

การศึกษาแบบจำลองทำนายขนาดหลุมอุบัติเหตุท่อส่งก๊าซธรรมชาติระเบิด



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study on Predictive Models of Crater by Buried NG Pipeline
Explosion Accidents

Tamon Suttasri
Suphasan Tatami



A THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

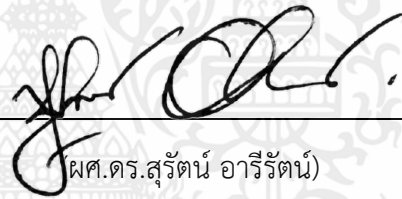
ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การศึกษาแบบจำลองทำนายขนาดหลุมอุกบาตที่เหตุท่อส่ง
ก๊าซธรรมชาติระเบิด

โดย ธมน สุทศศรี
ศุภสัณห์ ตาตะมิ

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์



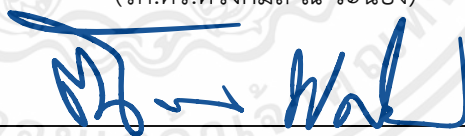
ประธานกรรมการ

(ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์)



กรรมการ

(รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง)



กรรมการ

(ผศ.ดร.ณัฐนนท์ ไพบูลย์ศิลป์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาแบบจำลองทำนายขนาดหลุมอุบัตินเหตุท่อส่ง ก๊าซธรรมชาติระเบิด
โดย	ธมน สุทศศรี ศุภสัณห์ ตาตะมิ
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ถูกจัดทำขึ้นมาโดยมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาขอบเขตการเกิดหลุมระเบิดจากการระเบิดของกลุ่มก๊าซ (VCEs) จากท่อส่งก๊าซธรรมชาติและปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดของหลุมระเบิด โดยการพัฒนาโมเดลที่ใช้ในการทำนายขนาดความกว้างหลุมของระเบิดขึ้นมา เพื่อให้ได้ค่าความกว้างที่ใกล้เคียงกับหลุมจริงมากที่สุดและลดความเสียหายที่เกิดจากการระเบิดของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ โมเดลที่สร้างมานั้นมีค่าความผิดพลาดที่คลาดเคลื่อนจากหลุมจริงประมาณ 20-23% ซึ่งดีกว่าแบบจำลองการทำนายจากเหตุการณ์อุบัติเหตุในอดีต ซึ่งเป็นโมเดลเดิมที่ความผิดพลาด 38-40 % ของเหตุการณ์ที่นำมาศึกษา ดังนั้นผลงานวิจัยในครั้งนี้สามารถสร้างโมเดลที่ใช้ในการทำนายหลุมระเบิดได้ดีกว่าแบบจำลองเดิม และพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความกว้างหลุมระเบิดมากที่สุดนั้นคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อส่งก๊าซที่มีค่าสัมประสิทธิ์ถึง 0.36 ในลำดับถัดมาคือความลึกของหลุมที่ใช้ในการฝังท่อส่งก๊าซธรรมชาติที่มีค่าสัมประสิทธิ์ -0.30 รองลงมาคือความดันที่ใช้ในการดำเนินการที่มีค่าสัมประสิทธิ์คือ -0.02 และในปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดหลุมระเบิดน้อยที่สุดคือค่าความหนาแน่นของดินที่สัมพันธ์กับลักษณะทางภูมิศาสตร์มีค่าสัมประสิทธิ์เพียง -0.003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title	Study on Predictive Models of Crater by Buried NG Pipeline Explosion Accidents
By	Mr. Tamon Suttasri Mr. Suphasan Tatami
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2022
Advisor	Asst. Prof. Dr. Surat Areerat

Abstract

This special project was conducted with the aim of studying the scope of blast craters caused by detonation of Vapor Cloud Explosions (VCEs) from natural gas pipelines and studying the factors that affects the size of the blast craters in terms of width and depth. A model was developed to predict the width of blast craters, in order to obtain the closest estimate of the actual blast crater size and reduce the damage caused by detonation of natural gas pipelines. The developed model had an error rate of approximately 20-23% compared to the actual blast crater size, which was better than the predictive model based on past accident events, which had an error range of 38-40% for the studied events. Therefore, this research work was able to create a predictive model of blast craters that was better than the previous model and found that the most significant factors affecting the width of blast craters were the diameter of the natural gas pipeline, which had a coefficient of up to 0.36. The next factor was the depth of the crater, which had a coefficient of -0.3. The least significant factors affecting the size of the blast craters were the operational factors, which had a coefficient of -0.02, and the density of the soil, which related to geographical area had a coefficient of only -0.003.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้จัดทำสำเร็จลุล่วงได้โดยได้รับความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษา
โครงการ ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์ ที่คอยให้คำแนะนำและช่วยเหลือ ในการแก้ไขปัญหาข้อบกพร่อง
ต่างๆ ตลอดจนให้ความรู้ และประสบการณ์ในขณะที่ทำโครงการ

ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ และบุคลากรประจำภาคภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้และคำปรึกษา
มาตลอดในระยะเวลาที่ได้ทำการศึกษา รวมถึงการให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการนี้

ขอขอบคุณ ดร.ศุภกร อัจฉริยวุฒิ ผู้จัดการ แผนกตรวจสอบภายใน บริษัท ปตท จำกัด
(มหาชน) ที่ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการให้ความรู้และข้อมูลที่เป็นในการใช้วิเคราะห์

สุดท้ายนี้หากปริญญาานิพนธ์เล่มนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ทางผู้จัดทำต้องขอภัยเป็น
อย่างสูงและน้อมรับความผิดพลาดมา ณ ที่นี้ด้วยครับ

ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	II
Abstract.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	10
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	10
1.2 วัตถุประสงค์.....	11
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	11
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	11
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.1 อุบัติเหตุของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ.....	12
2.1.1 สาเหตุของความผิดพลาดของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ.....	12
2.1.2 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ.....	14
2.1.2.1 การระเบิดของกลุ่มก๊าซธรรมชาติ (Vapor cloud explosion).....	15
2.1.2.2 เปลวไฟแบบลำจรวด (Jet fire).....	15
2.1.2.3 เปลววาบไฟ (Flash fire).....	16
2.2 การเกิดหลุมระเบิด.....	16
2.2.1 สาเหตุและพลังงานที่เกี่ยวข้อง [13,14].....	17
2.2.2 คลื่นกระแทก (Shock wave).....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 ผลกระทบความเสียหายแบบต่อเนื่อง (Damage by domino effect) [13]	18
2.3 สมการทำนายการก่อตัวของหลุมระเบิด.....	18
2.3.1 แบบจำลองการทำนายจากเหตุการณ์อุบัติเหตุในอดีต (Accident-based model) [15].....	18
2.3.2 แบบจำลองการทำนายหลุมระเบิด (NTS modified model).....	19
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
2.4.1 การทำนายการเกิดหลุมระเบิดจากอุบัติเหตุของระบบท่อแรงดันน้ำหลักโดยเทียบกับเหตุการณ์การระเบิดใต้ดิน [15].....	19
2.4.2 ศึกษาผลกระทบจากการระเบิดแบบต่อเนื่องของท่อขนส่งคูขนานใต้ดิน โดยการวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองหลุมระเบิดจากท่อขนส่งและแบบจำลองจากเหตุการณ์อุบัติเหตุในอดีต [16]	20
2.4.3 รายงานที่ 11 เกี่ยวกับกลุ่มข้อมูลเหตุการณ์อุบัติเหตุท่อส่งก๊าซของทวีปยุโรป ในช่วงปี 1970-2019 [3]	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	21
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	21
3.2 ข้อมูลอุบัติเหตุของท่อส่งก๊าซธรรมชาติที่เกิดขึ้น	22
3.2.1 ข้อมูลพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซธรรมชาติและขนาดของหลุมระเบิด	22
3.3 เลือกแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายขนาดของหลุม	24
3.3.1 แบบจำลองการทำนายจากเหตุการณ์อุบัติเหตุในอดีต (Accident-based model) [15].....	24
3.3.2 แบบจำลองการทำนายหลุมระเบิด (NTS modified model).....	24
3.4 ทำนายขนาดหลุมระเบิดและเปรียบเทียบกับเหตุการณ์จริงในอดีต	24
3.5 ศึกษาอิทธิพลที่ส่งผลต่อขนาดของหลุมระเบิด	24
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	25
บทที่ 5 สรุปผล.....	27
5.1 สรุปผล.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ	27
บรรณานุกรม.....	29
ภาคผนวก.....	32



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงแรงดันเหนือแรงดันบรรยากาศต่อความเสียหายของสิ่งปลูกสร้าง [7].....	17
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซธรรมชาติและขนาดของหลุมระเบิด [16]	22



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 ความถี่ของสาเหตุในการเกิดอุบัติเหตุของท่อส่งก๊าซ [3]	12
รูปที่ 2.2 ความถี่ของสาเหตุในการเกิดความผิดพลาดของท่อส่งก๊าซปี 2010-2019 [3]	13
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการแผนภาพลำดับเหตุการณ์ต้นไม้สำหรับการรั่วไหลของก๊าซ [10]	14
รูปที่ 2.4 คุณลักษณะที่สำคัญของการเกิดหลุมระเบิด	16
รูปที่ 4.1 Accident-base model	25
รูปที่ 4.2 NTS midified model	25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ท่อส่งก๊าซธรรมชาติเป็นวิธีการขนส่งก๊าซที่มีประสิทธิภาพและความปลอดภัยที่สูงตามมาตรฐานสากล เป็นโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญในการดำเนินธุรกิจก๊าซธรรมชาติ ซึ่งจากข้อมูลในปี 2561 ประเทศไทยมีการสร้างโครงข่ายระบบการขนส่งก๊าซธรรมชาติความยาวรวม 4,255 กิโลเมตร ประกอบด้วยท่อนบก 2,122 กิโลเมตร และในทะเล 2,133 กิโลเมตร [1,2] หากแต่ท่อส่งก๊าซธรรมชาติที่มีการฝังดินเพื่อไม่ให้ขัดขวางการจราจรและความยาวท่อที่มากจึงยากต่อการตรวจสอบ อีกทั้งท่อส่งก๊าซมีโอกาสได้รับความเสียหายจากความผิดพลาดของการควบคุมระบบและสิ่งแวดล้อมรอบตัว เช่น การกัดกร่อน การเคลื่อนตัวของดิน แรงกระทำจากภายใน แรงกระทำจากภายนอก และอื่นๆ เป็นต้น [3] ซึ่งอาจนำไปสู่การแตกหักของท่อและการระเบิดของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ โดยการระเบิดที่เกิดขึ้นจะก่อให้เกิดหลุมระเบิดขึ้น และสามารถนำไปสู่การเกิดความเสียหายแบบต่อเนื่องได้ หากมีท่ออยู่ใกล้กับแหล่งเกิดการระเบิด

การแตกหักของท่อส่งก๊าซธรรมชาติดีโอกาสนำไปสู่เหตุการณ์ที่ผลลัพธ์ได้แก่ การระเบิดของกลุ่มก๊าซ เปลวไฟแบบลำจรวด และวาบไฟ [1,4] อุบัติเหตุการระเบิดของท่อส่งก๊าซธรรมชาติจากการระเบิดของกลุ่มก๊าซ นำไปสู่การปลดปล่อยพลังงานอย่างทันทีทันใด สามารถแบ่งการระเบิดได้สองรูปแบบ คือ การระเบิดทางกลและการระเบิดทางเคมี [5] ในรูปแบบของการระเบิดทางกลเกิดจากการแตกหักของท่อแรงดันสูงอย่างฉับพลัน ก่อให้เกิดคลื่นกระแทกและการรั่วของก๊าซในปริมาณสูงสามารถนำไปสู่การระเบิดทางเคมี โดยการระเบิดทางเคมีเกิดจากก๊าซที่รั่วออกมาในปริมาณมากผสมกับอากาศที่สภาวะบรรยากาศและเมื่อเจอแหล่งกำเนิดไฟจะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้และเปลี่ยนพลังงานที่ได้ในรูปของคลื่นกระแทก [2] แรงระเบิดที่เกิดขึ้นนำไปสู่การเกิดหลุมระเบิด และคลื่นกระแทกที่จะก่อให้เกิดความเสียหายตามมา โดยแรงดันเหนือแรงดันบรรยากาศและความรุนแรงจะเพิ่มมากขึ้นตามระยะทางที่เข้าใกล้แหล่งกำเนิด ท่อแรกที่เกิดการระเบิดขึ้นสามารถนำไปการระเบิดของท่อที่อยู่ใกล้เคียง หากท่อใกล้เคียงอยู่ในขอบเขตของการเกิดหลุมระเบิดหรือขอบเขตความเสียหายของคลื่นกระแทก

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการหาขนาดความกว้างของหลุมระเบิดที่เกิดจากการระเบิดของกลุ่มก๊าซ (VCEs) เพื่อหาระยะปลอดภัยจากผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการระเบิดของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ และระยะออกแบบในการป้องกันการเกิดความเสียหายแบบต่อเนื่องจากการสร้างท่อแบบคู่ขนานหรือแบบตั้งฉาก โดยการคำนวณหาขนาดของหลุมระเบิด จะคำนวณจากแบบจำลองการทำนาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดจากเหตุการณ์อุบัติเหตุในอดีต [15] และแบบจำลองการทำนายขนาดจากอิทธิพลของผลกระทบและแรงระเบิด [16] และการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดของหลุมระเบิด

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาขอบเขตการเกิดหลุมระเบิดจากการระเบิดของกลุ่มก๊าซ (VCEs) ของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ
2. เพื่อศึกษาหาระยะปลอดภัยจากผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการระเบิดของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ และระยะออกแบบในการป้องกันการเกิดความเสียหายแบบต่อเนื่องจากการสร้างท่อแนวคู่นาน หรือแนวตั้งฉาก
3. เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดของหลุมระเบิด

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาขอบเขตการเกิดหลุมระเบิดและขอบเขตความอันตรายของแรงดันเหนือแรงดันบรรยากาศระเบิดที่เกิดจากการระเบิดของกลุ่มก๊าซ (VCEs)
2. ในการคำนวณหาขนาดของหลุมระเบิด ตัวแปรที่สนใจในการคำนวณจะได้แก่ ความหนาของผนังท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ความลึกที่ฝังท่อ และความดันภายในท่อ
3. คลื่นกระแทกที่เกิดจากการระเบิด ให้เกิดในพื้นที่ว่างและไม่ได้รับผลกระทบจากการสะท้อนของดิน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. เข้าใจแบบจำลองอธิบายลักษณะของการเกิดหลุมระเบิดจากอุบัติเหตุจากท่อส่งก๊าซธรรมชาติ
2. สามารถหาระยะปลอดภัยจากการระเบิดของท่อได้ เพื่อนำไปติดเป็นป้ายเตือนภัยให้กับชุมชนที่อยู่ใกล้ท่อขนส่งก๊าซ
3. สามารถหาระยะออกแบบในการติดตั้งท่อขนส่งก๊าซแบบคู่นานและแบบตั้งฉาก เพื่อป้องกันการเกิดการระเบิดของท่อข้างเคียง

บทที่ 2

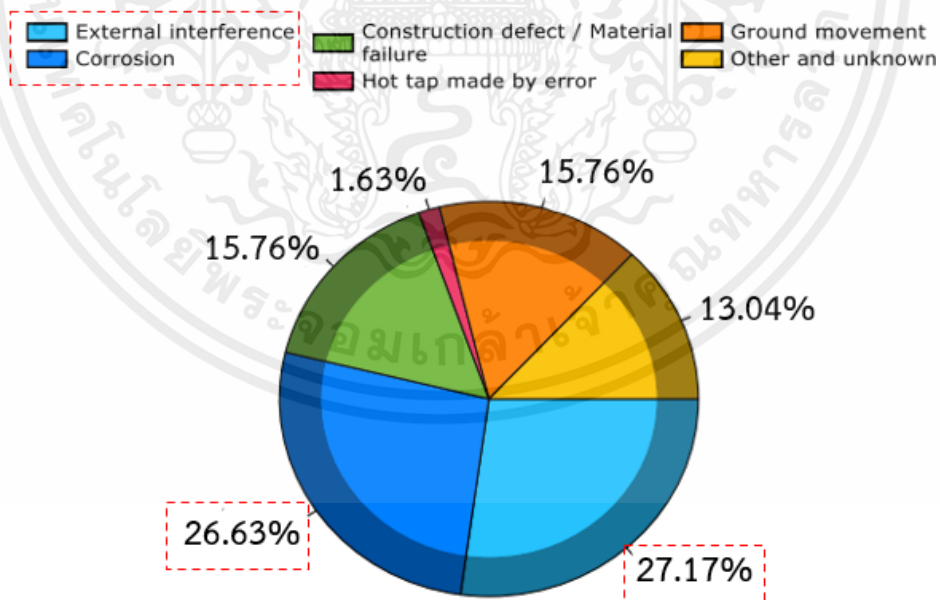
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 อุบัติเหตุของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

ความผิดพลาดของท่อส่งก๊าซธรรมชาติสามารถเกิดได้จากหลายปัจจัย เช่น จากการควบคุมกระบวนการการส่งก๊าซ หรือจากสิ่งแวดล้อมรอบตัวท่อ [6] ซึ่งสาเหตุของความผิดพลาดสามารถเกิดเหตุการณ์ที่เป็นอันตรายร้ายแรงที่นำไปสู่การสูญเสียทางทรัพย์สิน ชีวิต และสิ่งแวดล้อมได้ โดยสาเหตุที่ทำให้เกิดความปกติต่อตัวท่อและปัจจัยอื่นๆที่แตกต่างกันจะให้ผลลัพธ์ของความรุนแรงในเหตุการณ์สุดท้ายที่แตกต่างกัน

2.1.1 สาเหตุของความผิดพลาดของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

จากการรวบรวมข้อมูลจากองค์กรรวบรวมข้อมูลอุบัติภัยที่เกิดจากท่อส่งก๊าซของสหภาพยุโรป (European Gas Pipeline Incident Data Group ,EGIG) พบว่าสาเหตุที่ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อท่อส่งก๊าซในช่วงปี ค.ศ. 2010 – 2019 ได้แก่ แรงกระทำภายนอก การกัดกร่อน ความผิดปกติของโครงสร้าง/วัสดุ การเคลื่อนที่ของชั้นดิน ความผิดพลาดจากการเจาะท่อขณะมีก๊าซไหลผ่าน สาเหตุอื่นๆและสาเหตุที่ไม่สามารถระบุได้ โดยเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.1

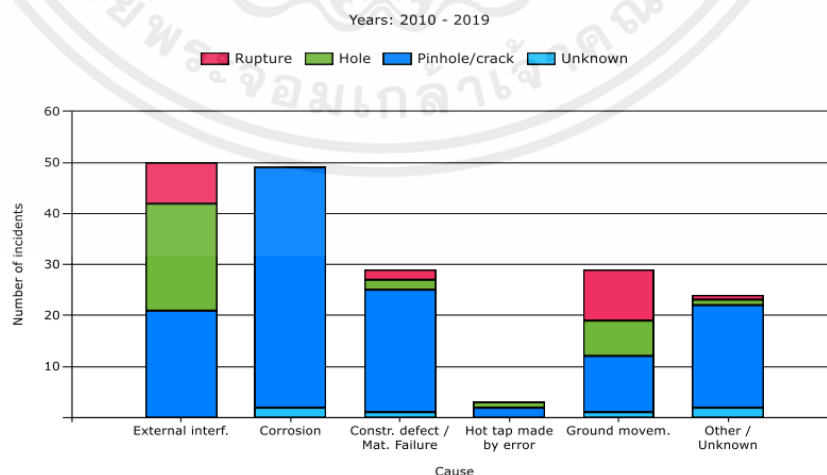


รูปที่ 2.1 ความถี่ของสาเหตุในการเกิดอุบัติเหตุของท่อส่งก๊าซ [3]

[สีน้ำเงิน : แรงกระทำภายนอก (External interference), สีฟ้า : การกัดกร่อน (Corrosion), สีเขียว : ความผิดปกติของโครงสร้าง/วัสดุ (Construction defect/Material failure), สีส้ม : การเคลื่อนที่ของชั้นดิน (Ground movement), สีแดง : ความผิดพลาดจากการเจาะท่อขณะมีก๊าซไหลผ่าน (Hot tap made by error), สีเหลือง : สาเหตุอื่นๆและสาเหตุที่ไม่สามารถระบุได้ (Unknown)]

พบว่าสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความผิดพลาดของท่อส่งก๊าซมาจากแรงกระทำจากภายนอก โดยมีความถี่ในการเกิดคิดเป็น 27.17% จากเหตุการณ์ทั้งหมด สาเหตุรองมาจากการกัดกร่อนของตัวท่อที่มีความถี่ที่เกิดขึ้นเป็น 26.63% สาเหตุต่อมาเกิดจากความผิดปกติของโครงสร้าง/วัสดุ และการเคลื่อนที่ของชั้นดิน โดยมีเปอร์เซ็นต์ที่เกิดขึ้นเท่ากันมีความถี่ที่เกิดขึ้นเป็น 15.76% สาเหตุต่อมาเกิดจากสาเหตุอื่นๆและสาเหตุที่ไม่สามารถระบุได้มีความถี่ที่เกิดขึ้นเป็น 13.04% และสาเหตุสุดท้ายที่ทำให้เกิดความผิดปกติของท่อส่งก๊าซมาจากความผิดพลาดจากการเจาะท่อขณะมีก๊าซไหลผ่านมีความถี่ที่เกิดขึ้นเป็น 1.63% ซึ่งพบว่าเหตุการณ์จากแรงกระทำจากภายนอกและการกัดกร่อนของตัวท่อมียเปอร์เซ็นต์ที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสาเหตุหลักที่นำไปสู่ความล้มเหลวของท่อส่งก๊าซ ได้แก่ แรงกระทำจากภายนอกและการกัดกร่อนของตัวท่อ ในขณะที่สาเหตุจากความผิดปกติของโครงสร้าง/วัสดุ การเคลื่อนที่ของชั้นดิน อื่นๆและสาเหตุที่ไม่สามารถระบุได้ เป็นสาเหตุรอง และสาเหตุที่ทำให้เกิดความล้มเหลวของท่อส่งก๊าซต่ำที่สุดคือความผิดพลาดจากการเจาะท่อขณะมีก๊าซไหลผ่าน [3]

เมื่อพิจารณาจากสาเหตุที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูป 2.1 พบว่าในแต่ละสาเหตุสามารถส่งผลต่อลักษณะความเสียหายของท่อส่งก๊าซธรรมชาติในลักษณะที่แตกต่างกัน เช่น ความเสียหายแบบรอยฉีกขาด (Rupture) รูขนาดใหญ่ (Hole) รูขนาดเล็ก (Pinhole/crack, รูต่อยมด) และไม่สามารถระบุขนาดได้ชัดเจน (Unknown) ดังแสดงในรูป 2.2



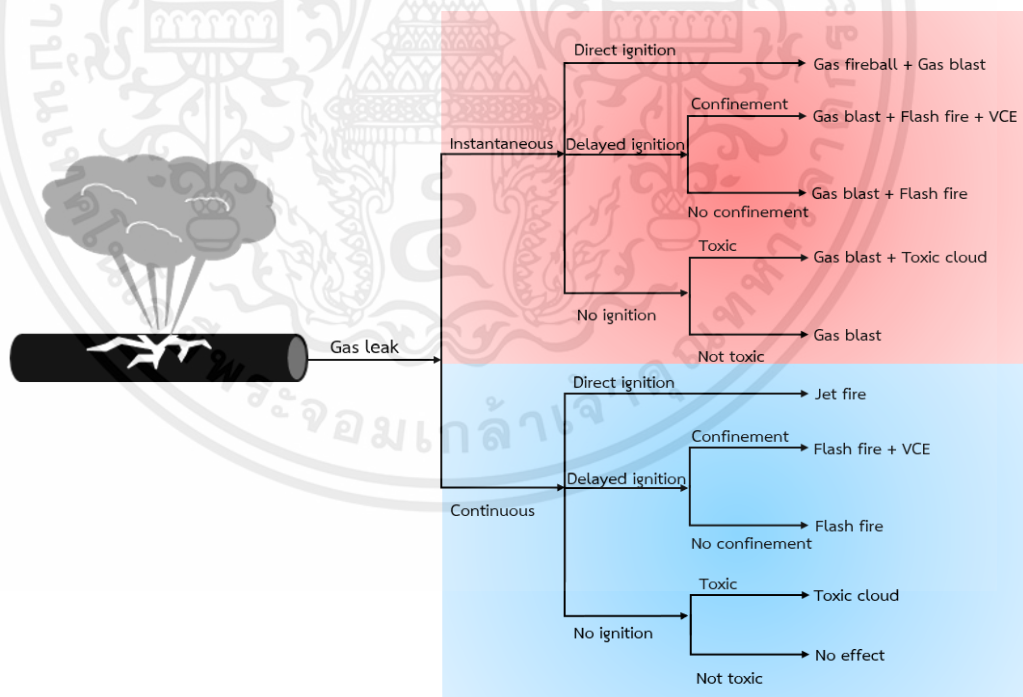
รูปที่ 2.2 ความถี่ของสาเหตุในการเกิดความผิดพลาดของท่อส่งก๊าซปี 2010-2019 [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(สีแดง : รอยฉีกขาด, สีเขียว : รูขนาดใหญ่, สีน้ำเงิน : รูขนาดเล็ก,
สีฟ้า : ไม่สามารถระบุขนาด)

รูปที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบขนาดของรอยรั่วที่เกิดขึ้นในแต่ละเหตุการณ์พบว่าการเกิดแรงกระทำจากภายนอกต่อตัวท่อจะเกิดรอยรั่วแบบเป็นรูขนาดใหญ่และรูขนาดเล็กส่วนใหญ่ และมีการเกิดรอยรั่วแบบฉีกขาดรองลงมา ขนาดของรูรั่วที่เกิดจากการกัดกร่อนจะเป็นรูขนาดเล็กเป็นหลัก รองลงมาจะเป็นรูรั่วที่ไม่สามารถระบุขนาดได้ชัดเจน รูรั่วที่เกิดจากความผิดปกติของโครงสร้าง/วัสดุ จะเป็นรูขนาดเล็กเป็นหลักเช่นเดียวกับที่เกิดจากการกัดกร่อน รองลงมาจะเป็นรอยรั่วที่เป็นแบบรูขนาดใหญ่ ฉีกขาดและไม่สามารถระบุขนาดได้ชัดเจน ในการเกิดความผิดพลาดจากการเจาะท่อขณะมีก๊าซไหลผ่านมีโอกาสเกิดรูรั่วมีเป็นรูขนาดเล็กและรูขนาดใหญ่ เหตุการณ์ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของชั้นดินจะเกิดรูรั่วแบบฉีกขาด รูขนาดใหญ่ และรูขนาดเล็ก สุดท้ายเหตุการณ์ที่เกิดจากสาเหตุอื่นๆ และสาเหตุที่ไม่สามารถระบุได้ จะเกิดรูที่เป็นรูขนาดเล็กเป็นหลักและเกิดรูแบบฉีกขาด รูขนาดใหญ่ และรูที่ไม่สามารถระบุได้รองลงมา

2.1.2 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการแผนภาพลำดับเหตุการณ์ต้นไม่สำหรับการรั่วไหลของก๊าซ [10]

พฤติกรรมของก๊าซที่เกิดการรั่วจากความผิดพลาดของท่อส่งก๊าซและสภาพแวดล้อมโดยรอบที่แตกต่างกัน เช่น ลักษณะของพื้นที่โดยรอบที่เกิดการระเบิด ขนาดของรอยรั่วที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณของก๊าซที่รั่วต่อเวลา ระยะเวลาก่อนการติดไฟ อุณหภูมิและความดันโดยรอบ ความสามารถในการติดไฟ [9] จะส่งผลเหตุการณ์และความรุนแรงที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไป เช่น การระเบิดของกลุ่มก๊าซ การเกิดเปลวไฟแบบลำจรวด เกิดการวาบไฟของกลุ่มก๊าซ และเกิดกลุ่มก๊าซพิษ ดังแสดงตามแผนผังในรูป 2.3

2.1.2.1 การระเบิดของกลุ่มก๊าซธรรมชาติ (Vapor cloud explosion)

เป็นการระเบิดที่สร้างความเสียหายและมีความอันตรายมากที่สุดในกลุ่มของอุตสาหกรรมเคมี โดยจะเกิดเมื่อเกิดการรั่วไหลของสารเคมีในปริมาณมาก และเกิดการติดไฟนำไปสู่การระเบิดที่ก่อให้เกิดการทำลายล้างสูง ซึ่งสามารถลำดับเหตุการณ์ของลักษณะการเกิดได้ ดังนี้ [9,11]

1. เกิดการรั่วไหลของก๊าซไวไฟในปริมาณที่มาก และมีการแพร่กระจายของก๊าซไปยังบริเวณโดยรอบและเกิดการผสมกับอากาศ
2. เมื่อผสมกับอากาศจนอยู่ในช่วงจำกัดการติดไฟ และเจอกับแหล่งกำเนิดไฟจนเกิดการติดไฟ
3. เมื่อแหล่งกำเนิดไฟมีพลังงานที่มากเพียงพอที่จะทำให้เกิดการติดไฟอย่างรวดเร็ว จะเกิดการระเบิดของกลุ่มก๊าซขึ้น

และจากการศึกษาของ Daniel Crowl และคณะ [9] แสดงให้เห็นว่า

1. ความน่าจะเป็นในการจุดติดไฟเพิ่มขึ้นเมื่อกลุ่มก๊าซไวไฟมีขนาดที่เพิ่มขึ้น
2. กลุ่มก๊าซไวไฟจะเกิดเหตุการณ์การติดไฟมากกว่าการระเบิด
3. ประสิทธิภาพของการระเบิดจะค่าที่ต่ำ (ประมาณ 2% ของพลังงานการเผาไหม้ที่แปรเปลี่ยนเป็นคลื่นระเบิด)
4. การผสมแบบปั่นป่วนของไอระเหยและอากาศและการติดไฟของกลุ่มก้อนไอระเหยจากระยะไกลจากจุดที่ปลดปล่อยจะเพิ่มผลกระทบของการระเบิด

2.1.2.2 เปลวไฟแบบลำจรวด (Jet fire)

เกิดจากการติดไฟของสารเคมีที่เกิดการรั่วไหลจากภาชนะที่ดำเนินการภายใต้แรงดันสูงอย่างทันทีทันใด และเกิดลำเปลวไฟพุ่งเป็นจรวดออกไป โดยระยะทางและความสูงของลำเปลวไฟที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับขนาดของรูรั่วและแรงดันที่ดำเนินการภายในท่อ ความร้อนที่แผ่ออกมาจากเปลวไฟแบบลำจรวด จะขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซที่รั่วออกมา โดยทั่วไปอุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 1,600 – 2,000 องศาเซลเซียส [11] ซึ่งเป็นความร้อนที่สูงมากพอที่จะทำให้เกิดความเสียหายต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

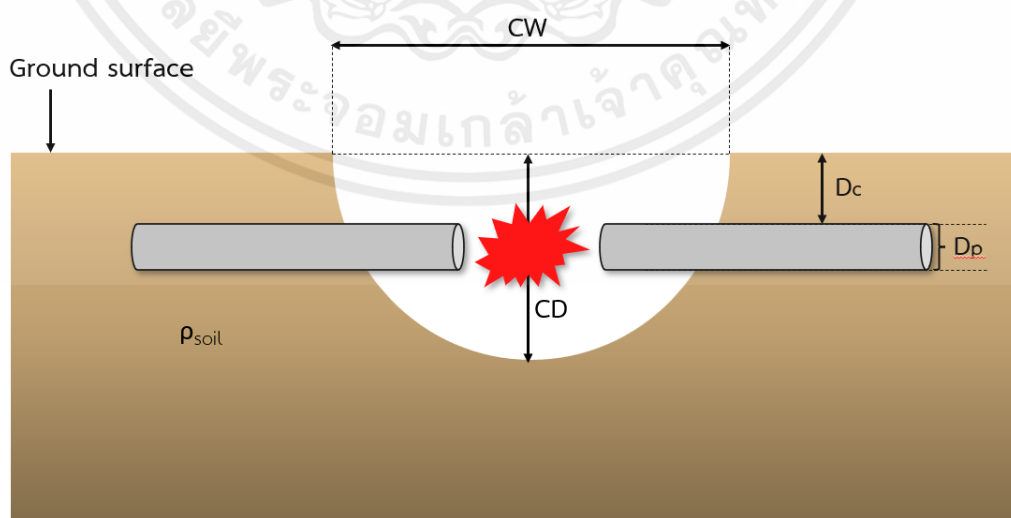
อุปกรณ์ โครงสร้าง สิ่งแวดล้อมและต่อร่างกายมนุษย์ได้ ทั้งจากการสัมผัสเปลวไฟโดยตรง หรือจากการแผ่รังสีสร้างความร้อน

2.1.2.3 เปลววาบไฟ (Flash fire)

เปลววาบไฟ หรือการติดไฟของกลุ่มก๊าซไวไฟ เกิดจากการติดไฟของกลุ่มก๊าซอย่างฉับพลันที่ผิวดินในพื้นที่ที่ไม่แออัดและเปิดโล่ง โดยก๊าซที่รั่วออกมาจะมีระยะเวลาก่อนการติดไฟในการเกิดเป็นกลุ่มก๊าซที่แพร่กระจายไปตามทิศทางลมทำให้มีความเข้มข้นที่ต่ำ การแพร่ของก๊าซจะขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของก๊าซที่รั่ว ขนาดรูรั่ว และสภาพแวดล้อมโดยล้อม ซึ่งพฤติกรรมของเปลววาบไฟจะเกิดเป็นกำแพงไฟที่มีอัตราการแพร่ออกจากจุดที่เกิดการติดไฟของกลุ่มก๊าซระดับปานกลาง จนกระทั่งกลุ่มก๊าซไวไฟเผาไหม้จนหมด โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจะไม่สูงมากเนื่องจากการเกิดเปลววาบไฟเกิดขึ้นอย่างฉับพลัน ทำให้บุคคลที่อยู่รอบนอกของกลุ่มก๊าซไวไฟจะไม่ได้รับอันตรายถึงชีวิต ในขณะที่บุคคลที่ผู้ภายในกลุ่มก๊าซไวไฟมีโอกาสได้รับอันตรายถึงชีวิตสูง นอกจากนี้ความเร็วของเปลวไฟไม่มากพอที่จะเกิดแรงดันหรือคลื่นกระแทกหลังจากที่เกิดการติดไฟของกลุ่มก๊าซ [11,12]

2.2 การเกิดหลุมระเบิด

หลุมระเบิดเกิดจากการพลังงานที่เกิดการปลดปล่อยออกมาอย่างทันทีทันใดจากการระเบิด โดยจะเกิดหลุมที่มีลักษณะคล้ายรูปชามหงายจากการแทนที่และการกระเด็นออกของชั้นดินใต้ผิวดิน ซึ่งพบว่าขนาดของหลุมระเบิดที่เกิดขึ้นจากกรณีของการระเบิดของท่อส่งก๊าซธรรมชาติมีความสัมพันธ์ลักษณะของตัวท่อ เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ แรงดันภายในท่อ เป็นต้น และมีความสัมพันธ์กับตัวแปรภายนอก เช่น ความลึกที่ฝังท่อ และคุณสมบัติของดิน [13] ดังแสดงในรูป 2.4



รูปที่ 2.4 คุณลักษณะที่สำคัญของการเกิดหลุมระเบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามรูป 2.4 ตัวแปร D แสดงถึงความลึกของหลุมระเบิด ตัวแปร W แสดงถึงความกว้างของหลุมระเบิด ตัวแปร D_c แสดงถึงความลึกจากผิวดินถึงผนังท่อส่วนบน ตัวแปร D_p แสดงถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ [6]

2.2.1 สาเหตุและพลังงานที่เกี่ยวข้อง [13,14]

พลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเกิดหลุมระเบิดที่มาจากกระเปาะระเบิดของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ มีสองพลังงานหลัก คือ พลังงานทางเคมีที่เกิดจากการเผาไหม้ของก๊าซธรรมชาติและพลังงานทางกลที่เกิดจากแรงดันที่ใช้งานภายในท่อ โดยพลังงานเกี่ยวข้องในการเกิดหลุมระเบิดจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแต่ละเหตุการณ์ โดยในกรณีที่เกิดการระเบิดจากการเผาไหม้ของก๊าซธรรมชาติที่รั่วออกมาจากรูขนาดเล็ก จะเกิดพลังงานทางเคมีและทางกลเกิดขึ้น ซึ่งจะเกิดพลังงานทางกลก่อน และเกิดพลังงานทางเคมีตามมาหลังจากการผสมระหว่างก๊าซที่รั่วออกมาต่อกับอากาศจนถึงช่วงขีดจำกัดของการระเบิด [13] และได้รับพลังงานที่มากเพียงพอต่อการจุดระเบิดจากแหล่งกำเนิดไฟ โดยในกรณีนี้พลังงานทางเคมีที่เกิดจากการเผาไหม้ของกลุ่มก๊าซไวไฟอย่างฉับพลัน หรือการระเบิดของกลุ่มก๊าซจะมีความมากกว่าพลังงานทางกลที่เกิดจากแรงดันภายในท่อส่งก๊าซธรรมชาติ อย่างไรก็ตามในกรณีที่ท่อส่งก๊าซธรรมชาติมีการใช้แรงดันภายในท่อที่สูงและท่อเกิดการฉีกขาดอย่างทันทีทันใดจากความผิดพลาดของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ พลังงานที่เกิดขึ้นจะเป็นพลังงานทางกลที่เกิดจากแรงดันของก๊าซภายในท่อที่ปลดปล่อยออกมาอย่างรวดเร็วจากรอยรั่วที่เกิดขึ้นเพียงอย่างเดียว ซึ่งในกรณีนี้ก๊าซที่รั่วออกมาจะเกิดการติดไฟแต่ไม่เกิดการระเบิดขึ้น ดังนั้นพลังงานทางเคมีที่เกิดขึ้นจะมีส่วนในการเกิดเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเปลวไฟ แต่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องในการเกิดพลังงานของการระเบิดจากการฉีกขาดของท่อ [14]

2.2.2 คลื่นกระแทก (Shock wave)

คลื่นกระแทกที่เกิดจากการระเบิดของท่อส่งก๊าซธรรมชาติจากความผิดพลาดของท่อส่งก๊าซ สามารถเกิดได้สองแบบ คือ คลื่นกระแทกที่เกิดจากแรงระเบิดทางกลจากการฉีกขาดของท่อส่งก๊าซแรงดันสูงอย่างฉับพลัน และคลื่นกระแทกที่เกิดจากแรงระเบิดทางเคมีจากการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ของกลุ่มก๊าซไวไฟความเข้มข้นสูงอย่างรวดเร็ว [7] นำไปสู่การระเบิดของกลุ่มก๊าซไวไฟ ซึ่งแรงดันเหนือบรรยากาศที่เกิดขึ้นจากคลื่นกระแทกสามารถสร้างความเสียหายต่ออุปกรณ์ข้างเคียง ตึก/อาคาร และก่อให้เกิดการบาดเจ็บและเสียชีวิตต่อบุคคลที่ได้รับผลกระทบจากคลื่นกระแทก โดยความเสียหายที่เกิดจากแรงดันเหนือบรรยากาศจากคลื่นกระแทกสามารถดูได้ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงแรงดันเหนือแรงดันบรรยากาศต่อความเสียหายของสิ่งปลูกสร้าง [7]

แรงดันเหนือแรงดันบรรยากาศ (kPa)	ความเสียหาย
1.0-1.5	หน้าต่างที่เป็นกระจกเกิดรอยร้าว
3.5-7.6	เกิดความเสียหายเล็กน้อยต่อสิ่งปลูกสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.6-12.4	เกิดการเปลี่ยนรูปแผ่นโลหะ
12.4-20.0	เกิดความเสียหายต่อกำแพงคอนกรีต
>35.0	เกิดการพังทลายของสิ่งปลูกสร้างที่ทำจากไม้
27.5-48.0	เกิดความเสียหายรุนแรงต่อสิ่งปลูกสร้างที่ทำจากเหล็กกล้า
40.0-60.0	เกิดความเสียหายอย่างหนักต่อสิ่งปลูกสร้างที่ทำจากคอนกรีตเสริมเหล็ก
70.0-80.0	เกิดการพังทลายของสิ่งปลูกสร้างส่วนใหญ่

2.2.3 ผลกระทบความเสียหายแบบต่อเนื่อง (Damage by domino effect) [13]

เมื่อท่อส่งก๊าซท่อที่หนึ่งระเบิดและนำไปสู่การเกิดหลุมระเบิดขึ้น โอกาสที่จะเกิดผลกระทบแบบต่อเนื่องขึ้นอยู่กับว่าท่อที่สองอยู่ในระยะขอบเขตการเกิดหลุมระเบิดหรือไม่ และอีกสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาคือหากท่อที่หนึ่งเกิดการรั่วไหลของก๊าซไวไฟจะเกิดการติดไฟหรือไม่ ความล้มเหลวของท่อที่สองจากการระเบิดของท่อที่หนึ่งนำไปสู่การระเบิดในท่อที่สองในกรณีที่ท่อที่สองอยู่ในขอบเขตของการเกิดหลุมระเบิดสามารถเกิดขึ้นได้จากสองปัจจัยคือ ผลกระทบจากแรงระเบิดและผลกระทบจากการแผ่รังสีความร้อน และในกรณีที่ท่อที่สองอยู่นอกขอบเขตของการเกิดหลุมระเบิด ความร้อนที่เกิดขึ้นของท่อที่สองสามารถเกิดจากคลื่นรังสีความร้อนสูงจากการติดไฟของก๊าซไวไฟที่รั่วไหลในท่อที่หนึ่ง และจากคลื่นกระแทกที่เกิดแรงระเบิดของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ นำไปสู่การระเบิดอย่างต่อเนื่องของท่อที่สอง

ในการป้องกันการเกิดเหตุการณ์การระเบิดอย่างต่อเนื่อง จะต้องมียาระยะปลอดภัยในการติดตั้งต่อแบบคู่ขนาน แบบตั้งฉาก และจากสิ่งที่อยู่รอบบริเวณท่อ ให้เป็นไปตามมาตรฐาน (standard) หรือตามหลักปฏิบัติ (code) [13]

2.3 สมการทำนายการก่อตัวของหลุมระเบิด

2.3.1 แบบจำลองการทำนายจากเหตุการณ์อุบัติเหตุในอดีต (Accident-based model)

[15]

$$CW = 40.795 + 0.382D_p - 0.068P + 4.844D_c - 10.069\gamma - 0.020\rho_{\text{soil}} \quad (1)$$

โดยที่ CW คือ ความกว้างของหลุมระเบิด (เมตร)

D_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (นิ้ว)

P คือ แรงดันภายในท่อ (บาร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D_c	คือ	ความลึกจากผิวดินถึงผนังท่อส่วนบน (นิ้ว)
γ	คือ	อัตราส่วนความร้อนจำเพาะของก๊าซ
ρ_{soil}	คือ	ความหนาแน่นของดิน (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

2.3.2 แบบจำลองการทำนายหลุมระเบิด (NTS modified model)

$$CW = 5.22 + 0.36D_p - 0.02P - 0.3D_c - 0.003\rho_{soil} \quad (2)$$

โดยที่	CW	คือ	ความกว้างของหลุมระเบิด (เมตร)
	D_p	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (นิ้ว)
	P	คือ	แรงดันภายในท่อ (บาร์)
	D_c	คือ	ความลึกจากผิวดินถึงผนังท่อส่วนบน (นิ้ว)
	ρ_{soil}	คือ	ความหนาแน่นของดิน (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

เป็นสมการที่สร้างขึ้นมาจากโปรแกรม RStudio โดยการรวบรวมข้อมูลของเหตุการณ์หลุมระเบิดในอดีต เพื่อปรับปรุงสมการเดิมให้มีความแม่นยำมากขึ้น

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 การทำนายการเกิดหลุมระเบิดจากอุบัติเหตุของระบบท่อแรงดันน้ำหลักโดยเทียบกับเหตุการณ์การระเบิดใต้ดิน [15]

Andrew D. Barr และคณะ [15] ได้ทำการปรับแก้สมการการทำนายการเกิดหลุมระเบิดสำหรับระบบท่อแรงดันน้ำ โดยการนำพลังงานจากการระเบิดจากแรงดันเปลี่ยนเป็นพลังงานเทียบเท่าการระเบิดของ TNT เพื่อใช้ในการศึกษาการระเบิดของท่อแรงดันน้ำใต้ดินที่เกิดจากความผิดพลาดจากความเปราะบางของท่อ นำไปสู่การเกิดความเสียหายและการบาดเจ็บจากเหตุการณ์อุบัติเหตุ และพัฒนานโยบายในการบังคับใช้ให้มีการเว้นระยะห่างที่ปลอดภัยบริเวณท่อที่มีความเสี่ยงสูง โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite-element modelling) ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมระเบิด ซึ่งพบว่าสมการที่ใช้มีความแม่นยำในการทำนายขนาดหลุมระเบิดที่ $r^2 = 0.95$

2.4.2 ศึกษาผลกระทบจากการระเบิดแบบต่อเนื่องของท่อขนส่งคู่ขนานใต้ดิน โดยการวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองหลุมระเบิดจากท่อขนส่งและแบบจำลองจากเหตุการณ์อุบัติเหตุในอดีต [16]

Edmilson P. Silva และคณะ [16] ทำการศึกษาผลกระทบจากการระเบิดแบบต่อเนื่องของท่อขนส่งคู่ขนานใต้ดิน ผ่านข้อมูลเหตุการณ์อุบัติเหตุในอดีตเพื่อหาระยะปลอดภัยในการติดตั้งท่อแบบคู่ขนานโดยขึ้นกับขนาดความกว้างของหลุมระเบิด โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการนำภาษา FORTRAN มาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองหลุมระเบิดของ Gasunie, Batelle และ Advantica นอกเหนือไปจากนี้ยังมีแบบจำลองการทำนายจากเหตุการณ์อุบัติเหตุในอดีตที่นำเสนอผ่านงานวิจัยนี้ ซึ่งขนาดความกว้างของหลุมระเบิดของแบบจำลองนี้จะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรของท่อที่ถูกออกแบบและความหนาแน่นของดิน จากการปรับแก้แบบจำลอง Batelle และแบบจำลองการทำนายจากเหตุการณ์อุบัติเหตุในอดีตเพื่อปรับแก้ขนาดความกว้างของหลุมระเบิดที่น้อยกว่าขนาดความเป็นจริงที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง พบว่าจากการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองผ่านข้อมูลเหตุการณ์อุบัติเหตุในอดีต 48 เหตุการณ์ พบว่าแบบจำลองการทำนายจากเหตุการณ์อุบัติเหตุในอดีตมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ และจากการตรวจสอบเหตุการณ์อุบัติเหตุ 41 เหตุการณ์จากทั้งหมด 48 เหตุการณ์ พบว่า 93% ของเหตุการณ์มีขนาดความกว้างของหลุมน้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 เมตร ดังนั้นในการประเมินหาระยะปลอดภัยในการติดตั้งท่อขนส่งแบบคู่ขนานต้องมีระยะห่างอย่างน้อย 10 เมตร เพื่อให้มั่นใจว่าโอกาสในการเกิดผลกระทบจากการระเบิดแบบต่อเนื่องมีน้อยที่สุด

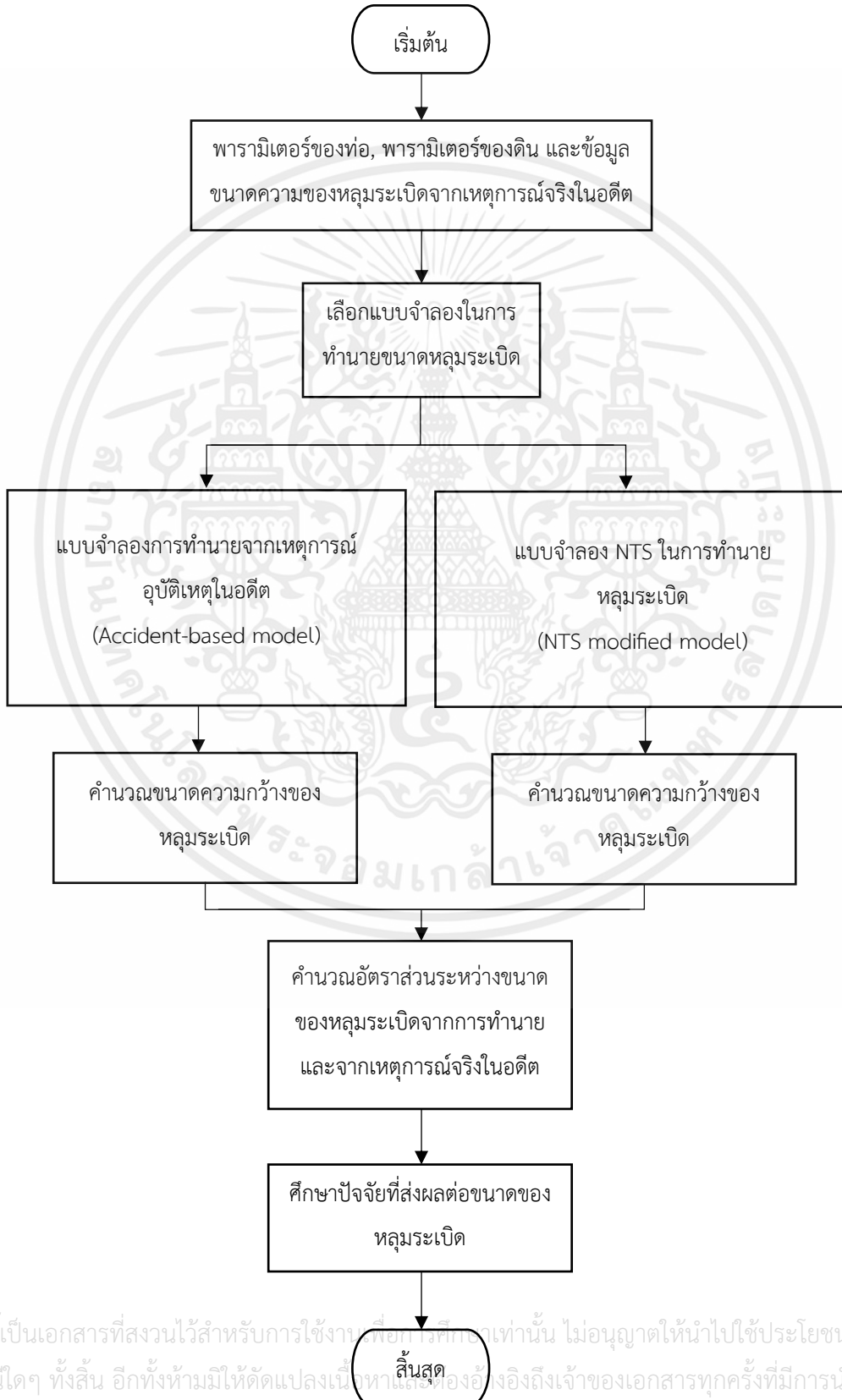
2.4.3 รายงานที่ 11 เกี่ยวกับกลุ่มข้อมูลเหตุการณ์อุบัติเหตุท่อส่งก๊าซของทวีปยุโรปในช่วงปี 1970-2019 [3]

รายงานฉบับนี้จัดทำขึ้นโดยกลุ่ม European Gas Pipeline Incident Data Group (EGIG) ในการจัดเก็บข้อมูลของท่อส่งก๊าซและอุบัติเหตุที่เกี่ยวข้องกับท่อส่งก๊าซทั้ง 17 แห่งในทวีปยุโรป โดยข้อมูลที่นำมาใช้ประโยชน์จากในเล่มรายงานนี้ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ความดันที่ใช้ภายในท่อระยะเวลาใช้งาน วิธีการเคลื่อนท่อ ความลึกในการฝังท่อ วัสดุที่ใช้ของท่อ และความหนาของท่อ นอกจากนี้ยังมีข้อมูลอุบัติเหตุที่เกิดจากท่อส่งก๊าซที่นำมาใช้ประโยชน์ได้แก่ ลักษณะของการเกิดอุบัติเหตุ ขนาดรั้วของท่อ สาเหตุเริ่มต้นในการเกิดอุบัติเหตุ การตัดไฟ ผลลัพธ์ของเหตุการณ์ และอื่นๆ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาสาระของเอกสารนี้ส่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ข้อมูลอุบัติเหตุของท่อส่งก๊าซธรรมชาติที่เกิดขึ้น

3.2.1 ข้อมูลพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซธรรมชาติและขนาดของหลุมระเบิด

ทำการรวบรวมข้อมูลพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซธรรมชาติได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซธรรมชาติและขนาดของหลุมระเบิด [16]

ID	Local	Year	Pipeline characteristics			Soil Characteristics
			diameter (in)	Pressure (bar)	Depth of cover (m)	$\rho \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$
1	Natchitoches, Louisiana, USA	1965	24	54.6	1	1360
2	Austin, Texas, USA	1973	10.8	36.9	1	1400
3	Monroe, Louisiana, USA	1974	30	56	1.95	1600
4	Farmington, New Mexico, USA	1974	12	34.9	0.76	1400
5	Meridian, Mississippi, USA	1974	6.6	21.1	0.9	1550
6	Bealeton, Virginia, USA	1974	30	50.5	1	1400
7	Bealeton, Virginia, USA	1974	30	54.1	0.6	1600
8	Cartwright, Louisiana, USA	1976	20	50.5	1	1400
9	Jackson, Louisiana, USA	1984	30	71.4	0.9	1480
10	Beaumont, Kentucky, USA	1985	30	69.7	1.8	1470
11	Lancaster, Kentucky, USA	1986	30	69.4	1.8	1390
12	Sabine Pass, Texas, USA	1989	16	57.6	0.15	1440
13	Marionville, Ontario, Canada	1990	12.7	47	1.2	1550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14	Potter, Ontario, Canada	1992	36	69	0.9	1550
15	Palaceknowe, Moffat, Scotland	1993	36	48	3	1600
16	St. Norbert, Manitoba, Canada	1996	34	50	1.3	1651
17	Ghislenghien, Belgium	2004	40	80	1.1	1400
18	Douglas County, Kansas, USA	2005	20	47	0.6	1390
19	Pilot Grove, Missouri, USA	2008	24	55.2	1.8	1400
20	Palm City Florida, USA	2009	18	58.9	1.1	1540
21	San Bruno, California, USA	2010	30	25.9	0.9	1600
22	East Bernard, Texas, USA	2010	24	49.6	1	1650
23	Beardmore, Ontario, Canada	2011	36	66.2	0.9	1550
24	Gillette, Wyoming, USA	2011	30	92.4	0.9	1440
25	Buick, British Columbia, Canada	2012	16	66.6	0.5	1400
26	Harper County, Oklahoma, USA	2013	30	55.8	1.5	1650
27	Houstonia, Missouri, USA	2013	30	61.6	1	1440
28	France	2014	8.6	34	1	1600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 เลือกแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายขนาดของหลุม

3.3.1 แบบจำลองการทำนายจากเหตุการณ์อุบัติเหตุในอดีต (Accident-based model)

[15]

$$CW = 40.795 + 0.382D_p - 0.068P + 4.844D_c - 10.069\gamma - 0.020\rho_{soil} \quad (1)$$

3.3.2 แบบจำลองการทำนายหลุมระเบิด (NTS modified model)

$$CW = 5.22 + 0.36D_p - 0.02P - 0.3D_c - 0.003\rho_{soil} \quad (2)$$

3.4 ทำนายขนาดหลุมระเบิดและเปรียบเทียบกับเหตุการณ์จริงในอดีต

นำขนาดความกว้างของหลุมระเบิดที่คำนวณได้ผ่านแบบจำลองต่างๆ มาเปรียบเทียบกับการคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างขนาดที่ได้จากการคำนวณและที่ได้จากเหตุการณ์จริงในอดีต หากมีค่าเข้าใกล้ศูนย์จะแสดงให้เห็นว่าขนาดของหลุมระเบิดที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้มีความแม่นยำสูงเมื่อเทียบกับขนาดที่เกิดจากเหตุการณ์จริง

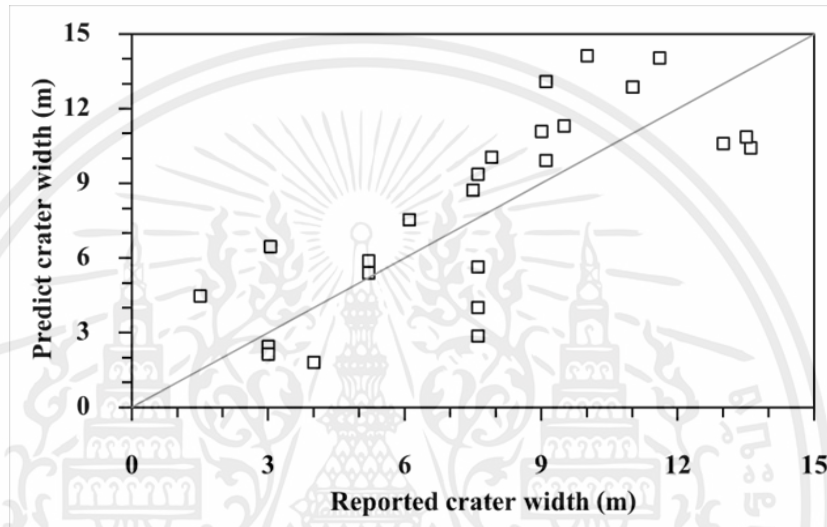
3.5 ศึกษาอิทธิพลที่ส่งผลต่อขนาดของหลุมระเบิด

ในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลต่อขนาดของหลุมระเบิด จะทำการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรที่สนใจเทียบกับขนาดหลุมระเบิดที่เปลี่ยนแปลงไป โดยตัวแปรที่สนใจได้แก่ ความดันที่ใช้ภายในท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ชนิดของดิน ความหนาแน่นของดิน และความลึกในการฝังท่อ

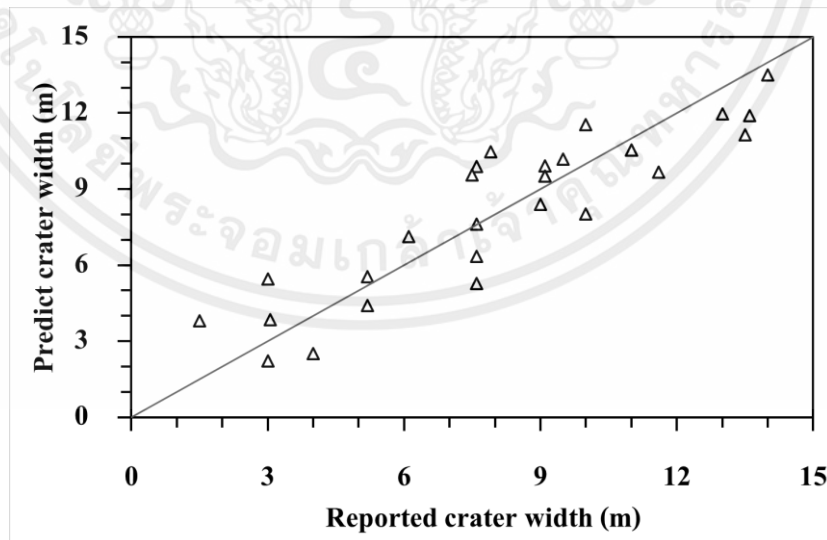
บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากการศึกษาโมเดลที่ใช้ในการคำนวณขนาดความกว้างของหลุมระเบิดที่เกิดจากท่อส่งก๊าซธรรมชาติ เพื่อจะประเมินขนาดความกว้างของหลุมจากการทำนายเทียบกับขนาดความกว้างของหลุมที่เกิดขึ้นจริง สามารถคำนวณได้อัตราส่วนระหว่างค่าทำนายกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริง โดยมีกรณีศึกษาอยู่ทั้งหมด 28 เหตุการณ์



รูปที่ 4.1 Accident-base model



รูปที่ 4.2 NTS modified model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังรูปที่ (5) และ (6) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างหลุมจากการทำนายโดย Accidents base model กับขนาดหลุมที่เกิดขึ้นจริง จะสังเกตได้ว่าค่าความผิดพลาดที่ได้มีการกระจายตัวที่ค่อนข้างสูงโดยส่วนใหญ่ขนาดความกว้างของหลุมจะมีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง และค่าความผิดพลาดที่คลาดเคลื่อนจากหลุมจริงจะมีค่าประมาณ 38-40% ของเหตุการณ์ที่นำมาศึกษา โดยมีเพียง 4 เหตุการณ์ ที่มีค่าความกว้างหลุมสูงกว่าความเป็นจริง และมีเพียง 2 เหตุการณ์ที่ใกล้เคียงกับขนาดหลุมจริง ดังนั้นค่าจากการทำนายขนาดความกว้างหลุมของ Accidents base model จึงเหมาะกับบางเหตุการณ์เท่านั้น

จากที่กล่าวมาจึงมีความสำคัญที่จำเป็นต้องพัฒนาโมเดลที่ใช้ในการทำนายขนาดความกว้างหลุมของระเบิดขึ้นมา เพื่อให้ได้ค่าความกว้างที่ใกล้เคียงกับหลุมจริงมากที่สุดและลดความเสียหายที่เกิดจากการระเบิดของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ โดย NTS modified model เป็นโมเดลที่พัฒนาขึ้นมา เพื่อให้ขนาดความกว้างของหลุมมีค่าใกล้เคียงกับเหตุการณ์จริงมากที่สุดโดยใช้วิธี/การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ จากกรณีศึกษา 28 เหตุการณ์ สามารถสังเกตได้จากรูปที่ 4.2 ค่าความผิดพลาดของความกว้างหลุมจากการทำนายและเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริงมีการกระจายตัวน้อยลงเมื่อเทียบกับ Accidents base model ทำให้ความกว้างที่ได้จากการทำนายมีความแม่นยำมากกว่าและ NTS modified model มีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R^2) มากกว่า 0.8 ซึ่งถือเป็นค่าที่ถือว่ายอมรับได้ เนื่องจากตัวแปรที่นำมาใช้ในการคำนวณนั้นตอบสนองได้ดีกับความกว้างหลุม นอกจากนี้ยังมีค่านัยสำคัญทางสถิติ (p-value) ที่ต่ำมากโดยมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงถือว่ามีนัยสำคัญทางสถิติ จากข้อมูลที่กล่าวมาทำให้สามารถสรุปได้ว่า NTS modified model นั้นถือว่ามีแนวโน้มเชื่อถือและมีค่าความผิดพลาดที่คลาดเคลื่อนจากหลุมจริงประมาณ 20-23% ของเหตุการณ์ที่นำมาศึกษาทั้งหมด โดยค่าที่ได้จากการทำนายนั้นสามารถนำมาวิเคราะห์หรือพิจารณาผลกระทบที่ตามมาหลังจากการระเบิดของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ เพื่อลดความเสียหายและสามารถประมาณหาระยะปลอดภัยได้

บทที่ 5

สรุปผล

5.1 สรุปผล

การเกิดเหตุการณ์ท้อส่งก๊าซธรรมชาติที่ระเบิดใต้ดินมักเกิดจากการรั่วของก๊าซที่มีการดำเนินงานอยู่ จึงจำเป็นต้องประเมินความเสี่ยงของผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการรั่วของก๊าซธรรมชาติ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อความกว้างหลุมระเบิดมากที่สุดคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท้อส่งก๊าซ ความลึกที่ใช้ในการฝังท้อ และความดันที่ใช้ในการดำเนินงาน โดย NTS modified model เป็นโมเดลที่พัฒนามาจากการใช้ข้อมูลจากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริงและวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ เพื่อประเมินค่าความกว้างของหลุมระเบิดได้โดยมีค่าความผิดพลาดที่น้อยกว่า Accidents base model โดยเฉพาะสำหรับการคำนวณความกว้างของหลุมที่เกิดจากการระเบิดของก๊าซธรรมชาติเท่านั้น การประเมินค่านี้จะช่วยในการวางแผนดำเนินงานและการฝังท้อคู่มือที่มีความปลอดภัยมากขึ้น

จากการศึกษาจะพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความกว้างหลุมระเบิดมากที่สุดคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท้อส่งก๊าซเนื่องจากว่าถ้าท้อมีขนาดใหญ่จะสามารถส่งก๊าซได้ในปริมาณมากหากเกิดรั่วจะทำให้ก๊าซรั่วไหลออกไปและมีการสะสมได้มีความเข้มข้นสูงทำให้สามารถเกิดระเบิดได้รุนแรง โดยค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางท้อถึง 0.36 ปัจจัยที่ส่งผลในลำดับถัดมาคือความลึกที่ใช้ในการฝังท้อส่งก๊าซธรรมชาติที่มีค่าสัมประสิทธิ์ -0.30 รองลงมาคือความดันที่ใช้ในการดำเนินการที่มีค่าสัมประสิทธิ์ -0.02 และในปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดหลุมระเบิดน้อยที่สุดคือ ความหนาแน่นของดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์เพียง -0.003

จาก NTS modified model นั้นพัฒนามาจากการใช้การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณโดยใช้ข้อมูลจากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริง ทำให้ค่าที่ทำนายได้มีความผิดพลาดที่น้อยกว่า 22.69% เมื่อเทียบกับ Accidents base model ที่มีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 39.27% นอกจากนี้ NTS modified model สามารถใช้ได้สำหรับการคำนวณความกว้างหลุมที่เกิดจากการระเบิดของก๊าซธรรมชาติเท่านั้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่ได้นำมาศึกษา พบว่ามีข้อมูลเหตุการณ์หลุมระเบิดที่ขาดหายไป ซึ่งอาจส่งผลต่อความถูกต้องของโมเดลที่ถูกสร้างขึ้น ดังนั้น ควรมีการเก็บข้อมูลให้ครบถ้วนที่สุดเพื่อใช้ในการพัฒนาโมเดลให้มีความแม่นยำสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เพื่อเพิ่มความแม่นยำของโมเดล ควรศึกษาความรุนแรงจากการระเบิดของทางด้านเคมีเข้าไปในโมเดลด้วย เนื่องจากข้อมูลด้านเคมีสามารถช่วยให้วิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงได้ถูกต้องและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
3. หากเกิดเหตุการณ์หลุมระเบิดขึ้นอีก ควรมีการเก็บข้อมูลที่มากขึ้นอีกเพื่อใช้ในการวิจัยและการป้องกันอุบัติเหตุในอนาคต การเก็บข้อมูลที่มากขึ้นจะช่วยให้มีการวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เพื่อนำไปใช้ในการวางแผนและการดำเนินการเพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้กับสังคม
4. ควรให้ความสำคัญกับการตระหนักถึงความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับผู้ที่อยู่อาศัยใกล้เคียงแนวท่อส่งก๊าซธรรมชาติ เนื่องจากหากเกิดการระเบิดของท่อส่งก๊าซธรรมชาติอาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยกับผู้ที่อยู่อาศัยใกล้เคียงกับแนวท่อส่งก๊าซธรรมชาติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, แผนบริหารจัดการก๊าซธรรมชาติ พ.ศ. 2561-2580, ตุลาคม 2563. Available online: http://www.eppo.go.th/images/Infomation_service/public_relations/PDF/Gasplan2018.pdf (accessed on 14 April 2022).
- [2] บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน), รายงานประจำปี 2561 บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). Available online: <https://investor.pttplc.com/th/downloads/annual-reports> (accessed on 14 April 2022).
- [3] European Gas Pipeline Incident Data Group (EGIG), 11th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (Period 1970–2019). December 2020. Available online: <https://www.egig.eu/reports> (accessed on 23 March 2022).
- [4] Y. Hao, W. Yang, Z. Xing, K. Yang, lin Sheng, J. Yang, Calculation of accident probability of gas pipeline based on evolutionary tree and moment multiplication, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 176 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.103955>.
- [5] R.M. Peekema, Causes of Natural Gas Pipeline Explosive Ruptures, *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 4 (2013) 74–80. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ps.1949-1204.0000116](https://doi.org/10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000116).
- [6] R. Amaya-Gómez, J.G. Ramírez-Camacho, E. Pastor, J. Casal, F. Muñoz, Crater formation by the rupture of underground natural gas pipelines: A probabilistic-based model, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 54 (2018) 224–239. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.03.011>.
- [7] L. Cheng, C. Ji, M. Zhong, Y. Long, F. Gao, Full-scale experimental investigation on the shock-wave characteristics of high-pressure natural gas pipeline physical explosions, *International Journal of Hydrogen Energy*. 44 (2019) 20587–20597. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.005>.

- [8] S. Dong, Y. Chen, X. Sun, H. Zhang, Full-Scale Experimental Verification of the Explosion Shock Wave Model of a Natural Gas Pipeline, *Mathematical Problems in Engineering*. 2018 (2018). <https://doi.org/10.1155/2018/4202389>.
- [9] Daniel Crawl, Joseph Louvar, *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications (International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences) 4th Edition*. (2019). pp. 258-278.
- [10] Senior Research Scientist Hans Boot, Fire and explosion hazards: What to expect if there is a leak. 24th November 2021. Available online: <https://www.gexcon.com/blog/fire-and-explosion-hazards-what-to-expect-if-there-is-a-leak/> (accessed on 13 April 2022).
- [11] กลุ่มพิทักษ์อากาศสดชื่น มาบตาพุด ระยอง, การระเบิดของสารเคมีที่สามารถเกิดขึ้นในโรงงานปิโตรเคมี. 12 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553. Available online: <http://airfresh-society.blogspot.com/2010/02/bleve.html> (accessed on 15 April 2022).
- [12] R.F. Cracknell, A.J. Carsley, Cloud fires - a methodology for hazard consequence modelling, n.d. (1997). Available online: <https://www.icheme.org/media/10325/xiii-paper-13.pdf> (accessed on 15 April 2022)
- [13] J.G. Ramírez-Camacho, E. Pastor, R. Amaya-Gómez, C. Mata, F. Muñoz, J. Casal, Analysis of crater formation in buried NG pipelines: A survey based on past accidents and evaluation of domino effect, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 58 (2019) 124–140. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.01.011>.
- [14] K. Wang, T. Shi, Y. He, M. Li, X. Qian, Case analysis and CFD numerical study on gas explosion and damage processing caused by aging urban subsurface pipeline failures, *Engineering Failure Analysis*. 97 (2019) 201–219. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.01.052>
- [15] Andrew D. Barr, Sam E. Rigby, Richard Collins, Vanessa Speight, Thomas Christen, PREDICTING CRATER FORMATION FROM FAILURE OF PRESSURISED WATER MAINS THROUGH ANALOGY WITH BURIED EXPLOSIVE EVENTS, *Journal*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

of Pipeline Systems Engineering and Practice/Volume 11 Issue 2 (May 2020).

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000458](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000458)

- [16] Edmilson P. Silva, Marcio Nele, Paulo F. Frutuoso e Melo, Laszlo Konozy, Underground parallel pipelines domino effect: An analysis based on pipeline crater models and historical accidents. February 2016.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2016.05.031>
- [17] Keith A. Holsapple, Theory and Equations for "Craters from Impacts and Explosions", Geophysical Research Abstracts, Vol. 5, 04450, EGS-AGU-EUG Joint Assembly (Jan 2003).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ภาพแสดงผลลัพธ์ภายในโปรแกรม RStudio

```
####r}r
library(tidyverse)
library(broom)
library(psych)
library(modelr)

####r}
df <- ex
summary(df)

####r}
      Dp          P          Dc
Min.   : 6.60   Min.   :21.10   Min.   :0.150
1st Qu.:17.50   1st Qu.:47.75   1st Qu.:0.900
Median :30.00   Median :54.90   Median :1.000
Mean   :24.81   Mean   :54.77   Mean   :1.127
3rd Qu.:30.00   3rd Qu.:66.30   3rd Qu.:1.225
Max.   :40.00   Max.   :92.40   Max.   :3.000
...4
Mode:logical
NA's:28
      CW
Min.   : 1.500
1st Qu.: 5.875
Median : 8.450
Mean   : 8.227
3rd Qu.:10.250
Max.   :14.000

####r}
mod1.lm <- lm(CW~Dp,data=df)
summary(mod1.lm)
mod2.lm <- lm(CW~Dp+P,data=df)
summary(mod2.lm)
mod3.lm <- lm(CW~Dp+P+Dc,data=df)
summary(mod3.lm)
anova(mod1.lm,mod2.lm,mod3.lm)

call:
lm(formula = CW ~ dp, data = df)

Residuals:
    Min       1q   Median       3Q      Max
-2.7048 -0.8502  0.1856  1.0821  2.2993

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -0.01297    0.86905   -0.015   0.988
Dp           0.33210    0.03289   10.097 1.73e-10 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.581 on 26 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7968,    Adjusted R-squared:  0.789
F-statistic: 102 on 1 and 26 DF,  p-value: 1.733e-10

call:
lm(formula = CW ~ Dp + P, data = df)

Residuals:
    Min       1q   Median       3Q      Max
-2.6684 -0.8847  0.1437  1.0742  2.4789

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0.252765    1.148054    0.220   0.828
Dp           0.340735    0.041052    8.300 1.19e-08 ***
P            -0.008761    0.024152   -0.363   0.720
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.608 on 25 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7979,    Adjusted R-squared:  0.7817
F-statistic: 49.34 on 2 and 25 DF,  p-value: 2.092e-09
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Call:
lm(formula = CW ~ Dp + P + Dc, data = df)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.6124 -0.7451  0.1249  1.0353  2.3987

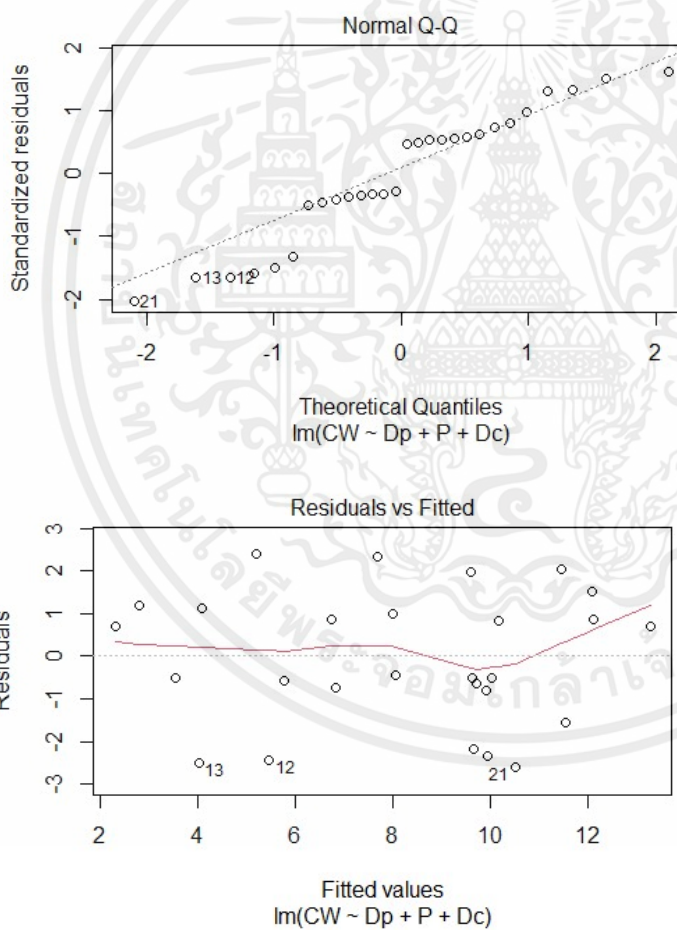
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0.57153    1.28136   0.446   0.660
Dp           0.35369    0.04698   7.529 9.09e-08 ***
P           -0.01258    0.02531  -0.497   0.624
Dc          -0.38213    0.64420  -0.593   0.559
---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.63 on 24 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8008,    Adjusted R-squared:  0.7759
F-statistic: 32.16 on 3 and 24 DF,  p-value: 1.422e-08

Analysis of Variance Table

Model 1: CW ~ Dp
Model 2: CW ~ Dp + P
Model 3: CW ~ Dp + P + Dc
  Res.Df  RSS Df Sum of Sq    F Pr(>F)
1       26 65.015
2       25 64.675  1    0.34037 0.1282 0.7235
3       24 63.740  1    0.93450 0.3519 0.5586

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้