



การวิเคราะห์อายุการใช้งานของท่อในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมที่สภาวะต่างๆ

Piping Analysis for Petroleum Industry



นายทศพล	ลาภเดโช	รหัส	45361466
นายวิรัช	เพิ่มผลนิรันดร์	รหัส	45361714
นายปฐมพงษ์	เลิศศิริรุ่งเรือง	รหัส	45380074

14047354

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์  
 วันที่รับ..... 24 พ.ย. 2549.....  
 เลขทะเบียน..... 4900221.....  
 เลขเรียกหนังสือ..... ๑๕.....  
 มหาวิทยาลัยนเรศวร ๗ ๒๓๘๗

2548

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2548



## ใบรับรองโครงการ

หัวข้อโครงการ : การวิเคราะห์อายุการใช้งานของท่อในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม  
ที่สภาวะต่าง ๆ

(Piping Analysis for Petroleum Industry)

ผู้ดำเนินโครงการ : นายทศพล ตากเดโช รหัส 45361466  
นายวิรัช เพิ่มผลนิรันดร์ รหัส 45361714  
นายปฐมพงษ์ เดิศศิริรุ่งเรือง รหัส 45380074

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ : ดร.ภาณุ พุททวงศ์  
ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา : 2548

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อนุมัติให้โครงการวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบโครงการ

.....ประธานกรรมการ  
(ดร.ภาณุ พุททวงศ์)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ชูพงษ์ ช่วยเพ็ญ)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ปกรณ์ สัตถธรรมณวงศ์)

หัวข้อโครงการ	: การวิเคราะห์อายุการใช้งานของท่อในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ที่สภาวะต่าง ๆ (Piping Analysis for Petroleum Industry)
ผู้ดำเนินโครงการ	: นายทศพล ลาภเดโช รหัส 45361466 นายวิรัช เพิ่มผลนิรันดร์ รหัส 45361714 นายปฐมพงษ์ เลิศศิริรุ่งเรือง รหัส 45380074
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ	: ดร.ภาณุ พุททวงศ์
ภาควิชา	: วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	: 2548

#### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการวิเคราะห์การกัดกร่อนเชิงกลของท่อในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม โดย การสร้างความสัมพันธ์ของปัจจัยที่เกี่ยวข้องด้วยกัน 7 ปัจจัยคือ ความหนา , ความดัน , อุณหภูมิ , ปริมาณทราย , อัตราการไหลของทรัพยากรที่เป็นของเหลว , อัตราการไหลของทรัพยากรที่เป็นก๊าซ และระยะเวลาในการสึกกร่อนด้วยวิธีการการถดถอยแบบหลายเชิงซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นโปรแกรม ที่สามารถคำนวณอายุการใช้งานของท่อในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ณ ที่สภาวะต่าง ๆ ได้โดย โปรแกรมที่ได้นั้นสร้างมาจากสมการความสัมพันธ์ของปัจจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น โดยมีข้อมูลทั้งหมด 15 หลุมผลิต ทั้งนี้มี 14 หลุมผลิตที่สมการความสัมพันธ์มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดต่ำและมีค่าการ เกาะกลุ่มของข้อมูล(Coefficient of Determination: R - Square) มากกว่า 0.9 ซึ่งถือว่ามีค่าความแม่นยำตรงที่สามารถนำโปรแกรมที่ได้นี้ไปใช้งานในสภาวะการทำงานจริงได้

Project title	: Piping Analysis for Petroleum Industry		
Name	: Mr.Thotsaphon Lapdesho	ID 45361466	
	: Mr.Wiruch Permholnirun	ID 45361714	
	: Mr.Pathompong Lerdsirirungruang	ID 45380074	
Project Advisor	: Dr. Panu Putthawong		
Major	: Mechanical Engineering		
Department	: Mechanical Engineering		
Academic Year	: 2005		

---



### Abstract

The purpose of this project is to analyze the mechanical corrosion in the pipeline in petroleum industry Seven factors are being considered: wall thickness, pressure, temperature, amount of sand, liquid flow rate, gas flow rate, and corrosion time. The method used here is Multiple Regression. The results are the program to calculate the remaining life of the pipeline under various conditions for each well site. From the data of 15 well sites, 14 are having R – square value over 0.9 which are very accurate. So, the developed programs can be used practically.

## กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgment)

การที่ข้าพเจ้าได้มาปฏิบัติการศึกษา ณ บริษัท ปตท.สำรวจและผลิตปิโตรเลียมจำกัด (มหาชน) (แหล่งน้ำมันสิริกิติ์) ตั้งแต่วันที่ 31 ตุลาคม พ.ศ.2548 ถึงวันที่ 28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2549 ส่งผลให้ข้าพเจ้าได้รับประสบการณ์ และความรู้ต่างๆ ที่มีค่ามากมายอีกทั้งประยุกต์ใช้ความรู้ความสามารถที่ได้เรียนมา สำหรับรายงานวิชา Training and Project in Mechanical Engineering ฉบับนี้ สำเร็จลงด้วยดีจากความร่วมมือและการสนับสนุนจากหลายฝ่าย ดังนี้

- |                               |   |
|-------------------------------|---|
| 1. คุณกิติศักดิ์ นวลจันทร์ฉาย | ผู้จัดการใหญ่ฝ่ายวางแผนการผลิต (JGO)      |
| 2. คุณศิริพงษ์ เพ็ญลิจิต      | ผู้จัดการฝ่ายประชาสัมพันธ์(JGO-R)         |
| 3. คุณธีระ พงษ์เจตพงษ์        | ผู้จัดการฝ่ายผลิต (JGO-P)                 |
| 4. คุณอนุสรณ์ วุฒิเจริญ       | ผู้จัดการฝ่ายบำรุงรักษาเครื่องจักร(JGO-M) |
| 5. คุณเบญจพล อนุศาสน์อมรกุล   | หัวหน้าแผนกการขนส่ง(JGO-ET)               |
| 6. คุณทศพร สวงพงษ์            | หัวหน้าฝ่ายเทคนิค                         |
| 7. คุณทัศนภรณ์ บุญญะฤทธิ      | ผู้ช่วยผู้จัดการฝ่ายประชาสัมพันธ์(JGO-R)  |

และบุคคลท่านอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวนามทุกท่านที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือในการจัดทำรายงานฉบับนี้

ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ที่มีส่วนร่วมในการให้ข้อมูล เป็นที่ปรึกษา ในการทำรายงานฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ตลอดจนให้การดูแล และให้ความเข้าใจเกี่ยวกับชีวิตการทำงานจริง ข้าพเจ้าขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

นายทศพล	ลาภเดโช
นายวิรัช	เพิ่มผลนิรันดร์
นายปฐมพงษ์	เลิศศิริรุ่งเรือง

## สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงการ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญรูปภาพ	ช
สารบัญตาราง	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ภาพรวมของบริษัท	1
1.2 การสำรวจ พัฒนาและผลิตปิโตรเลียม	5
1.3 การสำรวจปิโตรเลียม	5
1.4 ที่มาของโครงการ	8
1.5 วัตถุประสงค์	8
1.6 ขอบข่ายของงาน	8
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
บทที่ 2 ข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	10
2.1 ท่อโลหะ (Metallic)	10
2.2 ท่อโลหะ (Non-Metallic)	12
2.3 คุณสมบัติของธาตุที่ใช้ทำท่อ	13
2.4 การกัดกร่อน	24
2.5 รูปแบบโดยทั่วไปของการกัดกร่อน	24
2.6 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก(Galvanic Corrosion)	25
2.7 การสูญเสียส่วนผสมบางตัว(Selective leaching)	26

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.8 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม(Pitting Corrosion)	27
2.9 การกัดกร่อนในที่อับ(Crevice Corrosion)	28
2.10 การกัดกร่อน-สึกกร่อน(Erosion Corrosion)	29
2.11 การกัดกร่อนแบบถูครูด(Fretting Corrosion)	29
2.12 การกัดกร่อนตามขอบเกรน(Intergranular Corrosion)	30
2.13 การกัดกร่อนร่วมกับความเค้น(Stress Corrosion)	31
2.14 การกัดกร่อนจากความล้า(Fatigue Corrosion)	32
บทที่3 วิธีการดำเนินงาน	33
3.1 ขั้นตอนการศึกษาข้อมูล	33
3.2 การทดสอบหาค่าความหนาของวัสดุแบบไม่ทำลายโดยใช้อัลตราโซนิก	34
3.3 การศึกษาการเก็บข้อมูล	37
3.4 การศึกษาวิธีการสร้างสมการ	40
3.5 การศึกษาโปรแกรมในการคำนวณเพื่อแก้สมการหลายตัวแปร	41
บทที่4 ผลการดำเนินและผลการวิเคราะห์	43
4.1 วิธีการคำนวณ	43
4.2 สรุปผลการทดสอบ	64
4.3 ผลการวิเคราะห์	64
บทที่ 5 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	65
บรรณานุกรม	66
ประวัติผู้ทำโครงการ	67

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
รูปที่ 3.1 เครื่องมือวัดความหนาชนิดอัลตราโซนิก	35
รูปที่ 3.2 แสดงการวัดค่าความหนาโดยใช้เครื่องมือวัดชนิดอัลตราโซนิก	36
รูปที่ 3.3 การเก็บข้อมูล	38
รูปที่ 3.4 ตำแหน่งในการเก็บข้อมูล	39
รูปที่ 3.5 แสดงการกักกรองภายในท่อ	39
บทที่ 4 ผลการดำเนินและผลการวิเคราะห์	
รูปที่ 4.1 แสดงการคำนวณหาค่าคงที่โดยใช้โปรแกรม MATLAB	45
รูปที่ 4.2 แสดง โปรแกรมการคำนวณอายุการใช้งานของท่อ	63



## สารบัญตาราง

	หน้า
บทที่ 1	
ตารางที่ 1.1 แสดงรายชื่อผู้ถือหุ้น	2
บทที่ 2	
ตารางที่ 2.1 แสดงสารประกอบเคมีของท่อเป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนัก	18
ตารางที่ 2.2 แสดงค่ากำหนด Tensile	19
ตารางที่ 2.3 แสดงค่าต่ำสุดของการ Test Pressure ของท่อมาตรฐาน API Specification 5L	20
ตารางที่ 2.4 แสดงค่าต่ำสุดของการ Test Pressure ของท่อมาตรฐาน API Specification 5L (ต่อ)	21
ตารางที่ 2.5 แสดงค่าต่ำสุดของการ Test Pressure ของท่อมาตรฐาน API Specification 5L (ต่อ)	22
ตารางที่ 2.6 แสดงค่าต่ำสุดของการ Test Pressure ของท่อมาตรฐาน API Specification 5L (ต่อ)	23
บทที่ 3	
ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างการเก็บข้อมูลค่าความหนาของท่อ ณ เวลาต่างๆ	37
บทที่ 4	
ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิต LKU-F11T	43
ตารางที่ 4.2 แสดงวิธีการคำนวณ	44
ตารางที่ 4.3 แสดงการหาค่า $S_r$ และ $S_p$	46
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต LKU-F11T	47
ตารางที่ 4.5 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิต W-02T	48
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต W-02T	48
ตารางที่ 4.7 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิต F-04T	49
ตารางที่ 4.8 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต F-04T	49
ตารางที่ 4.9 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิต D-14T	50
ตารางที่ 4.10 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต D-14T	50
ตารางที่ 4.11 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิต NMMA-04T	51
ตารางที่ 4.12 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต NMMA-04T	51
ตารางที่ 4.13 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิต C-03T	52
ตารางที่ 4.14 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต C-03T	52
ตารางที่ 4.15 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิต X-02	53

## สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.16 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต X-02	53
ตารางที่ 4.17 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิต B-16T	54
ตารางที่ 4.18 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต B-16T	54
ตารางที่ 4.19 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิต S-02T	55
ตารางที่ 4.20 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต S-02T	55
ตารางที่ 4.21 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิต X-05T	56
ตารางที่ 4.22 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต X-05T	56
ตารางที่ 4.23 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิต LKU-C15	57
ตารางที่ 4.24 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต LKU-C15	57
ตารางที่ 4.25 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิต LKU-D-ext13	58
ตารางที่ 4.26 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต LKU-D-ext13	58
ตารางที่ 4.27 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิต LKU-D14	59
ตารางที่ 4.28 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต LKU-D14	59
ตารางที่ 4.29 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิต LKU-F22	60
ตารางที่ 4.30 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต LKU-F22	60
ตารางที่ 4.31 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิต LKU-X02	61
ตารางที่ 4.32 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต LKU-X02	61
ตารางที่ 4.33 แสดงอายุการทำงานของท่อที่ได้จากการคำนวณ	62

## บทที่ 1

### ภาพรวมของบริษัท

#### 1.1 รายละเอียดเกี่ยวกับบริษัท

ปตท.สผ. ก่อตั้งขึ้นเมื่อวันที่ 20 มิถุนายน 2528 โดยเป็นไปตามเจตนารมณ์ของ คณะรัฐมนตรี ที่ต้องการเสริมสร้างความมั่นคงด้านพลังงานให้กับประเทศ รวมทั้งลดการพึ่งพาการนำเข้าปิโตรเลียมจากต่างประเทศ คณะรัฐมนตรีจึงได้มอบหมายให้การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย จัดตั้งบริษัท ปตท.สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด หรือ ปตท.สผ. ขึ้นเพื่อดำเนินธุรกิจหลัก คือ สำรวจ พัฒนา และผลิตปิโตรเลียมให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อประเทศ ต่อมาเพื่อเป็นการรองรับการขยายบทบาททางธุรกิจสำรวจและผลิตปิโตรเลียมทั้งภายในและต่างประเทศและลดภาระของรัฐ ปตท.สผ.จึงได้ระดมทุนจากภาคเอกชนด้วยการนำหุ้นเข้าจดทะเบียนเป็นบริษัทมหาชนในปี 2535 ปัจจุบัน ปตท.สผ. มีทุนจดทะเบียน 3,322 ล้านบาทโดยมีผู้ถือหุ้นหลัก คือ บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน)

นอกจากธุรกิจหลักด้านการสำรวจและผลิตปิโตรเลียมแล้ว ปตท.สผ. ได้ขยายการลงทุนไปสู่ธุรกิจแปรรูปพลังงาน โดยได้ลงทุนในธุรกิจไฟฟ้า เพื่อตอบสนองนโยบายของรัฐบาลซึ่งเปิดตลาดเสรีให้กับ ผู้ผลิตก๊าซธรรมชาติ นอกจากนี้ การขยายธุรกิจไปสู่ธุรกิจไฟฟ้ายังเป็นการส่งเสริมการดำเนินงานของธุรกิจหลักด้วย

#### วิสัยทัศน์

เป็นบริษัทสำรวจและผลิตปิโตรเลียมชั้นนำที่มีความสามารถ วิถีทางในการดำเนินการ และ ศักยภาพในการแข่งขัน ระดับแนวหน้าของโลก

#### พันธกิจ

ประกอบธุรกิจหลักในการลงทุนและดำเนินการสำรวจ พัฒนา และผลิตปิโตรเลียม รวมทั้ง กิจการต่อเนื่องที่มีความสำคัญเชิงกลยุทธ์ทั้งในและนอกประเทศ

#### ค่านิยม

ปตท.สผ.ให้ความสำคัญกับบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญระดับ มืออาชีพ มีคุณลักษณะดี ใฝ่หาความรู้ ถ่ายทอดแลกเปลี่ยนประสบการณ์ และทุ่มเทผลงานเพื่อเป็นเลิศ

## ผู้ถือหุ้น

ผู้ถือหุ้นรายใหญ่ 10 อันดับแรกของ ปตท.สผ. ณ วันที่ 8 เมษายน 2547 (วันปิดทะเบียนพัก  
โอนหุ้นเพื่อการประชุมสามัญผู้ถือหุ้นประจำปี 2547 ในวันที่ 28 เมษายน 2547)

ตารางที่ 1.1 แสดงรายชื่อผู้ถือหุ้น

อันดับ	รายชื่อผู้ถือหุ้น	จำนวนหุ้น	% ของจำนวน หุ้นทั้งหมด
1.	บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)	418,260,500	64.11
2.	HSBC (Singapore) Nominees PTE Ltd	14,224,296	2.18
3.	State Street Bank and Trust Company	14,137,642	2.17
4.	The Bank of New York (Nominees) Limited	12,326,815	1.89
5.	State Street Bank and Trust Company, for London	10,865,671	1.67
6.	Chase Nominees Limited 1	10,369,800	1.59
7.	Little down Nominees Limited 5	6,556,100	1.00
8.	Boston Safe Deposit and Trust Company	6,253,068	0.96
9.	บริษัท ไทยเอ็นวีดีอาร์ จำกัด	5,421,545	0.83
10.	State Street Bank and Trust Company for Australia	5,240,100	0.80

## อุตสาหกรรมการสำรวจและผลิตปิโตรเลียมในประเทศไทย

### 1.1.1 การกำหนดพื้นที่สัมปทาน

กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ กระทรวงพลังงาน ในฐานะหน่วยงานที่รับผิดชอบจะเป็น ผู้กำหนดพื้นที่สัมปทาน โดยแบ่งพื้นที่ออกเป็นแปลง (Block) และเชิญชวนให้บริษัทน้ำมันต่าง ๆ เข้ามายื่นขอสัมปทานสำหรับขั้นตอนการอนุมัติสัมปทานนั้น คณะกรรมการปิโตรเลียมเป็นผู้พิจารณาคำขอสัมปทาน โดยมีคณะกรรมการเป็นผู้กลั่นกรองข้อมูลตามคำขอในเบื้องต้น รัฐมนตรีว่าการกระทรวงพลังงาน โดยได้รับอนุมัติจากคณะรัฐมนตรีเป็นผู้มีอำนาจให้สัมปทานและลงนามในสัมปทาน ทั้งนี้ หลักเกณฑ์ในการอนุมัติสัมปทานแต่ละแปลงนั้น รัฐจะพิจารณาถึงคุณสมบัติของผู้ยื่นคำขอแต่ละราย

โดยดูว่ามีการนำเงินทุนเข้ามาใช้ในการสำรวจปิโตรเลียมอย่างเหมาะสมการถ่ายทอดความรู้ และเทคโนโลยี การว่าจ้างแรงงานในประเทศ รวมทั้งพิจารณาถึงผลประโยชน์สูงสุดที่รัฐพึงได้ เป็นต้น

### 1.1.2 ลักษณะของผู้ประกอบการ

สัมปทานปิโตรเลียมหนึ่ง ๆ อาจออกให้แก่ผู้รับสัมปทาน (Concessionaire) รายเดียว หรือผู้รับสัมปทานร่วม (Co-Concessionaire) ตั้งแต่ 2 รายขึ้นไปได้ เนื่องจากลักษณะธุรกิจการสำรวจและผลิตปิโตรเลียมค่อนข้างจะมีความเสี่ยงสูงในระดับหนึ่ง ดังนั้น ผู้รับสัมปทานจึงมักจะจัดหาบริษัทอื่นเข้ามารับสัมปทานร่วมด้วย หรือเข้าร่วมประกอบกิจการปิโตรเลียม (Co-Venture) ด้วย เพื่อเป็นการกระจายความเสี่ยง ในการลงทุน โดยผู้เข้าร่วมทุนในโครงการภายหลังจากนี้จะต้องชำระค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นก่อนการเข้าร่วม โครงการให้แก่ผู้รับสัมปทานหรือผู้ร่วมทุนเดิม ในการร่วมทุนข้างต้นจะมีบริษัทหนึ่งเป็นผู้ดำเนินการ (Operator) เพื่อดำเนินการสำรวจและผลิตแทนผู้ร่วมทุนอื่น ภายใต้การควบคุมของ คณะกรรมการจัดการ ซึ่งประกอบด้วยตัวแทนจากผู้ร่วมทุนแต่ละราย และสำหรับบริษัทผู้ร่วมทุนอื่นซึ่งมิได้เป็นผู้ดำเนินการจะถูกเรียกว่า ผู้ร่วมทุน (Non-Operator) โดยทั้งนี้ ผู้ดำเนินงานจะเป็นผู้กำหนดแผนการเงินที่จะเรียกเก็บ (Cash Call) จากผู้ร่วมทุนเพื่อนำมาใช้จ่ายในโครงการ ผู้ร่วมทุนจะมีส่วนในการตัดสินใจทางเทคนิคและในทางการเงิน โดยผ่านตัวแทนของตนในคณะกรรมการจัดการ (Management Committee) โดยทั่วไปบริษัทปิโตรเลียมหนึ่ง ๆ เมื่อสะสมประสบการณ์ได้พอสมควรแล้วมักจะผันตนเองเข้าเป็นผู้ดำเนินงาน เพื่อให้มีบทบาทมากยิ่งขึ้นในการจัดการและบริหารงาน

### 1.1.3 ลักษณะการดำเนินงานและการตัดสินใจลงทุน

โดยทั่วไปแล้วก่อนที่จะบริษัทน้ำมันจะตัดสินใจเข้าลงทุนในการสำรวจปิโตรเลียมทั้งในและต่างประเทศนั้น จะต้องพิจารณาถึงโอกาสที่การสำรวจจะประสบผลสำเร็จ ปัจจัยความเสี่ยงต่าง ๆ ในการลงทุนอย่างรอบคอบ โดยจะต้องมีการศึกษาข้อมูล เพื่อวิเคราะห์ศักยภาพของพื้นที่ว่าจะมีปิโตรเลียมสูงเพียงใด และมีสมรรถนะในเชิงพาณิชย์หรือไม่ ตลอดจนสถิติของอัตราส่วนความสำเร็จ (Success Ratio) ของการเจาะหลุมสำรวจในพื้นที่ใกล้เคียงด้วย ตลอดจนถึงปัจจัยความเสี่ยงต่าง ๆ ของประเทศที่เราเข้าไปลงทุนด้วย ทั้งนี้ เมื่อเห็นว่าคุ้มค่าต่อการลงทุนในระยะการสำรวจแล้วจึงจะยื่นขอสัมปทานปิโตรเลียม หรือเข้าร่วมทุนในสัมปทานปิโตรเลียมที่มีการขอไว้แล้ว

เมื่อบริษัทน้ำมันได้รับอนุมัติพื้นที่สัมปทานให้เข้าไปดำเนินการสำรวจแหล่งปิโตรเลียมและเริ่มงานสำรวจ ซึ่งโดยปกติจะใช้เวลาในการสำรวจขั้นต้นประมาณ 2 - 3 ปี จนเมื่อพบปริมาณสำรองปิโตรเลียมก็จะเปรียบเทียบมูลค่าเงินลงทุนที่ต้องใช้ในช่วงการพัฒนาแหล่งผลิต กับมูลค่าการขายปิโตรเลียมตามปริมาณสำรองในส่วนที่คาดว่าจะผลิตขึ้นมาได้ หากพบว่าเป็นการลงทุน

พัฒนาที่คุ้มค่าก็จะถือว่าแหล่งปิโตรเลียมนั้นมีศักยภาพในเชิงพาณิชย์ โดยผู้ดำเนินงานจะต้องยื่นขออนุมัติให้แหล่งปิโตรเลียมนั้นเป็นพื้นที่ ผลิปิโตรเลียมและเริ่มทำการผลิตในแหล่งนั้นไปก่อน ทั้งนี้ ผู้ดำเนินการยังคงสามารถทำการสำรวจพื้นที่ที่เหลือต่อไปได้ หากยังอยู่ในระยะเวลาสำรวจตามที่กำหนดในสัมปทาน ในช่วงของการขออนุมัติพื้นที่ผลิตนี้ ผู้ดำเนินงานจะต้องมีความมั่นใจในการลงทุน เนื่องจากการลงทุนเพื่อพัฒนาการผลิตดังกล่าวจะมีมูลค่าสูงมาก ดังนั้น จึงต้องติดต่อจัดหาผู้ซื้อปิโตรเลียมไว้ล่วงหน้า และจัดทำสัญญาซื้อขายปิโตรเลียมระยะยาว (Sales Agreement) ในปัจจุบัน ปตท. เป็นผู้รับซื้อปิโตรเลียมรายใหญ่ที่สุดในประเทศ สำหรับสาระสำคัญ โดยปกติในสัญญาซื้อขายปิโตรเลียมจะประกอบด้วย วิธีการกำหนดราคาซื้อขาย และกำหนดปริมาณปิโตรเลียมที่จะส่งมอบ ทั้งนี้ เมื่อถึงกำหนดเริ่มสัญญาผู้ซื้อจะต้องรับผิดชอบต่อผลผลิตปิโตรเลียมทันทีเมื่อมีการผลิต โดยในการซื้อขายก๊าซธรรมชาติจากโครงการในประเทศจะซื้อขายกันที่ปากหลุมผลิต ส่วนการซื้อขายก๊าซธรรมชาติจากโครงการในต่างประเทศจะทำการซื้อขายที่เขตชายแดนประเทศไทย ปตท. จึงต้องเป็นผู้จัดวางท่อส่งก๊าซที่สามารถรองรับได้ตามปริมาณผลิตที่ระบุไว้ตามสัญญา สำหรับการซื้อขายน้ำมันดิบจะซื้อขายกันที่โรงกลั่นน้ำมันของผู้ซื้อ ส่วนการซื้อขายคอนเดนเสทจะทำการซื้อขายที่ Floating Storage Unit (FSU) ใกล้บริเวณหลุมผลิต

#### 1.1.4 ลักษณะของกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับธุรกิจ

ปัจจุบันการประกอบธุรกิจปิโตรเลียมในประเทศไทยอยู่ภายใต้ 2 กฎหมายหลัก ได้แก่ พระราชบัญญัติปิโตรเลียม พ.ศ. 2514 และพระราชบัญญัติภาษีเงินได้ปิโตรเลียม พ.ศ. 2514 (รวมทั้งฉบับที่แก้ไขเพิ่มเติม) ซึ่งสรุปประเด็นสำคัญของกฎหมายดังกล่าวได้ ดังนี้

ผู้ขอสัมปทานต้องเป็นบริษัทจำกัด หรือนิติบุคคลที่มีสภาพเช่นเดียวกับบริษัทจำกัด ซึ่งจัดตั้งขึ้นตามกฎหมายไทย หรือกฎหมายต่างประเทศ อย่างไรก็ตามผู้ได้รับสัมปทานจะต้องเป็นบริษัทจำกัดที่จัดตั้งขึ้นตามกฎหมายไทย

ผู้รับสัมปทาน ผู้รับสัมปทานร่วม และผู้เข้าร่วมประกอบกิจการปิโตรเลียม จะต้องชำระค่าภาคหลวง ซึ่งโดยปกติชำระเป็นตัวเงิน แต่รัฐมนตรีมีอำนาจสั่งให้ชำระเป็นปิโตรเลียมได้ ซึ่งต้องแจ้งล่วงหน้าไม่น้อยกว่า 6 เดือน ค่าภาคหลวงนี้สามารถนำมาเครดิตภาษีเงินได้ (Thailand I) หรือตัดเป็นค่าใช้จ่ายได้ (Thailand III) อัตราภาษีเงินได้ปิโตรเลียมเก็บในอัตราไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 แต่ไม่เกิน ร้อยละ 60 ของกำไรสุทธิที่ได้จากกิจการปิโตรเลียม ดอกเบี้ยจ่าย ไม่สามารถนำมาคำนวณเป็นรายจ่ายทางภาษีได้ ผู้รับสัมปทาน (Concessionaire) แต่ละรายมีสิทธิได้รับสัมปทานไม่เกิน 4 แปลง เว้นแต่กรณีที่รัฐมนตรีเห็นสมควรอาจจะอนุญาตให้ผู้ขอสัมปทานได้รับสัมปทานเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งแปลงสำรวจ

**Thailand I** สำหรับสัมปทานปิโตรเลียมที่ออกโดยกระทรวงอุตสาหกรรม ตั้งแต่ปี 2514 - 2532 และสำหรับสัมปทานปิโตรเลียมบนบกที่ออกก่อนปี 2525

**Thailand II** สำหรับสัมปทานปิโตรเลียมบนบกทั้งหมด ที่ออก โดยกระทรวงอุตสาหกรรม 1 ตั้งแต่ปี 2525 - 2532

**Thailand III** สำหรับสัมปทานปิโตรเลียมที่ออกโดยกระทรวงอุตสาหกรรมตั้งแต่ปี 2533

## 1.2 การสำรวจ พัฒนาและผลิตปิโตรเลียม

ปิโตรเลียม (Petroleum) คือสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งประกอบด้วยธาตุไฮโดรเจน และคาร์บอน มักพบอยู่ใน ชั้นหินตะกอน (Sedimentary Rocks) ทั้งในสภาพของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ปิโตรเลียมเกิดจากซากของสิ่งมีชีวิตตกทับถมกันในทะเล ทะเลสาบ หนอง บึงที่มีน้ำนิ่ง ซึ่งมีดินตะกอน (Sediments) ตกทับถมอยู่ น้ำหนักของดินตะกอนประกอบกับการเปลี่ยนแปลงโดยแบคทีเรีย (Anaerobic Bacteria) ทำให้ซากสิ่งมีชีวิตเหล่านั้นปราศจากออกซิเจน เหลืออยู่แต่สารประกอบไฮโดรเจนและคาร์บอน ในระยะแรกสารไฮโดรคาร์บอนจะมีความหนืดสูง เมื่อมีดินตะกอนตกทับถมมากขึ้น จะทำให้สารไฮโดรคาร์บอนค่อย ๆ จมลึกลงไป ด้วยน้ำหนักของดินตะกอน และความร้อนที่สะสมมากขึ้น ทำให้สารไฮโดรคาร์บอนกลายbecome น้ำมันและก๊าซในที่สุด การเกิดแหล่งปิโตรเลียมจะต้องประกอบด้วยหินต้นกำเนิด (Source Rocks) ซึ่งเป็นหินดินดาน เมื่อถูกทับถมมาก ๆ เนื้อหินของหินต้นกำเนิดจะแน่นขึ้น จนทำให้ปิโตรเลียมเคลื่อนตัวไปสะสมอยู่ในหินอุ้มน้ำมันปิโตรเลียม (Reservoir Rock) และจะพยายามซึมขึ้นสู่ที่สูง ดังนั้นการเกิดปิโตรเลียมจะต้องมีหินปิดกั้นปิโตรเลียม (Cap Rock) มาปิดกั้นไว้ ซึ่งจะกลายเป็นแหล่งกักเก็บปิโตรเลียม (Petroleum Trap) ตามลักษณะ โครงสร้างทางธรณีวิทยาต่อไป

## 1.3 การสำรวจปิโตรเลียม

### 1.3.1 การสำรวจธรณีวิทยา

คือการศึกษาการเกิดการสะสมตัว และการกักเก็บปิโตรเลียมในชั้นหินใต้ดิน ซึ่งเริ่มต้นจากการศึกษา และรวบรวมข้อมูลทางธรณีวิทยา ธรณีฟิสิกส์ ภาพถ่ายทางอากาศ หรือภาพถ่ายผ่านดาวเทียม ข้อมูลเหล่านี้ทำให้นักธรณีวิทยาสามารถกำหนด โครงสร้างที่มีศักยภาพในการกักเก็บปิโตรเลียมในเบื้องต้นได้ จากนั้น จึงทำการสำรวจธรณีวิทยาภาคสนาม แล้วจึงเอาข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์ เพื่อหาลักษณะธรณีวิทยาปิโตรเลียม เช่น หาโครงสร้างต่าง ๆ ได้ผิวดินที่คาดว่าจะมีศักยภาพกักเก็บปิโตรเลียม แล้วจึงนำโครงสร้างเหล่านั้นมาประเมินวิเคราะห์อัตราเสี่ยง และวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน

### 1.3.2 การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์

การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ขั้นต้นจะใช้วิธีวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กทางอากาศ เพื่อหาขอบเขตและความลึกของกลุ่มแอ่ง จากนั้นจึงทำการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ขั้นรายละเอียด โดยใช้วิธีวัดความเร็วคลื่นความไหวสะเทือน ซึ่งคือการส่งคลื่นความไหวสะเทือนลงไปได้ผิวดิน เมื่อคลื่นเสียงกระทบ โครงสร้างใต้ดินก็จะสะท้อนกลับเข้าตัวรับคลื่นเสียงนั้น ซึ่งวางอยู่ตามจุดที่กำหนดไว้ คลื่นเสียงจะกลับมากกระทบถึงตัวรับคลื่นเสียงได้เร็ว หรือช้าขึ้นอยู่กับลักษณะและคุณสมบัติของชั้นหินในแต่ละความลึก จากข้อมูลที่ได้รับ นักธรณีฟิสิกส์ และนักธรณีวิทยา จะทำการแปลความหมายข้อมูลเหล่านี้ และสร้างรูปโครงสร้าง ชั้นหินที่คาดว่าจะมีศักยภาพในการเป็นแหล่งปิโตรเลียมขึ้นมา เพื่อใช้ประโยชน์ในการวางตำแหน่งหลุมสำรวจต่อไป

### 1.3.3 การเจาะสำรวจ

หลุมสำรวจ (Exploration Well) โดยทั่วไปเรียกว่าหลุม Wild Cat เป็นหลุมที่เจาะสำรวจเพื่อหาข้อมูลเพิ่มเติม เกี่ยวกับชั้นหิน และคุณสมบัติทางกายภาพของชั้นหินต่าง ๆ โดยไม่หวังว่าจะพบปิโตรเลียมในปริมาณมากพอที่จะมีสมรรถนะเชิงพาณิชย์ แต่จะหวังว่าผลของการเจาะหลุมนี้จะช่วยเพิ่มศักยภาพและความมั่นใจว่า ในพื้นที่ดังกล่าวมีปิโตรเลียมกักเก็บอยู่ ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อประโยชน์ในการวางแผนการเจาะหลุมต่อไป หลุมสำรวจในบริเวณพื้นที่ใหม่ๆ อาจมีมากมายหลายหลุม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความกว้างของพื้นที่ และความต้องการข้อมูล เพื่อนำมาใช้ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาแหล่งปิโตรเลียมนั้น ๆ หากข้อมูลที่ได้พบว่าเป็นแหล่งกักเก็บปิโตรเลียม จึงจะวางแผนเจาะหลุมพัฒนา (Development Well) ในขั้นต่อไป

### 1.3.4 การพัฒนาแหล่งปิโตรเลียม

ก่อนการเจาะหลุมพัฒนา วิศวกร นักธรณีวิทยาและนักธรณีฟิสิกส์ จะร่วมกันศึกษาประเมินคุณค่าเชิงพาณิชย์ ของแหล่งกักเก็บปิโตรเลียม และความเป็นไปได้ในการผลิต ตลอดจนศึกษาแนวทางการออกแบบวิศวกรก่อสร้างแท่นผลิต เพื่อคำนวณและวางแผนการเจาะหลุมให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดและปลอดภัยที่สุด

### 1.3.5 การเจาะหลุมปิโตรเลียม

เมื่อทราบตำแหน่งที่แน่นอนแล้ว จะเริ่มเจาะเปิดปากหลุม (Spud ding) จากนั้นจึงเจาะด้วยหัวเจาะที่มีขนาด 17 1/2 นิ้ว ในระหว่างการเจาะ หัวเจาะจะค่อยๆ บดและตัดชั้นหินลึกลงไปเรื่อย ๆ โดยอาศัยแรงกดจากก้านเจาะ ความคมของหัวเจาะ และแรงอัดของน้ำโคลน (Drilling Mud) ซึ่งเป็นของเหลวที่มีส่วนผสม ของสารเคมีและน้ำ น้ำโคลนจะทำหน้าที่ช่วยลดความร้อน และเป็นตัวหล่อลื่นที่หัวเจาะ ช่วยป้องกันการพังทลายของผนังหลุมในระหว่างการเจาะและยังควบคุมความดันภายในหลุมอีกด้วย นอกจากนี้ยังเป็นตัวนำเอาเศษหินที่ถูกบดและตัดแล้ว ขึ้นมายังพื้นผิวเพื่อ



ตรวจสอบและวิเคราะห์ต่อไป และลงท่อกรุพื้นผิว (Surface Casing) ขนาด 13 3/8 นิ้ว แล้วจึงอัดซีเมนต์ลงไปรอบหลุมเจาะ ในช่องว่างระหว่าง ท่อกรุและผนังหลุม เพื่อป้องกันการทลายของขอบหลุม และการไหลย้อนกลับของน้ำโคลน จากนั้นจึงเจาะด้วยหัวเจาะ 12 1/4 นิ้ว แล้วลงท่อกรุช่วงกลาง (Intermediate Casing) ขนาด 9 5/8 นิ้ว อัดซีเมนต์รอบหลุม เพื่อป้องกันการทลายของขอบหลุมอีกครั้งหนึ่ง และยังเป็นกำกั้นการไหลของของเหลวจากชั้นหินหนึ่งไปยังอีกชั้นหิน โดยผ่านทางหลุมเจาะด้วย

ในพื้นที่ที่คาดว่า จะเป็นแหล่งกักเก็บปิโตรเลียมนั้น จะทำการทดสอบเจาะด้วยหัวเจาะขนาดเล็ก 8 1/2 นิ้ว ก่อน หลังจากการเจาะจะพอทราบคร่าวๆ แล้วว่าที่ความลึกนั้น มีหินชนิดใด และมีของเหลวชนิดใดกักเก็บอยู่ขนาดของหัวเจาะและความลึกในการเจาะแต่ละช่วงจะสัมพันธ์กับสภาพของชั้นหินและความดันในชั้นหินนั้น ซึ่งวิศวกรจะต้องเตรียมแผนการไว้ เพื่อจะได้เจาะหลุมได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

การบันทึกข้อมูลต่างๆ ในระหว่างเจาะหลุมมีความสำคัญมากต่อการวิเคราะห์ชั้นหิน (Formation Evaluation) เพื่อหาบริเวณที่เป็นแหล่งกักเก็บปิโตรเลียม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่คาดว่า จะเป็นแหล่ง ปิโตรเลียม จะมีการวัดหาคุณสมบัติทางกายภาพของชั้นหิน เช่น ความพรุนและความหนาแน่นและของเหลวในชั้นหินนั้นๆ ว่ามีลักษณะเป็นน้ำมันหรือน้ำ หรือก๊าซ ผลของการวัดนี้ เมื่อผ่านขั้นตอน การแปลความหมายแล้ว จะบอกได้ชัดเจนว่า ที่ความลึกระดับใดมีปิโตรเลียมกักเก็บอยู่ แต่เพื่อให้แน่ใจยิ่งขึ้นและเพื่อเป็นการทดสอบความสามารถในการผลิตปิโตรเลียม จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบการผลิต โดยทำการผลิตปิโตรเลียมผ่านก้านเจาะโดยปกติแล้วการทดสอบนี้จะใช้เวลานานหลายวันเพราะข้อมูลที่ได้อาจบันทึกไว้ไม่ว่าจะเป็นอัตราการไหลหรือ ความดันของแหล่งกักเก็บปิโตรเลียมจะมีความสำคัญต่อการพัฒนาแหล่งปิโตรเลียมอย่างมาก

### 1.3.6 การผลิตปิโตรเลียม

หลังจากการทดสอบการผลิตเสร็จสิ้นลง หากพบว่าในพื้นที่ดังกล่าว มีปิโตรเลียมที่สามารถผลิตได้ในสมรรถนะเชิงพาณิชย์แล้ว ก็ทำการลงท่อกรุเตรียมผลิต (Production Casing) และอัดซีเมนต์เพื่อป้องกันไม่ให้ของเหลวไหลเข้ามาภายในท่อกรุได้ จากนั้นจึงทำการเจาะรู (Perforate) ในท่อกรุ ให้ทะลุผนังเหล็กและซีเมนต์ในบริเวณที่มีปิโตรเลียมกักเก็บอยู่ เพื่อให้ปิโตรเลียมสามารถไหลเข้ามาในท่อกรุสำหรับเตรียมการผลิตต่อไปขั้นตอนสุดท้าย เป็นการลงท่อผลิต โดยปกติท่อผลิตจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ถึง 4.5 นิ้ว แต่จะใช้ขนาดใดขึ้นอยู่กับผลของการทดสอบที่ได้ทำไปแล้ว เมื่อลงท่อผลิตแล้ว จะทำการติดตั้งระบบควบคุมความดันบนพื้นผิว (Christmas Tree) และระบบควบคุมการไหล (Choke) เพื่อให้สามารถวางแผน การผลิตปิโตรเลียมผ่านท่อผลิตสู่พื้นผิวอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดหากจะกล่าวแล้วการเจาะหลุมปิโตรเลียมแต่ละครั้งนั้น

จำเป็นต้องใช้เงินทุนเป็นจำนวนมาก และที่สำคัญคือการเจาะหลุมแต่ละหลุมมีความเสี่ยงสูงมาก เช่นกัน ซึ่งค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในการ เจาะหลุม นั้นๆ จะขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 อย่างด้วยกันคือ ขนาด และ ความลึกของหลุมเจาะ

#### 1.4 ที่มาของโครงการ

เนื่องจากในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมจำเป็นต้องมีการขนส่งผลิตภัณฑ์โดยใช้ท่อเป็น ตัวกลางในการขนส่งและเมื่อใช้ท่อไปในระยะเวลาอันนานก็จะทำให้เกิดการสึกกร่อนของท่อได้ซึ่งจะมีผลกระทบโดยตรงต่อการผลิตปิโตรเลียมและสิ่งแวดล้อมที่อยู่บริเวณใกล้เคียงดังนั้นเพื่อเป็นการ ใฝ่ระวังความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นจึงทำให้มีการสร้าง โครงการขึ้นนี้ขึ้นมาเพื่อใฝ่ระวังความเสียหายในอนาคต ณ สภาวะภายในหลุมผลิตที่แตกต่างกัน

#### 1.5 วัตถุประสงค์

- 1.5.1 เพื่อศึกษาการกัดกร่อนของท่อขนส่งปิโตรเลียมที่สภาวะต่าง ๆ ได้
- 1.5.2 เพื่อทำนายอายุการใช้งานที่เหลือของท่อขนส่งปิโตรเลียมที่สภาวะต่าง ๆ ได้
- 1.5.3 เพื่อใฝ่ระวังการเพิ่มหรือลดรอบระยะเวลาในการดูแลรักษาของท่อขนส่งปิโตรเลียมที่สภาวะต่าง ๆ ได้
- 1.5.4 เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการสึกกร่อนที่สามารถนำไปใช้ในสภาวะการทำงานจริงได้
- 1.5.5 เพื่อสร้าง โปรแกรมการทำนายอายุการใช้งานของท่อในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมที่สภาวะต่าง ๆ ได้

#### 1.6 ขอบข่ายของงาน

นำข้อมูลของตัวแปรที่เกี่ยวข้องคือ ความหนาของท่อขนส่งปิโตรเลียม , ความดันภายในหลุมผลิต , อุณหภูมิภายในหลุมผลิต , ปริมาณทรายภายในหลุมผลิต , อัตราการไหลของทรัพยากรภายในหลุมผลิตที่เป็นของเหลว , อัตราการไหลของทรัพยากรที่เป็นก๊าซภายในหลุมผลิต โดยเก็บข้อมูลบริเวณแปลงสัมปทาน S1 (บริเวณ อ. ลานกระบือ จ.กำแพงเพชร ) ที่สภาวะต่างๆ ซึ่งได้เก็บบันทึกไว้มาทำการสร้างความสัมพันธ์โดยวิธีการถดถอยแบบหลายเชิง (Multiple Regression Method) หลังจากนั้นทำการหาค่าคงที่โดยใช้โปรแกรม MATLAB โดยทำการหาความสัมพันธ์ของหลุมผลิตทั้งหมด 15 หลุมผลิต ได้แก่ หลุมผลิต W-02T, หลุมผลิต F-04T, หลุมผลิต D-14T, หลุมผลิต NMMA-04T, หลุมผลิต C-03T, หลุมผลิต X-02, หลุมผลิต B-16T, หลุมผลิต S-02T, หลุมผลิต X-05T, หลุมผลิต LKU-C15, หลุมผลิต LKU-D-ext13, หลุมผลิต LKU-D14, หลุมผลิต LKU-F22,

หลุมผลิต LKU-X02 และเมื่อได้สมการความสัมพันธ์ของตัวแปรของแต่ละหลุมผลิตแล้วก็ทำการหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน โดยจะต้องไม่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์และค่าการเกาะกลุ่มของข้อมูล (Coefficient of Determination: R - Square) โดยจะต้องไม่ต่ำกว่า 0.75 เพื่อความน่าเชื่อถือของแต่ละสมการในการนำไปใช้ในสภาวะการทำงานจริง

#### 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1 สามารถเฝ้าระวังความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตของท่อขนส่งปีโตรเลียมในสภาวะต่าง ๆ ได้
- 1.7.2 สามารถทำนายอายุการใช้งานที่เหลือของท่อขนส่งปีโตรเลียมที่สภาวะต่าง ๆ ได้
- 1.7.3 สามารถเฝ้าระวังการเพิ่มหรือลดรอบระยะเวลาในการดูแลรักษาของท่อขนส่งปีโตรเลียมที่สภาวะต่าง ๆ ได้
- 1.7.4 สามารถศึกษาการกัดกร่อนของท่อขนส่งปีโตรเลียมที่สภาวะต่าง ๆ
- 1.7.5 สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการสึกกร่อนที่สามารถนำไปใช้ในสภาวะการทำงานจริงได้
- 1.7.6 สามารถสร้างโปรแกรมการทำนายอายุการใช้งานของท่อในอุตสาหกรรมปีโตรเลียมที่สภาวะต่าง ๆ ได้

## บทที่ 2

### ข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานท่อ หมายถึง งานที่พาของไหลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งของไหลไม่ใช่หมายถึงน้ำอย่างเดียว แต่ยังหมายถึง สสารที่สามารถไหลหรือพาไปในระบบงานท่อ เช่น เมล็ดข้าว เมล็ดถั่วต่างๆ น้ำมัน แก๊ส ฯลฯ งานท่อแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ งานท่อสุญญากาศ และงานท่ออุตสาหกรรมซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะงานท่ออุตสาหกรรมเท่านั้น

งานท่ออุตสาหกรรม หมายถึง ระบบการใช้ของไหลหมุนเวียนในงานอุตสาหกรรมใหญ่ เช่น งานท่อน้ำ ท่อน้ำมัน ท่อไอน้ำ ในโรงงานอุตสาหกรรมถ่านหิน น้ำมัน อุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้า อุตสาหกรรมถลุงเหล็ก เป็นต้น งานท่ออุตสาหกรรมลักษณะของงานคล้ายๆกับงานท่อและสุญญากาศ แต่อุปกรณ์ที่ใช้ต่างๆตลอดจนท่อที่ใช้จะต้องทนความดันและความร้อนได้สูง การต่อท่อเข้าด้วยกันจะไม่นิยมการต่อด้วยเกลียว จะใช้การต่อแบบเชื่อมเป็นส่วนมาก การต่อด้วยด้วยหน้าแปลนจะนิยมการประกอบหน้าแปลนด้วยวิธีการเชื่อมเช่นกัน

ท่อ หมายถึง วัสดุตัวกลางที่ทำหน้าที่พาของไหลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ตามจุดมุ่งหมายที่ต้องการ การเลือกใช้ท่อต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของไหลภายในท่อ อุณหภูมิ ความดัน ความเป็นกรดเป็นด่าง การกัดกร่อน และความปลอดภัย ท่อที่ใช้จึงมีอยู่หลายแบบชนิด แต่ละชนิดเหมาะสมกับงานต่างกัน

ท่อแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ท่อโลหะและท่ออโลหะ

#### 2.1 ท่อโลหะ (Metallic)

เป็นท่อที่ทำจากโลหะที่เลือกมาให้เหมาะสมกับงานที่ใช้ต่างๆ แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ท่อแข็งที่ทนแรงดัน (Pipe) และท่ออ่อนที่ทนแรงดันไม่มากนัก (Tube) แบ่งเป็น 3 เกรด คือ A,B,C ยิ่งเกรด C จะทนแรงดึง (Tensile Strength) ได้สูงกว่าเกรด B แต่เกรด B จะทนแรงดึงได้สูงกว่าเกรด A แต่ถ้ามีการทนความดันสูงความเหนียวของมันจะลดลง ดังนั้นความเปราะจะมากขึ้น แต่ในสถานที่ที่ต้องทนการกัดกร่อนสูงจะต้องใช้เหล็กท่อ Wrought Iron

##### 2.1.1 ท่อเหล็ก (Steel Pipe)

ใช้ทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม สามารถทนความต่อความดันและความร้อนสูง สารประกอบต่างๆ ที่มีอยู่ภายในส่วนผสมของท่อ โดยเฉพาะโครเมียม (Cr) หรือนิกเกิล (Ni) ซึ่งจะช่วยให้ความแข็งแรงในเนื้อวัสดุมากขึ้น มาตรฐานของท่อ (Standards Steel Pipe) ถูกเรียกและกำหนดโดย Nominal Diameter ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ถูกเรียกนี้ จะมีขนาดน้อยกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อจะขึ้นอยู่กับหนาของท่อแต่ละชนิด

ประเภทและขนาด จะนับค่า Nominal Diameter จะหมายถึงขนาดที่เรียกกันในท่อเหล็กเหนียว แต่เส้นผ่านศูนย์กลางนอก (Outside Diameter) จะเท่ากันและโตกว่า Nominal Diameter

### 2.1.2 ท่อประปา (Galvanized Steel Pipe)

เป็นท่อที่ทำจากท่อเหล็ก แต่นำไปชุบสังกะสีเพื่อช่วยป้องกันการเกิดสนิมและการกัดกร่อนเมื่อใช้กับน้ำ การเรียกขนาดของท่อเช่นเดียวกับท่อเหล็กเหนียว การอบสังกะสีจะต้องให้ได้ความหนาตามฐานงานอุตสาหกรรม

### 2.1.3 ท่อเหล็กหล่อ

จะใช้กับงานขนส่งน้ำ แก๊ส โดยเฉพาะใช้เป็นท่อส่งน้ำไฮโดรค การใช้งานนิยมใช้กับงานฝังดิน เนื่องจากท่อเหล็กหล่อผลิตจากเหล็กที่มีคาร์บอนสูง ซึ่งสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี การต่อบรรจบทำได้โดยการสวมกับบารองรับ(ปากระฆัง) เพราะสะดวกในการต่องานในร่องดิน ซึ่งจะง่ายต่อการต่อด้วยการเชื่อมหรือการต่อการต่อเกลียว ท่อเหล็กหล่อมีความทนทานต่อการกัดกร่อนมากกว่าท่อ Wrought และท่อเหล็ก แต่ก็ไม่เหมาะกับที่ที่มีความดันสูง อุณหภูมิและงานสั้นสะเทือน สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ไม่ควรเกิน 230 °F และน้ำมัน 150 °F สำหรับขนาดที่เรียกใช้ จะต้องบอกขนาดที่เรียกใช้และตามความหนาของท่อด้วย

### 2.1.4 ท่อทองเหลืองและท่อทองแดง(Brass & Copper Pipe)

ท่อทองเหลืองและท่อทองแดง จะผลิตขึ้น 2 ชนิด คือ ทนแรงดันได้สูงมาก (Extra Strong) และแบบทนแรงดันได้ปานกลางมีขนาดตั้งแต่ 1/8 นิ้ว ถึง 12 นิ้ว ขนาดของท่อจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่านั้น ไม่เหมือนกับท่อเหล็กเหนียว และเนื่องจากท่อชนิดนี้ราคาค่อนข้างแพง การใช้ท่อทองเหลืองและท่อทองแดงจะนิยมใช้กับงานที่ต้องการความคงทนและยาวนานเท่านั้น การเดินท่อชนิดนี้จะต้องมีจุดรองรับมากกว่าท่อโลหะชนิดอื่นๆ

### 2.1.5 ท่อตะกั่ว (Lead Pipe)

ท่อตะกั่วเป็นท่อที่ทนต่อสารเคมีหลายชนิด จะใช้กับงานอุตสาหกรรมเคมีและการขนส่งกรดและสารเคมีต่างๆ

### 2.1.6 ท่ออะลูมิเนียม (Aluminum Pipe)

จะมีน้ำหนักเบาประมาณ 1 ใน 3 ในท่อเหล็กเหนียวที่มีใช้ในงานอุตสาหกรรม จากความแข็งแรงของวัสดุ อุณหภูมิและความดัน จะมีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุ ฉะนั้นต้องออกแบบการเลือกใช้งานต้องคำนึงถึงความแข็งแรงของงาน และอุณหภูมิของงานที่มีความร้อนมาประกอบกับการพิจารณาการเลือกใช้ท่อ เพื่อความปลอดภัยและประหยัด

### 2.1.7 ท่อโลหะผสม (Alloys Pipe)

โลหะผสม (Alloys) ใช้ในงานที่มีการกัดกร่อนสูง และช่วยให้เกิดการไหลได้ง่ายทั้งทางความร้อนและทางกล ในงานที่ต้องการความดันสูงๆ ทนอุณหภูมิได้สูงๆ จะนิยมใช้ท่อชนิดนี้เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากคุณสมบัติของ Alloys จะทนต่อการกัดกร่อน แม้จะอยู่ในตำแหน่งของของไหลมีอุณหภูมิสูง ยังมีอุณหภูมิสูงมากเท่าไรย่อมเกิดปฏิกิริยาทางเคมีสูงขึ้นก็ตาม

### 2.1.8 ท่อสแตนเลส (Stainless Steel Pipe)

ท่อสแตนเลส เป็นท่อที่มีการผสมของ Alloys ที่ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีได้ดี เพราะมีส่วนประกอบของโครเมียม (Cr) ในเนื้อวัสดุ (Steel) ตั้งแต่ 10% หรือมากกว่า นอกจากนี้ยังสามารถต้านทานการเกิดสนิมได้ดี ตามมาตรฐาน AISI ของอเมริกา (American Iron Steel) ได้กำหนดท่อสแตนเลสไว้ให้มีมาตรฐานที่แน่นอน AISI ได้กำหนดให้ท่อสแตนเลสมี 2 ชนิด คือ AISI Series 300 จะมีโลหะผสมของโครเมียมและนิกเกิล และ AISI Series 400 แต่บางครั้งจะเรียกท่อชนิดนี้ใหม่โดยเรียกเหล็กสแตนเลส AISI Series 300 ว่าท่อออสเทนติก (Austenitic) โดยมีส่วนของโลหะโครเมียม และ AISI Series 400 อาจเรียกว่าท่อ มาเทนทิสติก (Martensitic) หรือท่อ Ear rite

### 2.1.9 ท่อไททาเนียม (Titanium Pipe)

ใช้กับงานท่อพิเศษ โดยมากจะใช้ในอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษและเคมี Alloys มากมายที่มีส่วนผสมของอลูมิเนียม โครเมียมและแมงกานีส เมื่อนำมาผสมกับไททาเนียมจะทำให้ท่อนั้นมีความคงทนยิ่งขึ้น แต่เนื่องจากราคาสูงมากจึงไม่นิยมใช้ ที่มีใช้มากคืองานโครงการอวกาศ

## 2.2 ท่อโลหะ (Non-Metallic)

เป็นท่อที่ใช้แรงดันไม่มากนักและอุณหภูมิไม่สูงเกินไป

### 2.2.1 ท่อพลาสติก (Plastic Pipe)

นิยมใช้อย่างแพร่หลายมากในบรรดาท่อโลหะทั้งหมด สามารถใช้กับงานที่มีความดันไม่มากนัก และอุณหภูมิต่ำ จุดสำคัญของท่อก็คือ ไม่สามารถทนความร้อนได้และยังไม่สามารถทนต่อความร้อนของแสงอาทิตย์ได้ เมื่อต้องนำมาใช้งาน จุรรองรับของท่อจะมากกว่าท่อทำจากโลหะ

### 2.2.2 ท่อ PVC (PVC Pipe)

ผลิตครั้งแรกจากประเทศเยอรมัน ปัจจุบันใช้งานที่ต้องการความแข็งแรงปานกลาง และสามารถรับแรงเสียดทานได้ไม่มากนัก ใช้ได้ดีทั้งท่อน้ำใช้และท่อน้ำทิ้ง ณ ความดันและอุณหภูมิไม่สูงเกินไป ท่อชนิดนี้ต้านทานสารเคมีที่กัดกร่อนได้สูง

### 2.2.3 ท่อแก้ว (Glass Pipe)

ท่อแก้วใช้ในงานอุตสาหกรรมที่มีอุณหภูมิไม่เกิน 400 °F ทนแรงดันและแรงสั่นสะเทือนได้ไม่มากนัก เหมาะกับงานที่เป็นอาหารต่างๆ เป็นส่วนมาก เช่น งานในอุตสาหกรรมเคมี เครื่องดื่ม อาหาร ยา พบได้ใน งานอุตสาหกรรมกระดาษและท่อน้ำ การต่อท่อแก้วจะต้องใช้ข้อต่อชนิดพิเศษที่ทำขึ้นโดยเฉพาะ

### 2.2.4 ท่อใยหิน (Asbestos Pipe)

ท่อใยหินผลิตจากใยหินหลายชนิดมาผสมกันด้วยเครื่องจักร เมื่อเติมน้ำลงไปผสมในเครื่องจักรเพื่อเปลี่ยนสภาพของใยหินให้เป็นใยบางๆ เหมือนใยของไนลอน และซ้อนๆกันเป็นท่อ การซ้อนกันนั้นจะอาศัยเครื่องอัด เพื่อทำให้เป็นผนังท่อตามความหนาที่ต้องการ ข้อดีของท่อใยหินคือน้ำหนักเบา คงทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ ไม่ผุกร่อน ไม่เป็นสนิม ไม่เป็นสื่อไฟฟ้าหรือความร้อน สะดวกและสวยงาม

## 2.3 คุณสมบัติของธาตุที่ใช้ทำท่อ

### 2.3.1 คุณสมบัติของคาร์บอน (Carbon)

สัญลักษณ์ทางเคมี คือ C เป็นธาตุที่สำคัญที่สุด จะต้องผสมอยู่ในเนื้อเหล็ก มีคุณสมบัติทำให้เหล็กแข็งเพิ่มขึ้น หลังจากนำไปอบชุบ (Heat Treatment) โดยรวมตัวกับเนื้อเหล็ก เป็นสารที่เรียกว่า มาร์เทนไซต์ (Martensite) และซีเมนไตต์ (Cementite) นอกจากนั้น คาร์บอนยังสามารถรวมตัวกับเหล็ก และธาตุอื่น ๆ กลายเป็นคาร์ไบด์ (Carbide) ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอของเหล็ก อย่างไรก็ตาม คาร์บอนจะลดความยืดหยุ่น (Elasticity) ความสามารถในการตีขึ้นรูป (Forging) และความสามารถในการเชื่อม (Welding) และไม่มีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อน

### 2.3.2 คุณสมบัติของอลูมิเนียม (Aluminium)

สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Al เป็นธาตุที่นิยมใช้เป็นตัวไล่แก๊สออกซิเจน และไนโตรเจน (Deoxidizer และ Denitrizer) มากที่สุด ซึ่งผสมอยู่เล็กน้อยในเหล็ก จะมีผลทำให้เนื้อละเอียดขึ้นเมื่อใช้ผสมลงในเหล็กที่จะนำไปผ่านกระบวนการอบชุบแข็ง โดยวิธีไนไตรดิง (Nitriding) ทั้งนี้เนื่องจากอลูมิเนียมสามารถรวมตัวกับไนโตรเจน เป็นสารที่แข็งแรงมาก ใช้ผสมลงในเหล็กทนความร้อนบางชนิด เพื่อให้ต้านทานต่อการตกสะเก็ด (Scale) ได้ดีขึ้นอะลูมิเนียม (aluminum หรือ aluminium) เป็นโลหะที่พบในชีวิตประจำวันและใช้ในงานต่าง ๆ รองจากเหล็กและทองแดง เช่น ใช้ทำภาชนะในครัวเรือน ของใช้อื่น ๆ และวัสดุก่อสร้าง อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่นำไปใช้แทนเหล็กและทองแดงมากขึ้นทุกที ข้อดีของอะลูมิเนียมคือเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบากว่าเหล็กและทองแดง (เหล็กมีความหนาแน่น ๗,๘๕๒ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร อะลูมิเนียมมีความหนาแน่น ๒,๖๔๓

กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร) มีราคาถูกและเนื่องจากน้ำหนักเบา จึงใช้อะลูมิเนียมทำลำตัวของเครื่องบิน และอากาศยานแต่เดิมอะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงต่ำ แต่ปัจจุบันมีอะลูมิเนียมผสมโดยผสมกับทองแดง แมกนีเซียม แมงกานีส หรือซิลิกอน ซึ่งโลหะผสมเหล่านี้ มีความแข็งแรง และความแข็ง (hardness) สูงกว่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มาก เนื่องจากอะลูมิเนียมเป็นโลหะที่ไวต่อการรวมตัวกับออกซิเจนมาก แร่อะลูมิเนียมจึงมีอะลูมิเนียมในรูปออกไซด์ทั้งสิ้นทำให้การหลอมอะลูมิเนียมไม่สามารถใช้เตาต่าง ๆ ที่ใช้ถลุงเหล็กหรือทองแดงหรือโลหะอื่นได้ เพราะอะลูมิเนียมเมื่อหลอมออกมาได้จะกลายเป็นออกไซด์ทันที อะลูมิเนียมปนอยู่ทั่วไปบนผิวโลกในรูปของดินเหนียว แร่ที่ใช้ผลิตอะลูมิเนียมคือแร่บอกไซต์ สูตรทางเคมีคือ  $Al_2O_3 \cdot X(H_2O)$  โดยปนอยู่กับออกไซด์ของเหล็ก ซิลิกอน และไทเทเนียม (titanium) ออกไซด์ของอะลูมิเนียมมีชื่อเรียกว่า อะลูมินา (alumina) แร่อะลูมิเนียมจึงเป็นแร่ที่มีราคาถูกเพราะหาได้ง่าย

### 2.3.3 คุณสมบัติของโบรอน (Boron)

สัญลักษณ์ทางเคมี คือ B ช่วยเพิ่มความสามารถชุบแข็งแก่เหล็ก ที่ใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องจักรทั่วไป จึงทำให้ใจกลางของงานที่ทำด้วยเหล็กชุบผิวแข็ง มีความแข็งสูงขึ้น โบรอนสามารถดูดกลืนนิวตรอนได้สูง จึงนิยมเติมในเหล็กที่ใช้ทำจากกัมมันตภาพรังสีนิวเคลียร์

### 2.3.4 คุณสมบัติของเบริลเลียม (Beryllium)

สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Be สปริงนาฬิกาซึ่งต้องต่อต้านอำนาจแม่เหล็ก และรับแรงแปรอยู่ตลอดเวลา นั้น ทำจากทองแดงผสมเบริลเลียม (Beryllium-Coppers Alloys) โลหะผสมนิกเกิล - เบริลเลียม (Ni-Be Alloys) แข็งมาก ทนการกัดกร่อนได้ดี ใช้ทำเครื่องมือผ่าตัด

### 2.3.5 คุณสมบัติของ แคลเซียม (Calcium)

สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Ca แคลเซียมจะใช้ในลักษณะแคลเซียมซิลิไซด์ ( $CaSi$ ) เพื่อลดออกซิเดชั่น (Deoxidation) นอกจากนั้น แคลเซียม ยังช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดสเกลของวัสดุที่ใช้เป็นตัวนำความร้อน

### 2.3.6 คุณสมบัติของซีเรียม (Cerium)

สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Ce เป็นตัวลดออกซิเจนและกำมะถันได้ดี ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้าน Hot Working ของเหล็กกล้า และปรับปรุงความต้านทานการเกิดสเกลของเหล็กทนความร้อน

### 2.3.7 คุณสมบัติของโคบอลต์ (Cobalt)

สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Co ไม่ทำให้เกิดคาร์ไบด์ แต่สามารถป้องกันไม่ให้เหล็กเกิดเนือยหายที่อุณหภูมิสูง ดังนั้น จึงช่วยปรับปรุงให้เหล็กมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ด้วยเหตุนี้ จึงใช้ผสมในเหล็กขึ้นรูปงานร้อน เหล็กทนความร้อน และเหล็กไฮสปีด ธาตุโคบอลต์เมื่อได้รับรังสี



นิวตรอนจะเกิดเป็น โคบอลต์ 60 ซึ่งเป็นสารกัมมันตภาพรังสีอย่างรุนแรง ดังนั้น จึงไม่ควรเติม  
โคบอลต์ลงในเหล็กที่ใช้ทำเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

### 2.3.8 คุณสมบัติของโครเมียม (Chromium)

สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Cr ทำให้เหล็กอบชุบได้ง่ายขึ้น เพราะลดอัตราการเย็นตัววิกฤตลง  
อย่างมาก สามารถชุบในน้ำมันหรืออากาศได้ (Oil or Air Quenching) เพิ่มความแข็งให้เหล็ก แต่ลด  
ความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact) ลง โครเมียมที่ผสมในเหล็กจะรวมตัวกับคาร์บอน เป็น  
สารประกอบพวกคาร์ไบด์ ซึ่งแข็งมาก ดังนั้น จึงทำให้เหล็กทนทานต่อแรงเสียดสี และบริเวณที่  
เป็นรอยคมหรือความคมไม่ลบง่าย ทำให้เหล็กเป็นสนิมได้ยาก เพิ่มความแข็งแรงของเหล็กที่ใช้งาน  
ที่อุณหภูมิสูง เพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารต่าง ๆ ได้ดีขึ้น

### 2.3.9 คุณสมบัติของทองแดง (Copper)

สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Cu เพิ่มความแข็งแรง ถ้ามีทองแดงผสมอยู่ในเหล็กแม้เพียงเล็กน้อย  
เหล็กจะไม่เกิดสนิมเมื่อใช้งานในบรรยากาศ ทองแดงจะไม่มีผลเสียต่อความสามารถในการเชื่อม  
ของเหล็กแต่อย่างไร

### 2.3.10 คุณสมบัติของแมงกานีส (Manganese)

สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Mn ใช้เป็นตัวไล่กำมะถัน (S) ซึ่งเป็นตัวที่ไม่ต้องการในเนื้อเหล็ก จะ  
ถูกกำจัดออกในขณะหลอม ทำให้เหล็กอบชุบแข็งง่ายขึ้น เนื่องจากเป็นตัวลดอัตราการเย็นตัววิกฤต  
(Critical Cooling Rate) ทำให้เหล็กทนทานต่อแรงดึงได้มากขึ้น เพิ่มสัมประสิทธิ์การขยายตัวของ  
เหล็กเมื่อถูกความร้อน แต่จะลดคุณสมบัติในการเป็นตัวนำไฟฟ้า และความร้อน นอกจากนี้  
แมงกานีสยังมีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปหรือเชื่อม เหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณแมงกานีสเพิ่มขึ้น จะ  
ทนต่อการเสียดสีได้ดีขึ้นมาก

### 2.3.11 คุณสมบัติของ โมลิบดีนัม (Molybdenum)

สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Mo ปกติจะใช้ผสมรวมกับธาตุอื่น ๆ เป็นตัวลดอัตราการเย็นตัววิกฤต  
ทำให้อบชุบง่ายขึ้น ป้องกันการเปราะขณะอบคืนตัว (Temper Brittleness) ทำให้เหล็กมีเนื้อละเอียด  
เพิ่มความทนทานต่อแรงดึงแก่เหล็กมากขึ้น สามารถรวมตัวกับคาร์บอนเป็นคาร์ไบด์ได้ง่ายมาก  
ดังนั้น จึงปรับปรุงคุณสมบัติในการตัดโลหะ (Cutting) ของเหล็กไฮสปีดได้ดีขึ้น เพิ่มความต้านทาน  
ต่อการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) แก่เหล็ก อย่างไรก็ตาม เหล็กที่มีโมลิบดีนัมสูงจะตีขึ้นรูป  
ยาก

### 2.3.12 คุณสมบัติของ ไนโตรเจน (Nitrogen)

สัญลักษณ์ทางเคมี คือ N ขณะทำไนโตรดิง (Nit riding) ไนโตรเจนจะรวมตัวกับธาตุบางชนิดในเหล็ก เกิดเป็นสารประกอบไนไตรด์ ซึ่งทำให้ผิวงานมีความแข็งสูงมาก ด้านทานการสึกหรอได้ดีเยี่ยม

### 2.3.13 คุณสมบัติของนิกเกิล (Nickel)

สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Ni เป็นตัวที่เพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกของเหล็ก ดังนั้น จึงใช้ผสมในเหล็กที่จะนำไปชุบแข็งที่ผิว ใช้ผสมกับโครเมียม ทำให้เหล็กทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี ไม่เป็นสนิมง่าย ทนความร้อน

### 2.3.14 คุณสมบัติของ ออกซิเจน (Oxygen)

สัญลักษณ์ทางเคมี คือ O ออกซิเจนเป็นอันตรายต่อเหล็ก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ชนิด ส่วนผสม รูปร่าง และการกระจายตัวของสารประกอบที่เกิดจากออกซิเจนนั้น ออกซิเจนทำให้คุณสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความต้านทานแรงกระแทกลดลง (ตามแนวขวาง) และเปราะยิ่งขึ้น

### 2.3.15 คุณสมบัติของตะกั่ว (Lead)

สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Pb เหล็กฟรีแมชชีนนิ่ง (Free-Machining Steel) มีตะกั่วผสมอยู่ประมาณ 0.20 - 0.50 % โดยตะกั่วจะเป็นอนุภาคละเอียด กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอภายในเนื้อเหล็ก เมื่อนำไปกลึง หรือตัดแต่งด้วยเครื่องมือกลทำให้ขี้กถึงขาดง่าย จึงทำให้ตัดแต่งได้ง่าย ตะกั่วไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลของเหล็ก

### 2.3.16 คุณสมบัติของฟอสฟอรัส (Phosphorus) และกำมะถัน (Sulphur)

สัญลักษณ์ทางเคมี คือ P และ S ตามลำดับเป็นตัวทำลายคุณสมบัติของเหล็ก แต่มักผสมอยู่ในเนื้อเหล็กโดยไม่ได้ตั้งใจ ต้องพยายามให้มีน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ มักจะเรียกสารเหล่านี้ว่า สารมลทิน (Impurities) เหล็กเกรดสูงจะต้องมีฟอสฟอรัสไม่เกิน 0.03 - 0.05 % ส่วนกำมะถันจะทำให้เหล็กเกิด Red Shortness จึงแตกเปราะง่าย โดยทั่วไปจึงจำกัดปริมาณกำมะถันในเหล็กไม่เกิน 0.025 หรือ 0.03 % ยกเว้น เหล็กฟรีแมชชีนนิ่ง (Free Machining) ที่เติมกำมะถันถึง 0.30 % เพื่อให้เกิดซัลไฟด์ขนาดเล็กกระจายทั่วเนื้อเหล็ก ทำให้ขี้กถึงขาดง่าย จึงตัดแต่งด้วยเครื่องมือกลได้ง่าย

### 2.3.17 คุณสมบัติของ ซิลิคอน (Silicon)

สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Si ซิลิคอนจะปรากฏในเหล็กทุกชนิด เนื่องจากสินแร่เหล็กมักมีซิลิคอนผสมอยู่ด้วยเสมอ ซิลิคอนไม่ใช่โลหะ แต่มีสภาพเหมือนโลหะ ใช้เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซิง (Oxidizing) ทำให้เหล็กแข็งแรงและทนทานต่อการเสียดสีได้ดีขึ้น เพิ่มค่าแรงดึงที่จุดคราก (Yield Point) ของเหล็กให้สูงขึ้นมาก ดังนั้น จึงใช้ผสมในการทำเหล็กสปริง (Spring Steels)

ช่วยทำให้เหล็กทนทานต่อการตกสะเก็ด (Scale) ที่อุณหภูมิสูงได้ดี จึงใช้ผสมในเหล็กทนความร้อน เหล็กกล้าที่มีซิลิคอนสูงจะมีเกรนหยาบ

### 2.3.18 คุณสมบัติของ ไทเทเนียม (Titanium)

สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Ti สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Ti ไทเทเนียมเป็นโลหะที่แข็งแรงมาก ทำให้เกิดคาร์ไบด์ได้ดี เป็นธาตุผสมที่สำคัญในเหล็กสแตนเลส เพื่อป้องกันการผุกร่อนตามขอบเกรน นอกจากนี้ ไทเทเนียมยังช่วยทำให้เหล็กมีเกรนละเอียด

### 2.3.19 คุณสมบัติของ วาเนเดียม (Vanadium)

สัญลักษณ์ทางเคมี คือ V ทำให้เหล็กทนต่อความร้อนได้ดี เพิ่มความแข็งแรงให้กับเหล็ก โดยไม่ทำให้คุณสมบัติในการเชื่อม และการดึงเสียไป ทำให้เหล็กมีเนื้อละเอียด รวมตัวกับคาร์บอนที่เป็นคาร์ไบด์ได้ง่าย จึงทำให้ทนทานต่อการสึกกร่อน มักจะผสมในเหล็กขึ้นรูปร้อน (Hot Working Steels) และเหล็กไฮสปีด

### 2.3.20 คุณสมบัติของ ทังสเตน (Tungsten)

สัญลักษณ์ทางเคมี คือ W สามารถรวมตัวกับคาร์บอนเป็น คาร์ไบด์ ที่แข็งแรงมาก จึงทำให้เหล็กที่ผสมทังสเตนมีความแข็งแรงมาก หลังจากผ่านการอบชุบ จึงใช้ทำพวกเครื่องมือคม (Cutting Tools) ต่าง ๆ ทำให้เหล็กเหนียวขึ้น และป้องกันไม่ให้เหล็กเกิดเนื้อหยาบ เนื่องจากการที่เกรนขยายตัว เพิ่มความทนทานต่อการเสียดสีของเหล็ก ดังนั้น จึงนิยมเติมทังสเตนในเหล็กไฮสปีด (Hi-Speed) และเหล็กที่ต้องอบชุบแข็งโดยทั่วไป

### 2.3.21 คุณสมบัติของ PVC

คุณสมบัติ แข็งแรง เหนียวและทนทาน มีความต้านทานต่อไขมันได้ดี การประยุกต์ใช้ ภาชนะที่ต้องการความใสเป็นพิเศษ เช่น น้ำมันพืช และซอสต่าง ๆ

ตารางที่ 2.1 แสดงสารประกอบเคมีของท่อเป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนัก

Grade & Class	Carbon Maximum	Manganese, Maximum	Phosphorus		Sulfur, Maximum	Other
			Minimum	Maximum		
Seamless						
A25,CII	0.21	0.6		0.03	0.03	
A25,CI II	0.21	0.6	0.045	0.08	0.03	
A	0.22	0.9		0.03	0.03	
B	0.28	1.2		0.03	0.03	b,d
X42	0.28	1.3		0.03	0.03	c,d
X46,X52,X56	0.28	1.4		0.03	0.03	c,d
X60,X65,X70	0.28	1.4		0.03	0.03	c,d
Welded						
A25,CII	0.21	0.6		0.03	0.03	
A25,CI II	0.21	0.6	0.045	0.08	0.03	
A	0.022	0.9		0.03	0.03	
B	0.26	1.2		0.03	0.03	b,d
X42	0.26	1.3		0.03	0.03	c,d
X46,X52,X56	0.26	1.4		0.03	0.03	c,d
X60	0.26	1.4		0.03	0.03	c,d
X65	0.26	1.45		0.03	0.03	c,d
X70	0.26	1.65		0.03	0.03	c,d

a หมายถึง เปอร์เซนต์น้ำหนักของ ธาตุ columbium (niobium), vanadium, titanium ที่เป็น ส่วนประกอบขึ้นอยู่กับผู้ซื้อและขบวนการผลิต

b หมายถึง เปอร์เซนต์น้ำหนักของ ธาตุ columbium (niobium), vanadium, titanium ที่เป็น ส่วนประกอบขึ้นอยู่กับขบวนการผลิต

c หมายถึง ผลรวมเปอร์เซนต์น้ำหนักของ ธาตุ columbium (niobium), vanadium, titanium ได้ไม่เกิน 0.15% ของส่วนประกอบ

ตารางที่ 2.2 แสดงค่ากำหนด Tensile

ชนิดท่อ	Yield Strength, Min		Ultimate Tensile Strength, Min	
	psi	Mpa	psi	Mpa
A25	25000	172	45000	310
A	30000	207	48000	331
<b>B</b>	<b>35000</b>	<b>241</b>	<b>60000</b>	<b>414</b>
X42	42000	290	60000	414
X46	46000	317	63000	434
X52	52000	359	66000	455
X56	56000	386	71000	490
X60	60000	414	75000	517
X65	65000	448	77000	531
X70	70000	483	82000	565

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าต่ำสุดของการ Test Pressure ของท่อมาตรฐาน API Specification 5L

Size	Specified Outside Diameter D (in )	Specified Wall Thickness t (mm )	Plan-End Weight per Unit Length $w_{pe}$ ( lb/ft )	Calculate Inside Diameter d (in )	Minimum Test Pressure ( psi )				
					Grade A	Grade B	Grade X42	Grade X46	Grade X52
2 <sup>3/8</sup>	2.375	4.7752	4.4	1.999	2500	2500	3000	3000	3000
2 <sup>3/8</sup>	2.375	5.5372	5.03	1.939	2500	2500	3000	3000	3000
2 <sup>3/8</sup>	2.375	6.35	5.68	1.875	2500	2500	3000	3000	3000
2 <sup>3/8</sup>	2.375	7.1374	6.29	1.813	2500	2500	3000	3000	3000
2 <sup>3/8</sup>	2.375	11.0744	9.04	1.503	2500	2500	3000	3000	3000
2 <sup>7/8</sup>	2.875	3.9624	4.53	2.563	1950	2280	2730	3000	3000
2 <sup>7/8</sup>	2.875	4.7752	5.4	2.499	2350	2500	3000	3000	3000
2 <sup>7/8</sup>	2.875	5.4864	6.14	2.443	2500	2500	3000	3000	3000
2 <sup>7/8</sup>	2.875	7.0104	7.67	2.323	2500	2500	3000	3000	3000
2 <sup>7/8</sup>	2.875	14.0208	13.71	1.771	2500	2500	3000	3000	3000
3 <sup>1/2</sup>	3.5	4.3688	6.12	3.156	1770	2060	2480	2710	3000
3 <sup>1/2</sup>	3.5	5.4864	7.58	3.068	2220	2500	3000	3000	3000
3 <sup>1/2</sup>	3.5	7.62	10.26	2.9	2500	2500	3000	3000	3000
4	4	4.3688	7.04	3.656	1550	1810	2170	2370	2680
4	4	4.7752	7.66	3.624	1690	1970	2370	2590	2930
4	4	5.7404	9.12	3.548	2030	2370	2850	3000	3000
4	4	6.35	10.02	3.5	2250	2630	3000	3000	3000
4	4	7.1374	11.17	3.438	2530	2800	3000	3000	3000
4 <sup>1/2</sup>	4.5	5.1562	9.32	4.094	1890	2270	2490	2810	3000
4 <sup>1/2</sup>	4.5	6.0198	10.8	4.026	2210	2650	2910	3000	3000
4 <sup>1/2</sup>	4.5	7.1374	12.67	3.938	2620	3000	3000	3000	3000

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าต่ำสุดของการ Test Pressure ของท่อมาตรฐาน API Specification 5L

Size	Specified	Specified	Plan-End	Calculate	Minimum Test Pressure ( psi )				
	Outside	Wall	Weight per	Inside	Grade	Grade	Grade	Grade	Grade
	Diameter	Thickness	Unit Length	Diameter					
D ( in )	t ( mm )	w <sub>pc</sub> ( lb/ft )	d ( in )	A	B	X42	X46	X52	
4 <sup>1/2</sup>	4.5	11.1252	19.02	3.624	2800	3000	3000	3000	3000
4 <sup>1/2</sup>	4.5	17.1196	27.57	3.152	2800	2800	3000	3000	3000
5 <sup>9/16</sup>	5.563	4.7752	10.8	5.187	1420	1700	1870	2110	2270
5 <sup>9/16</sup>	5.563	5.5626	12.51	5.125	1650	1980	2170	2460	2650
5 <sup>9/16</sup>	5.563	7.1374	15.87	5.001	2120	2550	2790	3000	3000
5 <sup>9/16</sup>	5.563	8.7376	19.19	4.875	2600	3000	3000	3000	3000
5 <sup>9/16</sup>	5.563	12.7	27.06	4.563	2800	3000	3000	3000	3000
6 <sup>5/8</sup>	6.625	6.35	17.04	6.125	1360	1580	2380	2600	2940
6 <sup>5/8</sup>	6.625	9.525	25.05	5.875	2040	2380	3000	3000	3000
6 <sup>5/8</sup>	6.625	12.7	32.74	5.625	2720	2800	3000	3000	3000
6 <sup>5/8</sup>	6.625	15.875	40.09	5.375	2800	2800	3000	3000	3000
8 <sup>5/8</sup>	8.625	4.7752	16.96	8.249	780	920	1370	1500	1700
8 <sup>5/8</sup>	8.625	5.1562	18.28	8.219	850	990	1480	1620	1840
8 <sup>5/8</sup>	8.625	6.35	22.38	8.125	1040	1220	1830	2000	2260
8 <sup>5/8</sup>	8.625	7.9248	27.73	8.001	1300	1520	2280	2500	2820
8 <sup>5/8</sup>	8.625	11.1252	38.33	7.749	1830	2130	3000	3000	3000
8 <sup>5/8</sup>	8.625	12.7	43.43	7.625	2090	2430	3000	3000	3000
8 <sup>5/8</sup>	8.625	18.2626	60.77	7.187	2800	2800	3000	3000	3000
8 <sup>5/8</sup>	8.625	20.6248	67.82	7.001	2800	2800	3000	3000	3000

ตารางที่ 2.5 แสดงค่าต่ำสุดของการ Test Pressure ของท่อมาตรฐาน API Specification 5L (ต่อ)

Size	Specified Outside Diameter D (in )	Specified Wall Thickness t (in )	Plan-End Weight per Unit Length $w_{pe}$ (lb/ft )	Calculate Inside Diameter d (in )	Minimum Test Pressure ( psi )				
					Grade	Grade	Grade	Grade	Grade
					A	B	X42	X46	X52
10 <sup>3/4</sup>	10.75	3.9624	17.67	10.438	520	610	1040	1130	1280
10 <sup>3/4</sup>	10.75	6.35	28.06	10.25	840	980	1660	1820	2060
10 <sup>3/4</sup>	10.75	8.7376	38.27	10.062	1150	1340	2280	2500	2830
10 <sup>3/4</sup>	10.75	11.1252	48.28	9.874	1470	1710	2910	3000	3000
10 <sup>3/4</sup>	10.75	12.7	54.79	9.75	1670	1950	3000	3000	3000
10 <sup>3/4</sup>	10.75	15.875	67.65	9.5	2090	2440	3000	3000	3000
10 <sup>3/4</sup>	10.75	20.6248	86.26	9.126	2720	2800	3000	3000	3000
12 <sup>3/4</sup>	12.75	4.7752	25.25	12.374	530	620	1050	1150	1300
12 <sup>3/4</sup>	12.75	5.1562	27.23	12.344	570	670	1140	1250	1410
12 <sup>3/4</sup>	12.75	7.9248	41.48	12.126	880	1030	1750	1910	2160
12 <sup>3/4</sup>	12.75	8.7376	45.62	12.062	970	1130	1930	2110	2390
12 <sup>3/4</sup>	12.75	10.3124	53.57	11.938	1150	1340	2270	2490	2810
12 <sup>3/4</sup>	12.75	12.7	65.48	11.75	1410	1650	2800	3000	3000
12 <sup>3/4</sup>	12.75	19.05	96.21	11.25	2120	2470	3000	3000	3000
12 <sup>3/4</sup>	12.75	25.4	125.61	10.75	2800	2800	3000	3000	3000
14	14	6.35	36.75	13.5	640	750	1280	1400	1580
14	14	7.9248	45.65	13.376	800	940	1590	1740	1970
14	14	10.3124	59	13.188	1040	1220	2070	2270	2560
14	14	12.7	72.16	13	1290	1500	2550	2790	3000
14	14	19.05	106.23	12.5	1930	2250	3000	3000	3000
14	14	25.4	138.97	12	2570	2800	3000	3000	3000
14	14	28.575	154.84	11.75	2800	2800	3000	3000	3000



ตารางที่ 2.6 แสดงค่าต่ำสุดของการ Test Pressure ของท่อมาตรฐาน API Specification 5L (ต่อ)

Size	Specified Outside Diameter D ( in )	Specified Wall Thickness t ( in )	Plan-End Weight per Unit Length $w_{pe}$ ( lb/ft )	Calculate Inside Diameter d ( in )	Minimum Test Pressure ( psi )				
					Grade	Grade	Grade	Grade	Grade
					A	B	X42	X46	X52
16	16	5.1562	34.28	15.594	460	530	910	990	1120
16	16	6.35	42.09	15.5	560	660	1120	1220	1380
16	16	10.3124	67.68	15.188	910	1070	1810	1980	2240
16	16	12.7	82.85	15	1130	1310	2230	2440	2760
18	18	4.7752	35.8	17.624	380	440	750	820	920
18	18	6.35	47.44	17.5	500	580	990	1090	1230
18	18	7.9248	58.99	17.376	620	730	1240	1360	1530
18	18	10.3124	76.36	17.188	810	950	1610	1760	1990
18	18	12.7	93.54	17	1000	1170	1980	2170	2460
18	18	19.05	138.3	16.5	1500	1750	2980	3000	3000
18	18	25.4	181.73	16	2000	2330	3000	3000	3000
18	18	31.75	223.82	223.82	15.5	2500	2800	3000	3000
20	20	6.35	52.78	19.5	450	530	950	1040	1170
20	20	10.3124	85.04	19.188	730	850	1530	1680	1900
20	20	12.7	104.23	19	900	1050	1890	2070	2340
20	20	15.875	129.45	18.75	1130	1310	2360	2590	2930
20	20	19.05	154.34	18.5	1350	1580	2840	3000	3000
20	20	25.4	203.11	18	1800	2100	3000	3000	3000
20	20	28.575	227	17.75	2030	2360	3000	3000	3000
20	20	31.75	250.55	17.5	2250	2630	3000	3000	3000
20	20	34.925	273.76	17.25	2480	2800	3000	3000	3000

## 2.4 การกัดกร่อน

การกัดกร่อน หรือ corrosion คือ การเสื่อมสภาพของ โลหะที่ทำให้สมบัติของ โลหะ เปลี่ยนไปในทางเลวลง โดยโลหะเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบของ โลหะหรือที่เรียกว่าสนิม ซึ่งเป็น ผลลัพธ์ของการกัดกร่อนเป็นเหตุให้โลหะเกิดความเสียหาย ในแต่ละปีโลกมีค่าใช้จ่าย จากปัญหา การกัดกร่อนมากมาย ทั้งที่เป็นการซ่อมแซม บำรุงรักษา หรือการรีไซเคิลใหม่ทดแทน ส่วนที่ชำรุด เสียหายจนไม่อาจใช้การได้อีกต่อไป บางครั้งก็เป็นค่าใช้จ่ายที่มากเกินไป เช่น การออกแบบเพื่อ ใช้ โลหะหนาเกินความจำเป็น นอกจากนี้ยังมีค่าใช้จ่ายของการค้นคว้าวิจัย เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ได้ พัฒนาให้มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง สามารถใช้ได้แม้ในสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน

การกัดกร่อน คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน(oxidation reaction) ของโลหะซึ่งเป็นปฏิกิริยาให้ อิเล็กตรอน โดยที่โลหะประกอบด้วยอะตอมโลหะเกาะเกี่ยวกันตลอดเนื้อโลหะด้วยพันธะโลหะซึ่งเป็นพันธะโควาเลนต์ ที่มีคู่อิเล็กตรอนที่พันธะเป็นชนิดไม่ประจำ โลหะจึงมีอิเล็กตรอนที่ เคลื่อนย้ายได้ ที่ยึดเหนี่ยวทั้งหมดเข้าด้วยกัน โลหะจึงมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า เมื่อโลหะเกิดการ กัดกร่อน อิเล็กตรอนที่พันธะจะหลุดออก ทำให้อะตอมโลหะเปลี่ยนเป็น ไอออนโลหะประจุบวก เมื่อมีการให้และรับอิเล็กตรอนครบเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เรียกว่า เซลล์การกัดกร่อน โลหะที่ให้อิเล็กตรอน เป็นขั้วแอโนด (anode) อิเล็กตรอนเดินทางไปตามเนื้อโลหะ สิ่งแวดล้อมที่รับอิเล็กตรอนเป็นขั้ว แคโทด (cathode) และความชื้นหรือสารละลายที่ผิวโลหะเป็นอิเล็กโทรไลต์(electrolyte)ให้ไอออน เดินทางให้ครบเซลล์ ดังนั้น การกัดกร่อนจึงสามารถเกิดขึ้นได้ทั่วไป อาจกล่าวได้ว่า โลหะเกือบทุก ชนิดเกิดการกัดกร่อนได้เสมอ ต่างกันที่ความยากง่ายของการเกิดการกัดกร่อน และอัตราการกัด กร่อนเร็ว-ช้า สาเหตุของการเกิดการกัดกร่อนจึง มาจากทั้งโลหะและสิ่งแวดล้อม

## 2.5 รูปแบบโดยทั่วไปของการกัดกร่อน

การกัดกร่อนสามารถจำแนกออกเป็นหมวดหมู่ได้หลายลักษณะ โดยใช้เกณฑ์ต่าง ๆ กัน เช่น จำแนกตามกลไกของการกัดกร่อน ตามลักษณะทางกายภาพของการกัดกร่อน หรือตามตัวแปรที่มี อิทธิพลต่อการกัดกร่อน ในที่นี้แบ่งออกเป็นหลักใหญ่ๆด้วยกันคือการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform corrosion) และการกัดกร่อนในบริเวณจำเพาะ (Localized corrosion) corrosion)

### 2.5.1 การกัดกร่อนในบริเวณจำเพาะ (Localized corrosion) แบ่งออกเป็นดังนี้

#### แบบมหภาค (Macroscopic scale)

##### 2.5.1.1 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic corrosion)

##### 2.5.1.2 การสูญเสียส่วนเจือ (Dealloying)

##### 2.5.1.3 การกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting corrosion)

4900221

2.5.1.4 การกัดกร่อนบริเวณซอก (Crevice corrosion)

2.5.1.5 การกัดเซาะ (Erosion corrosion)

2.5.1.6 การกัดกร่อนจากการถูครูด (Fretting corrosion)

**แบบจุลภาค (Microscopic scale)**

2.5.2.1 การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน (Intergranular corrosion)

2.5.2.2 การกัดกร่อนร่วมกับแรงเค้น (Stress corrosion cracking)

2.5.2.3 การกัดกร่อนร่วมกับความล้า (Corrosion fatigue)

2.5.2.4 การแตกร้าวจากไฮโดรเจน (Hydrogen embrittlement)

นอกจากนี้ยังสามารถจำแนกประเภทของการกัดกร่อนตามสภาพการใช้งานของวัสดุได้อีก เช่น การกัดกร่อนในบรรยากาศ (Atmospheric corrosion) การกัดกร่อนโดยจุลินทรีย์ (Microbial corrosion) การกัดกร่อนของวัสดุทางการแพทย์ที่ใช้ฝังในร่างกาย (Corrosion of implant materials) การกัดกร่อนในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี (Corrosion in petroleum and petrochemical industry)

**2.6 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic Corrosion)**

โลหะแต่ละชนิดจะมีค่าศักย์เฉพาะตัว ดังนั้นถ้าหากมีโลหะ 2-ชนิด สัมผัสกันอยู่และมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์และส่วนโลหะเชื่อมต่อนำไฟฟ้าหรือต่อกันอย่างครบวงจรไฟฟ้าเคมี เมื่อเวลาผ่านไปโลหะที่ศักย์ต่ำกว่าจะเกิดการกัดกร่อน (แอโนด) ขณะที่โลหะที่มีศักย์สูงกว่าจะไม่กัดกร่อน (แคโทด) ความต่างศักย์ของโลหะทั้งสอง ยิ่งมากเท่าไรความรุนแรงก็มากขึ้นเท่านั้น

ความต่างศักย์จะทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนระหว่างวัสดุทั้งสอง ทำให้เพิ่มอัตราการกัดกร่อนของโลหะ ที่มีค่าความต้านทานต่อการกัดกร่อนน้อย และจะลดอัตราการกัดกร่อนของโลหะที่มีค่าความต้านทานมากกว่า โดยปกติโลหะที่มีค่าความต่างศักย์มากจะมีการกัดกร่อนค่อนข้างน้อยหรือแทบจะไม่เกิดเลย เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้าและความแตกต่างของโลหะ จึงมีการเรียกการกัดกร่อนแบบนี้ว่า Galvanic Corrosion หรือ Two-metal Corrosion ปริมาณกระแสและการกัดกร่อนขึ้นกับความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะทั้งสอง

วิศวกรรมการออกแบบจะต้องทราบถึงความเป็นไปได้ของการกัดกร่อนแบบ galvanic ตั้งแต่การระบุรายละเอียดของวัสดุที่จะนำไปใช้ในเครื่องจักร บางครั้งเพื่อเป็นการประหยัดอาจใช้วัสดุต่างชนิดกันมาเชื่อมกัน โดยเฉพาะ โลหะที่มีค่าความต่างศักย์กันมากควรระมัดระวังให้ดี ความต่างศักย์ที่เกิดจาก galvanic Cell สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามเวลา เนื่องจากผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่สะสมอยู่ที่ขั้วคาโทดหรืออานโอดจะทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลง

## 2.6.1 การป้องกัน

วิธีการลดหรือป้องกันการกัดกร่อนแบบ galvanic มีหลายวิธีดังนี้

- 2.6.1.1 เลือกใช้วัสดุที่มีค่า galvanic Series ใกล้เคียงกันเท่าที่เป็นได้
- 2.6.1.2 หลีกเลี่ยงอัตราส่วนของพื้นที่แคโทด/แอโนด ปรับให้พื้นที่ทั้งสองใกล้เคียงกัน
- 2.6.1.3 ใช้ฉนวนกัน ในบริเวณที่ใช้โลหะต่างชนิดกันมาสัมผัสกัน
- 2.6.1.4 ใช้สารเคลือบผิวอย่างระมัด คดูแลการเคลือบผิวให้อยู่ในสภาพดี
- 2.6.1.5 เติมสารยับยั้ง เพื่อลดความรุนแรงของการกัดกร่อน
- 2.6.1.6 ออกแบบที่ให้ออกสามารถเปลี่ยนชิ้นงานที่เป็นแอโนดได้ง่าย
- 2.6.1.7 ติดตั้งวัสดุที่สามที่มีค่าความต่างศักย์น้อยกว่าโลหะทั้งสอง เพื่อให้เกิดการกัดกร่อนแทน

## 2.7 การสูญเสียส่วนผสมบางตัว(Selective leaching)

เป็นรูปแบบหนึ่งของการกัดกร่อนซึ่งเกิด โดยการละลายของธาตุบางตัวจากโลหะอัลลอยด์ เป็นผลจากการกระทำซึ่งสิ่งแวดล้อม โลหะที่ว่องไวที่สุด ออกจากอัลลอยด์ เหลือไว้แต่โครงสร้าง พรุณซึ่งเต็มไปด้วยโลหะที่เสถียรที่สุด วัสดุที่เหลือจึงสูญเสียความแข็งแรงทางกายภาพไปมาก การกัดกร่อนแบบนี้มักมีชื่อตามธาตุที่ละลายออกมา เช่น ถ้าสังกะสีละลายออกมาเรียกว่า

Dezincification

โลหะผสมประกอบด้วย โลหะตั้งแต่ 2-ชนิดขึ้นไป จากที่กล่าวมาว่าโลหะจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าเฉพาะตัว ดังนั้น โลหะที่เป็นส่วนผสมที่มีศักย์ต่ำกว่า จะถูกกัดกร่อนไป ตัวอย่างที่พบมากคือ ทองเหลือง (ประกอบด้วยทองแดงและสังกะสี) สูญเสียสังกะสีไปทำให้ทองเหลืองที่เหลืออยู่เป็นทองแดง ส่วนมากและพรุณ ความแข็งแรงต่ำลง การสูญเสียสังกะสีอาจสังเกตได้จากที่เดิมที่เคยมีสีเหลือง เมื่อสูญเสียสังกะสีไป จะทำให้มีสีแดงขึ้น ทองเหลืองที่มีปริมาณสังกะสีผสมอยู่มากจะเกิดการสูญเสียสังกะสีได้ง่าย

### 2.7.1 กลไกการสูญเสียสังกะสีแบ่งเป็นขั้นตอนคือ

- 2.7.1.1 ทองเหลือง (ทองแดงและสังกะสี) ถูกกัดกร่อนหรือละลายลงมาในสารละลาย
- 2.7.1.2 สังกะสียังคงอยู่ในสารละลาย
- 2.7.1.3 ทองแดงกลับไปเป็นโลหะอีกครั้ง โดยติดกับชิ้นงานเดิม

### 2.7.2 การป้องกัน

- 2.7.2.1 ลดความรุนแรงของสภาวะแวดล้อม เช่น กำจัดออกซิเจนจากสารละลาย
- 2.7.2.2 ใช้การป้องกันแบบแคโทด

## 2.8 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม(Pitting Corrosion)

การกัดกร่อนแบบสนิมขุมหรือการกัดกร่อนแบบรูเข็ม เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นมาก โดยเฉพาะกับโลหะที่ได้พัฒนาให้มีฟิล์ม ป้องกันการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้าได้แล้ว แต่เมื่อฟิล์มบางแตกแยกออกเฉพาะบางที่ ก็จะเกิดการกัดกร่อนเฉพาะ ที่กัดกร่อนลึกลงไปเรื่อยๆ ทำให้สังเกตเห็นได้ยาก เนื่องจากผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนได้ปกคลุมเอาไว้ การกัดกร่อน แบบนี้ทำให้ทำนายได้ยาก โดยทั่วไปสนิมขุมมักจะเกิดทิศทางเดียวกันกับแรงโน้มถ่วงของโลก การเกิดการกัดกร่อน ในแนวอื่นก็เกิดได้แต่น้อย

Pitting เป็นลักษณะที่ทำให้เป็นรูหรือหลุมในเนื้อโลหะ รูเหล่านี้อาจมีขนาดเล็กหรือใหญ่ก็ได้ แต่โดยส่วนมากจะมีขนาดเล็ก บางครั้งจะเห็นรูกระจายอยู่ห่างกัน หรืออาจอยู่ใกล้กันจนดูคล้ายผิวโลหะที่ขรุขระ pitting เป็นการกัดกร่อนที่ก่อให้เกิดความเสียหายและรุนแรงที่สุด ซึ่งทำให้อุปกรณ์ เครื่องมือ หรือชิ้นส่วนต่างๆ เกิดความเสียหายเนื่องจากการเจาะลึกด้วยเปอร์เซ็นต์การสูญเสีย น้ำหนักของ โครงสร้างทั้งหมดที่น้อย ลักษณะมักยากที่จะตรวจสอบพบยากเพราะมีขนาดเล็ก นอกจากนั้นยังยากที่จะตรวจวัดเชิงปริมาณและ ตรวจวัดการขยายตัวของสภาพการกัดกร่อนของ pitting ได้ เพราะความลึกและจำนวนของรูที่เปลี่ยนแปลง ภายใต้อาณาเฉพาะสภาวะใดสภาวะหนึ่ง การเกิด pitting ยังยากที่จะทำนายได้จาก การทดสอบในห้องทดลองอีกด้วย บางครั้งอาจใช้เวลานานจึงปรากฏสภาพของการกัดกร่อน การเกิด pitting เป็นการเกิดเฉพาะที่และ เป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่รุนแรง ความเสียหายที่เกิดขึ้นมักจะเกิดอย่างฉับพลัน

### 2.8.1 การป้องกัน

โดยทั่วไป วิธีที่ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนในที่อับก็สามารถนำมาใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนแบบ pitting ได้เช่นกัน วัสดุที่มีการกัดกร่อนหรือมีแนวโน้มที่จะเกิดการกัดกร่อนแบบ pitting ไม่ควรนำมาใช้ในการสร้างโรงงานหรือเครื่องมือ วัสดุแต่ละชนิดมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ต่างกัน เช่นการเติม โมลิบดีนัมลงไป ในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ในปริมาณ 2 % ซึ่งทำให้ได้เหล็กกล้าไร้สนิม 316 โดยจะเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบ pitting โดยจะทำให้เกิดผิว passive ที่มีความเสถียรมากกว่า คือมีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนมาก วัสดุ 2 ชนิดนี้ประพฤติตัวต่างกันคือชนิดหนึ่ง ไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในน้ำทะเลแต่อีกชนิดหนึ่งสามารถใช้ได้บางกรณี

## 2.9 การกัดกร่อนในที่อับ(Crevice Corrosion)

การกัดกร่อนในที่อับคือการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในพื้นที่อับบนผิวโลหะที่สัมผัสโดยตรงกับสารกัดกร่อน การกัดกร่อนประเภทนี้เกี่ยวข้องกับปริมาณของสารละลายที่ค้างอยู่ตามพื้นที่ที่เป็นหลุม หรือพื้นที่ที่เป็นซอก บริเวณแคบๆที่มีสารละลายเข้าไปขังอยู่ได้เป็นเวลานาน โดยไม่มีการถ่ายเท ทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจน ในน้ำหรือสารละลายภายในซอกไม่เท่ากับภายนอก ทำให้เกิดการครบเซลล์การกัดกร่อนชนิดเซลล์ความเข้มข้น โดยบริเวณในซอกจะเกิดเป็นขั้วแอโนดคือเกิดการสูญเสียเนื้อโลหะ

การสัมผัสระหว่างผิวโลหะและผิวที่ไม่ใช่โลหะ สามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนในที่อับได้เช่นกัน ปะเก็นรอยต่อระหว่างยางกับเหล็กกล้า ไร้นิมที่จุ่มอยู่ในน้ำทะเล

เนื่องจากสารละลายที่ขังอยู่มีปริมาณจำกัดและหยุดนิ่ง ออกซิเจนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาแคโทดจึงลดจำนวนลดลงเรื่อยๆ จนหมด แต่ปฏิกิริยาแอโนดก็ยังดำเนินอยู่ จึงทำให้ความเข้มข้นของประจุบวกสูง ดังนั้นเพื่อรักษาสมดุลของประจุไว้ ถ้ามีสารเจือปนโดยเฉพาะคลอรีน ประจุลบของคลอรีนจะเคลื่อนที่เข้ามาในรอยแตก และทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เป็นโลหะ ไฮดรอกไซด์และกรดไฮโดรคลอริก กรดนี้จะกัดผิวของ โลหะออกมาทีละน้อย ส่งผลให้รอยแตกและรอยร้าวขยายตัวไปเรื่อยๆ

### 2.9.1 การป้องกัน

2.9.1.1 ใช้การเชื่อมแบบ butt joint แทนการขั้วหมุดหรือการยึดด้วยสลักเกลียว

2.9.1.2 ปิดบริเวณที่เป็นที่อับ โดยการเชื่อมหรือการบัดกรี

2.9.1.3 ออกแบบถึงความดันให้สามารถระบายน้ำได้ดี พยายามหลีกเลี่ยงรูปร่างที่เป็นมุม

2.9.1.4 ตรวจสอบเครื่องมือและสารแปลกปลอมอยู่เสมอ

2.9.1.5 กำจัดของแข็งที่ลอยอยู่ก่อนเข้ากระบวนการผลิต

2.9.1.6 กำจัดวัสดุเป็ยกที่ตกค้างอยู่ ในระหว่างการหยุดซ่อมประจำปี

2.9.1.7 จัดสถานะสิ่งแวดล้อมให้มีความสม่ำเสมอ

2.9.1.8 ใช้ปะเก็นที่เป็นของแข็งและไม่มีการดูดซึม

2.9.1.9 ใช้การเชื่อมแทนการม้วนเป็นท่อ

## 2.10 การกัดกร่อน-สึกกร่อน(Erosion Corrosion)

เมื่อมีการเสียดสีและการสึกกร่อนต่อ โลหะในสิ่งแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้ด้วย นั้น จะมีผลรวมของการกระทำต่อ โลหะ อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์เชิงกล และเชิงเคมีซึ่งส่งผลให้เกิดการการทำลายและการเสื่อมสภาพของ โลหะอย่างรวดเร็ว

การกัดกร่อนประเภทนี้เริ่มจากการกัดกร่อนที่มีของไหล ไหลผ่านโลหะและมักไหลด้วยความเร็วสูง หากของไหลนี้มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง เมื่อโลหะเริ่มสึกจะทำให้โลหะเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายขึ้น หากโลหะนั้นมีฟิล์มปกคลุมผิวได้ การไหลของของไหล อาจทำให้ฟิล์มถูกทำลายไปบางส่วน ถ้าฟิล์มนี้สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้อย่างง่ายและรวดเร็ว การกัดกร่อนก็จะไม่รุนแรงนัก แต่ถ้าฟิล์มใหม่เกิดขึ้นได้ช้าก็จะทำให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นรุนแรง และรวดเร็ว

## 2.11 การกัดกร่อนแบบถูครูด(Fretting Corrosion)

เป็นการกัดกร่อนที่เกิดในสภาวะบรรยากาศปกติ บริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่าง โลหะ เมื่อโลหะนั้นกำลังถูกแรงกระทำ

### 2.11.1 ปัจจัยพื้นฐานของการเกิด Fretting corrosion

- 2.11.1.1 โลหะที่หันหน้าเข้าหากันนั้น กำลังถูกแรงกระทำ
- 2.11.1.2 มีการสัมผัสบริเวณผิวหน้าสัมผัส ผิวด้านหนึ่งตีกระทบหรือดูอยู่อีกผิวหน้าหนึ่ง
- 2.11.1.3 ระหว่างผิวหน้าโลหะทั้งสองมีการลื่นไถล (เช่นผิวสัมผัสระหว่าง bearing กับเพลา)

### 2.11.2 ผลที่เกิดจาก Fretting corrosion

- 2.11.2.1 สูญเสียเนื้อ โลหะบริเวณพื้นผิวสัมผัสเป็น โลหะออกไซด์ เกิดกับเหล็ก เหล็กกล้า (ferric oxide)
- 2.11.2.2 ทำให้ size tolerance เสีย จากที่เคยเข้ากันได้ก็จะเป็นหลวม
- 2.11.2.3 fretting corrosion ทำให้เกิดการหลวมแล้วก็จะเกิด excessive strain นำไปสู่การเกิดร่องซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของรอยร้าว และเป็น fatigue fracture ในที่สุด

### 2.11.3 กลไกการเกิด Fretting corrosion 2 แนวคิด

- 2.11.3.1 เนื้อ โลหะเป็น particle เล็กๆ ของผิว โลหะที่สัมผัสกัน
- 2.11.3.2 เกิดเป็น oxide แล้วหลุดออกมา

ความชื้นลดความเสียหายจาก fretting corrosion ความชื้นเป็นสารหล่อลื่นเพราะว่า hydrate rust (สนิม+น้ำ) ก่อให้เกิดความเสียหายจากการเสียดสีน้อยกว่าออกไซด์ที่มีสภาพแข็ง และบริเวณที่ขาดออกซิเจนหรือไม่มีออกซิเจนจะทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบถูครูดน้อยลง fretting จะเกิดมากขึ้นเมื่อมีน้ำหนัก

หรือความเค้นมากกระทำมากขึ้นและถ้าอากาศดึงเอา particles ของโลหะเข้ามาพร้อมด้วยแสดงว่ามี tension, shear stress ร่วมด้วย fretting corrosion บางที่เรียกว่า friction oxidation, wear oxidation, false brine ling

#### 2.11.4 การป้องกัน

2.11.4.1 หล่อลื่นด้วยน้ำมันที่มีความหนืดต่ำ คุณสมบัติการเกาะยึดสูง

2.11.4.2 เพิ่ม load เพื่อลด slip ระหว่างผิวหน้าสัมผัส

2.11.4.3 ใช้ปะเก็นเพื่ออุดซบการสั่นสะเทือน ป้องกันออกซิเจน

2.11.4.4 เพิ่มความแข็งแรงผิวหน้าสัมผัส

2.11.4.5 ใช้ Coating หรือ surface treatment เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของผิว โลหะที่สัมผัสกัน

2.11.4.6 เพิ่มความแข็งแรงด้วยการยิงทราย (shot preening)

#### 2.12 การกัดกร่อนตามขอบเกรน(Intergranular Corrosion)

โดยปกติขอบเกรนมักจะเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าเนื้อเกรนอยู่แล้ว โดยขอบเกรนจะแสดงตัวเป็นข้อบกพร่อง(สูญเสียเนื้อโลหะ) ภายในเกรนจะแสดงตัวเป็นข้อบกพร่อง หากบริเวณขอบเกรนมีอนุภาคอื่น ๆ มาตกตะกอนอยู่ หรือมีธาตุหนึ่งมากหรือน้อยเกินไป ขอบเกรนอาจจะถูกกัดกร่อนหรือทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้นอีก เมื่อการกัดกร่อนเกิดขึ้นได้ระยะเวลาหนึ่ง บริเวณพื้นที่ที่แสดงตัวเป็นข้อบกพร่องจะเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไป การกัดกร่อนก็จะเกิดกระจายอยู่ทั่วไปเป็นแบบ Uniform attack กัดเซาะทั้งก้อน บริเวณที่เป็นข้อบกพร่องจะเปลี่ยนตลอดเวลา

แต่ถ้าบริเวณขอบเกรนแสดงตัวเป็นข้อบกพร่องตลอดเวลา การกัดกร่อนก็จะเกิดเฉพาะบริเวณขอบเกรนตลอดเวลา เป็นการกัดกร่อนที่เรียกว่าการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion) เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนได้ หากนำไปใช้งานอย่างไม่เหมาะสม โดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกทนการกัดกร่อนได้ดี แต่ถ้าเหล็กประเภทนี้ได้รับอุณหภูมิในช่วง 500-800 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานพอสมควร จะทำให้เกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรน โครเมียมที่เดิมเคยอยู่ในเนื้อเหล็กและคอยป้องกันการกัดกร่อนให้เหล็กก็จะมารวมตัวกับคาร์บอน ทำให้บริเวณใกล้ๆ หรือชิดกับขอบเกรนมีโครเมียมต่ำกว่าร้อยละ 12 ซึ่งถือว่าบริเวณนี้ไม่ใช่เหล็กกล้าไร้สนิมอีกต่อไป ดังนั้นบริเวณที่มีโครเมียมต่ำตามขอบเกรนจึงถูกกัดกร่อนได้ง่ายกว่าบริเวณอื่น



### 2.12.1 การควบคุมหรือลดการกัดกร่อนตามขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก สามารถทำได้ 3 วิธีคือ

2.12.1.1 การทำ heat treatment ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งปกติจะเรียกว่า quench annealing หรือ solution quenching

2.12.1.2 การเติมธาตุบางตัวที่สามารถรวมตัวเป็นคาร์ไบด์ได้ดี (stabilizer)

2.12.1.3 การลดปริมาณคาร์บอนให้ต่ำกว่า 0.03 เปอร์เซ็นต์

### 2.13 การกัดกร่อนร่วมกับความเค้น (Stress Corrosion)

การกัดกร่อนชนิดนี้จะเกิดกับโลหะที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีสารกัดกร่อน และมีความเค้นแรงดึงกระทำกับ โลหะ ความเค้นนี้อาจเป็นความเค้นตกค้าง หรือความเค้นภายนอกที่มากระทำ การเสียหายแบบนี้ผิวโลหะอาจไม่ถูกกัดกร่อน หรือไม่เปลี่ยนแปลงเลย แต่ในเนื้อโลหะจะมีรอยร้าวเล็กๆ อยู่มากรมาย ตัวอย่างโลหะที่เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ เช่น ทองเหลืองจะไม่ทนต่อแอมโมเนีย ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิมจะไม่ทนต่อไอออนของคลอไรด์ เป็นต้น ลักษณะของการกัดกร่อนที่มีความเค้นเข้ามา เกี่ยวข้อง จะมีลักษณะรอยร้าวเป็นกิ่งก้าน โดยที่รอยร้าวนี้อาจเกิดตามขอบเกรนหรือผ่าเกรนก็ได้

#### 2.13.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อน

2.13.1.1 ความเค้น ต้องเป็นความเค้นดึงซึ่งอาจเป็นความเค้นตกค้างในเนื้อวัสดุ ความเค้นมาจากภายนอก ความเค้นเนื่องจากความร้อนหรืออาจเกิดจากการเชื่อมก็ได้

2.13.1.2 สภาวะแวดล้อม การกัดกร่อนแบบนี้ทำให้โลหะเกิดความเสียหายเนื่องจาก cracking ที่เกิดขึ้น โดยการกระทำร่วมกันของสิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อ การกัดกร่อนกับ tensile stress คำว่า tensile stress มุ่งหมายเอาความเค้นที่กระทำกับโลหะ (applied stress) และความเค้นภายใน (internal residual stress) ในบางกรณีความเค้นอาจเกิดจากการสะสมตัวของผลิตภัณฑ์อันเนื่องจากการกัดกร่อน ตัวอย่าง เช่น นีอิตและสกรู เมื่อถูกวางไว้ในสิ่งแวดล้อมที่เอื้อต่อการกัดกร่อน ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนจะถูกสะสมตัวอยู่ระหว่างนีอิตและสกรู อย่างไรก็ตาม ปริมาณของผลิตภัณฑ์เหล่านี้มากกว่าปริมาณดั้งเดิมของโลหะ มันจึงทำให้เกิด tensile stress ขึ้นบนสกรูซึ่งก็จะเสียหายด้วยกระบวนการ cracking

#### 2.13.2 การกัดกร่อนแบบนี้ปกติมีลักษณะพิเศษคือ

2.13.2.1 ปรากฏการณ์นี้จะเกิดเฉพาะใน โลหะผสมเท่านั้น ในโลหะบริสุทธิ์ไม่เกิด

2.13.2.2 ประเภทของสิ่งแวดล้อมที่จะให้เกิดการแตกหักนั้นมีลักษณะเฉพาะตัว สำหรับโลหะผสมแต่ละชนิด

2.13.2.3 การอบชุบด้วยความร้อนทำให้โครงสร้างเปลี่ยนไปมีผลกับการแตกหัก

2.13.2.4 การป้องกันแบบแคโทดิกเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด

**2.13.3 ตัวแปรที่มีอิทธิพลกับ Stress corrosion cracking ได้แก่**

2.13.3.1 อุณหภูมิ

2.13.3.2 องค์ประกอบสารละลาย

2.13.3.3 องค์ประกอบของโลหะ

2.13.3.4 ขนาดของแรงเค้น

2.13.3.5 โครงสร้างของโลหะ

การแตกหักเสียหาย (Cracking) พบว่ามีทั้งแบบ แยกไปตามขอบเกรน (intergranular cracking) และแบบผ่ากลางเกรน (Trans granular cracking)

**2.13.4 การป้องกัน**

2.13.4.1 ลดความเค้นในเนื้อโลหะลง หรือลดความเค้นที่กระทำกับผิวโลหะ

2.13.4.2 ลดความรุนแรงของสภาวะแวดล้อม

2.13.4.3 เลือกละเอียดที่ทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน

2.13.4.4 ใช้การป้องกันแบบแคโทด

2.13.4.5 ใช้สารยับยั้ง

**2.14 การกัดกร่อนจากความล้า (Fatigue Corrosion)**

ความล้าหรือ Fatigue เป็นอาการของโลหะที่ถูกแรงกระทำซ้ำๆ กัน หรือซ้ำแล้วซ้ำเล่า แรงที่กระทำเป็นได้ทั้ง tensile และ compressive stress จนที่สุดแล้วโลหะนั้นก็แตกหักเสียหาย (fracture) โดยปกติแล้ว การกัดกร่อนแบบนี้เกิดเมื่อขนาดแรงเค้นต่ำกว่าค่า yield point และเกิดเมื่อถูกกระทำซ้ำแล้วซ้ำเล่าในช่วงเวลาหนึ่ง และในสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนด้วย ดังนั้นจึงถูกกระทำทั้งทางกล และทางเคมี โดยมีผลไปลดความต้านทานของโลหะจนถึงจุดที่เกิดความเสียหาย

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 ขั้นตอนการศึกษาข้อมูล

##### 3.1.1 การศึกษาการทดสอบและเครื่องมือทดสอบค่าความหนาของวัสดุ

ในการตรวจสอบรอยบกพร่องภายในของวัสดุ อุปกรณ์ หรือ โครงสร้างต่าง ๆ ว่ามีอยู่หรือไม่ นั้น การทำให้แตกหักแล้วพินิจด้วยตาเป็นวิธีการตรวจสอบที่ถูกต้องแน่นอนที่สุด ยิ่งไปกว่านั้น การวัดระดับความแข็งแรงของวัสดุ อุปกรณ์ และ โครงสร้าง โดยใช้การทดสอบเชิงกล ( ส่วนใหญ่เป็นการทดสอบแบบทำลาย ) ที่กล่าวถึงต่อไปนี้ก็จะเป็นวิธีการทดสอบที่ถูกต้องแน่นอนที่สุด ซึ่งได้แก่

3.1.1.1 การทดสอบความทนทานต่อแรงดึง ( Tension Test )

3.1.1.2 การทดสอบความทนทานต่อการดัดโค้ง ( Bending Test )

3.1.1.3 การทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก ( Impact Test )

3.1.1.4 การทดสอบความทนทานต่อความล้า ( Fatigue Test )

3.1.1.5 การทดสอบความแข็ง ( Hardness Test )

3.1.1.6 การทดสอบการรับแรง ( Load Test )

3.1.1.7 การทดสอบความทนทานต่อการแตกหักด้วยแรงดันภายใน ( Breaking Test by Internal Pressure )

แต่ว่าการทดสอบโดยการทำลายนั้นจะทำให้วัสดุ อุปกรณ์ หรือ โครงสร้างเกิดการแตกหักเสียหายใช้งานอีกไม่ได้ ดังนั้นความเหมาะสมของวิธีการทดสอบของอุปกรณ์ที่ต้องการใช้งานต่อ จึงต้องการเป็นทดสอบแบบไม่ทำลาย

##### 3.1.2 ประเภทของการทดสอบโดยไม่ทำลาย

3.1.2.1 การทดสอบโดยไม่ทำลายเพื่อตรวจหารอยบกพร่องบริเวณผิว

3.1.2.2 การทดสอบโดยการตรวจพินิจ ( Visual Testing )

ตามทฤษฎีแล้วจะใช้สายตาดู ในกรณีที่จำเป็นจะใช้แว่นขยาย , ไม้บรรทัดเว้า ( Convex ruler ) , เกจชนิดพิเศษต่าง ๆ เพื่อวัดขนาดของรอยแตก รอยเหลื่อม ( Overlapped ) หลุมบ่อต่าง ๆ ความสูงของตะเข็บเชื่อมและการเชื่อมเนื้องาน ( Undercut ) เป็นต้น

3.1.2.3 การทดสอบโดยใช้ผงแม่เหล็ก ( Magnetic Particle Testing )

สามารถใช้ตรวจหารอยบกพร่องบริเวณผิวหรือภายใต้ผิวได้ แต่ไม่สามารถใช้กับชิ้นทดสอบที่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กสูง

### 3.1.2.4 การทดสอบโดยใช้การซึมของของเหลว (Liquid Penetrant Testing)

ใช้ตรวจหารอยแตกเฉพาะที่บริเวณผิวพื้นเท่านั้น ใช้กับวัสดุที่เป็นโลหะและอโลหะ โดยทั่วไป

### 3.1.2.5 การทดสอบโดยกระแสไหลวน (Eddy Current Testing)

ใช้ตรวจสอบหารอยขีดข่วนที่ผิววัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าโดยไม่ต้องสัมผัส และสามารถตรวจสอบได้อย่างรวดเร็วใช้ในการตรวจสอบรอยแตกของแท่งหรือท่อ โดยอัตโนมัติ

## 3.1.3 การทดสอบโดยไม่ทำลายเพื่อหารอยบกพร่องภายใน

### 3.1.3.1 การทดสอบโดยใช้รังสี (Radiographic Testing)

เหมาะสำหรับใช้ตรวจสอบรอยบกพร่องที่อยู่ลึกเข้าไปตามแนวรังสีโดยรังสีที่ช่วยในการตรวจยังใช้ตรวจชนิดของรอยบกพร่อง และรูปร่างที่ไม่ดี ทว่า ผิวที่มีการเคลือบหรือรอยแตกที่เอียงทำมุมนั้นไม่สามารถตรวจสอบได้

### 3.1.3.2 การทดสอบโดยใช้อัลตราโซนิก (Ultrasonic Testing)

การตรวจสอบรอยแตกที่แผ่เป็นแผ่นทำได้ดีกว่าการตรวจสอบโดยใช้รังสี ทว่าเพื่อให้การตรวจสอบทำได้ดีจำเป็นต้องเลือกให้การสะท้อนคลื่นนั้นตั้งฉากกับระนาบของรอยแตก และในกรณีของรอยบกพร่องพวกโพรงอากาศ (Blow hole) หรือที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมจะตรวจพบได้ยาก

จากประเภทของการทดสอบโดยไม่ทำลายทั้งหมดนั้น ประเภทที่เหมาะสมกับการทำโครงการฉบับนี้คือ การทดสอบแบบไม่ทำลายโดยการใช้อัลตราโซนิก (Ultrasonic Testing) เพื่อวัดค่าความหนาของวัสดุโดยไม่ทำลายวัสดุ

## 3.2 การทดสอบหาค่าความหนาของวัสดุแบบไม่ทำลายโดยใช้อัลตราโซนิก

วิธีการตรวจหาความหนาโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกนี้มีอยู่ด้วยกันสามวิธีคือ วิธีที่ใช้การสะท้อนกลับของสัญญาณพัลส์, วิธีที่ให้คลื่นส่งผ่าน และวิธีเรโซแนนซ์ ในสามวิธีนี้วิธีการที่ใช้กันมากที่สุดคือวิธีการสะท้อนกลับของสัญญาณพัลส์ ในวิธีการใช้การสะท้อนของสัญญาณพัลส์นี้ สัญญาณพัลส์ช่วงสั้น ๆ จะถูกส่งเข้าไปในเนื้อของวัสดุ เมื่อคลื่นเคลื่อนผ่านเนื้อวัสดุและสะท้อนกลับมาจะได้ระยะความหนาของวัสดุ ณ จุดนั้น ๆ

ผลจากการทดสอบหารอยร้าวโดยคลื่นอัลตราโซนิกนี้ จะถูกแสดงเป็นรูปสองมิติในจอโทรทัศน์สำหรับแสดงผล ลักษณะของการแสดงผลแบบพื้นฐานซึ่งมีการใช้มากที่สุด (A scope) ก็คือ การแสดงผลที่แกนนอนของกราฟในจอซึ่งแสดงผลจากซ้ายไปขวาหมายถึงเวลาที่ผ่านไป และแกนตั้งของกราฟแสดงถึงขนาดหรือความเข้มข้นของสัญญาณของคลื่นสะท้อนกลับที่ตรวจจับได้

คลื่นอัลตราโซนิกที่ใช้ในการตรวจสอบจะถูกส่งหรือตรวจจับโดยตัวทรานสดิวเซอร์ (Transducer ซึ่งทำด้วยผลึกควอตซ์หรือเซรามิก) บรรจุอยู่ในกล่องที่ทำหน้าที่เป็นโพรบ ตัวทรานสดิวเซอร์นี้เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าลงไปจะทำให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิกขึ้นและในทางตรงข้ามเมื่อได้รับคลื่นอัลตราโซนิกก็จะก่อให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นเช่นกัน วิธีการซึ่งใช้ทรานสดิวเซอร์เพียงชุดเดียวในการส่งและตรวจจับคลื่นจะเรียกว่า (Single Probe Technique) และวิธีการใช้ทรานสดิวเซอร์สองตัวสำหรับใช้ในการส่งและตรวจจับคลื่นจะเรียกว่าวิธีการสองโพรบ (Double Probe Technique) โดยในการทดสอบโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกนี้ ถ้าหากว่าระหว่างตัวทรานสดิวเซอร์และผิวของชิ้นวัสดุไม่ได้สัมผัสกันโดยตรง หรือมีช่องว่างเกิดขึ้นและการวางทิศทางของโพรบไม่ตั้งฉากกับชิ้นงานจะทำให้การส่งผ่านคลื่นจากตัวทรานสดิวเซอร์ไปยังชิ้นวัสดุเลวลง ดังนั้นจึงต้องทาสารบางชนิดที่ผิวหน้าของชิ้นวัสดุที่จะตรวจสอบ (เช่น น้ำมันเครื่อง เป็นต้น) การทำเช่นนี้เรียกว่าการทดสอบโดยวิธีการสัมผัสโดยตรง



ตัวเครื่องวัด



หัววัด (โพรบ)

รูปที่ 3.1 : เครื่องมือวัดความหนาชนิดอัลตราโซนิก



รูปที่ 3.2 : แสดงการวัดค่าความหนาโดยใช้เครื่องมือวัดชนิดอัลตราโซนิก

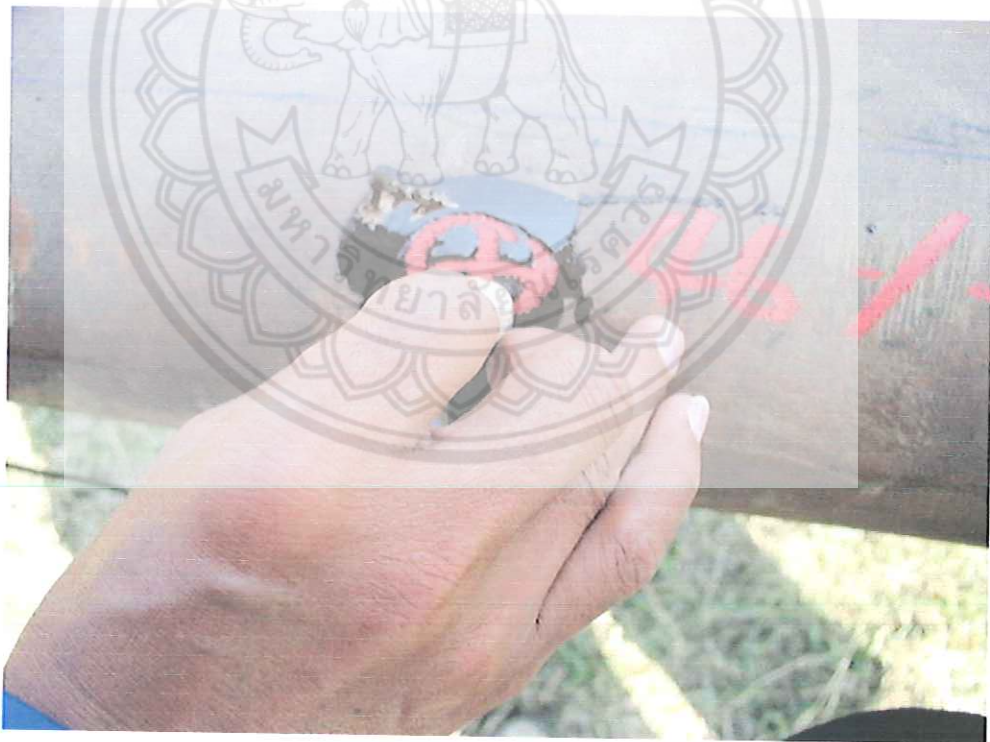
### 3.3 การศึกษาการเก็บข้อมูล

ในการเก็บข้อมูลนั้นจะแบ่งเป็นการเก็บข้อมูล 2 ประเภทด้วยกันคือ ข้อมูลที่เป็นคุณสมบัติของหลุมน้ำมันต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น ปริมาณทราย (ส่วนต่อพันล้านส่วน , ppb) , อุณหภูมิ ( องศาเซลเซียส, °C ) , ความดัน ( ปอนด์ต่อตารางนิ้ว , psig ) , อัตราการไหลของทรพยากรที่เป็นของเหลว(Gross) ( บาร์เรลต่อวัน, bbl/d) , อัตราการไหลของทรพยากรที่เป็นก๊าซ ,( mscft/d) ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลที่ทางบริษัทได้เก็บไว้อยู่แล้วและข้อมูลอีกประเภทคือ ข้อมูลความหนาของท่อที่เสื่อเทียบกับระยะเวลาโดยการเก็บข้อมูลของความหนาของท่อนั้นจะเก็บข้อมูลเป็นรอบการเก็บข้อมูลโดยจะมีรอบการเก็บข้อมูลอยู่ที่ประมาณ 2 – 6 เดือนต่อรอบการเก็บข้อมูล ซึ่งความถี่ในการเก็บข้อมูลจะขึ้นอยู่กับอัตราการลดลงของความหนาของท่อโดยถ้าอัตราการลดลงของความหนาของท่อลดลงมากผิดปกติ จะมีผลทำให้ต้องย่นระยะเวลาในการเก็บข้อมูลของท่อนั้น ๆ ในครั้งต่อไป โดยตัวอย่างตารางการเก็บข้อมูลนั้นได้แสดงในตารางที่ 3.1

Well site A

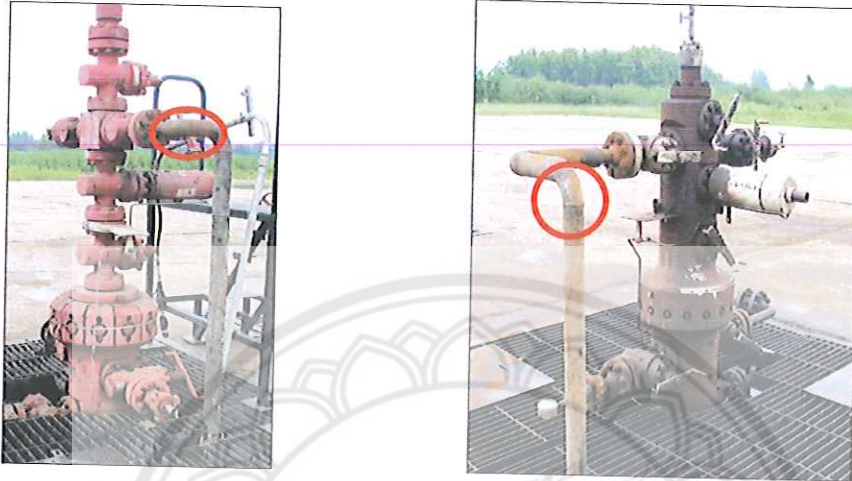
Well	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	4 <sup>th</sup>	5 <sup>th</sup>	6 <sup>th</sup>	7 <sup>th</sup>
Head No.	มี.ย./2004	ก.ค./2004	พ.ย./2004	ก.พ./2005	พ.ค./2005	ก.ค./2005	ก.ย./2005
A-01T	10.3 L1	10.3 L1	-	10.1 L1	-	-	10.1/10.3
A-02T	10.5 L1	10.5 L1,2	-	10.5 L1,2	-	-	10.5/10.5
A-03S	11.0 L1	11.0 L1	-	11.0 L1	-	-	11.0 L1
A-03L	10.4 L2	10.3 L2	-	10.3 L2	-	-	10.5/10.3
A-04T	10.4 L1	10.4 L1	-	10.4 L1	-	-	10.4 L1
A-05T	9.5 L1	9.4 L1	-	9.3 L1	9.3 / 9.9	9.3 / 9.9	9.3/9.9
A-06T	10.3 L1	10.2 L1	-	10.1 L1	-	-	10.1/10.6
A-07T	7.4 L1	*7.1 L1	-	6.4 L1	5.4 / 9.6	5.4 / 9.6	F44/9.6
A-08T	10.4 L2	10.3 L2	-	10.3 L2	-	-	10.8/10.3
A-09T	9.9 L1	9.8 L1	-	9.5 L1	9.5 / 10.6	9.5 / 10.6	9.5/10.6

ตารางที่ 3.1 : ตัวอย่างการเก็บข้อมูลค่าความหนาของท่อ ณ เวลาต่างๆ



รูปที่ 3.3 : การเก็บข้อมูล





รูปที่ 3.4 : ตำแหน่งในการเก็บข้อมูล



รูปที่ 3.5 : แสดงการกักคร่อนภายในท่อ

### 3.4 การศึกษาวิธีการสร้างสมการ

เนื่องจากมีหลายวิธีในการสร้างสมการหลายตัวแปร ไม่ว่าจะเป็นวิธีการถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial Regression) หรือวิธีการถดถอยแบบหลายเชิง (เชิงเส้น) แต่ทางผู้จัดทำเลือกใช้วิธีการถดถอยแบบหลายเชิง (เชิงเส้น) เพราะว่าลักษณะของวิธีการนี้มีความสอดคล้องกับลักษณะของการกระจายของข้อมูลส่วนใหญ่ซึ่งสามารถทราบได้จากค่าการกระจายของข้อมูล (Coefficient of Determination) โดยมีค่าไม่ต่ำกว่า 0.75

#### 3.4.1 การหาค่าตัวแปรโดยวิธีถดถอยแบบหลายเชิง(เชิงเส้น)

จากข้อมูลของตัวแปรตาม  $y$  ที่จะเปลี่ยนแปลงไปตามตัวแปรต้น  $x_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, p$  จำนวนทั้งสิ้น  $p$  ตัว และจำนวนชุดข้อมูลมี  $n$  ชุด โดยเราสามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาสร้างเป็นเมตริกซ์โดยการวางตำแหน่งและการกระทำกับข้อมูลก่อนวางในเมตริกซ์นั้นให้ทำตามทำตามเมตริกซ์ข้างล่างนี้

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_{1i} & \sum_{i=1}^n x_{2i} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{pi} \\ \sum_{i=1}^n x_{1i} & \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{1i} & \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{2i} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{pi} \\ \sum_{i=1}^n x_{2i} & \sum_{i=1}^n x_{2i}x_{1i} & \sum_{i=1}^n x_{2i}x_{2i} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{2i}x_{pi} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{pi} & \sum_{i=1}^n x_{pi}x_{1i} & \sum_{i=1}^n x_{pi}x_{2i} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{pi}x_{pi} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_{1i} \\ \sum_{i=1}^n x_{1i}y_{1i} \\ \sum_{i=1}^n x_{2i}y_{1i} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{pi}y_{1i} \end{bmatrix}$$

เมื่อได้เป็นเมตริกซ์ตามรูปแบบข้างต้นแล้วขั้นตอนต่อไปคือ การหาค่าคงที่  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_p$  โดยใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการคำนวณหาค่าคงที่ดังกล่าว และเมื่อได้ค่าของค่าคงที่มากแล้วก็นำค่าคงที่ที่ได้มาแทนลงในสมการ  $Q$  เพื่อหาค่า  $y$  ที่ได้จากการสร้างสมการใหม่

$$Q = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_px_p \quad (3.1)$$

หลังจากนั้นทำการคำนวณหาความผิดพลาด (E) ของสมการที่ได้เทียบกับค่าของข้อมูลที่ได้จริงตามสมการที่ 3.2

$$E = |((Q - y) / Q)| \times 100\% \quad (3.2)$$

เมื่อ  $Q$  คือ ค่า  $y$  ที่ได้จากการสร้างสมการใหม่

และทำการตรวจสอบค่าการเกาะกลุ่มของข้อมูล(Coefficient of Determination: R - Square)

โดยจะต้องไม่ต่ำกว่า 0.75 เพื่อความน่าเชื่อถือของแต่ละสมการในการนำไปใช้ในสภาวะการทำงานจริง

### 3.5 การศึกษาโปรแกรมในการคำนวณเพื่อแก้สมการหลายตัวแปร

ในการแก้สมการหลายตัวแปรนั้นมีโปรแกรมมากมายที่เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการแก้สมการซึ่งรวมไปถึงโปรแกรม MATLAB ที่ใช้เป็นโปรแกรมเครื่องมือช่วยสำหรับการแก้สมการในการทำโครงการครั้งนี้โดยมีพื้นฐานและวิธีใช้โปรแกรมในการแก้สมการดังต่อไปนี้

ลักษณะของระบบสมการเชิงเส้น

สำหรับระบบสมการเชิงเส้นของค่าตัวแปร  $n$  ตัวซึ่งแต่ละตัวต้องมีกำลัง 1 และไม่อยู่ในรูปของ Nonlinear function ใดๆ เช่น function sin, log เป็นต้น และการที่จะหาค่าได้นั้น อันดับแรกจะต้องมีสมการอิสระทั้งหมดเท่ากับจำนวนตัวแปร  $n$  ซึ่งระบบสมการเชิงเส้นสามารถเขียนในรูปทั่วไปได้เป็น

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2$$

.....

$$a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n = b_n$$

หรือเขียนเป็นสมการ Matrix ได้อยู่ในรูป  $[A]\{x\} = \{b\}$

โดย  $[A]$  เป็น  $[n \times n]$  matrix ส่วน  $\{x\}$  และ  $\{b\}$  เป็น  $[n \times 1]$  vector จากสมการนี้ก็มีกรณีต่างๆ ให้พิจารณา ดังนี้

ถ้า  $\{b\} \neq \{0\}$  ;  $\{x\}$  จะหาค่าได้ ถ้า  $[A]$  มี inverse (หรือ  $\det(A) \neq 0$ )

ถ้า  $\{b\} = \{0\}$  จะหาค่า  $\{x\}$  ที่เป็น non-trivial solution ( $\{x\} \neq 0$ ) ได้ก็ต่อเมื่อ  $\det(A) = 0$

ซึ่งในกรณีนี้เรียก eigenvalue problems

ถ้า  $\{b\} \neq \{0\}$  ; และ  $[A]$  ไม่มี inverse (หรือ  $\det(A) = 0$ ) จะไม่สามารถหาค่า  $\{x\}$  ที่ unique ได้

สำหรับกรณีแรกถ้า  $\{b\} \neq \{0\}$  และ  $[A]$  มี inverse จะได้

$$[A]^{-1}[A]\{x\} = [A]^{-1}\{b\}$$

$$\{x\} = [A]^{-1}\{b\}$$

ใน MATLAB จะหาค่า variable  $x$  สำหรับ  $n$ -linear equations ได้โดยการกำหนดค่า  $[A]$  และ  $\{b\}$  แล้วหาค่า  $x$  สำหรับคำตอบของระบบสมการเชิงเส้น สามารถหาค่าได้โดยไม่ยากนักเมื่อ

ใช้ MATLAB ซึ่งแม้ว่าวิธีการแก้สมการประเภทนี้มีอยู่หลายวิธี แต่สำหรับ MATLAB แล้ววิธีที่นิยมใช้จะมีอยู่ 2 วิธีคือ

### 3.5.1. การหา Inverse

ซึ่งการแก้สมการด้วยวิธีทั้งสองนั้น หากว่าระบบสมการเป็นระบบใหญ่ การแก้สมการจะใช้ Numerical method ซึ่งในวิธีนี้จะไม่ขอก้าวถึงรายละเอียดของวิธีการของการคำนวณแต่จะเป็นเพียงการแนะนำการใช้ MATLAB ช่วยหาคำตอบเท่านั้น

#### การหาคำตอบด้วยการหา Inverse

สำหรับการหาคำตอบของสมการโดยวิธีการใช้ Inverse นั้นดูเหมือนจะเป็นวิธีที่ยุ่งยาก หากว่าจะต้องคำนวณด้วยตัวเอง แต่หากว่าใช้ MATLAB เป็นตัวช่วยในการคำนวณแล้วเราจะได้คำตอบที่

รวดเร็ว สำหรับการหาค่า Inverse ของ Matrix นั้น MATLAB เราจะใช้รูปแบบของการหาค่า  $x$  จากสมการ

$$[A]\{x\} = \{b\}$$

ด้วยคำสั่ง

$$X = \text{inv}(A)*b$$

### 3.5.2 การหาคำตอบโดยการหาร Matrix

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า Matrix นั้นไม่มีคุณสมบัติของการหาร แต่ MATLAB ได้สร้างคุณสมบัตินี้ขึ้นมาเพื่อใช้หาคำตอบของสมการเชิงเส้นโดยเฉพาะ โดย MATLAB ใช้หลักการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ด้วยวิธี Gaussian Elimination ซึ่งจะเป็นการหาคำตอบโดยไม่จำเป็นต้องหา inverse ของ matrix ซึ่งเป็นวิธีการที่ประหยัดเวลาและได้ความถูกต้องมากกว่าการหา inverse ด้วยวิธีเชิงตัวเลขมาก

นอกเหนือจากนี้หากว่า Matrix มีสภาพที่เรียกว่ามี ill-condition หรือสภาพที่ matrix เกือบเป็น singular matrix (คือ matrix ที่มี determinant ใกล้เคียงศูนย์มาก) จะทำให้การหาค่า inverse มีความผิดพลาดมากขึ้นไปอีก เพราะต้องคำนวณตัวเลขที่มี floating point สูงหลายครั้ง แต่สำหรับ Gaussian Elimination Method จะมีวิธีการที่จะตรวจสอบ ill-condition เหล่านี้ทำให้การหาคำตอบมีความแม่นยำกว่ามาก ดังนั้นจากระบบสมการเชิงเส้น

$$[A]\{X\} = \{b\}$$

หากเราต้องการหาคำตอบของสมการโดยใช้ MATLAB โดยวิธีการหาร matrix จะใช้

$$X = A \setminus b$$

## บทที่ 4

## ผลการดำเนินงานและผลการวิเคราะห์

## 4.1 วิธีการคำนวณ

ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิต LKU-F11T

ตัวแปร	X1	X2	X3	X4	X5	y
จำนวนข้อมูล	ความหนา mm	ความดัน Psig	อุณหภูมิ c	GROSS BBL/D	GAS MSCFT/D	ระยะเวลา เดือน
1	9.7	117	43	1481	575	0
2	9.7	118	42	1324	400	1
3	9.6	126	42	1018	399	5
4	9.5	137	40	951	401	8
5	9.5	110	56	1130	416	10
6	9.5	110	43	926	400	13
7	9.5	119	43	822	402	15

สูตรการคำนวณ การถดถอยแบบหลายเชิง (Multiple Regression)

$$\begin{bmatrix}
 n & \sum_{i=1}^n x_{1i} & \sum_{i=1}^n x_{2i} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{pi} \\
 \sum_{i=1}^n x_{1i} & \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{1i} & \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{2i} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{pi} \\
 \sum_{i=1}^n x_{2i} & \sum_{i=1}^n x_{2i}x_{1i} & \sum_{i=1}^n x_{2i}x_{2i} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{2i}x_{pi} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 \sum_{i=1}^n x_{pi} & \sum_{i=1}^n x_{pi}x_{1i} & \sum_{i=1}^n x_{pi}x_{2i} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{pi}x_{pi}
 \end{bmatrix}
 \times
 \begin{bmatrix}
 a_0 \\
 a_1 \\
 a_2 \\
 \vdots \\
 a_p
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \sum_{i=1}^n y_{1i} \\
 \sum_{i=1}^n x_{1i}y_i \\
 \sum_{i=1}^n x_{2i}y_i \\
 \vdots \\
 \sum_{i=1}^n x_{pi}y_i
 \end{bmatrix}$$

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5$$

ตารางที่ 4.2 แสดงวิธีการคำนวณ

ข้อมูล	x1	x2	x3	x4	x5	y	x1×x1	x1×x2	x1×x3	x1×x4	x2×x2	x2×x3	x2×x4
1	9.7	117	43	1481	575	0	94.09	1134.9	417.1	14365.7	13689	5031	173277
2	9.7	118	42	1324	400	1	94.09	1144.6	407.4	12842.8	13924	4956	156232
3	9.6	126	42	1018	399	5	92.16	1209.6	403.2	9772.8	15876	5292	128268
4	9.5	137	40	951	401	8	90.25	1301.5	380	9034.5	18769	5480	130287
5	9.5	110	56	1130	416	10	90.25	1045	532	10735	12100	6160	124300
6	9.5	110	43	926	400	13	90.25	1045	408.5	8797	12100	4730	101860
7	9.5	119	43	822	402	15	90.25	1130.5	408.5	7809	14161	5117	97818
ผลรวม	67	837	309	7652	2993	52.0	641.34	8011.1	2956.7	73356.8	100619	36766	912042

ข้อมูล	x3×x3	x3×x4	x4×x4	x5×x1	x5×x2	x5×x3	x5×x4	x5×x5	x1×y	x2×y	x3×y	x4×y	x5×y
1	1849	63683	2193361	5577.5	67275	24725	851575	330625	0	0	0	0	0
2	1764	55608	1752976	3880	47200	16800	529600	160000	9.7	118	42	1324	400
3	1764	42756	1036324	3830.4	50274	16758	406182	159201	48	630	210	5090	1995
4	1600	38040	904401	3809.5	54937	16040	381351	160801	76	1096	320	7608	3208
5	3136	63280	1276900	3952	45760	23296	470080	173056	95	1100	560	11300	4160
6	1849	39818	857476	3800	44000	17200	370400	160000	123.5	1430	559	12038	5200
7	1849	35346	675684	3819	47838	17286	330444	161604	142.5	1785	645	12330	6030
ผลรวม	13811	338531	8697122	28668.4	357284	132105	3339632	1305287	494.7	6159	2336	49690	20993

เมื่อนำมาเขียนอยู่ในรูป Matrix ตามแบบวิธี การถดถอยแบบหลายเชิง (Multiple Regression) จะได้ว่ารูปดังนี้คือ

$$\begin{bmatrix} 7 & 67 & 837 & 309 & 7652 & 2993 \\ 67 & 641.34 & 8011.1 & 2956.7 & 73356.8 & 28668.4 \\ 837 & 8011.1 & 100619 & 36766 & 912042 & 357284 \\ 309 & 2956.7 & 36766 & 13811 & 338531 & 132105 \\ 7652 & 73356.8 & 912042 & 338531 & 8697122 & 3339632 \\ 2993 & 28668.4 & 357284 & 132105 & 3339632 & 1305287 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 52 \\ 494.7 \\ 6159 \\ 2336 \\ 49690 \\ 20993 \end{bmatrix}$$

นำข้อมูลต่าง ๆ ใน Matrix มาป้อนลงใน MATLAB เพื่อทำการหาค่าคงที่ที่ต้องการไปสร้างเป็นสมการของหลุมผลิตนั้น ๆ

The screenshot shows the MATLAB Command Window with the following code and output:

```

a =
1.0e+006 *
    0.0000    0.0001    0.0008    0.0003    0.0077    0.0030
    0.0001    0.0006    0.0080    0.0030    0.0734    0.0287
    0.0008    0.0080    0.1006    0.0368    0.9120    0.3573
    0.0003    0.0030    0.0368    0.0138    0.3385    0.1321
    0.0077    0.0734    0.9120    0.3385    3.6971    3.3396
    0.0030    0.0287    0.3573    0.1321    3.3396    1.3053

>> b=[52;494.7;6159;2336;49690;20993];
>> x=inv(a)*b

x =
    967.5687
   -94.7874
   -0.2923
   -0.6134
    0.0127
   -0.0111
  
```

The Workspace window shows variables 'a' (6x6 double), 'b' (6x1 double), and 'x' (6x1 double).

รูปที่ 4.1 : แสดงการคำนวณหาค่าคงที่โดยใช้โปรแกรม MATLAB

เมื่อได้ค่าคงที่ที่ต้องการแล้วก็นำไปสร้างเป็นสมการของแต่ละหลุมผลิตได้โดยใช้สมการอ้างอิงตามตัวอย่างข้างล่างนี้คือ

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5$$

จะได้เป็นสมการดังนี้

$$y = 631.399 - 60.3442(X1) - 0.2475(X2) - 0.3354(X3) + 0.0003(X4) - 0.0056(X5)$$

และนำสมการที่ได้นั้นไปคำนวณหาค่าการเกาะกลุ่มของข้อมูล(Coefficient of Determination: R - Square) ตามการคำนวณต่อไปนี้คือ

$$\text{(ค่าการเกาะกลุ่มของข้อมูล)} \quad r^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t}$$

$$\text{โดย } S_t = \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2$$

$$S_r = \sum_{i=1}^n (y - y_{\text{model}})^2$$

เมื่อ  $y$  คือค่าตัวแปรตามที่ได้จากการเก็บข้อมูลจริง  
 $y_{\text{model}}$  คือค่าตัวแปรตามที่ได้จากการแทนค่าในสมการความสัมพันธ์ที่ได้  
 $\bar{y}$  คือเฉลี่ยของตัวแปรตามที่ได้จากการเก็บข้อมูลจริง

ตารางที่ 4.3 แสดงการหาค่า  $S_t$  และ  $S_r$

	$(y - \bar{y})^2$	$(y - y_{\text{model}})^2$
	55.18367348	0.008881178
	41.32653062	0.005393434
	5.897959186	0.011071248
	0.326530612	0.71605444
	6.612244896	0.017424
	31.04081632	2.31222436
	57.32653061	7.55865049
$\Sigma$	197.7142857	10.62969915

$$r^2 = \frac{197.7142857 - 10.62969915}{197.7142857} = 0.946237071$$



และเมื่อทำการคำนวณตามขั้นตอนข้างต้นแล้วจะได้ผลการคำนวณของแต่ละหลุมผลิต  
ดังต่อไปนี้คือ

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต NMM-F11T

ค่าคงที่	ค่าคงที่ที่คำนวณได้	ที่ชุด ข้อมูล	ค่า y ที่ได้จาก สมการ	ค่า y จริง	เปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาด
a0	631.3999	1	-0.09424	0	100
a1	-60.3442	2	0.92656	1	-7.926092212
a2	-0.2475	3	4.89478	5	-2.14963696
a3	-0.3354	4	8.8462	8	9.565689222
a4	0.0003	5	10.132	10	1.302803
a5	-0.0056	6	14.5206	13	10.47201906

หมายเหตุ : ที่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เพราะว่าเป็นการเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกับค่า  
เริ่มต้นที่เป็น 0 ดังนั้นจึงทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เปอร์เซ็นต์

ส่วนของหลุมผลิตที่ไม่มีทรายปริมาณทรายปะปนมาด้วย

ตารางที่ 4.5 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิต W-02T

ตัวแปร	X1	X2	X3	X4	X5	y
จำนวน ข้อมูล	ความหนา mm	ความดัน Psig	อุณหภูมิ c	GROSS BBL/D	GAS MSCFT/D	ระยะเวลา เดือน
1	8.9	129	37	326	300	0
2	8.9	130	50	357	597	1
3	8.7	200	50	515	400	5
4	8.7	130	52	441	496	8
5	8.6	142	52	402	420	10
6	8.6	137	47	445	700	13
7	8.5	130	52	430	465	15

ได้สมการคือ

$$y = 319.6019 - 35.4055(X1) - 0.0492(X2) - 0.0918(X3) + 0.0103(X4) + 0.0063(X5)$$

$$r^2 = 0.999715744$$

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต W-02T

ค่าคงที่	ค่าคงที่ที่คำนวณได้	ที่ชุด ข้อมูลที่	ค่า y ที่ได้จาก สมการ	ค่า y จริง	เปอร์เซ็นต์ความ ผิดพลาด
a0	319.6019	1	-0.00265	0	100
a1	-35.4055	2	0.94515	1	-5.803311644
a2	-0.0492	3	4.96855	5	-0.632981453
a3	-0.0918	4	8.07155	8	0.886446841
a4	0.0103	5	10.1412	10	1.392340157
a5	0.0063	6	13.0531	13	0.406799917

หมายเหตุ : ที่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เพราะว่าเป็นการเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกับค่าเริ่มต้นที่เป็น 0 ดังนั้นจึงทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.7 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิต F-04T

ตัวแปร	X1	X2	X3	X4	X5	y
จำนวนข้อมูล	ความหนา mm	ความดัน Psig	อุณหภูมิ c	GROSS BBL/D	GAS MSCFT/D	ระยะเวลา เดือน
1	8.9	169	47	1845	570	0
2	8.9	170	46	1807	573	1
3	8.7	166	46	1673	517	5
4	8.7	160	47	1637	567	8
5	8.6	164	44	1354	561	10
6	8.6	143	47	1497	574	13
7	8.5	162	45	1447	509	15

ได้สมการคือ

$$y = 212.0208 - 25.2713(X1) - 0.0438(X2) + 0.9224(X3) - 0.0108(X4)$$

$$r^2 = 0.962854468$$

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต NMM-F-04T

ค่าคงที่	ค่าคงที่ที่คำนวณได้	ที่ชุดข้อมูล	ค่า y ที่ได้จากสมการ	ค่า y จริง	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
a0	212.0208	1	0.46083	0	100
a1	-25.5713	2	-0.09497	1	1152.964094
a2	-0.0438	3	6.64169	5	24.71795582
a3	0.9224	4	8.21569	8	2.625342485
a4	-0.0108	5	10.88682	10	8.145813011
a5	0	6	13.02942	13	0.225796697

หมายเหตุ : ที่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เพราะว่าเป็นการเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกับค่าเริ่มต้นที่เป็น 0 ดังนั้นจึงทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.9 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิต D-14

ตัวแปร	X1	X2	X3	X4	X5	y
จำนวนข้อมูล	ความหนา mm	ความดัน Psig	อุณหภูมิ c	GROSS BBL/D	GAS MSCFT/D	ระยะเวลา เดือน
1	9.5	129	55	2557	834	0
2	9.5	117	55	2504	695	1
3	9.4	120	55	2487	776	5
4	9.2	136	55	2347	773	8
5	9.2	126	54	2310	838	10
6	9.2	118	59	2258	801	13
7	9.2	119	54	2283	819	15

ได้สมการคือ

$$y = 364.7073 - 34.0187(X1) - 0.02965(X2) - 0.1298(X3) - 0.0033(X4) + 0.0144(X5)$$

$$r^2 = 0.972567629$$

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต D-14T

ค่าคงที่	ค่าคงที่ที่คำนวณได้	ที่หาค่าข้อมูล ที่	ค่า y ที่ได้จาก สมการ	ค่า y จริง	เปอร์เซ็นต์ความ ผิดพลาด
a0	364.7073	1	-0.28635	9.9	100
a1	-34.0187	2	1.44495	9.9	30.79345306
a2	-0.2965	3	5.17982	9.9	3.471549204
a3	-0.1298	4	7.65836	9.7	-4.461007317
a4	-0.0033	5	11.81126	9.7	15.33502776
a5	0.0144	6	13.17306	9.7	1.313741834

หมายเหตุ : ที่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เพราะว่าเป็นการเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกับค่าเริ่มต้นที่เป็น 0 ดังนั้นจึงทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.11 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิตที่หลุมผลิต A-04T

ตัวแปร	X1	X2	X3	X4	X5	y
จำนวนข้อมูล	ความหนา mm	ความดัน Psig	อุณหภูมิ c	GROSS BBL/D	GAS MSCFT/D	ระยะเวลา เดือน
1	9.8	185	43	571	792	0
2	9.8	163	40	596	788	1
3	9.7	175	37	617	841	5
4	9.6	165	43	656	942	8
5	9.6	140	37	630	768	10
6	9.6	130	36	663	766	13
7	9.6	150	34	692	827	15

ได้สมการคือ

$$y = 263.6484 - 31.875(X1) + 0.0778(X2) + 0.0867(X3) + 0.1128(X4) - 0.0427(X5)$$

$$r^2 = 0.999983806$$

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต A-04T

ค่าคงที่	ค่าคงที่ที่คำนวณได้	ที่ชุดข้อมูล	ค่า y ที่ได้จากสมการ	ค่า y จริง	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
a0	263.6484	1	-0.0151	0	100
a1	-31.875	2	1.004	1	0.398406374
a2	0.0778	3	4.9707	5	-0.589454202
a3	0.0867	4	7.9869	8	-0.16401858
a4	0.1128	5	10.0187	10	0.186650963
a5	-0.0427	6	12.9618	13	-0.294712154

หมายเหตุ : ที่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เพราะว่าเป็นการเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกับค่าเริ่มต้นที่เป็น 0 ดังนั้นจึงทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.13 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิตที่หลุมผลิต C-03T

ตัวแปร	X1	X2	X3	X4	X5	y
จำนวนข้อมูล	ความหนา mm	ความดัน Psig	อุณหภูมิ c	GROSS BBL/D	GAS MSCFT/D	ระยะเวลา เดือน
1	13	216	39	75	1694	0
2	12.9	221	43	70	1763	1
3	12.7	264	38	71	1739	5
4	12.7	270	46	85	1893	8
5	12.7	341	39	55	1534	10
6	12.7	395	38	20	1400	13
7	12.6	382	36	22	1802	15

ได้สมการคือ

$$y = -36.4379 - 0.3796(X1) + 0.0984(X2) + 0.0651(X3) + 0.0399(X4) + 0.0086(X5)$$

$$r^2 = 0.99953697$$

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต C-03T

ค่าคงที่	ค่าคงที่ที่คำนวณได้	ที่ชุดข้อมูล	ค่า y ที่ได้จากสมการ	ค่า y จริง	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
a0	-36.4379	1	-0.0185	0	100
a1	-0.3796	2	1.16576	1	14.21905023
a2	0.0984	3	4.98088	5	-0.383867911
a3	0.0651	4	7.97508	8	-0.312473354
a4	0.0399	5	10.22138	10	2.16585236
a5	0.0086	6	12.92098	13	-0.611563519

หมายเหตุ : ที่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เพราะว่าเป็นการเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกับค่าเริ่มต้นที่เป็น 0 ดังนั้นจึงทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.15 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิตที่หลุมผลิต X-02

ตัวแปร	X1	X2	X3	X4	X5	y
จำนวนข้อมูล	ความหนา mm	ความดัน Psig	อุณหภูมิ c	GROSS BBL/D	GAS MSCFT/D	ระยะเวลา เดือน
1	9.4	330	47	92	2435	0
2	9.4	483	48	93	2319	1
3	9.4	452	48	121	2596	5
4	9.1	320	42	143	2812	8
5	9.0	333	47	117	2077	10
6	9.0	265	45	142	2432	13
7	9.0	550	52	144	1921	15

ได้สมการคือ

$$y = -252.1349 + 42.7915(X1) - 0.0159(X2) - 2.0146(X3) + 0.4905(X4) - 0.039(X5)$$

$$r^2 = 0.994979159$$

ตารางที่ 4.16 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต X-02

ค่าคงที่	ค่าคงที่ที่คำนวณได้	ที่ชุดข้อมูล	ค่า y ที่ได้จากสมการ	ค่า y จริง	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
a0	-252.1349	1	0.333	0	100
a1	42.7915	2	0.9002	1	-11.08642524
a2	-0.0159	3	4.3241	5	-15.63099836
a3	-2.0146	4	8.04005	8	0.498131231
a4	0.4905	5	9.3932	10	-6.459992335
a5	-0.039	6	12.9211	13	-0.610629126

หมายเหตุ : ที่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เพราะว่าเป็นการเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกับค่าเริ่มต้นที่เป็น 0 ดังนั้นจึงทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.17 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิตที่หลุมผลิต B-16T

ตัวแปร	X1	X2	X3	X4	X5	y
จำนวนข้อมูล	ความหนา mm	ความดัน Psig	อุณหภูมิ c	GROSS BBL/D	GAS MSCFT/D	ระยะเวลา เดือน
1	9.4	773	38	306	1328	0
2	9.3	816	39	202	1492	1
3	9.2	815	42	309	2682	5
4	9.0	798	42	308	1283	8
5	9.0	750	37	336	1522	10
6	9.0	830	39	371	1563	13
7	9.0	919	41	387	1911	15

ได้สมการคือ

$$y = 209.9774 - 23.684(X1) + 0.0347(X2) - 0.5903(X3) + 0.0007(X4)$$

$$r^2 = 0.998501332$$

ตารางที่ 4.18 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต B-16T

ค่าคงที่	ค่าคงที่ที่คำนวณได้	ที่ชุดข้อมูล	ค่า y ที่ได้จากสมการ	ค่า y จริง	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
a0	209.9774	1	-0.0481	0	100
a1	-23.684	2	0.8617	1	-16.04966926
a2	0.0347	3	4.8041	5	-4.077766907
a3	-0.5903	4	7.9479	8	-0.655519068
a4	0.0238	5	10.0675	10	0.670474298
a5	0.0007	6	12.5246	13	-3.795730003

หมายเหตุ : ที่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เพราะว่าเป็นการเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกับค่าเริ่มต้นที่เป็น 0 ดังนั้นจึงทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เปอร์เซ็นต์



ตารางที่ 4.19 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิตที่หลุมผลิต S-02T

ตัวแปร	X1	X2	X3	X4	X5	y
จำนวนข้อมูล	ความหนา mm	ความดัน Psig	อุณหภูมิ c	GROSS BBL/D	GAS MSCFT/D	ระยะเวลา เดือน
1	8.1	127	39	128	589	0
2	8.1	130	38	151	806	1
3	7.9	135	38	142	625	5
4	7.9	150	38	145	601	8
5	7.8	150	34	176	607	10
6	7.8	110	34	260	1303	13
7	7.8	180	35	290	1757	15

ได้สมการคือ

$$y = 63.9649 - 16.6107(X1) + 0.0468(X2) + 1.2715(X3) + 0.2097(X4) - 0.0188(X5)$$

$$r^2 = 0.990583452$$

ตารางที่ 4.20 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต S-02T

ค่าคงที่	ค่าคงที่ที่คำนวณได้	ที่ชุดข้อมูล	ค่า y ที่ได้จากสมการ	ค่า y จริง	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
a0	63.9649	1	0.71873	0	100
a1	-16.6107	2	0.33113	1	-201.9961948
a2	0.0468	3	5.40277	5	7.454879627
a3	1.2715	4	7.18507	8	-11.3419911
a4	0.2097	5	10.14804	10	1.458803868
a5	-0.0188	6	12.80604	13	-1.514597799

หมายเหตุ : ที่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เพราะว่าเป็นการเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกับค่าเริ่มต้นที่เป็น 0 ดังนั้นจึงทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.21 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิตที่หลุมผลิต X-05T

ตัวแปร	X1	X2	X3	X4	X5	y
จำนวนข้อมูล	ความหนา mm	ความดัน Psig	อุณหภูมิ c	GROSS BBL/D	GAS MSCFT/D	ระยะเวลา เดือน
1	8.7	352	39	269	1311	0
2	8.7	389	36	252	1054	1
3	8.6	405	52	256	1321	5
4	8.4	429	55	254	1341	8
5	8.4	411	52	314	1437	10
6	8.3	437	51	245	1149	13
7	8.3	490	45	232	1606	15

ได้สมการคือ

$$y = 181.0374 - 23.105 (X1) + 0.0472 (X2) - 0.0413(X3) + 0.017(X4) + 0.0003(X5)$$

$$r^2 = 0.977851493$$

ตารางที่ 4.22 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต X-05T

ค่าคงที่	ค่าคงที่ที่คำนวณได้	ที่ชุดข้อมูลที่	ค่า y ที่ได้จากสมการ	ค่า y จริง	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
a0	181.0374	1	-0.0061	0	100
a1	-23.105	2	1.4981	1	33.24878179
a2	0.0472	3	4.0511	5	-23.42326775
a3	-0.0413	4	9.653	8	17.12421009
a4	0.017	5	9.9761	10	-0.239572578
a5	0.0003	6	12.2957	13	-5.728018738

หมายเหตุ : ที่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เพราะว่าเป็นการเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกับค่าเริ่มต้นที่เป็น 0 ดังนั้นจึงทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เปอร์เซ็นต์

ส่วนของหลุมผลิตที่มีทรายปริมาณทรายปะปนมาด้วย

ตารางที่ 4.23 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิตที่หลุมผลิต LKU-C15

ตัวแปร	X1	X2	X3	X4	X5	X6	y
จำนวนข้อมูล	ความหนา mm	ความดัน Psig	อุณหภูมิ c	ทราย ppb	GROSS BBL/D	GAS MSCFT/D	ระยะเวลา เดือน
1	9.6	140	30	18.61	400	350	0
2	9.6	200	28	8.82	821	231	1
3	9.4	240	25	10.78	1000	500	5
4	9.4	220	27	35.76	889	294	8
5	9.4	195	26	21.72	900	300	10
6	9.4	190	28	9.02	1000	500	13
7	9.4	180	26	11.71	220	250	15

ได้สมการคือ

$$y = 891.6986 - 98.5357 (X1) - 0.0071 (X2) + 2.3716 (X3) - 0.3115(X4) - 0.0283(X) - 0.0283 (X6)$$

$$r^2 = 0.99995147$$

ตารางที่ 4.24 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต LKU-C15

ค่าคงที่	ค่าคงที่ที่คำนวณได้	ที่ชุดข้อมูล	ค่า y ที่ได้จากสมการ	ค่า y จริง	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
a0	891.6986	1	0.007865	0	100
a1	-98.5357	2	1.04545	1	4.347410206
a2	-0.0071	3	5.04105	5	0.814314478
a3	2.3716	4	8.03028	8	0.37707278
a4	-0.3115	5	10.03434	10	0.3422248
a5	-0.0005	6	13.05909	13	0.452481758
a6	-0.0283	7	15.013955	15	0.092946862

หมายเหตุ : ที่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เพราะว่าเป็นการเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกับค่าเริ่มต้นที่เป็น 0 ดังนั้นจึงทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.25 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิตที่หลุมผลิต LKU-D-ext13

ตัวแปร	X1	X2	X3	X4	X5	X6	y
จำนวนข้อมูล	ความหนา mm	ความดัน Psig	อุณหภูมิ c	ทราย ppb	GROSS BBL/D	GAS MSCFT/D	ระยะเวลา เดือน
1	9.8	120	52	2.21	1418	1034	0
2	9.8	120	47	1.09	1565	1195	1
3	9.8	109	48	2.43	1565	1195	5
4	9.8	97	65	2.86	1619	1108	8
5	9.8	309	70	3.02	1600	1300	10
6	9.8	320	49	4.33	1615	1346	13
7	9.8	300	48	2.51	1863	1303	15

ได้สมการคือ

$$y = \text{INFINITY}$$

ตารางที่ 4.26 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต LKU-D-ext13

ค่าคงที่	ค่าคงที่ที่คำนวณได้	ที่ชุดข้อมูล	ค่า y ที่ได้จากสมการ	ค่า y จริง	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
a0	inf	1	inf	0	inf
a1	inf	2	inf	1	inf
a2	inf	3	inf	5	inf
a3	inf	4	inf	8	inf
a4	inf	5	inf	10	inf
a5	inf	6	inf	13	inf
a6	inf	7	inf	15	inf

หมายเหตุ :  $y = \text{INFINITY}$  เพราะไม่มีการกักกรองของท่อ เมื่อสภาวะต่างๆเปลี่ยนแปลงที่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด inf เพราะว่าค่า y ที่ได้จากสมการเป็นค่า inf

ตารางที่ 4.27 แสดงข้อมูลที่หุลุมผลิตที่หุลุมผลิต LKU-D14

ตัวแปร	X1	X2	X3	X4	X5	X6	y
จำนวนข้อมูล	ความหนา mm	ความดัน Psig	อุณหภูมิ c	ทราย ppb	GROSS BBL/D	GAS MSCFT/D	ระยะเวลา เดือน
1	9.5	190	59	1.76	1797	228	0
2	9.5	100	54	1.73	2800	700	1
3	9.4	170	50	2.66	2600	550	5
4	9.2	68	50	1.98	2622	530	8
5	9.2	69	50	2.99	2700	600	10
6	9.2	71	54	3.15	3000	650	13
7	9.2	76	61	1.57	2888	600	15

ได้สมการคือ

$$y = 106.0877 - 15.7968(X1) + 0.0007(X2) + 0.1813(X3) + 0(X4) + 0.0243(X5) - 0.046(X6)$$

$$r^2 = 0.963405996$$

ตารางที่ 4.28 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หุลุมผลิต LKU-D14

ค่าคงที่	ค่าคงที่ที่คำนวณได้	ที่ชุดข้อมูล	ค่า y ที่ได้จากสมการ	ค่า y จริง	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
a0	106.0877	1	0.0269	0	100
a1	-15.7968	2	1.7183	1	41.80294477
a2	0.0007	3	4.66178	5	-7.255168627
a3	0.1813	4	9.20434	8	13.08447971
a4	0	5	7.88044	10	-26.89646771
a5	0.0243	6	13.59704	13	4.390955679
a6	-0.046	7	14.44804	15	-3.820310575

หมายเหตุ : ที่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เพราะว่าเป็นการเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกับค่าเริ่มต้นที่เป็น 0 ดังนั้นจึงทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.29 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิตที่หลุมผลิต LKU-F22

ตัวแปร	X1	X2	X3	X4	X5	X6	y
จำนวนข้อมูล	ความหนา mm	ความดัน Psig	อุณหภูมิ c	ทราย ppb	GROSS BBL/D	GAS MSCFT/D	ระยะเวลา เดือน
1	9.3	99	40	59.74	104	337	0
2	9.2	115	39	38.72	118	340	1
3	9.1	112	33	30.25	127	399	5
4	9.8	105	34	8.76	147	370	8
5	8.8	196	33	0	151	365	10
6	8.8	151	31	0	148	351	13
7	8.8	100	37	0	154	374	15

ได้สมการคือ

$$y = 8.0792 - 8.1512(X1) - 0.00653(X2) - 0.8424(X3) + 0.6262(X4) + 0.9884(X5) - 0.0959(X6)$$

$$r^2 = 0.999999523$$

ตารางที่ 4.30 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต LKU-F22

ค่าคงที่	ค่าคงที่ที่คำนวณได้	ที่ชุดข้อมูล	ค่า y ที่ได้จากสมการ	ค่า y จริง	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
a0	8.0792	1	-0.003172	0	100
a1	-8.1512	2	0.996724	1	-0.328676745
a2	-0.0653	3	4.99573	5	-0.085472994
a3	-0.8424	4	7.996652	8	-0.041867522
a4	0.6262	5	9.99554	10	-0.0446199
a5	0.9884	6	12.99624	13	-0.028931445
a6	-0.0959	7	14.99684	15	-0.021071106

หมายเหตุ : ที่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เพราะว่าเป็นการเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกับค่าเริ่มต้นที่เป็น 0 ดังนั้นจึงทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.31 แสดงข้อมูลที่หลุมผลิตที่หลุมผลิต LKU-X02

ตัวแปร	X1	X2	X3	X4	X5	X6	y
จำนวนข้อมูล	ความหนา mm	ความดัน Psig	อุณหภูมิ c	ทราย ppb	GROSS BBL/D	GAS MSCFT/D	ระยะเวลา เดือน
1	9.8	228	38	200.58	100	915	0
2	9.7	272	29	374.2	102	866	1
3	9.6	121	36	32.68	103	824	5
4	9.5	152	38	36.88	98	863	8
5	9.5	217	36	36.08	106	1011	10
6	9.3	97	40	11.72	130	900	13
7	9.3	140	39	7.21	112	564	15

ได้สมการคือ

$$y = 399.774 - 41.958 (X1) - 0.0002(X2) + 0.5361(X3) + 0.017(X4) - 0.1702(X5) + 0.0052(X6)$$

$$r^2 = 0.947519814$$

ตารางที่ 4.32 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่หลุมผลิต LKU-X02

ค่าคงที่	ค่าคงที่ที่คำนวณได้	ที่ชุดข้อมูล	ค่า y ที่ได้จากสมการ	ค่า y จริง	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
a0	399.774	1	0.05966	0	100
a1	-41.958	2	1.7781	1	43.76019346
a2	-0.0002	3	3.56236	5	-40.35639295
a3	0.5361	4	9.94936	8	19.59281803
a4	0.017	5	8.25856	10	-21.08648481
a5	-0.1702	6	13.74244	13	5.402534048
a6	0.0052	7	14.43747	15	-3.896319785

หมายเหตุ : ที่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เพราะว่าเป็นการเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกับค่าเริ่มต้นที่เป็น 0 ดังนั้นจึงทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 100 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.33 แสดงอายุการทำงานของท่อที่ได้จากการคำนวณ

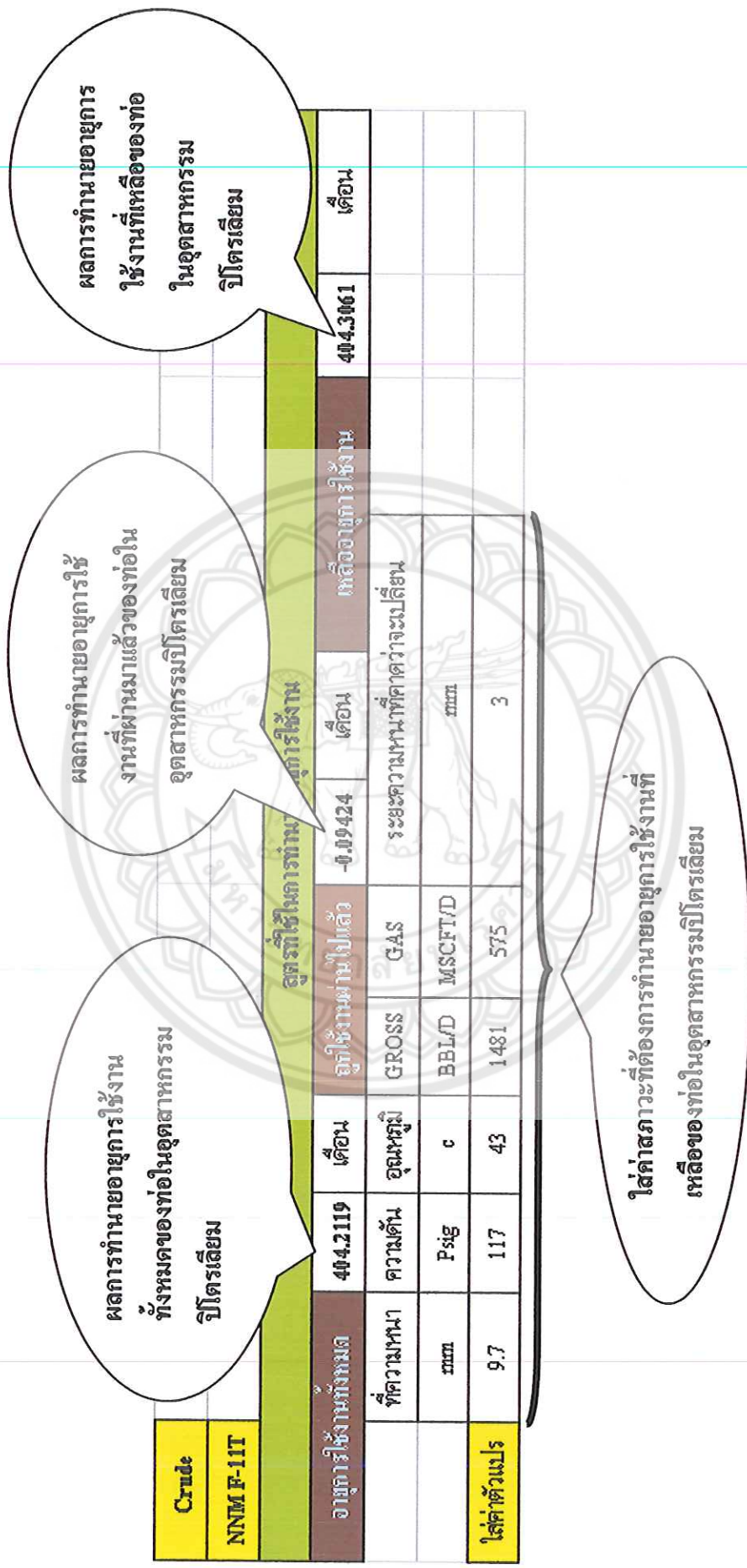
ที่ปริมาตรทราย =100ppb

ที่ปริมาตร Gross = 100 bb/d

ความดัน	flow =0	flow =100	flow =200	flow =300	flow =400	flow =500	flow =600	flow =700	flow =800	flow =900	flow =1000	flow =1100	flow =1200	flow =1300	flow =1400	flow =1500
psig	mscft/d	mscft/d	mscft/d	mscft/d	mscft/d	mscft/d	mscft/d	mscft/d	mscft/d	mscft/d	mscft/d	mscft/d	mscft/d	mscft/d	mscft/d	mscft/d
0	436.95	436.39	435.83	435.27	434.71	434.15	433.59	433.03	432.47	431.91	431.35	430.79	430.23	429.67	429.11	428.55
10	434.48	433.92	433.36	432.80	432.24	431.68	431.12	430.56	430.00	429.44	428.88	428.32	427.76	427.20	426.64	426.08
20	432.00	431.44	430.88	430.32	429.76	429.20	428.64	428.08	427.52	426.96	426.40	425.84	425.28	424.72	424.16	423.60
30	429.53	428.97	428.41	427.85	427.29	426.73	426.17	425.61	425.05	424.49	423.93	423.37	422.81	422.25	421.69	421.13
40	427.05	426.49	425.93	425.37	424.81	424.25	423.69	423.13	422.57	422.01	421.45	420.89	420.33	419.77	419.21	418.65
50	424.58	424.02	423.46	422.90	422.34	421.78	421.22	420.66	420.10	419.54	418.98	418.42	417.86	417.30	416.74	416.18
60	422.10	421.54	420.98	420.42	419.86	419.30	418.74	418.18	417.62	417.06	416.50	415.94	415.38	414.82	414.26	413.70
70	419.63	419.07	418.51	417.95	417.39	416.83	416.27	415.71	415.15	414.59	414.03	413.47	412.91	412.35	411.79	411.23
80	417.15	416.59	416.03	415.47	414.91	414.35	413.79	413.23	412.67	412.11	411.55	410.99	410.43	409.87	409.31	408.75
90	414.68	414.12	413.56	413.00	412.44	411.88	411.32	410.76	410.20	409.64	409.08	408.52	407.96	407.40	406.84	406.28
100	412.20	411.64	411.08	410.52	409.96	409.40	408.84	408.28	407.72	407.16	406.60	406.04	405.48	404.92	404.36	403.80
110	409.73	409.17	408.61	408.05	407.49	406.93	406.37	405.81	405.25	404.69	404.13	403.57	403.01	402.45	401.89	401.33
120	407.25	406.69	406.13	405.57	405.01	404.45	403.89	403.33	402.77	402.21	401.65	401.09	400.53	399.97	399.41	398.85
130	404.78	404.22	403.66	403.10	402.54	401.98	401.42	400.86	400.30	399.74	399.18	398.62	398.06	397.50	396.94	396.38
140	402.30	401.74	401.18	400.62	400.06	399.50	398.94	398.38	397.82	397.26	396.70	396.14	395.58	395.02	394.46	393.90
150	399.83	399.27	398.71	398.15	397.59	397.03	396.47	395.91	395.35	394.79	394.23	393.67	393.11	392.55	391.99	391.43



โดยตารางข้างต้นเป็นตัวอย่างค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ที่ถูกสร้างขึ้นจากข้อมูลและวิธีการข้างต้น ซึ่งค่าที่ได้สามารถแทนค่าในโปรแกรมการคำนวณต่อไป



รูปที่ 4.2 : แสดงโปรแกรมการคำนวณอายุการใช้งานของท่อ

## 4.2 สรุปผลการทดสอบ

เมื่อนำข้อมูลที่ได้ทั้งหมด 15 ข้อมูลมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์ตามขั้นตอนข้างต้น พบว่ามีข้อมูล 14 ข้อมูลที่สมการความสัมพันธ์มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดต่ำและมีค่าการเกาะกลุ่มของข้อมูล (Coefficient of Determination: R - Square) มากกว่า 0.9 ซึ่งถือว่ามีค่าความแม่นยำที่สามารถนำโปรแกรมที่ได้นี้ไปใช้งานในการทำนายอายุการใช้งานของท่อในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมที่สภาวะการทำงานจริงได้

## 4.3 ผลการวิเคราะห์

เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาสร้างเป็นสมการตามขั้นตอนข้างต้นพบว่า สมการแต่ละสมการนั้นมีค่าของค่าคงที่ที่แตกต่างกัน โดยแบ่งความแตกต่างออกเป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ

### 4.3.1 ความแตกต่างของเครื่องหมายหน้าค่าคงที่ที่เป็นบวกกับลบ

จากการสังเกตข้อมูลที่นำมาหาความสัมพันธ์พบว่าเมื่อข้อมูลมีแนวโน้มการเปลี่ยนค่าที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงไปในทิศทางที่ตรงข้ามกับค่าของระยะเวลา (ค่าตัวแปร  $y$ ) ก็จะทำให้ค่าคงที่นั้น ๆ ที่คำนวณได้จะมีค่าติดลบ แต่ถ้ามีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงไปในทิศทางเดียวกันกับค่าของระยะเวลา (ค่าตัวแปร  $y$ ) ค่าคงที่ที่คำนวณได้ค่านั้น ๆ ก็จะมีค่าเป็นบวก

### 4.3.2 ความมากหรือน้อยของค่าคงที่โดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมายข้างหน้า

จากการสังเกตข้อมูลที่นำมาหาความสัมพันธ์พบว่าเมื่อค่าของข้อมูลนั้น ๆ มากก็จะทำให้ค่าคงที่ที่คำนวณได้นั้นมีค่าน้อย แต่ถ้าค่าของข้อมูลนั้น ๆ น้อยก็จะทำให้ค่าคงที่ที่คำนวณได้นั้นมีค่ามาก

### 4.3.3 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดและค่าการเกาะกลุ่มของข้อมูล (Coefficient of Determination: R - Square) มากหรือน้อย

จากการสังเกตข้อมูลที่นำมาหาความสัมพันธ์พบว่าเมื่อข้อมูลที่มีการกระจายมากจะทำให้มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมากแต่จะมีค่าการเกาะกลุ่มของข้อมูลน้อย แต่ถ้าข้อมูลมีการกระจายน้อยก็จะทำให้มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยแต่จะมีค่าการเกาะกลุ่มของข้อมูลมากเช่นกัน ทั้งนี้ค่าการเกาะกลุ่มของข้อมูลจะมีค่าไม่เกิน 1

## บทที่ 5

### ปัญหาและข้อเสนอแนะ

จากสมการที่ได้นั้นเป็นการนำข้อมูลที่มีแนวโน้มเดียวกันและเป็นปริมาณค่าสุด ซึ่งเป็นค่าจริง ณ เวลาปัจจุบัน ซึ่งทั้งนี้ถ้าในอนาคตมีการเปลี่ยนแปลงแนวโน้มหรือปริมาณของข้อมูลสมการที่ได้ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะความเป็นจริงที่เกิดขึ้นโดยแยกเป็นแต่ละหลุมผลิตไม่สามารถนำสมการของหลุมผลิตหลุมใดไปเป็นตัวแทนในการทำนายอายุการใช้งานของท่อขนส่งในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมของหลุมผลิตอื่นได้เพราะว่าสมการของแต่ละหลุมผลิตนั้นสร้างมาจากสภาวะการผลิตที่แตกต่างกัน



## บรรณานุกรม

1. ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. กรุงเทพฯ:จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538
2. โสภณา แจ่มการ และ กนต์ธร ชานีประศาสน์. การใช้ MATLAB สำหรับงานทางวิศวกรรม. ปรับปรุงครั้งที่ 2. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
3. พุทธิ ชาติตะ. การทดสอบแบบไม่ทำลาย. แปลโดย ปรีทรศน์ พันธบุรุษย์ และคนอื่นๆ. กรุงเทพฯ:สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2530
4. Steven C. Chapra and Raymond P. Canale. Numerical Methods for Engineers. Third Edition. Singapore: WCB/McGraw-Hill



## ประวัติผู้จัดทำโครงการ

ชื่อ : นายทศพล ตากเคโซ  
 ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล  
 คณะ : วิศวกรรมศาสตร์  
 ที่อยู่ : 77/1 หมู่ 4 ต.ท่าไม้ อ.พรานกระต่าย จ.กำแพงเพชร  
 การศึกษา : สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจาก โรงเรียนบ้านพรานกระต่าย  
 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนกำแพงเพชรพิทยาคม  
 สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษาจาก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร



ชื่อ : นายวิรัช เพิ่มผลนิรันดร์  
 ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล  
 คณะ : วิศวกรรมศาสตร์  
 ที่อยู่ : 1045/6 ถ.พุทธบูชา ต.ในเมือง อ.เมือง จ.พิษณุโลก  
 การศึกษา : สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจาก โรงเรียนอนุบาลพิษณุโลก  
 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนพิษณุโลกพิทยาคม  
 สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษาจาก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร



ชื่อ : นายปฐมพงษ์ เลิศศิริรุ่งเรือง  
 ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล  
 คณะ : วิศวกรรมศาสตร์  
 ที่อยู่ : 108 ถ.มรุรส ต.ตะพานหิน อ.ตะพานหิน จ.พิจิตร  
 การศึกษา : สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา โรงเรียนนรบุตรศึกษา  
 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนตะพานหิน  
 สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

