่าวมา

ตารางที่ 2.5 ลักษณะทั่วไปของการรั่วไหลและการแตกรั่ว(Mays (2000) อ้างถึงใน (Devera, 2013))

	การแตกรั่ว (Breaks)	การรั่วไหล (Leaks)
การตรวจพบ	สามารถระบุได้โดยง่ายตามสภาพพื้นดินและแรงดันน้ำ	ยากที่จะตรวจจับ อุปกรณ์พิเศษเป็นสิ่งจำเป็น
ผลกระทบด้านการบริการ	โอกาสในการหยุดชะงักของบริการสูง	โอกาสในการหยุดชะงักของบริการต่ำ
การเกิดขึ้น	ลักษณะทั่วไปตามความยาวของท่อ	มักพบที่อุปกรณ์ท่อ และเกิดขึ้นด้านข้าง
ซ่อมแซมความเร่งรีบ	ต้องได้รับความสนใจทันที	การซ่อมสามารถกำหนดได้และไม่จำเป็นเร่งด่วน

2.7.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสื่อมสภาพของท่อ

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า ในต่างประเทศมีการศึกษาและให้คำอธิบายเกี่ยวกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสื่อมสภาพของท่อและการแตกหักไว้อย่างมากมาย ส่วนใหญ่ปัจจัยเหล่านี้จะไม่แตกต่างกัน เช่น เดียวกับการศึกษาของ Federation of Canadian Municipalities and National Research Council, (2003) ได้อธิบายเกี่ยวกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสื่อมสภาพของท่อและการแตกรั่ว รายละเอียดหัวข้อที่ 2.1.2.1 และสำหรับในประเทศไทยการประปาส่วนภูมิภาคได้อธิบายปัจจัยที่มีผลกระทบต่อท่อรั่ว ดังหัวข้อที่ 2.1.2.2 พบว่า ส่วนใหญ่มีความคล้ายคลึงกัน เช่น วัสดุ อายุ การติดตั้ง แรงดัน ชนิดดิน การทรุดตัว เป็นต้น

2.7.2.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสื่อมสภาพท่อและการแตกร้าว (Federation of Canadian Municipalities and National Research Council, 2003)

1) ลักษณะทางกายภาพ

- (1) วัสดุท่อ (Pipe material) ท่อที่ทำจากวัสดุที่แตกต่างกัน ความล้มเหลวก็จะเกิดในรูปแบบที่แตกต่างกัน
- (2) ความหนาของผนังท่อ (Pipe wall thickness) การกัดกร่อน จะซึมผ่านท่อที่บางลงได้เร็วขึ้น
- (3) อายุท่อ (Pipe age) ผลกระทบของการย่อยสลายของท่อมากขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น
- (4) Pipe vintage ท่อที่ทำในช่วงเวลาและสถานที่หนึ่ง อาจมีความเปราะบางที่จะเกิดความล้มเหลวต่างกัน
- (5) เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (Pipe diameter) ท่อที่มีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กมีความอ่อนไหวต่อความล้มเหลวจากความแรงของน้ำ
- (6) ประเภทของข้อต่อ (Type of joints) บางประเภทของข้อต่อเกิดความล้มเหลวก่อนวัยอันควร (เช่น ข้อต่อตะกั่ว)
- (7) ยับยั้งแรงดึงจุด (Thrust restraint) ความไม่ต้านทาน ทำให้เพิ่มความเค้นในท่อที่ยาวขึ้น
- (8) ซับและเคลือบท่อ (Pipe lining and coating) ท่อเรียงรายและเคลือบน้อยไม่ไวต่อการกัดกร่อน
- (9) โลหะที่ไม่เหมือนกัน (Dissimilar metals) โลหะที่ไม่เหมือนกัน มีความไวต่อการกัดกร่อนแบบกัลวานิก
- (10) การติดตั้งท่อ (Pipe installation) การติดตั้งที่ไม่ดี อาจทำให้ท่อเกิดความเสียหาย ทำให้เสี่ยงต่อความล้มเหลว
- (11) ผู้ผลิตท่อ ข้อบกพร่องของผนังท่อที่เกิดจากข้อผิดพลาดในการผลิตทำให้ท่ออ่อนไหวต่อความล้มเหลว ปัญหานี้พบได้บ่อยกับท่อเหล็กหล่อเก่า

2) ลักษณะสภาพสิ่งแวดล้อม

- (1) การวางตัวของท่อ (Pipe bedding) อาจส่งผลให้ท่อล้มเหลวก่อนเวลาอันควร
- (2) ตะแกรงรอง (Trench backfill) วัสดุทดแทนบางชนิด มีความสามารถในการกัดกร่อนหรือน้ำค้างแข็งได้

(3) ชนิดของดิน (Soil type) ดินบางชนิดมีฤทธิ์กัดกร่อน ดินบางชนิดมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณมากในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความชื้น ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงการไหลต่อ การเกิดขึ้นของไฮโดรคาร์บอนและตัวทำละลายในดินอาจทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของท่อ

(4) น้ำบาดาล (Groundwater) น้ำใต้ดินบางแห่งเคลื่อนตัวไปยังบริเวณที่มีท่อประปา ส่งผลกระทบต่อวัสดุท่อบางชนิด

(5) ตำแหน่งท่อ (Pipe location) การอยู่ในทิศทาง การเคลื่อนตัวของเกลือในดิน สามารถเพิ่มอัตราการกัดกร่อนได้

(6) การรบกวน (Disturbances) การรบกวนใต้ดินในบริเวณใกล้เคียงของท่อที่มีอยู่ อาจนำไปสู่ความเสียหายที่เกิดขึ้นจริงหรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรองรับและเพิ่มแรงอัดบนท่อ

(7) กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Stray electrical currents) กระแสไฟฟ้าลัดวงจรทำให้เกิดการกัดกร่อนของอิเล็กทรอนิกส์

(8) การเกิดแผ่นดินไหว (Seismic activity) แผ่นดินไหวสามารถเพิ่มแรงเค้นบนท่อและก่อให้เกิดแรงดันกระชากได้

3) การดำเนินงาน

(1) แรงดันน้ำภายใน แรงดันชั่วคราว การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำภายใน จะเปลี่ยนความเครียดที่เกิดขึ้นกับท่อ

(2) รั่วไหล (Leakage) การรั่วไหลจะทำให้เกิดการพังทลายในพื้นที่ของการวางท่อ และเพิ่มความชุ่มชื้นของดินโดยรอบบริเวณจุดรั่วไหล

(3) คุณภาพน้ำ (Water quality) น้ำบางชนิดแพร่กระจายและมีฤทธิ์กัดกร่อน

(4) ความเร็วในการไหล (Flow velocity) อัตราการกัดกร่อนภายในมีค่ามากกว่าในท่อปลายตัน ท่อปลายตันที่เกิดขึ้นจากความสนใจในการออกแบบ โดยมีลักษณะเป็นท่อน้ำที่ปลายข้างหนึ่งปิดตันและน้ำไม่มีการไหลต่อไปยังที่ใด ๆ

(5) ศักยภาพการไหลย้อน (Backflow potential) การเชื่อมต่อกับระบบที่ไม่มีน้ำดื่ม อาจทำให้ระบบการกระจายน้ำได้รับการปนเปื้อนได้ การไหลย้อนกลับ (Backflow) คือ การไหลของของน้ำที่อยู่ในท่อในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของการไหลปกติ ซึ่งเกิดขึ้นโดยความแตกต่างของแรงดันน้ำ

(6) การปฏิบัติ O&M (O&M practices) การปฏิบัติที่ไม่เหมาะสม อาจส่งผลต่อความสมบูรณ์ของโครงสร้างและคุณภาพน้ำ

2.7.2.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อท่อรั่ว (การประปาส่วนภูมิภาค, 2552)

1) แรงดันน้ำแรงดันมีผลกระทบต่อการสูญเสียน้ำภายในระบบจำหน่าย ดังนี้

(1) ในกรณีที่ระบบจำหน่ายมีท่อแตกรั่วอยู่แล้วเมื่อมีการเพิ่มความดันน้ำในระบบจะทำให้ปริมาณน้ำสูญเสียเพิ่มขึ้น

(2) ความถี่ของท่อที่แตกรั่วจากการเพิ่มความดันในระบบจำหน่ายจะมีผลมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสภาพท่อในระบบว่ามีสภาพการผุกร่อนมากน้อยเพียงใด

(3) ตำแหน่งจุดรั่ว ถ้าอยู่ในช่วงเวลาที่มีความดันสูงจะทำให้ปริมาณน้ำสูญเสียผ่านจุดรั่วเพิ่มมากขึ้นจนบางครั้งจะสังเกตพบได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากน้ำซึมขึ้นผ่านผิวดินได้เร็ว

(4) ความดันที่เกิดขึ้นมากกว่าปกติ ซึ่งอาจเกิดจากการเปิด-ปิดเครื่องสูบน้ำหรือเปิด-ปิดประตูน้ำเร็วเกินไป จะมีผลต่อท่อหลักหรือท่อจ่ายน้ำได้

(5) การปรับเปลี่ยนแรงดันระหว่างแรงดันสูงสุด-ต่ำสุดเป็นรอบ ๆ เช่น การเปิด-ปิดเครื่องสูบน้ำหรือการบำรุงรักษาาล์วลดแรงดันน้ำ (Pressure Reducing Valve: PRV) ผิดวิธีจะทำให้ท่อเกิดความล้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งท่อพลาสติก เนื่องจากเป็นท่อที่ง่ายต่อการเกิดความล้ามากกว่าท่อชนิดอื่น ๆ

2) การทรุดตัว

(1) การเคลื่อนตัวของดิน เช่น การทรุดตัวของพื้นดินตามธรรมชาติ เนื่องจากการลดของระดับดินน้ำใต้ดินหลังการทรุดตัว

(2) เคลื่อนตัวจากการก่อสร้างบริเวณใกล้เคียงการวางท่อในดินอ่อนตัวหรือโคลน

3) สภาพความเสื่อมสภาพของท่อจ่ายน้ำ การผุกร่อนของท่อโลหะ สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งจากภายใน และภายนอก การกัดกร่อนภายในท่อ อาจมีสาเหตุจากน้ำไหลอ่อน การกัดกร่อนผิวนอกท่อ อาจเกิดจากการสัมผัสโลหะต่างชนิดกัน การผันแปรความเข้มข้นของเกลือที่สะสมในดินรวมถึงจุลินทรีย์ในบริเวณนั้น การผุกร่อนจะทำให้ผิวท่อเป็นรู และอาจขยายจนเกิดรอยแตกตามแนวขวางหรือตามยาวของท่อได้ สำหรับการผุกร่อนของท่อคอนกรีต หรือท่อแอสเบสตอสซีเมนต์ จะมีสาเหตุจากดินหรือน้ำที่มีซัลเฟตสูง

4) การใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีคุณภาพต่ำ รวมถึงการติดตั้งไม่ได้มาตรฐาน

5) ภาวะบรรทุทางจราจร แรงสั่นสะเทือน การจราจร หรือรถบรรทุก น้ำหนักมาก เป็นสาเหตุที่ทำให้ท่อสั่น และเกิดการแตกรั่ว การวางท่อจึงควรหลีกเลี่ยงผิวจราจร หรือวางท่อให้ลึกพอสมควร

6) อายุการใช้งานของท่อและอุปกรณ์ ขึ้นอยู่กับวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้งานรวมถึงวิธีการติดตั้งระบบท่อจำหน่ายน้ำ

2.7.3 ข้อมูลพื้นฐาน กปภ.สาขาลาดยาว

กปภ.สาขาลาดยาวประกอบด้วย 2 แม่ข่าย ได้แก่ แม่ข่ายลาดยาว และแม่ข่ายบรรพตพิสัย มีพื้นที่บริการรวมกัน 3.25 ตารางกิโลเมตร รายละเอียดดังข้อมูลในตารางที่ 2.6 ซึ่งพื้นที่ศึกษาในงานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะแม่ข่ายลาดยาวเท่านั้น โดยมีพื้นที่บริการครอบคลุม 5 ตำบล 29 หมู่บ้าน มีพื้นที่ประมาณ 2.18 ตร.กม. ใช้น้ำดิบจากสระเก็บน้ำดิบบึงหล่ม อยู่ในลุ่มน้ำเจ้าพระยา

ตารางที่ 2.6 รายละเอียดพื้นที่บริการ กปภ.สาขาลาดยาว

ที่มา: การประปาส่วนภูมิภาค

กปภ.สาขาลาดยาว								
แม่ข่ายลาดยาว								
พื้นที่ให้บริการน้ำประปาของแม่ข่ายลาดยาว								
ลำดับที่	พื้นที่ให้บริการ	จังหวัด	อำเภอ	ตำบล	หมู่	พื้นที่ (ตร.กม.)	แหล่งน้ำ	ลุ่มน้ำ
1	เทศบาลตำบลลาดยาว	นครสวรรค์	ลาดยาว	ลาดยาว		2.18	สระเก็บน้ำ ดิบบึงหล่ม	ลุ่มน้ำ เจ้าพระยา
2	องค์การบริหารส่วนตำบลลาดยาว	นครสวรรค์	ลาดยาว	ลาดยาว	1,4,5,6,7, 13,14			
3	องค์การบริหารส่วนตำบลสระแก้ว	นครสวรรค์	ลาดยาว	สระแก้ว	4,5,7,9			
4	องค์การบริหารส่วนตำบลหนองนมวัว	นครสวรรค์	ลาดยาว	หนองนมวัว	1,2,3,4,5, 6,7,8,9			
5	องค์การบริหารส่วนตำบลหนองยาว	นครสวรรค์	ลาดยาว	หนองยาว	1,2,3,4,6			
6	องค์การบริหารส่วนตำบลวังม้า	นครสวรรค์	ลาดยาว	วังม้า	8,9,10,13			

หน่วยบริการบรรพตพิสัย								
พื้นที่ให้บริการน้ำประปาของหน่วยบริการบรรพตพิสัย								
ลำดับที่	พื้นที่ให้บริการ	จังหวัด	อำเภอ	ตำบล	หมู่	พื้นที่ (ตร.กม.)	แหล่งน้ำ	ลุ่มน้ำ
1	เทศบาลตำบลบรรพตพิสัย	นครสวรรค์	บรรพตพิสัย	ท่าจั่ว		1.07	แม่น้ำปิง	ลุ่มน้ำปิง
2	องค์การบริหารส่วนตำบลท่าจั่ว	นครสวรรค์	บรรพตพิสัย	ท่าจั่ว	2,3			
3	องค์การบริหารส่วนตำบลเจริญผล	นครสวรรค์	บรรพตพิสัย	เจริญผล	1,7			

จากข้อมูลกำลังการผลิตประจำเดือนมกราคม 2561 กบภ.สาขาลาดยาว มีผู้ใช้น้ำทั้งสิ้น 7,134 ราย มีกำลังการผลิตอยู่ที่ 4,650 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และมีปริมาณจำหน่ายน้ำ 111,513 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน รายละเอียดเพิ่มเติมดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ข้อมูลกำลังการผลิต กบภ.สาขาลาดยาว

ที่มา: กองศูนย์ข้อมูลและแผนเทคโนโลยีสารสนเทศ การประปาส่วนภูมิภาค

ประเภท	จำนวน	หน่วย
จำนวนผู้ใช้น้ำทั้งหมด	7,134	ราย
กำลังการผลิต	4,650	ลบ.ม./วัน
ปริมาณการผลิต	143,851	ลบ.ม./เดือน
ปริมาณน้ำผลิตจ่าย	131,241	ลบ.ม./เดือน
ปริมาณจำหน่าย	111,513	ลบ.ม./เดือน

และจากรูปที่ 2.5 แสดงแผนภาพจำนวนผู้ใช้น้ำของ กบภ.สาขาลาดยาว ซึ่งจะให้เห็นว่าผู้ใช้น้ำเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ตั้งแต่ปี พ.ศ.2540 จนถึงปัจจุบัน ได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุก ๆ ปี และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นต่อไปอีกในอนาคต



รูปที่ 2.5 แผนภาพจำนวนผู้ใช้น้ำ

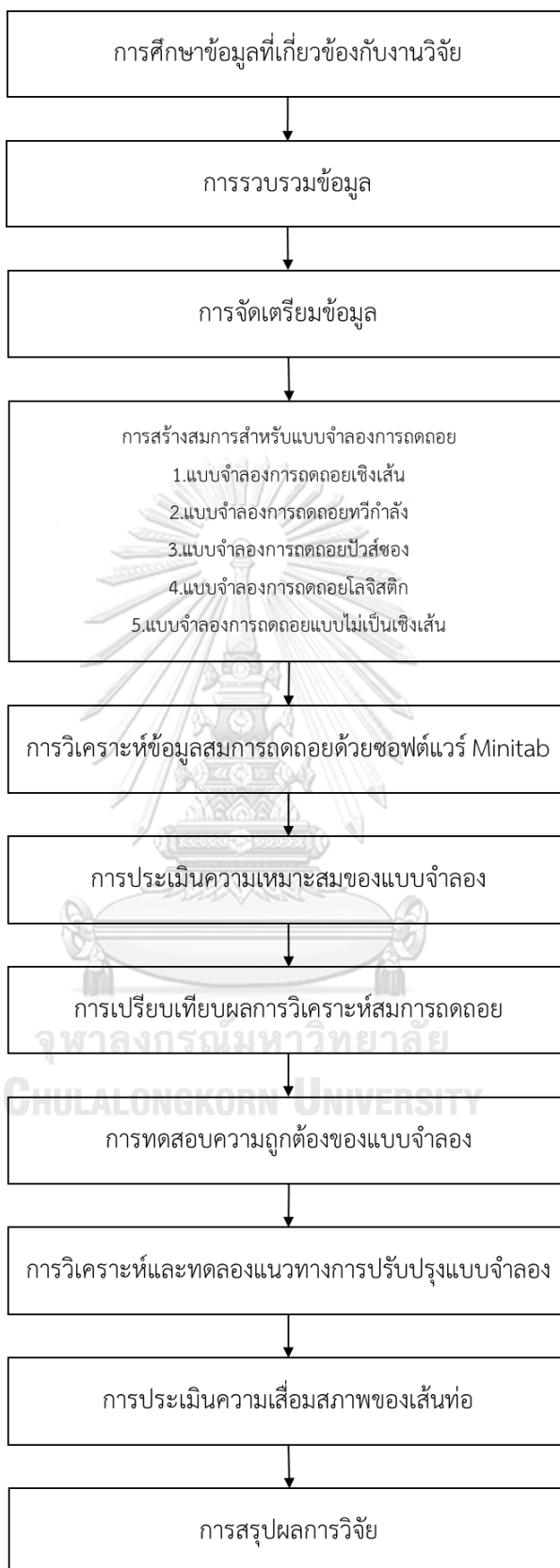
ที่มา: การประปาส่วนภูมิภาค

บทที่ 3

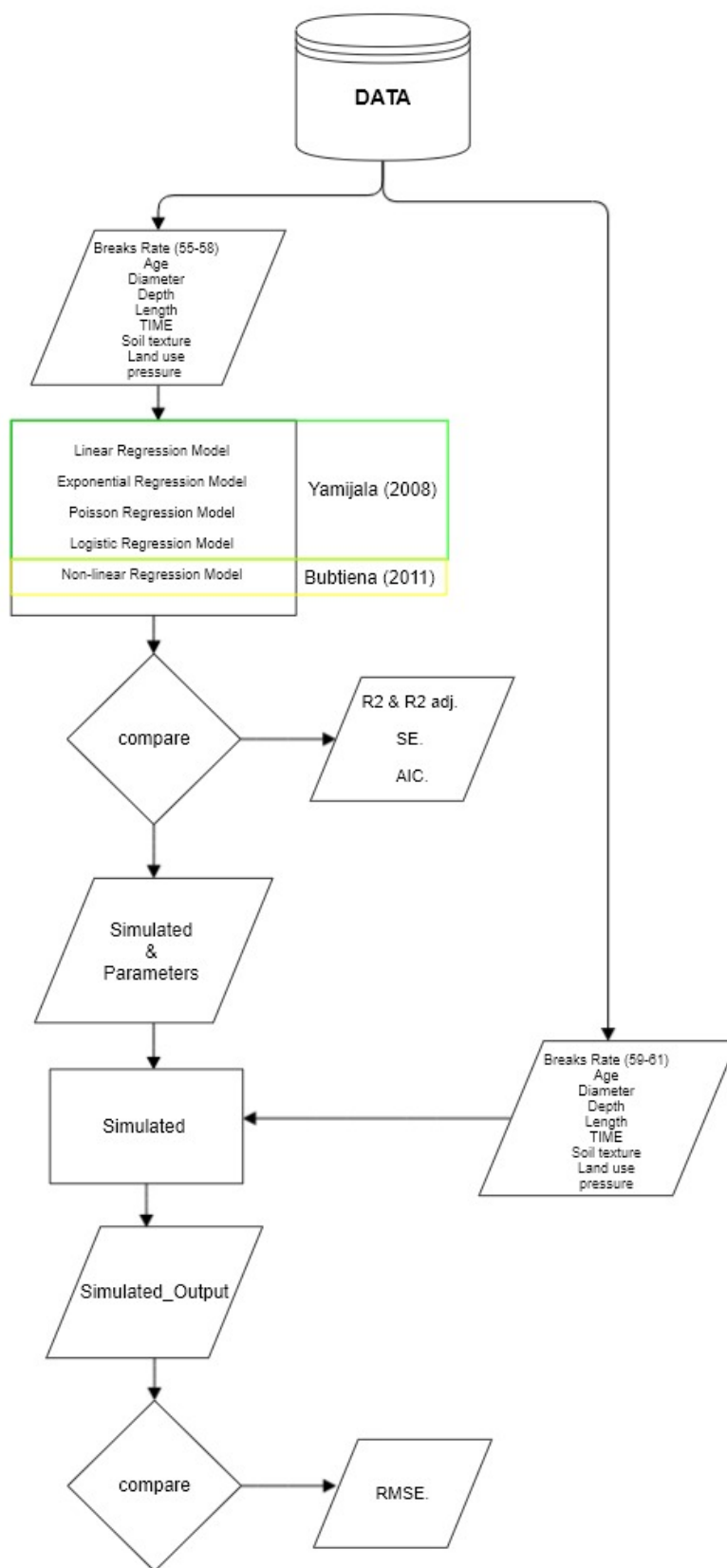
ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

ในบทที่ 3 นี้ จะกล่าวถึงขั้นตอนดำเนินการวิจัยที่ประกอบด้วย แผนการดำเนินงาน และ ขั้นตอนการประมวลผล จากรูปที่ 3.1 แสดงแผนการดำเนินงาน ทั้ง 11 ขั้นตอน เริ่มจากการศึกษา ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย การรวบรวมข้อมูลและการจัดเตรียมข้อมูล การสร้างสมการสำหรับ แบบจำลองการถดถอย การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการการถดถอยโดยซอฟต์แวร์ Minitab การ ประเมินความเหมาะสมของแบบจำลอง การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สมการถดถอย การทดสอบ ความถูกต้องของแบบจำลองคาดการณ์การแตกตัวของเส้นท่อประปาในพื้นที่ศึกษาการวิเคราะห์ และทดลองแนวทางการปรับปรุงแบบจำลอง การประเมินความเสถียรภาพของเส้นท่อ และสรุป ผลการวิจัย รายละเอียดจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

สำหรับในรูปที่ 3.2 จะแสดงขั้นตอนประมวลผลแบบจำลองคาดการณ์การแตกตัวของท่อ ประปา โดยขั้นตอนเหล่านี้จะอยู่ในระหว่างขั้นตอนที่ 2 ถึง 8 ของแผนการดำเนินงาน จากรูปข้อมูลที่ได้มีการรวบรวมและจัดเตรียมในขั้นตอนที่ 2 และ 3 จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ ชุดข้อมูลปี 2555-2558 และชุดข้อมูลปี 2559-2561 โดยชุดข้อมูลแรก จะใช้สำหรับการวิเคราะห์ด้วยสมการ ถดถอยทั้ง 5 รูปแบบ ที่ได้สร้างขึ้นในขั้นตอนที่ 4 เพื่อสร้างสมการการคาดการณ์การแตกตัวของแต่ละ แบบจำลอง จากนั้นจะนำค่าสถิติที่ได้จากการวิเคราะห์ มาทำการเปรียบเทียบความเหมาะสมของ แบบจำลองทั้งหมดเพื่อเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปใช้สำหรับการประเมินความ เสถียรภาพของท่อต่อไป โดยก่อนที่จะนำไปใช้ในประเมินจริง จะมีการนำข้อมูลชุดที่ 2 ที่ได้จัดเตรียม ไว้มาใช้สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้มา ด้วยการประเมินความถูกต้องจาก ค่าเฉลี่ยกำลังสองความคลาดเคลื่อน (RMSE) ดังนั้นข้อมูลชุดที่ 2 จึงใช้เป็นข้อมูลสำหรับการตรวจสอบ แบบจำลองว่าสามารถคาดการณ์ได้แม่นยำเพียงใด ด้วยการนำไปคาดการณ์อัตราการแตกตัวของ พื้นที่ศึกษานี้ ซึ่งจะอยู่ในขั้นตอนที่ 8 ของแผนการดำเนินการวิจัย หลังจากนั้นจะนำแบบจำลองที่ได้ คัดเลือกมาแล้ว มาทดลองปรับปรุงแบบจำลองด้วยวิธีการต่าง ๆ ดังขั้นตอนที่ 9 และขั้นตอนสุดท้าย นำแบบจำลองที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการประเมินความเสถียรภาพของเส้นท่อ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพใน การคัดเลือกเส้นท่อสำหรับในงานปรับปรุงและทดแทนเส้นท่อ



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนประมวลผลแบบจำลองคาดการณ์การแตกตัวของท่อประปา

จากรูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานและรูปที่ 3.2 ขั้นตอนประมวลผลแบบจำลองคาดการณ์การแตกตัวของท่อประปาสามารถอธิบายพอสังเขปได้ดังนี้

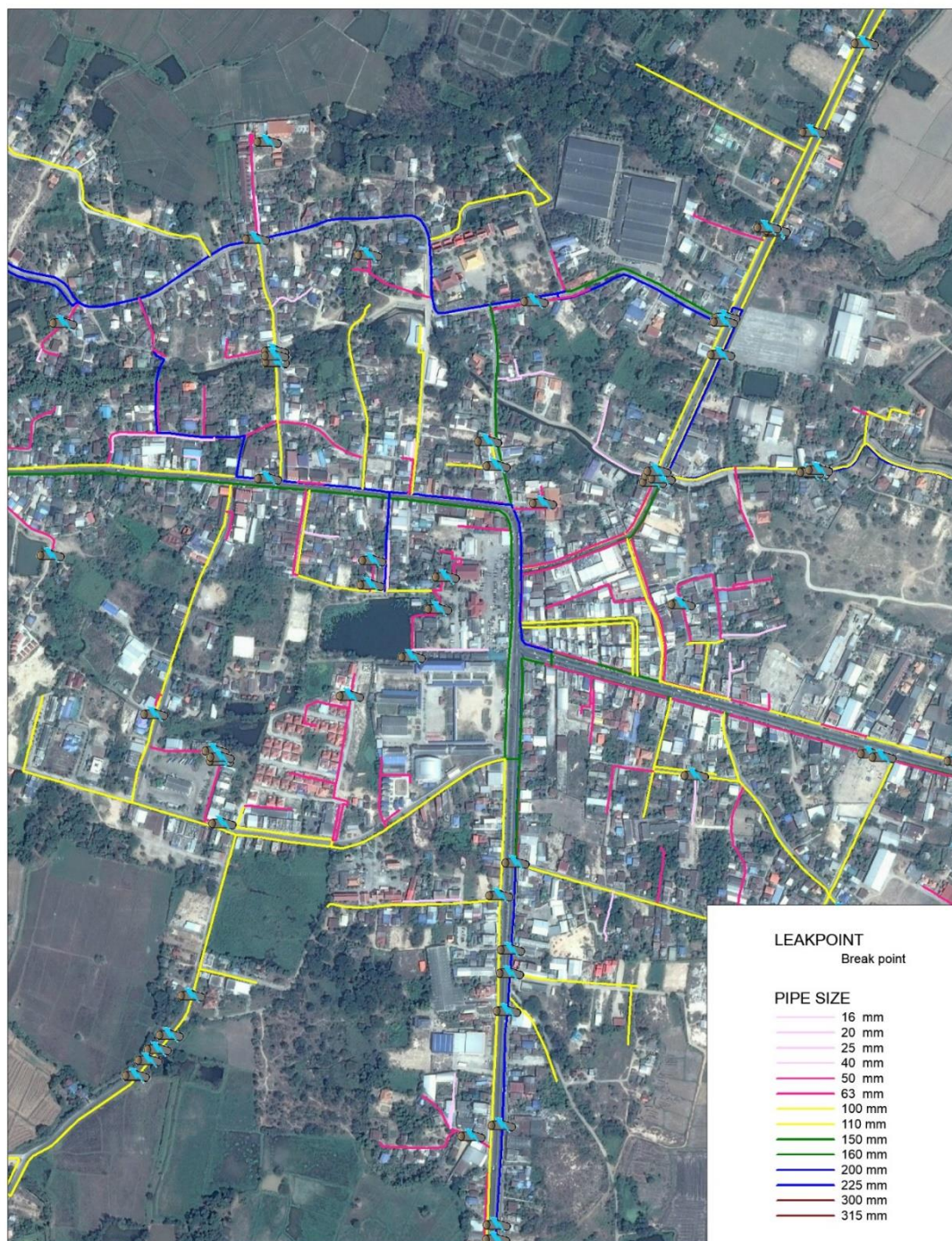
3.1 การศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

- 1) ทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง การคาดการณ์การแตกรั่ว โดยใช้ค่าสถิติการแตกรั่วของเส้นท่อตลอดจนศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกรั่วของเส้นท่อประปา
- 2) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคาดการณ์การแตกรั่วของท่อ โดยอาศัยปัจจัยทางภูมิศาสตร์
- 3) การใช้แบบจำลองการถดถอยในการจัดทำและวิเคราะห์แบบจำลองฯ

3.2 การรวบรวมข้อมูล

- 1) สถิติการแตกรั่วระหว่างปี 2555-2561 ในงานวิจัยนี้ได้มาจากข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ของ กปภ สาขาลาดยาว ที่ได้การบันทึกประวัติการซ่อมท่อประปาที่แตกรั่วของสาขาในช่วงเวลาที่ผ่านมามีในรูปแบบ .tab ไฟล์
- 2) แนวท่อประปา อยู่ในรูปแบบไฟล์สารสนเทศภูมิศาสตร์ ของ กปภ.สาขาลาดยาว ประกอบด้วยรายละเอียดลักษณะของท่อ เช่น ความยาว ปีที่ติดตั้ง ชนิดท่อ ความลึกของการติดตั้ง ขนาดเส้นท่อ เป็นต้น
- 3) ข้อมูลแรงดัน ได้จากใช้ซอฟต์แวร์ EPANET การวิเคราะห์แบบจำลองชลศาสตร์ของทาง กปภ.สาขาลาดยาวที่ได้จัดทำไว้ระหว่างปี 2555-2561
- 4) ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินในจังหวัดนครสวรรค์ ได้จากกรมพัฒนาที่ดิน ดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 1
- 5) ข้อมูลประเภทของดินในจังหวัดนครสวรรค์ ได้จากกรมพัฒนาที่ดิน ดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 1

รูปที่ 3.3 เป็นตัวอย่างข้อมูล GIS เส้นท่อประปา จะแสดงด้วยสีที่แตกต่างกันตามขนาดของเส้นท่อและจุดซ่อมท่อ (สถิติการแตกรั่ว) ที่เจ้าหน้าที่ได้ลงตำแหน่งที่มีการซ่อมท่อ เมื่อเกิดการแตกรั่วของท่อแต่ละเส้นท่อนั้น ๆ ซึ่งจะต้องนำมาทำการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ด้วยซอฟต์แวร์ ArcGIS 10.2 โดยจะได้อธิบายต่อไปในหัวข้อที่ 3.3 ก่อนนำข้อมูลมาวิเคราะห์นั้น จะต้องทำการทำความสะอาดข้อมูล (Data Cleaning) เหล่านี้ก่อน เช่น การตรวจสอบจุดซ่อมท่อ อาจมีการลงซ้ำหรือลงผิดเส้นท่อ เนื่องจากการลงข้อมูลมิได้เก็บค่าพิกัดโดยใช้ GPS แต่อาศัยตำแหน่งเชิงสัมพันธ์ในพื้นที่หน้างาน จึงมีโอกาสคลาดเคลื่อนได้



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างข้อมูล GIS เส้นท่อประปาและจุดซ่อมท่อ (สถิติการแตกรั่ว)

ในการศึกษานี้ ประกอบด้วยเส้นท่อ 325 ส่วน (325 PIPE_ID) ความยาวเส้นท่อทั้งหมด 178 กิโลเมตร สัดส่วนของชนิดท่อแต่ละชนิดในระบบ ได้แก่ ท่อ PVC มี 75 เปอร์เซ็นต์ท่อ HDPE มี 22 เปอร์เซ็นต์ และท่อ AC, GS และ PBP มีอย่างละ 1 เปอร์เซ็นต์

ในตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาจัดทำแบบจำลองคาดการณ์การแตกรั่วของเส้นท่อประปาในพื้นที่ กปภ.สาขาลาดยาว ประกอบไปด้วยตัวแปรตาม คือ อัตราการแตกรั่ว และตัวแปรอิสระทั้งหมด 40 ตัวแปร ตัวแปรทั้งหมดนี้เป็นตัวแปรที่มีการดัดแปลงมาจากงานวิจัยของ Yamijala และคณะ (2009) เป็นหลัก แต่เนื่องจากพื้นที่ศึกษาแตกต่าง ดังนั้นบางตัวแปรจะไม่ถูกนำมาใช้และมีการปรับปรุงให้เหมาะสมกับข้อมูลที่มีของ กปภ.สาขาลาดยาว รายละเอียดจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป สำหรับแบบจำลองถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นนั้น มีการสร้างตัวแบบขึ้นมาใหม่ตามเทคนิควิธีการในงานวิจัย Bubić และคณะ (2011) ประกอบด้วย แรงดัน (Pressure) ดิน (Soil) และวัสดุท่อ (Material) จะนำตัวแปรเหล่านี้ มาสร้างในรูปแบบเชิงปริมาณตามลักษณะความรุนแรงของผลกระทบต่อการแตกรั่ว

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

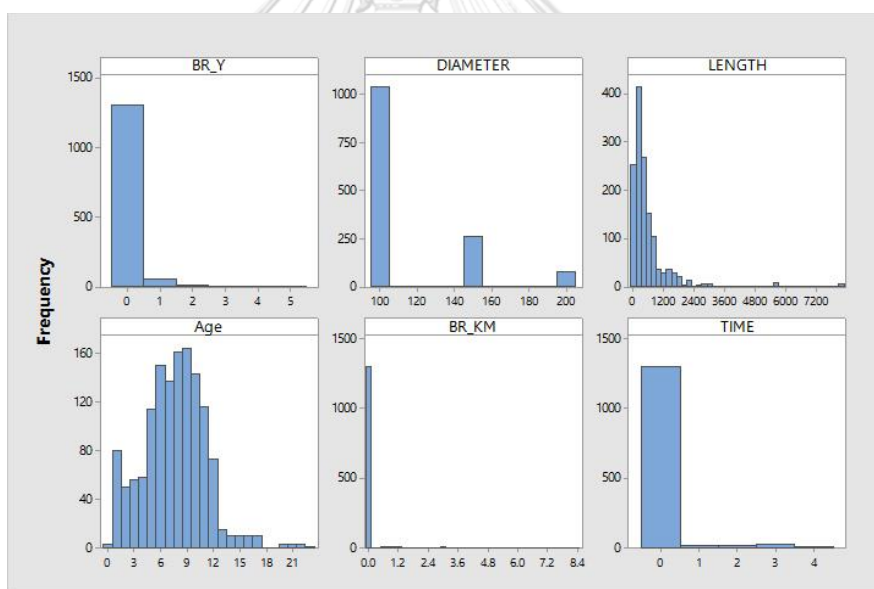
Variable	Description	Units	Mean	SD.	Min.	Max.
BrR	Breaks Rate	Breakage/year	0.143	0.652	0	9.472
Dia	Diameter	Meter	115.38	29.3	100	200
Dep	Depth	Meter	0.81	0.05	0.7	1
Len	Length	Meter	546.48	779.74	8171.87	2.3
Age	Age	Years	8	4.16	1	23
AC	Asbestos cement	NA	0.009	0.096	0	1
PVC	Polyvinyl chloride	NA	0.754	0.431	0	1
HDPE	High Density Polyethylene	NA	0.222	0.416	0	1
GS	Galvanized steel	NA	0.006	-0.078	0	1
PBP	Poly Butylene	NA	-	-	0	0
INSTYR	Year of installation	NA	2551	4.16	2536	2558
TIME	Time since last break	Years	0.385	1.011	0	4
Pre	Pressure	mH ₂ O	17.465	3.955	7.37	27.363
	Land use	Percentage	-	-	-	-
	Soil Texture	Percentage	-	-	-	-

จากตารางที่ 3.2 ตัวแปรประเภทชนิดของเส้นท่อ ซึ่งเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพหรือตัวแปรกลุ่ม (categorical variable) จะถูกเปลี่ยนให้เป็นตัวแปรหุ่น (Dummy variable) เพื่อให้การวิเคราะห์ถดถอยมีการแปลความหมายที่เหมาะสม (จิราวัลย์ จิตรถเวช, 2558)

ตารางที่ 3.2 การให้รหัสตัวแปรหุ่น (Dummy Code Variable)

Variable	Description	Dummy Code Variable				
		AC	PVC	HDPE	GS	PBP
AC	Asbestos Cement	1	0	0	0	0
PVC	Polyvinyl Chloride	0	1	0	0	0
HDPE	High Density Polyethylene	0	0	1	0	0
GS	Galvanized Steel	0	0	0	1	0
PBP	Poly Butylene	0	0	0	0	1

รูปที่ 3.4 เป็นฮิสโตแกรมของตัวแปรบางตัว ได้แก่ แลวบนซ้าย คือ จำนวนการแตกรั้ว แลวบนกลาง คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และแลวบนขวา คือ ความยาวของเส้นท่อ ส่วนแลวซ้ายล่าง คือ อายุของเส้นท่อ แลวกลางล่าง อัตราการแตกรั้วต่อกิโลเมตร และแลวขวาล่าง คือ เวลานับจากการแตกรั้วครั้งสุดท้าย



รูปที่ 3.4 แสดงฮิสโตแกรมของบางตัวแปร

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation Analysis) จะช่วยในการอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันหรือไม่ และมีขนาดความสัมพันธ์มากน้อยเพียงใด เป็นการแปลผล โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient, r) ซึ่งเป็นค่าที่วัดความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ตัวแปร โดยจะมองในแง่ของความเกี่ยวข้องกัน ความสอดคล้องกัน การแปรผันร่วมกันหรือสัมพันธ์กัน ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) มีค่าระหว่าง -1 ถึง +1 อธิบายความหมายได้ คือ ถ้ามี

เครื่องหมายเป็นลบ แสดงความสัมพันธ์ในทางตรงกันข้าม หากมีเครื่องหมายเป็นบวก แสดงถึงความสัมพันธ์ทิศทางเดียวกัน หากค่า r เข้าใกล้ 1 แสดงถึงความสัมพันธ์กันมาก และเข้าใกล้ศูนย์ หมายถึง มีความสัมพันธ์กันน้อย และหากเป็น 0 แสดงถึงตัวแปรไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นต่อกัน

สำหรับค่า P-Value เป็นการทดสอบสมมติฐานของความสัมพันธ์ ดังนี้ H_0 ตัวแปรทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์กัน H_1 ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน หากค่า P-Value เท่ากับ 0 แสดงว่าปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง ตารางที่ 3.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ของบางตัวแปรที่ใช้ในการวิจัยนี้ ซึ่งพิสูจน์ว่าตัวแปรตาม (อัตราการแตกร้าว : BrR) และตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์เชิงเส้นต่อกัน

จากตารางที่ 3.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) จากการประมวลผลด้วย Minitab 17 ของตัวแปรบางตัวแปรที่ใช้ในงานศึกษา ซึ่งพบว่า ปัจจัยเหล่านี้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอัตราการแตกร้าวของเส้นท่อ แต่มีความสัมพันธ์กันน้อย ดูได้จากมีค่า Pearson correlation อยู่ระหว่าง 0.2 - 0.5 ซึ่งตัวแปรทุกตัวมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\text{-Value} < 0.05$)

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ของตัวแปรบางตัวแปรจากการประมวลผลใน Minitab 17

	BrR	Dep	Dia	Len	Age	TIME	Pre
Dep	0.316						
	*0.000						
Dia	0.250	0.739					
	*0.000	*0.000					
Len	0.524	0.341	0.361				
	*0.000	*0.000	*0.000				
Age	0.188	0.078	0.049	-0.014			
	*0.001	*0.161	*0.381	0.803			
TIME	0.398	0.030	0.058	0.174	0.169		
	*0.000	*0.594	*0.302	*0.002	*0.002		
Pre	-0.005	0.020	0.093	0.066	-0.225	0.018	
	*0.929	*0.717	*0.094	*0.235	*0.000	*0.742	
BrR	1	0.316	0.250	0.524	0.188	0.398	-0.005
	*	*0.000	*0.000	*0.001	*0.000	*0.000	*0.929

Cell Contents : Pearson correlation

* P-Value

3.3 การจัดเตรียมข้อมูล

จัดเตรียมข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลองคาดการณ์การแตกรั่วของท่อประปา

1) แบ่งข้อมูลสถิติการแตกรั่วออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงปี พ.ศ. 2555-2558 ใช้เป็นข้อมูลสำหรับ Calibrate เพื่อสร้างแบบจำลองและช่วงปี พ.ศ. 2559-2561 ใช้เป็นข้อมูลสำหรับ Validate เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

2) ข้อมูลสถิติการแตกรั่วของแต่ละเส้นท่อ จะถูกแบ่งออกเป็นรายปี เพื่อที่จะได้ข้อมูลของการแตกรั่วของแต่ละเส้นท่อรายปี โดยใช้เครื่องมือ Spatial join ใน ArcGIS ระหว่างข้อมูลเส้นท่อประปากับข้อมูลการแตกรั่วที่แยกไว้เป็นรายปี เพื่อคำนวณหาจำนวนผลรวมของจุดที่มีการแตกรั่วในแต่ละเส้นท่อ

3) หลังจากนั้น นำเส้นท่อที่มีสถิติการแตกรั่วต่อปี มาสร้างเป็นสมการสังเกตการณ์ เพื่อใช้สำหรับการสร้างแบบจำลอง และหาค่าพารามิเตอร์ ดังตัวอย่างในตารางที่ 3.4 แสดงตัวแปรอิสระบางส่วน เช่น Dia (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง) Dep (ความลึก) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ ข้อมูลเส้นท่อที่มีสถิติการแตกรั่วระหว่างปี 2555-2558 จะสร้างสมการได้ 323 สมการสังเกตการณ์ และเส้นท่อที่มีสถิติการแตกรั่วระหว่างปี 2559-2561 สร้างได้ 323 สมการเช่นกัน

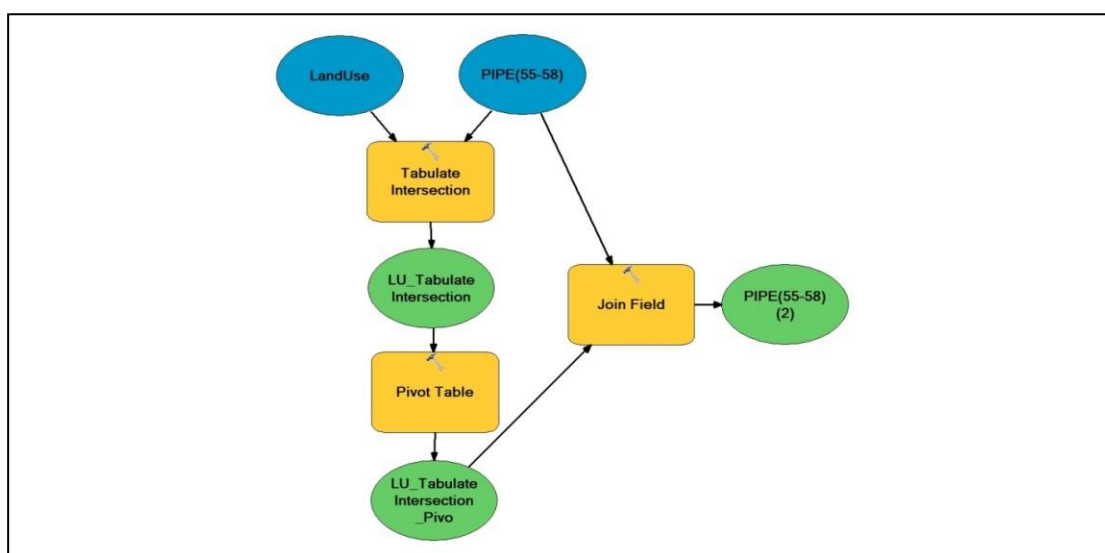
4) ทำการคำนวณเพิ่มเติมในตารางเชิงบรรยาย ได้แก่ อายุของเส้นท่อ (Age) อัตราการแตกรั่วต่อปี (Breaks rate) และช่วงเวลาถึงการแตกรั่วครั้งสุดท้าย (Time since last break)

ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์การถดถอย

PIPE_ID	BrR	Dia	Dep	AC	PVC	HDPE	GS	PBP	Len	INSTYR	AGE	TIME	Pre	c	sil	A1	M1	U2
1	0.0000	150	0.80	0	1	0	0	0	2247.0100	2551	8	0	18.2140	25.4550	74.5450	0.0000	0.0000	94.4326
2	0.0000	100	0.80	0	1	0	0	0	11.1038	2551	8	0	18.2800	0.0000	100.0000	0.0000	0.0000	100.0000
3	0.0000	100	0.80	0	1	0	0	0	43.7587	2551	8	0	18.2800	0.0000	100.0000	0.0000	0.0000	100.0000
5	0.2500	100	0.80	0	1	0	0	0	1374.6900	2551	8	2	18.2600	10.6496	89.3504	5.1206	2.4163	92.4631
6	0.0000	100	0.80	0	1	0	0	0	215.3060	2551	8	0	18.2000	0.0000	78.5584	0.0000	0.0000	100.0000
9	0.0000	100	0.80	0	1	0	0	0	404.4090	2551	8	0	13.6300	91.6948	0.0000	3.1851	0.0000	88.1601
10	1.7500	100	0.80	0	1	0	0	0	847.5100	2547	12	2	12.0429	0.0000	0.0000	11.6819	0.0000	12.8292
11	0.0000	100	0.80	0	1	0	0	0	540.0330	2547	12	0	13.1700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0	0.0000	100	0.80	0	1	0	0	0	175.4000	2547	12	0	14.3100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13	0.2500	150	0.80	0	1	0	0	0	334.6360	2547	12	1	11.4200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
14	0.0000	150	0.80	0	1	0	0	0	22.3299	2547	12	0	10.9300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15	0.2500	100	0.80	0	1	0	0	0	1815.6800	2547	12	3	12.8850	0.0000	0.0000	21.2839	0.0000	16.4727
16	0.0000	100	0.80	0	1	0	0	0	455.3130	2547	12	0	11.2625	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17	0.7500	100	0.80	0	1	0	0	0	819.7660	2547	12	1	12.5167	0.0000	0.0000	33.4202	0.0000	27.7302

จากตารางที่ 3.4 จะแสดงตัวอย่างของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์การถดถอยที่อยู่ในรูปแบบของข้อมูลเชิงบรรยาย ประกอบไปด้วย ตัวแปรอิสระถึง 40 ตัวแปรและตัวแปรตาม 1 ตัวแปร

5) คำนวณพื้นที่ซ้อนทับ (Overlay) ของประเภทเนื้อดินและพื้นที่ซ้อนทับของการใช้ประโยชน์ที่ดินของแต่ละเส้นท่อโดยคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อความยาวของเส้นท่อ จะใช้เครื่องมือใน ArcGIS10.2 คำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อความยาว ดังรูปที่ 3.5 ข้อมูล Land Use และ PIPE (55-58) วิเคราะห์ด้วยคำสั่ง Tabulate Intersection เพื่อคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ของ Land Use ต่อเส้นท่อ คำสั่ง Pivot table และคำสั่ง join Field จะถูกใช้สำหรับการจัดการตารางที่ได้มา



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการคำนวณเปอร์เซ็นต์ต่อความยาวในซอฟต์แวร์ ArcGIS 10.2

6) จัดสร้างข้อมูลเชิงบรรยาย (attribute) ให้อยู่ในรูปแบบของสมการถดถอย เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้วิเคราะห์ต่อไป

3.4 การสร้างสมการสำหรับแบบจำลองการถดถอยทั้ง 5 รูปแบบ

จากการทบทวนวรรณกรรมในบทที่ 2 ได้นำแบบจำลองการถดถอยทั้ง 5 รูปแบบ มาใช้วิเคราะห์ข้อมูล เพื่อสร้างสมการถดถอยสำหรับคาดการณ์อัตราการแตกรั่วของเส้นท่อประปา ซึ่งแต่ละแบบจำลองมีรายละเอียดที่แตกต่างกันดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.5 ทำให้ไม่สามารถระบุได้ว่าแบบจำลองใดมีความเหมาะสมกับพื้นที่ศึกษานี้ ซึ่งในงานวิจัยก่อนหน้านี้นี้ มีการทดลองวิเคราะห์มาบ้างแล้ว แต่เนื่องด้วยความแตกต่างของพื้นที่ศึกษาทั้งด้านของขนาดโครงข่ายประปา สภาพอากาศ ลักษณะทำเลที่ตั้ง ตลอดจนความพร้อมของข้อมูล ปัจจัยต่าง ๆ ในพื้นที่นั้น ๆ ทำให้ก่อนที่จะมีการวิเคราะห์ข้อมูล ต้องมีการปรับปรุงแบบจำลองเพื่อให้เหมาะสมกับข้อมูลที่มีอยู่ในพื้นที่ศึกษาของงานวิจัยนี้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1 รูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Model)

สมการที่ 3.1 ปรับปรุงมาจากแบบจำลอง Time Linear Regression ของ Yamijala และคณะ (2009) โดยมีการเพิ่มตัวแปรอิสระ ได้แก่ ความลึก (Dep) และเวลานับจากการแตกรั้วครั้งสุดท้าย (TIME) เข้าไปในแบบจำลอง เนื่องจากความลึกของการวางท่อที่ไม่ได้มาตรฐานสามารถเพิ่มโอกาสให้เกิดแรงกดทับจากภายนอกได้มากขึ้น สำหรับตัวแปรเวลานับจากการแตกรั้วครั้งสุดท้ายนั้น ในงานวิจัยของ Yamijala ได้ทดลองนำมาวิเคราะห์และพบความสัมพันธ์ต่ออัตราการแตกรั้ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้ทดลองเพิ่มตัวแปรทั้งสองเข้ามาในแบบจำลองเชิงเส้นด้วย สำหรับตัวแปรอิสระที่ตัดทิ้งไปเพื่อให้เหมาะสมกับพื้นที่ศึกษา ได้แก่ ตัวแปรอุณหภูมิ และน้ำฝน ไม่ได้นำมาวิเคราะห์ด้วย เนื่องจากพื้นที่ประเทศไทยไม่ค่อยมีความแตกต่างรุนแรงมากนักระหว่างอุณหภูมิและน้ำฝนในระหว่างฤดูกาลเหมือนในรัฐเท็กซัส ประเทศสหรัฐอเมริกา เช่นเดียวกับความชื้นในดินพื้นที่อำเภอลาวยาว จังหวัดนครสวรรค์ ตั้งอยู่ทางตอนกลางของประเทศไทยความชื้นมีอิทธิพลน้อยมากหากเทียบตะวันออกและภาคใต้ของประเทศไทย สำหรับตัวแปรการใช้ประโยชน์ที่ดินจะใช้การจำแนกชั้นที่ 2 และเนื้อดินจะใช้ทุกชั้นที่ได้จำแนกไว้ เนื่องจากยังไม่ทราบถึงอิทธิพลของแต่ละตัวแปรของทั้ง 2 กลุ่มนี้ในเมืองไทย จึงได้ทดลองเพิ่มเข้าไปในการศึกษา ได้รูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้น ดังสมการที่ (3.1)

$$BrR = \beta_0 + \beta_1(Dia) + \beta_2(Dep) + \beta_3(AC) + \beta_4(PVC) + \beta_5(HDPE) + \beta_6(GS) + \beta_7(Len) + \beta_8(Age) + \beta_9(TIME) + \beta_{10}(Pre) + \sum_{j=11}^{30} \beta_j(LU_j) + \sum_{k=31}^{40} \beta_k(ST_k) \quad (3.1)$$

3.4.2 รูปแบบสมการถดถอยทวีกำลัง (Exponential Regression Model)

รูปแบบสมการถดถอยยังคงใช้เช่นเดียวกับของในงานวิจัยของ Yamijala และคณะ (2009) เนื่องจากตัวแปรอิสระที่ใช้เป็นตัวแปรทางด้านเวลาเพียงอย่างเดียว จึงไม่มีการเพิ่มหรือลดตัวแปรอื่น ๆ เข้ามาในสมการ ดังนั้นรูปแบบสมการถดถอยทวีกำลังจะได้ดังสมการที่ (3.2)

$$BrR = \beta_0 * \exp(\beta_1(TIME) + \beta_2(INSTYR)) \quad (3.2)$$

3.4.3 รูปแบบสมการถดถอยปัวส์ซอง (Poisson Regression Model)

มีการเพิ่มลดตัวแปรมีลักษณะเช่นเดียวกับรูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้น ดังที่ได้กล่าวมา ได้สมการถดถอยปัวส์ซอง ดังสมการที่ (3.3)

$$\log(\mu) = \beta_0 + \beta_1(Dia) + \beta_2(Dep) + \beta_3(AC) + \beta_4(PVC) + \beta_5(HDPE) + \beta_6(GS) + \beta_7(Len) + \beta_8(Age) + \beta_9(TIME) + \beta_{10}(Pre) + \sum_{j=11}^{30} \beta_j(LU_j) + \sum_{k=31}^{40} \beta_k(ST_k) \quad (3.3)$$

3.4.4 รูปแบบสมการถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression Model)

มีการเพิ่มตัวแปรที่มีลักษณะเช่นเดียวกับรูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้นและสมการถดถอยปัวส์ซอง ดังที่ได้กล่าวมา ได้สมการถดถอยโลจิสติก ดังสมการที่ (3.4)

$$\begin{aligned} \text{logit}[P(x)] = \log \left[\frac{P(x)}{1-P(x)} \right] = & \beta_0 + \beta_1(Dia) + \beta_2(Dep) + \beta_3(AC) + \beta_4(PVC) + \\ & \beta_5(HDPE) + \beta_6(GS) + \beta_7(Len) + \beta_8(Age) + \beta_9(TIME) + \beta_{10}(Pre) + \\ & \sum_{j=11}^{30} \beta_j(LU_j) + \sum_{k=31}^{40} \beta_k(ST_k) \end{aligned} \quad (3.4)$$

3.4.5 รูปแบบสมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Regression Model)

สมการที่ (3.5) ดัดแปลงมาจาก Burtina และคณะ (2011) โดยเฉพาะวิธีการสร้างตัวแปรกลุ่ม (Categorical variable) ให้อยู่ในรูปแบบตัวแปรเชิงปริมาณ (Quantitative variable) ตามลักษณะความรุนแรงของผลกระทบต่อการแตกร้าว ซึ่งจะใช้เพียง 7 ตัวแปรที่ได้คัดเลือกมาแล้วเท่านั้น สำหรับในงานวิจัยนี้ไม่มีตัวแปรคุณภาพน้ำ (water quality) จึงเปลี่ยนมาใช้ แรงดันภายในเส้นท่อ (Pressure) อีกทั้งได้ดัดแปลงชนิดดิน (Soil type) เป็นการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land Use) เนื่องจากไม่สามารถกำหนดความรุนแรงของสภาพดินที่มีต่อการแตกร้าวของเส้นท่อได้ ดังสมการที่ (3.5)

$$\text{BrR} = \beta_0 + \beta_1 \ln(Len) + \beta_2 \ln(Dia) + \beta_3 \ln(Dep) + \beta_4 \ln(Age) + \beta_5 \ln(Mat) + \beta_6 \ln(LU) + \beta_7 \ln(Pre) \quad (3.5)$$

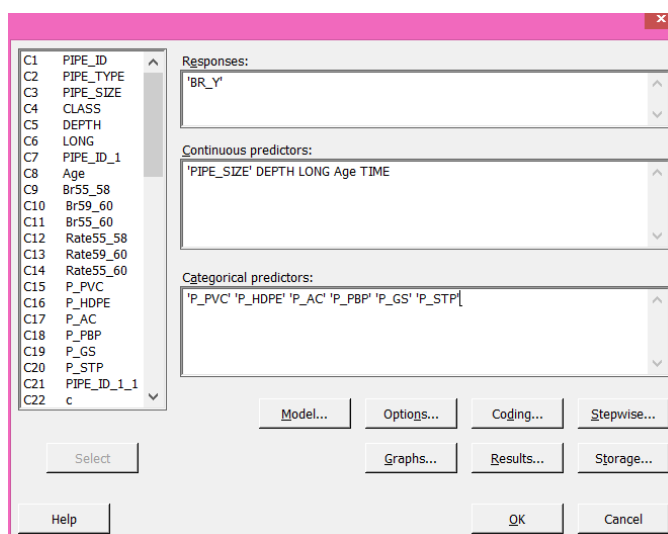
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอย ด้วยซอฟต์แวร์ Minitab 17

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอย ด้วยซอฟต์แวร์ Minitab 17 เหมาะกับการวิเคราะห์ข้อมูลสถิติที่มีปริมาณข้อมูลและมีตัวแปรในการวิเคราะห์จำนวนมากเพื่อค้นหารูปแบบหรือความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลในฐานข้อมูลขนาดใหญ่ ซึ่งข้อดีของซอฟต์แวร์ Minitab 17 คือ สามารถนำมาวิเคราะห์ โดยใช้แบบจำลองได้หลากหลายขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และความต้องการของการใช้งาน ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงเลือกใช้ซอฟต์แวร์ Minitab 17 ในการวิเคราะห์หาสมการแบบจำลอง คาดการณ์การแตกร้าวของท่อประปาที่ต้องทำการวิเคราะห์ทั้งแบบจำลอง การถดถอยเชิงเส้นแบบจำลองการถดถอยปัวส์ซอง และแบบจำลองการถดถอยโลจิสติก ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์เปรียบเทียบแต่ละแบบจำลองสะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น

ก่อนเข้าขั้นตอนการประมวลผลต้องจัดเตรียมข้อมูลให้พร้อม ซึ่งในงานวิจัยนี้นำเข้าข้อมูลในรูปแบบตาราง Excel (.xlsx) เป็นข้อมูลเชิงบรรยายของชั้นข้อมูลที่ได้ทำการวิเคราะห์คำนวณค่าข้อมูลของตัวแปรต่าง ๆ ในซอฟต์แวร์ ArcGIS 10.2 มาแล้ว จะถูกนำมาวิเคราะห์ถดถอยตามรูปแบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบรายละเอียดของการทำงานด้วยซอฟต์แวร์จะดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

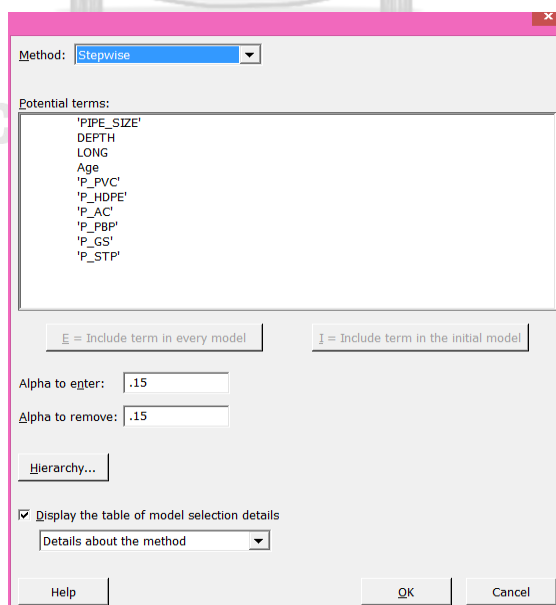
- 1) นำเข้าข้อมูลตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ในรูปแบบตาราง Excel (.xlsx)

2) เลือกรูปแบบของแบบจำลองที่ต้องการใช้ในการวิเคราะห์ เช่น ในที่นี้ทำการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น จะใช้คำสั่ง Fit Regression Model... จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 3.6 จากนั้นคลิกเลือกตัวแปรที่ต้องการวิเคราะห์จากคอลัมน์ของตัวแปรตาม (Y) และตัวแปรอิสระ (X) ดังรูปที่ 3.6



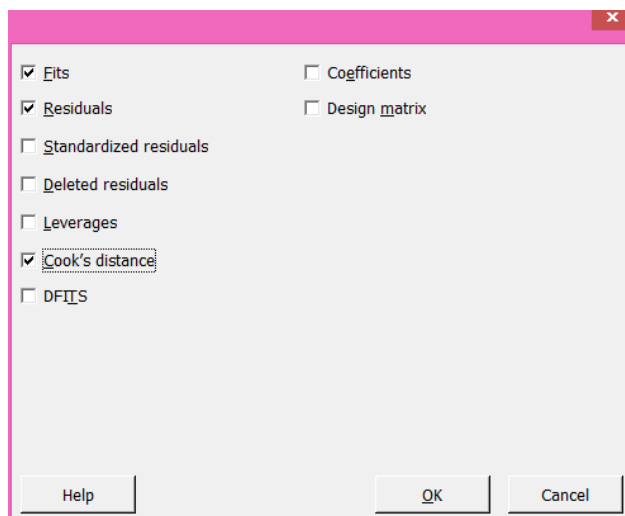
รูปที่ 3.6 การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นด้วย Fit Regression Model...

3) การคัดเลือกตัวแปรจะคลิกปุ่ม Stepwise... ซึ่งสามารถคัดเลือกได้ 3 วิธีดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 ซึ่งหากมีตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นจำนวนมากวิธีที่นิยมใช้สำหรับการคัดกรอกตัวแปรเหล่านี้มักนิยมใช้วิธี Stepwise ซึ่งเป็นวิธีที่ผสมระหว่าง Forward selection กับ Backward elimination ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วิธีคัดกรองตัวแปรอิสระด้วย Stepwise...

4) สามารถตั้งค่าให้ซอฟต์แวร์ทำการบันทึกค่า Fits, Residuals, Standardized Residuals และอื่น ๆ ดังรูปที่ 3.8 เพื่อที่จะได้นำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไปได้



รูปที่ 3.8 ค่าต่าง ๆ จากการคำนวณโดยซอฟต์แวร์ Minitab 17

6) เมื่อทำการประมวลผลซอฟต์แวร์ จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ดังต่อไปนี้ ซึ่งสามารถนำออกไฟล์ในรูปแบบ Text (.txt) ดังตัวอย่างด้านล่างที่ได้จากการวิเคราะห์ในซอฟต์แวร์ Minitab 17 ค่าที่ได้จะนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบขั้นต่อไป

Regression Analysis: BR_Y versus DEPTH, LONG, Age, TIME, BR_KM, PIPE_SIZE, P_PVC, P_HDPE
Method

Categorical predictor coding (1, 0)

Continuous predictor standardization

Subtract the mean, then divide by the standard deviation

Predictor	Mean	StDev
DEPTH	0.810	0.047
LONG	514.266	746.359
Age	7.580	3.532
TIME	0.122	0.583
BR_KM	0.088	0.509
PIPE_SIZE	114.851	28.130

Stepwise Selection of Terms

α to enter = 0.15, α to remove = 0.15

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	6	118.966	19.8276	536.65	0.000
DEPTH	1	0.827	0.8266	22.37	0.000
LONG	1	9.746	9.7458	263.78	0.000
Age	1	0.469	0.4685	12.68	0.000
TIME	1	16.005	16.0045	433.18	0.000

BR_KM	1	7.421	7.4207	200.85	0.000
PIPE_SIZE	1	0.414	0.4136	11.20	0.001
Error	1370	50.617	0.0369		
Total	1376	169.583			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.192216	70.15%	70.02%	65.74%

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0.06826	0.00518	13.18	0.000	
DEPTH	0.03502	0.00740	4.73	0.000	2.04
LONG	0.09599	0.00591	16.24	0.000	1.30
Age	0.01866	0.00524	3.56	0.000	1.02
TIME	0.16434	0.00790	20.81	0.000	2.32
BR_KM	0.10694	0.00755	14.17	0.000	2.12
PIPE_SIZE	-0.02496	0.00746	-3.35	0.001	2.07

Regression Equation in Uncoded Units

$$BR_Y = -0.595 + 0.748 DEPTH + 0.000129 LONG + 0.00528 Age + 0.2819 TIME + 0.2103 BR_KM - 0.000887 PIPE_SIZE$$

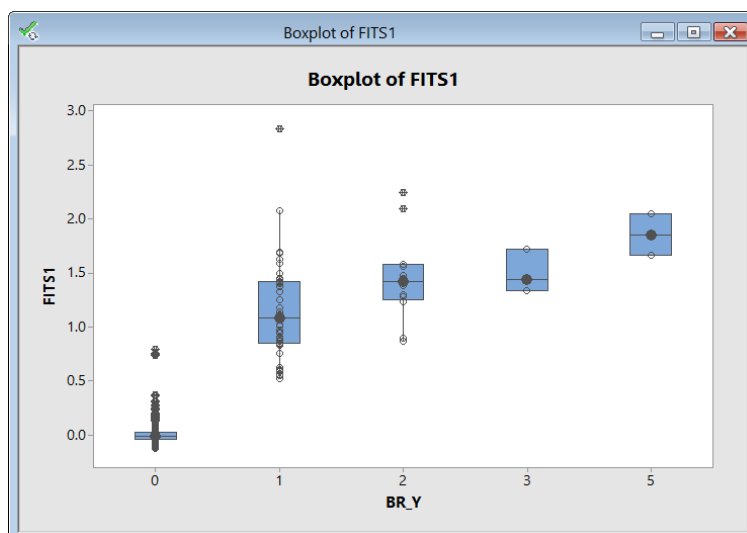
Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	BR_Y	Fit	Resid	Std Resid	
10	1.0000	1.1382	-0.1382	-0.73	X
12	1.0000	0.5849	0.4151	2.16	R
23	2.0000	2.0983	-0.0983	-0.53	X
31	1.0000	1.4486	-0.4486	-2.39	R X

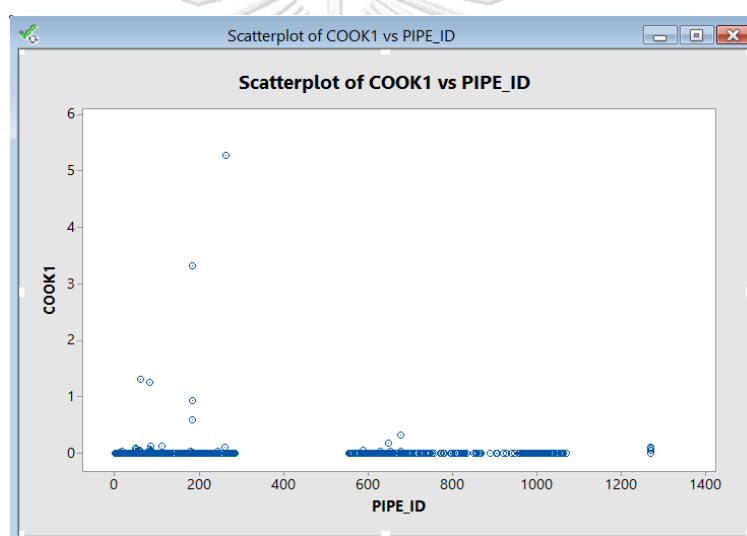
R Large residual

X Unusual X

7) จากรูปที่ 3.9 แสดง Boxplot ระหว่างค่า Fits (ค่าคาดการณ์จากแบบจำลอง) กับค่าการแทรกัวร์จริง (BR_Y) ทำให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงกับค่าที่คาดการณ์ และรูปที่ 3.10 แสดง Scatterplot ของค่า Cook's Distance จะช่วยบอกถึงค่าที่ผิดปกติที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งต้องนำไปวิเคราะห์ต่อไป โดยปกติค่า Cook's Distance ที่ดีจะมีค่าไม่เกิน 1



รูปที่ 3.9 Boxplot ระหว่างค่าที่คาดการณ์ได้จากแบบจำลอง (FITS1) กับค่าการแทรกจริง(BR_Y)



รูปที่ 3.10 แสดง Scatterplot ของค่า Cook's Distance

3.6 การประเมินความเหมาะสมของแบบจำลอง

เมื่อทำการหาตัวแบบด้วยการวิเคราะห์การถดถอยจากขั้นตอนก่อนหน้านี้นี้ จะต้องมี การประเมินตัวแบบด้วยว่ามีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานหรือไม่ ซึ่งใน ซอฟต์แวร์ Minitab มีตัวสถิติที่ใช้ทดสอบความสมบูรณ์ของตัวแบบ (Goodness of fit statistics) ให้เลือกนำมาใช้ในการประเมินตัวแบบอยู่หลายตัว ในงานวิจัยนี้จะใช้ตัวสถิติเพียง 3 ตัว ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย และ Akaike Information Criterion (AIC) ที่ได้จากซอฟต์แวร์ ในขั้นตอนที่ 3.5 ซึ่งเพียงพอที่จะทำให้สามารถเปรียบเทียบความเหมาะสมของตัวแบบทั้ง 5 รูปแบบได้ รายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (Coefficient of determination, R^2) คือ ค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนอง (Response variable) ที่สามารถอธิบายได้ ว่ามีอยู่ในตัวแบบเชิงเส้นนี้ ทั้งหมดกี่เปอร์เซ็นต์ หรือความผันแปรที่สามารถอธิบายได้ต่อความผันแปร หากแบบจำลองนั้นมีค่า R^2 สูง แสดงถึงความสามารถที่ตัวแปรอิสระ จะสามารถอธิบายตัวแปรตามได้ค่อนข้างดี และหากมีค่า R^2 ต่ำ นั้นหมายถึง ตัวแปรอิสระเหล่านั้น ยังไม่ดีพอที่จะอธิบายตัวแปรตามนั้น ๆ

2) ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (Standard error of the regression, S) เป็นการวัดความแปรปรวนการถดถอย สามารถใช้ได้คล้ายคลึงกับ standard deviation ซึ่งบ่งบอกถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการนำตัวแปรอิสระมาใช้ในการประมาณค่าตัวแปรตามนั้น หมายความว่า หากค่า S มีค่าน้อย ๆ ซึ่งแสดงว่า ค่าสังเกตการณ์กับอยู่ใกล้กับเส้น Regression

3) Akaike Information Criterion (AIC) เป็นสถิติที่ใช้เปรียบเทียบแบบจำลองที่ต่างกัน ยิ่งค่า AIC เล็กกลง จะบ่งชี้ว่าแบบจำลองถูกปรับให้เข้ากับข้อมูลได้ดีเท่านั้น

3.7 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สมการถดถอย 5 รูปแบบ

จากขั้นตอนที่ 3.5 และ 3.6 ซอฟต์แวร์ Minitab ได้วิเคราะห์และประมวลผลในแต่ละแบบจำลอง โดยจะให้ค่าสถิติพร้อมกับแบบจำลองแต่ละรูปแบบที่วิเคราะห์มาได้ ในขั้นตอนนี้จะนำค่าสถิติที่ได้จากการวิเคราะห์ ได้แก่ ค่า p-value, R^2 , S, และ AIC มาเปรียบเทียบ เพื่อประเมินความเหมาะสมของแบบจำลอง สำหรับนำไปใช้เป็นสมการคาดการณ์การแตกตัวของท่อประปาของ กปภ. สาขาลาดยาว

3.8 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองคาดการณ์การแตกตัวของเส้นท่อประปา

จากข้อมูลสถิติการแตกตัวได้แบ่งออกเป็น 2 ชุด โดยชุดแรกสำหรับการสร้างแบบจำลองฯ และชุดที่สองมีไว้สำหรับการใช้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองฯ เนื่องจากงานวิจัยมีเวลาที่ค่อนข้างจำกัด จึงไม่สามารถที่จะรอผลการแตกตัวในอนาคตได้ ดังนั้นในการเลือกจะแบ่งข้อมูลสถิติการแตกตัวที่มีอยู่ออกเป็น 2 ชุด จะช่วยให้สามารถตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยไม่ต้องรอเวลานาน การตรวจสอบจะตรวจสอบจากค่าเฉลี่ยกำลังสองความคลาดเคลื่อน (Root Mean Square Error : RMSE) ซึ่งสามารถวัดขนาดของค่าเฉลี่ยของข้อผิดพลาด ซึ่งเป็นรากที่สองของค่าเฉลี่ยของความแตกต่างกำลังสองระหว่างค่าทำนายและค่าสังเกตการณ์

3.9 การวิเคราะห์และทดลองแนวทางการปรับปรุงแบบจำลอง

ในขั้นตอนนี้ จะทดลองปรับปรุงทั้ง 5 แบบจำลอง เพื่อหาแนวทางในการเพิ่มความถูกต้องของแบบจำลองทั้ง 5 รูปแบบ โดยวิธีการดังต่อไปนี้

3.9.1 การขจัดค่าผิดปกติ

นำมาใช้สำหรับปรับปรุงแบบจำลอง โดยตัดข้อมูลที่มีค่า Cook's distance, D ห่างจากกลุ่มออกเพื่อปรับปรุงแบบจำลองให้เหมาะสมยิ่งขึ้น

3.9.2 การเพิ่มตัวทำนายอื่น ๆ

จะทำการเพิ่มตัวทำนายที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของท่อประปา เช่น ถนน ความสูง และอัตราการแตกต่อกิโลเมตรต่อปี เป็นต้น เพื่อหาทางปรับปรุงให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

3.10 การประเมินความเสื่อมสภาพของเส้นท่อประปา

ในขั้นตอนนี้ จะทำการประเมินความเสื่อมสภาพของเส้นท่อประปาด้วยแบบจำลองที่ กปก. ใช้ในการประเมินความเสื่อมสภาพของเส้นท่ออยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากไม่สามารถหาข้อมูลที่ กปก. สาขาลาดยาว ได้ประเมินไว้จริงระหว่างช่วงปี 2558-2561 และประเมินความเสื่อมสภาพของเส้นท่อโดยใช้แบบจำลองที่คัดเลือกมาในขั้นตอนที่ 3.7 และ 3.8 นำมาเปรียบเทียบกับอัตราการแตกที่ที่เกิดขึ้นจริงระหว่างปี 2559 – 2561 ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเสื่อมสภาพของเส้นท่อ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองได้สำหรับการนำมาใช้ประเมินจริง

3.11 การสรุปผลการวิจัย

เป็นขั้นตอนการอธิบายผลการศึกษา และสรุปผลการศึกษา ตลอดถึงข้อเสนอแนะเพิ่มเติมที่ได้จากการศึกษานี้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

จากการศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองคาดการณ์การแตกตัวของท่อประปา: กรณีศึกษาการประปาส่วนภูมิภาคสาขาลาดยาว โดยใช้ซอฟต์แวร์ ArcGIS 10.2 และซอฟต์แวร์ Minitab 17 เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอยทั้ง 5 รูปแบบ ได้ผลการวิจัยดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอยทั้ง 5 รูปแบบ

จากหัวข้อที่ 3.2 และ 3.3 ข้อมูลเชิงบรรยายถูกจัดเตรียม โดยใช้ซอฟต์แวร์ ArcGIS 10.2 และ Excel เพื่อให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมก่อนนำไปวิเคราะห์ในซอฟต์แวร์ Minitab 17 โดยนำรูปแบบสมการถดถอยที่สร้างขึ้นในหัวข้อที่ 3.4 และทำการวิเคราะห์ข้อมูลตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.5 จะได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอยทั้ง 5 รูปแบบ พร้อมทั้งค่าสถิติสำหรับการประเมินความเหมาะสมของแบบจำลอง ดังหัวข้อที่ 3.6 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Model)

ประมวลผลโดยใช้คำสั่ง Fit Regression Model ในซอฟต์แวร์ Minitab 17 ซึ่งจะคัดเลือกตัวแปรอิสระ ด้วยวิธีการเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน (Stepwise) รายละเอียดได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 เพื่อคัดเลือกแบบจำลองคาดการณ์การแตกตัวของท่อประปาที่เหมาะสมที่สุด ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น ผลการวิเคราะห์ พบว่า จากตัวแปรอิสระทั้งหมด 40 ตัวแปร จะถูกคัดเลือกเหลือเพียง 9 ตัวแปรที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\text{-value} < 0.05$) ต่ออัตราการแตก (BrR) ได้แก่ ความลึก (Dep) ความยาว (Len) อายุ (Age) เวลานับจากการแตกครั้งสุดท้าย (TIME) ดินร่วนเหนียวปนทราย/ดินร่วนเหนียวปนทราย (scl_scl) ดินร่วนปนทราย (sl) พื้นที่นา (A1) บ่อขุด (M3) และแหล่งน้ำที่สร้างขึ้น (W2)

ในหัวข้อนี้ จะแสดงรายละเอียดในการวิเคราะห์ในซอฟต์แวร์ เนื่องจากตัวแปรที่นำมาใช้มีจำนวนมาก ซึ่งหากนำมาใช้ทุกตัวแปรจะทำให้เป็นแบบจำลองไม่เหมาะสม อีกทั้งทุกตัวแปรที่นำมาใช้ไม่ได้หมายความว่า จะเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการแตกที่เกิดขึ้นในระบบโครงข่ายของ กปภ.สาขาลาดยาว ดังนั้นจึงต้องอาศัยเทคนิควิธีการในการคัดเลือกตัวแปรของซอฟต์แวร์ซึ่งทำ

ได้หลายวิธีในการคัดเลือก เพื่อให้การทำงานสามารถทำได้สะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยรายละเอียดจะได้แสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

ในตารางที่ 4.1 ผลการคัดเลือกตัวแปรอิสระที่มีระดับนัยสำคัญต่ออัตราการแตกร้าวด้วยวิธี Stepwise ซึ่งซอฟต์แวร์ได้ทำการประมวลผลและแสดงผลพีธีในการคัดเลือกตัวแปรอิสระที่มีระดับนัยสำคัญกับอัตราการแตกร้าวออกมาทั้งหมด 9 Step โดยซอฟต์แวร์ไม่ได้แสดงรายละเอียดในส่วน of ขั้นตอนการวิเคราะห์และคัดเลือกให้เห็น แต่จะแสดงเฉพาะตัวแปรอิสระที่ถูกคัดเลือกได้ในแต่ละ Step และแสดงค่าทางสถิติสำหรับประเมินความเหมาะสมของแบบจำลอง พบว่า เมื่อเพิ่มตัวแปรอิสระที่ถูกคัดเลือกโดยซอฟต์แวร์เข้าไปทีละตัว ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (Standard error of the regression: S) ที่สามารถบ่งบอกความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองนี้ จะค่อย ๆ ลดลง นั่นหมายความว่าแบบจำลองนั้น มีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น อีกทั้งค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) จะสูงขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดที่ปรับแล้วสำหรับตัวแปรอิสระหลายตัว (R^2_{adj}) จะมีค่าสูงสุด ค่า R^2_{adj} จะสามารถช่วยตรวจสอบ ในกรณีที่ค่า R^2 เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มตัวแปรอิสระเข้าไปมากเกินไปจนความจำเป็น ค่า R^2_{adj} จะลดลงและค่อนข้างต่างจากค่า R^2 ค่อนข้างมาก

ตารางที่ 4.1 ผลการคัดเลือกตัวแปรอิสระที่มีระดับนัยสำคัญกับอัตราการแตกรั่วด้วยวิธี Stepwise

Variable		Stepwise Selection of Terms (Candidate 40 Variable)								
		Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5	Step 6	Step 7	Step 8	Step 9
BrR	Breakage Rate (Breakage/Year)									
Dia	Diameter									
Dep	Depth						***	**	**	**
Len	Length	***	***	***	***	***	***	***	***	***
Age	Age							*	*	*
AC	Asbestos Cement									
PVC	Polyvinyl Chloride									
HDPE	High Density Polyethylene									
GS	Galvanized Steel									
PBP	Poly Butylene									
INSTYR	Year of Installation									
TIME	Time since last break		***	***	***	***	***	***	***	***
Pre	Pressure									
c	ดินเหนียว									
cl	ดินร่วนปนดินเหนียว									
cl scl	ดินร่วนปนดินเหนียว/ดินร่วนเหนียวปนทราย									
cl sil	ดินร่วนปนดินเหนียว/ดินร่วนปนทรายแป้ง									
ls	ดินทรายปนร่วน									
scl	ดินร่วนเหนียวปนทราย									
scl scl	ดินร่วนเหนียวปนทราย/ดินร่วนเหนียวปนทราย								*	*
sicl	ดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง									
sil	ดินร่วนปนทรายแป้ง									
sl	ดินร่วนปนทราย					***	***	***	***	***
A0	เกษตรผสมผสาน/ไร่นาสวนผสม									
A1	พื้นที่นา				***	***	***	**	*	*
A2	พืชไร่									
A3	ไม้ยืนต้น									
A4	ไม้ผล									
A7	ทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์และโรงเรือนเลี้ยงสัตว์									
F2	ป่าผลัดใบ									
M1	ทุ่งหญ้าและไม้สะเมาะ									
M2	พื้นที่ลุ่ม									
M3	เหมืองแร่ บ่อขุด									*
M4	พื้นที่เปิดเตล็ดอื่นๆ									
U1	ตัวเมืองและย่านการค้า									
U2	หมู่บ้าน									
U3	สถานที่ราชการ และสถาบันต่าง ๆ									
U5	พื้นที่อุตสาหกรรม									
U6	สิ่งปลูกสร้างอื่น ๆ									
W1	แหล่งน้ำธรรมชาติ									
W2	แหล่งน้ำที่สร้างขึ้น			***	***	***	***	***	***	***
จำนวนตัวแปรอิสระ		1	2	3	4	5	6	7	8	9
ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error)		0.24577	0.229107	0.222088	0.218487	0.213447	0.21021	0.208605	0.207228	0.205817
R2		0.2747	0.3719	0.4116	0.4323	0.4599	0.4778	0.4874	0.4958	0.5042
R2 (adj)		0.2727	0.368	0.4061	0.4252	0.4514	0.4679	0.476	0.4829	0.4899

*** คือ พหุคูณมีระดับนัยสำคัญ P-value ระหว่าง 0-0.001, ** คือ พหุคูณมีระดับนัยสำคัญ P-value ระหว่าง 0.001-0.01

* คือ พหุคูณมีระดับนัยสำคัญ P-value ระหว่าง 0.01-0.05

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นที่ได้จากการคัดเลือกตัวแปรด้วยวิธี None/Enter, Forward, Backward และ Stepwise ในซอฟต์แวร์ Minitab 17

Variable	Model									
	None	Forward	Forward	Forward	Backward	Backward	Backward	Stepwise	Stepwise	Stepwise
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
BrR	Breakage Rate (Breakage/Year)									
Dia	Diameter (Meter)									
Dep	Depth (Meter)									
Len	Length (Meter)									
Age	Age (Year)									
AC	Asbestos Cement									
PVC	Polyvinyl Chloride									
HDPE	High Density Polyethylene									
GS	Galvanized Steel									
PBP	Poly Butylene									
TIME	Time since last break (Year)									
Pre	Pressure (mH ₂ O)									
c	ดินเหนียว (Percentage)									
cl	ดินร่วนปนดินเหนียว (Percentage)									
cl scl	ดินร่วนปนดินเหนียว/ดินร่วนปนทราย (Percentage)									
cl sil	ดินร่วนปนดินเหนียว/ดินร่วนปนทรายแข็ง (Percentage)									
ls	ดินทรายปนร่วน (Percentage)									
scl	ดินร่วนเหนียวปนทราย (Percentage)									
scl scl	ดินร่วนเหนียวปนทราย/ดินร่วนเหนียวปนทราย (Percentage)									
sicl	ดินร่วนเหนียวปนทรายแข็ง (Percentage)									
sil	ดินร่วนปนทรายแข็ง (Percentage)									
sl	ดินร่วนปนทราย (Percentage)									
A0	เกษตรผสมผสาน/ไร่นาสวนผสม (Percentage)									
A1	พื้นที่นา (Percentage)									
A2	พื้นที่ไร่ (Percentage)									
A3	ไม้ยืนต้น (Percentage)									
A4	ไม้ผล (Percentage)									
A7	ทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์และโรงเรือนเลี้ยงสัตว์ (Percentage)									
A9	สถานที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Percentage)									
F2	ป่าผลัดใบ (Percentage)									
M1	ทุ่งหญ้าและไม้ละเมาะ (Percentage)									
M2	พื้นที่ลุ่ม (Percentage)									
M3	เหมืองแร่ ป่อขุด (Percentage)									
M4	พื้นที่เปิดเตล็ดหินๆ (Percentage)									
U1	ตัวเมืองและย่านการค้า (Percentage)									
U2	หมู่บ้าน (Percentage)									
U3	สถานที่ราชการ และสถาบันต่าง ๆ (Percentage)									
U5	พื้นที่อุตสาหกรรม (Percentage)									
U6	สิ่งปลูกสร้างอื่น ๆ (Percentage)									
W1	แหล่งน้ำธรรมชาติ (Percentage)									
W2	แหล่งน้ำที่สร้างขึ้น (Percentage)									
จำนวนตัวแปรอิสระ										
ค่าคาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error)										
R ²										
R ² (adj)										

*** คือ พารามิเตอร์มีระดับนัยสำคัญ P-value ระหว่าง 0-0.001 , N คือ พารามิเตอร์มีโมเดลแต่ไม่มีนัยสำคัญ

** คือ พารามิเตอร์มีระดับนัยสำคัญ P-value ระหว่าง 0.001-0.01 , - คือ พารามิเตอร์ไม่มีโมเดล

* คือ พารามิเตอร์มีระดับนัยสำคัญ P-value ระหว่าง 0.01-0.05

/ คือ พารามิเตอร์มีระดับนัยสำคัญ P-value ระหว่าง 0.05-0.1

ในบทที่ 3 ได้กล่าวถึง เครื่องมือในการคัดเลือกตัวแปรอิสระของซอฟต์แวร์ Minitab 17 ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เพื่อพิสูจน์ว่าวิธี Stepwise เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการคัดเลือกตัวแปรอิสระในงานวิจัยนี้ จึงได้ทดลองเปรียบเทียบแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นที่ได้จากการคัดเลือกตัวแปรอิสระด้วยวิธี None/Enter , Forward, Backward และ Stepwise ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.2 พบว่า เมื่อคัดเลือกโดยใช้วิธี None/Enter คือ วิธีที่เลือกตัวแปรอิสระทั้งหมด เข้าไปในแบบจำลอง ถึงแม้ว่าจะได้ค่า R^2 และ R^2_{adj} ที่มีค่าสูง แต่กลับทำให้ค่า S มีค่าที่สูงขึ้น อีกทั้งแบบจำลองนี้จะประกอบไปด้วยตัวแปรอิสระจำนวนมาก ซึ่งทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากมีตัวแปรอิสระมากเกินไปจนความจำเป็น ในส่วนของวิธี Forward, Backward และ Stepwise นั้น ได้นำแบบจำลองที่ดีที่สุด 3 แบบจำลองของการคัดเลือกแต่ละวิธีมาทำการเปรียบเทียบกัน พบว่า วิธี Backward ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด คือ มีค่า R^2 และ R^2_{adj} สูง แต่มีตัวแปรอิสระจำนวนมากในแบบจำลอง เช่นเดียวกับวิธี None/Enter ส่วนวิธี Forward และวิธี Stepwise ให้ผลลัพธ์ที่เหมือนกัน โดยมีค่า R^2 และ R^2_{adj} ที่มีค่าสูง และได้ค่า S ที่ต่ำกว่าวิธีอื่น ๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้การคัดเลือกด้วยวิธี Stepwise เป็นหลัก เนื่องจากเหมาะสำหรับการวิเคราะห์การถดถอยที่มีตัวแปรอิสระเป็นจำนวนมาก ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้เร็วกว่าวิธี Forward

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของท่อประปา

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-0.754	0.214	-3.53	0.000	
Dep	0.785	0.265	2.96	0.003	1.23
Len	0.000226	0.00002	11.47	0.000	1.95
Age	0.00801	0.0032	2.50	0.013	1.24
TIME	0.1001	0.0146	6.85	0.000	1.08
scl_scl	-0.276	0.115	-2.40	0.017	1.06
sl	-0.04011	0.00773	-5.19	0.000	1.56
A1	-0.001184	0.000472	-2.51	0.013	1.39
M3	-0.526	0.228	-2.31	0.022	1.04
W2	0.075	0.0183	4.10	0.000	1.05

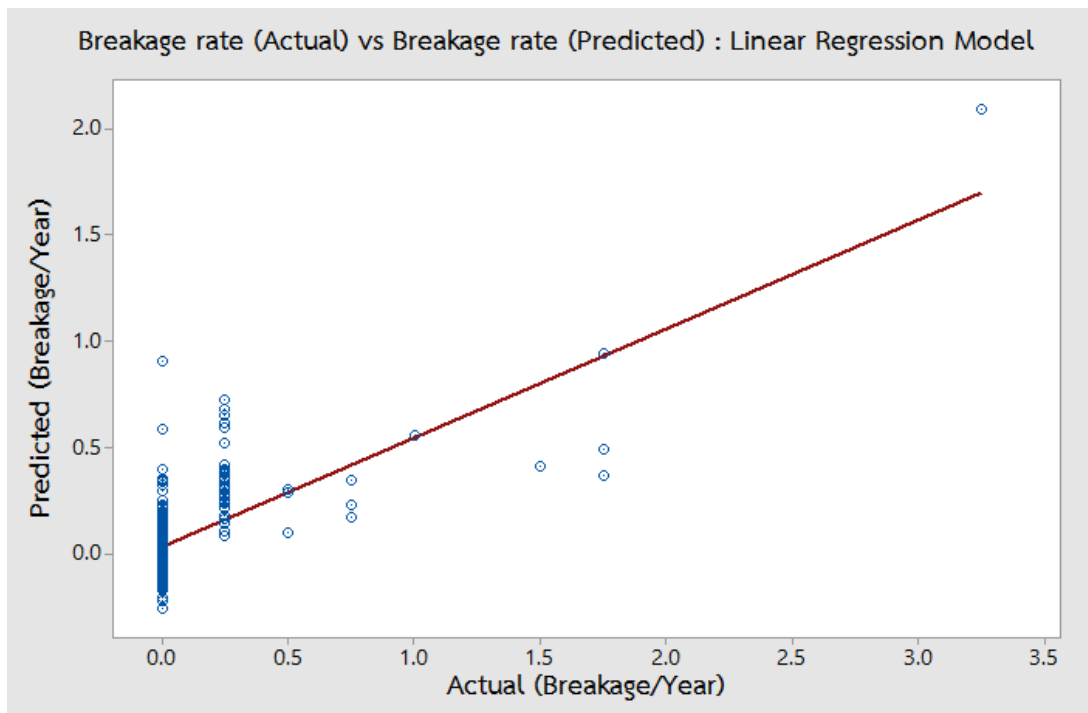
จากตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของเส้นท่อประปา จะมีค่าสำคัญที่ต้องมีการตรวจสอบ คือ VIF (Variance Inflation Factor) ที่จะช่วยตรวจสอบความสัมพันธ์กันเองระหว่างตัวแปรอิสระ ซึ่งจะมีผลต่อความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ โดยพบว่า ทุกตัวแปรมีค่า VIF อยู่ระหว่าง 1.04 -1.95 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 และน้อย

กว่า 5 ดังนั้นความแปรปรวนของค่าประมาณของค่าสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์ มีความสัมพันธ์กันระดับปานกลาง แบบจำลองนี้ จึงไม่มีปัญหาเรื่อง Multicollinearity และตัวแปรอิสระทุกตัว มีนัยสำคัญทางสถิติ

ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของเส้นท่อประปา ได้แบบจำลองที่เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) เท่ากับ 0.50 % ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดที่ปรับแล้วสำหรับตัวแปรอิสระหลายตัว (R^2_{adj}) เท่ากับ 0.49 % และมีค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (S) เท่ากับ 0.205817 สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแตกรั่วเฉลี่ยระหว่างปี 2555 ถึง 2558 ของเส้นท่อประปากับตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกรั่วด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น ดังสมการที่ (4.1) จากสมการ พบว่า ตัวแปรความลึกของท่อ (Dep) และเวลานับจากการแตกรั่วครั้งสุดท้าย (TIME) ส่งผลอย่างมากต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการแตกรั่วที่เกิดขึ้น หมายความว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรทั้ง 2 ไปหนึ่งหน่วย มีผลให้อัตราการแตกรั่วเพิ่มขึ้น เท่ากับ 0.785 และ 0.1001 ครั้งต่อปี ตามลำดับ ส่วนชนิดของดินประเภทดินร่วนเหนียวปนทราย/ดินร่วนเหนียวปนทราย (scl_scl) ดินร่วนปนทราย (sl) และพื้นที่เบ็ดเตล็ดอื่น ๆ (M3) มีผลให้อัตราการแตกรั่วของท่อประปาลดลง ส่วนตัวแปรที่เหลือส่งผลต่ออัตราการแตกรั่วของเส้นท่อน้อย

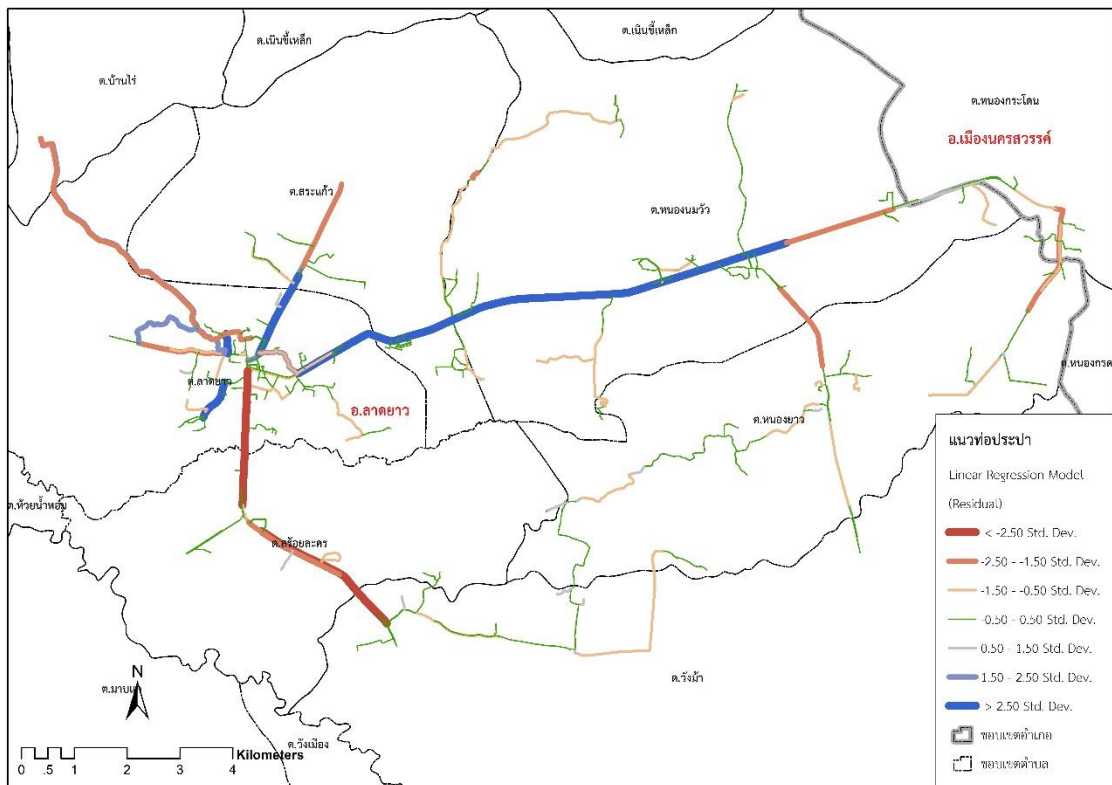
$$\begin{aligned} BrR55_58 = & -0.754 + 0.785 Dep + 0.000226 Len + 0.00801 Age + 0.1001 TIME \\ & - 0.276 scl_scl - 0.04011 sl - 0.001184 A1 - 0.526 M3 + 0.0750 W2 \end{aligned} \quad (4.1)$$

จากการเปรียบเทียบอัตราการแตกรั่วที่คาดการณ์ได้ (Predicted) กับอัตราการแตกรั่วที่เกิดขึ้นจริง (Actual) ดังรูปที่ 4.1 พบว่า เมื่อใช้แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นนั้น จะทำให้อัตราการแตกรั่วที่คาดการณ์ได้บางส่วนมีค่าติดลบ สำหรับความแม่นยำในการทำนายนั้น สามารถทำนายการแตกรั่วที่มีค่าเป็นศูนย์ (ไม่มีการแตกรั่ว) ได้ดีกว่าการทำนายการแตกรั่วที่มีค่ามากกว่าศูนย์ และความแม่นยำจะลดลง เมื่อทำนายอัตราการแตกรั่วที่มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบประปาขนาดเล็ก ปริมาณข้อมูลเส้นท่อที่แตกรั่ว จึงมีไม่มากพอสำหรับการวิเคราะห์ ดังนั้นจึงได้นำข้อมูลเส้นท่อทั้งหมดรวมถึงเส้นท่อที่ไม่มีการแตกรั่วเข้ามาใช้ในการวิเคราะห์รวมด้วย ซึ่งในอนาคตหากมีการเก็บข้อมูลสถิติการแตกรั่วในระบบประปาขนาดใหญ่ได้ครบถ้วนสมบูรณ์ จะสามารถใช้เฉพาะข้อมูลเส้นท่อที่มีการแตกรั่วเพียงอย่างเดียวในการวิเคราะห์ได้ เพื่อให้การวิเคราะห์มีความถูกต้องแม่นยำในยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบอัตราการแตกรั่วที่คาดการณ์ได้ (Predicted) กับอัตราการแตกรั่วที่เกิดขึ้นจริง (Actual) ด้วยแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น

ผลลัพธ์อีกอย่างหนึ่งที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น คือ ค่าเศษเหลือ (Residual) ที่เกิดขึ้นในแต่ละเส้นท่อ เมื่อนำค่าเศษเหลือจากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น มาแสดงในรูปแบบแผนที่ได้ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวของค่าเศษเหลือในรูปแบบเชิงพื้นที่ โดยสีแดง แสดงถึงค่าเศษเหลือเป็นลบ สีเขียว คือ ค่าเศษเหลือที่เข้าใกล้ศูนย์ และสีน้ำเงิน คือ ค่าเศษเหลือที่เป็นบวก โดยระดับความเข้มของสีและขนาดของเส้นบ่งบอกถึงมีค่ามากหรือมีค่าน้อย หากมีค่ามากและห่างจากค่าศูนย์มาก เส้นมีขนาดใหญ่และสีจะมีความเข้มสูง แสดงถึงเส้นท่อเส้นนั้นมีค่าเศษเหลือที่มีค่ามากและอยู่ห่างจากค่าศูนย์ค่อนข้างมาก บ่งชี้ว่าค่าที่คาดการณ์ได้ของท่อเส้นนั้นมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง ซึ่งจากรูปที่ 4.2 พบว่า ในแบบจำลองนี้ค่าเศษเหลือส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง -1.5 ถึง 1.5 และมีบางส่วนที่มีค่าเศษเหลือที่สูง ซึ่งจะได้นำไปวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.2 ค่าเศษเหลือ (Residual) ของเส้นท่อแต่ละเส้นในแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอยทวีกำลัง (Exponential Regression Model)

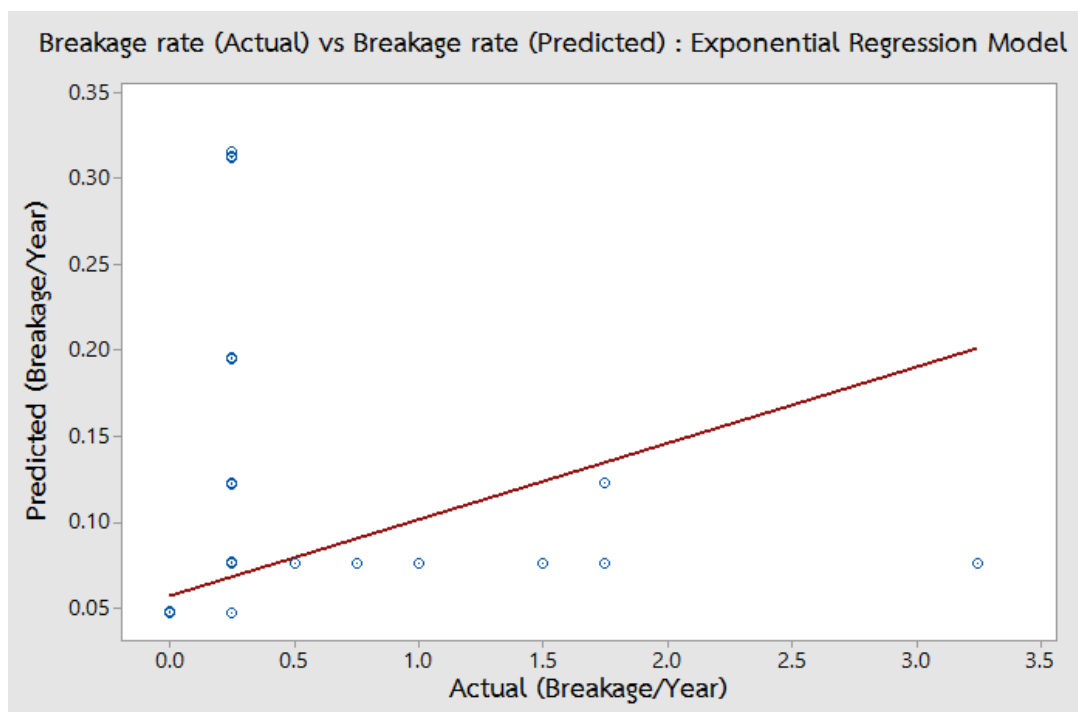
ประมวลผลโดยใช้คำสั่ง Nonlinear Regression ใน Minitab 17 ได้สมการความสัมพันธ์ที่มีค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (S) น้อยที่สุด คือ 0.279975 ดังตารางที่ 4.4 และได้สมการความสัมพันธ์ของแบบจำลองการถดถอยทวีกำลัง ดังสมการที่ (4.2) พบว่า เวลานั้นจากการแตกรั่วครั้งสุดท้าย (TIME) มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการแตกรั่ว ส่วนปีที่ทำการติดตั้ง (INSTYR) มีผลต่ออัตราการแตกรั่วน้อยมาก

$$\text{BrR55_58} = 0.510953 \cdot \text{EXP} [0.469524 \cdot \text{TIME} - 9.3 \times 10^{-5} \cdot \text{INSTYR}] \quad (4.2)$$

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์การถดถอยทวีกำลังด้วยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกรั่วของท่อประปา

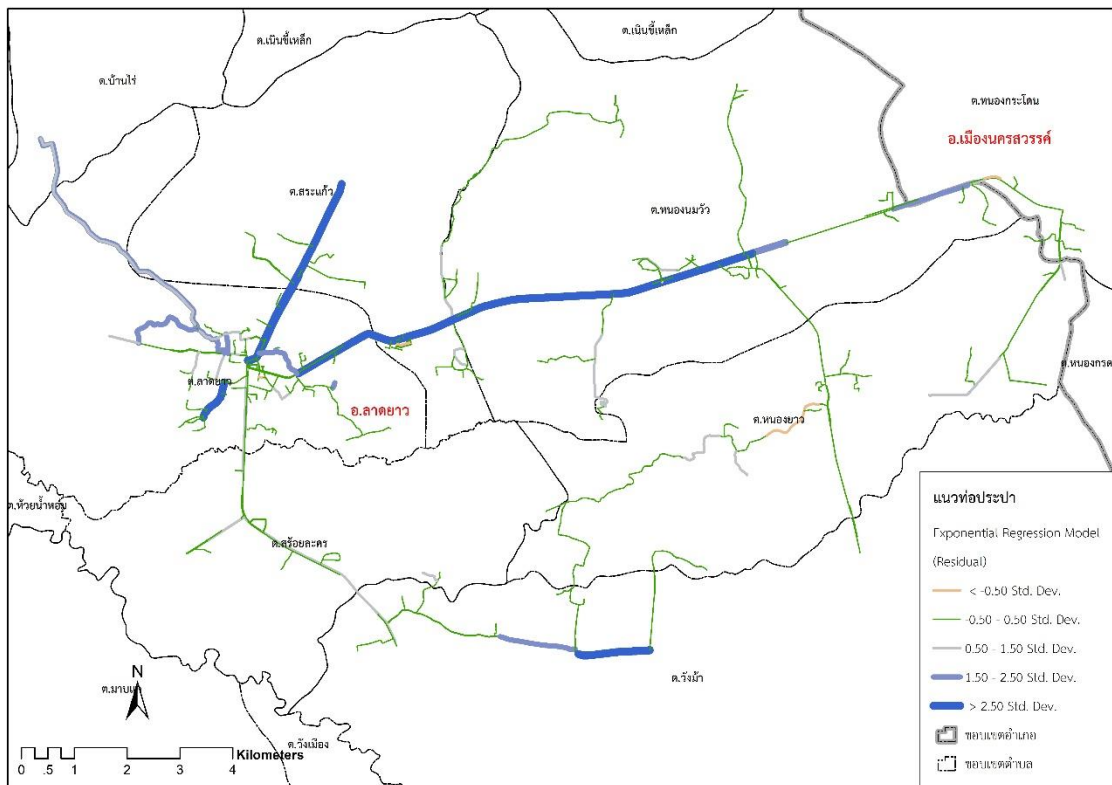
Iterations	200
Final SSE	25.0835
DFE	320
MSE	0.078386
S	0.279975

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการแตกร้าวที่คาดการณ์ได้กับอัตราการแตกร้าวจริงของแบบจำลองการถดถอยทวิกำลัง ดังรูปที่ 4.4 พบว่า แม้อัตราการแตกร้าวที่คาดการณ์ได้จะไม่มีค่าติดลบเช่นเดียวกับแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น แต่ความถูกต้องแม่นยำกลับมีน้อยกว่าวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบอัตราการแตกร้าวที่คาดการณ์ได้ (Predicted) กับอัตราการแตกร้าวที่เกิดขึ้นจริง (Actual) ด้วยแบบจำลองการถดถอยทวิกำลัง

ค่าเศษเหลือจากการวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยทวิกำลังที่ได้มานั้น นำมาแสดงในรูปแบบแผนที่ได้ดังรูปที่ 4.4 แสดงถึงการกระจายตัวของค่าเศษเหลือที่ได้ในรูปแบบเชิงพื้นที่พบว่า การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองการถดถอยทวิกำลัง จะมีค่าเศษอยู่ระหว่าง -0.50 ถึง 2.5 ค่าเศษเหลือที่มีความคลาดเคลื่อนสูงส่วนใหญ่จะมีค่าเป็นบวกแต่มีไม่มากนัก แสดงด้วยเส้นที่มีขนาดใหญ่ และมีสีน้ำเงินเข้ม



รูปที่ 4.4 ค่าเศษเหลือ (Residual) ของเส้นท่อแต่ละเส้นในแบบจำลองการถดถอยทวีกำลัง

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอยปัวส์ซอง (Poisson Regression Model)

ประมวลผลโดยใช้คำสั่ง Fit Regression Model ในซอฟต์แวร์ Minitab 17 ซึ่งจะคัดเลือกตัวแปรอิสระด้วยวิธีการเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน (Stepwise) เช่นเดียวกับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นก่อนหน้านี้ เพื่อคัดเลือกแบบจำลองคาดการณ์การแตกรั่วของท่อประปาที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยปัวส์ซอง ผลการวิเคราะห์ พบว่า จากตัวแปรอิสระทั้งหมด 40 ตัวแปร จะถูกคัดเลือกเหลือเพียง 8 ตัวแปรที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\text{-value} < 0.05$) ต่ออัตราการแตกรั่ว (BrR) ประกอบด้วย ชนิดท่อเหล็ก (GS) ท่อชนิด HDPE (HDPE) ความยาวเส้นท่อ (Len) อายุ (Age) เวลานั้นจากการแตกรั่วครั้งสุดท้าย (TIME) พื้นที่ลุ่ม (M2) สถานที่ราชการ และสถาบันต่าง ๆ (U3) และแหล่งน้ำที่สร้างขึ้น (W2) โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดที่ปรับแล้วสำหรับตัวแปรอิสระหลายตัว ($R^2\text{adj}$) จะสูงที่สุด และให้ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (S) ค่า AIC (Akaike Information Criterion) น้อยที่สุด

จากตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยปัวส์ซอง พบว่า ความแปรปรวนของค่าประมาณของค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระแต่ละตัว มีความสัมพันธ์กันระดับปานกลาง เนื่องจากมีค่า VIF อยู่ในช่วงมากกว่า 1 และน้อยกว่า 5 โดย

มีค่าอยู่ระหว่าง 1.04 และ 1.72 ดังนั้นแบบจำลองที่ได้จึงไม่มีปัญหาเรื่อง Multicollinearity และตัวแปรอิสระทุกตัวมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์การถดถอยปัวส์ของด้วยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของท่อประปา

Term	Coef	SE Coef	VIF
Constant	-6.41	1.18	
Age	0.249	0.105	1.67
TIME	0.824	0.162	1.25
HDPE	-1.513	0.967	1.72
GS	1.97	1.46	1.04
Len	0.000474	0.000078	1.14
M2	0.0557	0.0236	1.11
U3	0.0339	0.0177	1.09
W2	0.376	0.099	1.10

ผลการวิเคราะห์การถดถอยปัวส์ของของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของเส้นท่อประปา ได้แบบจำลองที่เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) เท่ากับ 0.66 ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดที่ปรับแล้วสำหรับตัวแปรอิสระหลายตัว (R^2_{adj}) เท่ากับ 0.59 มีค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (S) เท่ากับ 0.200539 และมีค่า AIC ต่ำที่สุด เท่ากับ 117.38 สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแตกรั่วเฉลี่ยระหว่างปี 2555 ถึง 2558 ของเส้นท่อประปากับตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการแตกรั่วด้วยการวิเคราะห์การถดถอยปัวส์ของ ดังสมการที่ (4.3) จากสมการ พบว่า ตัวแปรชนิดท่อ GS (GS) เวลานับจากการแตกรั่วครั้งสุดท้าย (TIME) แหล่งน้ำที่สร้างขึ้น (W2) และอายุ (Age) มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการแตกรั่วที่เกิดขึ้น หมายความว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระทั้ง 4 ไปหนึ่งหน่วย ส่งผลให้อัตราการแตกรั่วเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.970, 0.824, 0.376 และ 0.249 ตามลำดับ ส่วนท่อชนิด HDPE (HDPE) มีผลให้อัตราการแตกรั่วของท่อประปาลดลง และตัวแปรที่เหลือมีผลต่อการแตกรั่วของเส้นท่อเล็กน้อย

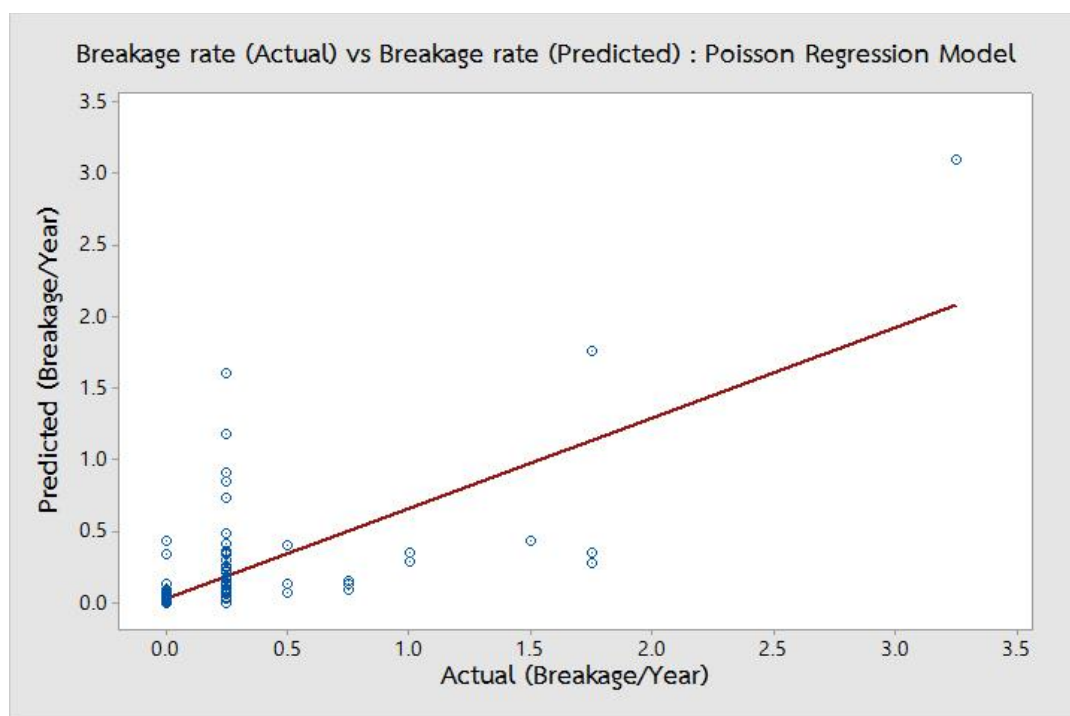
$$\text{BrR55_58} = \exp(Y')$$

$$Y' = -6.41 + 0.249 \text{ Age} + 0.824 \text{ TIME} - 1.513 \text{ HDPE} + 1.97 \text{ GS} + 0.000474 \text{ Len}$$

$$+ 0.0557 \text{ M2} + 0.0339 \text{ U3} + 0.376 \text{ W2}$$

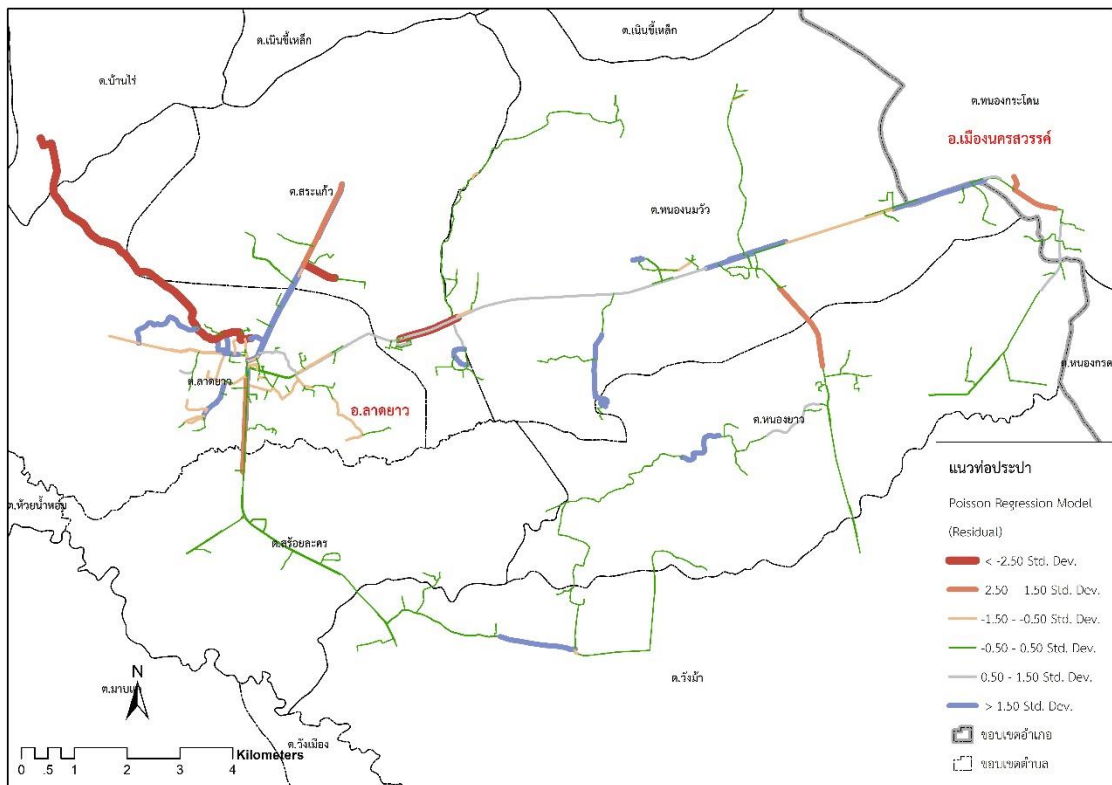
(4.3)

จากการเปรียบเทียบอัตราการแตกร้าวที่คาดการณ์ได้ (Predicted) กับอัตราการแตกร้าวที่เกิดขึ้นจริง (Actual) ดังรูปที่ 4.5 พบว่า เมื่อใช้แบบจำลองการถดถอยปัวส์ของ จำนวนการแตกร้าวที่คาดการณ์ได้ไม่มีค่าติดลบดังที่เกิดขึ้นกับในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น สำหรับความแม่นยำในการทำนายจำนวนการแตกร้าวมีลักษณะเช่นเดียวกับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น คือ การทำนายจำนวนการแตกร้าวที่เป็นศูนย์จะแม่นยำกว่าที่ไม่เป็นศูนย์ และจะแม่นยำน้อยลงเมื่อจำนวนการแตกร้าวเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบอัตราการแตกร้าวที่คาดการณ์ได้ (Predicted) กับอัตราการแตกร้าวที่เกิดขึ้นจริง (Actual) ด้วยแบบจำลองการถดถอยปัวส์ของ

ค่าเศษเหลือ (Residual) ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์การถดถอยปัวส์ของที่เกิดขึ้นในแต่ละเส้นท่อ เมื่อนำค่าเศษเหลือจากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น มาแสดงในรูปแบบแผนที่ได้ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวของค่าเศษเหลือในรูปแบบเชิงพื้นที่ พบว่า การวิเคราะห์การถดถอยปัวส์ของจะมีค่าเศษเหลืออยู่ระหว่าง -2.50 ถึง 1.50 ซึ่งค่าเศษเหลือส่วนใหญ่จะเข้าใกล้ศูนย์ และมีเพียงเล็กน้อยที่มีขนาดของค่าเศษเหลือที่มาก แสดงดังเส้นสีแดงที่มีขนาดใหญ่ดังรูป 4.6



รูปที่ 4.6 ค่าเศษเหลือ (Residual) ของเส้นท่อแต่ละเส้นในแบบจำลองการถดถอยปัวส์ซอง

4.1.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression Model)

ประมวลผลโดยใช้คำสั่ง Fit Binary Logistic Model ในซอฟต์แวร์ Minitab 17 ซึ่งจะคัดเลือกตัวแปรอิสระด้วยวิธีการเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน (Stepwise) เพื่อคัดเลือกแบบจำลองคาดการณ์การแตกรั่วของท่อประปาที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก ตัวแปรตามจะแตกต่างจากการวิเคราะห์ถดถอยด้วยวิธีอื่น ๆ ก่อนหน้านี้ โดยตัวแปรอัตราการแตกรั่ว (BrR) จะถูกแปลงเป็น 2 ค่า ได้แก่ 0 หมายถึง เส้นท่อประปาที่ไม่เกิดการแตกรั่ว และ 1 หมายถึง เส้นท่อประปาที่มีการแตกรั่ว ผลจากการวิเคราะห์และคัดเลือกตัวแปร พบว่า แบบจำลองที่มีความเหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้ที่สุดโดยให้ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดที่ปรับแล้วสำหรับตัวแปรอิสระหลายตัว (R^2_{adj}) จะสูงที่สุดและให้ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (S) ค่า AIC (Akaike Information Criterion) น้อยที่สุด ประกอบด้วย ตัวแปรอิสระทั้งหมด 6 ตัวแปร โดยแบ่งเป็นตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\text{-value} < 0.05$) ต่อเหตุการณ์การแตกรั่วของเส้นท่อประปา (Even) ประกอบด้วย ความยาวเส้นท่อ (Len) อายุ (Age) เวลารับจากการแตกรั่วครั้งสุดท้าย (TIME) ดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง (sicl) พื้นที่อุตสาหกรรม (U5) และ สิ่งปลูกสร้างอื่น ๆ (U6)

จากตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่ได้การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยโลจิสติก พบว่า ความแปรปรวนของค่าประมาณของค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระ มีความสัมพันธ์กันระดับปานกลาง เนื่องจาก มีค่า VIF อยู่ในช่วงมากกว่าหนึ่งและน้อยกว่า 5 โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1.08 และ 1.67 ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกด้วยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของท่อประปา

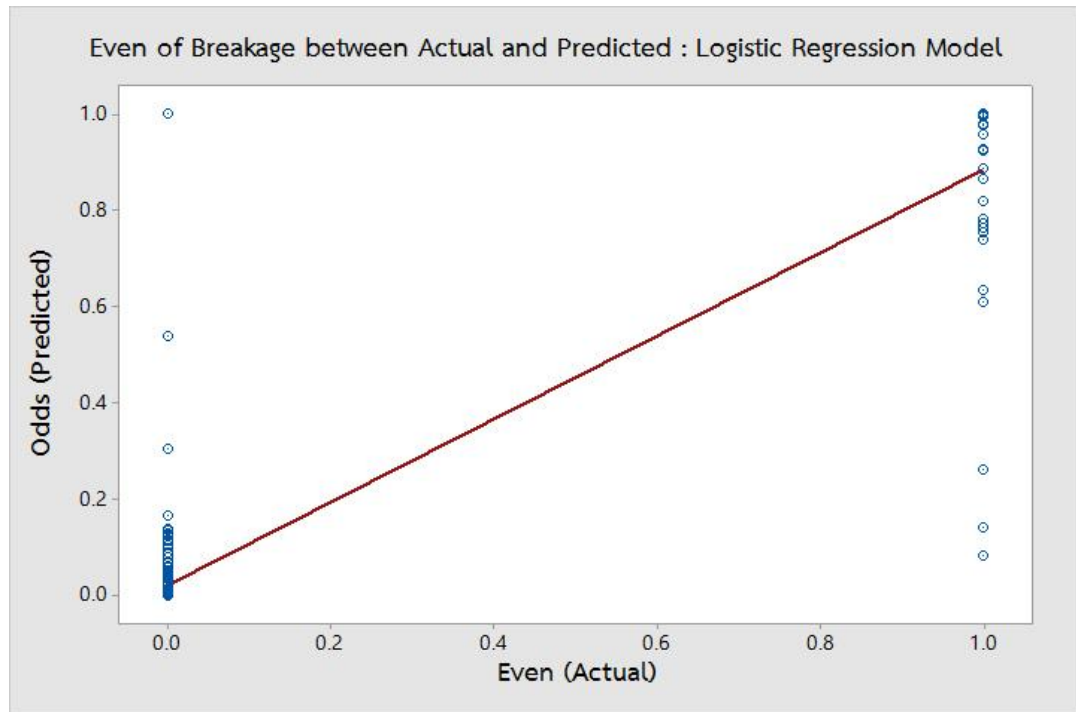
Term	Coef	SE Coef	VIF
Constant	-7.82	1.79	
Age	0.249	0.105	1.67
TIME	5.827	0.987	1.50
Len	0.001516	0.000614	1.39
sicl	0.0259	0.0123	1.57
U5	0.1508	0.0606	1.18
U6	0.1103	0.0608	1.08

ผลการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อเหตุการณ์การเกิดการแตกตัวของเส้นท่อประปา ได้แบบจำลองที่เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) เท่ากับ 0.81 สัมประสิทธิ์การกำหนดที่ปรับแล้ว สำหรับตัวแปรอิสระหลายตัว (R^2_{adj}) เท่ากับ 0.79 มีค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (S) เท่ากับ 0.118891 และมีค่า AIC ต่ำที่สุด เท่ากับ 67.13 สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างเหตุการณ์การรแตกรั่วเฉลี่ยระหว่างปี 2555 ถึง 2558 ของเส้นท่อประปากับตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกรั่วด้วยการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก ดังสมการที่ (4.4) จากสมการ พบว่า ตัวแปรที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการแตกรั่ว ได้แก่ เวลานับจากการแตกรั่วครั้งสุดท้าย (TIME) อายุ (Age) พื้นที่อุตสาหกรรม (U5) และ สิ่งปลูกสร้างอื่น ๆ (U6) โดยเมื่อตัวแปรเหล่านี้ เปลี่ยนแปลงไปหนึ่งหน่วย จะส่งผลให้มีโอกาสจะเกิดเหตุการณ์การแตกรั่วเพิ่มขึ้นเท่ากับ 5.827, 0.226, 0.1508 และ 0.1103 ตามลำดับ ส่วนตัวแปรที่เหลือมีผลต่อการแตกรั่วเล็กน้อย

$$P(1) = \exp(Y') / (1 + \exp(Y'))$$

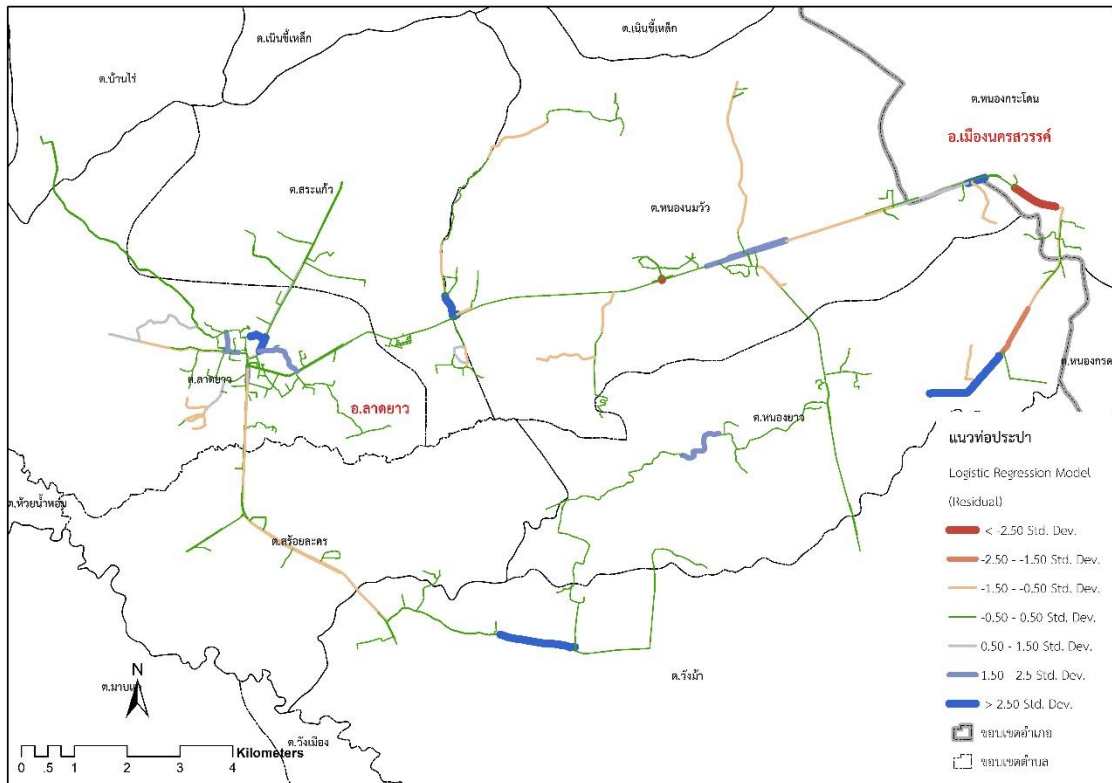
$$Y' = -7.82 + 0.226 \text{ Age} + 5.827 \text{ TIME} + 0.001516 \text{ Len} + 0.0259 \text{ sicl} + 0.1508 \text{ U5} + 0.1103 \text{ U6} \quad (4.4)$$

จากการเปรียบเทียบอัตราการแตกร้าที่คาดการณ์ได้ (Predicted) กับอัตราการแตกร้าที่เกิดขึ้นจริง (Actual) ดังรูปที่ 4.7 พบว่า แบบจำลองนี้จะแตกต่างจากแบบจำลองที่ผ่านมาที่ทำนายอัตราการแตกร้าหรือจำนวนการแตกร้า โดยแบบจำลองนี้จะเป็นการทำนายโอกาสที่จะเกิดการแตกร้าที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 พบว่า สามารถคาดการณ์โอกาสที่จะไม่เกิดเหตุการณ์การแตกร้าได้แม่นยำมากกว่าโอกาสที่จะเกิดการแตกร้า



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบโอกาสของการเกิดการแตกร้าที่คาดการณ์ได้ (Predicted) กับเหตุการณ์การเกิดการแตกร้าที่เกิดขึ้นจริง (Actual) ด้วยแบบจำลองการถดถอยโลจิสติก

ค่าเศษเหลือ (Residual) ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกที่เกิดขึ้นในแต่ละเส้นท่อ เมื่อนำค่าเศษเหลือจากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น มาแสดงในรูปแบบแผนที่ได้ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวของค่าเศษเหลือที่ได้ในรูปแบบเชิงพื้นที่ โดยเส้นสีแดง แสดงถึงค่าเศษเหลือเป็นลบ เส้นสีเขียวค่าเศษเหลือ แสดงถึงค่าเศษเหลือที่มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ส่วนเส้นสีน้ำเงิน แสดงถึงค่าเศษเหลือเป็นบวก และความเข้มของสีและขนาดของเส้น เป็นตัวบ่งบอกถึงค่าเศษเหลือมีค่ามากหรือน้อย โดยสีเข้มและขนาดใหญ่แสดงถึงค่าเศษเหลือมีค่ามาก ซึ่งพบว่า การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยโลจิสติก จะมีค่าเศษเหลืออยู่ระหว่าง -2.50 ถึง 2.50



รูปที่ 4.8 ค่า Residual ของเส้นทางแต่ละเส้นในแบบจำลองการถดถอยโลจิสติก

4.1.5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Regression Model)

ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น จะมีการจัดเตรียมตัวแปรอิสระที่จะนำมาใช้วิเคราะห์ใน Excel เพื่อให้อยู่ในรูปแบบที่สะดวกในการวิเคราะห์การถดถอย จากนั้นจะประมวลผลโดยใช้คำสั่ง Fit Regression Model ในซอฟต์แวร์ Minitab 17 โดยจะดัดแปลงวิธีสร้างตัวแปรที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมของ Bubienna และคณะ (2011) มาทำการวิเคราะห์และประมวลผล ซึ่งประกอบด้วย 7 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของระบบกปภ. สาขาลาดยาว ได้แก่ ความยาว (LN_Len) ความลึกของเส้นทาง (LN_Dep) อายุ (LN_Age) และการใช้ประโยชน์ที่ดิน (LN_Landuse) ส่วนตัวแปรขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (LN_Dia) วัสดุของเส้นทาง (LN_Mat) และแรงดันในเส้นทาง (LN_Pre) ผลการวิเคราะห์พบว่า มีทั้งหมดมี 4 ตัวแปรที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\text{-value} < 0.05$) ในแบบจำลอง ได้แก่ ความยาว (LN_Len) ความลึกของเส้นทาง (LN_Dep) อายุ (LN_Age) และการใช้ประโยชน์ที่ดิน (LN_Landuse) ส่วนตัวแปรขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (LN_Dia) วัสดุของเส้นทาง (LN_Mat) และแรงดันในเส้นทาง (LN_Pre) ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติแต่ยังคงอยู่ในแบบจำลอง

จากตารางที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่ได้รับการวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น พบว่า ความแปรปรวนของค่าประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์ มีความสัมพันธ์กันระดับปานกลาง เนื่องจาก มีค่า VIF อยู่ในช่วงมากกว่าหนึ่งและน้อยกว่า 5 โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1.04 และ 1.93

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของท่อประปา

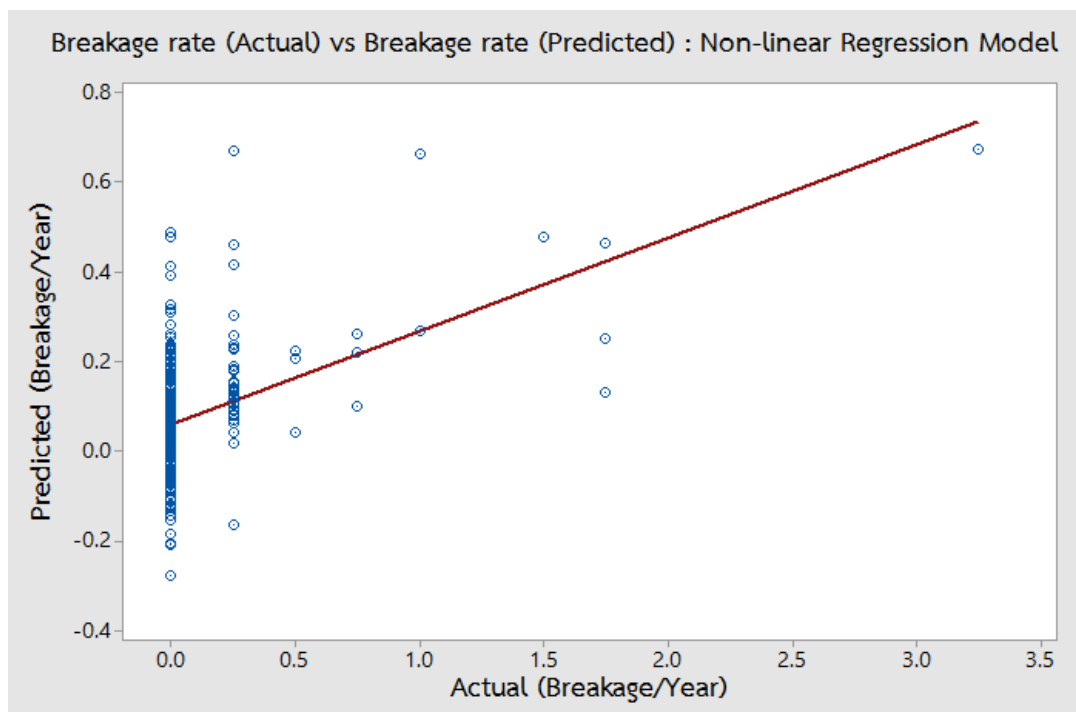
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-0.055	0.519	-0.11	0.915	
LN_Len	0.050	0.011	4.42	0.000	1.12
LN_Dia	-0.005	0.095	-0.06	0.955	1.93
LN_Dep	1.536	0.369	4.16	0.000	1.89
LN_Age	0.077	0.020	3.95	0.000	1.15
LN_Mat	0.107	0.220	0.49	0.627	1.04
LN_Landuse	-0.126	0.051	-2.49	0.013	1.20
LN_Pre	0.018	0.063	0.28	0.776	1.11

ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของเส้นท่อประปา ได้แบบจำลองที่เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) เท่ากับ 0.21 ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดที่ปรับแล้วสำหรับตัวแปรอิสระหลายตัว (R^2_{adj}) เท่ากับ 0.19 และมีค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (S) เท่ากับ 0.259412 สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแตกรั่วเฉลี่ยระหว่างปี 2555 ถึง 2558 ของเส้นท่อประปากับตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกรั่วด้วยการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังสมการที่ (4.5) จากสมการพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการแตกรั่ว ได้แก่ ความลึก (LN_Dep) ชนิดของวัสดุท่อ (LN_Mat) อายุ (LN_Age) ความยาวเส้นท่อ (LN_Len) และแรงดันภายในเส้นท่อ (LN_Pre) ส่วนตัวแปรที่มีทำให้อัตราการแตกรั่วลดลง ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นท่อ (LN_Dia) และพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน (LN_Landuse)

$$\text{BrR55_58} = -0.055 + 0.0495 \text{ LN_Len} - 0.0053 \text{ LN_Dia} + 1.536 \text{ LN_Dep} + 0.0768 \text{ LN_Age} + 0.107 \text{ LN_Mat} - 0.1260 \text{ LN_Landuse} + 0.0178 \text{ LN_Pre} \quad (4.5)$$

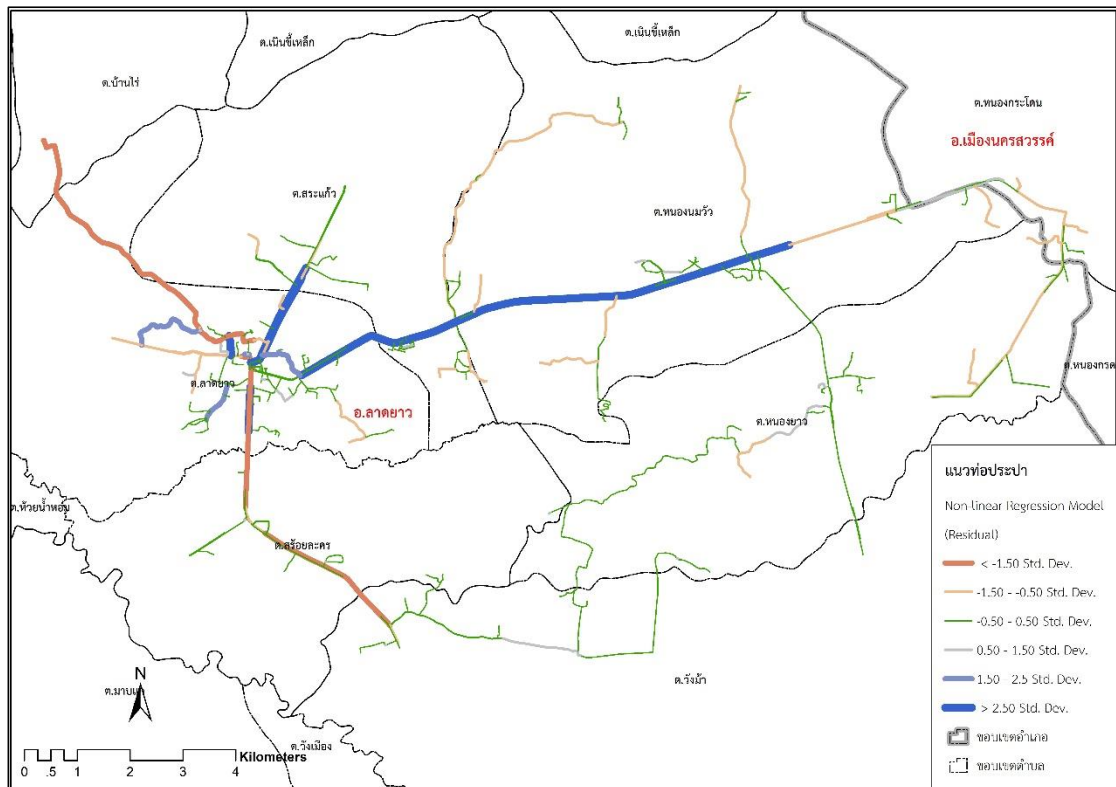
จากการเปรียบเทียบอัตราการแตกรั่วที่คาดการณ์ได้ (Predicted) กับอัตราการแตกรั่วที่เกิดขึ้นจริง (Actual) ดังรูปที่ 4.9 พบว่า เมื่อใช้แบบจำลองการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นนั้น จะ

เห็นว่า อัตราการแตกร้าวที่คาดการณ์ได้บางค่ามีค่าติดลบ มีความแม่นยำ เมื่อการแตกร้าวเป็นศูนย์ (ไม่มีการแตกร้าว) และความแม่นยำจะลดลงเมื่อทำนายค่าอัตราการแตกร้าวที่มีค่ามากขึ้น ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับแบบจำลองที่ผ่านมา



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบอัตราการแตกร้าวที่คาดการณ์ได้ (Predicted) กับอัตราการแตกร้าวที่เกิดขึ้นจริง (Actual) ด้วยแบบจำลองการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น

ค่าเศษเหลือ (Residual) ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดขึ้นในแต่ละเส้นท่อ เมื่อนำค่าเศษเหลือจากการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น มาแสดงในรูปแบบแผนที่ได้ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวของค่าเศษเหลือจากที่ได้ในรูปแบบเชิงพื้นที่โดยที่เส้นสีแดง แสดงถึงค่าเศษเหลือเป็นลบ เส้นสีขาวค่าเศษเหลือ มีค่าอยู่ระหว่าง -0.50 ถึง 0.50 ส่วนเส้นสีน้ำเงินแสดงถึงค่าเศษเหลือเป็นบวก ความเข้มของสีและขนาดของเส้น เป็นตัวบ่งบอกถึงค่าเศษเหลือมีค่ามากหรือน้อย โดยสีเข้มและมีขนาดใหญ่ แสดงถึงค่าเศษเหลือมีค่ามาก ซึ่งพบว่า การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะมีค่าเศษเหลืออยู่ระหว่าง -1.50 ถึง 2.50



รูปที่ 4.10 ค่า Residual ของเส้นท่อแต่ละเส้นในแบบจำลองการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น

4.2 ผลการเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอย

จากการทบทวนวรรณกรรมในบทที่ 2 พบว่า แบบจำลองการถดถอยปัวส์ซอง เป็นตัวแบบการถดถอยที่ใช้กันโดยทั่วไปสำหรับข้อมูลจำนวนนับ และแบบจำลองการถดถอยโลจิสติกส์ เป็นตัวแบบที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรทำนายกับความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ที่สนใจตัวแปรเกณฑ์ มักแทนด้วยค่า 0 กับ 1 ซึ่งจะพบว่า ตัวแบบตามที่ใช้วิเคราะห์ของทั้ง 2 แบบจำลองแตกต่างจากแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น แบบจำลองการถดถอยทวิกำลัง และแบบจำลองการถดถอยไม่เป็นเชิงเส้นที่มีตัวแปรตาม คือ อัตราการแตกเร็ว และจะถูกนำมาใช้สำหรับการประเมินความเสื่อมสภาพของเส้นท่อต่อไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จะไม่นำแบบจำลองถดถอยโลจิสติกส์มาเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่เหลือ ผลที่ได้มาจากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.1 จะได้ค่าสถิติสำหรับประเมินความเหมาะสมของแบบจำลอง ซึ่งจะเห็นว่าซอฟต์แวร์ Minitab 17 มีข้อจำกัดที่ไม่สามารถประเมินค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) และค่า Akaike Information Criterion (AIC) ได้ครบทุกแบบจำลอง แต่ยังสามารถใช้ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (S) บ่งบอกถึงความคลาดเคลื่อนของการคาดการณ์ได้ ผลการเปรียบเทียบที่ได้ดังตารางที่ 4.8 พบว่า แบบจำลอง

การถดถอยปัวส์ซอง ให้ค่า R^2 สูงที่สุด เท่ากับ 0.66 มีค่า S น้อยที่สุด เท่ากับ 0.118891 รองลงมา คือ แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น โดยให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.50 มีค่า S เท่ากับ 0.205817 แบบจำลอง การถดถอยไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.21 ค่า S เท่ากับ 0.259412 และแบบจำลอง การถดถอยทวิกำลัง มีค่า S เท่ากับ 0.279975

ตารางที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สมการถดถอยทั้ง 5 รูปแบบ

ค่าทางสถิติ	แบบจำลองการถดถอย			
	เชิงเส้น	ทวิกำลัง	ปัวส์ซอง	ไม่เป็นเชิงเส้น
R^2	0.50	-	0.66	0.21
S	0.205817	0.279975	0.118891	0.259412
AIC	-	-	67.13	-
$NO. Variable$	9	2	6	7

4.3 ผลตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยข้อมูลการแตกรั้วจริงปี 2559-2561

จากผลการเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองทั้ง 4 ได้แก่ แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น แบบจำลองการถดถอยทวิกำลัง แบบจำลองการถดถอยปัวส์ซอง และแบบจำลองการถดถอยไม่เป็นเชิงเส้น ในหัวข้อก่อนหน้านี้ จะนำมาทดลองใช้ในการคาดการณ์จริง โดยเป็นการคาดการณ์อัตราการแตกรั้วของ กบ.สาขาลาดยาวที่จะเกิดขึ้น ระหว่างปี 2559-2561 และทำการทดสอบความถูกต้องของการคาดการณ์ด้วยข้อมูลชุดที่ 2 ที่เตรียมไว้สำหรับการทดสอบความถูกต้อง ซึ่งทำได้โดยการหาค่าเฉลี่ยกำลังสองความคลาดเคลื่อน (Root Mean Square Error, RMSE) ผลการตรวจสอบความถูกต้องได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลการแตกรั้วจริงระหว่างปี 2559-2561

แบบจำลอง	RMSE
แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Model)	0.27555 Breaks / year
แบบจำลองการถดถอยเชิงทวิกำลัง (Exponential Regression Model)	1.18718 Breaks / year
แบบจำลองการถดถอยปัวส์ซอง (Poisson Regression Model)	1.47061 Breaks / year
แบบจำลองการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Regression Model)	0.29751 Breaks / year

จากตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยกำลังสองความคลาดเคลื่อน (RMSE) ที่ได้จากการตรวจสอบอัตราการแตกรั้วที่เกิดขึ้นจริง ระหว่างปี 2559 ถึง 2561 กับอัตราการแตกรั้วที่

คาดการณ์ของแต่ละแบบจำลอง พบว่า แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น ให้ค่า RMSE ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.27555 Break/Year ซึ่งหมายความว่าคาดการณ์ได้ค่อนข้างแม่นยำที่สุดในขณะที่แบบจำลองการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น แบบจำลองการถดถอยทวิกำลัง และแบบจำลองการถดถอยปัวส์ซอง มีค่า RMSE มากขึ้น คือ เท่ากับ 0.29751, 1.18718 และ 1.47061 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแบบจำลองการถดถอยปัวส์ซองมีการประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองได้ค่อนข้างดี เมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ แต่กลับให้ผลการคาดการณ์จริงที่มีความถูกต้องต่ำที่สุด อันเนื่องจากข้อจำกัดของตัวแบบการถดถอยปัวส์ซองที่ไม่เหมาะสมในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ตัวแปรตามมีความแปรปรวนสูงกว่าค่าเฉลี่ย (Over-dispersion) และข้อมูลตัวแปรตามที่มีค่าเท่ากับ 0 เป็นจำนวนมาก (Excess of zeros) (Poston Jr และ McKibben, 2003; Zeileis, Kleiber, และ Jackman, 2008) อ้างถึงใน (Buathong และ Pothisiri, 2017) ในงานวิจัยนี้ จะเห็นว่าตัวแปรตาม คือ จำนวนการแตกร้ว เป็นค่า 0 จำนวนมาก จึงมีปัญหาในการพยากรณ์สัดส่วนของตัวอย่างที่รายงานมีตัวแปรตามเท่ากับ 0 น้อยกว่าความเป็นจริงและทำให้ได้ค่า S (Standard error of the regression) น้อยเกินความเป็นจริง ทำให้แบบจำลองการถดถอยปัวส์ซองยังไม่ใช้ตัวแบบที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยนี้

4.4 ผลการทดลองเพื่อหาแนวทางสำหรับปรับปรุงแบบจำลองคาดการณ์การแตกร้วของเส้นท่อประปา

4.4.1 ผลการทดลองหาค่าผิดปกติโดยใช้วิธี Cook's distance, D

การหาค่าผิดปกติโดยใช้วิธี Cook's distance, D ซึ่งเป็นวิธีที่บ่งบอกถึงค่าผิดปกติหรือจุดที่มีอิทธิพลที่มีแนวโน้มที่จะบิดเบือนผลลัพธ์ที่พหุคูณ โดยใช้วิธีการ Cook's distance จะวัดอิทธิพลของจุดข้อมูลที่มีอยู่ในจุดข้อมูลอื่น ๆ รายละเอียดได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.6 ผลการหาค่าผิดปกติแล้วได้ดังตารางที่ 4.10 พบว่า แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นค่า R^2 และ R^2_{adj} มีค่าลดลง แต่ทำให้ได้ค่า SE ที่น้อยลง สำหรับแบบจำลองการถดถอยปัวส์ซองและแบบจำลองการถดถอยโลจิสติกนั้น ช่วยเพิ่มความถูกต้องของทั้งสองแบบจำลองขึ้นมาเล็กน้อย สำหรับแบบจำลองสำหรับแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นมีลักษณะเช่นเดียวกับแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น ในส่วนของแบบจำลองการถดถอยทวิกำลัง ซอฟต์แวร์ไม่สามารถคำนวณค่า Cook's distance ได้ เนื่องจากมีวิธีประมวลผลต่างกัน

ตารางที่ 4.10 ผลการปรับปรุงแบบจำลองด้วยขจัดค่าผิดปกติโดยใช้วิธี Cook' s distance, D

ชนิดแบบจำลอง		แบบจำลองเก่า	แบบจำลองใหม่ขจัดค่าผิดปกติ โดยใช้วิธี Cook' s distance, D
แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Model)	S.	0.205817	0.168303 ▲
	R ²	50.42%	30.81% ▼
	R ² (adj)	50.43%	33.58% ▼
แบบจำลองการถดถอยทวีกำลัง (Exponential Regression Model)	S.	0.279975	-
แบบจำลองการถดถอยปัวส์ซอง (Poisson Regression Model)	S.	0.200539	0.191579 ▲
	AIC.	117.38	111.67 ▲
	R ²	65.64%	67.92% ▲
	R ² (adj)	58.59%	61.72% ▲
แบบจำลองการถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression Model)	S.	0.118891	0.107137 ▲
	AIC.	67.13	63.23 ▲
	R ²	80.68%	82.08% ▲
	R ² (adj)	78.50%	79.89% ▲
แบบจำลองการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Regression Model)	S.	0.259412	0.211352 ▲
	R ²	20.73%	15.66% ▼
	R ² (adj)	18.97%	13.78% ▼

4.4.2 ผลการทดลองเพิ่มจำนวนตัวแปรข้อต่อ (Joint)

ข้อต่อ ข้องอ และสามทาง เป็นอุปกรณ์ที่มีไว้สำหรับเชื่อมต่อระหว่างเส้นท่อ เพื่อหลีกเลี่ยงอุปสรรคในพื้นที่จริง ซึ่งยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญอย่างยิ่งที่จะทำให้เกิดการแตกรั่วเนื่องจากการหลุดหรือการเกิดความเสียหายในบริเวณข้อต่อเกิดขึ้นได้ง่าย ข้อมูลจุดเชื่อมต่อของ กปภ.สาขาลาดยาวนั้น พบว่า ยังไม่มีการบันทึกรายละเอียดจำนวนข้อต่อที่ใช้ในแต่ละเส้นท่อลงในข้อมูลจุดเชื่อมต่อ ทำให้ในงานวิจัยนี้ต้องประมาณข้อต่อขึ้นมาจากจุดเชื่อมต่อของแต่ละเส้น รวมถึงจุดโค้งงอบนเส้นท่อที่มีมุมน้อยกว่าหรือเท่ากับ 90 องศา ซึ่งในสภาพหน้างานจริงนั้น มีการดัดแปลงแก้ไขตามสภาพแวดล้อมหน้างานอาจทำให้มีจำนวนการใช้ข้อต่อมากกว่าที่ประมาณเอาไว้ ซึ่งในอนาคตหากมีการจัดเก็บข้อมูลจำนวนข้อต่อไว้ใน GIS จะทำให้การวิเคราะห์นั้น มีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น ผลการเพิ่มตัวแปรจำนวนข้อต่อ (Joint) ได้ดังตารางที่ 4.11 พบว่า การเพิ่มตัวแปรจำนวนข้อต่อจะช่วยเพิ่มค่า R² ของแบบจำลองแต่กลับส่งผลให้ค่า S .แต่ละแบบจำลองมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.11 ผลการปรับปรุงแบบจำลองด้วยการเพิ่มตัวแปรจำนวนข้อต่อ (Joint)

แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Model)	S.	0.205817	0.206101 ▼
	R2	50.42%	50.44% ▲
	R2(adj)	50.43%	48.45% ▲
แบบจำลองการถดถอยทวีกำลัง (Exponential Regression Model)	S.	0.279975	0.279369 ▲
แบบจำลองการถดถอยปัวส์ซอง (Poisson Regression Model)	S.	0.200539	0.201824 ▼
	AIC.	117.38	118.93 ▼
	R2	65.64%	66.04% ▲
	R2(adj)	58.59%	58.11% ▼
แบบจำลองการถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression Model)	S.	0.118891	0.119795 ▼
	AIC.	67.13	68.56 ▼
	R2	80.68%	80.88% ▲
	R2(adj)	78.50%	78.34% ▼
แบบจำลองการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Regression Model)	S.	0.259412	0.25762 ▲
	R2	20.73%	20.07% ▼
	R2(adj)	18.97%	20.09% ▲

4.4.3 ผลการทดลองเพิ่มตัวแปรในแบบจำลองการถดถอยทวีกำลัง

เนื่องจากในหัวข้อที่ 4.1.2 ผลการเลือกคัดแบบจำลองฯ ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยทวีกำลัง (Exponential Regression Model) ที่ได้นั้นได้ทดลองทำเช่นเดียวกับวิธีของ Yamijala และคณะ (2009) ซึ่งดัดแปลงมาจาก Shamir and Howard ที่หาความสัมพันธ์ของจำนวนการแตกรื้อต่อความยาวต่อปีกับช่วงเวลาของการแตกรื้อ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ยังไม่ดีพอ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทดลองเพิ่มตัวแปรอื่น ๆ นอกเหนือตัวแปรเชิงเวลา ดังตารางที่ 4.12 ทดลองเพิ่มตัวแปร Joint, Soil, Material และ Land Use ซึ่งพบว่า ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (S) เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย

ตารางที่ 4.12 ผลการปรับปรุงแบบจำลองด้วยการเพิ่มตัวแปรในแบบจำลองการถดถอยทริกกำลัง

แบบจำลอง	ตัวแปรที่ใช้	Standard error : S
		เพิ่มตัวแปรในแบบจำลองการถดถอยเชิงทริกกำลัง
การวิเคราะห์การถดถอยทริกกำลัง (Exponential Regression Model)	TIME, INSTYR	0.279975
	TIME, INSTYR, Joint	0.279369 ▲
	TIME, INSTYR, soil	0.280413 ▼
	TIME, INSTYR, Material	0.280196 ▼
	TIME, INSTYR, LandUse,	0.278406 ▲
	TIME, INSTYR, Joint, Material	0.257696 ▲
	TIME, INSTYR, LandUse, Material	0.278789 ▲

4.5 ผลการเปรียบเทียบกับผลการประเมินความเสี่ยงของเส้นท่อที่ กปภ. ดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน

4.5.1 การประเมินความเสี่ยงของเส้นท่อด้วยเกณฑ์ของ กปภ.

เนื่องจากไม่สามารถหาข้อมูลที่ทาง กปภ. สาขาใต้ประเมินเส้นท่อที่มีความเสี่ยงสภาพได้ ดังนั้นจึงทดลองทำการประเมินเส้นท่อที่เสี่ยงสภาพจากเกณฑ์การประเมินความเสี่ยงของ กปภ. (กองภูมิสารสนเทศ สำนักเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ 2560) โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

เกณฑ์การประเมินความเสี่ยงของ กปภ. ได้แบ่งเป็น 2 ด้าน ได้แก่ ด้านโอกาสเกิดความเสียหายและด้านความรุนแรงของผลกระทบต่อธุรกิจ ซึ่งเราจะให้ความสนใจเฉพาะด้านโอกาสเกิดความเสียหาย ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้สภาพของความเสียหายของเส้นท่อ โดยแบ่งออกเป็น 7 ปัจจัย ได้แก่

ปัจจัยที่ 1 ชนิดท่อแข็ง เปราะ ไม่ยืดหยุ่น (AC)

ปัจจัยที่ 2 อายุท่อมากกว่า 10 ปี

ปัจจัยที่ 3 เป็นท่อที่มีแรงดันน้ำสูง เช่น ช่วงที่อยู่ใกล้สถานีจ่ายน้ำ สถานีเพิ่มแรงดัน หรือวางท่ออยู่ในระดับต่ำกว่าต้นทาง หรือปลายท่อค่อนข้างมาก หรือไม่มีการใช้วัสดุรองรับท่อ หรือท่อหุ้มท่ออย่างไม่เหมาะสม

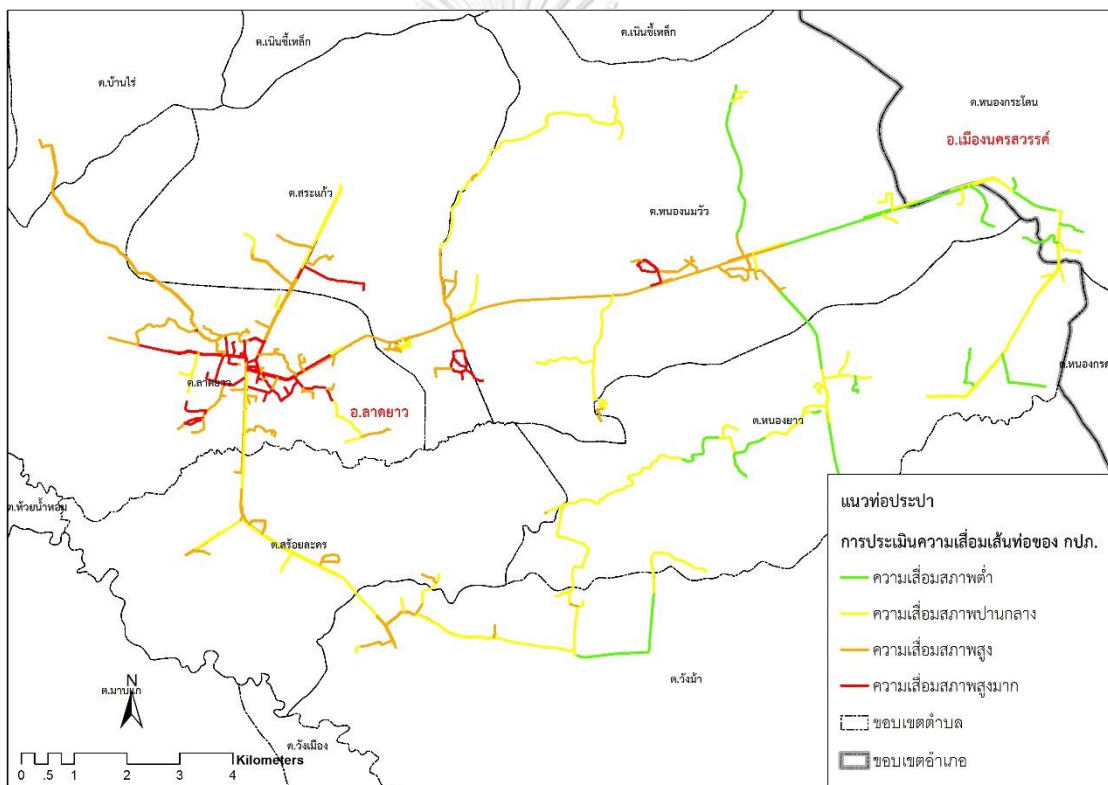
ปัจจัยที่ 4 คุณภาพการวางท่อไม่ได้มาตรฐาน เช่น เป็นท่อช่วงที่วางเบี่ยงเบนไปมาทั้งแนวราบหรือแนวตั้ง หรือวางโดยต้องใช้จำนวนข้อต่อมาก เพื่อหลีกเลี่ยงอุปสรรคในการวางท่อ หรือไม่มีการใช้วัสดุรองรับท่อ หรือท่อหุ้มท่ออย่างไม่เหมาะสม

ปัจจัยที่ 5 บริเวณที่วางท่อมีพาหนะขนาดใหญ่วิ่งผ่านประจำ หรือบริเวณที่วางท่อโดยรอบเป็นดินอ่อน

ปัจจัยที่ 6 พื้นที่เกิดภัยธรรมชาติซ้ำซากที่มีผลต่อแนวท่อประธาน เช่น แผ่นดินไหว ฯลฯ

ปัจจัยที่ 7 การกระทำจากบุคคลภายนอก เช่น การก่อสร้างสาธารณูปโภคอื่น ๆ ในพื้นที่แนวท่อ

เมื่อนำทั้ง 7 ปัจจัยมาใช้ในการประเมินความเสี่ยงของเส้นทางจากข้อมูลที่มีจากกปภ.สาขาลาดยาว พบว่ามี 4 จาก 7 ปัจจัยไม่มีการเก็บข้อมูลหรือการบันทึกไว้ในฐานข้อมูลระหว่างปี 2555 ถึง 2558 ทำให้การประเมินสามารถทำได้เพียง 3 ปัจจัย และได้แผนที่การประเมินความเสี่ยงสภาพด้วยเกณฑ์ของ กปภ. ดังรูปที่ 4.11



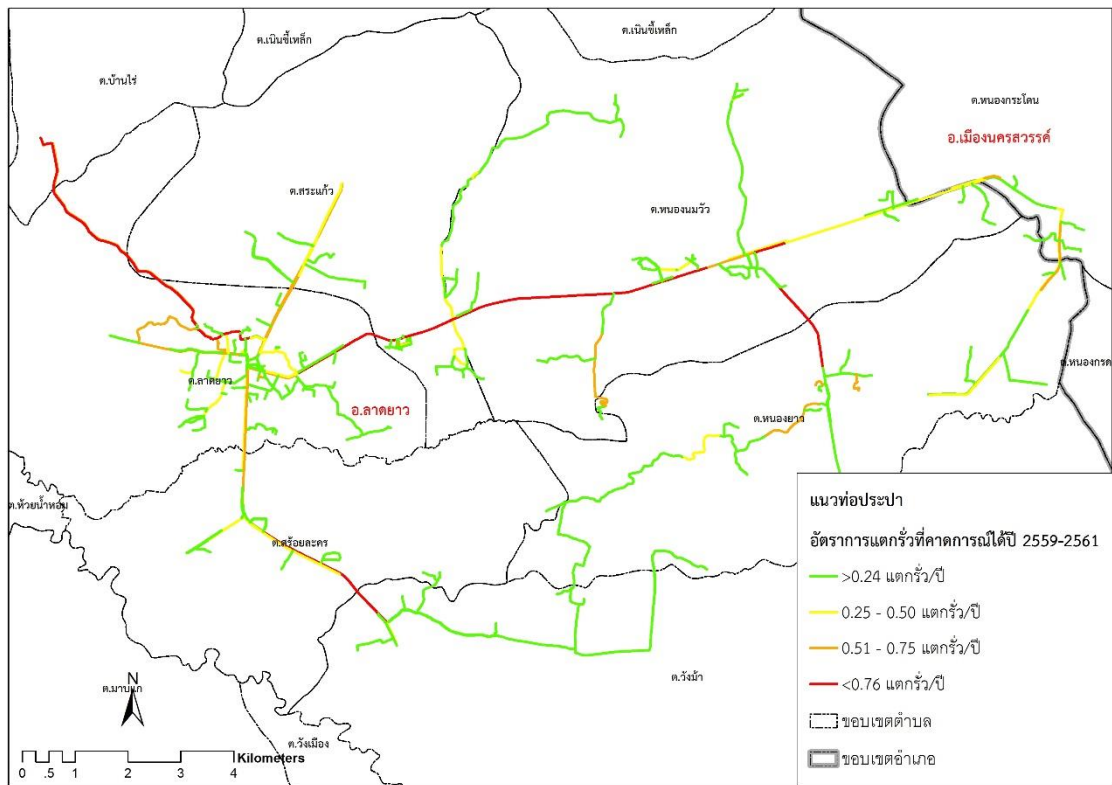
รูปที่ 4.11 การประเมินความเสี่ยงของเส้นทางด้วยวิธีการประเมินเดิมของการประปาส่วนภูมิภาค

จากรูปที่ 4.11 ได้แบ่งระดับความเสี่ยงของสภาพความเสี่ยงของเส้นทางออกไป 4 ระดับ ได้แก่ ระดับความเสี่ยงต่ำ ประกอบด้วยปัจจัยเสี่ยง 0-1 ปัจจัย ระดับความเสี่ยงปานกลาง ประกอบด้วยปัจจัยเสี่ยง 2-3 ปัจจัย ระดับความเสี่ยงสูง ประกอบด้วยปัจจัยเสี่ยง 4-5 ปัจจัย และระดับความเสี่ยงสูงมาก ประกอบด้วยปัจจัยเสี่ยง มากกว่า 5 ปัจจัยขึ้นไป เนื่องจากข้อมูลที่ใช้มีเพียง 3 ปัจจัย ดังนั้นแผนที่การประเมินนี้ยังไม่สมบูรณ์มากนัก แต่ทำให้เห็นถึงข้อจำกัดของแบบจำลองนี้ นั่น

คือ การกำหนดปัจจัยแต่ละเกณฑ์ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้ ประสบการณ์และความเข้าใจระบบของประปาอย่างดี การกำหนดให้แต่ละปัจจัยมีค่าคะแนนเท่ากันซึ่งอาจไม่ตรงกับความเป็นจริง อีกทั้งบางปัจจัยยังไม่มีระบบจัดเก็บและแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ได้ เป็นต้น

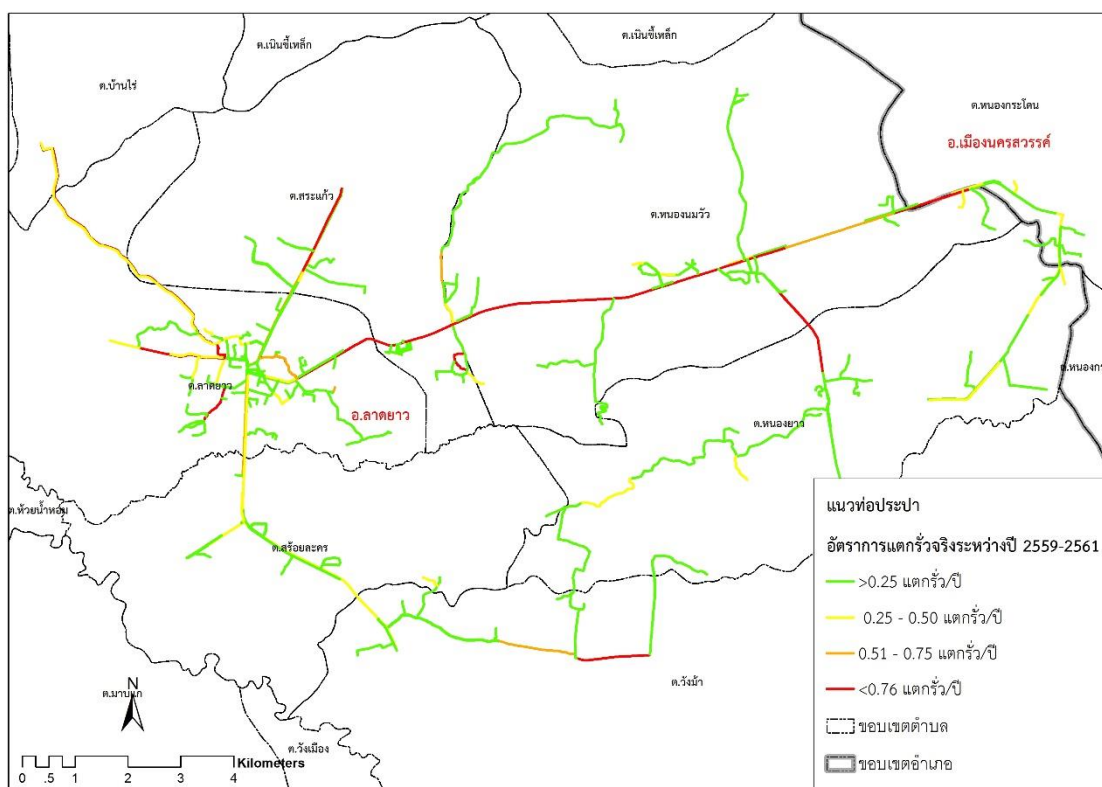
4.5.2 ประเมินความเสื่อมของเส้นท่อด้วยแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น

จากผลการเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองในหัวข้อ 4.2 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการคาดการณ์อัตราการแตกรั่วของข้อมูลชุดนี้ได้ดีที่สุดคือแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น แม้จะมีค่า R^2 ไม่มากนัก และเมื่อนำมาใช้ทดสอบกับข้อมูลอัตราการแตกรั่วจริงระหว่างปี 2559 ถึง 2561 พบว่า ให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองความคลาดเคลื่อน (RMSE) ต่ำที่สุดจากแบบจำลอง 3 แบบจำลอง ที่ได้ทดลองนำไปใช้คาดการณ์อัตราการแตกรั่วระหว่างปี 2559 ถึง 2561 หลังจากการคาดการณ์ได้จะนำมาแสดงในรูปแบบแผนภูมิที่ประเมินความเสี่ยงของเส้นท่อที่ได้จากอัตราการแตกรั่ว ดังรูปที่ 4.12 จะแสดงอัตราการแตกรั่วของแต่ละเส้นท่อที่คาดการณ์ได้จากแบบจำลองการถดถอยเวลาเชิงเส้นโดยจำแนกอัตราแตกรั่วออกเป็น 4 ระดับเท่า ๆ กัน ได้แก่ ระดับความเสื่อมสภาพต่ำ มีอัตราการแตกรั่วน้อยกว่า 0.25 ครั้งต่อปี ระดับความเสื่อมสภาพปานกลาง มีอัตราการแตกรั่วระหว่าง 0.25 – 0.50 ครั้งต่อปี ระดับความเสื่อมสภาพสูง มีอัตราการแตกรั่วระหว่าง 0.51 – 0.75 ครั้งต่อปี และระดับความเสื่อมสภาพสูงมาก มีอัตราการแตกรั่วมากกว่า 0.75 ครั้งต่อปี



รูปที่ 4.12 อัตราการแตกตัวของแต่ละเส้นท่อที่คาดการณ์ได้จากแบบจำลองการถดถอยเวลาเชิงเส้น

จากรูปที่ 4.13 แสดงอัตราการแตกตัวของแต่ละเส้นท่อที่เกิดขึ้นจริงระหว่างปี 2559-2561 ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับอัตราการคาดการณ์ด้วยแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น จะได้ดังตารางที่ 4.13 ซึ่งเปรียบเทียบจำนวนที่แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นคาดการณ์ได้ตรงกับที่เกิดอัตราการแตกจริง โดยแบ่งออกตามเกณฑ์ที่ได้แบ่งออกเป็น 4 ระดับ อีกทั้งได้คำนวณค่า RMSE ตามกลุ่มอัตราการแตกจริงที่ได้คาดการณ์ทั้ง 4 กลุ่มที่คาดการณ์ได้ถูกต้อง และค่า RMSE ที่แบบจำลองฯ ได้คาดการณ์ว่าเป็นกลุ่มอัตราการแตกจริงนั้น ๆ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองประเมินความเสื่อมสภาพของเส้นท่อประปา



รูปที่ 4.13 อัตราการแตกร้วของแต่ละเส้นท่อที่เกิดขึ้นจริงระหว่างปี 2559-2561

ตารางที่ 4.13 การประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองจากการจำแนกอัตราการแตกร้วเป็น 4 ระดับ

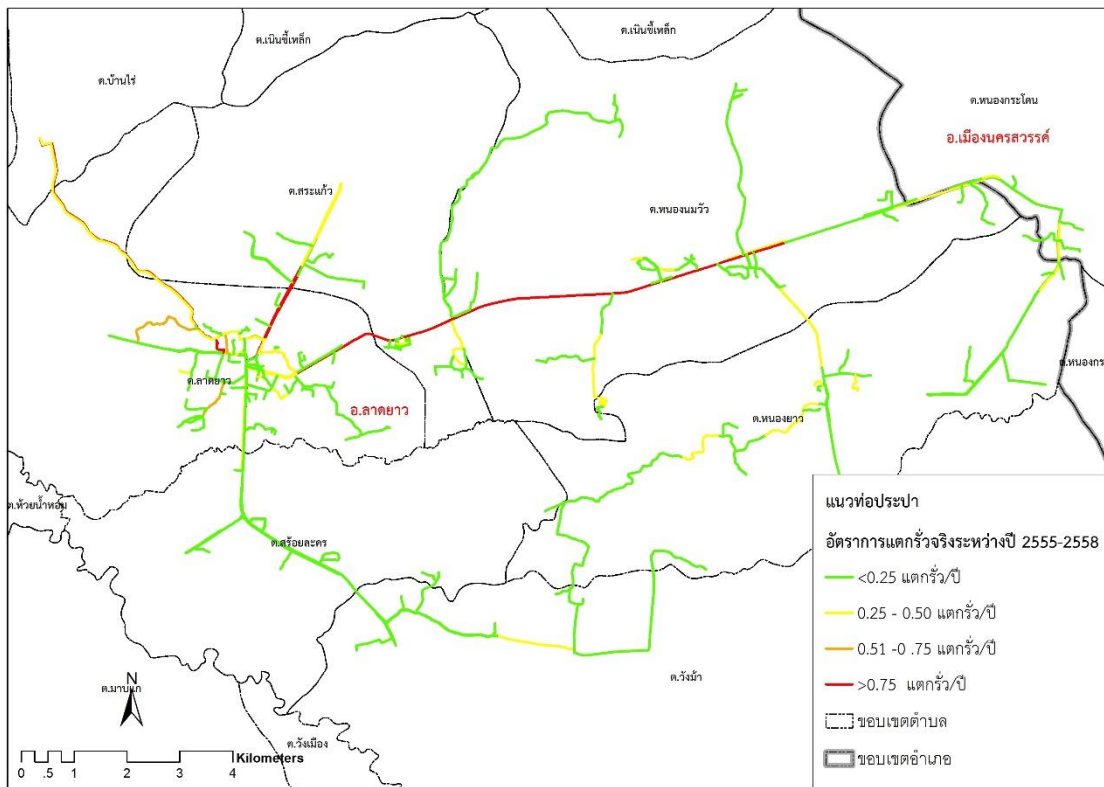
Class BrR		Actual				Row total	RMSE (ของข้อมูลที่ทำนายถูกต้อง)	RMSE (ที่แบบจำลองทำนายว่าจะเป็นกลุ่มนั้นๆ)
		≤0.25	0.26-0.50	0.51-0.75	≥0.76			
Predicted	≤0.25	242	16	2	1	262	0.0791	0.1881
	0.25-0.50	14	12	5	5	35	0.0764	0.3912
	0.51-0.75	15	1	1	3	20	0.0866	0.5456
	≥0.76	1	2	0	3	6	0.8540	0.8107
Column total		272	31	8	12	323	RMSE (ของแบบจำลอง)	
Recall(%)		88.97	38.71	12.50	25.00		0.2756	

จากตารางที่ 4.13 พบว่า อัตราการแตกร้วน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.25 ครั้ง/ปี สามารถคาดการณ์ได้ตรงกัน 242 เส้นท่อ คิดเป็นจำนวนที่ตรงกันร้อยละ 88.97 และเมื่อทดสอบความถูกต้องในการคาดการณ์ด้วยค่า RMSE เฉพาะกลุ่มที่คาดการณ์ได้ตรงกันมีค่า 0.0791 ซึ่งค่อนข้างน้อยแต่เมื่อพิจารณาภาพรวมของแบบจำลองที่คาดการณ์ว่าเป็นกลุ่มอัตราการแตกร้วน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.25 ค่า RMSE เพื่อขึ้นเป็น 0.1881 สำหรับอัตราการแตกร้วระหว่าง 0.26-0.50 คาดการณ์ได้ตรงกันจำนวน 12 เส้นท่อ คิดเป็นจำนวนที่ตรงกันร้อยละ 38.71 มีค่า RMSE เฉพาะ

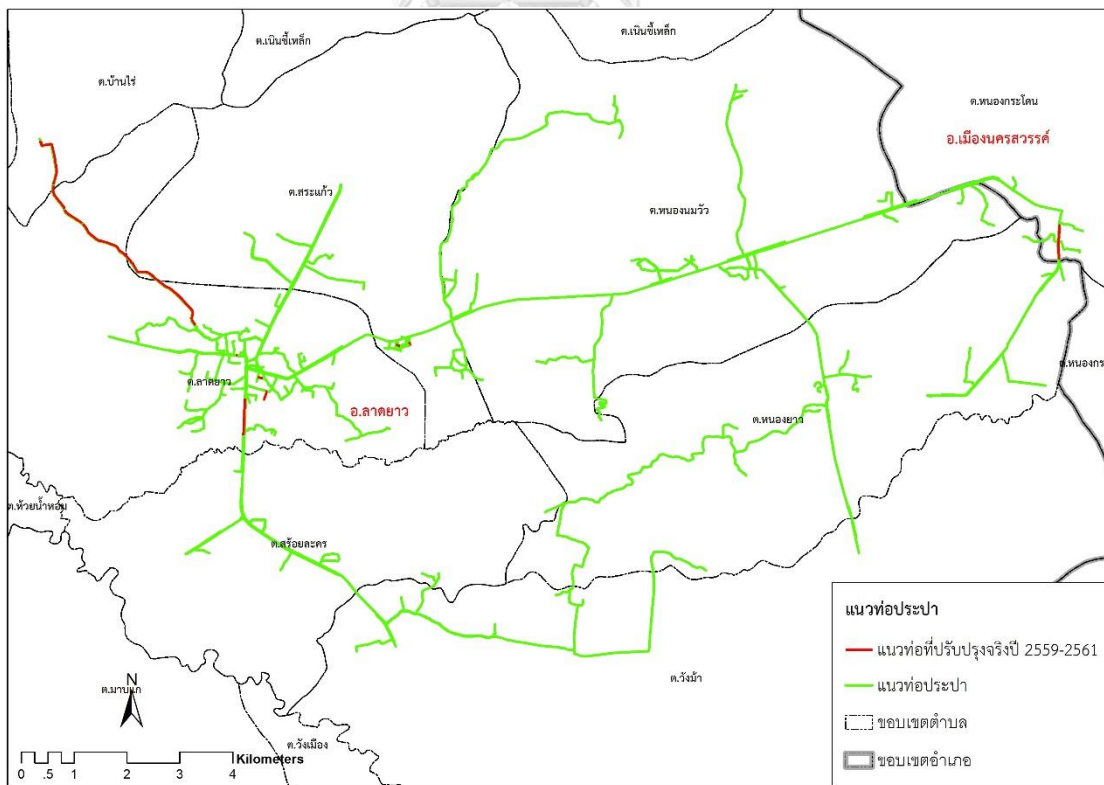
กลุ่มที่คาดการณ์ได้ตรงกันเท่ากับ 0.0764 ซึ่งพอกๆกับกลุ่มแรก แต่เมื่อพิจารณาภาพรวมของการคาดการณ์ทั้งหมด พบว่า RMSE เพื่อขึ้นเป็น 0.3912 ส่วนกลุ่มที่ 3 ทำนายได้ตรงกันเพียง 1 เส้นท่อ คิดเป็นจำนวนที่ตรงกันเพียงร้อยละ 12.50 มีค่า RMSE เฉพาะกลุ่มที่คาดการณ์ได้ตรงกันเท่ากับ 0.0866 และภาพรวมของการคาดการณ์ในกลุ่มนี้ มีค่า RMSE เพื่อขึ้นเป็น 0.5456 และกลุ่มสุดท้ายที่มีอัตราการแตกรั่วมากกว่าหรือเท่ากับ 0.76 สามารถคาดการณ์ได้ตรงกัน 3 เส้นท่อ คิดเป็นจำนวนที่ตรงกันร้อยละ 25 โดยมีค่า RMSE เฉพาะกลุ่มที่ทำนายได้ตรงกันเท่ากับ 0.8540 ซึ่งสูงที่สุดจากทั้ง 4 กลุ่มและมีค่า RMSE ภาพรวมที่คาดการณ์ในกลุ่มนี้ เท่ากับ 0.8107

4.5.3 การเปลี่ยนแปลงปรับปรุงเส้นท่อจริงระหว่างปี 2559-2561

จากรูปที่ 4.14 แสดงอัตราการแตกรั่วจริงที่เกิดขึ้นช่วงปี 2555-2558 ซึ่งหากเปรียบเทียบกับอัตราการแตกรั่วจริงปี 2559-2561 ในรูปที่ 4.13 ค่อนข้างมีความคล้ายคลึงกัน และจะเห็นได้ว่า เส้นท่อที่มีอัตราการแตกรั่วสูง ซึ่งแทนด้วยเส้นสีแดง ในปี 2555-2558 ยังคงมีอยู่เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการแตกรั่วปี 2559-2561 และจะพบว่า มีเส้นสีแดงที่แทนการแตกรั่วสูงหรือมีอัตราการแตกรั่วมากกว่าหรือเท่ากับ 0.76 เพิ่มขึ้นอีกหลายเส้นในช่วงปี 2559-2561 และหากพิจารณาในรูปที่ 4.15 ประกอบจะพบว่า การเปลี่ยนเส้นท่อในช่วงปี 2559-2561 ที่ผ่านมายังไม่ตรงกับเส้นท่อที่มีอัตราการแตกรั่วสูง ๆ เท่าที่ควร สำหรับเกณฑ์ในการเปลี่ยนเส้นท่อของ กปภ.สาขาลาดยาวนั้น อาจจะได้พิจารณาเฉพาะความเสื่อมสภาพของท่อเพียงอย่างเดียว การเปลี่ยนเส้นท่อนั้น อาจยังต้องพิจารณาในเรื่องของงบประมาณที่จำกัด อีกทั้งเปลี่ยนเส้นท่อยังถูกกำหนดด้วยปัจจัยอื่นอีกมากมาย เช่น ผลกระทบทางเศรษฐกิจ ผลกระทบต่อการบริการ และปัจจัยอื่น ๆ ดังนั้นตลอดระยะเวลา 3 ปีจะเห็นได้ว่า มีเส้นท่อที่ถูกเปลี่ยนออกไปเพียงไม่กี่เส้น ดังนั้นการเลือกเส้นท่อที่จะเปลี่ยนในแต่ละครั้งต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพและประสิทธิผลสูงสุดที่จะทำได้ ดังนั้น การนำแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นมาใช้ในการคาดการณ์อัตราการแตกรั่วเพื่อคัดเลือกเส้นท่อที่เสื่อมสภาพที่สุดออกก่อน จะช่วยลดความผิดพลาด เนื่องจากการเปลี่ยนเส้นท่อที่สภาพดีออกก่อนเวลาอันสมควร อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้วางแผนสำหรับการปรับปรุงเส้นท่อในระยะยาวของ กปภ.สาขาลาดยาวได้อย่างถูกต้องและน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.14 อัตราการแตกรั่วของแต่ละเส้นท่อที่เกิดขึ้นจริงระหว่างปี 2555-2558



รูปที่ 4.15 การปรับปรุงเส้นท่อที่เกิดขึ้นจริงในปี 2559-2561

บทที่ 5

อภิปราย สรุปผล และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการอภิปรายผลการศึกษา การสรุปผลการศึกษา ในหัวข้อต่าง ๆ ข้อจำกัด และข้อเสนอแนะในการศึกษาครั้งนี้ รวมถึงเทคนิคในการทำวิจัยที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอนาคตต่อไป

5.1 อภิปรายผลการศึกษา

จากผลการศึกษาในบทที่ 4 สามารถแบ่งหัวข้อการอภิปรายออกเป็น 3 หัวข้อดังต่อไปนี้

5.1.1 อภิปรายผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอยทั้ง 5 รูปแบบ

จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอยเชิงเส้น ตัวแปรอิสระที่นำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับอัตราการแตกรื้อทั้งหมด 40 ตัวแปร จะถูกคัดเลือกเหลือเพียง 9 ตัวแปร ที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\text{-value} < 0.05$) ต่ออัตราการแตกรื้อ ได้แก่ ความลึก (Dep) ความยาว (Len) อายุ (Age) เวลารับจากการแตกรื้อครั้งสุดท้าย (TIME) ดินร่วนเหนียวปนทราย/ดินร่วนเหนียวปนทราย (scl_scl) ดินร่วนปนทราย (sl) พื้นที่นา (A1) บ่อขุด (M3) และแหล่งน้ำที่สร้างขึ้น (W2) จะว่าหลังจากมีการปรับปรุงตัวแปรอิสระ เพื่อให้เหมาะสมกับข้อมูลที่มีของพื้นที่ศึกษานี้แล้ว พบว่าความลึกมีอิทธิพลต่อการแตกรื้อค่อนข้างสูงมาก แม้ว่าในหลายงานวิจัยไม่นิยมนำตัวแปรความลึกมาใช้ในการศึกษา เนื่องจากมีสมมุติฐานที่ว่า การวางท่อต้องเป็นไปตามมาตรฐานความลึกของการวางท่อ แต่ในความเป็นจริงพบว่า มีข้อจำกัดมากมายในพื้นที่สำหรับการวางท่อนั้น โดยเฉพาะพื้นที่เมือง อาจทำให้ไม่สามารถวางท่อให้เป็นไปตามมาตรฐานได้ เนื่องจากพื้นที่ที่จำกัดต้องมีการวางท่อใหม่ในบริเวณเดิมที่ยังมีท่อเดิมฝังอยู่ ทำให้ความลึกไม่ได้มาตรฐาน แรงกระทำจากภายนอก รวมถึงการสั่นของเส้นท่อจากแรงดัน อาจทำท่อใหม่เปียดกับท่อเดิมก่อให้เกิดการแตกรื้อได้ ซึ่งส่วนใหญ่มักไม่ได้ขุดท่อเก่าขึ้นมาเนื่องจากไม่มีงบประมาณ เป็นต้น สำหรับตัวแปรอิสระประเภทเชิงพื้นที่นั้น พบว่า เนื้อดิน (Soil Texture) ประเภทดินทราย จะช่วยลดการเกิดการแตกรื้อลง เนื่องจากทำให้ท่อสามารถเคลื่อนตัวได้อย่างอิสระในขณะที่เกิดการสั่นเหือนจากแรงดันและการไหลของน้ำในเส้นท่อ แตกต่างจากดินเหนียวที่มักเกิดการหดตัวและขยายตัวอย่างรุนแรงตามสภาพภูมิอากาศในแต่ละปี ซึ่งจะส่งผลต่อการแตกรื้อของเส้นท่อได้ สำหรับตัวแปรการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land Use) พบว่า ที่นา และพื้นที่

เหมืองแร่บ่อขุด ซึ่งไม่ถูกรบกวนจากแรงสั่นสะเทือนจากการขนส่งหรือการจราจรทำให้ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มการแตกร้าว สำหรับแหล่งน้ำที่สร้างขึ้นมา มีผลทำให้เพิ่มอัตราการแตกร้าว อาจมีสาเหตุมาจากเส้นท่อผ่านเข้าไปในพื้นที่ชุ่มน้ำ ซึ่งอาจจะมีผลต่อการทรุดตัวของดินโดยรอบแหล่งน้ำ ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ที่ไม่เท่ากันของเส้นท่อ ทำให้เกิดการแตกร้าวบริเวณจุดเชื่อมต่อได้

สำหรับผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอยทวิกำลังนั้น เน้นเฉพาะตัวแปรอิสระเชิงเวลาเท่านั้น พบว่า เวลานับจากการแตกร้าวครั้งสุดท้าย (Time Since Last Break : TIME) มีผลต่ออัตราการแตกร้าวของเส้นท่อน้อยมาก และปีที่ทำการติดตั้ง (INSTYR) มีผลต่ออัตราการแตกร่วมน้อยมาก ซึ่งค่อนข้างคล้ายคลึงกับการศึกษาที่มีมาก่อนหน้านี้

ส่วนผลการวิเคราะห์สมการถดถอยปัวส์ซองนั้น ตัวแปรที่มีนัยสำคัญทางสถิติ (P-value < 0.05) ต่ออัตราการแตกร้าว ได้แก่ ชนิดท่อเหล็ก (GS) ท่อชนิด HDPE (HDPE) ความยาวเส้นท่อ (Len) อายุ (Age) เวลานับจากการแตกร้าวครั้งสุดท้าย (TIME) พื้นที่ลุ่ม (M2) สถานที่ราชการและสถาบันต่าง ๆ (U3) และแหล่งน้ำที่สร้างขึ้น (W2) พบว่า มีตัวแปร 3 ตัวแปร ได้แก่ ความยาวเส้นท่อ (Len) อายุ (Age) เวลานับจากการแตกร้าวครั้งสุดท้าย (TIME) ซึ่งมีความสอดคล้องกับแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น

ในส่วนของผลการวิเคราะห์สมการถดถอยโลจิสติกนั้น ตัวแปรที่มีนัยสำคัญทางสถิติ (P-value < 0.05) ต่ออัตราการแตกร้าว ได้แก่ ความยาวเส้นท่อ (Len) อายุ (Age) เวลานับจากการแตกร้าวครั้งสุดท้าย (TIME) ดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง (sicl) พื้นที่อุตสาหกรรม (U5) และ สิ่งปลูกสร้างอื่น ๆ (U6) ซึ่งพบว่า ตัวแปร ความยาวเส้นท่อ (Len) อายุ (Age) เวลานับจากการแตกร้าวครั้งสุดท้าย (TIME) ซึ่งมีความสอดคล้องกับการคัดเลือกตัวแปรอิสระด้วยแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น และแบบจำลองถดถอยปัวส์ซอง นั้นอาจจะกล่าวได้ว่า ตัวแปรทั้ง 3 นี้เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลอย่างมากต่ออัตราการแตกร้าวของเส้นท่อของ กปภ.สาขาลาดยาว โดยมีตัวแปรอิสระอื่น ๆ ที่เหลือมีอิทธิพลรองลงมา ตัวแปรอิสระเหล่านั้นจะแตกต่างกันไปในแต่ละแบบจำลอง ขึ้นอยู่กับลักษณะ ของความสัมพันธ์ และระดับนัยสำคัญที่มีต่อการแตกร้าว

สำหรับผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นนั้น มีการนำตัวแปรอิสระมาใช้เพียง 7 ตัวแปรเท่านั้น ทั้งนี้ ได้มีการปรับเปลี่ยนตัวแปรอิสระ เพื่อให้เหมาะสมกับข้อมูลที่มีของพื้นที่ศึกษาเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยก่อนหน้านี้ แต่ยังคงใช้เพียง 7 ตัวแปรตามงานวิจัยของ Bublina ซึ่งค่า R^2 ที่ได้ค่อนข้างต่ำ และไม่สามารถนำค่าเศษเหลือมาใช้

เพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองได้เช่นเดียวกับการศึกษาของ Bubtiena อาจมีสาเหตุมาจากค่าเศษเหลือที่ได้นั้น มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าที่คาดการณ์ได้ อีกทั้งตัวแปรเชิงกลุ่มที่นำมาสร้างตัวแปรเชิงกลุ่มให้เป็นตัวแปรเชิงปริมาณตามลักษณะความรุนแรงของผลกระทบของการแตกร้าว ยังไม่มีความชัดเจนพอที่จะกำหนดค่าได้เหมาะสมและถูกต้องเพียงพอ

5.1.2 อภิปรายผลการทดลองปรับปรุงแบบจำลอง

จากการทดลองปรับปรุงเส้นท่อทั้งหมด 3 ประเด็น ได้แก่ ประเด็นแรกการจัดค่าผิดปกติ ด้วยวิธีทางสถิติ Cook's distance มีแนวโน้มที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองให้ดีขึ้น เนื่องจากการจัดข้อมูลที่มีความผิดปกติและห่างออกจากกลุ่มออกไป ประเด็นที่สองการเพิ่มประสิทธิภาพแบบจำลองโดยการเพิ่มตัวแปรจำนวนข้อต่อ นั้น ยังให้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากให้ค่า R^2 เพิ่มขึ้น แต่ค่า S ลดลง อาจมีสาเหตุจากความถูกต้องของการประมาณค่าจำนวนข้อต่อ อาจยังมีความผิดพลาดสูงอยู่ เนื่องจากคำนวณด้วยจำนวนข้อต่อที่คาดจะมีได้สูงที่สุด ซึ่งจะเห็นว่ามี ความแตกต่างกันระหว่างข้อต่อที่ใช้สำหรับท่อแต่ละชนิดบางชนิด เช่น HDPE ท่อขนาดยาวต่อกันด้วยการเชื่อมด้วยความร้อน อีกทั้งความแน่นหนาของท่อแต่ละชนิดก็มีความแตกต่างกัน ลักษณะของการแตกร้าวเองก็อาจจะขึ้นอยู่กับข้อต่อและไม่ใช่วิธีการได้ ดังนั้นตัวแปรข้อต่อยังไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้แบบจำลองเหล่านี้ได้ ประเด็นสุดท้าย คือ การเพิ่มตัวแปรอื่น ๆ เช่น ชนิดดิน วัสดุของท่อ การใช้ประโยชน์ที่ดิน เข้าไปในแบบจำลองการถดถอยทวิกำลัง พบว่า ส่วนใหญ่ให้ค่าเพิ่มขึ้นแต่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งแทบจะไม่มีนัยสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองทวิกำลัง

5.1.3 อภิปรายการประเมินความเสื่อมสภาพของท่อระหว่างวิธีของ กปภ.และการใช้แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น

ความแตกต่างระหว่างการประเมินความเสื่อมสภาพของท่อประปาของ กปภ. กับ การประเมินความเสื่อมสภาพจากแบบจำลองคาดการณ์การแตกร้าวของท่อประปา โดยใช้แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นเป็นแบบจำลองสำหรับการประเมิน ได้แก่ วิธีการได้มาของตัวแปรต่างกัน นั่นคือ กปภ.ใช้ประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญในการเลือกตัวแปรทั้ง 7 ส่วนแบบจำลองคาดการณ์ ๆ ได้จากการคัดเลือกตัวแปรอิสระทั้งหมด 40 ตัวแปร เหลือเพียง 9 ตัวแปรที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ประการที่สอง ตัวแปรทุกตัวแปรจะถูกให้ค่าคะแนนเท่า ๆ กัน จากนั้นนำมาคำนวณเพื่อกำหนดสภาพความเสื่อมของเส้นท่อจากคะแนนรวมทั้งหมด ส่วนแบบจำลองคาดการณ์นั้น นำตัวแปรที่ได้ไปใช้คาดการณ์

อัตราการแตกร้าวที่จะเกิดขึ้นในอนาคต และจัดกลุ่มอัตราการแตกร้าวเพื่อจัดกลุ่มความเสี่ยงของเส้นท่อ ซึ่งสามารถนำมาวัดความถูกต้องของการประเมินได้ โดยตรวจสอบกับข้อมูลอัตราการแตกร้าวที่เกิดขึ้นจริงที่ได้จัดเตรียมไว้ นั่นคือ อัตราการแตกร้าวระหว่างปี 2559-2561 โดยจะแบ่งอัตราการแตกร้าวเป็น 4 ระดับเพื่อที่จะกำหนดความเสี่ยงของเส้นท่อ พบว่า อัตราการแตกร้าวน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.25 ครั้งต่อปี มีค่า RMSE น้อยที่สุด คือ 0.1881 รองลงมา คือ อัตราการแตกร้าวระหว่าง 0.26-0.50 ครั้งต่อปี อัตราการแตกร้าวระหว่าง 0.51-0.75 และอัตราการแตกร้าวมากกว่าหรือเท่ากับ 0.76 ครั้งต่อปี โดยมีค่า RMSE เท่ากับ 0.3912, 0.5456 และ 0.8107 ตามลำดับซึ่งจะเห็นได้ว่าแบบจำลองสามารถประเมินได้แม่นยำที่อัตราการแตกร้าวต่ำ และหากพิจารณาเฉพาะค่า RMSE ของกลุ่มที่คาดการณ์ได้ตรงกัน พบว่า อัตราการแตกร้าวที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.75 ครั้งต่อปี สามารถคาดการณ์ได้ค่อนข้างแม่นยำ

5.2 สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองการคาดการณ์การแตกร้าวของเส้นท่อประปาในพื้นที่ศึกษาด้วยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกร้าวของท่อประปาโดยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย ทั้งหมด 5 รูปแบบที่แตกต่างกันนั้น ซึ่งจากผลการศึกษาในบทที่ 4 สรุปได้ว่า แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Model) สามารถนำไปใช้คาดการณ์อัตราการแตกร้าวของพื้นที่ กปภ. สาขาลาดยาวได้ดีกว่าแบบจำลองการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Regression Model) และแบบจำลองการถดถอยทวีกำลัง (Exponential Regression Model) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) เท่ากับ 0.50 และมีค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (S) เท่ากับ 0.2058 เมื่อนำไปใช้คาดการณ์อัตราการแตกร้าวเฉลี่ย ระหว่างปี 2559-2561 พบว่า แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นมีค่าเฉลี่ยกำลังสองความคลาดเคลื่อน (RMSE) ต่ำที่สุด คือ 0.2755 ครั้งต่อปี รองลงมา คือ แบบจำลองการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น และแบบจำลองถดถอยทวีกำลัง สำหรับแบบจำลองการถดถอยปัวส์ซอง (Poisson Regression Model) และแบบจำลองการถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression Model) เป็นแบบจำลองที่ไม่ได้ใช้สำหรับคาดการณ์อัตราการแตกร้าว ซึ่งแบบจำลองการถดถอยปัวส์ซอง เหมาะสำหรับตัวแปรตามที่เป็นจำนวนนับหรือใช้หาความถี่ของจำนวนที่จะเกิดการแตกร้าว ซึ่งมีข้อจำกัดที่ไม่เหมาะสมสำหรับนำไปวิเคราะห์ข้อมูลที่ตัวแปรตามมีความแปรปรวนสูงกว่าค่าเฉลี่ย (Over-dispersion) และตัวแปรตามที่มีค่าเท่ากับ 0 จำนวนมาก (Excess of zeros) เช่น ข้อมูลการแตกร้าวของงานวิจัยนี้ ทำให้แบบจำลองได้ผลการคาดการณ์ไม่ถูกต้องเท่าที่ควรจะเป็น ส่วน

แบบจำลองการถดถอยโลจิสติกเป็นประเภทตัวแบบที่ใช้หาความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ ซึ่งในการศึกษานี้ให้ความสนใจเฉพาะอัตราการแตกตัวของเส้นท่อ เพื่อจะนำไปใช้ประเมินความเสื่อมสภาพของท่อประปา เท่านั้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าด้วยลักษณะพิเศษของทั้ง 2 แบบจำลอง สามารถนำไปใช้ประโยชน์และพัฒนาต่อไปได้ในอนาคต ขึ้นอยู่กับความต้องการและวัตถุประสงค์ของการใช้งานนั้น ๆ

ในงานวิจัยนี้ ยังได้มีการทดลองนำแบบจำลองคาดการณ์การแตกตัวของเส้นท่อประปามาใช้ในการประเมินความเสื่อมสภาพของเส้นท่อของ กปภ.สาขาลาดยาว โดยได้เลือกแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นมาใช้เป็นแบบ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้องและเหมาะสมที่สุดสำหรับพื้นที่ศึกษานี้ โดยได้ประเมินความเสื่อมสภาพของเส้นท่อจากอัตราการแตกที่ทำนายได้ ระหว่างปี 2559-2561 โดยได้แบ่งระดับของความรุนแรงของเส้นท่อออกเป็น 4 ระดับ พบว่า สามารถคาดการณ์ได้แม่นยำที่สุดที่ระดับอัตราการแตกที่น้อย และจะลดลงเมื่อใช้คาดการณ์อัตราการแตกที่สูง แต่หากพิจารณาเฉพาะเส้นท่อที่สามารถคาดการณ์ได้ตรงกับอัตราการแตกจริงของปี 2559-2561 พบว่าสามารถคาดการณ์ได้ค่อนข้างแม่นยำที่ระดับอัตราการแตกที่ระหว่าง 0 - 0.75 ครั้งต่อปี และหากพิจารณาประเมินด้วยวิธีของ กปภ.แล้ว การประเมินด้วยการใช้แบบจำลองคาดการณ์การแตกสามารถใช้ตัวแปรที่อิทธิพลต่อการแตกได้หลากหลายมากกว่า ซึ่งตรงกับสภาพของความเป็นจริงของการเกิดการแตกของท่อประปา อีกทั้งยังสามารถลดปัญหาเรื่องการขาดข้อมูลบางประเภทที่ยากต่อการจัดเก็บหรือต้องใช้การตัดสินใจ โดยใช้ประสบการณ์ของเจ้าหน้าที่หน่วยงาน ในอนาคตหากมีการเก็บข้อมูลให้มีความถูกต้องและครบถ้วนสมบูรณ์มากพอ และมีการพัฒนาโดยใช้แบบจำลองที่มีซับซ้อนมากขึ้น จะยิ่งช่วยให้การประเมินประจวบความเสื่อมสภาพของเส้นท่อมีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยซึ่งให้ผลที่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนด แต่เพื่อให้แบบจำลองคาดการณ์การแตกตัวของเส้นท่อประปามีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะ เพื่อให้การดำเนินการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในอนาคต ดังนี้

1. ควรมีการขยายผลการทดลองต่อเนื่อง โดยการทดลองคาดการณ์การแตกไว้ในปีต่อ ๆ ไป เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์ในครั้งนี้

2. ควรมีการทดสอบกับพื้นที่ที่ใหญ่ขึ้น หรือทดสอบกับระบบโครงข่ายการประปาที่ใหญ่ขึ้น เพื่อให้ทราบถึงข้อจำกัดของแบบจำลอง และความสามารถในการนำไปใช้งานกับพื้นที่ที่มีความแตกต่างกัน

3. ในอนาคตการประปาส่วนภูมิภาคมีการเก็บข้อมูลตัวแปรอื่น ๆ เช่น ประวัติของลักษณะการแตกรั่ว สาเหตุการแตกรั่ว แผนที่แรงดันที่มีความถูกต้องสมบูรณ์ทั้งระบบ สามารถนำมาใช้วิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความถูกต้องได้



บรรณานุกรม

ภาษาไทย

- การประปาส่วนภูมิภาค. (2552). คู่มือระบบน้ำสูญเสียการประปาส่วนภูมิภาค 2552. ม.ป.ท.
- การประปาส่วนภูมิภาค. (2559). รายงานประจำปี 2559. ม.ป.ท.
- จิราวัลย์ จิตรถเวช. (2558). การวิเคราะห์การถดถอย. กรุงเทพฯ: สำนักงานกิจการโรงพิมพ์ องค์การส่งเสริมการค้าผ่านศึก.
- ประเสริฐ เรือนนระการ. (2560). ตัวแบบเชิงเส้นทั่วไป. มหาสารคาม: ตักสิลาการพิมพ์.
- ปรัชญา พลพัฒน์. (2560). คู่มือวิเคราะห์และจัดการข้อมูลสถิติด้วย Minitab ฉบับมืออาชีพ. นนทบุรี: ไอทีซี พรีเมียร์.
- ศิริชัย กาญจนวาสี. (2554). การวิเคราะห์พหุระดับ. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำราญ มีแจ้ง. (2557). สถิติขั้นสูงสำหรับการวิจัยทฤษฎีและปฏิบัติ. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Bendel, R. B., & Afifi, A. A. (1977). Comparison of stopping rules in forward “stepwise” regression. *Journal of the American Statistical Association*, 72(357), 46-53.
- Berk, K. N. (1978). Comparing subset regression procedures. *Technometrics*, 20(1), 1-6.
- Buathong, T., & Pothisiri, W. (2017). Fertility modeling in low fertility of Thai society. *Journal of Social Sciences Naresuan University*, 13, 217-240.
- Bubtiena, A. M., ElShafie, A. H., & Jaafar, O. (2011). Performance improvement for pipe breakage prediction modeling using regression method. *International Journal of Physical Sciences*, 6(25), 6025-6035.
- Clark, R. M., Stafford, C. L., & Goodrich, J. A. (1982). Water distribution systems: a spatial and cost evaluation. *Journal of the Water Resources Planning & Management Division, ASCE*, 108(WR3), 243-256.
- Cortez, H. (2015). *A Risk Analysis Model for the Maintenance and Rehabilitation of Pipes in a Water Distribution System: A Statistical Approach*. (Master's thesis, California Polytechnic State University).

- Cox, D. R. (1972). Regression models and life-tables. *Royal Statistical Society: Series B*, 34(2), 187-202.
- Devera, J. C. (2013). *Risk assessment model for pipe rehabilitation and replacement in a water distribution system*. (Master's thesis, California Polytechnic State University).
- Doleac, M., Lackey, S., & Bratton, G. (1980). Prediction of time-to failure for buried cast iron pipe. *Proceedings of American water works association annual conference*, 21-28.
- Draper, N. R., & Smith, H. (2014). *Applied regression analysis* (Vol. 326): John Wiley & Sons.
- Efroymson, M. A. (1960). Multiple Regression Analysis: Mathematical Methods for Digital Computers. *New York: Wiley*, 191-203.
- Kennedy, W. J., & Bancroft, T. A. (1971). Model building for prediction in regression based upon repeated significance tests. *The Annals of Mathematical Statistics*, 42(4), 1273-1284.
- Kettler, A., & Goulter, I. (1985). An analysis of pipe breakage in urban water distribution networks. *Canadian journal of civil engineering*, 12(2), 286-293.
- Kleiner, Y., & Rajani, B. (2001). Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models. *Urban Water*, 3(3), 131-150.
- Kleiner, Y., & Rajani, B. (2010). I-WARP: Individual Water mAin Renewal Planner. *Drinking Water Engineering and Science*, 3(1), 71-77.
- Mavin, K. (1996). *Predicting the failure performance of individual water mains*. n.p.: Urban Water Research Association of Australia.
- McMullen, F. G. (1982). Process for wastewater treatment and wastewater sludge conversion into energy. *U.S. Patent*, 321(4), 151.
- Rossum, J. R. (1969). Prediction of pitting rates in ferrous metals from soil parameters. *American Water Works Association*, 61(6), 305-310.
- Scheidegger, A., Leitao, J. P., & Scholten, L. (2015). Statistical failure models for water distribution pipes - A review from a unified perspective. *Water Res*, 83, 237-247.
- Shamir, U., & Howard, C. D. (1979). An analytic approach to scheduling pipe replacement. *American Water Works Association*, 71(5), 248-258.

Yamijala, S., Guikema, S. D., & Brumbelow, K. (2009). Statistical models for the analysis of water distribution system pipe break data. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(2), 282-293.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายอรรถพล มาลาพร
วัน เดือน ปี เกิด	9 มกราคม 2530
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2552 วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ภูมิศาสตร์) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พ.ศ. 2559 รัฐศาสตรบัณฑิต (ทฤษฎีและเทคนิคทางรัฐศาสตร์) สาขาวิชา รัฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
ผลงานตีพิมพ์	อรรถพล มาลาพร และ ชรินทร์ ทินนโชติ (2561) "การศึกษาแบบจำลอง คาดการณ์การแพร่ระบาดของท่อประปา โดยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย : กรณีศึกษาการประปาส่วนภูมิภาคสาขาลาดยาว", การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23