

การประเมินความเป็นไปได้ของฟังก์ชันวัดคัมมิรภัยโดยพิจารณาความเหมาะสม
ของค่าใช้จ่าย – ผลประโยชน์ด้วยการใช้วิธีการประเมิน ALARP

PROBABILISTIC ASSESSMENTS OF SAFETY INSTRUMENTED FUNCTION BY
CONSIDERING THE JUSTIFICATION OF COST-BENEFIT USING ALARP
EVALUATION METHOD

ธนกฤต โพธิ์ธีรบุตร
THANAKRIT POTITEERABUIT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอัตโนมัติ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2558
KMITL-2015-EN-M-257-075

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประเมินความเป็นไปได้ของฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย โดยพิจารณาความเหมาะสม
ของค่าใช้จ่าย – ผลประโยชน์ ด้วยการใช้วิธีการประเมิน ALARP

PROBABILISTIC ASSESSMENTS OF SAFETY INSTRUMENTED FUNCTION BY
CONSIDERING THE JUSTIFICATION OF COST-BENEFIT USING ALARP
EVALUATION METHOD



T139425

ธนกฤต โพธิ์ธีรบุตร

THANAKRIT POTITEERABUIT

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 139425
วันเดือนปี..... ๕-3 7111 2558

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอัตโนมัติ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2558
KMITL-2015-EN-M-257-075

PROBABILISTIC ASSESSMENTS OF SAFETY INSTRUMENTED FUNCTION BY
CONSIDERING THE JUSTIFICATION OF COST-BENEFIT USING
ALARP EVALUATION METHOD

THANAKRIT POTITEERABUIT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN AUTOMATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015
KMITL-2015-EN-M-257-075

COPYRIGHT 2015
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประเมินความเป็นไปได้ของฟังก์ชันวัดความเสียหาย โดยพิจารณาความเหมาะสมของค่าใช้จ่าย - ผลประโยชน์ด้วยการใช้วิธีการประเมิน ALARP

Thesis Title Probabilistic Assessments of Safety Instrumented Function by Considering the Justification of Cost-benefit using ALARP Evaluation Method

นักศึกษา นายธนภุต โพธิ์ธีรบุตร


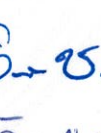



รหัสประจำตัว 56601318

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอัตโนมัติ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ เทพมณี

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-257-075

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ไสว	พงศ์สวัสดิ์	
รศ.ประสิทธิ์	จุลเสวีวงศ์	
รศ.ดร.จิระศักดิ์	ชาญวุฒิธรรม	
รศ.ดร.อัมพวัน	จุลเสวีวงศ์	
ผศ.ดร.ธีรวัฒน์	เทพมณี	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 เวลา 17.00-19.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติใหม่ ห้อง HM-301

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินความเป็นไปได้ของฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย โดยพิจารณาความเหมาะสมของค่าใช้จ่าย – ผลประโยชน์ ด้วยการใช้วิธีการประเมิน ALARP
นักศึกษา	นายธนกฤต โพธิ์ธีรบุตร
รหัสประจำตัว	56601318
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอัตโนมัติ
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. ชีรวัฒน์ เทพมณี

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการคำนวณหาค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตราย (average Probability of Failure on Demand, PFDavg) ของอุปกรณ์การวัด โดยใช้แผนภาพต้นไม้ (Fault Tree Analysis, FTA) ซึ่งในการคำนวณจะพิจารณาว่าอุปกรณ์นั้นมีการทดสอบแบบไม่สมบูรณ์ ขณะที่การคำนวณหาค่า PFDavg ตามมาตรฐาน IEC 61508 และ IEC 61511 นั้นจะใช้สมมติฐานที่ว่า อุปกรณ์เหล่านี้มีการทดสอบแบบสมบูรณ์ ซึ่งผลของค่า PFDavg ที่คำนวณได้จากวิธีที่นำเสนอ นั้นมีค่ามากกว่าการคำนวณด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังได้นำเสนอการปรับปรุงค่า PFDavg ของฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย (Safety Instrumented Function, SIF) โดยพิจารณาช่วงเวลาของการทดสอบอุปกรณ์ โดยผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าช่วงเวลาการทดสอบอุปกรณ์นั้นมีผลต่อค่า PFDavg ซึ่งการเพิ่มความถี่ในการทดสอบอุปกรณ์จะทำให้ค่า PFDavg นั้นมีค่าลดลงหรือความเสี่ยงลดลง แต่ในขณะเดียวกันจะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการทดสอบอุปกรณ์ นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงที่ลดลงกับค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจะถูกประเมินด้วยวิธีการ ALARP โดยเทคนิคการประเมินที่นำเสนอสามารถนำไปใช้ในการตัดสินใจได้ว่า ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นเพื่อทำให้ฟังก์ชันวัดคุมนิรภัยมีความเสี่ยงที่ลดลงนั้นมีความเหมาะสมที่จะลงทุนหรือไม่

Thesis Title	Probabilistic Assessments of Safety Instrumented Function by Considering the Justification of Cost-Benefit Using ALARP Evaluation Method
Student	Mr.Thanakrit Potiteerabuit
Student ID.	56601318
Degree	Master of Engineering
Program	Automation Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Teerawat Thepmanee

ABSTRACT

This thesis proposes the average Probability of Failure on Demand (PFDavg) of sensing devices, which is calculated by Fault Tree Analysis (FTA) under consideration of imperfect proof test. The PFDavg calculation method in IEC 61508 and 61511 standards is based on assumption that testing components in the system is assumed to be perfect. The effect of the imperfect proof test of PFDavg is then examined. The result reveals that the PFDavg value calculated by the proposed technique is higher than that of traditional method. This thesis also proposes the PFDavg improvement of Safety Instrumented Function (SIF) by considering the proof test interval. The improvement result shows that test interval has a significant impact to the PFDavg value. As the test cost occurs during device proof test, high frequency of testing along the device life cycle increases the cost, whereas the PFDavg value will be decreased. In addition, assessments of the relation between the achieved risk reduction and the investment cost using As Low As Reasonably Practicable (ALARP) method are described in details. The proposed probabilistic assessments can be useful for justifying the investment cost and obtained benefit.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ธีรวัฒน์ เทพมณี ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม (หลักสูตรวิศวกรรมอัตโนมัติ) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และให้ความอนุเคราะห์ในด้านต่าง ๆ

ขอขอบคุณหัวหน้างานและเพื่อนร่วมงานทุกท่าน ที่เข้าใจและให้โอกาส ให้ความช่วยเหลือในหน้าที่การงาน จนทำให้การทำวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าเป็นไปอย่างราบรื่น

ขอขอบคุณภรรยาของข้าพเจ้า คุณณิชาภา โพธิ์ธีรบุตร ที่เป็นเสมือนคู่คิดและเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยดูแลห่วงใย เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุน ข้าพเจ้ามาโดยตลอด รวมทั้งญาติพี่น้อง และเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยถามไถ่และเป็นกำลังใจให้เสมอมา

ธนกฤต โพธิ์ธีรบุตร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 การนำเสนอแนวคิดของวิทยานิพนธ์	2
1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์	3
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ระบบควบคุมในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิต	5
2.1.1 ระบบควบคุมกระบวนการผลิตพื้นฐาน (Basic Process Control System)	5
2.1.2 ระบบวัดคุมনিรภัย (Safety Instrumented System, SIS)	7
2.2 มาตรฐานสำหรับระบบวัดคุมনিรภัย	8
2.2.1 วงรอบความปลอดภัย (Safety Life Cycle)	9
2.2.2 ค่าระดับความปลอดภัย (Safety Integrity Level, SIL)	12
2.3 ค่าความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตราย (Probability of Failure on Demand, PFD) ของระบบวัดคุมনিรภัย	13
2.3.1 โหมดความผิดพลาด (Failure mode) ของอุปกรณ์นิรภัย	14
2.3.2 ความผิดพลาดร่วม (Common Cause Failure, β)	16
2.3.3 เวลาเฉลี่ยในการซ่อมแซม (Mean Time To Repair, MTTR)	16
2.3.4 การทดสอบอุปกรณ์วัดคุมনিรภัยแบบสมบูรณ์และแบบไม่สมบูรณ์ (Perfect and Imperfect Proof Test)	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 การหาค่าความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายโดยใช้แผนภาพต้นไม้ (Fault Tree Analysis, FTA)	17
2.4.1 การหาค่า PFD ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1๐๐1.....	21
2.4.2 การหาค่า PFD ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1๐๐2.....	22
2.4.3 การหาค่า PFD ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1๐๐3.....	23
2.4.4 การหาค่า PFD ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2๐๐2.....	25
2.4.5 การหาค่า PFD ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2๐๐3.....	26
2.4.6 การหาค่า PFD ของอุปกรณ์สุดท้าย	28
2.5 ค่าความเสี่ยงที่ยอมรับได้ (Tolerable Risk).....	30
2.6 สมการผลตอบแทนเฉลี่ยจากการลงทุน (Return on Average Capital Employed-ROACE)	32
2.7 ค่าใช้จ่ายตลอดรอบการทำงาน (Life Cycle Cost, LCC).....	34
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	35
3.1 กล่าวนำ.....	35
3.2 ฟังก์ชันวัดคุณนिरภัยที่ใช้อ้างอิง.....	37
3.2.1 รูปแบบฟังก์ชันวัดคุณนिरภัย SIF2-A.....	37
3.2.2 การปรับปรุงค่าระดับความปลอดภัยและการประเมินผลค่าใช้จ่าย-ผลประโยชน์ของ SIF2-A	41
3.3 ฟังก์ชันวัดคุณนिरภัยที่ใช้ในงานวิจัย	43
3.3.1 การหาค่าระดับความปลอดภัยของฟังก์ชันวัดคุณนिरภัย SIF2-A.....	43
3.3.1.1 ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์การวัด (SE), PFD_{avgSE}	43
3.3.1.2 ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของส่วนประมวลผล (LS), PFD_{avgLS}	45
3.3.1.3 ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์สุดท้าย (FE), PFD_{avgFE}	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1.4 ผลรวมค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของฟังก์ชันวัด คุมনিรภัย SIF2-A, PFDavg SIF2-A.....	47
3.3.2 การปรับปรุงค่าระดับความปลอดภัย.....	48
3.4 การประเมินผลค่าใช้จ่าย – ผลประโยชน์ ด้วยวิธีการ ALARP.....	49
3.5 ค่าใช้จ่ายตลอดรอบการทำงานของอุปกรณ์ (LCC) กับค่า PFD _{avg} ของอุปกรณ์.....	51
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	52
4.1 กล่าวนำ.....	52
4.2 ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์การวัดรูปแบบต่าง ๆ	52
4.2.1 ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1๐๐2.....	52
4.2.2 ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2๐๐3.....	53
4.2.3 ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายในการ ทดสอบอุปกรณ์ในช่วงเวลาการทดสอบต่าง ๆ	54
4.3 ผลของการประเมินผลค่าใช้จ่าย – ผลประโยชน์ ด้วยวิธีการ ALARP.....	56
4.4 กราฟเปรียบเทียบค่า LCC กับ PFD _{avg} ของอุปกรณ์	61
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	69
5.1 สรุปผลการวิจัย	69
5.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อ.....	70
เอกสารอ้างอิง.....	71
ภาคผนวก ก บททความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	73
ภาคผนวก ข ตารางค่าอัตราความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์วัดคุมนิรภัย	84
ประวัติผู้เขียน	86

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางค่าระดับความปลอดภัยที่อัตราการเกิดอันตรายต่ำ (Low Demand Mode)	12
2.2 ตารางค่าระดับความปลอดภัยที่อัตราการเกิดอันตรายสูง (High Demand Mode)	13
2.3 สัญลักษณ์ของแผนภาพต้นไม้ (Fault Tree Analysis, FTA).....	19
2.4 อุปกรณ์การวัดในรูปแบบต่าง ๆ	20
3.1 ผลการประเมินค่าระดับความปลอดภัยของ SIF2-A	40
3.2 การออกแบบฟังก์ชันวัดคุณนริภัย SIF2-A รูปแบบต่าง ๆ จากงานวิจัย [3]	42
3.3 ค่า PFD_{avg} ของอุปกรณ์ใน SIF2-A แต่ละช่วงเวลาการทดสอบ.....	48
3.4 รายละเอียดค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์.....	50
3.5 ค่าตัวแปรสำคัญต่าง ๆ เพื่อคำนวณหาค่า ROACE	50
4.1 ค่า PFD_{avg} ของอุปกรณ์การวัดและอุปกรณ์สุดท้ายในแต่ละช่วงเวลาการทดสอบ	55
4.2 ผลของการประเมินผลค่าใช้จ่าย – ผลประโยชน์ ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1oo2.....	57
4.3 ผลของการประเมินผลค่าใช้จ่าย – ผลประโยชน์ ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1oo3.....	58
4.4 ผลของการประเมินผลค่าใช้จ่าย – ผลประโยชน์ ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2oo3.....	59
4.5 ผลของการประเมินผลค่าใช้จ่าย – ผลประโยชน์ ของอุปกรณ์สุดท้ายรูปแบบ 1oo2+1oo2	60
4.6 ค่าใช้จ่ายตลอดรอบการทำงานโดยประมาณของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1oo2	62
4.7 ค่าใช้จ่ายตลอดรอบการทำงานโดยประมาณของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1oo3 และ 2oo3.....	63
4.8 ค่าใช้จ่ายตลอดรอบการทำงานโดยประมาณของอุปกรณ์สุดท้ายรูปแบบ 1oo2+1oo2.....	64
4.9 รูปแบบฟังก์ชันวัดคุณนริภัย SIF2-A แบบต่าง ๆ ที่มีช่วงเวลาการทดสอบอุปกรณ์ที่เหมาะสม.....	68

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ฟังก์ชันการควบคุมระดับของเหลวพื้นฐาน 6
2.2	ระบบวัดคูนिरภัย 7
2.3	แผนภาพกระบวนการผลิตที่ประกอบไปด้วยระบบ SIS และ BPCS 8
2.4	วงรอบความปลอดภัย (Safety Life Cycle) ของ IEC 61511 11
2.5	ลำดับขั้นตอนการหาค่าระดับความปลอดภัยของฟังก์ชันวัดคูนिरภัย 14
2.6	โครงสร้างของความผิดพลาด (Failure) ของอุปกรณ์ 15
2.7	ช่วงเวลาเฉลี่ยในการซ่อมแซม (Mean Time To Repair, MTTR) 16
2.8	แผนภาพต้นไม้สำหรับหาค่า PFD ของอุปกรณ์แบบ 1oo1 22
2.9	แผนภาพต้นไม้สำหรับหาค่า PFD ของอุปกรณ์แบบ 1oo2 23
2.10	แผนภาพต้นไม้สำหรับหาค่า PFD ของอุปกรณ์แบบ 1oo3 24
2.11	แผนภาพต้นไม้สำหรับหาค่า PFD ของอุปกรณ์แบบ 2oo2 26
2.12	แผนภาพต้นไม้สำหรับหาค่า PFD ของอุปกรณ์แบบ 2oo3 27
2.13	ALARP (As Low As Reasonably Practicable) 31
2.14	ขั้นตอนการประเมินด้วย ALARP 31
3.1	แผนภาพกระบวนการอย่างง่ายของ Tail Gas Treating Unit 36
3.2	แผนภาพกระบวนการของฟังก์ชันวัดคูนिरภัย SIF2-A 39
3.3	แผนภาพต้นไม้ของอุปกรณ์การวัดในฟังก์ชันวัดคูนिरภัย SIF2-A 44
3.4	แผนภาพต้นไม้ของส่วนประมวลผลในฟังก์ชันวัดคูนिरภัย SIF2-A 45
3.5	แผนภาพต้นไม้ของอุปกรณ์สุดท้ายในฟังก์ชันวัดคูนिरภัย SIF2-A 46
3.6	แผนภาพต้นไม้ของฟังก์ชันวัดคูนिरภัย SIF2-A 47
3.7	ตัวอย่างกราฟเปรียบเทียบค่า LCC กับ PFD_{avg} 51
4.1	แผนภาพต้นไม้ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1oo2 53
4.2	แผนภาพต้นไม้ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2oo3 54
4.3	กราฟเปรียบเทียบค่า LCC กับ PFD_{avg} ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1oo2 65
4.4	กราฟเปรียบเทียบค่า LCC กับ PFD_{avg} ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1oo3 65
4.5	กราฟเปรียบเทียบค่า LCC กับ PFD_{avg} ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2oo3 66
4.6	กราฟเปรียบเทียบค่า LCC กับ PFD_{avg} ของอุปกรณ์สุดท้ายรูปแบบ 1oo2+1oo2 66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตประเภทต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม นอกจากจะต้องมีระบบควบคุมกระบวนการผลิต (Basic Process Control System, BPCS) แล้ว ยังมีอีกระบบหนึ่งที่มีความสำคัญมากซึ่งก็คือระบบวัดคุมนิรภัย (Safety Instrumented System, SIS) โดยมาตรฐาน IEC 61508/61511 [1,2] ได้นิยามระบบวัดคุมนิรภัยว่าเป็นระบบที่ประกอบไปด้วยฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย (Safety Instrumented Function, SIF) หลาย ๆ ฟังก์ชัน โดยแต่ละฟังก์ชันวัดคุมนิรภัยก็จะประกอบไปด้วย อุปกรณ์การวัด (Sensing Element, SE) ส่วนประมวลผล (Logic Solver, LS) และอุปกรณ์สุดท้าย (Final Element, FE) โดยจุดประสงค์ของระบบวัดคุมนิรภัยคือเพื่อนำไปใช้สำหรับป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตประเภทต่าง ๆ ซึ่งความเสียหายเหล่านี้จะรวมไปถึงความเสียหายต่อสิ่งมีชีวิต ต่อสิ่งแวดล้อมและความเสียหายต่ออุปกรณ์หรือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิต โดยค่าระดับความปลอดภัย (Safety Integrity Level, SIL) ของฟังก์ชันวัดคุมนิรภัยสามารถหาได้จากผลรวมค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตราย (average Probability of Failure on Demand, PFD_{avg}) ของอุปกรณ์การวัด ส่วนประมวลผล และอุปกรณ์สุดท้าย ดังนั้นเมื่อค่าระดับความปลอดภัยได้ถูกกำหนดให้กับฟังก์ชันวัดคุมนิรภัยโดยใช้วิธีการต่าง ๆ ตามมาตรฐาน IEC 61508/61511 แล้ว การออกแบบหรือการเลือกใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ในฟังก์ชันวัดคุมนิรภัยจะต้องมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายอยู่ในขอบเขตของแต่ละค่าระดับความปลอดภัย

ค่าความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ต่าง ๆ นั้นมีผลต่อค่าระดับความปลอดภัยของฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย และหนึ่งในตัวแปรที่มีผลต่อค่าความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์คือการทำการทดสอบอุปกรณ์ (Proof Test) โดยความผิดพลาดอันตรายตรวจจับไม่ได้ (Dangerous Undetected Failure) จะถูกเปิดเผยได้ในขณะทำการทดสอบอุปกรณ์ และถ้าความผิดพลาดอันตรายตรวจจับไม่ได้ถูกเปิดเผยทั้งหมดในขณะทำการทดสอบ จะทำให้การทำงานของอุปกรณ์เหล่านั้นสามารถกลับมาทำงานได้อย่างสมบูรณ์แบบ จะเรียกการทดสอบแบบนี้ว่าการทดสอบแบบสมบูรณ์ (Perfect Proof Test) ซึ่งในการคำนวณหาค่าความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEC 61508/61511 กำหนดให้อุปกรณ์นั้น ๆ จะถูกทดสอบโดยสมบูรณ์แบบเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติ การทดสอบนั้นอาจจะไม่สามารถตรวจจับความผิดพลาดอันตรายได้ทั้งหมด จะเรียกการทดสอบแบบนี้ว่าการทดสอบแบบไม่สมบูรณ์ (Imperfect Proof Test) โดยการทดสอบแบบนี้จะทำให้ค่าความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์หรือโอกาสที่อุปกรณ์จะทำงานผิดพลาด

มีค่าสูง ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดอันตรายต่อกระบวนการผลิตได้อันเนื่องมาจากการทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์

ในการทำการทดสอบอุปกรณ์ในฟังก์ชันวัดคัมมิรภัยนั้น ถ้าอุปกรณ์มีความถี่ในการทดสอบหรือมีช่วงเวลาในการทดสอบ (Proof Test Interval, T) มาก จะทำให้โอกาสที่ความผิดพลาดอันตรายตรวจจับไม่ได้จะถูกเปิดเผยได้ในขณะทำการทดสอบมีค่าสูง นั้นหมายความว่าโอกาสที่อุปกรณ์เหล่านี้จะทำงานผิดพลาดหรือความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์มีค่าลดลง แต่ในขณะเดียวกันจะทำให้ค่าใช้จ่ายในการทดสอบอุปกรณ์มีค่าสูงขึ้น โดยงานวิจัยนี้จะนำเสนอการเลือกช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทดสอบอุปกรณ์ที่ทำให้อุปกรณ์เหล่านี้มีความเสี่ยงที่จะทำงานผิดพลาดอยู่ในค่าที่ยอมรับได้และมีค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมต่อการลงทุน

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดจุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาดังนี้

- เพื่อศึกษาผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณหาค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ที่มีการทดสอบแบบสมบูรณ์และไม่สมบูรณ์
- เพื่อศึกษาว่าช่วงเวลาในการทดสอบอุปกรณ์หรือความถี่ในการทดสอบอุปกรณ์ตลอดอายุการใช้งาน (Life Cycle) นั้นมีผลต่อค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์
- เพื่อศึกษาและประยุกต์การใช้งานสมการ ROACE (Return on Average Capital Employed) ในวิธีการประเมิน ALARP
- เพื่อศึกษาการประเมินค่าใช้จ่ายในการทดสอบอุปกรณ์ที่เพิ่มขึ้นกับผลประโยชน์ที่จะได้รับการดำเนินงานผิดพลาดที่ลดลงของอุปกรณ์ ว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ โดยวิธีการประเมิน ALARP

1.3 การนำเสนอแนวคิดของวิทยานิพนธ์

ตามมาตรฐาน IEC 61508/61511 ได้แสดงวิธีการคำนวณหาค่าความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์โดยกำหนดให้อุปกรณ์นั้น ๆ จะถูกทดสอบแบบสมบูรณ์เท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติแล้วการทดสอบอุปกรณ์แบบสมบูรณ์นั้นเป็นไปได้ยาก งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาค่าความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ด้วยวิธีแผนภูมิต้นไม้ โดยพิจารณาให้การทดสอบอุปกรณ์นั้นเป็นการทดสอบแบบไม่สมบูรณ์ ซึ่งผลของค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายที่ได้นั้นจะสอดคล้องกับความเป็นจริง และอีกตัวแปรที่งานวิจัยนี้นำมาพิจารณาค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์คือความถี่หรือช่วงเวลาในการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ ถ้าอุปกรณ์มีความถี่ในการทดสอบมากจะทำให้ความเสี่ยงที่อุปกรณ์นั้นจะทำงานผิดพลาดมีค่าลดลง ในขณะที่เดียวกันค่าใช้จ่ายในการทดสอบอุปกรณ์ก็จะสูงขึ้น ในการเลือกช่วงเวลาการทดสอบอุปกรณ์เพื่อให้ความเสี่ยงลดลง โดยพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการทดสอบที่เหมาะสมนั้น ในงานวิจัยนี้จะใช้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายตลอดรอบการทำงาน (Life Cycle Cost, LCC) ของอุปกรณ์กับค่าเฉลี่ย

ความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ (PFD_{avg}) ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงจุดที่มีความเหมาะสมในการลงทุนเพื่อให้ความเสี่ยงนั้นลดลงหรือจุด ALARP และในงานวิจัยนี้ยังนำเสนอการประยุกต์ใช้งานสมการผลเฉลี่ยตอบแทนจากการลงทุน (Return On Average Capital Employed, ROACE) มาประเมินว่าผลประโยชน์ที่จะได้รับจากความเสี่ยงที่ลดลงของอุปกรณ์นั้นคุ้มค่ากับการลงทุนที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มความถี่ในการทดสอบหรือไม่

1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

งานวิจัยนี้ได้ยกกรณีศึกษาในเรื่อง “การประเมินค่าระดับความปลอดภัยและการออกแบบฟังก์ชันวัดคัมมิรภัย โดยพิจารณาความเหมาะสมของค่าใช้จ่าย – ผลประโยชน์ ด้วยการใช่วิธีการประเมิน ALARP” [3] โดยนำฟังก์ชันวัดคัมมิรภัยของกระบวนการ Tail Gas Treating ซึ่งเป็นฟังก์ชันวัดคัมมิรภัยที่มีค่าระดับความปลอดภัยด้านการสูญเสียทรัพย์สินอยู่ในระดับสูงและมีความเสี่ยงที่กระทบต่อชีวิตและสิ่งแวดล้อมอยู่ในระดับต่ำมาพิจารณา จากกรณีศึกษา [3] นั้นได้ใช้ขั้นตอนการออกแบบระบบวัดคัมมิรภัย ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการเป็นไปตามวงจรความปลอดภัย (Safety Life Cycle) ตามมาตรฐาน IEC 61511 โดยงานวิจัย [3] ได้ดำเนินการตามขั้นตอนตั้งแต่ในเฟสที่ 1 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาความอันตรายที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการผลิต รวมไปถึงการประเมินผลกระทบต่อส่วนต่าง ๆ เมื่อมีเหตุการณ์อันตรายเกิดขึ้น ไปจนถึงเฟสที่ 4 ซึ่งเป็นการดำเนินการจัดทำระบบวัดคัมมิรภัยให้เป็นไปตามรายละเอียดความต้องการของแต่ละฟังก์ชันวัดคัมมิรภัย โดยการออกแบบจะต้องให้ได้ค่าระดับความปลอดภัยเป็นไปตามค่าระดับความปลอดภัยเป้าหมาย ในช่วงเฟสที่ 4 นั้น งานวิจัย [3] ได้ทำการออกแบบรูปแบบของฟังก์ชันวัดคัมมิรภัย โดยเน้นการปรับปรุงรูปแบบการทำงานของอุปกรณ์ในฟังก์ชันวัดคัมมิรภัย เช่น ปรับเปลี่ยนรูปแบบการทำงานของวาล์วนิรภัยจาก 1oo1+1oo1 ไปเป็น 1oo2+1oo2 รวมไปถึงมีการเพิ่มการทดสอบแบบ Partial Test เพื่อให้มีค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของวาล์วนิรภัยมีค่าลดลง

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาในเฟสที่ 4 ของวงจรความปลอดภัย ซึ่งจะนำเสนอการออกแบบฟังก์ชันวัดคัมมิรภัย โดยการออกแบบรูปแบบการทำงานของอุปกรณ์การวัดแบบต่าง ๆ รวมไปถึงการเลือกช่วงเวลาในการทดสอบอุปกรณ์การวัดและอุปกรณ์สุดท้ายที่เหมาะสมกับค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น โดยการประยุกต์ใช้งานสมการ ROACE ในวิธีการประเมิน ALARP และในการคำนวณหาค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์การวัดนั้นจะใช่วิธีแผนภาพต้นไม้ โดยพิจารณาให้การทดสอบอุปกรณ์นั้นเป็นการทดสอบแบบไม่สมบูรณ์ ส่วนวิธีการคำนวณหาค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของส่วนประมวลผลและอุปกรณ์สุดท้ายนั้นจะใช่วิธีการคำนวณด้วยสมการอย่างง่ายที่ได้จาก [3] เนื่องจากว่าในการหาค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายอย่างละเอียดของส่วนประมวลผล จะต้องนำค่าความผิดพลาดของอุปกรณ์ย่อยต่าง ๆ ในระบบมาคำนวณด้วย เช่น ค่าอัตราความผิดพลาดของหน่วยควบคุม (Controller unit) ค่าอัตราความผิดพลาดของอินพุต/เอาต์พุตโมดูล (Input/Output Module) เป็นต้น และในการหาค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายอย่างละเอียดของอุปกรณ์สุดท้ายนั้น จะต้องนำค่าความผิดพลาดของตัววาล์วนิรภัย (Valve Body) และค่า

ความผิดพลาดของโซลินอยด์วาล์ว (Solenoid Valve) มาทำการคำนวณ ซึ่งข้อมูลที่ใช้อ้างอิงจาก [3] นั้นไม่มีค่าความผิดพลาดเหล่านี้ จึงไม่สามารถทำการคำนวณอย่างละเอียดได้ และค่าตัวแปรพื้นฐานต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ทั้งสามส่วนรวมไปถึงค่าใช้จ่ายต่าง ๆ นั้นได้มาจากฐานข้อมูลที่อยู่ในงานวิจัย [3]

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญ ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา การนำเสนอแนวคิดของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตวิทยานิพนธ์ และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึง หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการหาค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ ค่าระดับความปลอดภัยของฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบวัดคุมนิรภัยและความคุ้มค่าต่อการลงทุนที่เพิ่มขึ้นเทียบกับความเสี่ยงที่ลดลง

บทที่ 3 เป็นวิธีดำเนินการวิจัย ซึ่งจะนำเสนอการออกแบบการทำงานของฟังก์ชันวัดคุมนิรภัยในรูปแบบต่าง ๆ รวมไปถึงแสดงการหาค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์

บทที่ 4 เป็นการแสดงผลการทดลอง ในการเลือกช่วงเวลาการทดสอบอุปกรณ์ที่เหมาะสม โดยพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการทดสอบอุปกรณ์ ด้วยการประเมิน ALARP

บทที่ 5 เป็นบทสุดท้ายซึ่งจะกล่าวถึงสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในส่วนสุดท้ายของวิทยานิพนธ์เป็นส่วนของภาคผนวก ประกอบไปด้วยบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์และข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย ดังนี้

ภาคผนวก ก บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

ภาคผนวก ข ตารางค่าอัตราความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์วัดคุมนิรภัย

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบควบคุมในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิต

ในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตชนิดต่าง ๆ จะต้องมีส่วนที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมและเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรมด้วยเสมอ เนื่องจากระบบควบคุมจะเป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ โดยระบบควบคุมที่ใช้ส่วนมากในกระบวนการผลิตได้แก่ระบบควบคุมแบบกระจาย (Distributed Control System, DCS) และระบบพีแอลซี (Programmable Logic Controller, PLC) ส่วนเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรมได้แก่เครื่องมือวัดตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตเช่นเครื่องมือวัดความดัน เครื่องมือวัดอัตราการไหล เครื่องมือวัดอุณหภูมิ เป็นต้น รวมไปถึงวาล์วควบคุม

นอกจากระบบที่ช่วยควบคุมกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแล้ว ยังมีระบบควบคุมอีกประเภทที่มีความสำคัญเช่นกันนั่นคือระบบนิรภัย โดยระบบนี้จะเป็นระบบควบคุมที่จะถูกจัดเตรียมขึ้นในกระบวนการผลิตเพื่อที่จะใช้ส่งสัญญาณเอาต์พุตไปยังกระบวนการผลิตหรืออุปกรณ์ภายใต้การควบคุม เพื่อให้กระบวนการผลิตนั้น ๆ อยู่ในสถานะที่ปลอดภัยเมื่อเกิดเหตุการณ์อันตรายนขึ้น โดยระบบนิรภัยที่เป็นที่รู้จักกันทั่วไปคือระบบหยุดทำงานแบบฉุกเฉิน (Emergency Shutdown System, ESD) หรือระบบวัดคัมนิรภัย (Safety Instrumented System, SIS)

2.1.1 ระบบควบคุมกระบวนการผลิตพื้นฐาน (Basic Process Control System, BPCS)

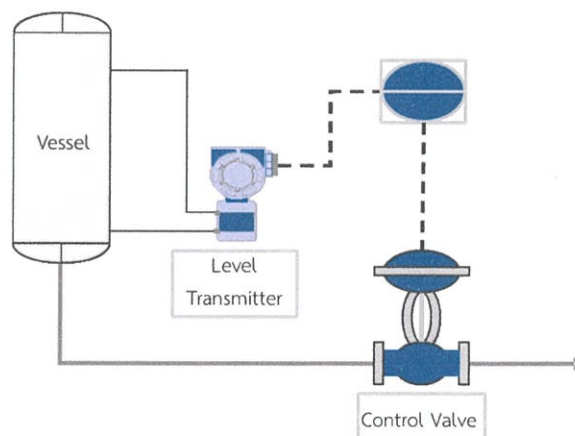
อุตสาหกรรมกระบวนการผลิต เป็นกระบวนการหรือขั้นตอนในการเปลี่ยนสภาพของวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตแต่ละชนิดจะต้องมีการจัดเตรียมระบบควบคุมหรือเรียกระบบนี้ว่าระบบควบคุมกระบวนการผลิตพื้นฐาน (Basic Process Control System, BPCS) ซึ่งระบบที่ใช้กันกันอย่างกว้างขวางสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตในปัจจุบันคือระบบ DCS และอีกระบบหนึ่งที่ต้องจัดเตรียมคือระบบเครื่องมือวัด โดยระบบเหล่านี้จะถูกจัดเตรียมเพื่อทำการแสดงค่าและควบคุมตัวแปรทางกระบวนการต่าง ๆ ให้อยู่ในค่าที่ต้องการและเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติตามที่กำหนด ตัวแปรทางกระบวนการที่เป็นพื้นฐานในการควบคุมจะได้แก่ การไหล (Flow) ระดับ (Level) ความดัน (Pressure) และ อุณหภูมิ (Temperature) เป็นต้น และตัวอย่างการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ เป็นดังนี้ การควบคุมอัตราการไหลของไหลในท่อให้อยู่ในค่าที่ต้องการ การควบคุมทิศทาง การไหลให้ไหลไปทิศทางที่กำหนด การควบคุมระดับของไหลในถัง การควบคุมอุณหภูมิของไหล และการควบคุมความดันของไหล เป็นต้น เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้ในกระบวนการผลิต จาก [4] ได้กล่าวว่าจะต้องมีการจัดเตรียมระบบวัดและควบคุม โดยระบบวัดและ

ควบคุมจะประกอบไปด้วยฟังก์ชันควบคุม (Control Function) หลาย ๆ ฟังก์ชัน อุปกรณ์พื้นฐานที่สำคัญของฟังก์ชันควบคุมจะมีอยู่ 3 ส่วนดังนี้

1. อุปกรณ์การวัด (Sensing Element) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดสถานะของกระบวนการผลิตและทำหน้าที่ในการเปลี่ยนตัวแปรจากกระบวนการผลิตให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ามาตรฐาน 4 ถึง 20 มิลลิแอมแปร์ (mA) ที่แรงดัน 24 โวลท์กระแสตรง (VDC) หรือสัญญาณมาตรฐานชนิดอื่น ๆ เพื่อส่งข้อมูลของตัวแปรต่าง ๆ ไปยังอุปกรณ์ควบคุม (Controller) และใช้แสดงค่าตัวแปรที่หน่วยแสดงผลของระบบควบคุม เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงและควบคุมตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้ได้ หน่วยแสดงผลอุปกรณ์การวัดพื้นฐานจะมีดังนี้ อุปกรณ์การวัดการไหล (Flow Transmitter) อุปกรณ์การวัดระดับของเหลว (Level Transmitter) อุปกรณ์การวัดความดัน (Pressure Transmitter) และอุปกรณ์การวัดอุณหภูมิ (Temperature Transmitter)

2. อุปกรณ์ควบคุม (Controller) จะทำการควบคุมตัวแปรจากกระบวนการผลิตให้อยู่ในค่าที่ต้องการ โดยการรับสัญญาณมาจากอุปกรณ์การวัดเพื่อมาทำการเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนด (Set Point) และทำการประมวลผลจากนั้นจะส่งสัญญาณอนาล็อก (analog) หรือสัญญาณไฟฟ้ามาตรฐาน 4 ถึง 20 มิลลิแอมแปร์ (mA) ที่แรงดัน 24 โวลท์กระแสตรง (VDC) ไปยังอุปกรณ์สุดท้ายเพื่อทำการปรับตัวแปรในกระบวนการให้อยู่ในค่าที่ต้องการ ตัวควบคุม (Controller) ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก ๆ ดังนี้ แหล่งจ่ายพลังงาน (Power Supply Unit) ตัวประมวลผลกลาง (Central Processor Unit) ส่วนรับและส่งสัญญาณ (Input and Output Cards) ส่วนติดต่อสื่อสาร (Communication Port) และโปรแกรมในการควบคุม (Control Function Program)

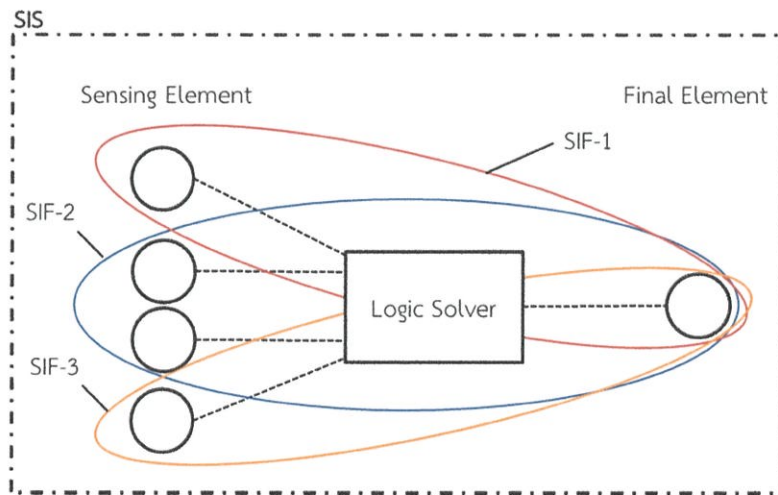
3. อุปกรณ์สุดท้าย (Final Element) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้ามาตรฐาน 4 ถึง 20 มิลลิแอมแปร์ (mA) ที่แรงดัน 24 โวลท์กระแสตรง (VDC) ที่ออกจากตัวควบคุมไปทำการควบคุมตัวแปรกระบวนการผลิต เช่น อุปกรณ์สุดท้ายจะเป็น วาล์วควบคุม (Control Valve) ซึ่งจะทำการปิดเปิดของไหลตามสัญญาณที่มาจากตัวควบคุม



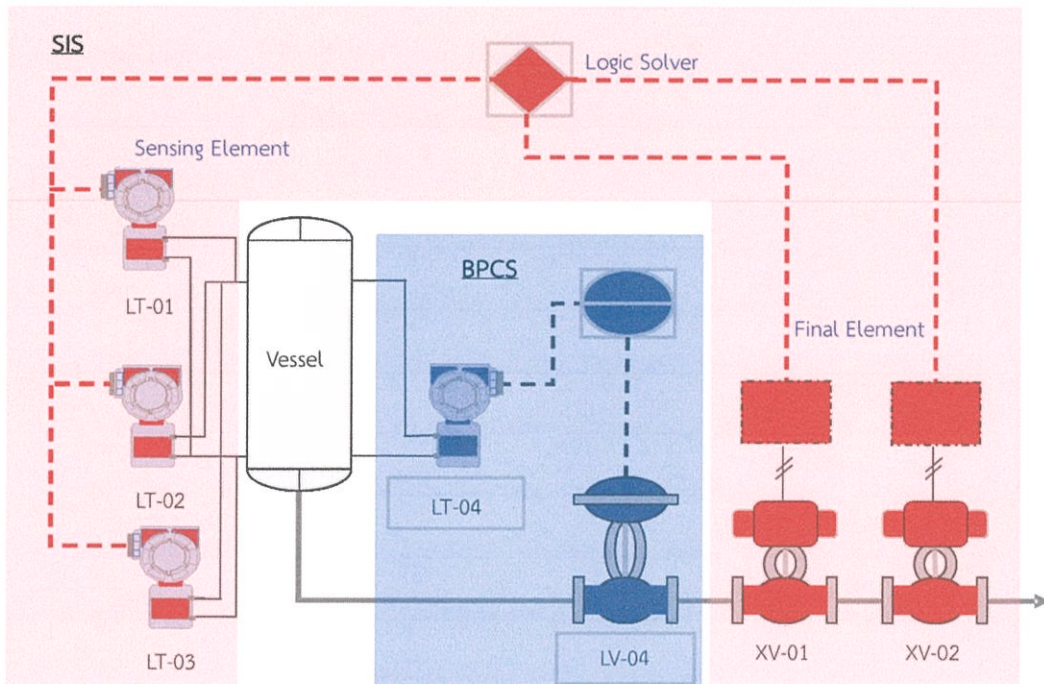
รูปที่ 2.1 ฟังก์ชันการควบคุมระดับของเหลวพื้นฐาน

2.1.2 ระบบวัดคุมนิรภัย (Safety Instrumented System, SIS)

มาตรฐาน IEC 61508/61511 ได้นิยามระบบวัดคุมนิรภัยว่าเป็นระบบที่ประกอบด้วยฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย (Safety Instrumented Function, SIF) หลาย ๆ ฟังก์ชัน โดยแต่ละฟังก์ชันวัดคุมนิรภัยก็จะประกอบไปด้วย อุปกรณ์การวัด (Sensing Element) ส่วนประมวลผล (Logic Solver) และอุปกรณ์สุดท้าย (Final Element) ดังแสดงตามรูปที่ 2.2 โดยจุดประสงค์ของระบบวัดคุมนิรภัยคือเพื่อนำไปใช้สำหรับป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตประเภทต่าง ๆ ซึ่งความเสียหายเหล่านี้จะรวมไปถึงความเสียหายต่อสิ่งมีชีวิต ต่อสิ่งแวดล้อมและความเสียหายต่ออุปกรณ์หรือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิต จะเห็นได้ว่าระบบวัดคุมนิรภัยและระบบควบคุมกระบวนการผลิตพื้นฐานนั้นประกอบไปด้วยอุปกรณ์ 3 ส่วนที่คล้าย ๆ กัน แต่จะแตกต่างกันที่หน่วยประมวลผลของระบบวัดคุมนิรภัยมีหน้าที่ใช้สำหรับประมวลผลทางตรรกะของระบบวัดคุมนิรภัย โดยรับสัญญาณมาจากอุปกรณ์การวัดเพื่อมาทำการเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนด เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นส่วนประมวลผลจะส่งสัญญาณแบบดิจิทัลเอาต์พุตไปยังอุปกรณ์สุดท้าย โดยให้อุปกรณ์สุดท้ายนั้นเปิดหรือปิด เพื่อให้กระบวนการผลิตนั้นอยู่ในสภาวะปลอดภัย ซึ่งแตกต่างจากอุปกรณ์สุดท้ายของระบบควบคุมกระบวนการผลิตพื้นฐาน ที่มีหน้าที่ควบคุมกระบวนการผลิตให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ รูปที่ 2.3 แสดงแผนภาพกระบวนการผลิตที่ประกอบไปด้วยระบบวัดคุมนิรภัยและระบบควบคุมกระบวนการผลิตพื้นฐาน



รูปที่ 2.2 ระบบวัดคุมนิรภัย



รูปที่ 2.3 แผนภาพกระบวนการผลิตที่ประกอบไปด้วยระบบ SIS และ BPCS

2.2 มาตรฐานสำหรับระบบวัดคุมนิรภัย

มาตรฐานที่สามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบวัดคุมนิรภัยในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตในปัจจุบันมีอยู่ 2 มาตรฐานคือ มาตรฐาน IEC 61511 (Functional safety –Safety instrumented systems for the process industry sector) ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับผู้ใช้งาน (Client) หรือผู้ประกอบการ (Integrator or Designer) ระบบวัดคุมนิรภัยสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการผลิต (Process Industrial Sector) จะประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 รายละเอียดกรอบแนวคิดคำจำกัดความของ ระบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ (เป็นรายละเอียดเกี่ยวกับกฎเกณฑ์ต่าง ๆ)

ส่วนที่ 2 แนวทางการใช้งานของ IEC 61511

ส่วนที่ 3 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการวัดค่าระดับความปลอดภัย

และมาตรฐาน IEC 61508 (Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems) เป็นมาตรฐานสำหรับผู้ผลิตอุปกรณ์ชิ้นส่วน (Hardware) หรือพัฒนาโปรแกรม (Software Developer) ขึ้นมาใหม่ เพื่อนำไปใช้งานในระบบวัดคุมนิรภัย จะประกอบไปด้วย 7 ส่วนคือ

ส่วนที่ 1 รายละเอียดทั่วไป

ส่วนที่ 2 รายละเอียดของระบบนิรภัยอุปกรณ์ไฟฟ้า/อิเล็กทรอนิกส์/โปรแกรมอิเล็กทรอนิกส์

ส่วนที่ 3 รายละเอียดเกี่ยวกับซอฟต์แวร์

ส่วนที่ 4 คำจำกัดความและคำย่อต่าง ๆ

ส่วนที่ 5 ตัวอย่างวิธีกำหนดค่าระดับความปลอดภัย

ส่วนที่ 6 แนวทางใช้งานในส่วนที่ 2 และ 3

ส่วนที่ 7 การสรุปใช้เทคนิคและการประเมิน

จะเห็นได้ว่ามาตรฐาน IEC 61511 และ IEC 61508 จะเป็นมาตรฐานของระบบนิรภัยที่ครอบคลุมเฉพาะระบบนิรภัยที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือ E/E/PES (Electrical/ Electronic/ Programmable Electronic System)

2.2.1 วงรอบความปลอดภัย (Safety Life Cycle)

ในมาตรฐาน IEC 61511 ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับผู้ใช้งานหรือผู้ประกอบการ เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบและใช้งานระบบวัดคุมนิรภัย โดยมีขั้นตอนการดำเนินการให้เป็นไปตามวงรอบความปลอดภัย ดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 โดยวงรอบความปลอดภัยจะเป็นลำดับขั้นตอนให้ผู้ใช้งานสำหรับการดำเนินการออกแบบระบบนิรภัย ลำดับขั้นการออกแบบตามวงรอบความปลอดภัยสามารถแสดงรายละเอียดในแต่ละเฟสได้ดังนี้

เฟส 1 จะเป็นการวิเคราะห์หาความเป็นอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นในกระบวนการผลิต รวมไปถึงการประเมินผลกระทบต่อส่วนต่าง ๆ เมื่อมีเหตุการณ์อันตรายเกิดขึ้น

เฟส 2 เมื่อทราบความเป็นอันตรายที่จะเกิดขึ้นในเฟส 1 แล้วก็จะทำการจัดเตรียมฟังก์ชันวัดคุมนิรภัยต่าง ๆ ที่อยู่ในระบบวัดคุมนิรภัยและต้องทำการประเมินความเป็นอันตรายเพื่อกำหนดค่าระดับความปลอดภัย หรือค่า SIL (Safety Integrity Level) ให้กับฟังก์ชันวัดคุมนิรภัยเหล่านี้ เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบหรือเลือกใช้เครื่องมือวัด ส่วนประมวลผล และอุปกรณ์สุดท้ายให้เหมาะสม

เฟส 3 จัดทำรายละเอียดความต้องการของระบบวัดคุมนิรภัยทั้งหมด (Safety Requirement Specification, SRS) เพื่อใช้ในการจัดส่งให้กับผู้ผลิตหรือผู้จัดจำหน่ายอุปกรณ์ในส่วนต่าง ๆ เพื่อให้ผู้ผลิตหรือผู้จัดจำหน่ายจัดทำอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ตรงกับความต้องการ

เฟส 4 เป็นการดำเนินการจัดทำระบบวัดคุมนิรภัยให้เป็นไปตามรายละเอียดความต้องการของแต่ละฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย โดยการออกแบบจะต้องให้ได้ค่าระดับความปลอดภัยเป็นไปตามค่าระดับความปลอดภัยเป้าหมายในเฟสที่ 2

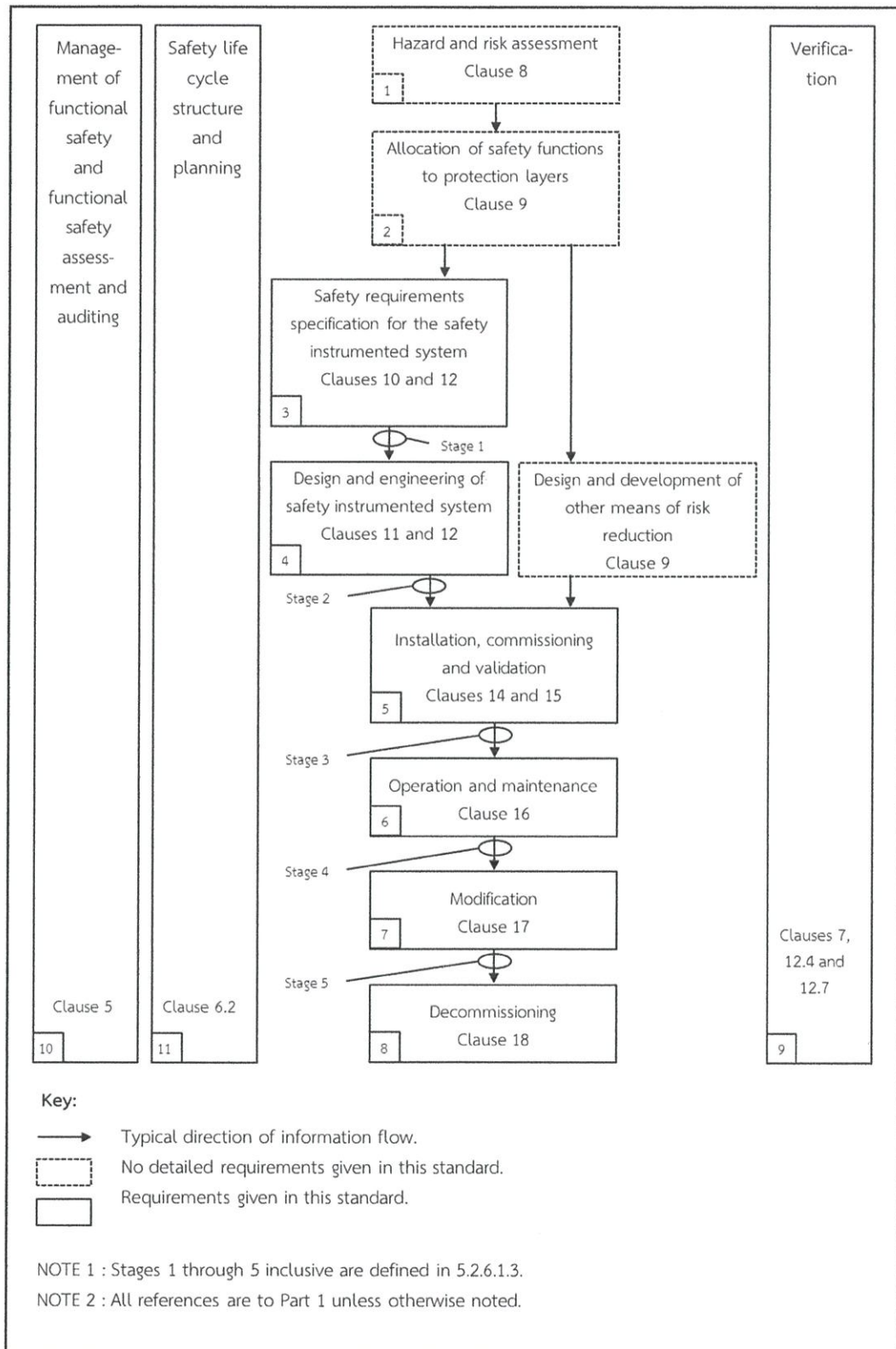
เฟส 5 ทำการติดตั้งและทดสอบการทำงาน เป็นการดำเนินการติดตั้งระบบนิรภัยที่บริเวณการใช้งานให้เป็นไปตามข้อกำหนดของผู้ผลิตและทดสอบการทำงานร่วมกับกระบวนการผลิต

เฟส 6 การใช้งานและการซ่อมบำรุง เป็นการใช้งานระบบนิรภัย สิ่งสำคัญต้องมีการจัดเตรียมการทดสอบการทำงานของฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย เพื่อให้การทำงานเป็นไปตามรายละเอียดความต้องการ และเป็นการค้นหาความผิดพลาดอันตรายที่ระบบนิรภัยไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยตัวเอง

เฟส 7 การเปลี่ยนแปลงแก้ไขระบบนิรภัยหลังการใช้งาน จัดเตรียมขั้นตอนในการแก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงระบบนิรภัยหลังจากที่มีการใช้งานผ่านไปแล้ว

เฟส 8 การหยุดการทำงานเพื่อแก้ไขเพิ่มเติม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ กับระบบนิรภัย จะต้องมีการจัดเตรียมแผนการหยุดทำงานระบบนิรภัยเพื่อดำเนินการ

ในแต่ละเฟส มาตรฐานได้จัดเตรียมรายละเอียดและข้อกำหนดต่าง ๆ ไว้อย่างชัดเจนเพื่อให้ผู้ใช้งานได้นำไปใช้ในการกำหนดรายละเอียด การเลือกอุปกรณ์ จนไปถึงการใช้งาน ซึ่งงานวิจัยนี้จะเน้นในเฟสที่ 4 ของวงรอบความปลอดภัย โดยยกกรณีศึกษาจาก [3] โดยนำฟังก์ชันวัดคุณนिरภัยของกระบวนการ Tail Gas Treating มาพิจารณา และคำนวณหาค่าระดับความปลอดภัยโดยใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อให้ได้ค่าระดับความปลอดภัยเป็นไปตามค่าระดับความปลอดภัยเป้าหมาย



รูปที่ 2.4 วงรอบความปลอดภัย (Safety Life Cycle) ของ IEC 61511

2.2.2 ค่าระดับความปลอดภัย (Safety Integrity Level, SIL)

มาตรฐาน IEC 61508 ได้มีการกำหนดค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตราย (Average Probability of Failure on Demand, PFD_{avg}) ของฟังก์ชันวัดคัมมิรภัย ที่อยู่ในระบบวัดคัมมิรภัยสำหรับการป้องกันและจำกัดขอบเขตความเสียหาย หรือจะเรียกอีกอย่างว่าค่าระดับความปลอดภัย

ค่าระดับความปลอดภัยจะแบ่งออกเป็น 4 ระดับ โดยที่ค่าระดับความปลอดภัยสูงสุดหรือค่าระดับความปลอดภัย 4 จะมีค่าความเป็นไปได้ต่ำสุดที่ระบบวัดคัมมิรภัยจะทำงานผิดพลาดเมื่อมีความต้องการ (Demand) ของฟังก์ชันวัดคัมมิรภัย ในทางกลับกันค่าระดับความปลอดภัยต่ำสุดหรือค่าระดับความปลอดภัย 1 จะมีค่าความเป็นไปได้สูงสุดที่ระบบวัดคัมมิรภัยจะทำงานผิดพลาดเมื่อมีความต้องการของฟังก์ชันวัดคัมมิรภัย

ค่าระดับความปลอดภัยของฟังก์ชันวัดคัมมิรภัย สามารถหาได้จากผลรวมของค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์การวัด ส่วนประมวลผล และอุปกรณ์สุดท้าย ดังนั้นเมื่อค่าระดับความปลอดภัยได้ถูกกำหนดให้กับฟังก์ชันวัดคัมมิรภัยโดยใช้วิธีการต่าง ๆ ตามมาตรฐาน IEC 61508/61511 แล้ว การออกแบบหรือการเลือกใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ในฟังก์ชันวัดคัมมิรภัยจะต้องมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายอยู่ในขอบเขตของแต่ละค่าระดับความปลอดภัย โดยมาตรฐานได้กำหนดค่าระดับความปลอดภัยขึ้นอยู่กับการทำงานของระบบการป้องกันหรือระบบนิรภัยได้เป็นสองโหมดคือ ค่าระดับความปลอดภัยที่อัตราการเกิดเหตุการณ์อันตรายต่ำ (Low demand mode) ซึ่งหมายความว่าความถี่ของความถี่ความต้องการบนระบบนิรภัยน้อยกว่าหนึ่งครั้งต่อปีหรือน้อยกว่าสองเท่าของความถี่ในการทดสอบการทำงาน (Proof Test) และค่าระดับความปลอดภัยที่อัตราการเกิดเหตุการณ์อันตรายสูง (High demand mode) ซึ่งหมายความว่าความถี่ของความถี่ความต้องการบนระบบนิรภัยมากกว่าหนึ่งครั้งต่อปีหรือน้อยกว่าสองเท่าของความถี่ในการทดสอบการทำงาน โดยงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่ค่าระดับความปลอดภัยใน Low demand mode

ตารางที่ 2.1 ตารางค่าระดับความปลอดภัยที่อัตราการเกิดอันตรายต่ำ (Low Demand Mode)

ค่าระดับความปลอดภัย (Safety Integrity Level –SIL)	ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตราย (Average Probability of Failure on Demand, PFD_{avg})
4	$\geq 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$
3	$\geq 10^{-4}$ to $< 10^{-3}$
2	$\geq 10^{-3}$ to $< 10^{-2}$
1	$\geq 10^{-2}$ to $< 10^{-1}$

ตารางที่ 2.2 ตารางค่าระดับความปลอดภัยที่อัตราการเกิดอันตรายสูง (High Demand Mode)

ค่าระดับความปลอดภัย (Safety Integrity Level –SIL)	ความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายต่อชั่วโมง (Probability of a dangerous failure per hour)
4	$\geq 10^{-9}$ to $< 10^{-8}$
3	$\geq 10^{-8}$ to $< 10^{-7}$
2	$\geq 10^{-7}$ to $< 10^{-6}$
1	$\geq 10^{-6}$ to $< 10^{-5}$

2.3 ค่าความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตราย (Probability of Failure on Demand, PFD) ของระบบวัดคุนิรภัย

จากหัวข้อที่ 2.1.2 ได้กล่าวไปแล้วว่าระบบวัดคุนิรภัยคือระบบที่ประกอบด้วยฟังก์ชันวัดคุนิรภัยหลาย ๆ ฟังก์ชัน โดยแต่ละฟังก์ชันวัดคุนิรภัยก็จะประกอบไปด้วย อุปกรณ์การวัด (Sensing Element) ส่วนประมวลผล (Logic Solver) และอุปกรณ์สุดท้าย (Final Element) ซึ่งการหาค่าความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของฟังก์ชันวัดคุนิรภัยจะต้องมีการจัดหาข้อมูลอัตราความผิดพลาด (Failure rate) ของอุปกรณ์ที่จะถูกนำมาใช้ในแต่ละฟังก์ชันวัดคุนิรภัย เมื่อทราบอัตราความผิดพลาดอันตรายของแต่ละอุปกรณ์ในฟังก์ชันวัดคุนิรภัยแล้ว ต่อไปจะต้องวิเคราะห์หาค่าความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตราย (PFD) และค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตราย (PFD_{avg}) ของอุปกรณ์นั้น ๆ จากนั้นนำผลที่วิเคราะห์ได้ไปคำนวณหาค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตราย (PFD_{avg}) ของฟังก์ชันวัดคุนิรภัย โดยนำค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของแต่ละอุปกรณ์ในฟังก์ชันวัดคุนิรภัยมารวมกันดังแสดงได้ตามสมการที่ (2.1)

$$PFD_{avg\ SIF} = PFD_{avg\ SE} + PFD_{avg\ LS} + PFD_{avg\ FE} \quad (2.1)$$

เมื่อ

$PFD_{avg\ SIF}$ คือ ผลรวมค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของฟังก์ชันวัดคุนิรภัย

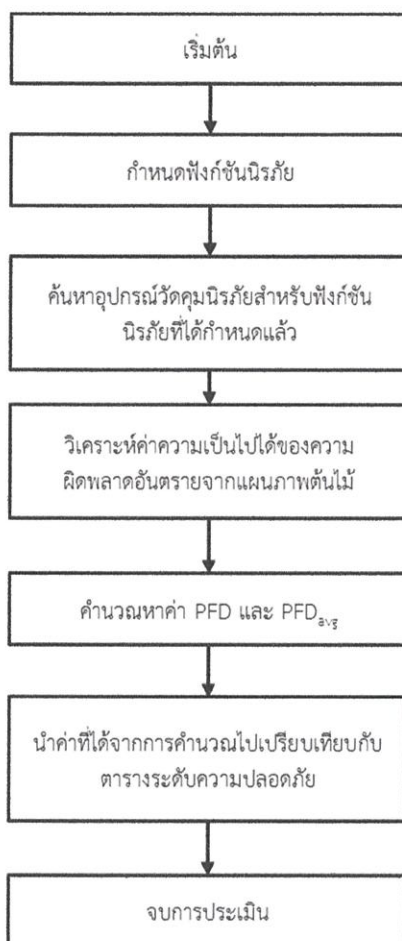
$PFD_{avg\ SE}$ คือ ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์การวัด

$PFD_{avg\ LS}$ คือ ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของส่วนประมวลผล

$PFD_{avg\ FE}$ คือ ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์สุดท้าย

หลังจากที่ได้ผลรวมค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของฟังก์ชันวัดคุนิรภัยแล้ว จะนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับตารางที่ 2.1 ผลที่ได้คือค่าระดับความปลอดภัยของฟังก์ชันวัดคุนิรภัย แล้วนำค่าระดับความปลอดภัยที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าระดับความปลอดภัยเป้าหมายที่ได้ถูกจัดทำในเฟสที่ 2 ของวงรอบความปลอดภัย โดยค่าระดับความปลอดภัยที่ได้จะต้องมีค่ามากกว่าหรือ

เท่ากับค่าระดับความปลอดภัยเป้าหมาย จากที่กล่าวมาข้างต้น รูปที่ 2.5 จะแสดงลำดับขั้นตอนการหาค่าระดับความปลอดภัยของฟังก์ชันวัดคุนิรภัย



รูปที่ 2.5 ลำดับขั้นตอนการหาค่าระดับความปลอดภัยของฟังก์ชันวัดคุนิรภัย

2.3.1 โหมดความผิดพลาด (Failure mode) ของอุปกรณ์นิรภัย

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าการหาค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของฟังก์ชันวัดคุนิรภัย จะต้องทราบผลรวมของค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของแต่ละอุปกรณ์ที่อยู่ในฟังก์ชันวัดคุนิรภัยนั้น ๆ โดยค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของแต่ละอุปกรณ์วัดคุนิรภัย จะต้องคำนวณมาจากค่าอัตราความผิดพลาด (Failure rate) ของอุปกรณ์วัดคุนิรภัยนั้น ๆ

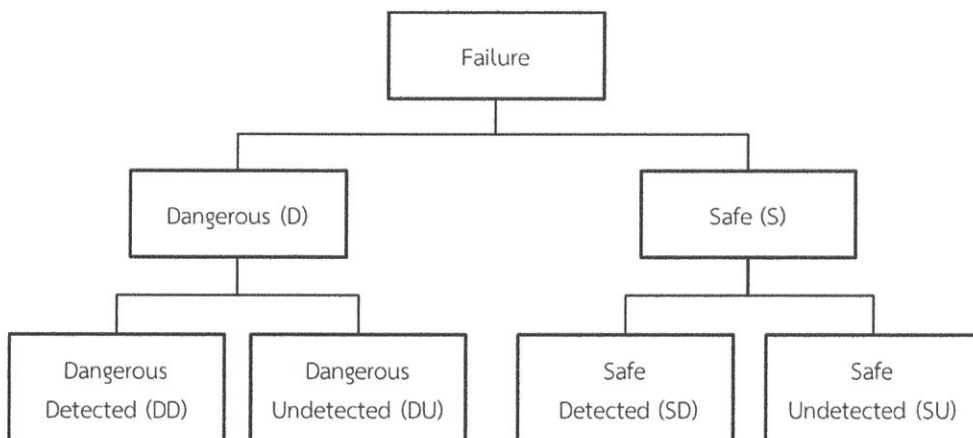
ค่าอัตราความผิดพลาดนั้นสามารถหาได้โดยวิธีการวิเคราะห์สาเหตุและผลกระทบในการทำงานของระบบนิรภัย (Failure Mode Effects and Diagnostic Analysis, FMEDA) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ถูกออกแบบมาเพื่อระบุปัญหาของอุปกรณ์โดยใช้วิธีการจากล่างขึ้นบน (bottom up) [6] หมายความว่า

ผลกระทบของความผิดพลาดของส่วนประกอบย่อยต่าง ๆ ของอุปกรณ์นั้นจะถูกนำมาประเมินในเชิงจำนวน โดยวิธีการดังกล่าวจะถูกทำการทดสอบโดยผู้ผลิตอุปกรณ์วัดคุมนิรภัยนั้น ๆ และผลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้จะทำให้ทราบอัตราความผิดพลาดของอุปกรณ์ดังนี้

1. อัตราความผิดพลาดปลอดภัยตรวจจับได้ (Safe failure Detected rate, λ^{SD})
2. อัตราความผิดพลาดปลอดภัยตรวจจับไม่ได้ (Safe failure Undetected rate, λ^{SU})
3. อัตราความผิดพลาดอันตรายตรวจจับได้ (Dangerous failure Detected rate, λ^{DD})
4. อัตราความผิดพลาดอันตรายตรวจจับไม่ได้ (Dangerous failure Undetected rate, λ^{DU})

โดยที่ความผิดพลาดปลอดภัยหมายความว่าเมื่อเกิดความผิดพลาดของอุปกรณ์ในขณะที่มีความต้องการของฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย จะไม่ส่งผลเสียหายต่อชีวิต สิ่งแวดล้อม หรือทรัพย์สิน ในทางกลับกัน ความผิดพลาดอันตรายหมายความว่าเมื่อเกิดความผิดพลาดของอุปกรณ์ในขณะที่มีความต้องการของฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย จะส่งผลเสียหายต่อชีวิต สิ่งแวดล้อม หรือทรัพย์สิน ส่วนการตรวจจับความผิดพลาดได้ (failure detected) นั้นมาจากการวินิจฉัยอัตโนมัติ (Automatic Diagnostic) ด้วยความสามารถของอุปกรณ์นั้น ๆ ซึ่งเป็นการทดสอบแบบออนไลน์ (on-line test) โดยความสามารถในการตรวจจับความผิดพลาดจะแสดงในรูปเปอร์เซ็นต์ของอัตราความผิดพลาดอันตรายตรวจจับได้ต่ออัตราความผิดพลาดอันตรายทั้งหมด หรือเรียกว่า Diagnostic Coverage Factor (DCF)

ส่วนการตรวจจับความผิดพลาดไม่ได้ (failure undetected) จะสามารถตรวจหาความผิดพลาดได้โดยการทำการทดสอบอุปกรณ์ (Proof Test) ซึ่งเป็นการทดสอบแบบออฟไลน์ (off-line test) เท่านั้น ซึ่งการทดสอบแบบนี้จะสามารถกระทำได้ในช่วงหยุดกระบวนการผลิตเท่านั้น โดยตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายนั้นจะได้มาจากอัตราความผิดพลาดอันตรายตรวจจับได้ (λ^{DD}) และ อัตราความผิดพลาดอันตรายตรวจจับไม่ได้ (λ^{DU})



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของความผิดพลาด (Failure) ของอุปกรณ์

2.3.2 ความผิดพลาดร่วม (Common Cause Failure, β)

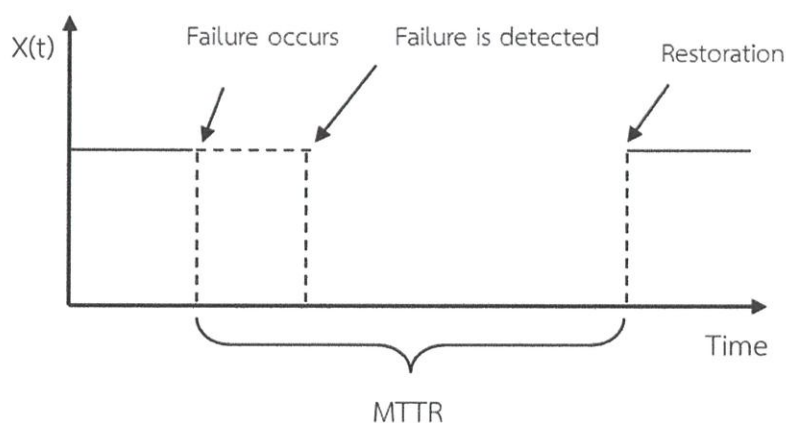
ในการติดตั้งอุปกรณ์วัดคุมনিรภัยในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตนั้น จะมีโอกาสที่อุปกรณ์นั้น ๆ จะถูกติดตั้งในบริเวณใกล้เคียงกัน ติดตั้งบนเครื่องจักรเดียวกัน หรือติดตั้งโดยใช้อุปกรณ์จากผู้ผลิตเดียวกัน ซึ่งเมื่อเกิดความผิดพลาดชนิดหนึ่งจะมีโอกาสที่จะกระทบต่ออุปกรณ์หลาย ๆ อุปกรณ์ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกัน เรียกความผิดพลาดชนิดนี้ว่าความผิดพลาดร่วม ตัวอย่างความผิดพลาดร่วมนี้ยังรวมไปถึงสภาพแวดล้อมบริเวณที่ติดตั้งเช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความสั่นสะเทือนบริเวณที่ติดตั้ง เป็นต้น

ความผิดพลาดร่วมนี้เป็นตัวแปรหนึ่งที่ใช้ในการคำนวณหาค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์วัดคุมนิรภัย โดยค่าความผิดพลาดร่วมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะนำค่ามาจากผู้ผลิตอุปกรณ์ยี่ห้อหนึ่ง โดยกำหนดให้ค่าความผิดพลาดร่วม (β) มีค่าเท่ากับ 0.05

2.3.3 เวลาเฉลี่ยในการซ่อมแซม (Mean Time To Repair, MTTR)

ค่าเวลาเฉลี่ยในการซ่อมแซมจะเป็นช่วงเวลาที่เริ่มนับจากมีความผิดพลาดกับตัวอุปกรณ์วัดคุมนิรภัยไปจนถึงเวลาก่อนที่จะนำอุปกรณ์นั้น ๆ กลับไปติดตั้งเพื่อใช้งานต่อไป การประมาณค่าเวลาเฉลี่ยในการซ่อมแซม ทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากการเสียหายมีลักษณะแตกต่างกัน ดังนั้นการหาค่าเวลาเฉลี่ยในการซ่อมแซมมักจะทำการประมาณค่า โดยการทดลองสร้างกลุ่มของความเสียหายเข้าไปในระบบ จากนั้นทำการวัดเวลาที่ต้องการในการซ่อมแซมอุปกรณ์ โดยหน่วยของค่าเวลาเฉลี่ยในการซ่อมแซมจะนับเป็น ชั่วโมง

ค่าเวลาเฉลี่ยในการซ่อมแซมนี้เป็นตัวแปรหนึ่งที่ใช้ในการคำนวณหาค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์วัดคุมนิรภัย โดยค่าเวลาเฉลี่ยในการซ่อมแซมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะนำค่ามาจากผู้ผลิตอุปกรณ์ยี่ห้อหนึ่ง



รูปที่ 2.7 ช่วงเวลาเฉลี่ยในการซ่อมแซม (Mean Time To Repair, MTTR)

2.3.4 การทดสอบอุปกรณ์วัดคummินิรัยแบบสมบูรณ์และแบบไม่สมบูรณ์ (Perfect and Imperfect Proof Test)

จากหัวข้อที่ 2.3.1 ได้กล่าวว่าการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์วัดคummินิรัย เป็นการทดสอบที่ต้องกระทำในช่วงหยุดกระบวนการผลิตเท่านั้น โดยการทดสอบแบบนี้จะทำให้ความผิดพลาดอันตรายที่ตรวจจับไม่ได้ (Dangerous failure Undetected) ถูกเปิดเผย

มาตรฐาน IEC 61508 และ IEC 61511 ได้กล่าวไว้ว่าหลังจากที่อุปกรณ์วัดคummินิรัยถูกทำการทดสอบ จะทำให้อุปกรณ์วัดคummินิรัยเหล่านั้นสามารถกลับมาทำงานได้อย่างสมบูรณ์แบบ นั้นหมายความว่าความผิดพลาดอันตรายที่ตรวจจับไม่ได้จะถูกเปิดเผยทั้งหมด หรือเรียกการทดสอบแบบนี้ว่าการทดสอบแบบสมบูรณ์ (Perfect Proof Test) แต่ในทางปฏิบัติการทดสอบนั้นอาจจะสามารถตรวจจับความผิดพลาดอันตรายได้แค่บางส่วนขณะทำการทดสอบ ทำให้ยังมีความผิดพลาดอันตรายหลงเหลืออยู่ ซึ่งทำให้อุปกรณ์เหล่านั้นกลับมาทำงานได้ไม่สมบูรณ์แบบ และเมื่อมีความต้องการ (Demand) ของฟังก์ชันวัดคummินิรัย อุปกรณ์เหล่านั้นก็อาจจะไม่สามารถทำงานตามฟังก์ชันวัดคummินิรัยเหล่านั้น ทำให้เกิดอันตรายต่อกระบวนการผลิตได้ เรียกการทดสอบแบบนี้ว่าการทดสอบแบบไม่สมบูรณ์ (Imperfect Proof Test) โดยความสามารถในการตรวจหาความผิดพลาดอันตรายตรวจจับไม่ได้ที่ถูกเปิดเผยขณะทำการทดสอบ จะเรียกว่า Proof Test Coverage (C_{PT}) ซึ่งจะเป็นอัตราส่วนความผิดพลาดอันตรายตรวจจับไม่ได้ที่ถูกเปิดเผยขณะทำการทดสอบต่อความผิดพลาดอันตรายตรวจจับไม่ได้ทั้งหมด จะแสดงอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์

สาเหตุของการทดสอบแบบไม่สมบูรณ์นี้ อาจจะมาจกขั้นตอนการทดสอบไม่ครอบคลุมถึงการตรวจจับความผิดพลาดทั้งหมด หรืออาจจะมาจากผู้ทำการทดสอบไม่มีความรู้ความสามารถหรือทักษะในการทดสอบอุปกรณ์วัดคummินิรัยเหล่านั้น แม้ว่ากรทดสอบการทำงานของอุปกรณ์วัดคummินิรัยนั้นจะทำให้ความผิดพลาดอันตรายตรวจจับไม่ได้ที่ถูกเปิดเผย แต่ถ้าอุปกรณ์เหล่านี้ถูกทำการทดสอบแบบไม่สมบูรณ์ จะทำให้ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้นทุก ๆ ปีตลอดอายุการใช้งาน [5] อย่างไรก็ตามค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์จะขึ้นอยู่กับช่วงเวลาในการทำการทดสอบ (Proof Test Interval, T) ของอุปกรณ์ ยิ่งถ้ามีความถี่ในการทดสอบมาก จะทำให้ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ลดลง ในทางกลับกันยิ่งถ้ามีความถี่ในการทดสอบมากก็จะทำให้มีค่าใช้จ่ายในการทดสอบมากขึ้นเช่นกัน

2.4 การหาค่าความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายโดยใช้แผนภาพต้นไม้ (Fault Tree Analysis, FTA)

แผนภาพต้นไม้เป็นการวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้หลักการเขียนโครงสร้างแสดงความสัมพันธ์เพื่อหาสาเหตุและผลที่เกิดขึ้น (Cause and Effect) โดยกำหนดให้ส่วนบนสุดของโครงสร้าง (Top Event) เป็น

ความผิดพลาดหรืออุบัติเหตุที่สนใจและทำการวิเคราะห์หาสาเหตุที่จะทำให้เกิดเหตุการณ์นั้นไปเรื่อย ๆ จนถึงขั้นสุด

ขั้นตอนในการเริ่มต้นทำแผนภาพต้นไม้ ต้องมีความเข้าใจและรู้การทำงานของระบบ โดยทำการแสดงปัญหาทั้งหมดที่จะเกิดขึ้น ต่อจากนั้นระบุถึงสาเหตุและขั้นตอนที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงหรือข้อบกพร่องภายในระบบ ซึ่งอาจจะเกิดจากสาเหตุย่อยหลาย ๆ สาเหตุและสาเหตุพื้นฐาน (Basic Event) ที่สนับสนุนการเกิดเหตุย่อยขึ้น การวิเคราะห์จะใช้แอนด์เกต (AND Gate) ซึ่งเป็นลอจิกที่แสดงเหตุการณ์เอาต์พุต เมื่อเหตุการณ์ที่อินพุตทั้งหมดมีค่าเป็นจริง หรือออร์กเกต (OR Gate) ซึ่งเป็นลอจิกที่แสดงเหตุการณ์เอาต์พุต เมื่อเหตุการณ์ที่อินพุตใดอินพุตหนึ่งมีค่าเป็นจริง เพื่อหาความเชื่อมโยงของสาเหตุต่าง ๆ ที่สนับสนุนให้เกิดความผิดพลาดขึ้นแล้วนำไปเขียนแผนภาพต้นไม้จากด้านบนลงสู่ด้านล่าง

สัญลักษณ์และความหมายที่ใช้ในการวิเคราะห์วิธีแผนภาพต้นไม้ ในปัจจุบันนี้มีสัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หลายสัญลักษณ์ บางครั้งผู้ใช้งานอาจจะดัดแปลงให้เหมาะสมกับลักษณะงานที่จะนำไปใช้ อย่างไรก็ตามเพื่อให้เนื้อหาอยู่ในขอบเขต ในที่นี้จะเสนอโครงสร้างและสัญลักษณ์ที่จำเป็นต้องนำมาใช้ โดยแต่ละสัญลักษณ์จะแสดงถึงเหตุการณ์และผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้นและมีลอจิกพื้นฐานดังแสดงในตารางที่ 2.3

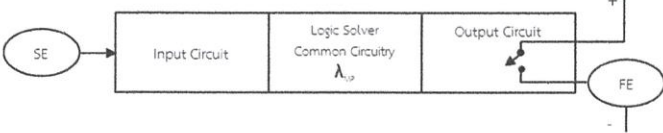
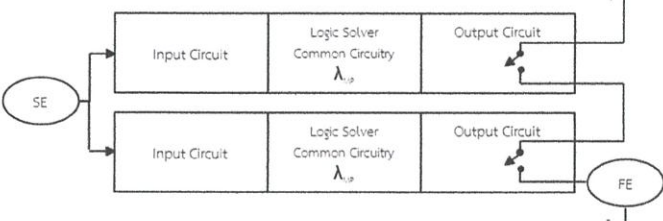
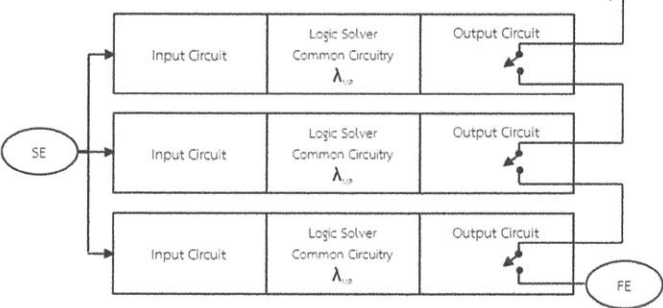
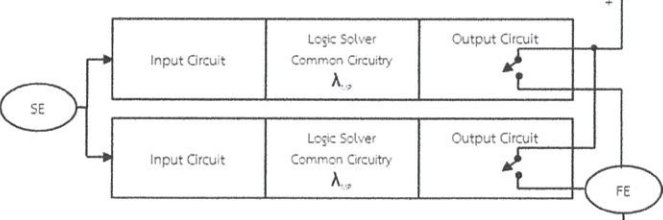
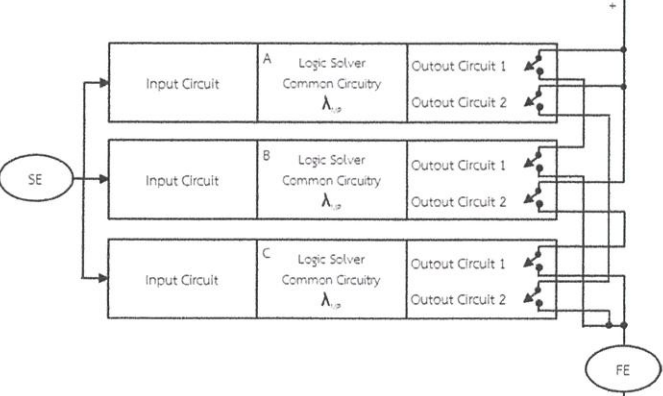
จาก [6] ได้ใช้แผนภาพต้นไม้ในการวิเคราะห์หาค่าความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์การวัด โดยแสดงการวิเคราะห์หาค่า PFD ของอุปกรณ์การวัดที่ใช้ในระบบวัดคัมมิรภัยในรูปแบบต่าง ๆ ดังนี้

1. อุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1o1 (One out of One Voting)
2. อุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1o2 (One out of Two Voting)
3. อุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1o3 (One out of Three Voting)
4. อุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2o2 (Two out of Two Voting)
5. อุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2o3 (Two out of Three Voting)

ตารางที่ 2.3 สัญลักษณ์ของแผนภาพต้นไม้ (Fault Tree Analysis, FTA)

สัญลักษณ์	ชื่อ	ความหมาย
	AND Gate (สาเหตุหลายสาเหตุ)	เหตุการณ์จะเกิดขึ้นได้เนื่องจากสาเหตุของเหตุการณ์ย่อยทุกตัว
	OR Gate (สาเหตุใดสาเหตุหนึ่ง)	เหตุการณ์จะเกิดขึ้นได้เนื่องจากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่งของสาเหตุย่อย
	Basic Event (สาเหตุพื้นฐาน)	เหตุการณ์ย่อยเกิดขึ้นได้ตามปกติ ซึ่งหมายถึงสาเหตุที่เห็นได้ชัดเจนโดยไม่ต้องทำการวิเคราะห์หาสาเหตุต่อไปถือเป็นสาเหตุแรกของการเกิดอุบัติเหตุ
	Fault Tree Event (เหตุการณ์ย่อย)	เหตุการณ์ย่อยที่ส่งผลให้เกิดเหตุการณ์ต่อเนื่องจนเป็นเหตุให้เกิดอุบัติเหตุ
	Undeveloped Event (เหตุการณ์ที่วิเคราะห์ต่อไม่ได้)	เหตุการณ์ย่อยที่ไม่ต้องการวิเคราะห์สาเหตุต่อไปเนื่องจากไม่มีข้อมูลสนับสนุน
	External Event (เหตุการณ์ภายนอก)	เหตุการณ์ย่อยภายนอกหรือปัจจัยภายนอกที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดเหตุการณ์ต่าง ๆ

ตารางที่ 2.4 อุปกรณ์การวัดในรูปแบบต่าง ๆ

สัญลักษณ์	ความหมาย
	<p>อุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1oo1 (One out of One Voting)</p>
	<p>อุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1oo2 (One out of Two Voting)</p>
	<p>อุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1oo3 (One out of Three Voting)</p>
	<p>อุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2oo2 (Two out of Two Voting)</p>
	<p>อุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2oo3 (Two out of Three Voting)</p>

2.4.1 การหาค่า PFD ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1๐๐1

อุปกรณ์การวัดรูปแบบนี้จะมีอุปกรณ์การวัดเพียงตัวเดียวต่อเข้ากับวงจรรับสัญญาณ (Input Circuit) โดยมีหน่วยประมวลผลทำหน้าที่ประมวลผลทางตรรกะ และส่งสัญญาณไปยังวงจรขับสัญญาณ (Output Circuit) ในการทำงานถ้าอุปกรณ์วัดค่าความผิดพลาดได้หรือถึงจุดทำงานที่กำหนดไว้ก็จะทำให้ระบบวัดคูนिरภัยทำงานทันที แต่ถ้าอุปกรณ์การวัดนี้เกิดความผิดพลาดอันตรายขึ้นและระบบวัดคูนिरภัยไม่สามารถตรวจจับความผิดพลาดนั้นได้ จะทำให้กระบวนการผลิตเข้าสู่สภาวะอันตรายเพราะระบบวัดคูนिरภัยไม่สามารถทำงานได้

ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตราย (PFD_{avg}) ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1๐๐1 ถูกแสดงในรูปที่ 2.8 โดยให้การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์เป็นแบบสมบูรณ์ จะสามารถแสดงได้ดังนี้

$$PFD_{1001} = \lambda^{DD} \cdot RT + \lambda^{DU} \cdot T_I \quad (2.2)$$

ทำการอินทิเกรตในช่วงเวลาที่ต้องการทดสอบ

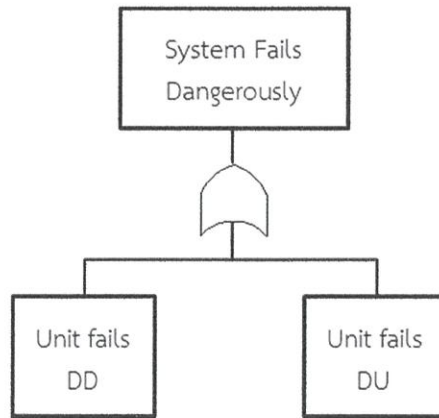
$$PFD_{avg\ 1001} = \frac{1}{T_I} \int_0^{T_I} (\lambda^{DD} \cdot RT + \lambda^{DU} \cdot T_I) dt \quad (2.3)$$

ดังนั้นค่า PFD_{avg} ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1๐๐1 ที่มีการทดสอบแบบสมบูรณ์ จะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$PFD_{avg\ 1001} = \lambda^{DD} \cdot RT + \lambda^{DU} \cdot \frac{T_I}{2} \quad (2.4)$$

แต่ถ้ามีการพิจารณาว่าอุปกรณ์นั้นมีการทดสอบแบบไม่สมบูรณ์ ค่า PFD_{avg} จะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$PFD_{avg\ 1001} = \lambda^{DD} \cdot RT + C_{PT} \cdot \lambda^{DU} \cdot \frac{T_I}{2} + (1 - C_{PT}) \cdot \lambda^{DU} \cdot \frac{LT}{2} \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.8 แผนภาพต้นไม้สำหรับหาค่า PFD ของอุปกรณ์แบบ 1oo1

2.4.2 การหาค่า PFD ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1oo2

อุปกรณ์การวัดรูปแบบนี้จะมีอุปกรณ์การวัดสองตัวต่อเข้ากับวงจรรับสัญญาณ (Input Circuit) โดยมีหน่วยประมวลผลทำหน้าที่ประมวลผลทางตรรกะ และส่งสัญญาณไปยังวงจรขับสัญญาณ (Output Circuit) ในการทำงานถ้าอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งวัดค่าความผิดพลาดได้หรือถึงจุดทำงานที่กำหนดไว้ก็จะทำให้ระบบวัดคุมนิรภัยทำงานทันที แต่ถ้าอุปกรณ์การวัดตัวใดตัวหนึ่งเกิดความผิดพลาดอันตรายขึ้น อุปกรณ์การวัดตัวที่เหลือจะยังคงทำหน้าที่ต่อไปได้ และเมื่ออุปกรณ์ทั้งสองตัวเกิดความผิดพลาดอันตรายขึ้นพร้อมกันและระบบวัดคุมนิรภัยไม่สามารถตรวจจับความผิดพลาดนั้นได้ จะทำให้กระบวนการผลิตเข้าสู่สภาวะอันตรายเพราะระบบวัดคุมนิรภัยไม่สามารถทำงานได้

ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตราย (PFD_{avg}) ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1oo2 ถูกแสดงในรูปที่ 2.9 โดยให้การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์เป็นแบบสมบูร์น จะสามารถแสดงได้ดังนี้

$$PFD_{1oo2} = \lambda^{DUC} \cdot T_1 + \lambda^{DDC} \cdot RT + (\lambda^{DDN} \cdot RT + \lambda^{DUN} \cdot T_1)^2 \quad (2.6)$$

ทำการอินทิเกรตในช่วงเวลาที่ต้องการทดสอบ

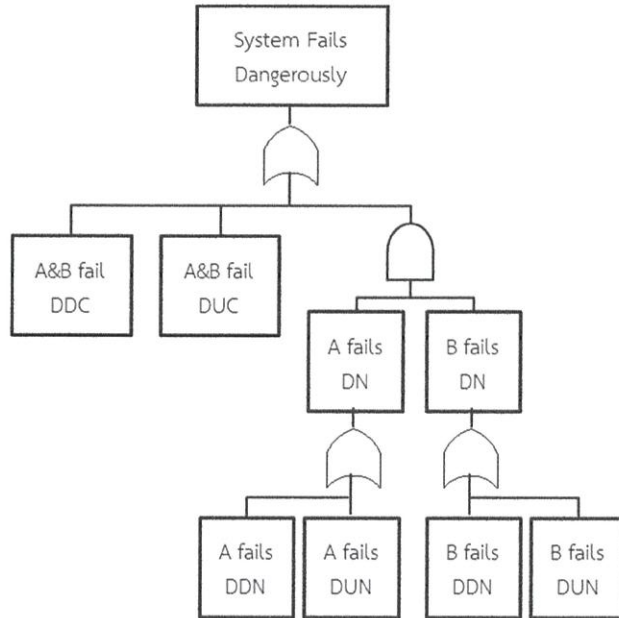
$$PFD_{avg \ 1oo2} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} (\lambda^{DUC} \cdot T_1 + \lambda^{DDC} \cdot RT + (\lambda^{DDN} \cdot RT + \lambda^{DUN} \cdot T_1)^2) dt \quad (2.7)$$

ดังนั้นค่า PFD_{avg} ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1oo2 ที่มีการทดสอบแบบสมบูร์น จะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$PFD_{avg \ 1oo2} = \lambda^{DUC} \cdot \frac{T_1}{2} + \lambda^{DDC} \cdot RT + (\lambda^{DDN} \cdot RT)^2 + (\lambda^{DDN} \cdot RT \cdot \lambda^{DUN} \cdot T_1) + \frac{(\lambda^{DUN} \cdot T_1)^2}{3} \quad (2.8)$$

แต่ถ้ามีการพิจารณาว่าอุปกรณ์นั้นมีการทดสอบแบบไม่สมบูร์น ค่า PFD_{avg} จะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 PFD_{avg\ 1002} = & C_{PT} \cdot \lambda^{DUC} \cdot \frac{T_I}{2} + (1 - C_{PT}) \cdot \lambda^{DUC} \cdot \frac{LT}{2} + \lambda^{DDC} \cdot RT + (\lambda^{DDN} \cdot RT)^2 + (\lambda^{DDN} \cdot RT \cdot C_{PT} \cdot \lambda^{DUN} \cdot T_I) \\
 & + (\lambda^{DDN} \cdot RT \cdot (1 - C_{PT}) \cdot \lambda^{DUN} \cdot LT) + \frac{(C_{PT} \cdot \lambda^{DUN} \cdot T_I)^2}{3} + \frac{((1 - C_{PT}) \cdot \lambda^{DUN} \cdot LT)^2}{3}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$



รูปที่ 2.9 แผนภาพต้นไม้สำหรับหาค่า PFD ของอุปกรณ์แบบ 1002

2.4.3 การหาค่า PFD ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1003

อุปกรณ์การวัดรูปแบบนี้จะมีอุปกรณ์การวัดสามตัวต่อเข้ากับวงจรรับสัญญาณ (Input Circuit) โดยมีหน่วยประมวลผลทำหน้าที่ประมวลผลทางตรรกะ และส่งสัญญาณไปยังวงจรขับสัญญาณ (Output Circuit) ในการทำงานถ้าอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งวัดค่าความผิดพลาดได้หรือถึงจุดทำงานที่กำหนดไว้ก็จะทำให้ระบบวัดคุมนิรภัยทำงานทันที ถ้าอุปกรณ์การวัดตัวใดตัวหนึ่งหรือสองตัวเกิดความผิดพลาดอันตรายขึ้น อุปกรณ์การวัดตัวที่เหลือจะยังคงทำหน้าที่ต่อไปได้ และเมื่ออุปกรณ์ทั้งสามตัวเกิดความผิดพลาดอันตรายขึ้นพร้อมกันและระบบวัดคุมนิรภัยไม่สามารถตรวจจับความผิดพลาดนั้นได้ จะทำให้กระบวนการผลิตเข้าสู่สภาวะอันตรายเพราะระบบวัดคุมนิรภัยไม่สามารถทำงานได้ ในรูปแบบนี้จะมีโอกาสให้เกิดการทำงานแบบไม่เป็นจริง (Spurious Trip) ได้สูง เนื่องจากมีจำนวนอุปกรณ์มากกว่ารูปแบบอื่น ๆ

ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตราย (PFD_{avg}) ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1003 ถูกแสดงในรูปที่ 2.10 โดยให้การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์เป็นแบบสมบรูณ์ จะสามารถแสดงได้ดังนี้

$$PFD_{1003} = \lambda^{DUC} \cdot T_I + \lambda^{DDC} \cdot RT + (\lambda^{DDN} \cdot RT + \lambda^{DUN} \cdot T_I)^3 \tag{2.10}$$

ทำการอินทิเกรตในช่วงเวลาที่ต้องการทดสอบ

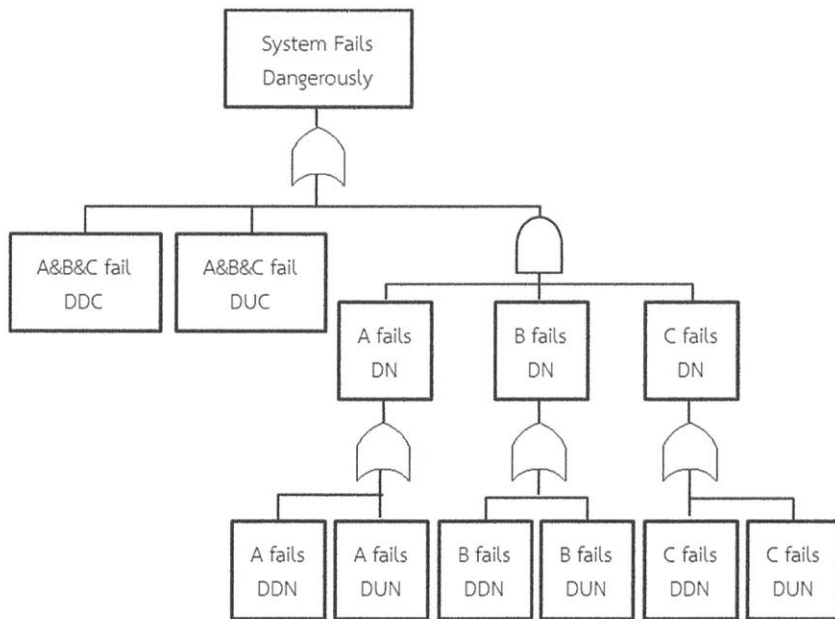
$$PFD_{avg\ 1003} = \frac{1}{T_I} \int_0^{T_I} (\lambda^{DUC} \cdot T_I + \lambda^{DDC} \cdot RT + (\lambda^{DDN} \cdot RT + \lambda^{DUN} \cdot T_I)^3) dt \tag{2.11}$$

ดังนั้นค่า PFD_{avg} ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1003 ที่มีการทดสอบแบบสมบูรณ์ จะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$PFD_{avg\ 1003} = \lambda^{DUC} \cdot \frac{T_I}{2} + \lambda^{DDC} \cdot RT + (\lambda^{DDN} \cdot RT)^3 + \frac{3}{2} \cdot (\lambda^{DDN} \cdot RT)^2 \cdot (\lambda^{DUN} \cdot T_I) + (\lambda^{DDN} \cdot RT) \cdot (\lambda^{DUN} \cdot T_I)^2 + \frac{1}{4} \cdot (\lambda^{DUN} \cdot T_I)^3 \tag{2.12}$$

แต่ถ้ามีการพิจารณาว่าอุปกรณ์นั้นมีการทดสอบแบบไม่สมบูรณ์ ค่า PFD_{avg} จะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$PFD_{avg\ 1003} = C_{PT} \cdot \lambda^{DUC} \cdot \frac{T_I}{2} + (1 - C_{PT}) \cdot \lambda^{DUC} \cdot \frac{LT}{2} + \lambda^{DDC} \cdot RT + (\lambda^{DDN} \cdot RT)^3 + \frac{3}{2} \cdot (\lambda^{DDN} \cdot RT)^2 \cdot (C_{PT} \cdot \lambda^{DUN} \cdot T_I) + \frac{3}{2} \cdot (\lambda^{DDN} \cdot RT)^2 \cdot ((1 - C_{PT}) \cdot \lambda^{DUN} \cdot LT) + (\lambda^{DDN} \cdot RT) \cdot (C_{PT} \cdot \lambda^{DUN} \cdot T_I)^2 + (\lambda^{DDN} \cdot RT) \cdot ((1 - C_{PT}) \cdot \lambda^{DUN} \cdot LT)^2 + \frac{1}{4} \cdot (C_{PT} \cdot \lambda^{DUN} \cdot T_I)^3 + \frac{1}{4} \cdot ((1 - C_{PT}) \cdot \lambda^{DUN} \cdot LT)^3 \tag{2.13}$$



รูปที่ 2.10 แผนภาพต้นไม้สำหรับหาค่า PFD ของอุปกรณ์แบบ 1003

2.4.4 การหาค่า PFD ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2o02

อุปกรณ์การวัดรูปแบบนี้จะมีอุปกรณ์การวัดสองตัวต่อเข้ากับวงจรรับสัญญาณ (Input Circuit) โดยมีหน่วยประมวลผลทำหน้าที่ประมวลผลทางตรรกะ และส่งสัญญาณไปยังวงจรขับสัญญาณ (Output Circuit) ในการทำงานถ้าอุปกรณ์ทั้งสองตัววัดค่าความผิดพลาดได้พร้อมกันหรือถึงจุดทำงานที่กำหนดไว้ก็จะทำให้ระบบวัดคุมนิรภัยทำงานทันที แต่ถ้าอุปกรณ์การวัดตัวใดตัวหนึ่งเกิดความผิดพลาดอันตรายเป็นขึ้นและระบบวัดคุมนิรภัยไม่สามารถตรวจจับความผิดพลาดนั้นได้ จะทำให้กระบวนการผลิตเข้าสู่สภาวะอันตรายเป็นเพราะระบบวัดคุมนิรภัยไม่สามารถทำงานได้ ในรูปแบบนี้จะมีการทำงานคล้ายกันกับในรูปแบบ 1o01 แต่ในรูปแบบนี้จะมีค่าความพร้อมใช้งาน (Availability) สูงกว่าแบบ 1o01

ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายเป็น (PFD_{avg}) ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2o02 ถูกแสดงในรูปที่ 2.11 โดยให้การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์เป็นแบบสมบูร์น จะสามารถแสดงได้ดังนี้

$$PFD_{2o02} = \lambda^{DUC} \cdot T_1 + \lambda^{DDC} \cdot RT + 2 \cdot \lambda^{DDN} \cdot RT + 2 \cdot \lambda^{DUN} \cdot T_1 \quad (2.14)$$

ทำการอินทิเกรตในช่วงเวลาที่ต้องการทดสอบ

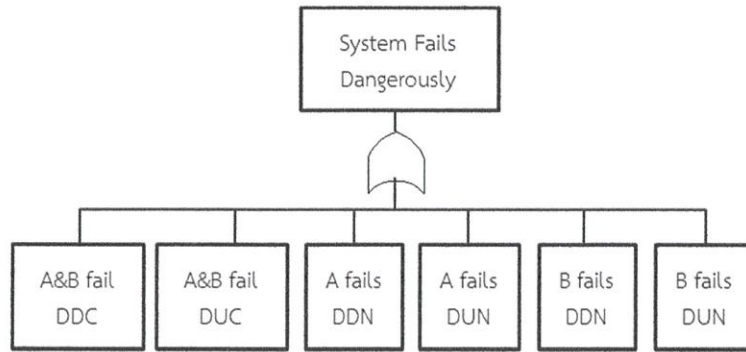
$$PFD_{avg\ 2o02} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} (\lambda^{DUC} \cdot T_1 + \lambda^{DDC} \cdot RT + 2 \cdot \lambda^{DDN} \cdot RT + 2 \cdot \lambda^{DUN} \cdot T_1) dt \quad (2.15)$$

ดังนั้นค่า PFD_{avg} ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2o02 ที่มีการทดสอบแบบสมบูร์น จะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$PFD_{avg\ 2o02} = \lambda^{DUC} \cdot \frac{T_1}{2} + \lambda^{DDC} \cdot RT + 2 \cdot \lambda^{DDN} \cdot RT + 2 \cdot \lambda^{DUN} \cdot \frac{T_1}{2} \quad (2.16)$$

แต่ถ้ามีการพิจารณาว่าอุปกรณ์นั้นมีการทดสอบแบบไม่สมบูร์น ค่า PFD_{avg} จะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$PFD_{avg\ 2o02} = C_{PT} \cdot \lambda^{DUC} \cdot \frac{T_1}{2} + (1 - C_{PT}) \cdot \lambda^{DUC} \cdot \frac{LT}{2} + \lambda^{DDC} \cdot RT + 2 \cdot \lambda^{DDN} \cdot RT \\ + 2 \cdot C_{PT} \cdot \lambda^{DUN} \cdot \frac{T_1}{2} + 2 \cdot (1 - C_{PT}) \cdot \lambda^{DUN} \cdot \frac{LT}{2} \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.11 แผนภาพต้นไม้สำหรับหาค่า PFD ของอุปกรณ์แบบ 2oo2

2.4.5 การหาค่า PFD ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2oo3

อุปกรณ์การวัดรูปแบบนี้จะมีอุปกรณ์การวัดสามตัวต่อเข้ากับวงจรรับสัญญาณ (Input Circuit) โดยมีหน่วยประมวลผลทำหน้าที่ประมวลผลทางตรรกะ และส่งสัญญาณไปยังวงจรขับสัญญาณ (Output Circuit) ในการทำงานถ้าอุปกรณ์สองตัวในทั้งหมดสามตัววัดค่าความผิดปกติได้พร้อมกันหรือถึงจุดทำงานที่กำหนดไว้ก็จะทำให้ระบบวัดคุมนิรภัยทำงานทันที แต่ถ้าเกิดความผิดพลาดอันตรายในอุปกรณ์การวัดตัวใดตัวหนึ่งและระบบวัดคุมนิรภัยไม่สามารถตรวจจับความผิดพลาดนั้นได้ จะมีอุปกรณ์ตัวที่สองและตัวที่สามยังคงทำหน้าที่ต่อไปได้ในรูปแบบ 2oo2 แต่ในรูปแบบนี้จะมีเชื่อมั่นในการทำงานน้อยกว่าในรูปแบบ 1oo3 ในรูปแบบ 2oo3 ระบบวัดคุมนิรภัยสามารถตรวจสอบความผิดพลาดของอุปกรณ์ได้ด้วยตนเอง โดยการเปรียบเทียบค่าการวัดที่ได้จากอุปกรณ์การวัดทั้งสามตัว ซึ่งสามารถทำให้ทราบได้ว่าอุปกรณ์ตัวใดเกิดความผิดพลาดขึ้นและถ้าอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งเกิดความผิดพลาดอันตรายก็สามารถซ่อมแซมได้ทันที แต่ถ้าอุปกรณ์ตั้งแต่สองตัวขึ้นไป (A & B, B & C, หรือ A & C) เกิดความผิดพลาดอันตรายขึ้น อาทิเช่น อุปกรณ์การวัดไม่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าที่ต้องการวัดจะทำให้กระบวนการผลิตเข้าสู่สถานะอันตราย เพราะเมื่อกระบวนการผลิตเกิดความผิดปกติขึ้นจะทำให้ระบบวัดคุมนิรภัยไม่สามารถทำงานได้ แต่ถ้าอุปกรณ์เพียงตัวใดตัวหนึ่งเกิดความผิดพลาดอันตรายขึ้น ระบบจะเปลี่ยนการทำงานไปเป็นรูปแบบ 2oo2 (Two out of Two Voting)

ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตราย (PFD_{avg}) ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2oo3 ถูกแสดงในรูปที่ 2.12 โดยให้การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์เป็นแบบสมบูร์ณ จะสามารถแสดงได้ดังนี้

$$PFD_{2oo3} = 3 \cdot \lambda^{DUC} \cdot T_1 + 3 \cdot \lambda^{DDC} \cdot RT + 3 \cdot [(\lambda^{DDN} \cdot RT)^2 + 2 \cdot \lambda^{DDN} \cdot RT \cdot \lambda^{DUN} \cdot T_1 + (\lambda^{DUN} \cdot T_1)^2] \tag{2.18}$$

ทำการอินทิเกรตในช่วงเวลาที่ต้องการทดสอบ

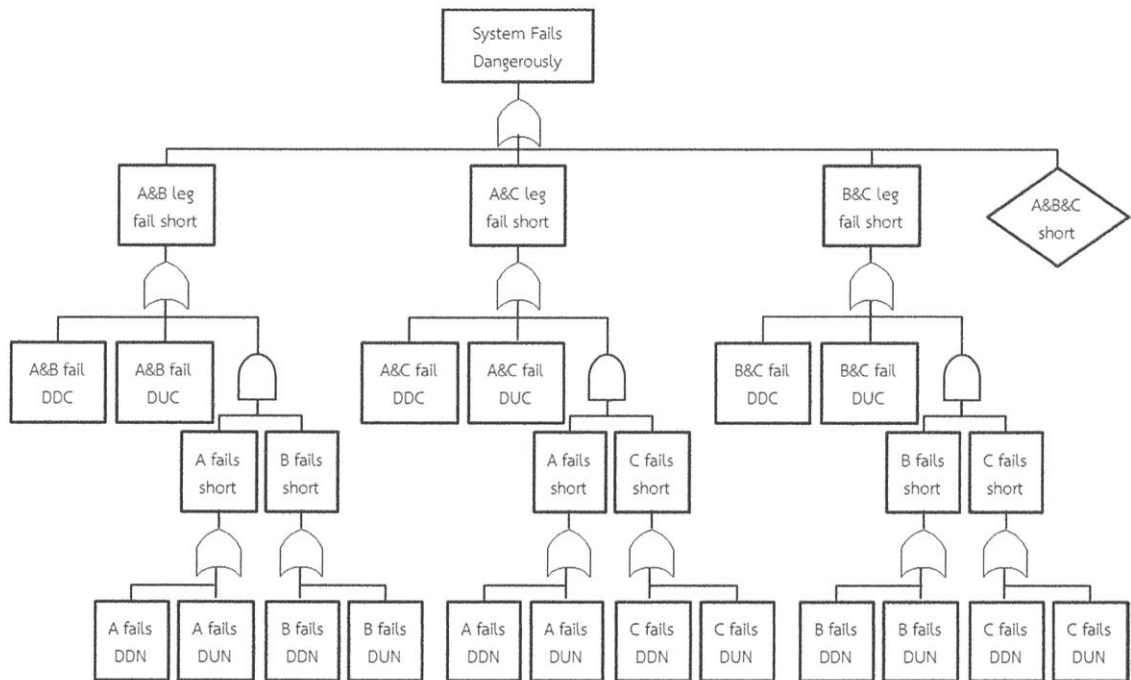
$$PFD_{avg\ 2oo3} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} [(3 \cdot \lambda^{DUC} \cdot T_1 + 3 \cdot \lambda^{DDC} \cdot RT + 3 \cdot ((\lambda^{DDN} \cdot RT)^2 + 2 \cdot \lambda^{DDN} \cdot RT \cdot \lambda^{DUN} \cdot T_1 + (\lambda^{DUN} \cdot T_1)^2)] dt \tag{2.19}$$

ดังนั้นค่า PDF_{avg} ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2oo3 ที่มีการทดสอบแบบสมบูร์ณ์ จะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$PDF_{avg\ 2oo3} = \frac{3}{2} \cdot \lambda^{DUC} \cdot T_I + 3 \cdot \lambda^{DDC} \cdot RT + 3 \cdot [(\lambda^{DDN} \cdot RT)^2 + (\lambda^{DDN} \cdot RT \cdot \lambda^{DUN} \cdot T_I) + \frac{(\lambda^{DUN} \cdot T_I)^2}{3}] \quad (2.20)$$

แต่ถ้ามีการพิจารณาว่าอุปกรณ์นั้นมีการทดสอบแบบไม่สมบูร์ณ์ ค่า PDF_{avg} จะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$PDF_{avg\ 2oo3} = \frac{3}{2} \cdot C_{PT} \cdot \lambda^{DUC} \cdot T_I + \frac{3}{2} \cdot (1 - C_{PT}) \cdot \lambda^{DUC} \cdot LT + 3 \cdot \lambda^{DDC} \cdot RT + 3 \cdot [(\lambda^{DDN} \cdot RT)^2 + (\lambda^{DDN} \cdot RT \cdot C_{PT} \cdot \lambda^{DUN} \cdot T_I) + (\lambda^{DDN} \cdot RT \cdot (1 - C_{PT}) \cdot \lambda^{DUN} \cdot LT) + \frac{(C_{PT} \cdot \lambda^{DUN} \cdot T_I)^2}{3} + \frac{((1 - C_{PT}) \cdot \lambda^{DUN} \cdot LT)^2}{3}] \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.12 แผนภาพต้นไม้สำหรับหาค่า PFD ของอุปกรณ์แบบ 2oo3

เมื่อ

RT (Repair Time)

คือ เวลาเฉลี่ยในการซ่อมแซม (MTTR) หน่วยเป็นชั่วโมง

C_{PT} (Proof Test Coverage)

คือ อัตราส่วนความผิดพลาดอันตรายตรวจจับไม่ได้ที่ถูกเปิดเผยขณะทำการทดสอบต่อความผิดพลาดอันตรายตรวจจับไม่ได้ทั้งหมด หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

LT (Life time)	คือ อายุการใช้งานของอุปกรณ์ หน่วยเป็นชั่วโมง
T_1 (Proof Test Interval)	คือ ช่วงเวลาในการทดสอบอุปกรณ์ หน่วยเป็นชั่วโมง
λ^{DDC}	คือ อัตราความผิดพลาดอันตรายตรวจจับได้ที่มีความผิดพลาดร่วม หาได้จาก $\lambda^{DDC} = \beta \times \lambda^{DD}$ หน่วยเป็นครั้งต่อชั่วโมง
λ^{DDN}	คือ อัตราความผิดพลาดอันตรายตรวจจับได้ที่ไม่มีความผิดพลาดร่วม หาได้จาก $\lambda^{DDN} = (1-\beta) \times \lambda^{DD}$ หน่วยเป็นครั้งต่อชั่วโมง
λ^{DUC}	คือ อัตราความผิดพลาดอันตรายตรวจจับไม่ได้ที่มีความผิดพลาดร่วม หาได้จาก $\lambda^{DUC} = \beta \times \lambda^{DU}$ หน่วยเป็นครั้งต่อชั่วโมง
λ^{DUN}	คือ อัตราความผิดพลาดอันตรายตรวจจับไม่ได้ที่ไม่มีความผิดพลาดร่วม หาได้จาก $\lambda^{DUN} = (1-\beta) \times \lambda^{DU}$ หน่วยเป็นครั้งต่อชั่วโมง

2.4.6 การหาค่า PFD ของอุปกรณ์สุดท้าย

อุปกรณ์สุดท้ายเป็นส่วนหนึ่งของฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย และที่พบส่วนมากในกระบวนการผลิตนั้น จะเป็นวาล์วนิรภัย โดยวาล์วนิรภัยเหล่านี้จะต้องมีการทดสอบการทำงานเพื่อที่จะหาความผิดพลาดที่อาจจะนำไปสู่สถานะอันตรายของกระบวนการผลิตนั้น ๆ ซึ่งการทดสอบการทำงานของวาล์วนิรภัยจะสามารถกระทำได้ทั้งแบบสมบูรณ์ (Full Function Test) และแบบไม่สมบูรณ์ (Partial Stroke Test)

ในการทดสอบการทำงานของวาล์วนิรภัยแบบสมบูรณ์นั้นจะต้องมีการถอดอุปกรณ์ออกไปทำการทดสอบ ทำให้ต้องมีการหยุดกระบวนการผลิต โดยการเพิ่มความถี่ในการทดสอบให้บ่อยขึ้นเพื่อที่จะลดความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายนั้นเป็นไปได้อย่างในกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง ซึ่งไม่อาจหยุดการผลิตได้จนกว่าจะถึงช่วงเวลาในการซ่อมบำรุงใหญ่ (Shutdown Period) ดังนั้นวิธีการทดสอบแบบไม่สมบูรณ์จึงเป็นวิธีหนึ่งที่ได้ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงค่าความผิดพลาดอันตรายของวาล์วนิรภัย เนื่องจากการทดสอบแบบนี้ เป็นการทดสอบแบบออนไลน์ ซึ่งไม่ต้องทำการหยุดกระบวนการผลิต

จาก [7] ได้กล่าวถึงวิธีโดยทั่วไปในการปรับปรุงค่าความผิดพลาดอันตรายสำหรับอุปกรณ์สุดท้าย โดยเฉพาะวาล์วนิรภัย โดยการเพิ่มวาล์วนิรภัย (Redundancy) ซึ่งจะถูกติดตั้งในลักษณะอนุกรม เพื่อลดความเป็นไปได้ในความผิดพลาดในการทำงานของวาล์วนิรภัย แต่ถ้าหากพิจารณาแล้วว่าการติดตั้งวาล์วแบบ Redundancy นั้น มีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงและบ่อยครั้งที่พบปัญหาเรื่องพื้นที่จำกัดในการติดตั้ง การทดสอบการทำงานของวาล์วนิรภัยทั้งแบบสมบูรณ์และแบบไม่สมบูรณ์ จะถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงค่าความผิดพลาดของวาล์วนิรภัย

ในงานวิจัยนี้ได้นำรูปแบบของอุปกรณ์สุดท้าย และการหาค่า PFD ของอุปกรณ์สุดท้ายโดยสมการอย่างง่าย จากกรณีศึกษา [3] มาพิจารณา ซึ่งรูปแบบของอุปกรณ์สุดท้ายที่จะใช้ในการพิจารณามีดังนี้

1. วาล์วนิรภัยรูปแบบ 1oo1+1oo1

รูปแบบนี้ประกอบไปด้วยวาล์วนิรภัย 2 ชุด โดยกระบวนการผลิตจะไม่เกิดสถานะอันตราย เมื่อวาล์วนิรภัยอย่างน้อย 1 ชุดทำงานเมื่อมีสัญญาณมาจากส่วนประมวลผล และในวาล์วนิรภัยแต่ละชุด มี

รูปแบบการทำงานแบบ 1๐๐1 ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของวาล์วนิรภัยรูปแบบนี้สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$PFD_{avg} = \lambda_{FE}^D \cdot T_I \quad (2.22)$$

2. วาล์วนิรภัยรูปแบบ 1๐๐1+1๐๐1 และมีการทดสอบแบบ Partial stroke Test

รูปแบบนี้มีฟังก์ชันการทำงานเหมือนกับรูปแบบที่ 1 แต่มีการทดสอบแบบ Partial Stroke Test เพิ่มเติมเข้ามา ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของวาล์วนิรภัยรูปแบบนี้สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$PFD_{avg} = (C_{PT} \cdot \lambda_{FE}^D \cdot T_{I1}) + ((1 - C_{PT}) \cdot \lambda_{FE}^D \cdot T_{I2}) \quad (2.23)$$

3. วาล์วนิรภัยรูปแบบ 1๐๐2+1๐๐2

รูปแบบนี้ประกอบไปด้วยวาล์วนิรภัย 2 ชุด โดยกระบวนการผลิตจะไม่เกิดสภาวะอันตราย เมื่อวาล์วนิรภัยอย่างน้อย 1 ชุดทำงานเมื่อมีสัญญาณมาจากส่วนประมวลผล และในวาล์วนิรภัยแต่ละชุด มีรูปแบบการทำงานแบบ 1๐๐2 ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของวาล์วนิรภัยรูปแบบนี้สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$PFD_{avg} = \frac{2}{3} \cdot (\lambda_{FE}^D)^2 \cdot (T_I)^2 \quad (2.24)$$

4. วาล์วนิรภัยรูปแบบ 1๐๐2+1๐๐2 และมีการทดสอบแบบ Partial stroke Test

รูปแบบนี้มีฟังก์ชันการทำงานเหมือนกับรูปแบบที่ 3 แต่มีการทดสอบแบบ Partial Stroke Test เพิ่มเติมเข้ามา ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของวาล์วนิรภัยรูปแบบนี้สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$PFD_{avg} = \frac{2}{3} \cdot C_{PT} \cdot (\lambda_{FE}^D)^2 \cdot (T_{I1})^2 + \frac{2}{3} \cdot (1 - C_{PT}) \cdot (\lambda_{FE}^D)^2 \cdot (T_{I2})^2 \quad (2.25)$$

5. วาล์วนิรภัยรูปแบบ 1๐๐3+1๐๐3

รูปแบบนี้ประกอบไปด้วยวาล์วนิรภัย 2 ชุด โดยกระบวนการผลิตจะไม่เกิดสภาวะอันตราย เมื่อวาล์วนิรภัยอย่างน้อย 1 ชุดทำงานเมื่อมีสัญญาณมาจากส่วนประมวลผล และในวาล์วนิรภัยแต่ละชุด มีรูปแบบการทำงานแบบ 1๐๐3 ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของวาล์วนิรภัยรูปแบบนี้สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$PFD_{avg} = \frac{1}{2} \cdot (\lambda_{FE}^D)^3 \cdot (T_I)^3 \quad (2.26)$$

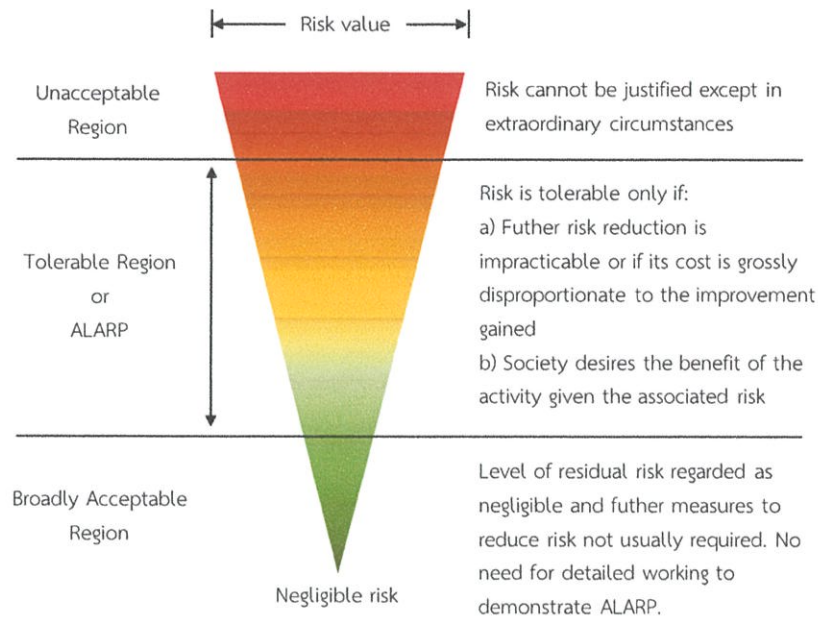
เมื่อ	
C_{PT}	คืออัตราส่วนความผิดพลาดอันตรายตรวจจับไม่ได้ที่ถูกเปิดเผยขณะทำการทดสอบต่อความผิดพลาดอันตรายตรวจจับไม่ได้ทั้งหมด หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์
T_{I1}	คือ ช่วงเวลาในการทำการทดสอบแบบไม่สมบูรณ์ (Partial Stroke Test) หน่วยเป็น ชั่วโมง
T_I หรือ T_{I2}	คือ ช่วงเวลาในการทำการทดสอบแบบสมบูรณ์ (Full Function Test) หน่วยเป็น ชั่วโมง
λ_{FE}^D	คือ อัตราความผิดพลาดอันตรายของวาล์วนิรภัย หน่วยเป็นครั้งต่อชั่วโมง

2.5 ค่าความเสี่ยงที่ยอมรับได้ (Tolerable Risk)

เมื่อได้ทำการวิเคราะห์อันตรายของกระบวนการผลิตแล้วพบว่ากระบวนการผลิตที่ออกแบบนั้นมีความเสี่ยงต่ออันตรายมากน้อยเพียงใด ดังนั้นบริษัทหรือองค์กรต่าง ๆ ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตมีหน้าที่ในการจำกัดความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้น โดยระบบวัดคุมนิรภัยจะต้องถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการดำเนินการลดความเสี่ยงของกระบวนการผลิตไปยังค่าความเสี่ยงที่ยอมรับได้ ในการดำเนินการลดความเสี่ยงนั้นจะต้องมีค่าใช้จ่ายเกิดขึ้น ซึ่งค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นอาจจะไม่ได้เป็นสัดส่วนกับผลประโยชน์ที่ได้รับ

วิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์หาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากการดำเนินการลดความเสี่ยงกับผลประโยชน์ที่ได้รับนั้น โดยทาง UK's HSE (Health and Safety Executive) ได้ดำเนินการตามขั้นตอนที่เรียกว่า ALARP (As Low As Reasonably Practicable) ซึ่งใช้สำหรับการวิเคราะห์และแสดงค่าความเสี่ยงที่ยอมรับได้ วิธีการนี้ได้แสดงความเสี่ยงออกเป็น 3 ระดับ คือ ระดับความเสี่ยงที่ยอมรับไม่ได้ (Unacceptable Region) ระดับความเสี่ยงที่พอยอมรับได้ (Tolerable Region or ALARP) และระดับความเสี่ยงที่ยอมรับได้สูงสุด (Broadly Acceptable Region) แสดงดังรูปที่ 2.13

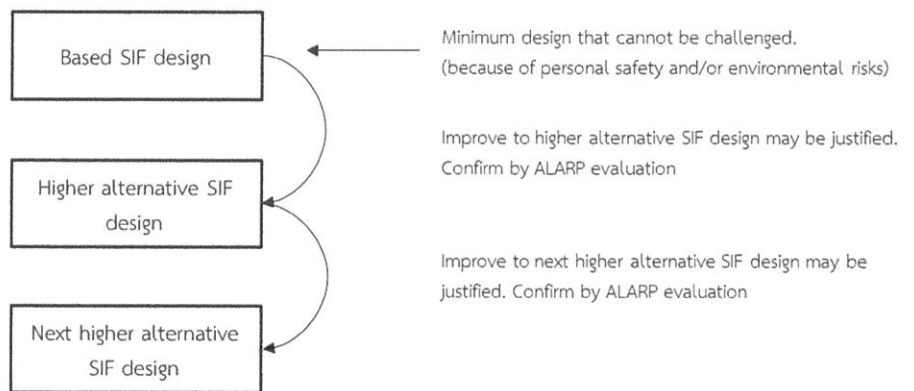
นอกจากนี้ DEP 32.80.10.10 [8] ได้กล่าวถึงวิธีการ ALARP ว่าเป็นจุดที่ความเสี่ยงนั้นถูกลดลงต่ำสุด โดยไม่สามารถลดความเสี่ยงได้อีก เนื่องจากเวลา อุปสรรค ความยุ่งยากและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการลดความเสี่ยงลงนั้น ไม่เป็นสัดส่วนที่สมเหตุสมผลกับผลประโยชน์ที่ได้รับจากความเสี่ยงที่ลดลง เมื่อค่าใช้จ่ายและทรัพยากรที่ต้องใช้ในการลดความเสี่ยง เริ่มไม่เป็นสัดส่วนกับความเสี่ยงที่ลดลง นั้นจะแสดงให้เห็นว่าจุด ALARP นั้นผ่านไปแล้ว โดย DEP 32.80.10.10 ยังกล่าวอีกว่าการประเมินด้วยวิธีการ ALARP นั้นจะสามารถทำได้ก็ต่อเมื่อความเสี่ยงนั้นมีผลเสียหายทางด้านทรัพย์สินอย่างเดียว



รูปที่ 2.13 ALARP (As Low As Reasonably Practicable)

การประเมินด้วยวิธี ALARP มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการออกแบบฟังก์ชันวัดคุณนिरภัยรูปแบบต่าง ๆ เพื่อเป็นทางเลือกในการเปรียบเทียบกับฟังก์ชันวัดคุณนिरภัยพื้นฐาน
2. กำหนดวิธีการทดสอบและช่วงเวลาในการทดสอบอุปกรณ์ในแต่ละรูปแบบ
3. ทำการประเมิน ALARP และทำการเลือกรูปแบบฟังก์ชันวัดคุณนिरภัยที่ต้องการ



The highest SIF design that is still justified reduces the risk to a level that is ALARP. This is the SIF design that is to be selected for implementation.

รูปที่ 2.14 ขั้นตอนการประเมินด้วย ALARP

2.6 สมการผลตอบแทนเฉลี่ยจากการลงทุน (Return on Average Capital Employed, ROACE)

ในการประเมินว่าฟังก์ชันวัดคุณนिरภัยที่ได้ทำการออกแบบไว้เป็นทางเลือกในการเปรียบเทียบกับฟังก์ชันวัดคุณนिरภัยพื้นฐานนั้น มีการลดความเสี่ยงลงอยู่ในจุด ALARP แล้วหรือยัง จะต้องพิจารณาจากสมการผลตอบแทนเฉลี่ยจากการลงทุน (Return on Average Capital Employed, ROACE) ซึ่งใช้ในการประเมินว่าผลประโยชน์ที่จะได้รับนั้นคุ้มค่ากับการลงทุนที่เพิ่มขึ้นหรือไม่ แสดงในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ (%)

$$\text{ROACE} = \frac{\text{Benefits} - \text{Depreciation} - \text{Additional repair cost} - \text{Additional test cost} - \text{New risk}}{\text{Additional Investment cost of this alternative}} \quad (2.27)$$

โดยฟังก์ชันวัดคุณนिरภัยที่ออกแบบไว้จะมีความคุ้มค่าต่อการลงทุน หรืออยู่ในจุด ALARP เมื่อ

$$\text{ROACE} \geq \text{ROACE}_{\text{Target}}$$

เมื่อ $\text{ROACE}_{\text{Target}}$ หมายถึง ความคุ้มค่าเป็นอย่างน้อยที่จะได้รับจากการลงทุนเพื่อทำให้ความเสี่ยงลดลงซึ่งปกติจะอยู่ที่ 15 – 20 %

เมื่อ

Benefits คือ ผลประโยชน์ที่จะได้รับ
สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Benefits} = (\text{PFD}_{\text{lower alternative}} - \text{PFD}_{\text{this alternative}}) \times \text{Initial Risk} \quad (2.28)$$

$\text{PFD}_{\text{lower alternative}}$ คือ ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของฟังก์ชันวัดคุณนिरภัยที่เป็นทางเลือกต่ำกว่า

$\text{PFD}_{\text{this alternative}}$ คือ ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของฟังก์ชันวัดคุณนिरภัยภายใต้การศึกษา

Initial Risk คือ ค่าความเสี่ยงเริ่มต้น
สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Initial Risk} = \frac{\text{Total Equivalent Consequences}}{\text{Demand Interval}} \quad (2.29)$$

Total Equivalent Consequences คือ ผลกระทบจากการประเมินความเสี่ยงในแต่ละด้าน โดยเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนเงิน โดยนำช่วงต่ำสุดและสูงสุด (lower and upper limit) จากตารางความสูญเสียด้านชีวิต ทรัพย์สิน และสิ่งแวดล้อม มาพิจารณาและคิดแบบลอกการทึมเฉลี่ย ดังสมการนี้

$$y=10^{\frac{(\log X1+\log X2)}{2}} \quad (2.30)$$

Demand Interval คือ อัตราการเกิดค่าความผิดพลาดที่ทำให้เกิดเหตุการณ์อันตราย โดยนำช่วงต่ำสุดและสูงสุดจากตารางอัตราการเกิดค่าความผิดพลาด มาพิจารณาและคิดแบบลอกการทึมเฉลี่ยตามสมการที่ (2.30)

Depreciation per year สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Depreciation per year} = \frac{\text{Additional investment cost for this alternative}}{\text{Depreciation period (life time)}} \quad (2.31)$$

Test Costs per year คือ ค่าใช้จ่ายในการทดสอบอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในแต่ละฟังก์ชันวัดคุณนริภัยต่อปี

Repair Costs per year คือ ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในแต่ละฟังก์ชันวัดคุณนริภัยต่อปี

New Risk (Spurious Trip Costs) คือ ค่าความเสี่ยงที่อุปกรณ์ในฟังก์ชันวัดคุณนริภัยจะทำงานโดยที่ไม่ได้เกิดเหตุการณ์นั้นขึ้นจริง (ไม่ได้นำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้)

วิธีการลดความเสี่ยงในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีเลือกช่วงเวลาการทดสอบที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาช่วงเวลาการทดสอบอุปกรณ์การวัดและอุปกรณ์สุดท้ายที่มีรูปแบบการทำงานเหมือนกัน นั้นหมายความว่า จะไม่มีการลงทุนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากใช้จำนวนอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน (Additional Investment Cost = 0) และค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมอุปกรณ์มีค่าเป็นศูนย์ (Additional Repair Cost = 0) จึงทำให้ไม่สามารถคำนวณหาค่า ROACE ตามสมการที่ (2.27) ได้

งานวิจัยนี้จะเลือกใช้ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากการทดสอบอุปกรณ์ที่มีเวลาที่แตกต่างกัน (Additional Test Cost) แทนการลงทุนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้จำนวนอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน (Additional Investment Cost) และจากบทความวิจัย [9] ได้มีการประยุกต์สมการ ROACE เพื่อใช้ในการกรณีศึกษา นี้ ดังแสดงตามสมการต่อไปนี้

$$\text{ROACE} = \frac{\text{Benefits-Depreciation}}{\text{Additional Test cost}} \quad (2.32)$$

2.7 ค่าใช้จ่ายตลอดรอบการทำงาน (Life Cycle Cost, LCC)

ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นตลอดรอบการทำงานของอุปกรณ์นั้น จะเป็นผลรวมของค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจาก ค่าใช้จ่ายคงที่ (Initial Fixed Cost) ในที่นี้หมายถึงค่าใช้จ่ายในการซื้ออุปกรณ์รวมถึงค่าใช้จ่ายในการ ติดตั้งอุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายประจำ (Annual Cost) ในที่นี้หมายถึงค่าใช้จ่ายในการทดสอบอุปกรณ์ (Test Cost) โดยค่าใช้จ่ายในการทดสอบอุปกรณ์นั้นจะต้องนำมาคำนวณหาค่าการลงทุนปัจจุบัน (Present Value of Investment, PV) ณ ช่วงเวลาหนึ่ง (Fixed Interval) ซึ่ง Hary L. Cheddie และ Paul Grunh ได้กล่าวถึงวิธีในการพิจารณาค่าใช้จ่ายเหล่านี้ โดยใช้หลักการทางการเงิน (Financial) พื้นฐานซึ่งหาได้จากสมการ

$$PV = M \frac{1 - [1+R]^{-N}}{R} \quad (2.33)$$

เมื่อ	M	คือ ค่าใช้จ่ายประจำปี ในที่นี้คือค่าใช้จ่ายในการทดสอบอุปกรณ์
	R	คือ อัตราดอกเบี้ย (InterestRate)
	N	คือ ระยะเวลาของรอบการทำงานของอุปกรณ์ (Life Cycle Year)

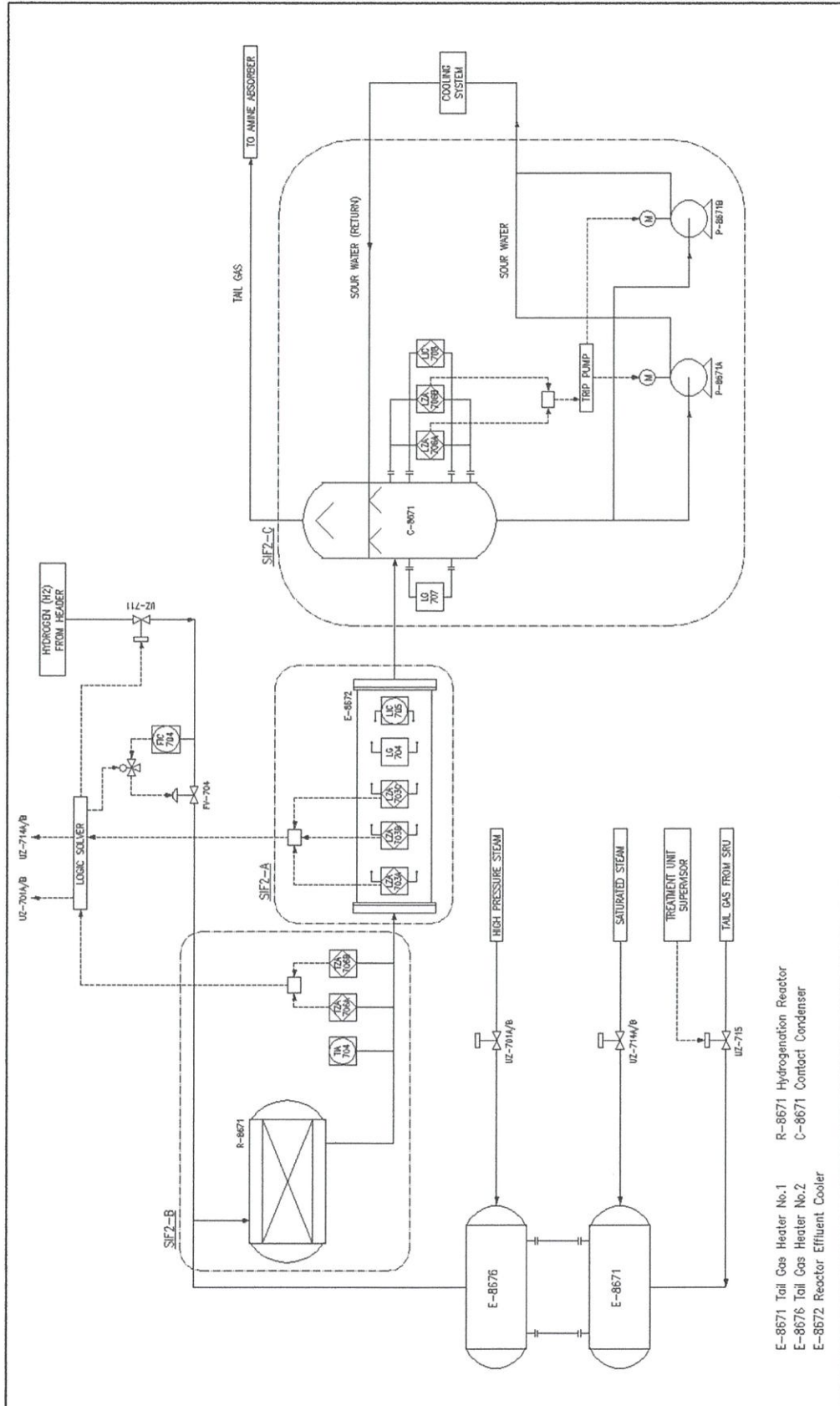
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 กล่าวนำ

งานวิจัยนี้ได้นำฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกระบวนการ Tail Gas Treating ซึ่งเป็นกรณีศึกษาจาก [3] มาพิจารณา โดยกระบวนการ Tail Gas Treating จะเป็นกระบวนการกู้คืนกำมะถันซึ่งเป็นสารที่ส่งผลกระทบต่ออาชีวอนามัยของผู้คนในชุมชนรอบเขตโรงงานก่อนที่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศ โดยกระบวนการนี้ สามารถกู้คืนกำมะถันเข้าสู่ระบบได้ถึงร้อยละ 99.9

กระบวนการ Tail Gas Treating จะเริ่มจากการรับ Feed หรือ Tail Gas ที่ได้มาจากหน่วยกู้คืนกำมะถัน (Sulphur Recovery unit) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำหน้าที่เพื่อเปลี่ยนแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ให้เป็นกำมะถัน จากนั้นจะทำการให้ความร้อนแก่ Tail Gas ผ่านอุปกรณ์ให้ความร้อน E-8671 และ E-8676 (Tail Gas Heater) ก่อนที่จะส่งเข้าถึงทำปฏิกิริยา R-8671 (Reactor) ซึ่งเป็นกระบวนการ Hydrogenation คือการใช้ H_2 เป็นตัวทำปฏิกิริยา เพื่อให้ SO_2 , S, COS และ CS_2 มีการเปลี่ยนรูปเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) จากนั้นส่งต่อไปทำให้เย็น (Cooling) ที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน E-8672 (Reactor Effluent Cooler) เพื่อทำการลดความร้อน เนื่องจากกระบวนการ Hydrogenation เป็นกระบวนการคายความร้อน และมีการคายพลังงานในปริมาณมาก ก่อนที่จะส่งเข้า C-8671 (Contact Condenser) เพื่อทำการควบแน่น โดยส่วนที่เป็น Tail Gas ที่ทำการกำจัดกำมะถันแล้วจะถูกส่งออกไปทางข้างบน เพื่อส่งต่อไปที่ Amine Absorber สำหรับกำจัด H_2S ก่อนจะส่งไปที่เตาเผา (Incinerator) และปล่อยสู่บรรยากาศออกไป และส่วนที่เป็นของเหลว (Sour Water) จะถูกส่งไปทำให้เย็นและส่งกลับเข้ามาที่ C-8671 (Contact Condenser) อีกครั้ง



รูปที่ 3.1 แผนภาพกระบวนการอย่างง่ายของ Tail Gas Treating Unit

จากการวิเคราะห์อันตรายที่งานวิจัย [3] ได้กล่าวไว้เกี่ยวกับกระบวนการ Tail Gas Treating unit แสดงดังรูปที่ 3.1 พบว่ากระบวนการนี้ ควรทำการติดตั้งฟังก์ชันวัดคুমินทรีย์จำนวน 3 ฟังก์ชัน เพื่อป้องกันการเกิดเหตุการณ์อันตรายต่าง ๆ โดยวัตถุประสงค์ของแต่ละฟังก์ชันวัดคুমินทรีย์จะสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. ฟังก์ชันวัดคুমินทรีย์ : SIF-2A มีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันท่อในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน E-8672 เกิดการแตกหัก
2. ฟังก์ชันวัดคুমินทรีย์ : SIF-2B มีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันถึงปฏิกริยา R-8671 และตัวทำปฏิกริยาภายในเกิดความเสียหายเนื่องจากความร้อนมากเกินไป
3. ฟังก์ชันวัดคুমินทรีย์ : SIF-2C มีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันปั้ม P-6871A/B จากการ Loss Suction

ในการหาค่าระดับความปลอดภัยเป้าหมายของแต่ละฟังก์ชันวัดคুমินทรีย์ จะเริ่มจากการประเมินความเสี่ยงของความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น อันจะเป็นเหตุนำไปสู่การเกิดเหตุการณ์อันตรายในแต่ละเหตุการณ์ โดยจะทำการพิจารณาถึงอัตราการเกิดเหตุ และผลกระทบต่อทรัพย์สิน ชีวิตคน และสิ่งแวดล้อม

งานวิจัย [3] ได้แสดงการอธิบายผลการประเมินความเสี่ยงและการหาค่าระดับความปลอดภัยเป้าหมายอย่างละเอียดเฉพาะของฟังก์ชันวัดคুমินทรีย์ SIF2-A ซึ่งผลกระทบที่เกิดจากความผิดพลาดของฟังก์ชันวัดคুমินทรีย์ SIF-2A จะมีผลกระทบต่อทรัพย์สินเพียงอย่างเดียว โดยรายละเอียดการออกแบบของฟังก์ชันวัดคুমินทรีย์ที่ใช้ในกรณีศึกษาจะแสดงในหัวข้อถัดไป

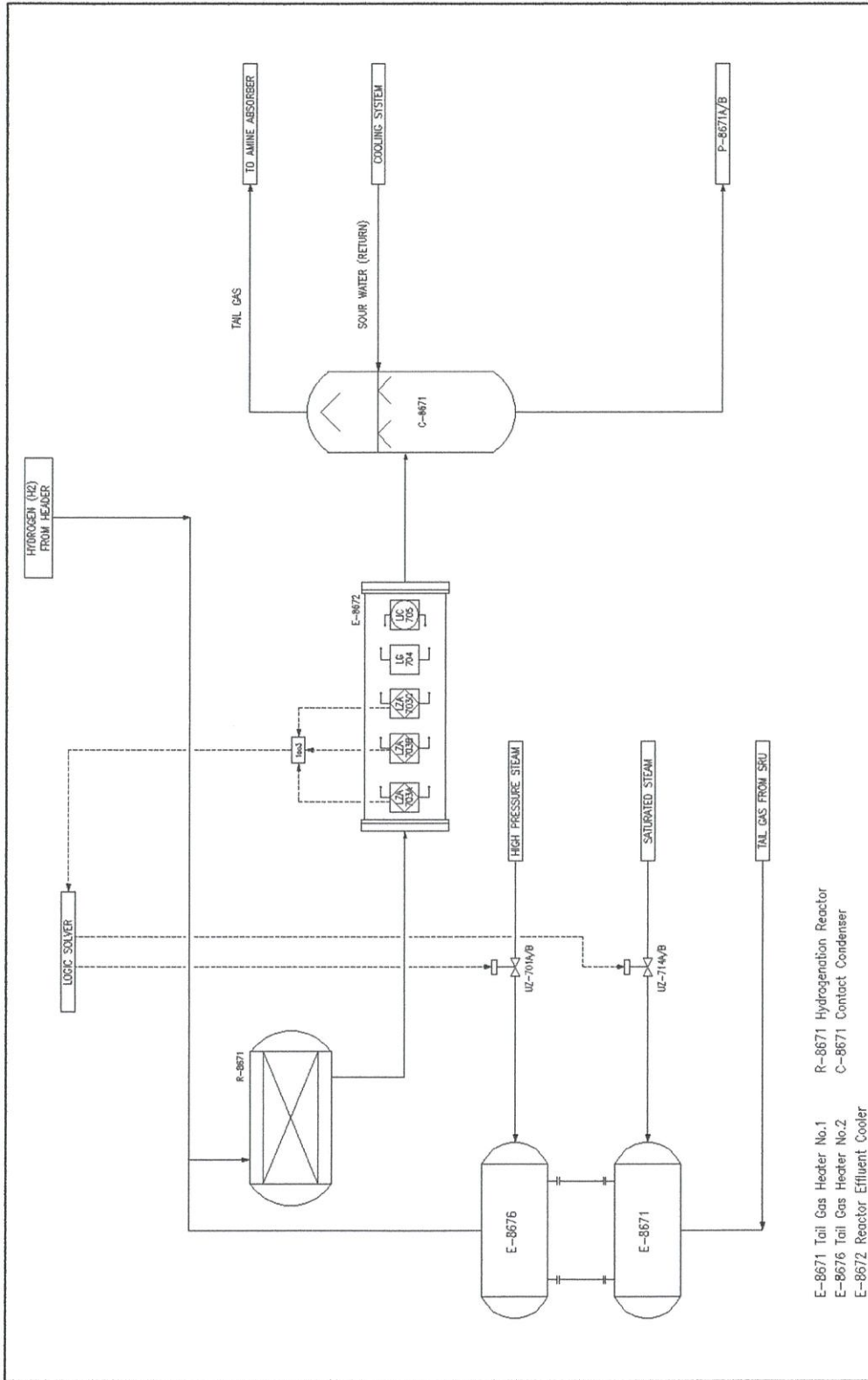
3.2 ฟังก์ชันวัดคুমินทรีย์ที่ใช้อ้างอิง

งานวิจัยนี้ได้พิจารณาฟังก์ชันวัดคুমินทรีย์ SIF2-A ซึ่งผลของการประเมินความเสี่ยงและค่าระดับความปลอดภัยเป้าหมายที่คำนวณได้จากงานวิจัย [3] นั้น แสดงให้เห็นว่าความเสี่ยงนั้นมีผลกระทบต่อทรัพย์สินเพียงอย่างเดียว และค่าระดับความปลอดภัยเป้าหมายที่ได้ขึ้นอยู่กับระดับ SIL2 ตามลำดับ

3.2.1 รูปแบบฟังก์ชันวัดคুমินทรีย์ SIF2-A

รูปแบบฟังก์ชันวัดคুমินทรีย์ SIF2-A ที่งานวิจัย [3] ได้ทำการออกแบบนั้นประกอบไปด้วยอุปกรณ์การวัดระดับของเหลว 3 ตัว คือ LZA-703A, LZA-703B และ LZA-703C มีรูปแบบการทำงานแบบ 1oo3 ในส่วนของส่วนประมวลผล จะเลือกใช้รูปแบบการทำงานแบบ 1oo1 และในส่วนของอุปกรณ์สุดท้ายประกอบไปด้วยวาล์วนิรภัย 2 ชุด มีรูปแบบการทำงานเป็นแบบ 1oo2+1oo2 โดยชุดแรกประกอบไปด้วย UZ-701A และ UZ-701B และชุดที่สองประกอบไปด้วย UZ-714A และ UZ-714B ซึ่งออกแบบให้มีการติดตั้งบริเวณ High Steam Header และ Saturated Steam ตามลำดับ โดยอย่างน้อย 1 ชุดต้องทำงาน หากมีสัญญาณมาจากส่วนประมวลผล และในวาล์วนิรภัยแต่ละชุด มีรูปแบบการทำงานแบบ 1oo2 รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพกระบวนการของฟังก์ชันวัดคুমินทรีย์ SIF2-A

งานวิจัย [3] ได้แสดงวิธีการหาค่าระดับความปลอดภัยของฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย SIF2-A ซึ่งใช้วิธีการแผนภาพต้นไม้ในการหาค่าความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์การวัด ส่วนประมวลผล และอุปกรณ์สุดท้าย โดยพิจารณาการทำการทดสอบของอุปกรณ์การวัดเป็นแบบสมบูรณ์ และให้อุปกรณ์สุดท้ายมีการทำ Partial Stroke Test และใช้ค่าอัตราความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์แต่ละตัว โดยใช้ข้อมูลจากฐานข้อมูลในโปรแกรมการคำนวณค่าระดับความปลอดภัยของบริษัทแห่งหนึ่ง ดังแสดงในตารางที่ ข1 [ภาคผนวก ข] จากนั้นนำผลรวมค่าความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายแต่ละส่วนที่ได้จากการคำนวณไปเปรียบเทียบกับตารางที่ 2.1 เพื่อหาค่าระดับความปลอดภัย โดยค่าระดับความปลอดภัยของฟังก์ชันวัดคุมนิรภัยที่คำนวณได้จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าระดับความปลอดภัยที่ได้จากการประเมินค่าระดับความปลอดภัยเป้าหมาย (SIL_{target}) จึงจะแสดงได้ว่าระบบวัดคุมนิรภัยนี้มีความเหมาะสม สามารถใช้ป้องกันอันตรายที่เกิดจากการทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุมได้ ตารางที่ 3.1 แสดงผลการประเมินค่าระดับความปลอดภัยของ SIF2-A จากงานวิจัย [3]



รูปที่ 3.2 แผนภาพกระบวนการของฟังก์ชันวัดคุมปรีภัย SIF2-A

ตารางที่ 3.1 ผลการประเมินค่าระดับความปลอดภัยของ SIF2-A

หมายเลข SIF	รายละเอียด	ค่าระดับความปลอดภัยแต่ละด้าน ที่ได้จากการหาความเสี่ยง			ค่า SIL เป้าหมาย (SIL _{target})	รูปแบบฟังก์ชันนิรภัยพื้นฐาน		ค่า PFDavg ที่ได้จากการคำนวณ	ค่า SIL ที่ได้จากการคำนวณ
		อัตราการเกิดเหตุการณ์ (W)	ผลกระทบต่อ	ตัวแปรที่ได้		ค่าระดับความปลอดภัยแต่ละด้าน	อุปกรณ์การวัด		
SIF2-A	เพื่อป้องกันท่อไนอูปรนล้มเปลี่ยนความร้อน E-8672 เกิดการแตกหัก	W ₄	ทรัพย์สิน (L)	L ₃	SIL 2	1oo3	1oo1	9.09 x 10 ⁻³	SIL 2
			ชีวิตคน (C)	C ₀					
			สิ่งแวดล้อม (E)	E ₁					

หมายเหตุ

- อัตราการเกิดเหตุการณ์ (Demand Rate, W) หมายถึงอัตราการเกิดเหตุการณ์ของอุปกรณ์ที่ทำงานผิดพลาด แบ่งออกเป็น 5 ระดับ โดยระดับ W4 หมายถึง อัตราการเกิดเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้น อยู่ในช่วงเวลา 1 ปี แต่ไม่เกิน 10 ปี
- ความสูญเสียต่อทรัพย์สิน (Asset & Production Loss, L) แบ่งความสูญเสียต่อทรัพย์สินออกเป็น 6 ระดับ โดยระดับ L3 หมายถึง สูญเสียปานกลางแต่ต้องหยุดกระบวนการผลิตเป็นช่วงสั้น ๆ คิดเป็นเงินอยู่ในช่วง 100,000 ถึง 1,000,000 เหรียญสหรัฐ
- ผลกระทบต่อชีวิตคน (Consequences Concerning People, C) แบ่งออกเป็น 5 ระดับ โดยระดับ C0 หมายถึง ไม่มีการบาดเจ็บต่อบุคคล
- ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental damage, E) แบ่งออกเป็น 6 ระดับ โดยระดับ E1 หมายถึง มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเล็กน้อยมาก
- งานวิจัย [3] ได้แสดงวิธีการคำนวณค่าระดับความปลอดภัย โดยใช้ฐานข้อมูลตามตารางที่ ข1 [ภาคผนวก ข] และกำหนดให้อุปกรณ์มีการทดสอบทุก ๆ 4 ปี โดยให้การทดสอบนั้นเป็นการทดสอบแบบสมบูรณ์ ส่วนตัวนิรภัยที่มีการทดสอบแบบ Partial Test ให้กับตัวนิรภัยทุก ๆ 1 ปี
- ค่า PFD_{avg} ของอุปกรณ์การวัด ส่วนประมวลผล และอุปกรณ์สุดท้าย ที่ได้จากการคำนวณจากงานวิจัย [3] มีค่าดังนี้
PFD_{avg} SE เท่ากับ 4.50 x 10⁻⁴, PFD_{avg} LS เท่ากับ 5.66 x 10⁻⁴ และ PFD_{avg} FE เท่ากับ 8.07 x 10⁻³

3.2.2 การปรับปรุงค่าระดับความปลอดภัยและการประเมินผลค่าใช้จ่าย – ผลประโยชน์ของ SIF2-A

ในการปรับปรุงค่าระดับความปลอดภัยที่งานวิจัย [3] ได้นำเสนอนั้นจะเน้นการเพิ่มจำนวนของอุปกรณ์และเพิ่มการทดสอบแบบ Partial Test ของอุปกรณ์สุดท้ายที่อยู่ในฟังก์ชันวัดคুমินิรภัยที่ทำการศึกษา เพื่อให้ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของฟังก์ชันวัดคুমินิรภัยนั้นมีค่าลดลงอยู่ในช่วงค่าระดับความปลอดภัยเป้าหมาย ตารางที่ 3.2 เป็นรูปแบบฟังก์ชันวัดคুমินิรภัย SIF2-A รูปแบบต่าง ๆ แบ่งออกเป็น 6 รูปแบบ โดยการเพิ่มจำนวนวาล์วนิรภัย และเพิ่มการทดสอบแบบ Partial Test ทุก ๆ 1 ปี ที่ SIF2 – A5 จะทำให้ผลของค่า PFD_{avg} ของฟังก์ชันวัดคুমินิรภัยอยู่ในช่วงของค่าความปลอดภัยเป้าหมาย SIL 2 และที่ SIF2-A6 ได้ทำการเพิ่มจำนวนอุปกรณ์สุดท้ายอีก จะเห็นได้ว่า ค่า PFD_{avg} มีค่าลดลงมาก

เมื่อทำการออกแบบฟังก์ชันวัดคুমินิรภัยในรูปแบบต่าง ๆ แล้ว งานวิจัย [3] ได้ทำการวิเคราะห์และประเมินผลประโยชน์ที่ได้รับเปรียบเทียบกับการลงทุนที่เพิ่มขึ้นระหว่างค่าระดับความปลอดภัยที่ยอมรับได้ระดับต่ำสุด (SIL 1) และค่าระดับความปลอดภัยสูงสุด (SIL 2) เพื่อทำการพิจารณาว่าฟังก์ชันวัดคুমินิรภัยที่ค่าระดับความปลอดภัยสูงสุด (SIL 2) เหมาะสมที่จะทำจริงและอยู่ในย่านที่ยอมรับได้ (ALARP) หรือไม่ โดยงานวิจัย [3] ได้ทำการเปรียบเทียบฟังก์ชันวัดคুমินิรภัยที่มีจำนวนอุปกรณ์แตกต่างกัน ซึ่งจะใช้รูปแบบ SIF2- A3 (SIL 1) กับ รูปแบบ SIF2 – A5 (SIL 2) ในตารางที่ 3.2 จากนั้นทำการคำนวณหา ROACE โดยใช้สมการที่ (2.27) และทำการคำนวณตัวแปรสำคัญต่าง ๆ ตามสมการที่ (2.28 ถึง 2.31) ซึ่งข้อมูลพื้นฐานที่นำมาใช้นั้นมาจากฐานข้อมูลของโปรแกรมคำนวณค่าความผิดพลาดอันตรายของบริษัทแห่งหนึ่งและส่วนหนึ่งเป็นข้อมูลจากการสอบถามผู้มีประสบการณ์ในการประเมินราคาโครงการ

ตารางที่ 3.2 การออกแบบฟังก์ชันวัดความเสียหาย SIF2-A รูปแบบต่าง ๆ จากงานวิจัย [3]

รูปแบบ	รูปแบบของอุปกรณ์ฟังก์ชันวัดความเสียหาย SIF2-A										ระดับความปลอดภัย SIL _{SIF}	
	อุปกรณ์การวัด (SE)		ส่วนประมวลผล (LS)			อุปกรณ์สุดท้าย (FE)			ผลรวมของค่า PFD _{avg SIF}			
	รูปแบบ	ช่วงเวลาทดสอบ (T) (ปี)	ค่า PFD _{avg SE}	รูปแบบ	ช่วงเวลาทดสอบ (T) (ปี)	ค่า PFD _{avg LS}	รูปแบบ	ช่วงเวลาทดสอบ Full Test (T ₁₂) (ปี)		ค่า PFD _{avg FE}		
SIF2-A1	1003	8	0.00363	1001	4	0.000566	1001+1001	N/A	8	0.35720	0.36140	ต่ำกว่า SIL1
SIF2-A2	1003	4	0.00045	1001	4	0.000566	1001+1001	N/A	4	0.18760	0.18862	ต่ำกว่า SIL1
SIF2-A3	1003	4	0.00045	1001	4	0.000566	1001+1001	1	4	0.08911	0.09013	SIL1
SIF2-A4	1003	4	0.00045	1001	4	0.000566	1002+1002	N/A	4	0.02346	0.02448	SIL1
SIF2-A5	1003	4	0.00045	1001	4	0.000566	1002+1002	1	4	0.00807	0.00909	SIL2
SIF2-A6	1003	8	0.00363	1001	4	0.000566	1003+1003	N/A	4	0.00330	0.00750	SIL2

หมายเหตุ

- กำหนดให้กระบวนการผลิตมีการซ่อมบำรุงใหญ่ (Shutdown Period) ทุก ๆ 4 ปี, SIL_{target} = SIL 2 (0.001 – 0.01)

3.3 ฟังก์ชันวัดคุณนिरภัยที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาในเฟสที่ 4 ของวงรอบความปลอดภัย ซึ่งจะนำเสนอการออกแบบฟังก์ชันวัดคุณนिरภัย โดยการออกแบบรูปแบบการทำงานของอุปกรณ์การวัดแบบต่าง ๆ รวมไปถึงการเลือกช่วงเวลาในการทดสอบอุปกรณ์การวัดและอุปกรณ์สุดท้ายที่เหมาะสมกับค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น และจากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.2 งานวิจัยนี้ได้นำฟังก์ชันวัดคุณนिरภัย SIF2-A จากงานวิจัย [3] มาใช้เป็นกรณีศึกษา โดยผลของการประเมินค่าระดับความปลอดภัยเป้าหมายที่คำนวณได้จากงานวิจัย [3] นั้น มีค่าระดับความปลอดภัยเป้าหมายอยู่ที่ระดับ SIL2 และผลของการประเมินความเสี่ยง แสดงให้เห็นว่าความเสี่ยงนั้นมีผลกระทบต่อทรัพย์สินเพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถใช้สมการ ROACE ที่ถูกประยุกต์มาพิจารณาถึงการลงทุนที่เพิ่มขึ้นเพื่อทำให้ความเสี่ยงนั้นลดลงมาอยู่ในย่านที่ยอมรับได้ ว่ามีความเหมาะสมที่จะลงทุนหรือไม่

ฟังก์ชันวัดคุณนिरภัย SIF2-A นั้นประกอบไปด้วยอุปกรณ์การวัดระดับของเหลว 3 ตัว คือ LZA-703A, LZA-703B และ LZA-703C มีรูปแบบการทำงานแบบ 1oo3 ในส่วนของส่วนประมวลผล จะเลือกใช้รูปแบบการทำงานแบบ 1oo1 และในส่วนของอุปกรณ์สุดท้ายประกอบไปด้วยวาล์วนิรภัย 2 ชุด มีรูปแบบการทำงานเป็นแบบ 1oo2+1oo2 โดยชุดแรกประกอบไปด้วย UZ-701A และ UZ-701B และชุดที่สองประกอบไปด้วย UZ-714A และ UZ-714B โดยอย่างน้อย 1 ชุดต้องทำงาน หากมีสัญญาณมาจากส่วนประมวลผล

3.3.1 การหาค่าระดับความปลอดภัยของฟังก์ชันวัดคุณนिरภัย SIF2-A

ค่าระดับความปลอดภัยของฟังก์ชันวัดคุณนिरภัยนั้น สามารถหาได้จากผลรวมของค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์การวัด ส่วนประมวลผล และอุปกรณ์สุดท้าย แล้วนำค่าที่ได้ไปเทียบกับตารางที่ 2.1 เพื่อให้ได้ค่าระดับความปลอดภัย โดยค่าระดับความปลอดภัยที่ได้นั้นจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าระดับความปลอดภัยเป้าหมาย

ในการหาค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์การวัดที่อยู่ในฟังก์ชันวัดคุณนिरภัยนั้น จะใช้วิธีแผนภาพต้นไม้ (Fault Tree Analysis, FTA) ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.4 ในการคำนวณ โดยพิจารณาให้อุปกรณ์การวัดนั้นมีการทดสอบแบบไม่สมบูรณ์ และในส่วนของหาค่าความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของส่วนประมวลผล และอุปกรณ์สุดท้ายนั้นจะอ้างอิงรูปแบบสมการจากงานวิจัย [3] เพื่อใช้ในการคำนวณ และค่าอัตราความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์แต่ละตัวนั้นจะใช้ข้อมูลจากฐานข้อมูลในโปรแกรมการคำนวณค่าระดับความปลอดภัยของบริษัทแห่งหนึ่ง ดังแสดงในตารางที่ ข1 [ภาคผนวก ข]

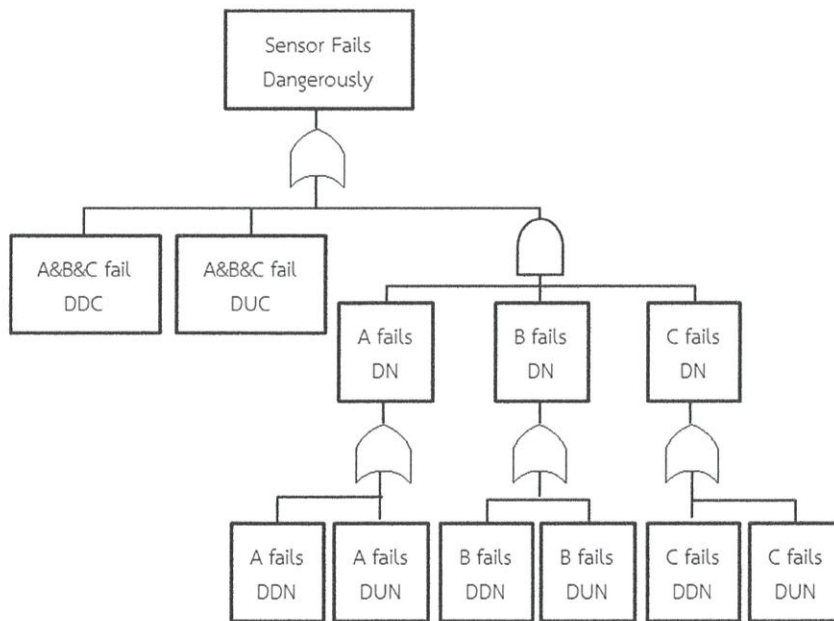
3.3.1.1 ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์การวัด (SE), PFD_{avgSE}

รูปแบบของอุปกรณ์การวัดในฟังก์ชันวัดคุณนिरภัย SIF2-A ประกอบไปด้วยอุปกรณ์การวัดระดับของเหลว 3 ตัว ซึ่งก็คือ LZA-703A, LZA-703B และ LZA-703C มีรูปแบบการทำงานเป็นแบบ

1oo3 (One out of Three) และในการคำนวณหาค่า PFD_{avgSE} จะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.13) ซึ่งเป็นสมการที่พิจารณาการทดสอบอุปกรณ์เป็นแบบไม่สมบูรณ์ โดยตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณจะใช้ข้อมูลจากตารางที่ ข1 [ภาคผนวก ข] ซึ่งเป็นฐานข้อมูลในโปรแกรมการคำนวณค่าระดับความปลอดภัยของบริษัทแห่งหนึ่ง และกำหนดให้อุปกรณ์ถูกทำการทดสอบทุก ๆ 4 ปี ($T_T=4$) หรือ 35040 ชั่วโมง

$$\begin{aligned}
 PFD_{avgSE} = & (0.9)(2.61 \cdot 10^{-8})\left(\frac{35040}{2}\right) + (1-0.9)(2.61 \cdot 10^{-8})\left(\frac{87600}{2}\right) + (1.48 \cdot 10^{-7})(8) + \\
 & ((2.81 \cdot 10^{-6})(8))^3 + \left(\frac{3}{2}\right)((2.81 \cdot 10^{-6})(8))^2(0.9)(4.96 \cdot 10^{-7})(35040) + \left(\frac{3}{2}\right) \\
 & ((2.81 \cdot 10^{-6})(8))^2(1-0.9)(4.96 \cdot 10^{-7})(87600) + (2.81 \cdot 10^{-6})(8) \\
 & ((0.9)(4.96 \cdot 10^{-7})(35040))^2 + (2.81 \cdot 10^{-6})(8)((1-0.9)(4.96 \cdot 10^{-7})(87600))^2 \\
 & + \left(\frac{1}{4}\right)((0.9)(4.96 \cdot 10^{-7})(35040))^3 + \left(\frac{1}{4}\right)((1-0.9)(4.96 \cdot 10^{-7})(87600))^3
 \end{aligned}$$

$$PFD_{avgSE} = 5.28 \times 10^{-4}$$



เมื่อ

- “A” แทนอุปกรณ์การวัดระดับ หมายเลข LZA-703A
- “B” แทนอุปกรณ์การวัดระดับ หมายเลข LZA-703B
- “C” แทนอุปกรณ์การวัดระดับ หมายเลข LZA-703C

รูปที่ 3.3 แผนภาพต้นไม้ของอุปกรณ์การวัดในฟังก์ชันวัดคัมมิรภัย SIF2-A

3.3.1.2 ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของส่วนประมวลผล (LS), PFD_{avgLS}

รูปแบบการทำงานของส่วนประมวลผล จะอ้างอิงรูปแบบและวิธีการคำนวณตามงานวิจัย [3] โดยส่วนประมวลผลจะใช้รูปแบบการทำงานเป็นแบบ 1oo1 (One out of One) สามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$PFD_{LS} = (\lambda_{LS}^D)(T_1) \quad (3.1)$$

ดังนั้นค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของส่วนประมวลผล (PFD_{avgLS}) จะสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

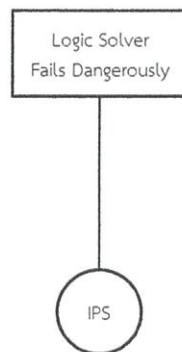
$$PFD_{avg LS} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} \lambda_{LS}^D T_1 dt \quad (3.2)$$

$$PFD_{avg LS} = \frac{1}{2} \lambda_{LS}^D T_1 \quad (3.3)$$

จากตารางที่ ข1 [ภาคผนวก ข] จะได้ค่า λ_{LS}^D เท่ากับ 3.23×10^{-8} ครั้งต่อชั่วโมง และกำหนดให้อุปกรณ์ถูกทำการทดสอบทุก ๆ 4 ปี ($T_1=4$) หรือ 35040 ชั่วโมง แทนค่าลงสมการที่ (3.3) จะได้

$$PFD_{avg LS} = \frac{1}{2} (3.23 \cdot 10^{-8}) (35040)$$

$$PFD_{avg LS} = 5.66 \times 10^{-4}$$



เมื่อ

“IPS” แทนส่วนประมวลผล หมายเลข IPS-700

รูปที่ 3.4 แผนภาพต้นไม้ของส่วนประมวลผลในฟังก์ชันวัดคุนิรภัย SIF2-A

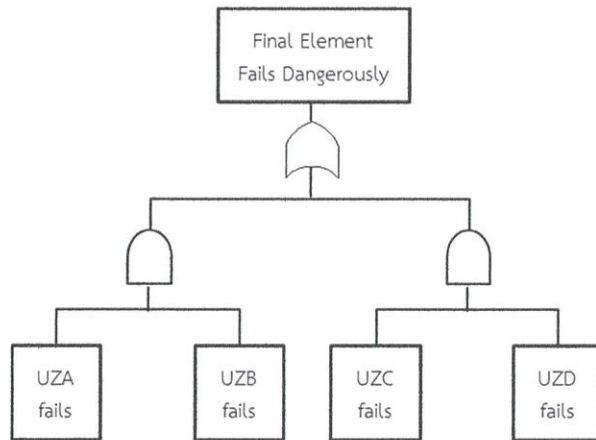
3.3.1.3 ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์สุดท้าย(FE), PFD_{avgFE}

รูปแบบของอุปกรณ์สุดท้ายในฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย SIF2-A ประกอบไปด้วยวาล์วนิรภัย 2 ชุด มีรูปแบบการทำงานเป็นแบบ 1oo2+1oo2 (One out of Two) โดยชุดแรกประกอบไปด้วย UZ-701A และ UZ-701B และชุดที่สองประกอบไปด้วย UZ-714A และ UZ-714B โดยอย่างน้อย 1 ชุดต้องทำงาน หากมีสัญญาณมาจากส่วนประมวลผล และได้มีการออกแบบให้วาล์วนิรภัยเหล่านี้มีการทดสอบการทำงานแบบ Partial Test

ในการคำนวณหาค่า PFD_{avgFE} จะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.25) โดยตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณจะใช้ข้อมูลจากตารางที่ ข1 [ภาคผนวก ข] โดยค่าความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์สุดท้าย (λ_{FE}^D) มีค่าเท่ากับ 5.35×10^{-6} ครั้งต่อชั่วโมง และกำหนดให้เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดอันตรายตรวจจับไม่ได้ที่ถูกเปิดเผยขณะทำการทดสอบแบบ Partial Test (C_{PT}) มีค่าเท่ากับ 70 เปอร์เซ็นต์ และให้มีการทดสอบวาล์วนิรภัยแบบ Partial Test ทุก ๆ 1 ปี หรือ 8760 ชั่วโมง (T_{11}) และการทดสอบแบบ Full Function Test ทุก ๆ 4 ปี หรือ 35040 ชั่วโมง (T_{12}) แทนค่าลงสมการที่ (2.25) จะได้

$$PFD_{avg FE} = \left(\frac{2}{3}\right)(0.7)(5.35 \cdot 10^{-6})^2(8760)^2 + \left(\frac{2}{3}\right)(1-0.7)(5.35 \cdot 10^{-6})^2(35040)^2$$

$$PFD_{avg FE} = 8.07 \times 10^{-3}$$



เมื่อ

- “UZA” แทนวาล์วนิรภัย หมายเลข UZ-701A
- “UZB” แทนวาล์วนิรภัย หมายเลข UZ-701B
- “UZC” แทนวาล์วนิรภัย หมายเลข UZ-714A
- “UZD” แทนวาล์วนิรภัย หมายเลข UZ-714B

รูปที่ 3.5 แผนภาพต้นไม้ของอุปกรณ์สุดท้ายในฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย SIF2-A

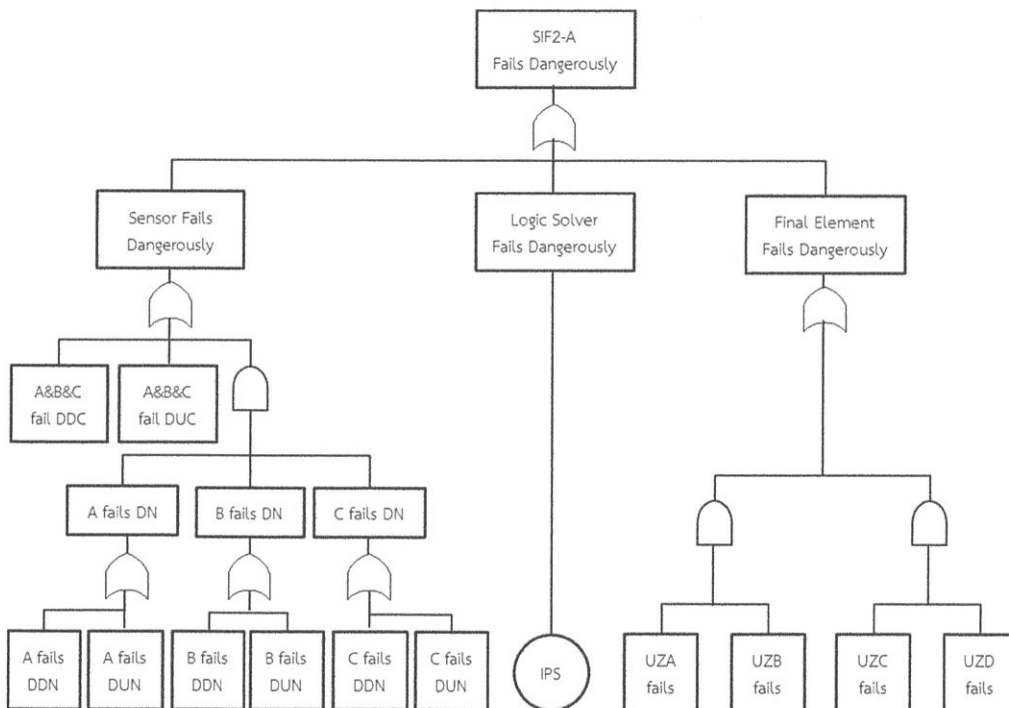
3.3.1.4 ผลรวมค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของฟังก์ชันวัดคูนิรภัย SIF2-A, PFD_{avg} SIF2-A

ในการหาค่าระดับความปลอดภัยของฟังก์ชันวัดคูนิรภัย (SIL_{SIF2-A}) นั้น สามารถหาได้จากผลรวมของค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์การวัด ส่วนประมวลผล และอุปกรณ์สุดท้าย จากสมการที่ (2.1) สามารถหาค่า PFD_{avg} SIF2-A ได้ดังนี้

$$PFD_{avg} \text{ SIF2-A} = 5.28 \times 10^{-4} + 5.66 \times 10^{-4} + 8.07 \times 10^{-3}$$

$$PFD_{avg} \text{ SIF2-A} = 9.16 \times 10^{-3}$$

จากผลของค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของฟังก์ชันวัดคูนิรภัย SIF2-A ที่ได้ นั้นมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณงานวิจัย [3] ตามตารางที่ 3.1 ซึ่งเป็นผลมาจากค่า PFD_{avgSE} ที่ได้จากการคำนวณแบบพิจารณาให้การทดสอบอุปกรณ์นั้นเป็นการทดสอบแบบไม่สมบูรณ์ และเมื่อนำค่าที่คำนวณได้ไปเทียบกับตารางที่ 2.1 จะได้ว่าระดับความปลอดภัยของฟังก์ชันวัดคูนิรภัย SIF2-A นั้นอยู่ในระดับ SIL2 คืออยู่ในช่วง 0.001-0.01 และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับระดับความปลอดภัยเป้าหมาย (SIL_{target}) จะแสดงให้เห็นว่า SIL_{SIF2-A} มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ SIL_{target} ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าฟังก์ชันวัดคูนิรภัย SIF2-A นั้นสามารถนำไปใช้สำหรับการป้องกันเหตุการณ์อันตรายได้



รูปที่ 3.6 แผนภาพต้นไม้ของฟังก์ชันวัดคูนิรภัย SIF2-A

3.3.2 การปรับปรุงค่าระดับความปลอดภัย

ในการปรับปรุงรูปแบบของอุปกรณ์ในฟังก์ชันวัดคัมมิรภัย SIF2-A ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มจำนวนวาล์วนิรภัยเพื่อเปลี่ยนรูปแบบการทำงานของวาล์วนิรภัยให้เป็นแบบ 1oo3 (One out of Three) หรือการเพิ่มจำนวนส่วนประมวลผลเพื่อเปลี่ยนรูปแบบการทำงานให้เป็นแบบ 2oo3 (Two out of Three) จะสามารถทำให้ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายมีค่าดีขึ้น แต่การเพิ่มจำนวนอุปกรณ์เช่นวาล์วนิรภัย อาจจะเป็นไปได้ยากเนื่องจากพื้นที่ที่จำกัด โดยเฉพาะวาล์วนิรภัยที่มีขนาดใหญ่ รวมไปถึงค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อเพิ่มอุปกรณ์ดังกล่าว

ในงานวิจัยนี้จึงได้พิจารณาการปรับปรุงค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์การวัดและอุปกรณ์สุดท้ายให้ดีขึ้นโดยการเพิ่มความถี่ในการทดสอบอุปกรณ์ ซึ่งในการเพิ่มความถี่ในการทดสอบอุปกรณ์นั้นจะพิจารณาให้อุปกรณ์จะถูกทำการทดสอบทุก ๆ 1 ปี ($T_i=1$), ทุก ๆ 2 ปี ($T_i=2$) ไปจนถึงการทดสอบทุก ๆ 10 ปี ($T_i=10$) โดยกำหนดให้อุปกรณ์มีอายุการใช้งาน (Life Cycle) 10 ปี และจากตารางที่ 3.3 แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายหรือค่าความเสี่ยงที่อุปกรณ์จะทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์การวัดและอุปกรณ์สุดท้ายที่อยู่ในฟังก์ชันวัดคัมมิรภัย SIF2-A มีค่าต่ำสุด เมื่อมีความถี่ในการทดสอบทุก ๆ 1 ปี ($T_i=1$) และมีค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายสูงสุด เมื่อมีความถี่ในการทดสอบทุก ๆ 10 ปี ($T_i=10$) ตามลำดับ

ตารางที่ 3.3 ค่า PFD_{avg} ของอุปกรณ์ใน SIF2-A แต่ละช่วงเวลาการทดสอบ

ช่วงเวลาการทดสอบ (T_i) (ปี)	ค่า PFD_{avg}	
	อุปกรณ์การวัด (SE) รูปแบบ 1oo3	อุปกรณ์สุดท้าย (FE) รูปแบบ (1oo2 + 1oo2)
$T_i = 1$	2.19×10^{-4}	1.47×10^{-3}
$T_i = 2$	3.22×10^{-4}	2.79×10^{-3}
$T_i = 3$	4.25×10^{-4}	4.99×10^{-3}
$T_i = 4$	5.28×10^{-4}	8.07×10^{-3}
$T_i = 5$	6.32×10^{-4}	1.20×10^{-2}
$T_i = 6$	7.36×10^{-4}	1.69×10^{-2}
$T_i = 7$	8.41×10^{-4}	2.26×10^{-2}
$T_i = 8$	9.47×10^{-4}	2.92×10^{-2}
$T_i = 9$	1.05×10^{-3}	3.67×10^{-2}
$T_i = 10$	1.16×10^{-3}	4.5×10^{-2}

3.4 การประเมินผลค่าใช้จ่าย – ผลประโยชน์ ด้วยวิธีการ ALARP

ในงานวิจัยนี้จะเน้นการปรับปรุงค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของฟังก์ชันวัดคุมนิรภัยให้ดีขึ้นหรือความเสี่ยงมีค่าลดลง โดยการเพิ่มความถี่ในการทดสอบของอุปกรณ์การวัดและอุปกรณ์สุดท้าย ถ้าอุปกรณ์เหล่านี้มีความถี่ในการทดสอบมาก จะทำให้ค่าความเสี่ยงหรือโอกาสที่อุปกรณ์เหล่านี้จะทำงานผิดพลาดมีค่าลดลง ในทางกลับกันค่าใช้จ่ายในการทำการทดสอบก็จะมีค่ามากขึ้น

จากผลการประเมินความเสี่ยงของฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย SIF2-A ที่ได้จากงานวิจัย [3] แสดงให้เห็นว่าผลกระทบที่เกิดจากความผิดพลาดในการทำงานของฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย SIF2-A จะมีผลกระทบต่อทรัพย์สินเพียงอย่างเดียว ดังนั้นสามารถใช้วิธีการ ALARP ในการวิเคราะห์หาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความถี่ในการทดสอบอุปกรณ์ที่เพิ่มขึ้นกับผลประโยชน์ที่ได้รับเนื่องจากความผิดพลาดที่เกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ลดลง

ในการประเมินด้วยวิธีการ ALARP ผู้วิจัยจะทำการออกแบบให้อุปกรณ์จะถูกทำการทดสอบทุก ๆ 1 ปี ($T_T=1$), ทุก ๆ 2 ปี ($T_T=2$) ไปจนถึงการทดสอบทุก ๆ 10 ปี ($T_T=10$) และกำหนดให้อุปกรณ์มีอายุการใช้งาน (Life Cycle) 10 ปี โดยค่าใช้จ่ายในการออกแบบ จัดซื้อ รวมไปถึงค่าติดตั้งและค่าใช้จ่ายในการทดสอบต่อครั้งของอุปกรณ์การวัดและอุปกรณ์สุดท้ายนั้นจะแสดงดังตารางที่ 3.4 เมื่อทราบค่าใช้จ่ายในการทดสอบอุปกรณ์และค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ในแต่ละช่วงเวลาของการทดสอบอุปกรณ์แล้ว จากนั้นทำการคำนวณตัวแปรสำคัญต่าง ๆ เพื่อคำนวณหาค่า ROACE ที่ถูกประยุกต์มาใช้ในงานวิจัยนี้ ดังสมการที่ (2.32) โดยข้อมูลพื้นฐานที่นำมาใช้นั้นมาจากงานวิจัย [3] ซึ่งได้มาจากการประเมินความเสี่ยงของฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย โดยมีอัตราการเกิดเหตุการณ์ (Demand Rate) จะอยู่ในช่วง 1 ถึง 10 ปี มีผลกระทบต่อทรัพย์สิน โดยมีค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมจากความเสียหายคิดเป็นเงินประมาณ 1,000,000 เหรียญสหรัฐ จึงได้ตัวแปรผลกระทบต่อทรัพย์สินอยู่ที่ระดับ L_3 ส่วนผลกระทบต่อชีวิตคนนั้นไม่มี จึงได้ตัวแปรอยู่ในระดับ C_0 และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมนั้นมีผลกระทบต่อเล็กน้อยจึงได้ตัวแปรอยู่ในระดับ E_1 จากข้อมูลดังกล่าวจะใช้วิธีการคำนวณตามสมการที่ (2.28 ถึง 2.31) ทำให้ได้ค่าผลกระทบจากการประเมินความเสี่ยงซึ่งรวมผลกระทบด้านทรัพย์สิน สิ่งแวดล้อมและชีวิตคน (Total Equivalent Consequence) เท่ากับ 319706.27 มีอัตราการเกิดค่าความผิดพลาดที่ทำให้เกิดเหตุการณ์อันตราย (Demand Rate) เท่ากับ 3.16 และมีค่าความเสี่ยงเริ่มต้น (Initial risk) เท่ากับ 101100 ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะใช้สำหรับงานวิจัยนี้เท่านั้น ตารางที่ 3.5 เป็นตารางแสดงค่าตัวแปรสำคัญต่าง ๆ เพื่อคำนวณหาค่า ROACE

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์

รายละเอียด	อุปกรณ์การวัด (SE)	อุปกรณ์สุดท้าย (FE)
ค่าใช้จ่ายคงที่ (Initial Fixed Cost) (เหรียญสหรัฐ)		
ค่าอุปกรณ์ (รวมค่าออกแบบและค่าติดตั้ง)	4,000	12,000
ค่าใช้จ่ายประจำ (Annual Cost) (เหรียญสหรัฐ)		
ค่าใช้จ่ายในการทดสอบต่อครั้ง	150	200

หมายเหตุ

- 1 เหรียญสหรัฐเท่ากับ 33 บาท
2. ข้อมูลพื้นฐานมาจากฐานข้อมูลของบริษัทแห่งหนึ่งและส่วนหนึ่งเป็นข้อมูลจากการสอบถามผู้มีประสบการณ์ในการประเมินราคาโครงการ อ้างอิงมาจากการวิจัย [3]

ตารางที่ 3.5 ค่าตัวแปรสำคัญต่าง ๆ เพื่อคำนวณหาค่า ROACE

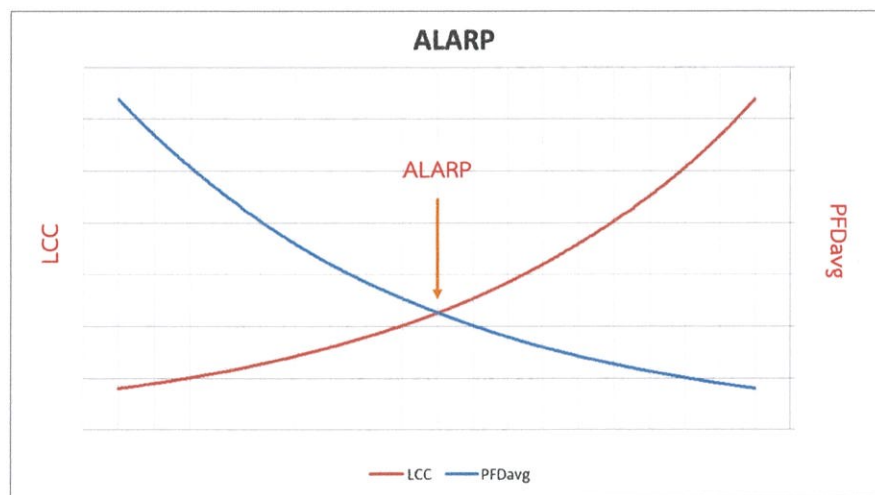
ตัวแปรสำคัญต่าง ๆ	ค่าตัวแปรสำคัญต่าง ๆ
Demand interval	3.16
Consequences	
Economic loss	316227.77
Personal Health and Safety	316.23
Environment impact	3162.28
Total	319706.27
Initial Risk	101100.00

หมายเหตุ

- ได้มาจากข้อมูลพื้นฐานซึ่งมาจากการประเมินความเสี่ยงของฟังก์ชันวัดคุณนिरภัยจากการวิจัย [3]

3.5 ค่าใช้จ่ายตลอดรอบการทำงานของอุปกรณ์ (LCC) กับค่า PFD_{avg} ของอุปกรณ์

ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นตลอดรอบการทำงานของอุปกรณ์นั้น จะเป็นผลรวมของค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากค่าใช้จ่ายคงที่ (Initial Fixed Cost) และค่าใช้จ่ายประจำ (Annual Cost) ของอุปกรณ์ ดังที่กล่าวไว้ในตารางที่ 3.4 โดยค่าใช้จ่ายในการทดสอบอุปกรณ์นั้นจะต้องนำมาคำนวณหาค่าการลงทุนปัจจุบัน (Present Value of Investment, PV) ณ ช่วงเวลาหนึ่ง (Fixed Interval) ดังสมการที่ (2.33) เมื่อได้ค่าใช้จ่ายตลอดรอบการทำงานของอุปกรณ์แล้ว จะนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์แล้วนำไปพล็อตกราฟ โดยที่จุดตัดระหว่างค่าทั้งสองนั้นจะถือว่าเป็นจุด ALARP รูปที่ 3.7 จะแสดงตัวอย่างกราฟที่เปรียบเทียบระหว่างค่าใช้จ่ายตลอดรอบการทำงานของอุปกรณ์กับค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างกราฟเปรียบเทียบค่า LCC กับ PFD_{avg}

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 กล่าวนำ

การออกแบบการทดลองในงานวิจัยนี้ นอกจากจะนำรูปแบบการทำงานของอุปกรณ์การวัดแบบ 1oo3 (One out of Three Voting) ที่อ้างอิงมาจากงานวิจัย [3] แล้ว จะพิจารณารูปแบบการทำงานของอุปกรณ์การวัดเพิ่มเติม 2 รูปแบบ คืออุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1oo2 (One out of Two Voting) และอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2oo3 (Two out of Three Voting) จากนั้นจะทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ทั้ง 2 รูปแบบ โดยการพิจารณาให้มีการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์การวัดทุก ๆ 1 ปี ($T_i=1$), ทุก ๆ 2 ปี ($T_i=2$) ไปจนถึงการทดสอบทุก ๆ 10 ปี ($T_i=10$) และกำหนดให้อุปกรณ์มีอายุการใช้งาน (Life Cycle) 10 ปี และทำการประเมินหาช่วงเวลาการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ที่เหมาะสม โดยพิจารณาความเสี่ยงที่ลดลงกับค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นด้วยการประยุกต์สมการ ROACE ในวิธีการประเมิน ALARP และจะแสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าใช้จ่ายตลอดรอบการทำงานของอุปกรณ์กับค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์สุดท้ายจะนำช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทดสอบของแต่ละอุปกรณ์มาใช้ในฟังก์ชันวัดคummนิรภัย SIF2-A

4.2 ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์การวัดรูปแบบต่างๆ

ในการหาค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์การวัดในรูปแบบต่าง ๆ จะใช้วิธีแผนภาพต้นไม้ในการคำนวณซึ่งได้กล่าวไว้ตามทฤษฎีในหัวข้อที่ 2.4 โดยจะแสดงดังต่อไปนี้

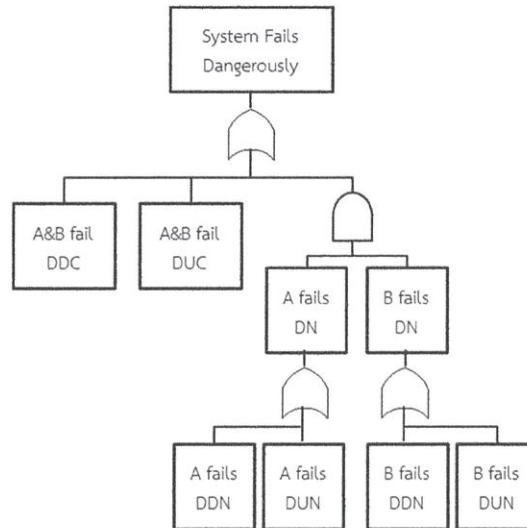
4.2.1 ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1oo2

รูปแบบของอุปกรณ์การวัดประกอบไปด้วยอุปกรณ์การวัดระดับของเหลว 2 ตัว ซึ่งก็คือ LZA-703A และ LZA-703B และในการคำนวณหาค่า PFD_{avgSE} ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1oo2 จะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.9) ซึ่งเป็นสมการที่พิจารณาการทดสอบอุปกรณ์เป็นแบบไม่สมบูรณ์ โดยตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณจะใช้ข้อมูลจากตารางที่ ข1 [ภาคผนวก ข] และกำหนดให้อุปกรณ์ถูกทำการทดสอบทุก ๆ 4 ปี ($T_i=4$) หรือ 35040 ชั่วโมง แทนค่าลงสมการที่ (2.9) จะได้

$$PFD_{avg\ 1oo2} = (0.9)(2.61 \cdot 10^{-8}) \left(\frac{35040}{2} \right) + (1-0.9)(2.61 \cdot 10^{-8}) \left(\frac{87600}{2} \right) + (1.48 \cdot 10^{-7})(8) + ((2.81 \cdot 10^{-6})(8))^2 \\ + ((2.81 \cdot 10^{-6})(8)(0.9)(4.96 \cdot 10^{-7})(35040)) + ((2.81 \cdot 10^{-6})(8)(1-0.9)(4.96 \cdot 10^{-7})(87600)) +$$

$$\left(\frac{1}{3}\right)((0.9)(4.96 \cdot 10^{-7})(35040))^2 + \left(\frac{1}{3}\right)((1-0.9)(4.96 \cdot 10^{-7})(87600))^2$$

$$PFD_{avg 1002} = 6.16 \times 10^{-4}$$



เมื่อ

“A” แทนอุปกรณ์การวัดระดับ หมายเลข LZA-703A

“B” แทนอุปกรณ์การวัดระดับ หมายเลข LZA-703B

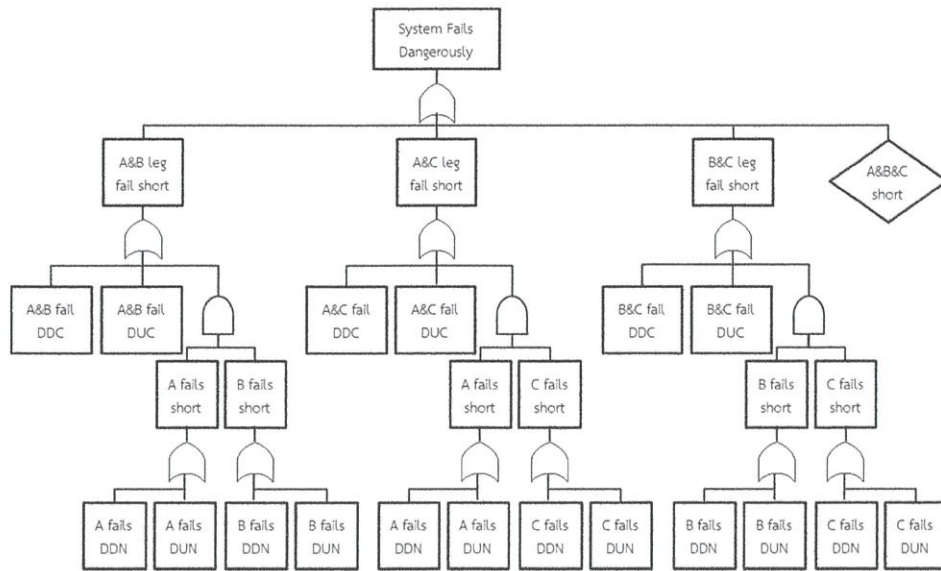
รูปที่ 4.1 แผนภาพต้นไม้ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1002

4.2.2 ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2003

รูปแบบของอุปกรณ์การวัดประกอบไปด้วยอุปกรณ์การวัดระดับของเหลว 3 ตัว ซึ่งก็คือ LZA-703A, LZA-703B และ LZA-703C และในการคำนวณหาค่า PFD_{avgSE} ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2003 จะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.21) ซึ่งเป็นสมการที่พิจารณาการทดสอบอุปกรณ์เป็นแบบไม่สมบูรณ์ โดยตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณจะใช้ข้อมูลจากตารางที่ ข1 [ภาคผนวก ข] และกำหนดให้อุปกรณ์ถูกทำการทดสอบทุก ๆ 4 ปี ($T_T=4$) หรือ 35040 ชั่วโมง

$$PFD_{avg 2003} = \left(\frac{3}{2}\right)(0.9)(2.61 \cdot 10^{-8})(35040) + \left(\frac{3}{2}\right)(1-0.9)(2.61 \cdot 10^{-8})(87600) + (3)(1.48 \cdot 10^{-7})(8) \\ + (3)[((2.81 \cdot 10^{-6})(8))^2 + (2.81 \cdot 10^{-6})(8)(0.9)(4.96 \cdot 10^{-7})(35040) + (2.81 \cdot 10^{-6})(8)(1-0.9) \\ (4.96 \cdot 10^{-7})(87600)] + \left(\frac{1}{3}\right)((0.9)(4.96 \cdot 10^{-7})(35040))^2 + \left(\frac{1}{3}\right)((1-0.9)(4.96 \cdot 10^{-7})(87600))^2]$$

$$PFD_{avg 2003} = 1.85 \times 10^{-3}$$



เมื่อ

“A” แทนอุปกรณ์การวัดระดับ หมายเลข LZA-703A

“B” แทนอุปกรณ์การวัดระดับ หมายเลข LZA-703B

“C” แทนอุปกรณ์การวัดระดับ หมายเลข LZA-703C

รูปที่ 4.2 แผนภาพต้นไม้ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2๐๐3

4.2.3 ค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายในการทดสอบอุปกรณ์ในช่วงเวลาการทดสอบต่าง ๆ

จากหัวข้อที่ 3.3.2 ได้กล่าวถึงการปรับปรุงค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ให้ดีขึ้นโดยการเพิ่มความถี่ในการทดสอบอุปกรณ์ และในการทดสอบอุปกรณ์แต่ละช่วงเวลาการทดสอบนั้นจะต้องมีค่าใช้จ่ายในการทดสอบ โดยค่าใช้จ่ายในการทดสอบของอุปกรณ์จะอ้างอิงจากตารางที่ 3.4 ซึ่งจะแสดงค่าใช้จ่ายในการทดสอบต่อครั้งของอุปกรณ์การวัดและอุปกรณ์สุดท้าย ดังนั้นในตารางที่ 4.1 จะแสดงค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1๐๐2, 1๐๐3 และ 2๐๐3 และอุปกรณ์สุดท้ายรูปแบบ 1๐๐2+1๐๐2 ที่ทำการทดสอบทุก ๆ 1 ปี ($T_i=1$), ทุก ๆ 2 ปี ($T_i=2$) ไปจนถึงการทดสอบทุก ๆ 10 ปี ($T_i=10$) รวมไปถึงแสดงค่าใช้จ่ายในการทดสอบอุปกรณ์ โดยค่าใช้จ่ายในการทดสอบอุปกรณ์จะแสดงค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อปีตลอดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ 10 ปี

ตารางที่ 4.1 ค่า PFD_{avg} ของอุปกรณ์การวัดและอุปกรณ์สุดท้ายในแต่ละช่วงเวลาทดสอบ

ช่วงเวลา การทดสอบ (T _i) (ปี)	ค่า PFD _{avg} และค่าใช้จ่ายในการทดสอบอุปกรณ์ (เหรียญสหรัฐ)			
	อุปกรณ์การวัด (SE) รูปแบบ 1002	อุปกรณ์การวัด (SE) รูปแบบ 1003	อุปกรณ์การวัด (SE) รูปแบบ 2003	อุปกรณ์สุดท้าย (FE) รูปแบบ (1002 + 1002)
T _i = 1	2.30 × 10 ⁻⁴	2.19 × 10 ⁻⁴	6.9 × 10 ⁻⁴	1.47 × 10 ⁻³
T _i = 2	3.48 × 10 ⁻⁴	3.22 × 10 ⁻⁴	1.05 × 10 ⁻³	2.79 × 10 ⁻³
T _i = 3	4.77 × 10 ⁻⁴	4.25 × 10 ⁻⁴	1.43 × 10 ⁻³	4.99 × 10 ⁻³
T _i = 4	6.16 × 10 ⁻⁴	5.28 × 10 ⁻⁴	1.85 × 10 ⁻³	8.07 × 10 ⁻³
T _i = 5	7.65 × 10 ⁻⁴	6.32 × 10 ⁻⁴	2.29 × 10 ⁻³	1.20 × 10 ⁻²
T _i = 6	9.24 × 10 ⁻⁴	7.36 × 10 ⁻⁴	2.77 × 10 ⁻³	1.69 × 10 ⁻²
T _i = 7	1.09 × 10 ⁻³	8.41 × 10 ⁻⁴	3.28 × 10 ⁻³	2.26 × 10 ⁻²
T _i = 8	1.27 × 10 ⁻³	9.47 × 10 ⁻⁴	3.82 × 10 ⁻³	2.92 × 10 ⁻²
T _i = 9	1.46 × 10 ⁻³	1.05 × 10 ⁻³	4.39 × 10 ⁻³	3.67 × 10 ⁻²
T _i = 10	1.66 × 10 ⁻³	1.16 × 10 ⁻³	4.99 × 10 ⁻³	4.5 × 10 ⁻²

4.3 ผลของการประเมินผลค่าใช้จ่าย – ผลประโยชน์ ด้วยวิธีการ ALARP

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ จะมีค่าลดลงหรือมีความเสี่ยงลดลงเมื่อมีการเพิ่มความถี่ในการทดสอบอุปกรณ์ ในทางกลับกันค่าใช้จ่ายในการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ก็จะมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้นในการเลือกช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทดสอบการทำงานของแต่ละอุปกรณ์ จะพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมในการทดสอบอุปกรณ์กับความเสียหายที่ลดลงของความผิดพลาดในการทำงานของอุปกรณ์ โดยใช้สมการที่ (2.32) ในการหาค่า ROACE และตัวแปรสำคัญต่าง ๆ จะใช้ค่าดังตารางที่ 3.5 และผลของค่า ROACE ที่คำนวณได้จะนำไปเปรียบเทียบกับค่า ROACE_{Target} ที่ได้กล่าวไว้ตามทฤษฎีในหัวข้อที่ 2.6 โดยกำหนดให้มีค่า ROACE_{Target} เท่ากับ 20 % ดังนั้นถ้าค่า ROACE ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า 20% จะถือว่าการลงทุนในการลดความเสี่ยงโดยการเพิ่มช่วงเวลาการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์นั้นมีความเหมาะสมต่อการลงทุน ดังนั้นผลของการประเมินผลค่าใช้จ่ายและผลประโยชน์ของอุปกรณ์การวัดและอุปกรณ์สุดท้ายในรูปแบบต่าง ๆ จะแสดงในตารางที่ 4.2, ตารางที่ 4.3, ตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.2 ผลของการประเมินผลค่าใช้จ่าย – ผลประโยชน์ ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1002

Device Architecture		1002 Architecture of Sensing Element																		
		T _i =1 and T _i =2	T _i =2 and T _i =3	T _i =3 and T _i =4	T _i =4 and T _i =5	T _i =5 and T _i =6	T _i =6 and T _i =7	T _i =7 and T _i =8	T _i =8 and T _i =9	T _i =9 and T _i =10										
ALARP Calculation																				
Benefit																				
Demand interval		3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16
Consequences																				
Economic loss		316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77
Personal Health and Safety		316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23
Environment impact		3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28
Total		319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27
Initial Risk		101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00
Risk Reduction of lower alternative		3.48E-04	4.77E-04	6.16E-04	7.65E-04	9.24E-04	1.09E-03	1.27E-03	1.46E-03	1.66E-03	1.86E-03	2.05E-03	2.24E-03	2.43E-03	2.62E-03	2.81E-03	3.00E-03	3.19E-03	3.38E-03	3.57E-03
Risk Reduction of this alternative		2.30E-04	3.48E-04	4.77E-04	6.16E-04	7.65E-04	9.24E-04	1.09E-03	1.27E-03	1.46E-03	1.66E-03	1.86E-03	2.05E-03	2.24E-03	2.43E-03	2.62E-03	2.81E-03	3.00E-03	3.19E-03	3.38E-03
Total benefits		12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Investment Cost (Test Cost per year)																				
Test Cost of lower alternative		150	100	75	60	50	43	38	33	30	27	24	21	18	16	14	12	10	9	8
Test Cost of this alternative		300	150	100	75	60	50	43	38	33	29	25	21	18	15	12	10	8	7	6
Additional Test Cost of this alternative		150	50	25	15	10	7	5	4	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Depreciation per year		15	5	3	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ROACE																				
ROACE		-2.02%	15.99%	46.10%	90.38%	150.88%	229.67%	328.81%	450.36%	596.39%	742.42%	888.45%	1034.48%	1180.51%	1326.54%	1472.57%	1618.60%	1764.63%	1910.66%	2056.69%
Result		Not Justified	Not Justified	Justified	Justified	Justified	Justified	Justified	Justified	Justified	Justified	Justified	Justified	Justified	Justified	Justified	Justified	Justified	Justified	Justified

ตารางที่ 4.3 ผลของการประเมินผลค่าใช้จ่าย - ผลประโยชน์ ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1003

Device Architecture		1003 Architecture of Sensing Element									
ALARP Calculation		T _I =1 and T _I =2	T _I =2 and T _I =3	T _I =3 and T _I =4	T _I =4 and T _I =5	T _I =5 and T _I =6	T _I =6 and T _I =7	T _I =7 and T _I =8	T _I =8 and T _I =9	T _I =9 and T _I =10	
Benefit											
Demand interval		3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	
Consequences											
Economic loss		316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	
Personal Health and Safety		316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	
Environment impact		3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	
Total		319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	
Initial Risk		101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	
Risk Reduction of lower alternative		3.22E-04	4.25E-04	5.28E-04	6.32E-04	7.36E-04	8.41E-04	9.47E-04	1.05E-03	1.16E-03	
Risk Reduction of this alternative		2.19E-04	3.22E-04	4.25E-04	5.28E-04	6.32E-04	7.36E-04	8.41E-04	9.47E-04	1.05E-03	
Total benefits		10	10	10	10	11	11	11	11	11	
Investment Cost (Test Cost per year)											
Test Cost of lower alternative		225	150	113	90	75	64	56	50	45	
Test Cost of this alternative		450	225	150	113	90	75	64	56	50	
Additional Test Cost of this alternative		225	75	38	23	15	11	8	6	5	
Depreciation per year		23	8	4	2	2	1	1	1	1	
ROACE											
ROACE		-5.37%	3.91%	17.90%	36.66%	60.30%	88.93%	122.70%	161.77%	206.35%	
Result		Not Justified	Not Justified	Not Justified	Justified	Justified	Justified	Justified	Justified	Justified	

ตารางที่ 4.4 ผลของการประเมินผลค่าใช้จ่าย – ผลประโยชน์ ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2003

Device Architecture	2003 Architecture of Sensing Element									
	T _i =1 and T _i =2	T _i =2 and T _i =3	T _i =3 and T _i =4	T _i =4 and T _i =5	T _i =5 and T _i =6	T _i =6 and T _i =7	T _i =7 and T _i =8	T _i =8 and T _i =9	T _i =9 and T _i =10	
ALARP Calculation										
Benefit										
Demand interval	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16
Consequences										
Economic loss	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77	316227.77
Personal Health and Safety	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23	316.23
Environment impact	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28	3162.28
Total	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27	319706.27
Initial Risk	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00	101100.00
Risk Reduction of lower alternative	1.05E-03	1.43E-03	1.85E-03	2.29E-03	2.77E-03	3.28E-03	3.82E-03	4.39E-03	4.99E-03	
Risk Reduction of this alternative	6.90E-04	1.05E-03	1.43E-03	1.85E-03	2.29E-03	2.77E-03	3.28E-03	3.82E-03	4.39E-03	
Total benefits	36	39	42	45	48	51	54	58	61	
Investment Cost (Test Cost per year)										
Test Cost of lower alternative	225	150	113	90	75	64	56	50	45	
Test Cost of this alternative	450	225	150	113	90	75	64	56	50	
Additional Test Cost of this alternative	225	75	38	23	15	11	8	6	5	
Depreciation per year	23	8	4	2	2	1	1	1	1	
ROACE										
ROACE	5.95%	41.98%	102.20%	190.75%	311.76%	469.34%	667.62%	910.72%	1202.78%	
Result	Not Justified	Justified	Justified	Justified	Justified	Justified	Justified	Justified	Justified	Justified

จากผลของการประเมินผลค่าใช้จ่าย – ผลประโยชน์ ของอุปกรณ์การวัดและอุปกรณ์สุดท้าย รูปแบบต่าง ๆ ในฟังก์ชันวัดคัมมิรภัย SIF2-A ที่ได้จากตารางที่ 4.2, ตารางที่ 4.3, ตารางที่ 4.4 และ ตารางที่ 4.5 สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากตารางที่ 4.2 ผลของการประเมินผลค่าใช้จ่าย – ผลประโยชน์ ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1002 สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความถี่ในการทดสอบอุปกรณ์ทุก ๆ 4 ปี ($T_I=4$) ไปยังการทดสอบ อุปกรณ์ทุก ๆ 3 ปี ($T_I=3$) เพื่อที่จะทำให้ความเสี่ยงลดลงนั้นคุ้มค่าต่อการลงทุน ดังนั้นช่วงเวลากการทดสอบที่เหมาะสมของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1002 ในฟังก์ชันวัดคัมมิรภัย SIF2-A นั้นคือช่วงเวลากการทดสอบทุก ๆ 3 ปี ($T_I=3$)

2. จากตารางที่ 4.3 ผลของการประเมินผลค่าใช้จ่าย – ผลประโยชน์ ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1003 สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความถี่ในการทดสอบอุปกรณ์ทุก ๆ 5 ปี ($T_I=5$) ไปยังการทดสอบ อุปกรณ์ทุก ๆ 4 ปี ($T_I=4$) เพื่อที่จะทำให้ความเสี่ยงลดลงนั้นคุ้มค่าต่อการลงทุน ดังนั้นช่วงเวลากการทดสอบที่เหมาะสมของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1003 ในฟังก์ชันวัดคัมมิรภัย SIF2-A นั้นคือช่วงเวลากการทดสอบทุก ๆ 4 ปี ($T_I=4$)

3. จากตารางที่ 4.4 ผลของการประเมินผลค่าใช้จ่าย – ผลประโยชน์ ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2003 สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความถี่ในการทดสอบอุปกรณ์ทุก ๆ 3 ปี ($T_I=3$) ไปยังการทดสอบ อุปกรณ์ทุก ๆ 2 ปี ($T_I=2$) เพื่อที่จะทำให้ความเสี่ยงลดลงนั้นคุ้มค่าต่อการลงทุน ดังนั้นช่วงเวลากการทดสอบที่เหมาะสมของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2003 ในฟังก์ชันวัดคัมมิรภัย SIF2-A นั้นคือช่วงเวลากการทดสอบทุก ๆ 2 ปี ($T_I=2$)

4. จากตารางที่ 4.5 ผลของการประเมินผลค่าใช้จ่าย – ผลประโยชน์ ของอุปกรณ์สุดท้าย รูปแบบ 1002+1002 สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความถี่ในการทดสอบอุปกรณ์ทุก ๆ 2 ปี ($T_I=2$) ไปยัง การทดสอบอุปกรณ์ทุก ๆ 1 ปี ($T_I=1$) เพื่อที่จะทำให้ความเสี่ยงลดลงนั้นคุ้มค่าต่อการลงทุน ดังนั้น ช่วงเวลากการทดสอบที่เหมาะสมของอุปกรณ์สุดท้ายรูปแบบ 1002+1002 ในฟังก์ชันวัดคัมมิรภัย SIF2-A นั้นคือช่วงเวลากการทดสอบทุก ๆ 1 ปี ($T_I=1$)

4.4 กราฟเปรียบเทียบค่า LCC กับ PFD_{avg} ของอุปกรณ์

จากหัวข้อที่ 3.5 ได้กล่าวถึงการหาค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นตลอดรอบการทำงานของอุปกรณ์ โดย ค่าใช้จ่ายตลอดรอบการทำงานของอุปกรณ์การวัดและอุปกรณ์สุดท้ายที่มีช่วงเวลากการทดสอบอุปกรณ์ที่ แตกต่างกันได้แสดงได้ดังตารางที่ 4.6, ตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 และกราฟเปรียบเทียบ ระหว่างค่าใช้จ่ายตลอดรอบการทำงานของแต่ละอุปกรณ์กับค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาด อันตรายของแต่ละอุปกรณ์จะแสดงดังรูปที่ 4.3 ถึงรูปที่ 4.6 โดยจุดตัดระหว่างค่าทั้งสองนั้นจะถือว่าเป็น จุด ALARP

ตารางที่ 4.6 ค่าใช้จ่ายตลอดรอบการทำงานโดยประมาณของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1๐๐2

รายละเอียด	อุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1๐๐2									
	T ₁ = 1	T ₁ = 2	T ₁ = 3	T ₁ = 4	T ₁ = 5	T ₁ = 6	T ₁ = 7	T ₁ = 8	T ₁ = 9	T ₁ = 10
ค่าใช้จ่ายคงที่ (เหรียญสหรัฐ)										
ค่าอุปกรณ์ต่อตัว (รวมค่าออกแบบและค่าติดตั้ง)	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000
จำนวนอุปกรณ์ทั้งหมด	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
รวม (เหรียญสหรัฐ)	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
ค่าใช้จ่ายประจำ (เหรียญสหรัฐ)										
ค่าใช้จ่ายในการทดสอบ	300	150	100	75	60	50	43	38	33	30
ค่าการลงทุนปัจจุบัน (PV) (เหรียญสหรัฐ)	2317	1158	772	579	463	386	331	290	257	232
ค่าใช้จ่ายตลอดรอบการทำงาน (LCC) (เหรียญสหรัฐ)	10317	9158	8772	8579	8463	8386	8331	8290	8257	8232

หมายเหตุ

- กำหนดให้อัตราดอกเบี้ยอยู่ที่ 5% และระยะเวลาของรอบการทำงานของอุปกรณ์ อยู่ที่ 10 ปี

ตารางที่ 4.7 ค่าใช้จ่ายตลอดรอบการทำงานโดยประมาณของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1003 และ 2003

รายละเอียด	อุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1003 และ 2003									
	T ₁ = 1	T ₁ = 2	T ₁ = 3	T ₁ = 4	T ₁ = 5	T ₁ = 6	T ₁ = 7	T ₁ = 8	T ₁ = 9	T ₁ = 10
ค่าใช้จ่ายคงที่ (เหรียญสหรัฐ)										
ค่าอุปกรณ์ต่อตัว (รวมค่าออกแบบและค่าติดตั้ง)	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000
จำนวนอุปกรณ์ทั้งหมด	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
รวม (เหรียญสหรัฐ)	12000	12000	12000	12000	12000	12000	12000	12000	12000	12000
ค่าใช้จ่ายประจำ (เหรียญสหรัฐ)										
ค่าใช้จ่ายในการทดสอบ	450	225	150	113	90	75	64	56	50	45
ค่าการลงทุนปัจจุบัน (PV) (เหรียญสหรัฐ)	3475	1737	1158	869	695	579	496	434	386	347
ค่าใช้จ่ายตลอดรอบการทำงาน (LCC) (เหรียญสหรัฐ)	15475	13737	13158	12869	12695	12579	12496	12434	12386	12347

หมายเหตุ

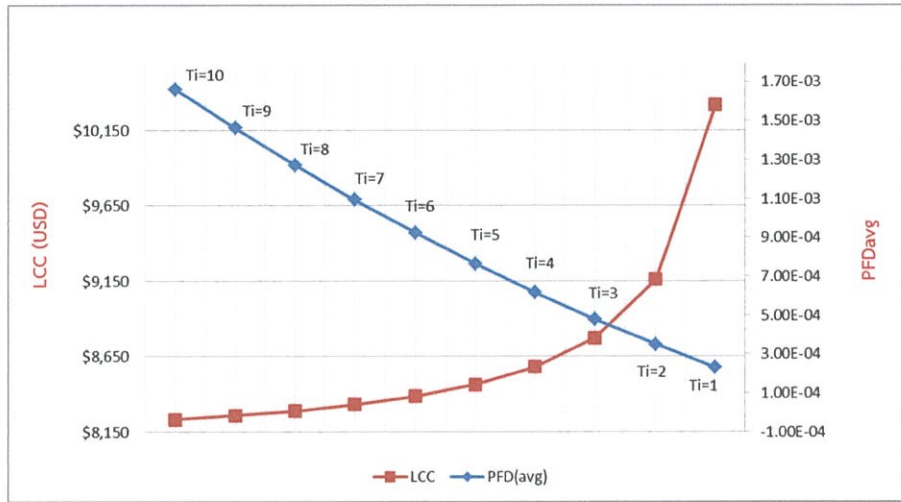
- กำหนดให้อัตราดอกเบี้ยอยู่ที่ 5% และระยะเวลาของรอบการทำงานของอุปกรณ์ อยู่ที่ 10 ปี

ตารางที่ 4.8 ค่าใช้จ่ายตลอดรอบการทำงานโดยประมาณของอุปกรณ์สุดท้ายรูปแบบ 1oo2+1oo2

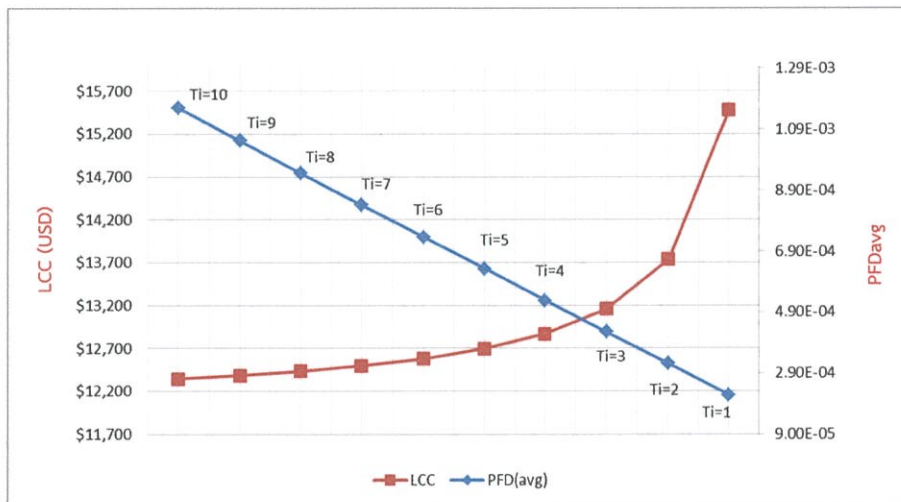
รายละเอียด	อุปกรณ์สุดท้ายรูปแบบ 1oo2+1oo2									
	T ₁ = 1	T ₁ = 2	T ₁ = 3	T ₁ = 4	T ₁ = 5	T ₁ = 6	T ₁ = 7	T ₁ = 8	T ₁ = 9	T ₁ = 10
ค่าใช้จ่ายคงที่ (เหรียญสหรัฐ)										
ค่าอุปกรณ์ต่อตัว (รวมค่าออกแบบและค่าติดตั้ง)	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000
จำนวนอุปกรณ์ทั้งหมด	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
รวม (เหรียญสหรัฐ)	48000	48000	48000	48000	48000	48000	48000	48000	48000	48000
ค่าใช้จ่ายประจำ (เหรียญสหรัฐ)										
ค่าใช้จ่ายในการทดสอบ	800	400	267	200	160	133	114	100	89	80
ค่าการลงทุนปัจจุบัน (PV) (เหรียญสหรัฐ)	6177	3089	2062	1544	1235	1027	880	772	687	618
ค่าใช้จ่ายตลอดรอบการทำงาน (LCC) (เหรียญสหรัฐ)	54177	51089	50062	49544	49235	49027	48880	48772	48687	48618

หมายเหตุ

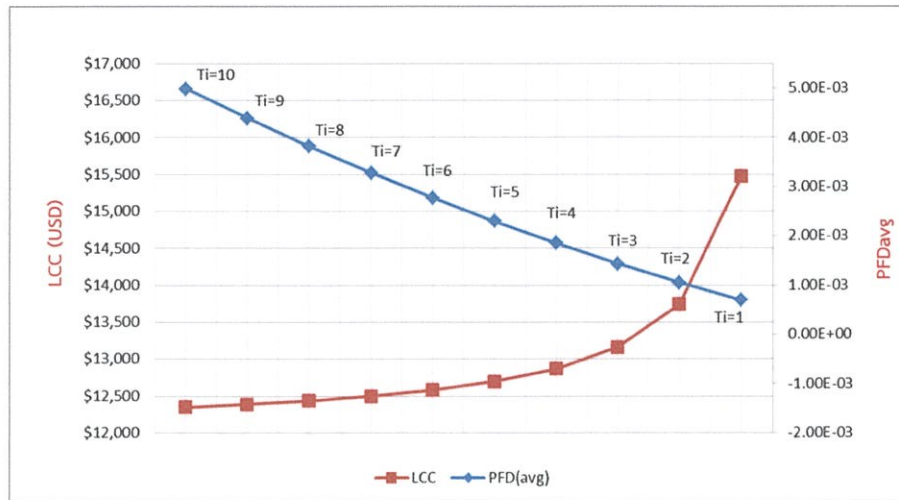
- กำหนดให้อัตราดอกเบี้ยอยู่ที่ 5% และระยะเวลาของรอบการทำงานของอุปกรณ์ อยู่ที่ 10 ปี



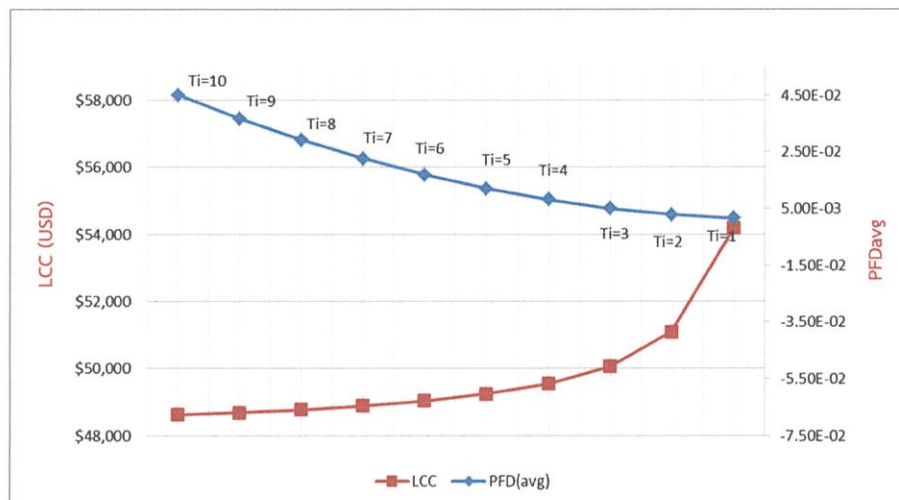
รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบค่า LCC กับ PFD_{avg} ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1002



รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบค่า LCC กับ PFD_{avg} ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1003



รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบค่า LCC กับ PFD_{avg} ของอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2003



รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบค่า LCC กับ PFD_{avg} ของอุปกรณ์สุดท้ายรูปแบบ 1002+1002

ดังนั้นเมื่อนำผลที่ได้จากการเลือกช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทดสอบอุปกรณ์มาออกแบบฟังก์ชันวัดคัมมิรภัย SIF2-A จะได้ข้อมูลดังตารางที่ 4.9 ซึ่งประกอบไปด้วย SIF2-A1, SIF2-A2 และ SIF2-A3 และจากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าค่าระดับความปลอดภัยที่ได้นั้นมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าระดับความปลอดภัยเป้าหมาย (SIL2) จึงสามารถที่จะนำรูปแบบฟังก์ชันวัดคัมมิรภัยเหล่านี้ไปใช้ในการป้องกันอันตรายในกระบวนการผลิตได้ แต่ในส่วนของช่วงเวลาการทดสอบของอุปกรณ์สุดท้ายหรือวาล์วนิรภัยที่มีช่วงเวลาการทดสอบอยู่ที่ทุก ๆ 1 ปี ($T_i=1$) นั้น ในความเป็นจริงอาจจะเป็นไปได้ยากเนื่องจากการทดสอบการทำงานของวาล์วนิรภัยแบบสมบูรณ์นั้นจะต้องมีการถอดอุปกรณ์ออกไปทำการทดสอบ ทำให้ต้องมีการหยุดกระบวนการผลิต โดยการเพิ่มความถี่ในการทดสอบให้บ่อยขึ้นเพื่อที่จะลดความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายนั้นเป็นไปได้ยากในกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง ซึ่งไม่อาจหยุดการผลิตได้จนกว่าจะถึงช่วงเวลาในการซ่อมบำรุงใหญ่ (Shutdown Period) ดังนั้นช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทดสอบของวาล์วนิรภัยนั้นควรอยู่ในช่วงทุก ๆ 4 ปี หรือช่วงการซ่อมบำรุงใหญ่ (ทุก ๆ 4 ปี) ซึ่งจะแสดงดังรูปแบบฟังก์ชันวัดคัมมิรภัย SIF2-A4, SIF2-A5 และ SIF2-A6 ในตารางที่ 4.9 และค่าระดับความปลอดภัยที่ได้นั้นยังคงมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าระดับความปลอดภัยเป้าหมาย สุดท้ายนี้ยังสามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ในงานวิจัย [3] เพื่อเลือกรูปแบบของฟังก์ชันวัดคัมมิรภัย SIF2-A ที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในการป้องกันอันตรายในกระบวนการผลิตได้

ตารางที่ 4.9 รูปแบบฟังก์ชันวัดคุณนिरภัย SIF2-A แบบต่าง ๆ ที่มีช่วงเวลาการทดสอบอุปกรณ์ที่เหมาะสม

รูปแบบ	รูปแบบฟังก์ชันวัดคุณนिरภัย SIF2-A แบบต่าง ๆ ที่มีช่วงเวลาการทดสอบอุปกรณ์ที่เหมาะสม												ระดับ ความ ปลอดภัย SIL _{SIF}	
	อุปกรณ์การวัด (SE)			ส่วนประมวลผล (LS)			อุปกรณ์สุดท้าย (FE)							ผลรวม ของค่า PFD _{avg SIF}
	รูปแบบ	ช่วงเวลา การ ทดสอบ (T ₁) (ปี)	ค่า PFD _{avg SE}	รูปแบบ	ช่วงเวลา การ ทดสอบ (T ₁) (ปี)	ค่า PFD _{avg LS}	รูปแบบ	ช่วงเวลา การทดสอบ แบบ Partial Test (T ₁₁) (ปี)	ช่วงเวลา การทดสอบ แบบ Full Test (T ₁₂) (ปี)	ค่า PFD _{avg FE}				
SIF2-A1	1002	3	4.77E-04	1001	4	5.66E-04	1002+1002	1	1	1	1.47E-03	2.51E-03	SIL2	
SIF2-A2	1003	4	5.28E-04	1001	4	5.66E-04	1002+1002	1	1	1	1.47E-03	2.56E-03	SIL2	
SIF2-A3	2003	2	1.05E-03	1001	4	5.66E-04	1002+1002	1	1	1	1.47E-03	3.08E-03	SIL2	
SIF2-A4	1002	3	4.77E-04	1001	4	5.66E-04	1002+1002	1	4	4	8.07E-03	9.11E-03	SIL2	
SIF2-A5	1003	4	5.28E-04	1001	4	5.66E-04	1002+1002	1	4	4	8.07E-03	9.16E-03	SIL2	
SIF2-A6	2003	2	1.05E-03	1001	4	5.66E-04	1002+1002	1	4	4	8.07E-03	9.68E-03	SIL2	

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำฟังก์ชันวัดคัมมิริภัยของกระบวนการ Tail Gas Treating ที่เป็นกรณีศึกษาจาก [3] มาพิจารณา โดยผลของการประเมินความเสี่ยงเมื่อฟังก์ชันวัดคัมมิริภัยนี้เกิดความผิดพลาดในการทำงาน จะมีผลการสูญเสียด้านทรัพย์สินอยู่ในระดับสูง ไม่มีผลกระทบต่อชีวิต และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเล็กน้อยมาก ดังนั้นค่าระดับความปลอดภัยเป้าหมายของฟังก์ชันวัดคัมมิริภัยนี้จะมีผลมาจากผลกระทบทางด้านทรัพย์สิน ซึ่งมีค่าระดับความปลอดภัยเป้าหมาย (SIL_{target}) อยู่ที่ระดับ SIL2 เมื่อได้ค่าระดับความปลอดภัยเป้าหมายที่ งานวิจัย [3] ได้แสดงการวิเคราะห์เอาไว้แล้ว จากนั้นจะทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตราย ($PFD_{avg, SIF}$) ของฟังก์ชันวัดคัมมิริภัยโดยใช้วิธีแผนภาพต้นไม้ในการคำนวณ โดยค่า $PFD_{avg, SIF}$ นั้นมาจากผลรวมของค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์การวัด ($PFD_{avg, SE}$) ส่วนประมวลผล ($PFD_{avg, LS}$) และอุปกรณ์สุดท้าย ($PFD_{avg, FE}$)

งานวิจัยนี้ได้แสดงวิธีการคำนวณหาค่า $PFD_{avg, SE}$ อย่างละเอียด โดยพิจารณาให้การทดสอบอุปกรณ์การวัดนั้นเป็นการทดสอบแบบไม่สมบูรณ์ (Imperfect Proof Test) ซึ่งตามมาตรฐาน IEC 61508/61511 จะแสดงวิธีการคำนวณหาค่าความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์โดยกำหนดให้อุปกรณ์นั้น ๆ จะถูกทดสอบโดยสมบูรณ์ (Perfect Proof Test) แบบเท่านั้น ซึ่งการทดสอบแบบนี้เป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ ส่วนการหาค่า $PFD_{avg, LS}$ และ $PFD_{avg, FE}$ นั้นจะใช้วิธีการคำนวณด้วยสมการอย่างง่ายที่ งานวิจัย [3] ได้แสดงวิธีการคำนวณเอาไว้ จากผลของการคำนวณค่า $PFD_{avg, SIF}$ ที่ได้ นั้นแสดงให้เห็นว่ามีค่ามากกว่าค่า $PFD_{avg, SIF}$ ที่ได้จากการคำนวณจากงานวิจัย [3] อันเนื่องมาจากผลของค่า $PFD_{avg, SE}$ ที่มีการพิจารณาให้การทดสอบอุปกรณ์การวัดนั้นเป็นการทดสอบแบบไม่สมบูรณ์

ส่วนสุดท้ายของงานวิจัย จะเป็นการปรับปรุงค่า PFD_{avg} โดยการเพิ่มความถี่ในการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์การวัดและอุปกรณ์สุดท้าย ซึ่งผลที่ได้พบว่าค่า PFD_{avg} นั้นมีค่าลดลงหรือความเป็นไปได้ที่อุปกรณ์เหล่านี้จะทำงานผิดพลาดมีค่าลดลง แต่การเพิ่มความถี่ในการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์นั้นจะทำให้ค่าใช้จ่ายในการทดสอบมีค่าสูงขึ้น โดยงานวิจัยนี้ได้แสดงวิธีการเลือกช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์การวัดและอุปกรณ์สุดท้าย ด้วยการประยุกต์สมการ ROACE ในวิธีการ ALARP โดยพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นกับความเสี่ยงที่ลดลง และแสดงให้เห็นกราฟเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายตลอดรอบการทำงานของอุปกรณ์กับค่าเฉลี่ยความเป็นไปได้ของความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ ซึ่งจุดตัดกันของค่าทั้งสองนั้นจะเป็นจุด ALARP

5.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อ

ในการคำนวณหาค่า PFD_{avg} อย่างละเอียดของส่วนประสมผลนั้นจะต้องนำค่าความผิดพลาดของอุปกรณ์ย่อยต่าง ๆ ในระบบมาคำนวณด้วย เช่นค่าอัตราความผิดพลาดของหน่วยควบคุม (Controller unit) ค่าอัตราความผิดพลาดของอินพุต/เอาต์พุตโมดูล (Input/Output module) ค่าอัตราความผิดพลาดของอุปกรณ์จำกัดพลังงาน (safety barrier) เป็นต้น และในการหาค่า PFD_{avg} อย่างละเอียดของอุปกรณ์สุดท้ายนั้น จะต้องนำค่าความผิดพลาดของตัววาล์วนิรภัย (Valve Body) และค่าความผิดพลาดของโซลินอยด์วาล์ว (Solenoid Valve) มาทำการคำนวณ ซึ่งข้อมูลที่ใช้อ้างอิงจากงานวิจัย [3] นั้นไม่มีค่าความผิดพลาดเหล่านี้ จึงทำให้ไม่สามารถแสดงการคำนวณหาค่า PFD_{avg} ของส่วนประสมผลและอุปกรณ์สุดท้ายอย่างละเอียดได้ ดังนั้นถ้าหากมีข้อมูลเพิ่มเติมและมีการพิจารณาการคำนวณแบบนี้ให้กับส่วนประสมผลและอุปกรณ์สุดท้าย จะทำให้ค่า PFD_{avg} ที่ได้นั้นใกล้เคียงกับความเป็นจริงมาก และสามารถที่จะออกแบบฟังก์ชันวัดคูนิรภัยได้อย่างเหมาะสม

เอกสารอ้างอิง

- [1] International Electrotechnical Commission. “Functional safety – Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector” **IEC-61511**, 2003.
- [2] International Electrotechnical Commission. “Functional safety of Electrical / Electronics / Programmable Electronic Safety - Related System” **IEC-61508**, 2010.
- [3] พรพิชรา คำคุณ. “การประเมินค่าระดับความปลอดภัยและการออกแบบฟังก์ชันวัดคูนิรภัย โดยพิจารณาความเหมาะสมของค่าใช้จ่าย – ผลประโยชน์ ด้วยการใช้วิธีการประเมิน ALARP.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.
- [4] ทวิช ชูเมือง. การกำหนดค่าระดับความปลอดภัยสำหรับฟังก์ชันนิรภัย. กรุงเทพมหานคร : วีพรีนท์. 2551.
- [5] Bukowski J.V and Iwan van Beurden. “Impact of Proof Test Effectiveness on Safety Instrumented System Performance” **Reliability and Maintainability Symposium**. 2009. pp. 157-163.
- [6] William M. Goble, Harry L. Cheddie. **Safety Instrumented Systems Verification : Practical Probabilistic Calculations**. United State of America : ISA. 2005.
- [7] Harry L. Cheddie, Paul Gruhn. **Safety Instrumented System: Design, Analysis, and Justification**. 2nd Edition. United State of America : ISA. 2002.
- [8] Shell GSI. “Classification and Implementation of Instrumented Protective Functions” **DEP 32.80.10.10 – Gen (Shell Standard)**, 2010.
- [9] Theerawat Thepmanee, Amornsak Potiteerabuit. “Probabilistic assessments of Safety Instrumented Function by considering the justification of cost-benefit using ALARP evaluation method” **ICIAE**. 2015. March 2015, pp. 613 – 618.
- [10] Teerawat Thepmanee, Pornpatchara Khamkoon. “SIL Assessment and implementation case study: A safety instrumented function for overpressure protection in a two – phase gas – liquid separator” **ICIC Express Letters Part B: Applications**. Volume 5, Number 1, February 2014, pp. 45 – 50.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

ภาคผนวก

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการระดับนานาชาติในวิทยานิพนธ์นี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- [9] Theerawat Thepmanee, Amornsak Potiteerabuit. “Probabilistic assessments of Safety Instrumented Function by considering the justification of cost-benefit using ALARP evaluation method” ICIAE. 2015. March 2015, pp. 613 – 618.

Proceedings of The 3rd International Conference on Industrial Application Engineering 2015

ICIAE2015

Kitakyushu International Conference Center, Kitakyushu, Japan

March 28-31, 2015

ISBN: 978-4-907220-06-8

- Committee
- Keynote Speech
- Time Table
- Program



Proceedings of ICIAE2015 Publisher

Published by



The Institute of Industrial Applications Engineers (IIAE)

Supported by



The Institute of Electrical and Electronic Engineers Fukuoka Section (IEEE)



The Society of Instrument and Control Engineers (SICE)



The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Kyushu Section (IEICE)



The Institute of Electrical Engineers of Japan (IEEJ)



The Japan Society of Mechanical Engineers (JSME)



Information Processing Society of Japan (IPSJ)



West Japan Industry and Trade Convention Association



City of Kitakyushu

Copyright(c) ICIAE2015 All Rights Reserved.

GS14 Image Processing**March 30****Room A****14:50-16:30****Chair Joo Kooi Tan, Kyushu Institute of Technology, Japan**GS14-1 A New Efficient Method to Improve Handwritten Signature Recognition

Anusara Hirunyanakul	Suranaree University of Technology, Thailand
Kedkarn Chaiyakhan	Suranaree University of Technology, Thailand
Ratiporn Chanklan	Suranaree University of Technology, Thailand
Kittisak Kerdprasop	Suranaree University of Technology, Thailand
Nittaya Kerdprasop	Suranaree University of Technology, Thailand

GS14-2 Fingerprint Recognition with Edge Detection and Dimensionality Reduction Techniques

Ratiporn Chanklan	Suranaree University of Technology, Thailand
Kedkarn Chaiyakhan	Suranaree University of Technology, Thailand
Anusara Hirunyanakul	Suranaree University of Technology, Thailand
Kittisak Kerdprasop	Suranaree University of Technology, Thailand
Nittaya Kerdprasop	Suranaree University of Technology, Thailand

GS14-3 Automatic Classification System of Electric Parts Focused on Periodicity of Leads

Shuichiro Kito	Nagoya Institute of Technology, Japan
Koosuke Hattori	Chubu University, Japan
Ryo Taguchi	Nagoya Institute of Technology, Japan
Taizo Umezaki	Nagoya Institute of Technology, Japan

GS14-4 Fast Image Alignment for Inspection of FCB Bump Coin System

Sungho Suh	Samsung Electro-Mechanics, Korea
Hansang Cho	Samsung Electro-Mechanics, Korea

GS14-5 Intelligent Stereo Image Processing in Mobile System

Tien-Yu Ho	National Tsing Hua University, Taiwan
Szu-Hao Huang	National Tsing Hua University, Taiwan
Tzu-Ting Shih	National Tsing Hua University, Taiwan
Gin-Yen Yang	National Tsing Hua University, Taiwan
Ching-Wei Tseng	National Tsing Hua University, Taiwan

GS15 Industrial Application Technology 2 March 30**Room B****14:50-16:30****Chair Mitsunori Mizumachi, Kyushu Institute of Technology, Japan**GS15-1 Mathematical Models and the Noise -Vibration of the Gearboxes

Hung-Phi Cao	Vinh Long University of Technology Education, Vietnam
--------------	---

GS15-2 A Single Deteriorating System's Replacement Model with Inspections

Shey-Huei Sheu	Providence University, Taiwan
Hsin-Nan Tsai	Providence University, Taiwan

	Fu-Kwun Wang	Western Washington University, U.S.A.
	Zhe George Zhang	Western Washington University, U.S.A.
GS15-3	<u>Unstructured Zero-Order Energy FEM: a potential NVH tool</u>	
	Hongwei Zhou	University of Science and Technology of China, China
	Haibo Chen	University of Science and Technology of China, China
	Yongyan Wang	University of Science and Technology of China, China
GS15-4	<u>PDSS: The Decision Support System of Diabetic Patient for Public Health</u>	
	Benjapuk Jongmuenwai	Rajabath Nakhonratchasima University, Thailand
	Kailas Bumrungrat	Rajabath Nakhonratchasima University, Thailand
	Papon Kaewhin	Rajabath Nakhonratchasima University, Thailand
GS15-5	<u>Probabilistic Assessments of Safety Instrumented Function by Considering the Justification of Cost-benefit Using ALARP Evaluation Method</u>	
	Amornsak Potiteerabuit	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand
	Teerawat Thepmanee	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

OS3 Intelligent Image Processing March 30

Room C 14:50-15:50

Chair Shota Nakashima, Yamaguchi University, Japan

OS3-1 Image Contrast Enhancement for Deep-sea Observation Systems

	Huimin Lu	Japan Society for the Promotion of Science, Japan
	Yujie Li	Kyushu Institute of Technology, Japan
	Jianru Li	Tongji University, China
	Xin Li	Shanghai Jiaotong University, China
	Yohei Kashio	Kyushu Institute of Technology, Japan
	Seiichi Serikawa	Kyushu Institute of Technology, Japan

OS3-2 Comparative Evaluation between Fixed and Floating Point Hardware Implementation of Image Conversion on High-level Synthesis

	Miyu Fujita	Kyushu Institute of Technology, Japan
	Kazunari Yosikawa	Kyushu Institute of Technology, Japan
	Naohiro Iwanaga	Kyushu Institute of Technology, Japan
	Akira Yamawaki	Kyushu Institute of Technology, Japan

OS3-3 Development of Fixed-point Canny Edge Filter Operations for High-level Synthesis

	Kazunari Yoshikawa	Kyushu Institute of Technology, Japan
	Naohiro Iwanaga	Kyushu Institute of Technology, Japan
	Tatsuya Hamachi	Kyushu Institute of Technology, Japan
	Akira Yamawaki	Kyushu Institute of Technology, Japan

Probabilistic assessments of Safety Instrumented Function by considering the justification of cost-benefit using ALARP evaluation method

Amornsak Potiteerabuit, Teerawat Thepmanee

Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

amornsak.po@gmail.com; ktteeraw@kmitl.ac.th

Abstract

This paper addresses the conceptual design step that probabilistic calculations are done to show that any given design meets the performance requirements of the Safety Instrumented Function(SIF) by considering the justification of cost-benefit. The average Probability of Failure on Demand (PFD_{avg}) of the one out of one (1oo1) sensing device was calculated by simplified Markov model. The effects of the imperfect proof test and proof test interval on the value of PFD_{avg} were then studied. As the test cost occurs during device proof test, high frequently of testing along the device life cycle increases the cost while decreases the PFD_{avg} value and risk of the sensing device. In this work, the relationship between the risk reduction achieved and the investment cost was investigated in detail using As Low As Reasonably Practicable (ALARP) method. Based on the ALARP analysis, the optimized interval of proof test was then evaluated.

Keywords: SIS, SIF, SIL, PFD, ALARP, Markov model, Proof test

1. Introduction

The SIS is a set of instrumentation hardware and software that controls the safety level of the process automation system in order to avoid revolting conditions, such as explosion, fire and leak of hazardous chemicals. Following this look, the desirable safety condition can be managed by implementing SIS to the process system. The IEC standard 61511 (1) defines a Safety Instrumented System (SIS) as an “instrumented system used to

implement one or more Safety Instrumented Functions (SIF). A SIS is composed of any combination of sensor, logic solver and final element”. The SIF is intended to bring the process industries to a safe state and designed for protecting the damage to the health of people, property or to the environment.

The level of risk reduction or Safety Integrity Level (SIL) is obtained from the amount of average Probability of Failure on Demand (PFD_{avg}) of sensing device, logic solve and final element. IEC standard recognizes three modes of safety function operation: (a) Low Demand Mode, (b) High Demand Mode and (c) Continuous Mode (2). The Low Demand Mode is defined as the safety function demand rate is less than or equal to once a year or less than two times of proof test frequency, High Demand Mode is defined as safety function demand rate is greater than once a year or greater than two times of proof test frequency and Continuous Mode is defined as safety function is operating as a continuous control function. This paper focuses on the SIL in Low Demand Mode which is shown in Table 1.

Table 1. Safety Integrity Level (SIL) in Low Demand Mode

Safety Integrity Level (SIL)	Average Probability of Failure on Demand (PFD _{avg})
4	$\geq 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$
3	$\geq 10^{-4}$ to $< 10^{-3}$
2	$\geq 10^{-3}$ to $< 10^{-2}$
1	$\geq 10^{-2}$ to $< 10^{-1}$

For decades, many researchers have focused on a variety of SIL assessment and implementation for process safety (3–5) and considered the justification of cost-benefit

(6). This paper focuses on the proof test of sensing device which affects the PFD_{avg} value by considering the justification of cost-benefit using ALARP evaluation method. The simplified Markov model is taken into account for calculating the PFD_{avg} . According to the proof test interval of the sensing device, the test cost will occur. If there are high frequently proof tests along the life cycle of sensing device, the test cost will increase while the risk or PFD_{avg} value will decrease respectively. In this case, the As Low As Reasonably Practicable (ALARP) method is taken into account for determining the proper proof test interval.

2. Markov model and Proof Test method

The objective of proof test is to reveal the dangerous undetected failures which cannot be detected by online diagnostic test. Once all failures are revealed, the equipment can be repaired and will function as “new” upon restart (3). This proof test is called “Perfect Proof Test”. In case of there are remaining dangerous failures which cannot be detected during the proof test, this proof test is called “Imperfect Proof Test”. The result from imperfect proof test will impact on the PFD value which will increase every year along the life cycle of device.

The method for determining failure rates is the Failure Modes Effects and Diagnostic Analysis (FMEDA) which is performed by manufacturers. The FMEDA is a systematic technique that is designed to identify problems. It is a “bottom up” method (7) that starts with a detailed list of all components within the system. The result from this analysis will yield the failure rate which is divided in the safe detected failure rate (λ^{SD}), safe undetected failure rate (λ^{SU}), dangerous detected failure rate (λ^{DD}) and dangerous undetected failure rate (λ^{DU}).

In this paper, the Markov model which is defined as a “memory-less” system where the probability of moving from one state to another is dependent only upon the current state and not past history of getting to the state (7) is taken into account. The failures for calculating the PFD by simplified Markov model are the λ^{DD} and λ^{DU} . Other factors for calculating the PFD are Proof Test Coverage (PTC) and Mean Time To Repair (MTTR). The PTC is the ratio of undetected dangerous failures revealed during the proof test to total undetected dangerous failures. The MTTR is the mean time to repair a module or element of the SIS. This mean time (hour) is measured from the time when failure occurs to the time when the repair is completed and device returned to service.

The simplified Markov model shown in Figure 1 consists of three states as following (4).

- 1) The OK state (state “0”, S_0) represents the situation where the SIF is operating correctly with no failures present.
- 2) The FDD state (state “1”, S_1) represents the situation where the SIF failed dangerous detected.
- 3) The FDU state (state “2”, S_2) represents the situation where the SIF failed dangerous undetected.

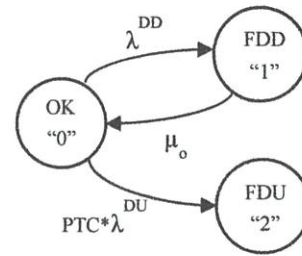


Fig. 1. Simplified Markov model

When the dangerous detected failure occurs, the state “0” will move to state “1”. If the failure is repaired, the state “1” will move back to state “0” which is represented by Restore rate (μ_0). Similarly, when the dangerous undetected failure occurs, the state “0” will move to state “2” and the dangerous undetected failure are only revealed and repaired during proof test.

This paper examines the 1001 sensing device from the manufacturer who performs the FMEDA. λ^{DD} of this device equals 1.898E-06 per hour, λ^{DU} equals 1.730E-07 per hour, MTTR equals 24 hours and suppose that the life cycle (T_1) of device and proof test interval (T_i) equals 10 years and every 1 year ($T_i=1$) respectively.

The Markov model solution technique which is considered in this paper is numerical solution technique. The probability of being in any state can be obtained by simple matrix (7). To solve for state probabilities, a row matrix indicating starting state probabilities ($[1 \ 0 \ 0]$) is multiplied by the square transition matrix which is shown in Equation (1). Each multiplication represents one discrete time (1 hour) increment. The end of multiplication is at 87600 hours or 10 year which is the device life cycle.

$$[1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} S_0 & S_1 & S_2 \\ 1 - \lambda^{DD} - \lambda^{DU} & \lambda^{DD} & PTC * \lambda^{DU} \\ \mu_0 & 1 - \mu_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

From Equation (1), The PFD(t) can be easily calculated by summing S_1 and S_2 in each discrete time (each 1 hour) and PFD_{avg} can be calculated as follow Equation (2).

$$PFD_{avg} = \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} PFD(t) dt \quad (2)$$

PFD_{avg} is average Probability of Failure on Demand

According to this information, Figure 2 shows the PFD_{avg} and $PFD(t)$ of perfect proof test (PTC is 100%) but it is quite unrealistic to assume that inspection and testing processes will detect all dangerous undetected failures (7). The suggested proof test from manufacturer will detect 94% of possible λ^{DU} (PTC is 94%). According to this imperfect proof test, the PFD_{avg} and $PFD(t)$ are shown in Figure 3.

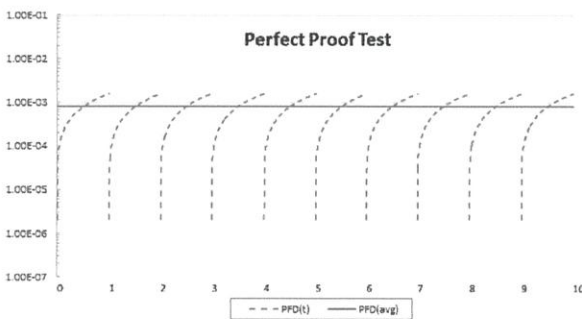


Fig. 2. PFD_{avg} and $PFD(t)$ from the perfect proof test

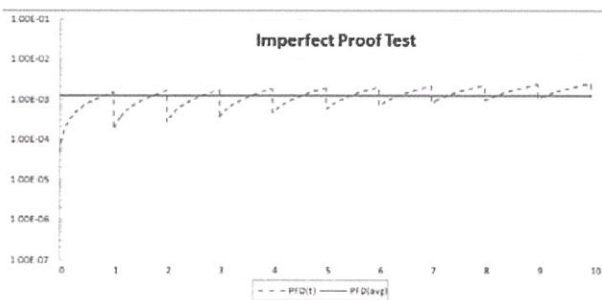


Fig. 3. PFD_{avg} and $PFD(t)$ from the imperfect proof test

From the Figure 3, It shows that the $PFD(t)$ is increasing every year along the life cycle of device. The comparison of PFD_{avg} between perfect proof test and imperfect proof test in Figure 2 and Figure 3 respectively shows that the PFD_{avg} achieving from imperfect proof test is higher than perfect proof test.

3. ALARP evaluation method

In fact that the test cost occurs during device proof test, high frequently of testing along the device life cycle increases the cost while decreases the PFD_{avg} value or risk of device.

To evaluate the justification of additional test cost and benefit achieving from decreased risk or PFD_{avg} whether it is justified or not, the ALARP method which is the demonstrable process whereby “a risk is reduced so low that any further risk reduction would involve time, trouble, difficulty and cost which are grossly disproportionate to the additional risk reduction achieved.” (8) is utilized. This method can be used when SIL or SIF is derived from the economic risks only.

The ALARP evaluation is done as follows. See also Figure 4:

- 1) Design each of the various alternative designs. This paper considers only 1ool sensing device.
- 2) Establish for each design the required test intervals. The proof test method from manufacturer is considered and the proof test interval is varied from every 1 year, 2 years, 3 years until 10 years along the device life cycle.
- 3) Do the ALARP evaluation for each improvement step and confirm the selection.

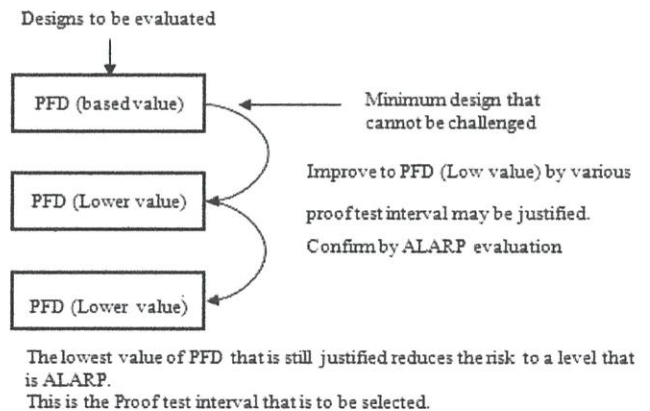


Fig. 4. ALARP evaluation method

To find the ALARP point, the comparison between PFD_{avg} and Life Cycle Cost (LCC) of device is considered. The LCC of device is the summation of investment cost of device (including purchase, design and installation) and annual cost (test cost). The annual cost shall be considered in term of present value (PV) at fixed interval by using basic financial which is mentioned by Hary L. Cheddie and

Paul Grunh (9). The PV can be calculated as follow.

$$PV = M \frac{1 - [1+R]^{-N}}{R} \quad (3)$$

Where M is Annual cost (test cost)
R is Interest rate (estimated 5%)
N is Life cycle of device (10 years)

In this paper, the case study from (6) is taken into account. The information estimates the test cost per event of device equals 150 USD and investment cost of device including purchase, design and installation equals 4,000 USD.

To verify the ALARP point, the Return on Average Capital Employed (ROACE) is utilized to verify whether the benefits are proportionate to additional investment cost or not. The ROACE Equation (4) is expressed as a percentage (%) and the parameters for calculating the ROACE is shown in Table 2.

$$ROACE = \frac{Benefits - Depreciation - Additional OPEX - New risk}{Additional Investment this alternative} \quad (4)$$

Note: Additional OPEX (Operational Expenditure) is the Test Cost (in case there is different number of device in two designs) and repair cost.

$$ROACE \geq ROACE_{target} \quad (5)$$

where $ROACE_{target}$ is the specified minimum ROACE to justify an investment (typically taken from 15 % to 20 %).

The Equation (4) will be achieved when the number of device in two designs are different. If the two designs are identical where the number of device in this alternative design and lower alternative design are equality, the term “Additional Investment this alternative” is zero. In this case, the ROACE cannot be calculated (8).

This paper considers only one sensing device and the alternative design is different by proof test interval. Only test cost of sensing device is taken into account and the term of “additional OPEX” and “new risk” will be neglected. Therefore, the “Additional Investment this alternative” in Equation (4) will be replaced by “Additional test cost this alternative”. The following Equation (6) is considered in this paper.

$$ROACE = \frac{Benefits - Depreciation}{Additional test cost this alternative} \quad (6)$$

Table 2. The Parameters for calculating the ROACE

Item	Descriptions
1. Equivalent Consequence	For personal safety and environmental consequences, the equivalent monetary consequences shall be used. The equivalent money consequences are the logarithmic average of the value of the lower and upper category limit of the equivalent ‘production loss and equipment damage category. Logarithmic average is here defined as: $y = 10^{\frac{(\log X_1 + \log X_2)}{2}}$
2. Demand Interval	is the logarithmic average of the lower and upper limit of the selected demand rate category.
3. Initial Risk	is the risk without any safety function implemented. It is calculated as: $Initial Risk = \frac{Total Equivalent Consequences}{Demand Interval}$
4. Risk Reduction	The Risk reduction offered by the “lower alternative” is the $PF_{D_{avg}}$ of the “lower Alternative” proof test interval. The Risk reduction of the alternative under study is the $PF_{D_{avg}}$ of “this alternative” proof test interval.
5. Benefits	are calculated as: $Benefits = (PF_{D_{lower alternative}} - PF_{D_{this alternative}}) \times Initial Risk$
6. Depreciation per year	is calculated as: $Depreciation per year = \frac{Additional investment this alternative}{Depreciation Period}$ In this paper considers as following; $Depreciation per year = \frac{Additional test cost this alternative}{Depreciation Period}$
7. Test Costs	is the test cost per event (USD).
8. Repair Costs	is the repair cost (USD per hour) (do not consider in this paper)
9. Additional test cost	is different test cost between “lower alternative” and “this alternative”
10. New Risk (Spurious Trip Costs)	is the additional cost due to spurious trips by “this alternative” design (do not consider in this paper).

The case study from (6) which determines SIL of the SIF by using the Risk Graph method is considered. The result from this case study is the demand rate (interval between demands) equals 1 year to 10 years, the economic

consequence equals 1 million USD which is in category L_3 , there is slight effect of environmental consequence which is in category E_1 and there is no personal injury or health effect which is in category C_0 . From Table 2, the total equivalent consequence which is summation of economic, personal health and environmental consequence equals 319706.27, the demand rate equals 3.16. From both parameters, the initial risk can be calculated. Therefore, the initial risk equals 101100.

4. Experimental Result

To determine the ALARP point, the PFD_{avg} and Life Cycle Cost (LCC) of each proof test interval shall be calculated then the comparison between these parameters is plotted into the graph and the ALARP point will be verified by ROACE whether the benefits are proportionate to additional test cost or not. The ALARP point can be determined by the following step.

4.1 PFD_{avg} and Life Cycle Cost (LCC) calculation

The PFD value can be calculated by Equation (1, 2). The LCC can be calculated by investment cost and test cost Equation (3). The results of these calculations are shown in Table 3 and the Figure 5 is the comparison graph between PFD_{avg} and LCC of each proof test interval.

Table 3. PFD_{avg} and Life Cycle Cost (LCC)

Proof test interval (Ti)	PFD_{avg}	Life Cycle Cost (USD)
Ti = 1	1.21E-03	15,583
Ti = 2	1.83E-03	9,791
Ti = 3	2.36E-03	7,861
Ti = 4	2.88E-03	6,896
Ti = 5	3.81E-03	6,317
Ti = 6	3.94E-03	5,930
Ti = 7	4.34E-03	5,655
Ti = 8	5.01E-03	5,448
Ti = 9	5.95E-03	5,287
Ti = 10	7.13E-03	5,158

The Figure 5 shows that the high frequency of proof test along the device life cycle increases LCC while decreases the risk or PFD_{avg} . The intersection between $Ti=3$ and $Ti=4$ is the ALARP point.

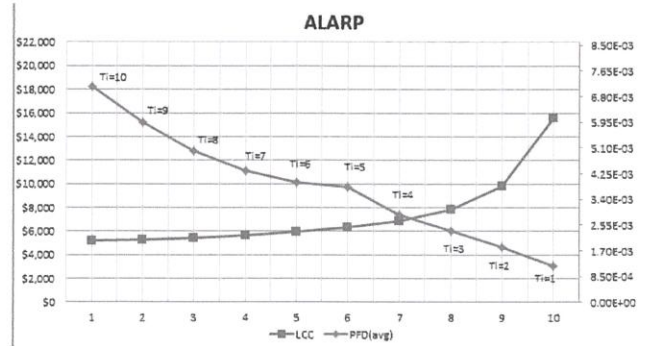


Fig. 5. Comparison Graph between PFD_{avg} and LCC

The risk reduction from $Ti=10$ to $Ti=4$ is proportionate to the investment cost but risk reduction from $Ti=3$ to $Ti=1$ is not proportionate to investment cost because risk reduction which is minor comparing with high LCC. Therefore, the selected proof test interval which is justified is $Ti=4$.

4.2 ROACE calculation for verifying ALARP

To verify whether the selected proof test interval ($Ti=4$) can reduce the risk or PFD_{avg} to the ALARP point, ROACE method is utilized.

Table 4. PFD_{avg} , Proof test frequency and Test cost

Proof test interval (Ti)	Proof test frequency per life cycle of device (Time)	Test cost (USD)
Ti = 1	10.0	1,500
Ti = 2	5.0	750
Ti = 3	3.3	500
Ti = 4	2.5	375
Ti = 5	2.0	300
Ti = 6	1.7	250
Ti = 7	1.4	214
Ti = 8	1.3	188
Ti = 9	1.1	167
Ti = 10	1.0	150

The Table 4 shows proof test interval, proof test frequency along the device life cycle and test cost. The ROACE calculation in Table 2 is done as follows.

- 1) Equivalent Consequence and Demand interval are calculated from the information from (6)
- 2) Calculate the Initial Risk from item 3
- 3) Calculate the Benefits from the item 5
- 4) Calculate the additional test cost from item 9 and Table 4

5) Calculate the Depreciation from the item 6

The comparison of respective proof test interval and ROACE value calculated from these steps are shown in Table 5.

Table 5. Comparison of proof test interval and ROACE

Comparison of respective proof test interval	Benefits	Additional test cost (USD)	Depreciation	ROACE (%)
Ti = 1 and Ti = 2	63.15	750.00	75.00	-1.58%
Ti = 2 and Ti = 3	53.15	250.00	25.00	11.26%
Ti = 3 and Ti = 4	53.18	125.00	12.50	32.54%
Ti = 4 and Ti = 5	93.86	75.00	7.50	115.15%
Ti = 5 and Ti = 6	13.16	50.00	5.00	16.31%
Ti = 6 and Ti = 7	40.30	35.71	3.57	102.85%
Ti = 7 and Ti = 8	67.61	26.79	2.68	242.42%
Ti = 8 and Ti = 9	95.09	20.83	2.08	446.44%
Ti = 9 and Ti = 10	119.68	16.67	1.67	708.08%

According to Equation (5), the selected proof test interval will be justified when $ROACE \geq ROACE_{target}$ where minimum $ROACE_{target}$ is 15%. Therefore, the selected proof test interval which is justified is $Ti=4$ (proof test 2.5 times per device life cycle).

5. Conclusion

This paper focuses only on 1ool sensing device. The PFD_{avg} of sensing device is calculated by simplified Markov model. The different proof test interval is taken into account in this study and this factor significantly impacts on the risk or PFD_{avg} value. The risk or PFD_{avg} can be reduced by increasing proof test interval. In this case, the test cost occurs when proof test of device is performed.

To demonstrate that the increased test cost is proportionate to risk reduction or decreased PFD_{avg} , the ALARP method is a tool for determining that the selected proof test is justified and this method can only be used when SIL of SIF is derived from the economic risks.

The optimized proof test interval of sensing device in this paper is $Ti=4$ which is done by proof testing 2.5 times per device life cycle and the PFD_{avg} of this proof test interval is $2.88E-03$.

Finally, the PFD_{avg} , ALARP calculation method and proof test interval selection in this paper can also be used for final element which is the one of three parts in Safety Instrumented System (SIS).

References

- (1) IEC-61511 : “Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector”, Inter-national Electrotechnical Commission, 2003
- (2) IEC-61508 : “Functional safety of electrical / electronic / programmable electronic safety-related systems”, International Electrotechnical Commission, 2000
- (3) Walid MECHRI, Christophe SIMON, Frdrique BICKING and Kamel BEN OTHMAN : “Probability of Failure on Demand of safety systems by Multiphase Markov Chains”, Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol), pp. 98-103, 2013
- (4) Bukowski J.V and Iwan van Beurden : “Impact of Proof Test Effectiveness on Safety Instrumented System Performance”, Reliability and Maintainability Symposium, pp. 157-163, 2009
- (5) Teerawat Thepmanee and Pornpatchara Khamkoon “SIL Assessment and implementation case study: A safety instrumented function for overpressure protection in a two – phase gas – liquid separator”, ICIC Express Letters Part B: Applications Volume 5, Number 1, February 2014, pp. 45 – 50.
- (6) Pornpatchara Khamkoon : “SIL Assessment and Design of Safety Instrumented Function by considering the justification of cost-benefit using ALARP evaluation method”, KMITL-2014-EN-M-257-26
- (7) William M. Goble and Harry L. Cheddie : “Safety Instrumented Systems Verification: Practical Probabilistic Calculations”, ISA, 2005
- (8) Shell GSI : “Classification and Implementation of Instrumented Protective Functions”, DEP 32.80.10.10 – Gen (Shell Standard), 2010
- (9) Harry L. Cheddie and Paul Gruhn : “Safety Instrumented System: Design, Analysis, and Justification”, 2nd Edition ,ISA, 2002

ภาคผนวก ข

ตารางค่าอัตราความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์วัดคุนิรภัย

ค่าอัตราความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์วัดคุมনিรภัย

ค่าอัตราความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์วัดคุมনিรภัย ซึ่งแสดงในตารางที่ ข1 เป็นค่าที่นำมาจากฐานข้อมูลของโปรแกรมคำนวณหาค่าความปลอดภัยของบริษัทแห่งหนึ่ง ซึ่งมีการบันทึกเก็บเป็นประวัติของอุปกรณ์แต่ละชนิดและเป็นค่าที่ยอมรับในระดับสากล

ตารางที่ ข1 ตารางค่าอัตราความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์วัดคุมনিรภัย

หมายเลขอุปกรณ์	รายละเอียดของอุปกรณ์	ชนิดของอุปกรณ์	อัตราความผิดพลาดอันตราย (λ_D) (ครั้งต่อชม.)
LZA-703A	E – 8672 Level	Level dP Smart Transmitter	3.48E-06
LZA-703B	E – 8672 Level	Level dP Smart Transmitter	3.48E-06
LZA-703C	E – 8672 Level	Level dP Smart Transmitter	3.48E-06
LZA-706A	C-8671 Level	Level dP Smart Transmitter	3.48E-06
LZA-706B	C-8671 Level	Level dP Smart Transmitter	3.48E-06
TZA-705A	R-8671 Tailed Gas to E-8672 Temperature	Temperature Transmitter	2.66E-06
TZA-705B	R-8671 Tailed Gas to E-8672 Temperature	Temperature Transmitter	2.66E-06
UZ-701	High Pressure Steam Header to E – 8676 TSOV	ESD Valve (Ball On/Off)	5.35E-06
UZ-714	E – 8676 Saturated Steam Supply TSOV	ESD Valve (Ball On/Off)	5.35E-06
UZ-711	Hydrogen Feed Gas to R-8671 TSOV	ESD Valve (Ball On/Off)	5.35E-06
FV-704	Hydrogen Feed Gas to R-8671 Valve	ESD Valve (Ball On/Off)	3.89E-06
P-8671A	P – 8671A Stop Signal	Contact	1.66E-07
P-8671B	P – 8671B Stop Signal	Contact	1.66E-07
IPS-700	Logic Solver	Safety PLC	3.23E-08

หมายเหตุ

- อัตราการตรวจจับความผิดพลาดของ Transmitter (Diagnostic Coverage Factor , DCF) มีค่าเท่ากับ 85% และค่า Proof Test Coverage (C_{PT}) มีค่าเท่ากับ 90%
- ค่า C_{PT} ของการทำ Partial Stroke Test ของวาล์วนิรภัยมีค่าเท่ากับ 70%
- ค่าความผิดพลาดรวมของอุปกรณ์ (β) มีค่าเท่ากับ 0.05
- MTTR หรือ Repair Time ของอุปกรณ์การวัดมีค่าเท่ากับ 8 ชั่วโมง
- Life Time ของอุปกรณ์ มีค่าเท่ากับ 10 ปี หรือ 87600 ชั่วโมง

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายธนกฤต โพธิ์ธีรบุตร
วัน เดือน ปีเกิด	18 ตุลาคม 2528 ที่จังหวัดกาญจนบุรี
ที่อยู่	99/770 หมู่ 1 หมู่บ้านชลลดาสุวรรณภูมิ ต.ศิระจรเข้ชั้น้อย อ.บางเสาธง จ.สมุทรปราการ 10540 โทร. 084-634-7232
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 2) สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2550
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ.2551-ปัจจุบัน	ตำแหน่งวิศวกรด้านเครื่องมือวัดและระบบควบคุม บริษัท ทีทีซีแอล จำกัด (มหาชน)