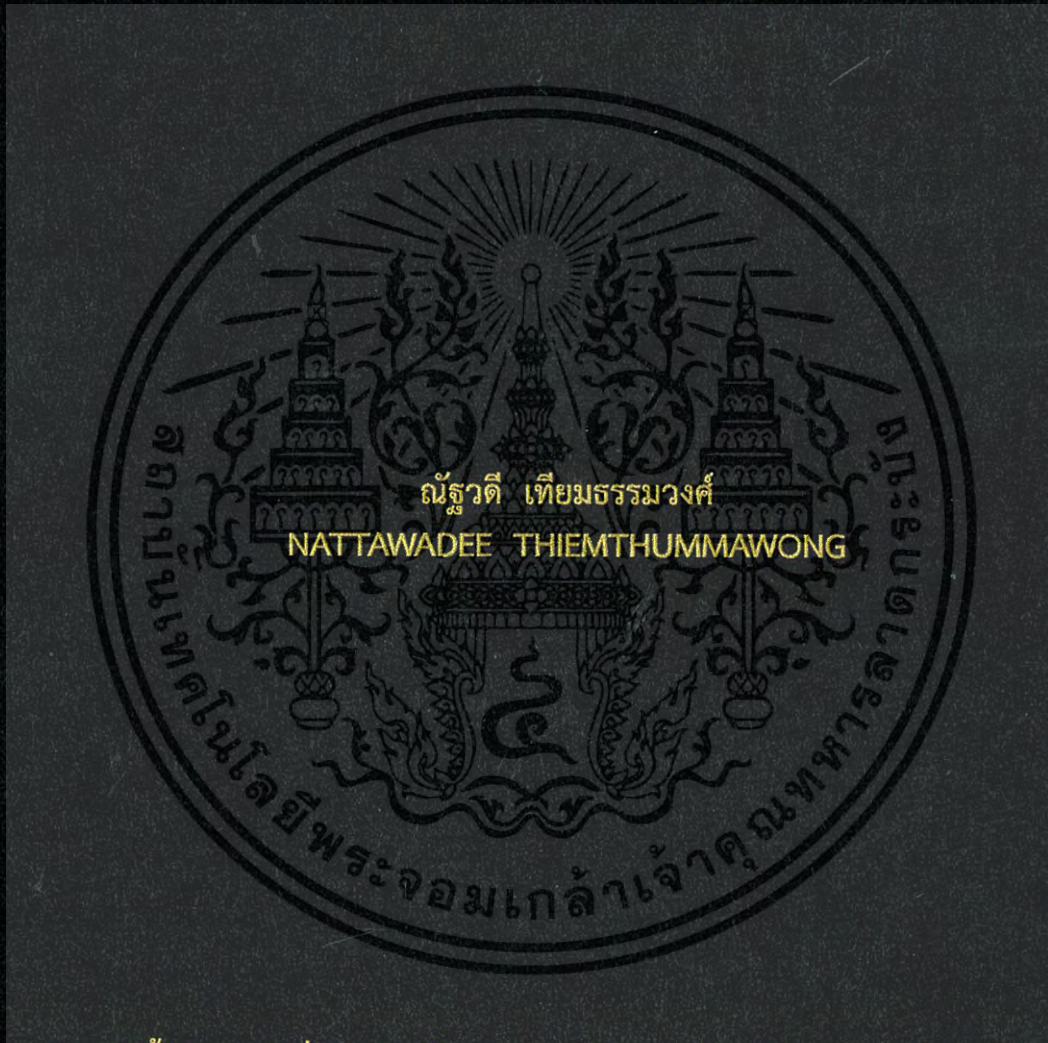


การตรวจสอบค่า  $PFD_{avg}$  ของฟังก์ชันนิรภัยที่มีเงื่อนไขการทำงาน  
โดยใช้เซตส่วนตัดขั้นต่ำ

$PFD_{avg}$  VERIFICATION OF THE CONDITIONAL SAFETY FUNCTION  
BASED ON MINIMAL CUT SET



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-060-095

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การตรวจสอบค่า  $PFD_{avg}$  ของฟังก์ชันนิรภัยที่มีเงื่อนไขการทำงาน

โดยใช้เซตส่วนตัดขั้นต่ำ

$PFD_{avg}$  VERIFICATION OF THE CONDITIONAL SAFETY FUNCTION

BASED ON MINIMAL CUT SET



T148674



เลขหนังสือ: 148674  
ต.ช.ทะเบียน: 148674  
ในเดือน.ปี: 14 พ.ย. 2560

บ. 002669/8  
ป. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-060-095

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PFD<sub>avg</sub> VERIFICATION OF THE CONDITIONAL SAFETY FUNCTION  
BASED ON MINIMAL CUT SET



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENT ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2017  
KMITL-2017-EN-M-060-095

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017






FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การตรวจสอบค่า  $PFD_{avg}$  ของฟังก์ชันนิรภัยที่มีเงื่อนไขการทำงานโดยใช้เซตส่วนตัดขั้นต่ำต่ำ  
Thesis Title  $PFD_{avg}$  Verification of the Conditional Safety Function based on Minimal Cut Set  
นักศึกษา นางสาวณัฐวดี เทียมธรรมวงศ์  
รหัสประจำตัว 58601297  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.อาจินต์ น่วมสำราญ  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-060-095

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.เสถียร	ธัญญศรีรัตน์	
รศ.ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	
รศ.วิริยะ	กองรัตน์	
รศ.ดร.สุพรรณ	กุลพานิชย์	
รศ.อาจินต์	น่วมสำราญ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 09.00-11.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ในวันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2560  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Thesis Title	PFD <sub>avg</sub> Verification of the Conditional Safety Function based on Minimal Cut Set
Student	Miss Nattawadee Thiemthummawong
Student ID.	58601297
Degree	Master of Engineering
Program	Instrument Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Arjin Numsomran

### ABSTRACT

A thesis presents verification method for average probability of dangerous failure on demand or PFD<sub>avg</sub> which play a key role in reliability and safety of SIS. However, in the previous studies, PFD<sub>avg</sub> verification has a limitation to apply with conditional safety function and the studies result calculates the estimated PFD<sub>avg</sub> value that is not a realistic value due to the error of conditional analysis. Therefore, this thesis presents the PFD<sub>avg</sub> calculation which complies with IEC 61508-6 and cover safety condition by using minimal cut set that is determined by each requirement of safety instrumented function. So the proposed new method can be applied with all architectures of the safety function. In conclusion, this developed method provides the solution for the conditional safety function problems and gives more accuracy PFD<sub>avg</sub> value than the other methods.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.อาจันต์ น่วมสำราญ ที่ให้คำแนะนำด้านการทำงานวิจัยและแนวทางในการแก้ไขปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์อันดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ คุณทิวช ชูเมือง ที่ให้ความรู้ด้านการออกแบบเชิงวิศวกรรมของระบบการวัดและควบคุม รวมไปถึงเรื่องระดับความปลอดภัย (Safety integrity level) ซึ่งเป็นแรงบันดาลใจนำมาสู่การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ อีกทั้งยังให้คำแนะนำ ข้อมูล และข้อชี้แนะต่างๆจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ รศ.ดร. วิทยา ทิพย์สุวรรณพร ที่ให้ความช่วยเหลือด้านข้อมูลและการประสานงานกับหน่วยงานต่างๆ พร้อมทั้งให้คำปรึกษาด้านการจัดทำและเรียบเรียงวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ บริษัท พีทีที เมนเทนแนนซ์ แอนด์ เอนจิเนียริง จำกัด ที่ให้ความสนับสนุนในด้านสถานที่และอุปกรณ์ในการศึกษาวิจัย

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่บิดามารดาซึ่งเป็นที่รักและกำลังใจสำคัญในการฟันฝ่าอุปสรรค ตลอดจนครูบาอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ณัฐวดี เทียมธรรมวงศ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VII
สารบัญรูป .....	VIII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	4
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	5
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ .....	5
1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา .....	5
1.7 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์ .....	8
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	9
2.1 มาตรฐาน IEC 61508-6 .....	9
2.1.1 สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ .....	11
2.1.2 ค่า PFD <sub>avg</sub> ของการจัดวางแบบพื้นฐานที่มีการทำงานแบบโหมดความ ต้องการต่ำ .....	12
2.1.2.1 การจัดวางแบบ 1oo1 .....	12
2.1.2.2 การจัดวางแบบ 1oo2 .....	14
2.1.2.3 การจัดวางแบบ 2oo2 .....	15
2.1.2.4 การจัดวางแบบ 1oo3 .....	15
2.1.2.5 การจัดวางแบบ 2oo3 .....	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2 สูตรทั่วไปของ $PFD_{avg}$ สำหรับการจัดวางแบบ KooN .....	18
2.2.1 การวิเคราะห์พื้นฐาน .....	18
2.2.1.1 ความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งาน .....	19
2.2.2 $PFD_{avg}$ สำหรับความผิดพลาดที่ไม่สามารถตรวจจับในระบบ KooN .....	21
2.2.3 รูปแบบการลดชั้นของระบบ .....	22
2.2.4 การพิจารณาผลกระทบของการซ่อมแซมและการตรวจจับความผิดพลาด .....	25
2.2.5 การพิจารณาความผิดพลาดร่วมและการสรุปสูตรทั่วไป .....	27
2.3 วิธีการวิเคราะห์ค่า $PFD_{avg}$ ด้วยบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือ .....	28
2.3.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์ค่า $PFD_{avg}$ โดยใช้บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือ .....	29
2.4 การวิเคราะห์เซตส่วนตัด .....	33
บทที่ 3 การออกแบบและการทดลอง .....	36
3.1 การวิเคราะห์ $PFD_{avg}$ สำหรับการจัดวางแบบ 1ooM .....	36
3.1.1 ความผิดพลาดอิสระของการจัดวางแบบ 1ooM .....	37
3.2 การวิเคราะห์การจัดวางแบบ KooN .....	38
3.2.1 การจัดวางแบบ 1oo1 .....	39
3.2.2 การจัดวางแบบ 1oo2 .....	40
3.2.3 การจัดวางแบบ 2oo2 .....	41
3.2.4 การจัดวางแบบ 1oo3 .....	41
3.2.5 การจัดวางแบบ 2oo3 .....	42
3.3 การวิเคราะห์กรณีศึกษาที่มีเงื่อนไขการทำงาน .....	44
3.3.1 กรณีศึกษาที่ 1: ระบบการตัดแหล่งให้ความร้อนของเครื่องต้มข้าว .....	44
3.3.2 กรณีศึกษาที่ 2: ระบบป้องกันความดันเกินในหลุมก๊าซธรรมชาติ .....	46
บทที่ 4 การอภิปรายผลการทดลอง .....	49
4.1 รูปแบบการจัดวางแบบพื้นฐาน .....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 กรณีศึกษาที่มีเงื่อนไขการทำงาน .....	53
4.2.1 กรณีศึกษาที่ 1: ระบบการตัดแหล่งให้ความร้อนของเครื่องต้มข้าว .....	53
4.2.2 กรณีศึกษาที่ 2: ระบบป้องกันความดันเกินในหลุมก๊าซธรรมชาติ .....	56
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	60
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	60
5.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อ .....	61
เอกสารอ้างอิง .....	62
ภาคผนวก .....	64
ภาคผนวก ก ตารางฟังก์ชันความน่าเชื่อถือของการจัดเรียงอุปกรณ์แบบซ้ำซ้อน .....	65
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ $PFD_{avg}$ ของกรณีศึกษาโดยการใช้สูตรทั่วไป KooN .....	67
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ $PFD_{avg}$ ของกรณีศึกษาโดยการใช้วิธีการ บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือ .....	70
ภาคผนวก ง ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์ .....	73
ประวัติผู้เขียน .....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความปลอดภัยกับค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานตามโหมดความต้องการต่ำ .....	2
1.2 เทอมและความหมาย .....	7
2.1 สูตรสำหรับคำนวณค่า $PFD_{avg}$ ของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบพื้นฐานตามมาตรฐาน IEC 61508-6 .....	17
2.2 ค่า $PFD_{avg}$ ของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ KooN .....	21
2.3 อัตราความผิดพลาดอันตรายและสัดส่วนอัตราความผิดพลาดร่วมของ BOP .....	31
2.4 เขตส่วนตัดและเขตส่วนตัดชั้นของรูปแบบการจัดวางพื้นฐาน .....	34
3.1 เขตส่วนตัดและเขตส่วนตัดชั้นต่ำของ 1o01 .....	39
3.2 เขตส่วนตัดและเขตส่วนตัดชั้นต่ำของ 1o02 .....	40
3.3 เขตส่วนตัดและเขตส่วนตัดชั้นต่ำของ 2o02 .....	41
3.4 เขตส่วนตัดและเขตส่วนตัดชั้นต่ำของ 1o03 .....	42
3.5 เขตส่วนตัดและเขตส่วนตัดชั้นต่ำของ 2o03 .....	43
3.6 เขตส่วนตัดและเขตส่วนตัดชั้นต่ำของกลุ่มวาล์วนิรภัย .....	45
3.7 เขตส่วนตัดและเขตส่วนตัดชั้นต่ำของกลุ่มวาล์ว .....	47
4.1 การเปรียบเทียบค่า $PFD_{avg}$ เซึ่งสมการของการจัดวางแบบพื้นฐาน .....	49
4.2 การเปรียบเทียบค่า $PFD_{avg}$ เซึ่งตัวเลขของการจัดวางแบบพื้นฐาน .....	50
4.3 การเปรียบเทียบค่า $PFD_{avg}$ เซึ่งสมการของกลุ่มวาล์วนิรภัย .....	54
4.4 การเปรียบเทียบค่า $PFD_{avg}$ เซึ่งตัวเลขของกลุ่มวาล์วนิรภัย .....	54
4.5 การเปรียบเทียบค่า $PFD_{IND}$ $PFD_{CCF}$ และ $PFD_{avg}$ เซึ่งตัวเลขของกลุ่มวาล์วนิรภัย .....	55
4.6 การเปรียบเทียบค่า $PFD_{avg}$ เซึ่งสมการของกลุ่มวาล์วในฟังก์ชันนิรภัยที่สอง .....	56
4.7 การเปรียบเทียบค่า $PFD_{avg}$ เซึ่งตัวเลขของกลุ่มวาล์วในฟังก์ชันนิรภัยที่สอง .....	57
4.8 การเปรียบเทียบค่า $PFD_{IND}$ $PFD_{CCF}$ และ $PFD_{avg}$ เซึ่งตัวเลขของกลุ่มวาล์ว .....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ระดับของการป้องกันในกระบวนการ .....	1
1.2 ส่วนประกอบของฟังก์ชันนิรภัย .....	3
2.1 สาเหตุของการความผิดพลาดกับระบบวัดคัมมิรภัย .....	9
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐาน IEC 61508 และ IEC 61511 .....	10
2.3 บล็อกไดอะแกรมเชิงกายภาพของการจัดวางแบบ 1๐๐1 .....	12
2.4 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของการจัดวางแบบ 1๐๐1 .....	13
2.5 บล็อกไดอะแกรมเชิงกายภาพของการจัดวางแบบ 1๐๐2 .....	14
2.6 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของการจัดวางแบบ 1๐๐2 .....	14
2.7 บล็อกไดอะแกรมเชิงกายภาพของการจัดวางแบบ 2๐๐2 .....	15
2.8 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของการจัดวางแบบ 2๐๐2 .....	15
2.9 บล็อกไดอะแกรมเชิงกายภาพของการจัดวางแบบ 1๐๐3 .....	15
2.10 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของการจัดวางแบบ 1๐๐3 .....	16
2.11 บล็อกไดอะแกรมเชิงกายภาพของการจัดวางแบบ 2๐๐3 .....	17
2.12 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของการจัดวางแบบ 2๐๐3 .....	17
2.13 สถานะการทำงานของอุปกรณ์ที่ขึ้นตรงกับความปลอดภัยอันตรายที่ตรวจจับไม่ได้ .....	19
2.14 ฟังก์ชันความไม่พร้อมใช้งานของอุปกรณ์ที่มีการทดสอบเป็นคาบ .....	19
2.15 การลดชั้นของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ KooN .....	23
2.16 เวลาเฉลี่ยหลังเกิดความผิดพลาดครั้งที่ i เมื่อพิจารณาการทดสอบและซ่อมแซม .....	25
2.17 การประยุกต์ใช้บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือ .....	29
2.18 โครงสร้างการทำงานของตัวป้องกันการระเบิดได้ทะเล .....	30
2.19 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของฟังก์ชัน AVPR .....	31
2.20 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของฟังก์ชัน BSR .....	31
2.21 วงจรไฟฟ้าที่มีการจัดวางแบบ 2๐๐3 .....	33
3.1 การลดชั้นของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ 1๐๐M .....	37
3.2 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของการจัดวางแบบ 1๐๐1 .....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

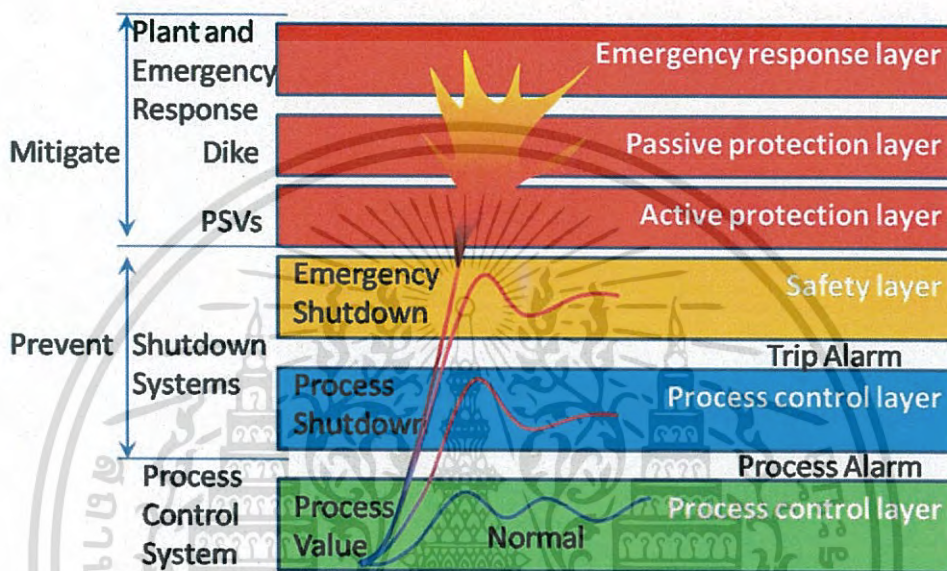
รูปที่	หน้า
3.3 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของการจัดวางแบบ 1๐๐2 .....	40
3.4 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของการจัดวางแบบ 2๐๐2 .....	41
3.5 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของการจัดวางแบบ 1๐๐3 .....	42
3.6 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของการจัดวางแบบ 2๐๐3 .....	43
3.7 ระบบการตัดแหล่งให้ความร้อนของเครื่องต้มข้า .....	44
3.8 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของกลุ่มวาล์วนิรภัย .....	45
3.9 ระบบป้องกันความดันเกินในหลุมก๊าซธรรมชาติ .....	46
3.10 การทำงานของกลุ่มวาล์วในฟังก์ชันนิรภัยที่สอง .....	47
3.11 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของกลุ่มวาล์ว .....	48
4.1 การเปรียบเทียบค่า $PFD_{avg}$ เซึ่งตัวเลขของการจัดวางแบบ 1๐๐1 .....	51
4.2 การเปรียบเทียบค่า $PFD_{avg}$ เซึ่งตัวเลขของการจัดวางแบบ 1๐๐2 .....	51
4.3 การเปรียบเทียบค่า $PFD_{avg}$ เซึ่งตัวเลขของการจัดวางแบบ 2๐๐2 .....	52
4.4 การเปรียบเทียบค่า $PFD_{avg}$ เซึ่งตัวเลขของการจัดวางแบบ 1๐๐3 .....	52
4.5 การเปรียบเทียบค่า $PFD_{avg}$ เซึ่งตัวเลขของการจัดวางแบบ 2๐๐3 .....	52
4.6 การเปรียบเทียบค่า $PFD_{avg}$ เซึ่งตัวเลขของกลุ่มวาล์วนิรภัย .....	54
4.7 การเปรียบเทียบค่า $PFD_{avg}$ เซึ่งตัวเลขของกลุ่มวาล์วในฟังก์ชันที่สองกรณีที่ 1 .....	58
4.8 การเปรียบเทียบค่า $PFD_{avg}$ เซึ่งตัวเลขของกลุ่มวาล์วในฟังก์ชันที่สองกรณีที่ 2 .....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ IX ษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา



รูปที่ 1.1 ระดับของการป้องกันในกระบวนการ

การทำงานของกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมมักต้องแบกรับความเสี่ยงในเรื่องของสุขภาพ ทรัพย์สิน และสิ่งแวดล้อมที่ติดตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเงื่อนไขกระบวนการผลิตที่มีความรุนแรง ความอันตรายของสารวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ หรือความผิดพลาดของอุปกรณ์ และการปฏิบัติงาน โดยเหตุการณ์อันตรายที่เกิดขึ้นนี้สามารถส่งผลกระทบได้ตั้งแต่การซ่อมแซม อุปกรณ์เล็กน้อยไปจนถึงการสูญเสียชีวิตของบุคลากรจำนวนมากที่ไม่อาจประเมินมูลค่าได้ ดังนั้นมาตรการป้องกันและบรรเทาเหตุการณ์อันตรายจึงมีความจำเป็นอย่างมากต่อกระบวนการการผลิต ระบบวัดคุมเป็นอีกมาตรการหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ทั้งในทางป้องกันและบรรเทา ซึ่งเมื่อกระบวนการไม่เป็นไปตามเงื่อนไขการทำงานปกติ (Normal operating) ส่วนป้องกันชั้นแรกของระบบวัดคุมนั้นคือการแจ้งเตือนโดยสัญญาณเตือนภัย (Alarm) และระบบอินเตอร์ลอค (Interlock) ที่ทำงานอัตโนมัติบนระบบควบคุมกระบวนการพื้นฐาน (Basic process control system – BPCS) แต่ถ้การป้องกันในชั้นหนึ่งเกิดความผิดพลาดหรือไม่สามารถควบคุมกระบวนการให้กลับสู่สภาวะปกติได้ และยังแนวโน้มความเสี่ยงเพิ่มสูงขึ้น การปิดฉุกเฉิน (Emergency shutdown) ที่ทำงานบนระบบวัดคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิรภัย (Safety instrumented system – SIS) จะทำหน้าที่ในการป้องกันขั้นสุดท้ายก่อนจะเกิดเหตุการณ์อันตรายด้วยการหยุดกระบวนการผลิตบางส่วนหรือทั้งหมด ซึ่งขั้นต่อไปจากนี้จะไม่ทำหน้าที่ในการป้องกันแต่จะทำหน้าที่ในการบรรเทาความรุนแรงของเหตุการณ์หรือความเสียหายดังรูปที่ 1.1 [1] ด้วยเหตุนี้ระบบ SIS จึงมีบทบาทสำคัญต่อความน่าเชื่อถือและความปลอดภัยของกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม

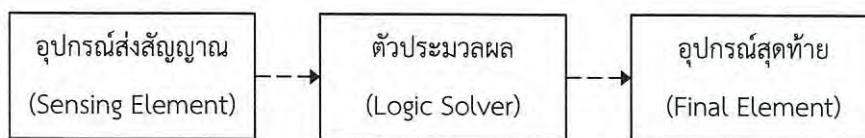
ระบบ SIS ประกอบด้วยฟังก์ชันนิรภัย (Safety instrumented function – SIF) หลายฟังก์ชันที่ทำหน้าที่ในการลดความเสี่ยงของแต่ละส่วนของกระบวนการให้ไปสู่ความปลอดภัยด้วยการทำงานตามเงื่อนไขการปิดฉุกเฉิน แต่เนื่องจากฟังก์ชันนิรภัยสามารถเกิดความผิดพลาดในการทำงานได้เช่นเดียวกับระบบบน BPCS จึงทำให้ไม่สามารถลดความเสี่ยงให้ไปสู่ความปลอดภัยได้ทั้งหมด ความเสี่ยงที่ยอมรับได้ (Tolerable risk) จึงถูกกำหนดและใช้เป็นค่าอ้างอิงในการประเมินความเสี่ยง (Risk assessment) เพื่อหาค่าความเสี่ยงแตกต่างที่เกิดจากการเปรียบเทียบความเสี่ยงจริงของกระบวนการที่ประเมินได้กับค่าอ้างอิง ซึ่งค่าความเสี่ยงแตกต่างนี้คือค่าความเสี่ยงที่ต้องการลดลงเพื่อให้กระบวนการมีระดับความเสี่ยงที่ยอมรับได้โดยใช้ฟังก์ชันนิรภัย ดังนั้นฟังก์ชันนิรภัยจึงต้องมีความน่าเชื่อถือหรือระดับความปลอดภัย (Safety integrity level – SIL) ที่สอดคล้องกับค่าความเสี่ยงที่ต้องการลดลง

ตารางที่ 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความปลอดภัยกับค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานตามโหมดความต้องการต่ำ

ระดับความปลอดภัย (SIL)	ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งาน (PFD <sub>avg</sub> )
4	$\geq 10^{-5}$ ถึง $< 10^{-4}$
3	$\geq 10^{-4}$ ถึง $< 10^{-3}$
2	$\geq 10^{-3}$ ถึง $< 10^{-2}$
1	$\geq 10^{-2}$ ถึง $< 10^{-1}$

ระดับความปลอดภัยหรือค่า SIL บ่งชี้ถึงโอกาสในการทำงานผิดพลาดของฟังก์ชันนิรภัย ซึ่งมักถูกกำหนดในรูปของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งาน (Average probability of dangerous failure on demand – PFD<sub>avg</sub>) ที่ขึ้นกับโหมดการทำงานของระบบนิรภัยตามมาตรฐาน IEC 61508/61511 [2, 3] โหมดการทำงานมีทั้งหมด 2 โหมดคือโหมดความต้องการต่ำ (Low demand mode) และโหมดความต้องการสูง (High demand mode) แต่อย่างไรก็ตามระบบในกระบวนการผลิตทั่วไปมักอยู่ในโหมดความต้องการต่ำเนื่องจากมีความถี่ที่ต้องการใช้งานระบบ SIS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 ส่วนประกอบของฟังก์ชันนิรภัย

น้อยกว่าหนึ่งครั้งต่อปีหรือ 2 เท่าของช่วงเวลาในการทดสอบ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงขอกล่าวถึงเฉพาะการทำงานของระบบ SIS บนโหมตความต้องการต่ำที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่า SIL กับ  $PFD_{avg}$  แสดงดังตารางที่ 1.1 ฟังก์ชันนิรภัยประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วนคืออุปกรณ์ส่งสัญญาณ ตัวประมวลผล และอุปกรณ์สุดท้ายตามรูปที่ 1.2 จึงหมายความว่าค่า SIL ของฟังก์ชันนิรภัยขึ้นอยู่กับค่า  $PFD_{avg}$  ของฟังก์ชันที่เป็นผลมาจากค่า  $PFD_{avg}$  ของแต่ละส่วนซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$PFD_{avg} = PFD_{SE} + PFD_{LS} + PFD_{FE} \quad (1.1)$$

ดังนั้นการเลือกฟังก์ชันนิรภัยให้ตอบสนองต่อค่าความเสี่ยงที่ต้องการลดจึงต้องเลือกจากระดับความปลอดภัยของอุปกรณ์ในแต่ละส่วน ซึ่งอาจทำได้โดยการเลือกอุปกรณ์ที่มีค่า SIL สอดคล้องกับค่าความเสี่ยงนั้น แต่อย่างไรก็ตามในกรณีที่มีความต้องการในการลดความเสี่ยงสูงมาก อุปกรณ์ที่เลือกใช้มักจะตามมาด้วยราคาที่สูงมากหรืออาจไม่มีอุปกรณ์ที่สามารถลดความเสี่ยงนี้ได้เลย ด้วยเหตุนี้การทำงานแบบซ้ำซ้อน (Redundant) จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงค่า SIL ของส่วนประกอบฟังก์ชันนิรภัยให้สูงขึ้น

มาตรฐาน IEC 61508-6 [2] นำเสนอการตรวจสอบค่า SIL ในกลุ่มอุปกรณ์ที่ทำงานแบบซ้ำซ้อนโดยการกำหนดสูตรสำหรับคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ KooN (K out of N) พื้นฐานคือ 1oo1, 1oo2, 1oo3, 2oo2 และ 2oo3 ซึ่งเป็นการจัดวางที่พบได้ทั่วไปในกระบวนการทางอุตสาหกรรม โดยในรูปแบบการจัดวาง (Architecture) ที่นอกเหนือจากนี้ยังมีการนำเสนอด้วยวิธีการอื่นๆ เช่น การวิเคราะห์แขนงความผิดพลาด (Fault tree analysis) [4] และรูปแบบมาร์คอฟ (Markov model) [5] แต่ผลลัพธ์ที่ได้ไม่สอดคล้องกับสูตรตาม IEC 61508-6 [2] และถึงแม้ว่าการใช้การลดระดับของระบบ (System degradation) [6] และสูตรทั่วไปของการจัดวางแบบ KooN [7, 8, 9] ในการคำนวณ  $PFD_{avg}$  จะให้ผลลัพธ์ตรงกับมาตรฐาน แต่ก็ยังไม่สามารถประยุกต์ใช้กับฟังก์ชันที่ไม่สุ่มความผิดพลาด (Nonrandom failure) ได้ ในปี 2011 Catelani et al. [10] ศึกษาขั้นตอนอย่างง่ายในการวิเคราะห์  $PFD_{avg}$  โดยวิธีการนี้สามารถประยุกต์ใช้กับความผิดพลาดแบบไม่สุ่ม แต่สูตรและการประยุกต์ใช้ยังนำเสนอได้ไม่เหมาะสมกับการใช้งานจริง รวมไปถึงวิธีการของ Chung [11] ที่จัดกลุ่มอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกันด้วยบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Reliability block diagram – RBD) แล้วคำนวณ  $PFD_{avg}$  ด้วยสูตรตามมาตรฐาน ซึ่งเทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์ความผิดพลาดแบบไม่สุ่มได้ แต่ยังไม่มีการนำเสนอวิธีการวิเคราะห์ที่ชัดเจนทำให้เกิดความสับสนในการประยุกต์ใช้งาน ด้วยเหตุนี้การตรวจสอบค่า  $PFD_{avg}$  ของการทำงานแบบไม่สุ่มความผิดพลาดจึงยังไม่มีวิธีการที่ให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมและง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน ส่งผลให้ค่า SIL ของกลุ่มอุปกรณ์ที่คำนวณได้นั้นมีค่าสูงหรือต่ำเกินไปกว่าความเป็นจริง โดยอาจมีผลกระทบต่อจำนวนและราคาของอุปกรณ์ในฟังก์ชันนิรภัย รวมไปถึงจนถึงความเสี่ยงต่อความเสียหายของอุปกรณ์ ผู้ปฏิบัติงาน และสิ่งแวดล้อมของโรงงานและพื้นที่โดยรอบ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอถึงการออกแบบวิธีการใหม่สำหรับวิเคราะห์และคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่ทำงานแบบซ้ำซ้อน ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับมาตรฐาน IEC 61508-6 [2] และสามารถวิเคราะห์การทำงานของฟังก์ชันที่ไม่สุ่มการเกิดความผิดพลาดหรือมีเงื่อนไขได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม โดยพิจารณาการวิเคราะห์การทำงานด้วยเซตส่วนตัดขั้นต่ำ (Minimal cut set – MCS) เพื่อได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมกับค่าจริง และเลือกใช้บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือเพื่อให้สามารถแสดงขั้นตอนของวิธีการได้อย่างชัดเจนและง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน วิธีการนี้จะถูกนำมาวิเคราะห์กลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ KooN พื้นฐานที่มีการกำหนดในมาตรฐาน และกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบมีเงื่อนไขในกรณีศึกษา จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีการอื่นและวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างผลลัพธ์ที่ได้เพื่อหาค่า  $PFD_{avg}$  ที่เหมาะสมกับการทำงานจริงของกลุ่มอุปกรณ์

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการวิเคราะห์และคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดเรียงแบบ KooN ที่ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับสูตรตามมาตรฐาน IEC 61508-6 และสามารถวิเคราะห์การทำงานของกลุ่มอุปกรณ์แบบไม่สุ่มความผิดพลาดหรือการทำงานที่มีเงื่อนไขได้ ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมกับการทำงานจริงเมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากวิธีการอื่นๆ อีกทั้งมีขั้นตอนในการวิเคราะห์ที่ชัดเจนและง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบวิธีการวิเคราะห์และคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดเรียงแบบ KooN ที่ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับสูตรตามมาตรฐาน IEC 61508-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ประยุกต์ใช้วิธีการที่พัฒนาขึ้นกับกรณีศึกษาที่มีการทำงานของกลุ่มนอุปกรณ์แบบมีเงื่อนไข และเปรียบเทียบ  $PFD_{avg}$  ที่ได้กับผลลัพธ์จากสูตรพื้นฐาน (IEC 61508-6. 2010), สูตรทั่วไป KooN (Jahanian. 2015) และวิธีการวิเคราะห์ด้วยบล็อกโตอะแกรมความน่าเชื่อถือ (Chung. 2016) ทั้งในเชิงสมการและตัวเลข

3. วิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่าง  $PFD_{avg}$  ที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ กับผลลัพธ์จากวิธีการที่มีการกล่าวถึงในข้อที่ 2

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาวิธีการตรวจสอบค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มนอุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบซ้ำซ้อนที่ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับสูตรตามมาตรฐาน IEC 61508-6 และหาผลลัพธ์เมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับฟังก์ชันนิรภัยที่มีความผิดพลาดแบบไม่สุ่มหรือมีเงื่อนไขการทำงานในกรณีศึกษา

2. ออกแบบวิธีการที่สอดคล้องกับสูตรตามมาตรฐาน IEC 61508-6 และสามารถประยุกต์ใช้กับฟังก์ชันนิรภัยที่มีเงื่อนไขการทำงาน โดยให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมกับการทำงานจริง

3. วิเคราะห์ความเหมาะสมของผลลัพธ์ค่า  $PFD_{avg}$  เมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากวิธีการอื่นทั้งในเชิงสมการและเชิงตัวเลข และวิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้เกิดความเหมือนหรือแตกต่างระหว่างผลลัพธ์

#### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัยคือการค้นพบวิธีการคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มนอุปกรณ์ที่สามารถวิเคราะห์การทำงานตามความจริงโดยให้ผลลัพธ์หรือค่า SIL ที่มีความเหมาะสม ทำให้สามารถเลือกใช้อุปกรณ์ภายในฟังก์ชันนิรภัยที่มีระดับความปลอดภัยตรงกับความเสี่ยงในการเกิดเหตุการณ์อันตรายจริง ซึ่งส่งผลให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีระดับความปลอดภัยมากเกินไปจนเกินกว่าความจำเป็นในกรณีที่มีการคำนวณค่า SIL ที่ต่ำเกินไป และสามารถเพิ่มความปลอดภัยหรือความน่าเชื่อถือภายในโรงงานและบริเวณโดยรอบในกรณีที่มีการคำนวณค่า SIL ที่สูงเกินไป

#### 1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา

ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งาน ( $PFD_{avg}$ ) คือค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์จะไม่ทำงานตามคำสั่งเมื่อถึงเวลาที่ต้องการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับความปลอดภัย (SIL) คือระดับที่บ่งชี้ถึงความเสี่ยงของโรงงาน หรือบ่งชี้ถึงความปลอดภัยของอุปกรณ์ กลุ่มอุปกรณ์ หรือฟังก์ชันนิรภัย โดยแบ่งออกเป็น SIL 0 ถึง SIL 4 ยิ่งมีค่ามากหมายถึงความเสี่ยงของโรงงานหรือความปลอดภัยของอุปกรณ์จะยิ่งมาก

ระบบควบคุมนิรภัย (SIS) คือระบบขั้นสุดท้ายที่ใช้ในการป้องกันการเกิดเหตุการณ์อันตรายขึ้น หรืออาจใช้เรียกแทนระบบการปิดฉุกเฉินหรือตัวประมวลผลในระบบขั้นสุดท้าย

ฟังก์ชันนิรภัย (SIF) คือฟังก์ชันหรือระบบย่อยที่อยู่บนระบบการควบคุมนิรภัย โดยภายในจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ส่งสัญญาณ ตัวประมวลผล และอุปกรณ์สุดท้าย ซึ่งอาจเรียกอุปกรณ์เหล่านี้โดยรวมว่าลูปควบคุม (Control loop)

การทำงานแบบซ้ำซ้อน คือการทำงานควบคุมแบบขนานของอุปกรณ์หลายตัวที่ทำหน้าที่เดียวกัน เพื่อรักษาความน่าเชื่อถือ (Reliability) ป้องกันความผิดพลาดในการทำงานของฟังก์ชันนิรภัยเมื่อเกิดความผิดพลาดกับอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่ง

การจัดวางแบบ KooN คือรูปแบบของการทำงานแบบซ้ำซ้อนด้วยการโหวตอุปกรณ์ โดยที่ N เป็นจำนวนอุปกรณ์ทั้งหมดในกลุ่มอุปกรณ์ ส่วน K เป็นจำนวนอุปกรณ์ที่ต้องทำงานได้ถูกต้อง ถ้าจำนวนอุปกรณ์ที่ทำงานได้จริงมีค่าน้อยกว่า K จะทำให้ฟังก์ชันนิรภัยทำงานผิดพลาดหรือไม่สามารถทำงานตามความต้องการได้

การทำงานที่ลุ่มความผิดพลาด คือการทำงานของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ KooN และกำหนดให้เกิดความผิดพลาดของอุปกรณ์ทุกตัวเท่าเทียมกันหรือไม่มีเงื่อนไขในการทำงาน

การทำงานที่ไม่ลุ่มความผิดพลาด คือการทำงานของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ KooN แต่มีเงื่อนไขหรือขีดจำกัดในการเกิดความผิดพลาดของอุปกรณ์ เช่น การทำงานที่สามารถเกิดความผิดพลาดได้เฉพาะกับอุปกรณ์ตัวที่กำหนดเท่านั้น เป็นต้น

เซตส่วนตัด (Cut set) คือเซตของอุปกรณ์ในกลุ่มอุปกรณ์ที่ผิดพลาดแล้วส่งผลให้ฟังก์ชันนิรภัยเกิดความผิดพลาดเช่นกัน ส่วนเซตส่วนตัดขั้นต่ำหมายถึงเซตส่วนตัดที่ไม่สามารถลดอุปกรณ์ในเซตได้

และเพื่อให้เข้าใจวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อย่างถูกต้อง จึงมีการอธิบายถึงความหมายของเทอมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ดังตารางที่ 1.2 โดยนอกเหนือจากเทอมทั่วไปที่มีการกำหนดไว้ตามมาตรฐาน IEC 61508-6 [2] แล้วยังมีการกำหนดเทอมที่ใช้เฉพาะในวิทยานิพนธ์นี้เพื่อใช้แสดงถึงรายละเอียดของวิธีการวิเคราะห์ค่า  $PFD_{avg}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.2 เทอมและความหมาย

เทอม	ความหมาย
$PFD_{avg}$	ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งาน
$PFD_{IND}$	ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานอิสระ
$PFD_{CCF}$	ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานร่วม
$\tau$	ช่วงเวลาในการทดสอบ
$MRT$	เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการซ่อม
$MTTR$	เวลาเฉลี่ยที่ฟังก์ชันกลับมาทำงานใหม่
	- $MTTR = MRT + \text{เวลาตรวจจับความผิดพลาด}$
$\lambda_D$	อัตราความผิดพลาดอันตราย
	- $\lambda_D = \lambda_{DD} + \lambda_{DU}$
$\lambda_{DD}$	อัตราความผิดพลาดอันตรายที่ตรวจจับได้
$\lambda_{DU}$	อัตราความผิดพลาดอันตรายที่ตรวจจับไม่ได้
$\lambda_{IND}$	อัตราความผิดพลาดอิสระ
$\lambda_{CCF}$	อัตราความผิดพลาดร่วม
$\beta$	สัดส่วนอัตราความผิดพลาดร่วมต่ออัตราความผิดพลาดที่ตรวจจับไม่ได้
	- $\beta = \lambda_{CCF,DU} / \lambda_{DU}$
$\beta_D$	สัดส่วนอัตราความผิดพลาดร่วมต่ออัตราความผิดพลาดที่ตรวจจับได้
	- $\beta_D = \lambda_{CCF,DD} / \lambda_{DD}$
$t_i$	ค่าเฉลี่ยช่วงเวลาที่กลุ่มอุปกรณ์เกิดความผิดพลาดครั้งที่ 1
$t_{CE}$	ค่าเฉลี่ยช่วงเวลาที่กลุ่มอุปกรณ์เกิดความผิดพลาดครั้งที่ 1
	- $t_{CE} = t_1$
$t_{GE}$	ค่าเฉลี่ยช่วงเวลาที่กลุ่มอุปกรณ์เกิดความผิดพลาดครั้งที่ 2
	- $t_{GE} = t_2$
$t_{G2E}$	ค่าเฉลี่ยช่วงเวลาที่กลุ่มอุปกรณ์เกิดความผิดพลาดครั้งที่ 3
	- $t_{G2E} = t_3$
$DC$	ความสามารถในการวินิจฉัย
	- $DC = \lambda_{DD} / \lambda_D$
$1ooM$	กลุ่มอุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบโหวต 1 out of M
$KooN$	กลุ่มอุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบโหวต K out of N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.7 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกทั้งหมด 5 บท โดยเนื้อหาในแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ สมมติฐานและสูตรพื้นฐานตามมาตรฐาน IEC 61508-6 ความรู้พื้นฐานในการวิเคราะห์ การประยุกต์ใช้บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือ ความหมายและการวิเคราะห์เขตส่วนตัดขั้นต่ำ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบพัฒนาวิธีการคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  โดยใช้วิธีการเขตส่วนตัดขั้นต่ำและบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือ การประยุกต์ใช้วิธีการที่นำเสนอกับการจัดวางแบบพื้นฐานและกรณีศึกษาที่มีการทำงานแบบไม่สุ่มความผิดพลาด

บทที่ 4 กล่าวถึงการวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลอง ตรวจสอบค่าและเปรียบเทียบผลลัพธ์จากวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการอื่น

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะ และแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 มาตรฐาน IEC 61508-6

การเกิดเหตุการณ์อันตรายในอุตสาหกรรมการผลิตส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับระบบวัดคุมนิรภัย จากผลการวิเคราะห์ความผิดพลาดของระบบวัดคุมนิรภัยดังรูปที่ 2.1 [12, 13] พบว่ากว่าร้อยละ 60 ของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากขั้นตอนในการออกแบบและกำหนดรายละเอียดของระบบวัดคุมนิรภัยไม่ถูกต้องเหมาะสม ซึ่งความผิดพลาดจากสาเหตุนี้สามารถทำให้ลดลงได้ก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง ทาง IEC (international Electrotechnical Commission) จึงได้จัดตั้งคณะกรรมการจากองค์กรต่างๆ รวมถึงผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับระบบวัดคุมนิรภัยเพื่อพัฒนาและกำหนดมาตรฐานสำหรับการออกแบบระบบวัดคุมนิรภัยที่ครอบคลุมตั้งแต่การออกแบบไปจนถึงการใช้งานนั้นคือมาตรฐาน IEC 61508 [2]

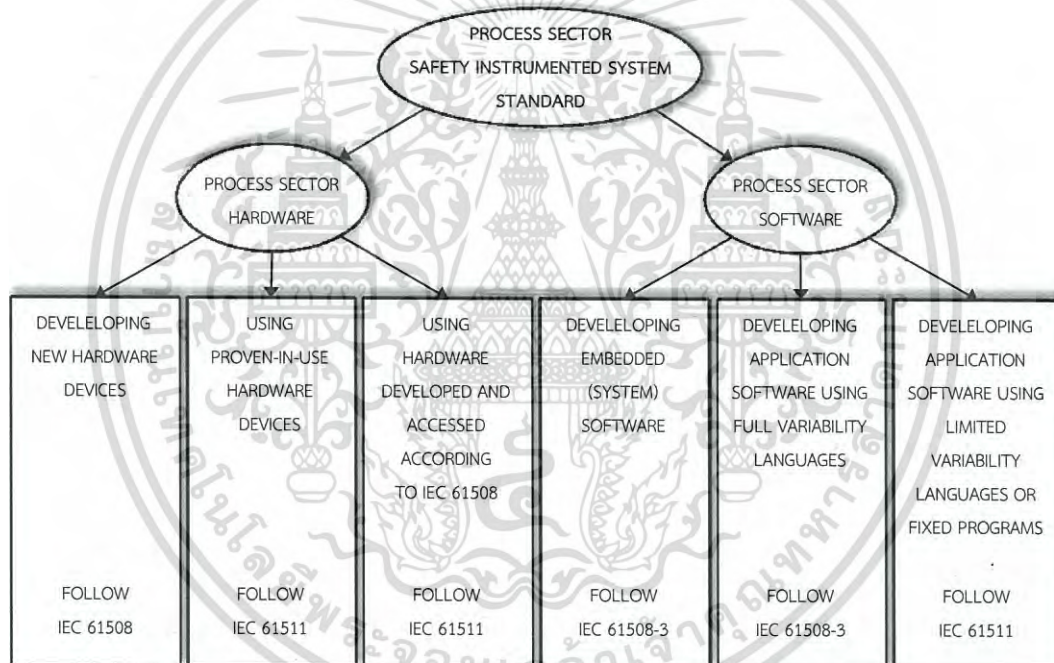


รูปที่ 2.1 สาเหตุของการความผิดพลาดกับระบบวัดคุมนิรภัย

มาตรฐาน IEC 61508 [2] เป็นมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในเรื่องของระบบนิรภัย (Safety-related system) ที่มีส่วนประกอบเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่โปรแกรมได้ (Programmable electronic element) โดยที่นำเสนอถึงวิธีการกำหนดรายละเอียด การออกแบบ และการใช้งานระบบนิรภัยทั้งในด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ มาตรฐาน IEC 61508 [2] มีการกำหนดระดับความปลอดภัยหรือค่า SIL บนพื้นฐานของความเสียหายหรือความถี่ในการเกิดเหตุการณ์อันตรายและผลกระทบของเหตุการณ์ เพื่อใช้เป็นบรรทัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐานในการออกแบบฟังก์ชันนิรภัยให้สามารถลดความเสี่ยงลงมาสู่ค่าที่ยอมรับได้เมื่อมีการใช้งานฟังก์ชัน และเนื่องจากระบบนิรภัยมีการนำไปประยุกต์ใช้กับภาคอุตสาหกรรมที่หลากหลายจึงมีการพัฒนามาตรฐานเฉพาะของภาคอุตสาหกรรมนั้นโดยยึดมาตรฐาน IEC 61508 [2] เป็นพื้นฐาน เช่น มาตรฐาน IEC 61513 [14] สำหรับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ และมาตรฐาน IEC 62061 [15] สำหรับการผลิตเครื่องจักรกล เป็นต้น ซึ่งสำหรับภาคอุตสาหกรรมการผลิต (Process industry) ก็ได้มีการพัฒนา มาตรฐาน IEC 61511 [3] เป็นมาตรฐานเฉพาะสำหรับการประยุกต์ใช้งาน และมีการกำหนดถึงความสัมพันธ์ระหว่าง IEC 61508 และ IEC 61511 ไว้ดังรูปที่ 2.2 [2, 3, 16] ดังนั้นมาตรฐาน IEC 61508 [2] จึงเหมาะสมสำหรับผู้ผลิตและผู้จัดจำหน่ายอุปกรณ์ ในขณะที่มาตรฐาน IEC 61511 [3] เหมาะสมกับผู้ออกแบบ ผู้รับเหมาระบบ (System integrator) และผู้ใช้งานปลายทาง



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐาน IEC 61508 และ IEC 61511

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ค่า SIL หรือค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบซ้ำซ้อน จึงจะขอกล่าวถึงเฉพาะมาตรฐาน IEC 61508-6 ที่นำเสนอข้อมูลและแนวทางในการประยุกต์ใช้งานหลักเกณฑ์หรือข้อกำหนดตาม IEC 61508-2 และ IEC 61508-3 ซึ่งมาตรฐาน IEC 61508-6 มีการจัดแบ่งออกเป็น 5 ส่วน โดยใน Annex A จะกล่าวถึงภาพรวมของข้อกำหนดโดยสรุปและกำหนดขั้นตอนในการประยุกต์ใช้ ส่วน Annex B นำเสนอถึงวิธีการประเมินค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดของอุปกรณ์ สำหรับ Annex C จะยกตัวอย่างการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความสามารถในการวิจัย (Diagnostic coverage) และสัดส่วนความผิดพลาดปลอดภัย Annex D แสดงถึงวิธีการหาค่าผลกระทบของความผิดพลาดร่วมของกลุ่มอุปกรณ์ในรูปของความน่าจะเป็น และสุดท้าย Annex E ได้ยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้ตารางความปลอดภัยของซอฟต์แวร์ที่มีการระบุใน IEC 61508-3 ซึ่งเนื้อหาหลักในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึง Annex B เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากมีการนำเสนอสูตรสำหรับการคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบพื้นฐานที่จะมีการกล่าวถึงต่อไป

### 2.1.1 สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์

การคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ตามมาตรฐาน IEC 61508-6 [2] และในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อยู่บนพื้นฐานของสมมติฐานดังต่อไปนี้

- a) ผลลัพธ์ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานของระบบน้อยกว่า  $10^{-1}$
- b) อัตราความผิดพลาดของอุปกรณ์มีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาในการทดสอบ
- c) ระบบย่อยของอุปกรณ์ส่งสัญญาณประกอบไปด้วยอุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor) ส่วนประกอบอื่นๆ และการเดินสาย แต่ไม่รวมส่วนประกอบที่ทำการรวมสัญญาณโดยการไหลหรือกระบวนการอื่น
- d) ระบบย่อยของตัวประมวลผลประกอบไปด้วยส่วนประกอบที่ทำการรวมสัญญาณ และส่วนประกอบอื่นทั้งหมด รวมไปถึงสัญญาณสุดท้ายที่ถูกส่งไปหาอุปกรณ์สุดท้าย
- e) ระบบย่อยของอุปกรณ์สุดท้ายประกอบไปด้วยส่วนประกอบทั้งหมดและการเดินสายที่รองรับสัญญาณสุดท้ายจากตัวประมวลผล รวมไปถึงจนถึงตัวกระตุ้นสุดท้าย (Final actuator)
- f) อุปกรณ์มี 2 สถานะคือสถานะกำลังทำงานกับสถานะทำงานล้มเหลว
- g) อัตราความผิดพลาดที่ใช้ในการคำนวณคืออัตราความผิดพลาดของอุปกรณ์ตัวเดียว ไม่ใช่อัตราความผิดพลาดรวมของกลุ่มอุปกรณ์
- h) อุปกรณ์ทุกตัวในกลุ่มโหนดเดียวกันจะมีอัตราความผิดพลาดและความสามารถในการวินิจฉัยเหมือนกัน
- i) อัตราความผิดพลาดของอุปกรณ์เป็นผลรวมระหว่างอัตราความผิดพลาดอันตรายและอัตราความผิดพลาดปลอดภัยของอุปกรณ์ ซึ่งสมมติให้มีค่าเท่ากัน
- j) แต่ละฟังก์ชันนิรภัยจะมีการทดสอบและการซ่อมแซมที่สมบูรณ์แบบ นั้นคือความผิดพลาดที่ยังเหลืออยู่ทั้งหมดจะถูกตรวจจับได้
- k) ช่วงเวลาในการทดสอบอย่างน้อยต้องมีค่ามากกว่าเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการซ่อม (MRT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

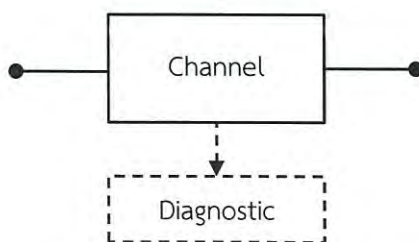
- l) อุปกรณ์ทุกตัวในกลุ่มโหนดเดียวกันจะมีช่วงเวลาในการทดสอบและ MRT เดียวและเท่ากัน
- m) ช่วงเวลาระหว่างความต้องการที่จะใช้งานอุปกรณ์นิริภัยอย่างน้อยต้องมีค่ามากกว่าช่วงเวลาในการทดสอบ จึงไม่พิจารณาอัตราความต้องการ (Demand rate)
- n) สำหรับกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการทำงานในโหมดความต้องการต่ำ สัดส่วนความผิดพลาดจะถูกกำหนดด้วยค่าความสามารถในการวิจัย (DC) โดยความผิดพลาดที่ตรวจจับได้จะถูกตรวจจับและซ่อมแซมภายในเวลาเฉลี่ยที่ฟังก์ชันกลับมาทำงานใหม่ (MTTR) และเนื่องเวลาที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดมีค่าน้อยมากจึงพิจารณาให้ MTTR เท่ากับ MRT
- o) มีช่างซ่อมแซมหลายทีมที่พร้อมทำงานเมื่อตรวจพบความผิดพลาดของอุปกรณ์ และมีอัตราในการซ่อมแซมเท่ากัน
- p) อุปกรณ์ทุกตัวในระบบจะทำงานได้อย่างเต็มที่หลังจากระบบเริ่มทำงาน (Startup)
- q) อุปกรณ์แต่ละตัวมีความเป็นอิสระต่อกัน นั่นคือการเกิดความผิดพลาดขึ้นกับอุปกรณ์ตัวหนึ่งจะไม่ส่งผลใดๆกับอุปกรณ์ตัวอื่น ยกเว้นการเกิดความผิดพลาดร่วม (Common cause failure – CCF)
- r) ความผิดพลาดจากการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะไม่ส่งผลกับค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานของระบบ

### 2.1.2 ค่า $PFD_{avg}$ ของการจัดวางแบบพื้นฐานที่มีการทำงานแบบโหมดความต้องการต่ำ

มาตรฐาน IEC 61508-6 [2] มีการกำหนดสูตรสำหรับคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ 1oo1, 1oo2, 1oo3, 2oo2 และ 2oo3 โดยที่อ้างอิงสมมติฐานตามหัวข้อที่ 2.1.1 และกำหนดให้ช่อง (Channel) ในบล็อกไดอะแกรมหมายถึงอุปกรณ์

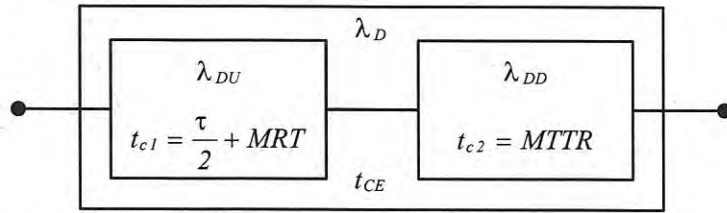
#### 2.1.2.1 การจัดวางแบบ 1oo1

การจัดวางแบบนี้ประกอบด้วยช่องเดียว ซึ่งมีความผิดพลาดอันตรายทำให้เกิดความผิดพลาดของฟังก์ชันนิริภัยเมื่อมีความต้องการใช้งาน



รูปที่ 2.3 บล็อกไดอะแกรมเชิงกายภาพของการจัดวางแบบ 1oo1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของการจัดวางแบบ 1oo1

รูปที่ 2.3 และ 2.4 เป็นบล็อกไดอะแกรมที่เกี่ยวข้องกัน โดยกำหนดอัตราความผิดพลาดอันตรายสำหรับช่องหรืออุปกรณ์เป็นดังสมการที่ 2.1

$$\lambda_D = \lambda_{DU} + \lambda_{DD} \quad (2.1)$$

จากรูปที่ 2.4 สามารถพิจารณาได้ว่าช่องหนึ่งประกอบไปด้วย 2 องค์ประกอบคืออัตราความผิดพลาดอันตราย  $\lambda_{DU}$  ที่เป็นผลมาจากความผิดพลาดที่ไม่สามารถตรวจจับ และอัตราความผิดพลาดอันตราย  $\lambda_{DD}$  ที่เป็นผลมาจากความผิดพลาดที่สามารถตรวจจับ ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่าเฉลี่ยช่วงเวลาที่อุปกรณ์เกิดความผิดพลาด  $t_{CE}$  จากผลรวมของค่าเฉลี่ยช่วงเวลาของแต่ละส่วนเกิดความผิดพลาด  $t_{c1}$  และ  $t_{c2}$  ในรูปแบบของสัดส่วนอัตราความผิดพลาดอันตราย

$$t_{CE} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{\tau}{2} + MRT \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTTR \quad (2.2)$$

สำหรับทุกรูปแบบการจัดวาง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดอันตรายที่ตรวจได้และตรวจจับไม่ได้ถูกกำหนดดังสมการที่ 2.3

$$\lambda_{DU} = \lambda_D (1 - DC); \quad \lambda_{DD} = \lambda_D DC \quad (2.3)$$

และสำหรับแต่ละช่องที่มีค่าเฉลี่ยเวลาที่กลุ่มอุปกรณ์เกิดความผิดพลาด  $t_{CE}$  จะสามารถหาค่าความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} PFD &= 1 - e^{-\lambda_D t_{CE}} \\ &\approx \lambda_D t_{CE} \quad ; \lambda_D t_{CE} \ll 1 \end{aligned} \quad (2.4)$$

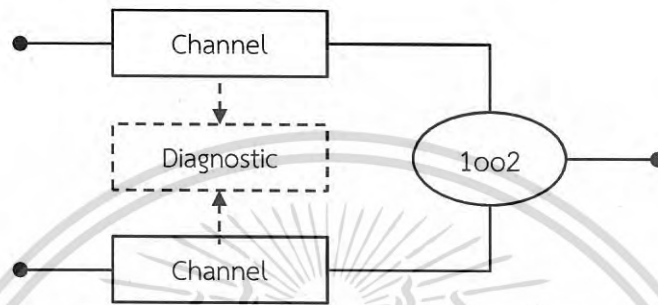
ดังนั้นค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานของการจัดวางแบบ 1oo1 จึงมีค่าดังนี้

$$PFD_{avg} = (\lambda_{DU} + \lambda_{DD}) t_{CE} \quad (2.5)$$

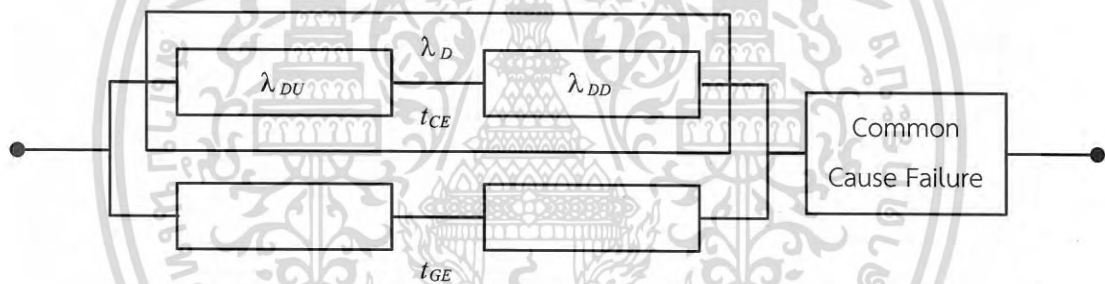
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2.2 การจัดวางแบบ 1oo2

การจัดวางแบบนี้ประกอบด้วยสองช่องที่ต่อกันแบบขนานเพื่อให้ช่องใดช่องหนึ่งสามารถทำงานบนฟังก์ชันนิรภัย ดังนั้นจึงต้องมีความผิดพลาดอันตรายเกิดขึ้นในทั้งสองช่องถึงจะทำให้ฟังก์ชันนิรภัยผิดพลาดเมื่อมีความต้องการใช้งาน โดยสมมติให้การวินิจฉัยตัวเองของอุปกรณ์เป็นเพียงแค่การแจ้งความผิดพลาดที่ตรวจพบและไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสถานะเอาต์พุตหรือการโหวต



รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมเชิงกายภาพของการจัดวางแบบ 1oo2



รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของการจัดวางแบบ 1oo2

รูปที่ 2.5 และ 2.6 เป็นบล็อกไดอะแกรมที่เกี่ยวข้องกัน โดยที่ค่า  $t_{CE}$  ถูกกำหนดไว้ในหัวข้อที่ 2.1.2.1 แต่นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องคำนวณค่าเฉลี่ยเวลาที่กลุ่มอุปกรณ์เกิดความผิดพลาด  $t_{GE}$  ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.6

$$t_{GE} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{\tau}{3} + MRT \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTTR \quad (2.6)$$

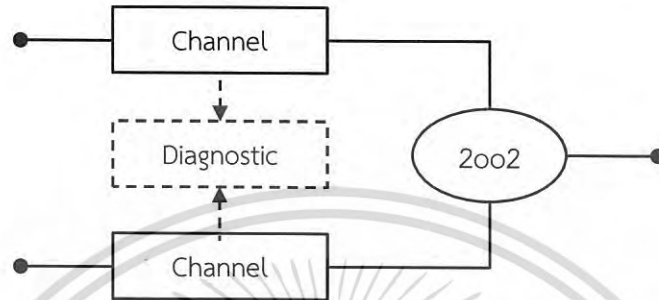
ดังนั้นค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานของการจัดวางแบบ 1oo2 จึงมีค่าดังนี้

$$PFD_{avg} = 2((1 - \beta_D)\lambda_{DD} + (1 - \beta)\lambda_{DU})^2 t_{CE} t_{GE} + \beta_D \lambda_{DD} MTTR + \beta \lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + MRT \right) \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.3 การจัดวางแบบ 2o02

การจัดวางแบบนี้ประกอบด้วยสองช่องที่ต่อกันแบบขนานเพื่อให้ทั้งสองช่องทำงานบนฟังก์ชันนิรภัยก่อนที่จะมีการเรียกใช้ โดยสมมติให้การวินิจฉัยตัวเองของอุปกรณ์เป็นเพียงแค่การแจ้งความผิดพลาดที่ตรวจพบและไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสถานะเอาต์พุตหรือการไหล



รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมเชิงกายภาพของการจัดวางแบบ 2o02

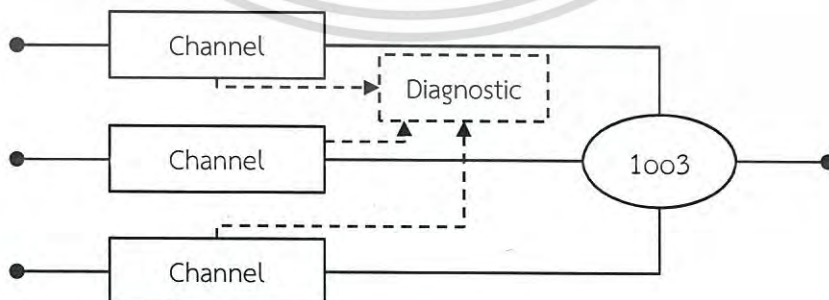


รูปที่ 2.8 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของการจัดวางแบบ 2o02

รูปที่ 2.7 และ 2.8 เป็นบล็อกไดอะแกรมที่เกี่ยวข้องกัน โดยที่ค่า  $t_{CE}$  ถูกกำหนดไว้ในหัวข้อที่ 2.1.2.1 และค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานของการจัดวางแบบ 2o02 จึงมีค่าดังนี้

$$PFD_{avg} = 2(\lambda_{DU} + \lambda_{DD})t_{CE} \tag{2.8}$$

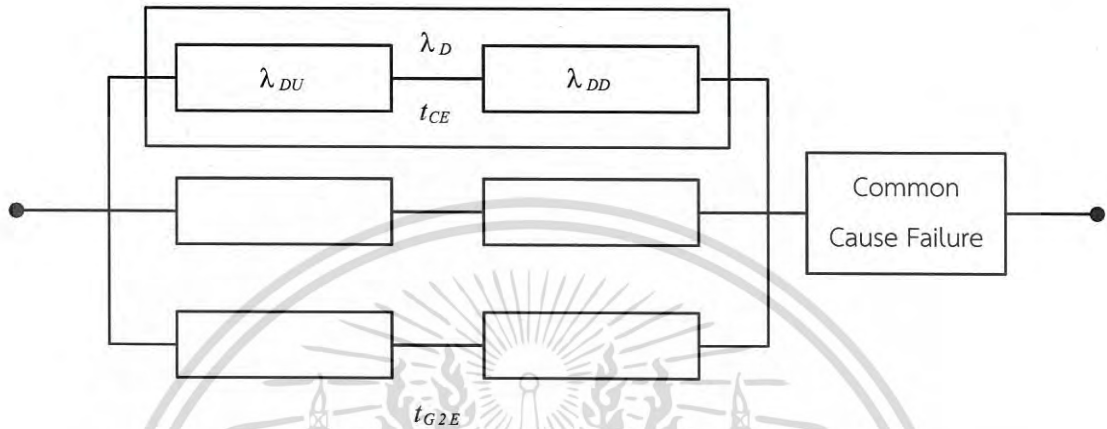
2.1.2.4 การจัดวางแบบ 1o03



รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมเชิงกายภาพของการจัดวางแบบ 1o03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจัดวางแบบนี้ประกอบด้วยสามช่องที่ต่อกันแบบขนานด้วยการโหวตสัญญาณเอาต์พุตเพื่อให้สถานะเอาต์พุตเป็นไปตามการจัดวางแบบ 1๐๐3 โดยสมมติให้การวินิจฉัยตัวเองของอุปกรณ์เป็นเพียงแค่การแจ้งความผิดพลาดที่ตรวจพบและไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสถานะเอาต์พุตหรือการโหวต



รูปที่ 2.10 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของการจัดวางแบบ 1๐๐3

รูปที่ 2.9 และ 2.10 เป็นบล็อกไดอะแกรมที่เกี่ยวข้องกัน โดยที่ค่า  $t_{CE}$  และ  $t_{GE}$  ถูกกำหนดไว้ในหัวข้อที่ 2.1.2.1 และ 2.1.2.2 ตามลำดับ แต่นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องคำนวณค่าเฉลี่ยช่วงเวลาที่กลุ่มอุปกรณ์เกิดความผิดพลาด  $t_{G2E}$  ซึ่งเป็นไปดังสมการต่อไปนี้

$$t_{G2E} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{\tau}{4} + MRT \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTTR \tag{2.9}$$

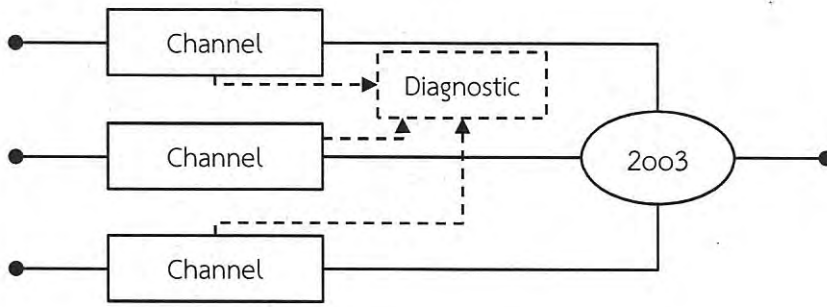
ดังนั้นค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานของการจัดวางแบบ 1๐๐3 จึงมีค่าดังนี้

$$PFD_{avg} = 6((1 - \beta_D)\lambda_{DD} + (1 - \beta)\lambda_{DU})^3 t_{CE} t_{GE} t_{G2E} + \beta_D \lambda_{DD} MTTR + \beta \lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + MRT \right) \tag{2.10}$$

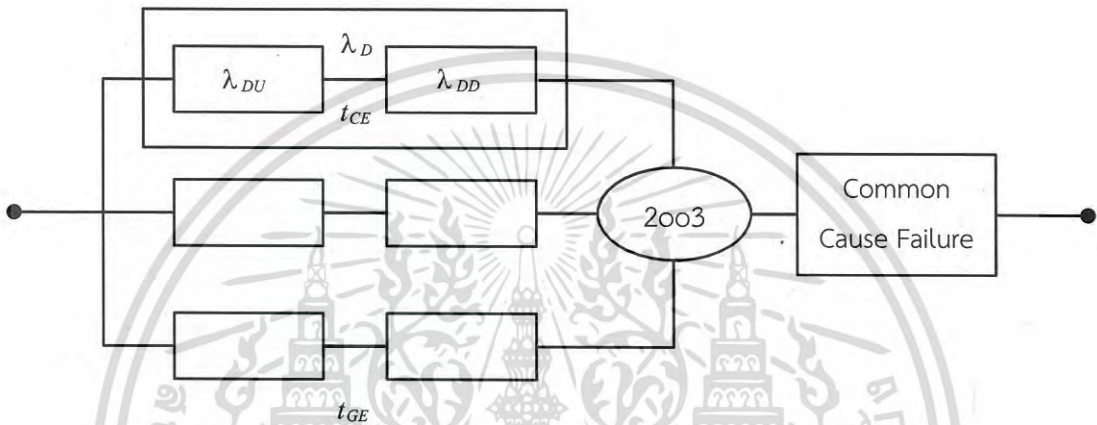
### 2.1.2.5 การจัดวางแบบ 2๐๐3

การจัดวางแบบนี้ประกอบด้วยสามช่องที่ต่อกันแบบขนานด้วยการโหวตสัญญาณเอาต์พุตข้างมากเพื่อให้สถานะเอาต์พุตไม่ถูกเปลี่ยนแปลงถ้ามีช่องใดช่องหนึ่งเพียงช่องเดียวให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกับช่องอื่นอีกสองช่อง โดยสมมติให้การวินิจฉัยตัวเองของอุปกรณ์เป็นเพียงแค่การแจ้งความผิดพลาดที่ตรวจพบและไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสถานะเอาต์พุตหรือการโหวต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 บล็อกโตะแกรมเชิงกายภาพของการจัดวางแบบ 2oo3



รูปที่ 2.12 บล็อกโตะแกรมความน่าเชื่อถือของการจัดวางแบบ 2oo3

รูปที่ 2.11 และ 2.12 เป็นบล็อกโตะแกรมที่เกี่ยวข้องกัน โดยที่ค่า  $t_{CE}$  และ  $t_{GE}$  ถูกกำหนดไว้ในหัวข้อที่ 2.1.2.1 และ 2.1.2.2 ตามลำดับ ดังนั้นค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานของการจัดวางแบบ 2oo3 จึงมีค่าดังนี้

$$PFD_{avg} = 6((1 - \beta_D)\lambda_{DD} + (1 - \beta)\lambda_{DU})^2 t_{CE} t_{GE} + \beta_D \lambda_{DD} MTTR + \beta \lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + MRT \right) \quad (2.11)$$

จากคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบพื้นฐานข้างต้นสามารถสรุปเป็นตารางของสูตรสำหรับคำนวณได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สูตรสำหรับคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบพื้นฐานตามมาตรฐาน IEC 61508-6

Architecture	ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งาน ( $PFD_{avg}$ )
1oo1	$(\lambda_{DU} + \lambda_{DD})t_{CE}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สูตรสำหรับคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบพื้นฐานตามมาตรฐาน IEC 61508-6 (ต่อ)

Architecture	ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งาน ( $PFD_{avg}$ )
1o02	$2((1-\beta_D)\lambda_{DD} + (1-\beta)\lambda_{DU})^2 t_{CE}t_{GE} + \beta_D\lambda_{DD}MTTR + \beta\lambda_{DU}\left(\frac{\tau}{2} + MRT\right)$
2o02	$2(\lambda_{DU} + \lambda_{DD})t_{CE}$
1o03	$6((1-\beta_D)\lambda_{DD} + (1-\beta)\lambda_{DU})^3 t_{CE}t_{GE}t_{G2E} + \beta_D\lambda_{DD}MTTR + \beta\lambda_{DU}\left(\frac{\tau}{2} + MRT\right)$
2o03	$6((1-\beta_D)\lambda_{DD} + (1-\beta)\lambda_{DU})^2 t_{CE}t_{GE} + \beta_D\lambda_{DD}MTTR + \beta\lambda_{DU}\left(\frac{\tau}{2} + MRT\right)$

## 2.2 สูตรทั่วไปของ $PFD_{avg}$ สำหรับการจัดวางแบบ KooN

ตลอดช่วงเวลาที่ผ่านมามีการศึกษาวิจัยเพื่อให้ได้สูตรสำหรับการตรวจสอบค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่สอดคล้องกับสูตรพื้นฐานตามมาตรฐาน IEC 61508-6 [2] และไม่จำกัดแค่การจัดวางแบบพื้นฐานเท่านั้น โดยมีการนำเสนอวิธีการวิเคราะห์หลากหลายวิธีเพื่อให้ได้สูตรของการจัดวางแบบ KooN เช่น วิธีการของ Innal [7] ที่วิเคราะห์สูตรจากความไม่พร้อมใช้งาน (Unavailability) ของกลุ่มอุปกรณ์ หรือวิธีการของ Ding [6] ที่ประยุกต์ใช้การลดชั้นความผิดพลาดของระบบกับบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือ เป็นต้น แต่ในที่นี้จะขอกกล่าวถึงเฉพาะการวิเคราะห์พื้นฐานและวิธีการสร้างสูตร  $PFD_{avg}$  สำหรับการจัดวางแบบ KooN ที่นำเสนอโดย Jahanian [9]

### 2.2.1 การวิเคราะห์พื้นฐาน

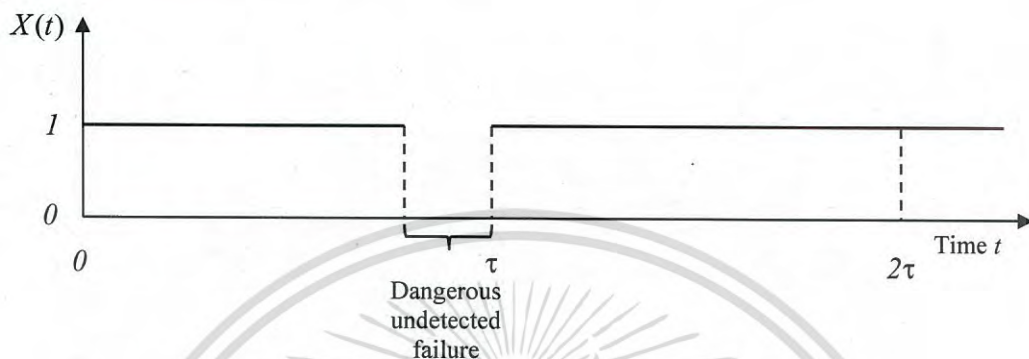
การวิเคราะห์อุปกรณ์หรือระบบนิรภัยในส่วนนี้เราจะสมมติให้อุปกรณ์ไม่มีการวินิจฉัยตัวเองและความผิดพลาดทั้งหมดจะถูกตรวจจับได้โดยการทดสอบการทำงาน อุปกรณ์ถูกพิจารณาให้เริ่มต้นทำงานที่เวลา  $t=0$  โดยที่อุปกรณ์ซึ่งอาจเป็นวาล์วปิดฉุกเฉิน ทรานสมิตเตอร์ หรือระบบการปิดฉุกเฉินมีการทดสอบ ซ่อมบำรุง หรือเปลี่ยนตัวอุปกรณ์ภายหลังจากช่วงเวลาในการทดสอบ  $\tau$  และใช้เวลาอันน้อยมากในการทดสอบและซ่อมบำรุง โดยหลังจากทดสอบแล้วอุปกรณ์จะถูกพิจารณาให้เสมือนอุปกรณ์ใหม่ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าอุปกรณ์นิรภัยนี้จะทำงานได้เป็นอย่างดีถ้าหากความผิดพลาดอันตรายที่ตรวจจับไม่ได้ (Dangerous undetected failure – DU) ไม่เกิดขึ้น

ตัวแปรที่แสดงสถานะการทำงานของอุปกรณ์ที่ขึ้นตรงกับความผิดพลาดอันตรายที่ตรวจจับไม่ได้ถูกแสดงด้วย  $X(t)$  ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

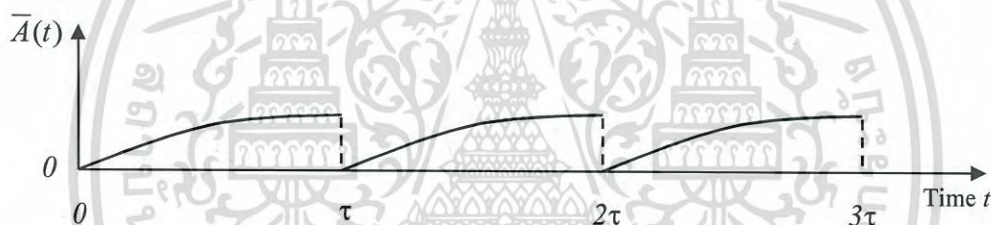
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X(t) = \begin{cases} 1 & ; \text{ถ้าอุปกรณ์สามารถทำงานได้ (DU ไม่เกิดขึ้น)} \\ 0 & ; \text{ถ้าอุปกรณ์ไม่สามารถทำงานได้ (DU เกิดขึ้น)} \end{cases}$$

และสามารถอธิบายได้ตามรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 สถานะการทำงานของอุปกรณ์ที่ขึ้นตรงกับความผิดพลาดอันตรายที่ตรวจจับไม่ได้



รูปที่ 2.14 ฟังก์ชันความไม่พร้อมใช้งานของอุปกรณ์ที่มีการทดสอบเป็นคาบ

### 2.2.1.1 ความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งาน

กำหนดให้  $T$  แทนช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาดอันตรายตรวจจับไม่ได้ของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับฟังก์ชันความไม่น่าเชื่อถือ  $F(t)$  และฟังก์ชันความไม่พร้อมใช้งาน  $\bar{A}(t)$  ของอุปกรณ์ในช่วงเวลาการทดสอบแรก  $(0, \tau]$  ดังสมการที่ 2.12

$$\begin{aligned} \bar{A}(t) &= \Pr(\text{ความผิดพลาดตรวจจับไม่ได้ที่เกิดขึ้นที่หรือก่อนเวลา } t) \\ &= \Pr(T \leq t) = F(t) \end{aligned} \quad (2.12)$$

เนื่องจากสมมติให้อุปกรณ์เสมือนอุปกรณ์ใหม่หลังจากที่ทำการทดสอบ โดยที่ช่วงเวลาในการทดสอบ  $(0, \tau], (\tau, 2\tau], \dots$ , ทั้งหมดมีค่าเท่ากัน จึงทำให้ฟังก์ชันความไม่พร้อมใช้งาน  $\bar{A}(t)$  ของอุปกรณ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งสังเกตว่า  $\bar{A}(t)$  เป็นฟังก์ชันไม่ต่อเนื่องที่  $t = n\tau$  เมื่อ  $n = 1, 2, \dots$  และถ้าหากมีความต้องการในการใช้งานฟังก์ชันนิรภัยเกิดขึ้นที่เวลา  $t$  ค่า  $\bar{A}(t)$  ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นจะสามารถบ่งชี้ถึงความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์จะเกิดความผิดพลาดในการตอบสนองต่อความต้องการ ดังนั้นฟังก์ชันความไม่พร้อมใช้งาน  $\bar{A}(t)$  ของอุปกรณ์จึงมักถูกเรียกว่าความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งาน (Probability of failure on demand – PFD) ที่เวลา  $t$

ส่วนมากในการประยุกต์ใช้งานเราจะไม่สนใจความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานที่ขึ้นกับเวลา เพราะการรู้เพียงแค่ว่าเฉลี่ยในเวลาระยะยาวของความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานถือว่าเพียงพอแล้วสำหรับการใช้งาน โดยที่ค่าเฉลี่ย PFD จะถูกเขียนแทนด้วย  $PFD_{avg}$  ที่ไม่อ้างอิงกับเวลา  $t$  และเนื่องจากความเป็นคาบเวลาของฟังก์ชัน  $\bar{A}(t)$  จึงทำให้ค่า  $PFD_{avg}$  ในเวลาระยะยาวมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของฟังก์ชัน  $\bar{A}(t)$  ในช่วงเวลาการทดสอบแรก  $(0, \tau]$

$$PFD_{avg} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \bar{A}(t) dt = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} F(t) dt \quad (2.13)$$

กำหนดให้  $R(t)$  แทนฟังก์ชันความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ที่ขึ้นตรงกับความผิดพลาดอันตรายที่ตรวจจับไม่ได้ ด้วยความที่  $R(t) = 1 - F(t)$  จึงทำให้สมการที่ 2.13 สามารถเขียนใหม่ได้

$$PFD_{avg} = 1 - \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} R(t) dt \quad (2.14)$$

โดยที่ฟังก์ชันความน่าเชื่อถือ  $R(t)$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบซ้ำซ้อนถูกกำหนดไว้ตามตารางที่ 1 ในภาคผนวก ก

ตัวอย่าง การคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ 1oo1

$$\begin{aligned} PFD_{avg} &= 1 - \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} R(t) dt = 1 - \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} e^{-\lambda_{DU}t} dt \\ &= 1 - \frac{1}{\lambda_{DU}\tau} (1 - e^{-\lambda_{DU}\tau}) \end{aligned} \quad (2.15)$$

ถ้าแทนค่า  $e^{-\lambda_{DU}t}$  ในสมการที่ 2.15 ด้วยอนุกรมแมคลอริน (Maclaurin series) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} PFD_{avg} &= 1 - \frac{1}{\lambda_{DU}\tau} \left( \lambda_{DU}\tau - \frac{(\lambda_{DU}\tau)^2}{2} + \frac{(\lambda_{DU}\tau)^3}{3!} - \frac{(\lambda_{DU}\tau)^4}{4!} + \dots \right) \\ &= 1 - \left( 1 - \frac{\lambda_{DU}\tau}{2} + \frac{(\lambda_{DU}\tau)^2}{3!} - \frac{(\lambda_{DU}\tau)^3}{4!} + \dots \right) \end{aligned}$$

เมื่อสมมติว่า  $\lambda_{DU}\tau$  มีค่าน้อยมาก แล้วค่า  $PFD_{avg}$  ของการจัดวางแบบ 1oo1 จะมีค่าเท่ากับ

$$PFD_{avg} \approx \frac{\lambda_{DU}\tau}{2} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ KooN

K \ N	1	2	3	4
1	$\frac{\lambda_{DU}\tau}{2}$	$\frac{(\lambda_{DU}\tau)^2}{3}$	$\frac{(\lambda_{DU}\tau)^3}{4}$	$\frac{(\lambda_{DU}\tau)^4}{5}$
2	-	$\lambda_{DU}\tau$	$(\lambda_{DU}\tau)^2$	$(\lambda_{DU}\tau)^3$
3	-	-	$\frac{3\lambda_{DU}\tau}{2}$	$2(\lambda_{DU}\tau)^2$
4	-	-	-	$2\lambda_{DU}\tau$

จากวิธีการตั้งตัวอย่างข้างต้นเมื่อกำหนดค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ KooN จะได้ค่าดังตารางที่ 2.2 และสามารถหาความสัมพันธ์เพื่อสรุปเป็นสูตรอย่างง่ายสำหรับคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ของการจัดวางแบบ KooN ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$PFD_{avg,1ooM} = \frac{(\lambda_{DU}\tau)^M}{M+1}; M = 1,2,3,\dots \quad (2.17)$$

$$PFD_{avg,KooN} = \frac{N!}{(N-K+1)!(K-1)!} \times \frac{(\lambda_{DU}\tau)^{(N-K+1)}}{N-K+2}; \binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (2.18)$$

$$= \binom{N}{N-K+1} \frac{(\lambda_{DU}\tau)^{(N-K+1)}}{N-K+2}$$

### 2.2.2 $PFD_{avg}$ สำหรับความผิดพลาดที่ไม่สามารถตรวจจับในระบบ KooN

จากสมการที่ 2.18 สามารถปรับรูปสมการใหม่ได้ว่า

$$PFD_{avg,KooN} = \frac{N!}{(N-K+1)!(K-1)!} \times \frac{(\lambda_{DU}\tau)^{(N-K+1)}}{N-K+2}$$

$$= \left( \frac{N(N-1)\dots(K+1)K}{(N-K+2)!} \right) (\lambda_{DU}\tau)^{(N-K+1)}$$

$$= \prod_{i=K}^N \frac{i\lambda_{DU}\tau}{N+2-i}$$

$$= \prod_{i=1}^{N-K+1} (N-i+1)\lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{i+1} \right) \quad (2.19)$$

สมการที่ 2.19 จะถูกใช้เป็นสูตรตั้งต้นสำหรับการวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป โดยสังเกตว่าสมการนี้ประกอบไปด้วย 3 เทอมหลักคือจำนวนของอุปกรณ์, อัตราความผิดพลาดของอุปกรณ์ และเวลา

### 2.2.3 รูปแบบการลดชั้นของระบบ

กลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ KooN จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์จำนวน  $N$  ตัว โดยฟังก์ชันนิรภัยที่ประกอบด้วยกลุ่มอุปกรณ์นี้จะสามารถทำงานได้อยู่ก็ต่อเมื่อมีอุปกรณ์อย่างน้อย  $K$  ตัวทำงานได้ นั่นคือต้องมีอุปกรณ์จำนวน  $N-K+1$  ตัวผิดพลาดก่อนแล้วฟังก์ชันนิรภัยถึงจะไม่พร้อมใช้งาน ด้วยเหตุนี้จึงสามารถบ่งบอกสถานะการทำงานของกลุ่มอุปกรณ์สอดคล้องกับความผิดพลาดอันตรายที่ไม่สามารถตรวจจับได้เป็น 3 สถานะคือ

1. สถานะพร้อมทำงาน โดยทุกอุปกรณ์จำนวน  $N$  ตัวพร้อมใช้งานและไม่มีตัวใดที่เกิดความผิดพลาดอันตรายที่ตรวจจับไม่ได้ สถานะนี้มักอยู่ในช่วงเวลาเริ่มต้นการทำงานหรือหลังจากผ่านการทดสอบแล้วอุปกรณ์เสมือนใหม่ ดังนั้นจึงกำหนดให้เริ่มต้นที่เวลา  $t = 0$
2. สถานะลดชั้น (Degrade) โดยอุปกรณ์ที่เกิดความผิดพลาดอันตรายแบบตรวจจับไม่ได้มีจำนวนมากกว่า 0 แต่น้อยกว่า  $N-K+1$  ตัว ฟังก์ชันนิรภัยจะยังสามารถตอบสนองต่อความต้องการใช้งานได้ ในสถานะนี้ เพียงแต่ความสามารถในการยอมให้เกิดความผิดพลาดชั้นอีกจะลดลง
3. สถานะไม่พร้อมทำงาน โดยอุปกรณ์ที่เกิดความผิดพลาดอันตรายแบบตรวจจับไม่ได้มีจำนวนมากกว่าหรือเท่ากับ  $N-K+1$  ตัว ในสถานะนี้ฟังก์ชันนิรภัยจะไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการใช้งานได้เลย

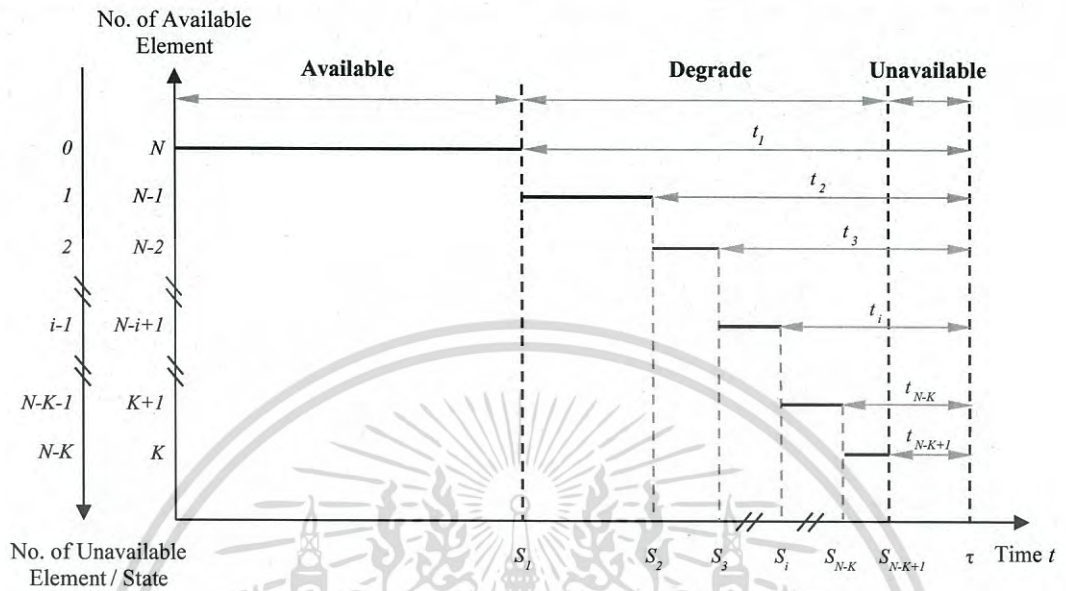
สังเกตว่าเป็นปกติที่ความผิดพลาดที่ตรวจจับไม่ได้จะไม่สามารถพบหรือตรวจวัดได้ จึงทำให้ไม่มีการแจ้งเตือนผู้ปฏิบัติงานให้ซ่อมแซมหรือหยุดการเดินระบบ ดังนั้นความผิดพลาดแบบนี้ซ่อนอยู่กับอุปกรณ์ไปจนกระทั่งถึงการทดสอบในครั้งหน้า ด้วยเหตุนี้จึงสมมติให้ไม่มีการซ่อมบำรุงความผิดพลาดที่เกิดขึ้น นอกจากนี้กลุ่มอุปกรณ์ต้องถูกลดชั้นลงเมื่อมีอุปกรณ์ในกลุ่มเกิดความผิดพลาด โดยความผิดพลาดนี้จะยังอยู่ไปจนกว่าจะมีการทดสอบอุปกรณ์

ตอนเริ่มต้นการทำงาน  $t = 0$  อุปกรณ์จำนวน  $N$  จะถูกพิจารณาให้พร้อมใช้งานทั้งหมด โดยในช่วงเวลาต่อมาที่เวลา  $t = S_1$  สมมติให้เกิดความผิดพลาดครั้งที่ 1 จึงทำให้กลุ่มอุปกรณ์ลดชั้นจากที่มีอุปกรณ์จำนวน  $N$  ตัวเป็น  $N-1$  ตัว ในทำนองเดียวกันเมื่อเกิดความผิดพลาดครั้งที่  $i$  ที่เวลา  $t = S_i$  กลุ่มอุปกรณ์ลดชั้นเป็น  $N-i$  ตัว และอุปกรณ์จะเกิดความไม่พร้อมใช้งานที่เวลา  $t = S_{N-K+1}$  เมื่อมีอุปกรณ์จำนวน  $N-K+1$  ผิดพลาดดังรูปที่ 2.15

กำหนดให้  $t_i$  แทนค่าเฉลี่ยช่วงเวลาหลังกลุ่มอุปกรณ์เกิดความผิดพลาดครั้งที่ 1 (Mean downtime) และ  $E(S_i)$  แทนค่าเฉลี่ยเวลาที่กลุ่มอุปกรณ์พร้อมทำงานก่อนจะเกิดความผิดพลาดครั้งที่ 1 (Mean uptime) ดังนั้น  $E(S_i) + t_i = \tau$  ซึ่งสามารถคำนวณค่า  $E(S_i)$  ได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์จะเกิดความผิดพลาด  $f_i(t)$  ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.20



รูปที่ 2.15 การลดชั้นของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ KooN

$$E(S_1) = \frac{\int_0^\tau t \cdot f_1(t) dt}{\int_0^\tau f_1(t) dt} ; f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{d(1-R(t))}{dt} \quad (2.20)$$

จากรูปที่ 2.15 สังเกตว่า  $R_i(t)$  ของกลุ่มอุปกรณ์เกิดความผิดพลาดครั้งที่ 1 อาจพิจารณาให้เทียบเท่ากับ  $R(t)$  ของการจัดวางแบบ NooN ได้ เนื่องจากมีเงื่อนไขการทำงานเหมือนกันคือมีอุปกรณ์จำนวน N ตัวที่เมื่อมีตัวใดตัวหนึ่งเกิดความผิดพลาดจะทำให้ค่าเฉลี่ยช่วงเวลาหลังเกิดความผิดพลาดมีค่าเท่ากับ  $t_1$  ด้วยเหตุนี้จึงสามารถคำนวณค่า  $E(S_1)$  ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} f_1(t) &= \frac{dF_1(t)}{dt} = \frac{d(1-R_1(t))}{dt} \\ &= \frac{d(1-e^{-N\lambda_{dut}t})}{dt} \\ &= \frac{d\left(N\lambda_{dut} - \frac{(N\lambda_{dut})^2}{2} + \frac{(N\lambda_{dut})^3}{3!} - \frac{(N\lambda_{dut})^4}{4!} + \dots\right)}{dt} \end{aligned}$$

เมื่อสมมติว่า  $N\lambda_{dut}$  มีค่าน้อยมาก แล้วค่า  $f_1(t)$  จะมีค่าเท่ากับ

$$f_I(t) \approx \frac{d(N\lambda_{DU}t)}{dt} = N\lambda_{DU}$$

ดังนั้นค่าเฉลี่ยช่วงเวลาในกลุ่มอุปกรณ์พร้อมทำงานก่อนจะเกิดความผิดพลาดครั้งที่ 1 จึงมีค่าดังนี้

$$E(S_I) = \frac{\int_0^\tau t \cdot N\lambda_{DU} dt}{\int_0^\tau N\lambda_{DU} dt} = \frac{\tau^2}{2} \cdot \frac{I}{\tau} = \frac{\tau}{2}$$

จึงทำให้สามารถคำนวณค่าเฉลี่ยช่วงเวลาหลังกลุ่มอุปกรณ์พร้อมทำงานก่อนจะเกิดความผิดพลาดครั้งที่ 1 ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$t_I = \tau - \frac{\tau}{2} = \frac{\tau}{2}$$

ในการทำงานเดียวกันเมื่อพิจารณาการเกิดความผิดพลาดครั้งที่  $i$  ที่เวลา  $S_i$  จะพบว่าอุปกรณ์ที่พร้อมใช้งานก่อนเกิดความผิดพลาดครั้งที่  $i$  มีจำนวนเท่ากับ  $N-i+1$  ตัว และสามารถคำนวณค่าเฉลี่ยช่วงเวลาหลังกลุ่มอุปกรณ์เกิดความผิดพลาดครั้งที่  $i$   $t_i$  ได้ดังต่อไปนี้

$$f_i(t) = \frac{d(F_i(t))^i}{dt} \approx \frac{d(N\lambda_{DU}t)^i}{dt} = iN^i\lambda_{DU}^i t^{i-1}$$

จึงทำให้ค่าเฉลี่ยช่วงเวลาในกลุ่มอุปกรณ์พร้อมทำงานก่อนจะเกิดความผิดพลาดครั้งที่  $i$  มีค่าเท่ากับ

$$E(S_i) = \frac{\int_0^\tau t \cdot iN^i\lambda_{DU}^i t^{i-1} dt}{\int_0^\tau iN^i\lambda_{DU}^i t^{i-1} dt} = \frac{\tau^{i+1}}{(i+1)} \cdot \frac{i}{\tau^i} = \frac{i\tau}{(i+1)}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ค่าเฉลี่ยช่วงเวลาหลังกลุ่มอุปกรณ์เกิดความผิดพลาดครั้งที่  $i$  ดังสมการที่ 2.21

$$t_i = \tau - \frac{i\tau}{(i+1)} = \frac{\tau}{i+1} \quad (2.21)$$

เมื่อมองย้อนกลับไปยังสมการที่ 2.19 และกำหนดให้  $i$  แทนเลขสถานะและจำนวนอุปกรณ์ที่เกิดความผิดพลาดอันตรวจที่ตรวจจับไม่ได้ จะพบว่าเทอมหลัก 3 เทอมทางด้านขวามือของสมการมีความหมายดังต่อไปนี้

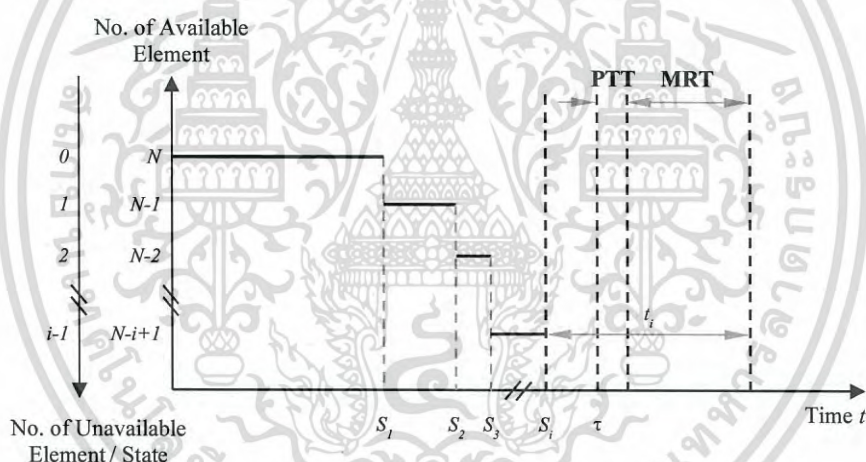
1.  $(N-i+1)$  หมายถึงจำนวนอุปกรณ์ที่พร้อมใช้งานก่อนที่จะเกิดความผิดพลาดครั้งที่  $i$  หรือก่อนที่จะเปลี่ยนสถานะจาก  $i-1$  เป็น  $i$
2.  $\lambda_{DU}$  หมายถึงอัตราการเกิดความผิดพลาดของอุปกรณ์หนึ่งตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.  $\tau/(i+1)$  หมายถึงค่าเฉลี่ยช่วงเวลาหลังเกิดความผิดพลาดครั้งที่  $i$  ไปจนถึงการทดสอบครั้งต่อไป หรือค่าเฉลี่ยเวลาที่กลุ่มอุปกรณ์ยังอยู่ในสถานะโดยมีอุปกรณ์จำนวน  $i$  ตัวที่เกิดความผิดพลาดอันตรายแบบตรวจจับไม่ได้

#### 2.2.4 การพิจารณาผลกระทบของการซ่อมแซมและการตรวจจับความผิดพลาด

สมการที่ 2.18 และ 2.19 ได้นำเสนอความไม่พร้อมใช้งานของอุปกรณ์ที่ขึ้นกับความผิดพลาดอันตรายที่ตรวจจับไม่ได้ในช่วงเวลาการทดสอบแรก  $(0, \tau]$  โดยสมมติให้การทดสอบเสร็จสิ้นเมื่อหมดช่วงเวลา  $\tau$  และตรวจพบความผิดพลาดของอุปกรณ์จำนวน  $i$  ตัวได้ทั้งหมด นั่นจึงหมายความว่า การเกิดความผิดพลาดครั้งที่  $i$  ที่เวลา  $S_i$  มีอุปกรณ์จำนวน  $i$  ตัวเกิดความผิดพลาดและมีช่วงเวลาเฉลี่ยหลังเกิดความผิดพลาดเท่ากับ  $t_i = \tau/(i+1)$  ซึ่งถึงแม้ว่าความผิดพลาดจะถูกตรวจจับแต่กลุ่มอุปกรณ์ก็จะยังอยู่ในสถานะ  $i$  ต่อไปจนกระทั่งอุปกรณ์ที่เกิดความผิดพลาดได้รับการซ่อมบำรุงฟื้นฟูใหม่ และช่วงเวลาในการทดสอบรอบต่อไปจะเริ่มนับก็ต่อเมื่ออุปกรณ์ได้รับการฟื้นฟูเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 2.16 เวลาเฉลี่ยหลังเกิดความผิดพลาดครั้งที่  $i$  เมื่อพิจารณาการทดสอบและซ่อมแซม

แต่อย่างไรก็ตามการทดสอบและการซ่อมแซมอุปกรณ์ไม่สามารถทำให้เสร็จสิ้นได้ภายในระยะเวลา  $\tau$  ดังรูปที่ 2.16 กำหนดให้ PTT แทนช่วงเวลาที่ใช้ในการทดสอบ (Proof test time) หรือช่วงเวลาที่ใช้ในการตรวจหาความผิดพลาดอันตรายที่ตรวจจับไม่ได้ และ MRT แทนค่าเฉลี่ยเวลาที่ใช้ในการซ่อม (Mean repair time) หรือช่วงเวลาหลังจากทำการทดสอบเพื่อซ่อมแซมอุปกรณ์ที่ผิดพลาดและติดตั้งคืนตำแหน่งเดิม ซึ่งสมการที่ 2.21 ที่แสดงถึงเวลาที่กลุ่มอุปกรณ์เกิดความผิดพลาดจะต้องถูกเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.22

$$t_i = \frac{\tau}{i+1} + PTT + MRT \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อเวลาเฉลี่ยหลังเกิดความผิดพลาดนั้นคือความเป็นไปได้ในการตรวจจับความผิดพลาด เมื่ออุปกรณ์มีความสามารถในวินิจฉัยตัวเองหรือตรวจจับความผิดพลาดได้ ส่วนหนึ่ง ความผิดพลาดอันตรายที่สามารถตรวจพบได้จะเรียกว่าความผิดพลาดอันตรายที่ตรวจจับได้ (Dangerous detected failure – DD) และนั่นทำให้เวลาเฉลี่ยที่กลุ่มอุปกรณ์อยู่ในสถานะลดขั้นมีค่าน้อยลงกว่าเดิม เนื่องจากเวลาหลังเกิดความผิดพลาดของแต่ละอุปกรณ์จะถูกลดลงด้วยการตรวจจับความผิดพลาดและการซ่อมบำรุงอุปกรณ์ที่ผิดพลาดก่อนจะมีการทดสอบที่เวลา  $\tau$  โดยกำหนดให้ MTTR แทนค่าเวลาเฉลี่ยที่ฟังก์ชันกลับมาทำงานใหม่ (Mean time to restoration) หรือช่วงเวลาเฉลี่ยตั้งแต่อุปกรณ์เริ่มเกิดความผิดพลาด การตรวจจับความผิดพลาด ไปจนถึงการซ่อมบำรุงและติดตั้งคืน ซึ่งถ้าความผิดพลาดทั้งหมดของอุปกรณ์เป็นความผิดพลาดที่ตรวจจับไม่ได้ นั่นคือ  $\lambda_D = \lambda_{DU}$  แล้วจะทำให้เวลาเฉลี่ยหลังเกิดความผิดพลาด  $t_i$  เป็นดังสมการที่ 2.22 แต่มีความผิดพลาดที่สามารถตรวจจับได้ด้วยการวินิจฉัยตัวเองของอุปกรณ์หรือระบบอื่น จะทำให้อัตราความผิดพลาดอันตรายถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ  $\lambda_D = \lambda_{DU} + \lambda_{DD}$  และทำให้เวลาเฉลี่ยหลังเกิดความผิดพลาดมีการเปลี่ยนแปลงไปดังนี้

$$t_i = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{\tau}{i+1} + PTT + MRT \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTTR \quad (2.23)$$

จากสมการที่ 2.23 พบว่ามีการแบ่งสัดส่วนเวลาที่อุปกรณ์เกิดความผิดพลาดด้วยอัตราความผิดพลาดอันตรายที่ตรวจจับได้และไม่ได้ โดยเวลาเฉลี่ยหลังเกิดความผิดพลาดที่มีสาเหตุจากความผิดพลาดอันตรายที่ตรวจจับได้จะถูกนำเสนอโดย MTTR และเวลาเฉลี่ยหลังเกิดความผิดพลาดที่มีสาเหตุจากความผิดพลาดอันตรายที่ตรวจจับไม่ได้จะประกอบไปด้วย PTT และ MRT เมื่อใช้สมการที่ 2.23 ที่เป็นส่วนขยายของสมการที่ 2.21 แทนค่าลงในสมการ 2.19 ส่วนของค่าเฉลี่ยช่วงเวลาหลังเกิดความผิดพลาดครั้งที่  $i$  จะได้ค่า  $PF_{D,avg}$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ KooN ดังสมการที่ 2.24

$$PF_{D,avg,KooN} = \prod_{i=1}^{N-K+1} (N-i+1) \lambda_D \left( \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{\tau}{i+1} + PTT + MRT \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTTR \right) \quad (2.24)$$

และอัตราการเกิดความผิดพลาดของอุปกรณ์หนึ่งตัวจะถูกแทนที่จาก  $\lambda_{DU}$  ด้วย  $\lambda_D$  เนื่องจากในที่นี้มีการพิจารณาอัตราความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ที่ประกอบไปด้วย  $\lambda_{DU}$  และ  $\lambda_{DD}$  ไม่ใช่เพียงแค่  $\lambda_{DU}$  เท่านั้น

### 2.2.5 การพิจารณาความผิดพลาดร่วมและการสรุปสูตรทั่วไป

จากหัวข้อข้างต้นจะกล่าวถึงเฉพาะความผิดพลาดอิสระของอุปกรณ์แต่ละตัวในกลุ่มโหนด แต่ในความเป็นจริงกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ KooN อาจเกิดความผิดพลาดเนื่องจากความผิดพลาดร่วมหรือความผิดพลาดที่สามารถส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ทุกตัวในเวลาเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่น ความผิดพลาดจากการออกแบบและซื้ออุปกรณ์ทำให้อุปกรณ์ในล็อตเดียวกันจะมีความผิดพลาดเหมือนกัน หรือความผิดพลาดทางกายภาพจากการเกิดฟ้าผ่าทำให้อุปกรณ์ที่อยู่ใกล้กันเกิดความผิดพลาดไปพร้อมกัน เป็นต้น ในหัวข้อนี้จะพิจารณาความผิดพลาดร่วมในการคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ KooN ซึ่งในการพิจารณาจะต้องใช้ค่าตัวประกอบ  $\beta$  ที่สามารถวิเคราะห์ได้จากวิธีการประมาณค่าตาม Annex D ใน IEC 61508-6 [2] วิธีการนี้ได้อธิบายอัตราความผิดพลาดร่วมของอุปกรณ์ด้วย  $\beta\lambda$  โดยที่  $\lambda$  คืออัตราความผิดพลาดของอุปกรณ์หนึ่งตัว และ  $\beta$  คือตัวประกอบที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 และถูกนำเสนอในรูปของสัดส่วนความผิดพลาดที่มีผลกระทบต่ออุปกรณ์ทุกตัวในเวลาเดียวกัน

จากวิธีการเดิมที่ใช้วิเคราะห์ค่า  $E(S_I)$  ในหัวข้อที่ 2.2.3 สามารถแสดงได้ว่าเวลาเฉลี่ยที่อุปกรณ์เกิดความผิดพลาดร่วม  $t_{I,CCF}$  มีค่าเท่ากับ  $\tau/2$  นั้นเพราะว่าความผิดพลาดร่วมเป็นความผิดพลาดกลุ่มและส่งผลให้ทั้งฟังก์ชันนิรภัยเกิดความผิดพลาด ถ้าอุปกรณ์ในกลุ่มโหนดมีอัตราความผิดพลาด  $\lambda$  แล้ว  $PFD_{avg}$  จากผลของความผิดพลาดร่วมหรือค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานรวม  $PFD_{CCF}$  จะมีค่าดังนี้

$$PFD_{CCF} = \beta\lambda \frac{\tau}{2}$$

สำหรับกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ KooN และมีความสามารถในการวินิจฉัยตัวเอง โดยที่มีอัตราความผิดพลาดเป็น  $\lambda_D = \lambda_{DU} + \lambda_{DD}$  จะทำให้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานรวมประกอบด้วยสองส่วนเช่นกันคือส่วนของความผิดพลาดร่วมอันตรายที่ตรวจจับได้และไม่ได้ ซึ่งกำหนดให้  $\beta$  แทนสัดส่วนของความผิดพลาดร่วมที่ตรวจจับไม่ได้หรือ  $\beta = \lambda_{DU,CCF} / \lambda_{DU}$  และ  $\beta_D$  แทนสัดส่วนของความผิดพลาดร่วมที่ตรวจจับได้หรือ  $\beta_D = \lambda_{DD,CCF} / \lambda_{DD}$  แล้วค่า  $PFD_{avg}$  จากความผิดพลาดร่วมจะถูกเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.25

$$PFD_{CCF} = \beta\lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + PTT + MRT \right) + \beta_D\lambda_{DD}MTTR \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเกตว่าความผิดพลาดรวมจะสามารถใช้ได้กับกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ KooN โดยที่ K มีค่าน้อยกว่า N เท่านั้น นั่นเพราะกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการโหวตแบบ NooN จะทำให้ทั้งฟังก์ชันเกิดความผิดพลาดขึ้นอยู่แล้วถ้าหากมีอุปกรณ์ตัวหนึ่งเกิดความผิดพลาด จึงไม่ต้องพิจารณาความผิดพลาดรวม

ก่อนที่จะสรุปสูตรสุดท้ายสำหรับการคำนวณค่า  $PF_{D_{avg}}$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ KooN จะต้องมีการปรับเปลี่ยนอัตราความผิดพลาด  $\lambda_D$  ในสมการที่ 2.24 โดยอัตราความผิดพลาดในสมการที่ 2.24 จะพิจารณาให้มีเพียงแค่อัตราความผิดพลาดอิสระของอุปกรณ์เท่านั้น แต่ในที่นี้มีการแยกความผิดพลาดรวมของอุปกรณ์ออก ทำให้จำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนค่า  $\lambda_D$  เพื่อให้เหลือเพียงอัตราความผิดพลาดอิสระ ดังนั้นจึงมีการแทนค่า  $\lambda_D$  ในสมการที่ 2.24 ด้วย  $\lambda_{D,IND}$  ที่มีค่าดังสมการที่ 2.26 ซึ่งให้ผลลัพธ์ค่า  $PF_{D_{avg}}$  จากผลของความผิดพลาดอิสระหรือค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานอิสระ  $PF_{D_{IND}}$  ดังสมการที่ 2.27

$$\lambda_{D,INF} = (1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD} \quad (2.26)$$

$$PF_{D_{IND}} = \prod_{i=1}^{N-K+1} (N-i+1) \times ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD}) \times \left( \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{\tau}{i+1} + PTT + MRT \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTTR \right) \quad (2.27)$$

จากการรวมกันของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานอิสระและร่วมดังสมการที่ 2.27 และ 2.25 ตามลำดับ ทำให้สามารถสรุปสูตรทั่วไปของ  $PF_{D_{avg}}$  สำหรับการจัดวางแบบ KooN ได้ดังนี้

$$PF_{D_{avg},KooN} = PF_{D_{IND}} + PF_{D_{CCF}} \quad (2.28)$$

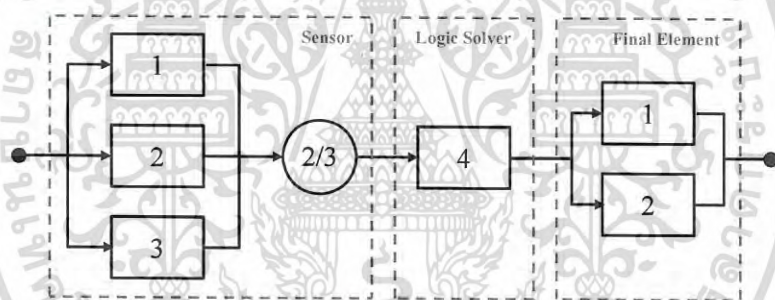
$$= \prod_{i=1}^{N-K+1} (N-i+1) \times ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD}) \times \left( \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{\tau}{i+1} + PTT + MRT \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTTR \right) + \beta\lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + PTT + MRT \right) + \beta_D\lambda_{DD} MTTR \quad (2.29)$$

### 2.3 วิธีการวิเคราะห์ค่า $PF_{D_{avg}}$ ด้วยบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือ

บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือหรือ RBD เป็นวิธีการบูลีน (Boolean) วิธีการหนึ่งที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ค่า  $PF_{D_{avg}}$  อย่างหลากหลาย โดยบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือนี้จะทำหน้าที่เชื่อมโยงความผิดพลาดของอุปกรณ์แต่ละตัวกับความผิดพลาดของทั้งฟังก์ชันนิรภัยเข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และนำเสนอออกมาในรูปของโครงสร้างเชิงโลจิก (Logical structure) แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ด้วยวิธีการนี้จะสามารถพิจารณาได้เฉพาะลักษณะทั่วไป เช่น การทดสอบที่มีคาบเวลา ส่วนพฤติกรรมที่นอกเหนือจากลักษณะโดยทั่วไปจะไม่สามารถวิเคราะห์ได้ บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือมักถูกใช้ในขั้นตอนแรกสำหรับการวิเคราะห์เพื่อแยกการคำนวณในสมการออกเป็นแผนภาพ และจากนั้นจะพิจารณาบล็อกไดอะแกรมเพื่อหาค่า  $PFD_{avg}$  โดยอาจใช้สูตรหรือวิธีการอื่นในการคำนวณ จากตัวอย่างการใช้บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือถูกนำเสนอในรูปที่ 2.17 ที่แสดงถึงรูปของฟังก์ชันนิรภัยที่มีการทำงานของเซนเซอร์แบบ 2oo3 ความสนใจหลักของไดอะแกรมนี้จะอยู่ที่การแบ่งฟังก์ชันออกเป็น 3 ส่วนตามลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ที่มีความใกล้เคียงกับโครงสร้างทางกายภาพจริงของฟังก์ชันนิรภัย ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ง่ายและถูกใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งในหัวข้อนี้ได้มีการยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือในการวิเคราะห์ค่า  $PFD_{avg}$  ของตัวป้องกันการระเบิดใต้ทะเล (Subsea blowout preventer – BOP) ที่มีการนำเสนอโดย Chung [11]



ที่ 2.17 การประยุกต์ใช้บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือ

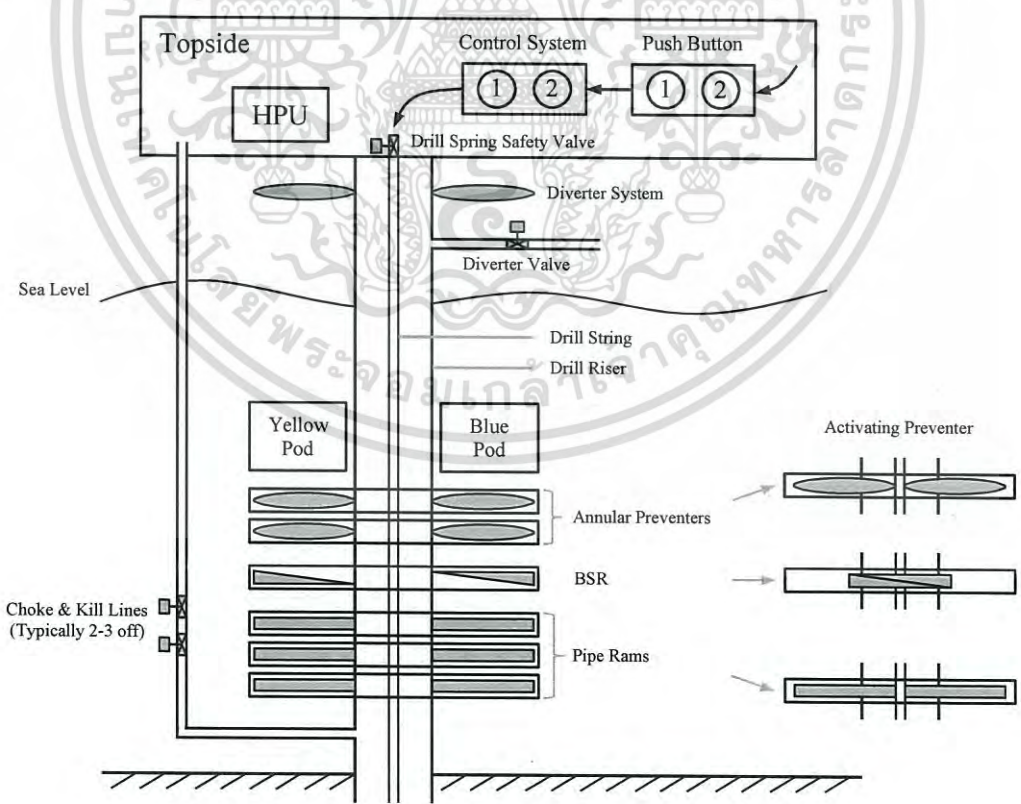
### 2.3.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์ค่า $PFD_{avg}$ โดยใช้บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือ

ตามที่ได้กล่าวไปข้างต้นถึงการใช้บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์การทำงานแบบซ้ำซ้อนของกลุ่มอุปกรณ์ ในหัวข้อนี้จึงขอเป็นส่วนหนึ่งของบทความที่มีการนำเสนอโดย Chung [11] มาเป็นตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งบทความนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ของตัวป้องกันการระเบิดใต้ทะเลที่มีการใช้บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือและสูตรพื้นฐานตามมาตรฐาน IEC 61508-6 ในการวิเคราะห์

ตัวป้องกันการระเบิดใต้ทะเลคือระบบวัดคุมนิรภัยที่ถูกใช้ในขณะที่มีการขุดเจาะหลุมน้ำมัน (Well drilling) หรือระหว่างการผลิตของหลุมน้ำมัน (Well intervention) การจัดการกับความดันในหลุมถือเป็นเรื่องที่มีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากถ้ามีความดันภายในหลุมมากอาจทำให้

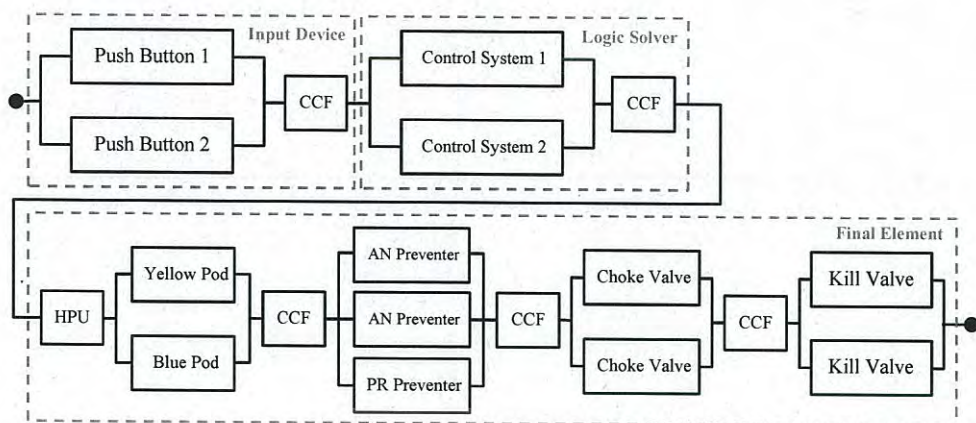
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการทะลักของแก๊สและน้ำมันดิบ (Well kicks) ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ผู้ปฏิบัติงาน และ ทรัพย์สิน ดังนั้นตัวป้องกันการระเบิดได้ทะเลที่ช่วยในการควบคุมการทะลักของแก๊สและน้ำมัน (Kick control) จึงมีบทบาทสำคัญต่อการบรรเทาและป้องกันความเสียหายจากเหตุการณ์อันตราย โครงสร้างของตัวป้องกันการระเบิดได้ทะเลถูกแสดงดังรูปที่ 2.18 ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ตัวป้องกันแบบแอนนูลาร์ (Annular preventer) 1 ตัวป้องกันแบบตัดก้านเจาะ (Blind shear ram preventer) และ 3 ตัวป้องกันแบบปิดท่อ (Pipe ram preventer) โดยเมื่อน้ำมันดิบเกิดการทะลัก ตัวป้องกันแบบแอนนูลาร์และแบบปิดท่อ (A/PR) ที่เป็นฟังก์ชันนิรภัยขั้นแรกจะถูกสั่งให้ทำงานด้วยสัญญาณอินพุตที่ส่งจากปุ่มกด (Push button) หน้าคอนโซลไปยังระบบควบคุมและชุดต้นกำลังไฮดรอลิก (Hydraulic power unit - HPU) จากนั้นสัญญาณจากระบบควบคุมจะถูกส่งไปที่พอร์ด (Pod) เพื่อทำการกระตุ้นให้ตัวป้องกันปิดท่อส่งขึ้น (Drill riser) นอกจากนี้ยังมีการลดความดันในท่อส่งขึ้นด้วยวาล์ว choke (Choke valve) และวาล์ว kill (Kill valve) แต่ถ้าหากฟังก์ชัน A/PR และฟังก์ชันนิรภัยอื่นเกิดความผิดพลาด ตัวป้องกันแบบตัดก้านเจาะ (BSR) ก็จะทำหน้าที่ป้องกันในขั้นสุดท้ายเพื่อหยุดการทะลักของน้ำมันดิบด้วยการปิดท่อส่งขึ้นและก้านเจาะ (Drill string) ผ่านการกดปุ่มและระบบควบคุมเช่นกัน

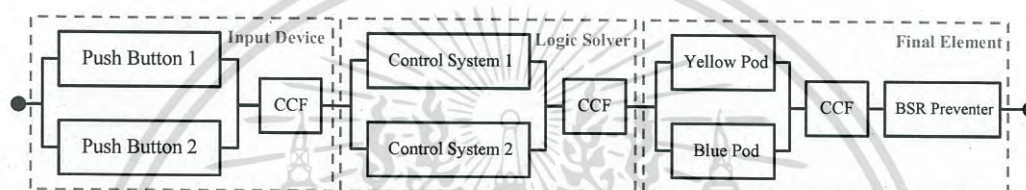


รูปที่ 2.18 โครงสร้างการทำงานของตัวป้องกันการระเบิดได้ทะเล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของฟังก์ชัน A/PR



รูปที่ 2.20 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของฟังก์ชัน BSR

ตารางที่ 2.3 อัตราความผิดพลาดอันตรายและสัดส่วนอัตราความผิดพลาดร่วมของ BOP

อุปกรณ์	$\lambda_{DU}$	$\beta$	ช่วงเวลาการทดสอบ $\tau$
	(ต่อ $10^6$ ชั่วโมง)	(%)	(ชั่วโมง)
ปุ่มกด (PB)	0.4	3	ทุก 4380 ชั่วโมงหรือ 6 เดือน (การทดสอบ แบบสมบูรณ์)
ระบบควบคุม (CS)	4.9	7	
ชุดต้นกำลังไฮดรอลิก (HPU)	0.9	-	
วาล์วไซ้ค (CV)	0.4	5	
วาล์วคิลล์ (KV)	0.4	5	
พอร์ต (POD)	104.7	5	
ตัวป้องกันแบบแอนนูลาร์ (A)	11.2	5	
ตัวป้องกันแบบปิดท่อ (PR)	6.5		

จากการทำงานของฟังก์ชันทั้งสองสามารถวิเคราะห์และเขียนบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือได้ดังรูปที่ 2.19 และ 2.20 ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะขอล่าเฉพาะการวิเคราะห์ค่า  $PFD_{avg}$  ของฟังก์ชัน A/PR เท่านั้น ส่วนฟังก์ชันอื่นสามารถศึกษาได้จากบทความของ Chung [11] โดยในรูปแบบที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.19 สังเกตว่ามีการพิจารณาให้มีตัวป้องกันแบบปิดท่อนึงตัวที่ทำงานในฟังก์ชันนิรภัยถึงแม้ว่าจะมีการติดตั้ง 3 ตัวก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากตัวป้องกันแบบปิดท่อแต่ละตัวจะมีขนาดไม่เท่ากันทำให้มักจะมีการทำงานที่ไม่พร้อมกัน รวมถึงมีการกำหนดให้ความไม่พร้อมใช้งานของฟังก์ชันขึ้นอยู่กับความผิดพลาดอันตรายที่ตรวจจับไม่ได้ที่ไม่คำนึงถึงเวลาซ่อมบำรุง และมีค่าอัตราความผิดพลาดอันตราย  $\lambda_{DU}$  และสัดส่วนอัตราความผิดพลาดรวม  $\beta$  ของอุปกรณ์ภายในฟังก์ชันเป็นไปตามตารางที่ 2.3

จากบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือในรูปที่ 2.19 และสูตรพื้นฐานสำหรับคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ KooN ตามมาตรฐาน IEC 61508-6 [2] ในหัวข้อที่ 2.1.2 ทำให้สามารถหาค่า  $PFD_{avg}$  ของแต่ละอุปกรณ์ของฟังก์ชัน A/PR ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 PFD_{avg,PB} &= PFD_{avg,1002} \\
 &= 2((1-\beta_D)\lambda_{DD} + (1-\beta)\lambda_{DU})^2 t_{CE}t_{GE} + \beta_D\lambda_{DD}MTTR + \beta\lambda_{DU}\left(\frac{\tau}{2} + MRT\right) \\
 &= \frac{1}{3}((1-\beta_{PB})\lambda_{PB}\tau)^2 + \beta_{PB}\lambda_{PB}\frac{\tau}{2} = 2.72e-5 \\
 PFD_{avg,CS} &= \frac{1}{3}((1-\beta_{CS})\lambda_{CS}\tau)^2 + \beta_{CS}\lambda_{CS}\frac{\tau}{2} = 8.84e-4 \\
 PFD_{avg,HPU} &= PFD_{avg,1001} \\
 &= (\lambda_{DU} + \lambda_{DD})t_{CE} \\
 &= \lambda_{HPU}\frac{\tau}{2} = 1.97e-3 \\
 PFD_{avg,POD} &= \frac{1}{3}((1-\beta_{POD})\lambda_{POD}\tau)^2 + \beta_{POD}\lambda_{POD}\frac{\tau}{2} = 7.47e-2 \\
 PFD_{avg,A/PR} &= PFD_{avg,1003} \\
 &= 6((1-\beta_D)\lambda_{DD} + (1-\beta)\lambda_{DU})^3 t_{CE}t_{GE}t_{G2E} + \beta_D\lambda_{DD}MTTR + \beta\lambda_{DU}\left(\frac{\tau}{2} + MRT\right) \\
 &= \frac{1}{4}((1-\beta_{A/PR})\lambda_{A/PR}\tau)^3 + \beta_{A/PR}\lambda_{A/PR}\frac{\tau}{2} \quad \text{โดยที่ } \lambda_{A/PR} = \sqrt[3]{\lambda_A^2 + \lambda_{PR}} \\
 &= 1.04e-3 \\
 PFD_{avg,CV} &= \frac{1}{3}((1-\beta_{CV})\lambda_{CV}\tau)^2 + \beta_{CV}\lambda_{CV}\frac{\tau}{2} = 4.47e-5 \\
 PFD_{avg,KV} &= \frac{1}{3}((1-\beta_{KV})\lambda_{KV}\tau)^2 + \beta_{KV}\lambda_{KV}\frac{\tau}{2} = 4.47e-5
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วสามารถหาค่า  $PFD_{avg}$  ของฟังก์ชัน A/PR ได้ดังต่อไปนี้

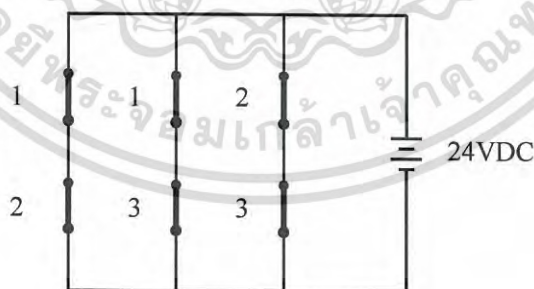
$$\begin{aligned} PFD_{avg,total} &= PFD_{avg,PB} + PFD_{avg,CS} + PFD_{avg,HPU} + PFD_{avg,POD} + PFD_{avg,A/PR} \\ &\quad + PFD_{avg,CV} + PFD_{avg,KV} \\ &= 7.87e-2 \end{aligned}$$

สังเกตว่าวิธีการที่มีการนำเสนอโดย Chung [11] ในหัวข้อนี้ถือเป็นวิธีการที่สามารถคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ได้อย่างเหมาะสมกับการทำงานอย่างมาก เนื่องจากมีการวิเคราะห์และจัดกลุ่มการโหวตของอุปกรณ์จากลักษณะของการทำงานจริงและชนิดของอุปกรณ์ แต่อย่างไรก็ตามจากบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือดังรูปที่ 2.19 และ 2.20 พบว่าวิธีการนี้จะพิจารณาให้ความผิดพลาดร่วมเกิดขึ้นทุกครั้งที่มีการจัดกลุ่มการโหวต ซึ่งในบางครั้งการพิจารณาความผิดพลาดร่วมในทุกกลุ่มอุปกรณ์อาจไม่เป็นความจริงเสมอไป โดยจะมีการกล่าวถึงกรณีเหล่านั้นในลำดับถัดไป

## 2.4 การวิเคราะห์เซตส่วนตัด

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีการนำเสนอการคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  โดยใช้เซตส่วนตัดขั้นต่ำเป็นเครื่องมือหลักในการวิเคราะห์ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีความเข้าใจในความหมายและวิธีการพิจารณาเซตส่วนตัดก่อน เซตส่วนตัดหมายถึงเซตของอุปกรณ์ที่เมื่อเกิดความผิดพลาดแล้วจะทำให้ฟังก์ชันนิรภัยเกิดความผิดพลาดตาม [17] ซึ่งสามารถวิเคราะห์ที่ได้ดังตัวอย่างการทำงานของกลุ่มอุปกรณ์ต่อไปนี้

ตัวอย่าง การวิเคราะห์เซตส่วนตัดของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ 2oo3



รูปที่ 2.21 วงจรไฟฟ้าที่มีการจัดวางแบบ 2oo3

วงจรไฟฟ้างดรูปที่ 2.21 ประกอบด้วยสวิตช์ 6 ตัวที่ทำงานตามคำสั่งหมายเลข 1 2 และ 3 โดยสมมติให้ในสภาวะพร้อมทำงานปกติสวิตช์ทั้งหมดจะอยู่ในตำแหน่งปิดวงจร (Normally close) เพื่อให้ครบวงจรไฟฟ้า แต่เมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นกับคำสั่งหรือสวิตช์หมายเลขใดจะทำให้สวิตช์ทั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สองตัวของหมายเลขนั้นเปิดวงจร (Open circuit) นั้นทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าวงจรไฟฟ้านี้จะไม่ครบวงจรหรือเกิดความไม่พร้อมใช้งาน ถ้าหากมีสวิตช์หมายเลขใดอย่างน้อย 2 หมายเลขเกิดความผิดพลาด ดังนั้นจึงทำให้สามารถวิเคราะห์เซตส่วนตัดของการทำงานนี้ได้  $\{1, 2\}$ ,  $\{1, 3\}$ ,  $\{2, 3\}$  และ  $\{1, 2, 3\}$  นอกจากเซตส่วนตัดแล้วยังมีการกล่าวถึงเซตส่วนตัดขั้นต่ำที่คือเซตส่วนตัดที่มีจำนวนอุปกรณ์ในเซตน้อยที่สุด [17] หรือไม่สามารถลดอุปกรณ์ภายในเซตแล้วทำให้ตรงตามเงื่อนไขของเซตส่วนตัดได้ ด้วยเหตุนี้จากตัวอย่างข้างต้นจึงสามารถวิเคราะห์เซตส่วนตัดขั้นต่ำได้ดังนี้  $\{1, 2\}$ ,  $\{1, 3\}$ ,  $\{2, 3\}$  เนื่องจากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับสวิตช์หมายเลขใดเพียงแค่ 2 หมายเลขก็ทำให้วงจรไฟฟ้าเกิดความไม่พร้อมใช้งานได้เช่นกัน ไม่จำเป็นต้องเกิดความผิดพลาดขึ้นกับสวิตช์ทั้งหมด สำหรับเซตส่วนตัดและเซตส่วนตัดขั้นของรูปแบบการจัดวางพื้นฐานอื่นถูกวิเคราะห์และแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เซตส่วนตัดและเซตส่วนตัดขั้นของรูปแบบการจัดวางพื้นฐาน

รูปแบบการจัดวาง	เซตส่วนตัด	เซตส่วนตัดขั้นต่ำ
1001	{1}	{1}
1002	{1, 2}	{1, 2}
2002	{1}	{1}
	{2}	{2}
	{1, 2}	{1, 2}
1003	{1, 2, 3}	{1, 2, 3}
2003	{1, 2}	{1, 2}
	{1, 3}	{1, 3}
	{2, 3}	{2, 3}
	{1, 2, 3}	{1, 2, 3}

สังเกตว่าจำนวนอุปกรณ์ภายในเซตส่วนตัดขั้นต่ำของทุกรูปแบบการจัดวางมีค่าเท่ากับ  $N-K+1$  นั้นเป็นเพราะความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์จำนวน  $N-K+1$  ตัวในกลุ่มโหนดจะทำให้ฟังก์ชันนิรภัยไม่สามารถทำงานได้ตามความต้องการ ดังนั้นจำนวนเซตส่วนตัดขั้นต่ำของแต่ละรูปแบบการจัดวางจึงสามารถวิเคราะห์ได้จากการจัดกลุ่มอุปกรณ์ตามจำนวน  $N-K+1$  ตัว หรือนั้นหมายถึงการหาค่าความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์ที่เกิดความผิดพลาด  $N-K+1$  ตัวจากจำนวนทั้งหมด  $N$  ตัว ซึ่งสมการสำหรับการคำนวณความน่าจะเป็นจะถูกกำหนดไว้ดังสมการที่ 2.30 แต่สมการนี้จะสามารถประยุกต์ใช้ได้กับการทำงานของกลุ่มอุปกรณ์ที่สู่มการเกิดความผิดพลาดเท่านั้น ส่วนการทำงานแบบไม่สู่มความผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาดหรือที่เรียกว่าการทำงานแบบมีเงื่อนไข เขตส่วนตัดชั้นต่ำจะต้องมีการวิเคราะห์จากการทำงานจริงของฟังก์ชันนั้น โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ทั่วไปตามที่กล่าวไปข้างต้น

$${}_N C_{N-K+1} = \frac{N!}{(N-K+1)!(K-1)!} \quad (2.30)$$

การวิเคราะห์เขตส่วนตัดชั้นต่ำจะทำให้สามารถพิจารณากลุ่มอุปกรณ์หรือฟังก์ชันนिरภัยจากการทำงานจริง จึงมีความเหมาะสมที่จะนำวิธีการนี้มาใช้ในการวิเคราะห์กลุ่มอุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบไม่สม่ำเสมอผิดพลาด เนื่องจากการพิจารณาแบบทั่วไปให้ผลลัพธ์ที่ไม่เหมาะสม โดยกรณีศึกษาของกลุ่มอุปกรณ์แบบไม่สม่ำเสมอผิดพลาดนี้จะมีการกล่าวถึงในบทที่ถัดไปของวิทยานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบและการทดลอง

จากความเป็นมาและความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการคำนวณค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ KooN ในบทที่ผ่านมาได้เป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้เกิดแนวความคิดในการศึกษาและออกแบบวิธีการสำหรับวิเคราะห์ค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบไม่สุ่มความผิดพลาดหรือมีเงื่อนไขในบทนี้ ซึ่งนอกจากการวิเคราะห์การทำงานแบบไม่สุ่มความผิดพลาดแล้วยังต้องสามารถวิเคราะห์การทำงานแบบสุ่มความผิดพลาดและให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับสูตรพื้นฐานตามมาตรฐาน IEC 61508-6 [2] ได้ด้วย โดยในบทที่ 3 นี้มีการแบ่งการนำเสนอออกเป็นสองส่วนหลักคือ การออกแบบวิธีการคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  จากการวิเคราะห์สูตรทั่วไปของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ 1ooM และ KooN และการนำไปวิธีการที่พัฒนาไปทดลองประยุกต์ใช้กับกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบพื้นฐานและกรณีศึกษาที่มีเงื่อนไขการทำงาน 2 กรณี

#### 3.1 การวิเคราะห์ $PFD_{avg}$ สำหรับการจัดวางแบบ 1ooM

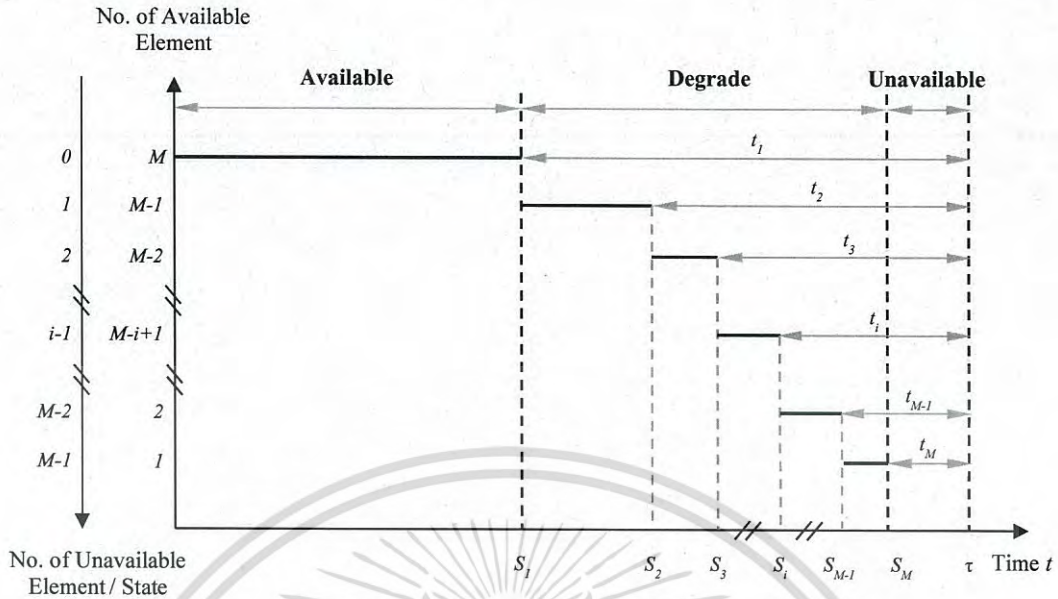
เมื่อย้อนกลับไปยังหัวข้อที่ 2.2.1.1 ที่แสดงถึงการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานจะพบว่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ 1ooM เป็นไปดังสมการที่ 2.17

$$PFD_{avg,1ooM} = \frac{(\lambda_{DU}\tau)^M}{M+I} \quad ; M = 1,2,3,\dots$$
$$= \prod_{i=1}^M (M-i+I)\lambda_{DU}\left(\frac{\tau}{i+I}\right) \quad (3.1)$$

สังเกตว่าสมการข้างต้นประกอบด้วยเทอมหลัก 3 เทอมนั้นคือจำนวนอุปกรณ์ อัตราความผิดพลาดอันตรายและเวลา โดยจากรูปแบบการลดชั้นตามหัวข้อที่ 2.2.3 การทำงานของระบบที่มีการจัดวางแบบ 1ooM สามารถถูกวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 3.1 ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สามารถแสดงความหมายของแต่ละเทอมในสมการที่ 3.1 ได้ดังต่อไปนี้

1.  $(M-i+I)$  หมายถึงจำนวนอุปกรณ์ที่พร้อมใช้งานก่อนที่จะเกิดความผิดพลาดครั้งที่  $i$  หรือก่อนที่จะเปลี่ยนสถานะจาก  $i-1$  เป็น  $i$
2.  $\lambda_{DU}$  หมายถึงอัตราการเกิดความผิดพลาดของอุปกรณ์หนึ่งตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 การลดชั้นของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ 1๐๐M

3.  $\tau / (i + 1)$  หมายถึงค่าเฉลี่ยช่วงเวลาหลังเกิดความผิดพลาดครั้งที่  $i$  ไปจนถึงการทดสอบครั้งต่อไป หรือค่าเฉลี่ยเวลาที่กลุ่มอุปกรณ์ยังอยู่ในสถานะโดยมีอุปกรณ์จำนวน  $i$  ตัวที่เกิดความผิดพลาดอันตรายแบบตรวจจับไม่ได้

และสามารถจัดรูปใหม่เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้นได้ดังสมการที่ 3.2 โดยที่สมการยังคงการแบ่งเทอมออกเป็น 3 เทอมตามสมการที่ 3.1

$$PFD_{avg, 100M} = M! \times (\lambda_{DU})^M \times \prod_{i=1}^M \left( \frac{\tau}{i+1} \right) \tag{3.2}$$

3.1.1 ความผิดพลาดอิสระของการจัดวางแบบ 1๐๐M

ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ 1๐๐M ตามสมการข้างต้นจะพิจารณาให้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์มาจากความผิดพลาดอันตรายที่ตรวจจับไม่ได้เท่านั้น อีกทั้งยังพิจารณาให้การตรวจจับและซ่อมแซมอุปกรณ์สามารถจัดการได้ภายในช่วงเวลาการทดสอบ  $\tau$  แต่ในการทำงานจริงของอุปกรณ์มักไม่เป็นเช่นนั้น ซึ่งสามารถศึกษาได้จากหัวข้อ 2.2.4 การพิจารณาผลกระทบของการซ่อมแซมและการตรวจจับความผิดพลาด จึงทำให้สมการที่ 3.2 มีการเปลี่ยนแปลงไปดังสมการต่อไปนี้ โดยในที่นี้สมมติให้เวลาที่ใช้ในการทดสอบ PTT มีค่าน้อยกว่าเวลาที่ใช้ในการซ่อมแซมอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$PFD_{avg,100M} = M! \times (\lambda_D)^M \times \prod_{i=1}^M t_i \quad ; t_i = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{\tau}{i+1} + MRT \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTTR \quad (3.3)$$

ยิ่งไปกว่านั้นความผิดพลาดของกลุ่มอุปกรณ์ยังมีการแบ่งออกเป็นความผิดพลาดร่วมและความผิดพลาดอิสระ โดยมีตัวประกอบ  $\beta$  และ  $\beta_D$  ที่แทนสัดส่วนของความผิดพลาดร่วมที่ตรวจจับไม่ได้ และตรวจจับได้ตามลำดับ เป็นตัวแปรในการแบ่งอัตราความผิดพลาดร่วมและอิสระที่เกิดขึ้นตามการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 2.2.5 ดังนั้นค่า  $PFD_{avg}$  จากผลของความผิดพลาดอิสระของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดเรียงแบบ 100M จึงมีค่าเท่ากับ

$$PFD_{IND,100M} = M! \times ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^M \times \prod_{i=1}^M t_i \quad (3.4)$$

ซึ่งจากสมการที่ 2.28 ทำให้สามารถสรุปสูตรสำหรับคำนวณค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบ 100M ได้ดังสมการที่ 3.5 โดยค่า  $PFD_{avg}$  ที่เป็นผลมาจากความผิดพลาดร่วมจะมีค่าตามสมการที่ 2.25 เนื่องจากการเกิดความผิดพลาดร่วมขึ้นเพียงหนึ่งครั้งจะส่งผลให้ฟังก์ชันนิรภัยทั้งหมดเกิดความไม่พร้อมใช้งาน จึงพิจารณาให้มีค่าคงที่สำหรับทุกรูปแบบการจัดวาง

$$\begin{aligned} PFD_{avg,100M} &= PFD_{IND} + PFD_{CCF} \\ &= M! \times ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^M \times \prod_{i=1}^M t_i \\ &\quad + \beta\lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + PTT + MRT \right) + \beta_D\lambda_{DD}MTTR \end{aligned} \quad (3.5)$$

### 3.2 การวิเคราะห์การจัดวางแบบ KooN

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบสุ่มความผิดพลาด โดยเมื่อพิจารณาสูตรทั่วไปสำหรับคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ของการจัดวางแบบ 100M และ KooN ดังสมการที่ 3.4 และ 2.27 ตามลำดับ สังเกตว่าสมการทั้งสองมีส่วนที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งถ้าจัดรูปสมการที่ 2.27 ใหม่ให้อยู่ในเทอมของการจัดวางแบบ 100M จะทำให้ได้สูตรทั่วไปของการจัดวางแบบ KooN ดังสมการที่ 3.6

$$PFD_{IND,KooN} = \prod_{i=1}^{N-K+1} (N-i+1)((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD}) t_i$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
&= (K(K+1)\dots(N-1)N)((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^{N-K+1} \times \prod_{i=1}^{N-K+1} t_i \\
&= \left( \frac{N!}{(K-1)!} \right) ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^{N-K+1} \times \prod_{i=1}^{N-K+1} t_i \\
&= \frac{N!}{(N-K+1)(K-1)!} \times (N-K+1)! ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^{N-K+1} \times \prod_{i=1}^{N-K+1} t_i \\
&= \frac{N!}{(N-K+1)(K-1)!} \times PFD_{IND,100(N-K+1)} \quad (3.6)
\end{aligned}$$

สมการที่ 3.6 แสดงให้เห็นว่าสูตรทั่วไปของการจัดวางแบบ KooN เป็นผลคูณระหว่างค่าคงที่จำนวนหนึ่งกับค่า  $PFD_{avg}$  ของการจัดวางแบบ 1oo(N-K+1) โดยที่ค่าคงที่นี้เท่ากับจำนวนเซตส่วนตัดขั้นต่ำที่สามารถวิเคราะห์ได้จากการทำงานของกลุ่มอุปกรณ์  ${}_N C_{N-K+1}$  ที่ถูกกำหนดไว้ในหัวข้อที่ 2.4 ดังนั้นจึงสามารถกำหนดสมมติฐานได้ว่าค่า  $PFD_{avg}$  ของการจัดวางแบบ KooN ที่สุ่มความผิดพลาดในการทำงานเป็นผลมาจากค่า  $PFD_{avg}$  ของการจัดวางแบบ 1oo(N-K+1) และจำนวนเซตส่วนตัดขั้นต่ำที่สามารถตรวจสอบสมมติฐานนี้ได้ด้วยการวิเคราะห์ค่า  $PFD_{avg}$  ของการจัดวางแบบพื้นฐานตั้งหัวข้อย่อต่อไปนี้

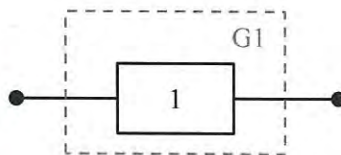
### 3.2.1 การจัดวางแบบ 1oo1

การจัดวางแบบ 1oo1 ประกอบไปด้วยอุปกรณ์จำนวน 1 ตัว ด้วยเหตุนี้ความผิดพลาดของอุปกรณ์จึงเท่ากับความผิดพลาดของฟังก์ชันนิรภัย และทำให้สามารถพิจารณาเซตส่วนตัดและเซตส่วนตัดขั้นต่ำของ 1oo1 ได้ดังตารางที่ 3.1 โดยสมมติให้เลขภายในเซตบ่งชี้ถึงหมายเลขของอุปกรณ์

ตารางที่ 3.1 เซตส่วนตัดและเซตส่วนตัดขั้นต่ำของ 1oo1

เซตส่วนตัด	เซตส่วนตัดขั้นต่ำ
{1}	{1}

ซึ่งสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือจากเซตส่วนตัดขั้นต่ำได้ตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของการจัดวางแบบ 1oo1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากรูปแบบการจัดวางนี้เป็นการไหลแบบ 1o0M จึงสามารถคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ได้จากสมการที่ 3.5 ซึ่งให้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\begin{aligned} PFD_{avg,1001} &= PFD_{avg,G1} + PFD_{CCF} \\ &; PFD_{avg,G1} = PFD_{IND,1001} \\ &= 1 \times PFD_{IND,1001} + PFD_{CCF} \end{aligned} \quad (3.7)$$

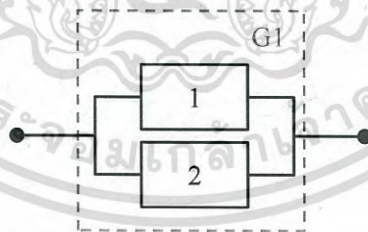
$$\begin{aligned} &= 1 \times 1 \times ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD}) \times t_1 + PFD_{CCF} \quad ; \beta = \beta_D = 0 \\ &= (\lambda_{DU} + \lambda_{DD}) t_1 \end{aligned} \quad (3.8)$$

### 3.2.2 การจัดวางแบบ 1o02

การจัดวางแบบ 1o02 ประกอบไปด้วยอุปกรณ์จำนวน 2 ตัวที่ทำงานแบบซ้ำซ้อน โดยที่ฟังก์ชันนิรภัยจะพร้อมทำงานถ้าหากมีอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งพร้อมทำงาน แต่ถ้าอุปกรณ์ทั้งสองตัวทำงานผิดพลาดก็จะทำให้ฟังก์ชันทำงานผิดพลาดด้วย จึงทำให้สามารถพิจารณาเซตส่วนตัดและเซตส่วนตัดขั้นต่ำของ 1o02 ได้ดังตารางที่ 3.2 และสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือจากเซตส่วนตัดขั้นต่ำได้ตามรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 เซตส่วนตัดและเซตส่วนตัดขั้นต่ำของ 1o02

เซตส่วนตัด	เซตส่วนตัดขั้นต่ำ
{1, 2}	{1, 2}



รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของการจัดวางแบบ 1o02

เนื่องจากรูปแบบการจัดวางนี้เป็นการไหลแบบ 1o0M จึงสามารถคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ได้จากสมการที่ 3.5 ซึ่งให้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\begin{aligned} PFD_{avg,1002} &= PFD_{avg,G1} + PFD_{CCF} \\ &; PFD_{avg,G1} = PFD_{IND,1002} \\ &= 1 \times PFD_{IND,1002} + PFD_{CCF} \end{aligned} \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= I \times 2 \times ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^2 \times t_1 t_2 + PFD_{CCF} \\
 &= 2((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^2 t_1 t_2 + \beta\lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + PTT + MRT \right) + \beta_D \lambda_{DD} MTTR
 \end{aligned}$$

(3.10)

### 3.2.3 การจัดวางแบบ 2o2

การจัดวางแบบ 2o2 ประกอบไปด้วยอุปกรณ์จำนวน 2 ตัวที่ต้องพร้อมทำงานทั้งคู่ถึงทำให้ฟังก์ชันนิรภัยพร้อมใช้งาน จึงทำให้สามารถพิจารณาเขตส่วนตัดและเขตส่วนตัดขั้นต่ำของ 2o2 ได้ดังตารางที่ 3.3 และสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือจากเขตส่วนตัดขั้นต่ำได้ตามรูปที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 เขตส่วนตัดและเขตส่วนตัดขั้นต่ำของ 2o2

เขตส่วนตัด	เขตส่วนตัดขั้นต่ำ
{1}	{1}
{2}	{2}
{1, 2}	



รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของการจัดวางแบบ 2o2

เมื่อพิจารณabloกไดอะแกรมจะสามารถหาค่า  $PFD_{avg}$  ของการจัดวางแบบ 2o2 ได้เท่ากับ

$$\begin{aligned}
 PFD_{avg,2o2} &= PFD_{avg,G1} + PFD_{avg,G2} + PFD_{CCF} \\
 &; PFD_{avg,G1} = PFD_{avg,G2} = PFD_{IND,1o1} \\
 &= 2 \times PFD_{IND,1o1} + PFD_{CCF}
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

$$\begin{aligned}
 &= 2 \times I \times ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD}) \times t_1 + PFD_{CCF} \quad ; \beta = \beta_D = 0 \\
 &= 2(\lambda_{DU} + \lambda_{DD}) t_1
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

### 3.2.4 การจัดวางแบบ 1o3

การจัดวางแบบ 1o3 ประกอบไปด้วยอุปกรณ์จำนวน 3 ตัวที่ทำงานแบบซ้ำซ้อน โดยที่ฟังก์ชันนิรภัยจะพร้อมทำงานถ้าหากมีอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งพร้อมทำงาน แต่ถ้าอุปกรณ์ทั้งหมด

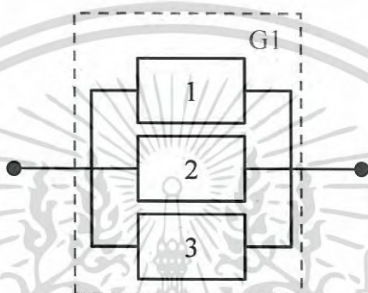
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิดพลาดก็จะทำให้ฟังก์ชันทำงานผิดพลาดด้วย จึงทำให้สามารถพิจารณาเซตส่วนตัดและเซตส่วนตัด  
 ขั้นต่ำของ 1oo3 ได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 เซตส่วนตัดและเซตส่วนตัดขั้นต่ำของ 1oo3

เซตส่วนตัด	เซตส่วนตัดขั้นต่ำ
{1, 2, 3}	{1, 2, 3}

ซึ่งสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือจากเซตส่วนตัดขั้นต่ำได้ตามรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของการจัดวางแบบ 1oo3

เนื่องจากรูปแบบการจัดวางนี้เป็นการโหวตแบบ 1ooM จึงสามารถคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ได้จากสมการ  
 ที่ 3.5 ซึ่งให้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\begin{aligned}
 PFD_{avg,1oo3} &= PFD_{avg,G1} + PFD_{CCF} \\
 &; PFD_{avg,G1} = PFD_{IND,1oo3} \\
 &= 1 \times PFD_{IND,1oo3} + PFD_{CCF}
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

$$\begin{aligned}
 &= 1 \times 6 \times ((1 - \beta)\lambda_{DU} + (1 - \beta_D)\lambda_{DD})^3 \times t_1 t_2 t_3 + PFD_{CCF} \\
 &= 6((1 - \beta)\lambda_{DU} + (1 - \beta_D)\lambda_{DD})^3 t_1 t_2 t_3 + \beta \lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + PTT + MRT \right) + \beta_D \lambda_{DD} MTTR
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

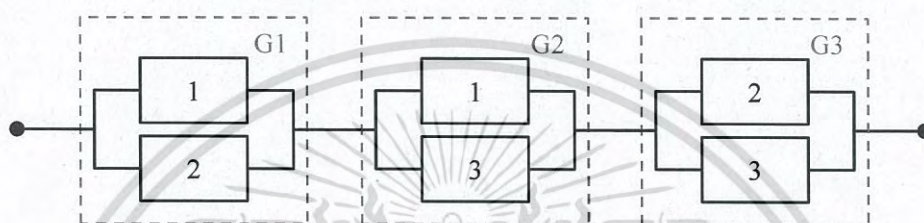
### 3.2.5 การจัดวางแบบ 2oo3

การจัดวางแบบ 2oo3 ประกอบไปด้วยอุปกรณ์จำนวน 3 ตัวที่ต้องพร้อมทำงานอย่างน้อย 2  
 ตัวถึงทำให้ฟังก์ชันนิรภัยพร้อมใช้งาน จึงทำให้สามารถพิจารณาเซตส่วนตัดและเซตส่วนตัดขั้นต่ำของ  
 2oo3 ได้ดังตารางที่ 3.5 และสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือจากเซตส่วนตัดขั้นต่ำ  
 ได้ตามรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 เขตส่วนตัดและเขตส่วนตัดขั้นต่ำของ 2๐๐3

เขตส่วนตัด	เขตส่วนตัดขั้นต่ำ
{1, 2}	{1, 2}
{1, 3}	{1, 3}
{2, 3}	{2, 3}
{1, 2, 3}	



รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของการจัดวางแบบ 2๐๐3

เมื่อพิจารณาบล็อกไดอะแกรมจะสามารถหาค่า  $PFD_{avg}$  ของการจัดวางแบบ 2๐๐3 ได้เท่ากับ

$$PFD_{avg,2002} = PFD_{avg,G1} + PFD_{avg,G2} + PFD_{avg,G3} + PFD_{CCF}$$

$$; PFD_{avg,G1} = PFD_{avg,G2} = PFD_{avg,G3} = PFD_{IND,1002}$$

$$= 3 \times PFD_{IND,1002} + PFD_{CCF} \quad (3.15)$$

$$= 3 \times 2 \times ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^2 \times t_1 t_2 + PFD_{CCF}$$

$$= 6((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^2 t_1 t_2 + \beta\lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + PTT + MRT \right) + \beta_D\lambda_{DD} MTTR \quad (3.16)$$

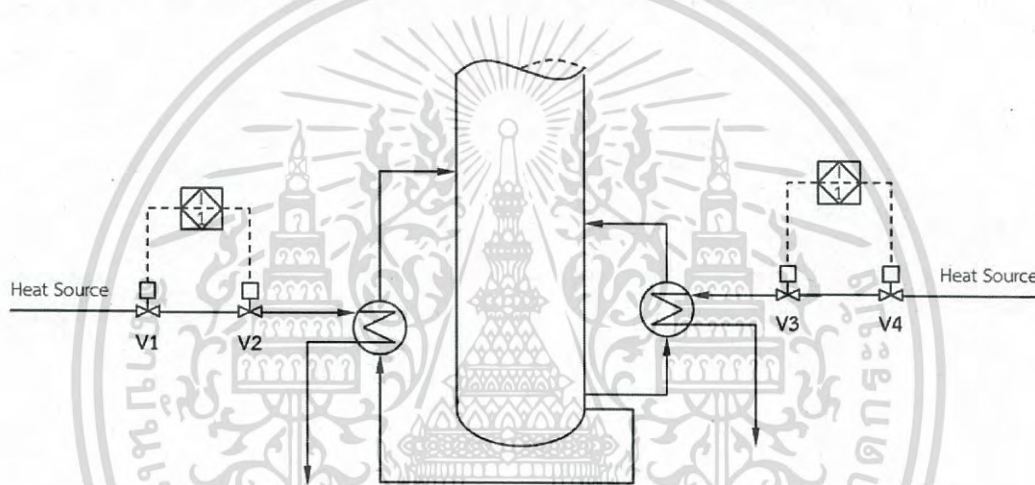
จากการตรวจสอบค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบพื้นฐานด้วยการวิเคราะห์เขตส่วนตัดขั้นต่ำเพื่อหาจำนวนของเขตตามข้างต้น พบว่าค่า  $PFD_{avg}$  ที่ขึ้นกับความผิดพลาดอิสระในสมการที่ 3.7, 3.9, 3.11, 3.13 และ 3.15 มีความสอดคล้องกับสูตรทั่วไปของการจัดวางแบบ KooN ตามสมการที่ 3.6 ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการวิเคราะห์เขตส่วนตัดขั้นต่ำของกลุ่มอุปกรณ์ร่วมกับสูตรทั่วไป 1๐๐M สามารถประยุกต์ใช้ในการคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่ทำงานแบบสุ่มความผิดพลาดได้ โดยให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับสูตรทั่วไป KooN ซึ่งสำหรับกลุ่มอุปกรณ์ที่ทำงานแบบไม่สุ่มความผิดพลาดจะมีการนำวิธีการนี้ไปประยุกต์ใช้ในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การวิเคราะห์กรณีศึกษาที่มีเงื่อนไขการทำงาน

การทำงานของกลุ่มอุปกรณ์แบบไม่สุ่มความผิดพลาดเป็นการทำงานที่ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ซึ่งแตกต่างจากการทำงานแบบสุ่มความผิดพลาด ดังนั้นการวิเคราะห์การทำงานรูปแบบนี้จึงจำเป็นต้องวิเคราะห์เป็นรายกรณี ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สูตรทั่วไป KooN ตามที่กล่าวไปในหัวข้อก่อนหน้านี้ไม่สามารถวิเคราะห์การทำงานได้อย่างเหมาะสม ในหัวข้อนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์เซตส่วนตัดชั้นต่ำกับกรณีศึกษาที่มีเงื่อนไขการทำงานที่ได้มีการยกตัวอย่างมาทั้งหมด 2 กรณีคือ ระบบการตัดแหล่งให้ความร้อนของเครื่องต้มฆ่า และระบบป้องกันความดันเกินในหลุมก๊าซธรรมชาติ

#### 3.3.1 กรณีศึกษาที่ 1: ระบบการตัดแหล่งให้ความร้อนของเครื่องต้มฆ่า



รูปที่ 3.7 ระบบการตัดแหล่งให้ความร้อนของเครื่องต้มฆ่า

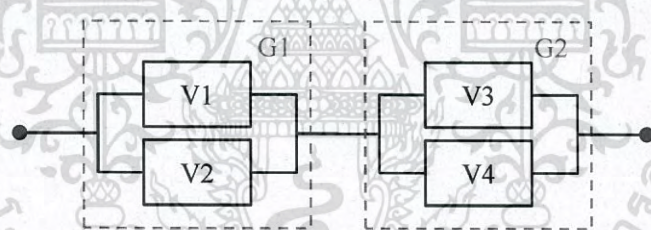
กรณีศึกษานี้แนะนำการตรวจสอบค่า  $PFD_{avg}$  ของอุปกรณ์สุดท้ายนั้นคือวาล์วนิรภัย จากกระบวนการตามรูปที่ 3.7 พบว่ามีเครื่องต้มฆ่า 2 ตัวทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิและย้อนกลับ (Reflux) สารผลิตภัณฑ์จากส่วนล่างเข้าสู่ส่วนกลางของหม้อต้ม โดยใช้อวาล์วนิรภัย 2 ตัวจากแต่ละเครื่องต้มฆ่าในการตัดแหล่งให้ความร้อน (Heat source) เมื่อเงื่อนไขกระบวนการ (Process condition) ผิดปกติ ซึ่งวาล์วทั้งหมดจะปิดพร้อมกันด้วยคำสั่งอินเทอร์ล็อก I-1 ดังนั้นระบบการตัดแหล่งให้ความร้อนจะพร้อมทำงานหรือสามารถปิดแหล่งให้ความร้อนได้ก็ต่อเมื่อมีวาล์วอย่างน้อย 2 จาก 4 ตัวพร้อมทำงาน จึงสามารถตีความว่ากลุ่มวาล์วนิรภัยนี้มีการจัดวางแบบ 2o04 แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ให้กลุ่มวาล์วนิรภัยนี้มีการจัดวางแบบ 2o04 จะสมเหตุสมผลก็ต่อเมื่อวาล์วนิรภัย 2 ตัวใดก็ได้จาก 4 ตัวพร้อมทำงานแล้วจะทำให้ฟังก์ชันนิรภัยพร้อมทำงานหรือที่เรียกว่ามีการทำงานแบบสุ่มความผิดพลาด ซึ่งกลุ่มวาล์วนิรภัยนี้ไม่สามารถตีความให้ทำงานแบบสุ่มความผิดพลาดได้เนื่องจากวาล์วนิรภัย 2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก 4 ตัวที่พร้อมใช้งานต้องไม่ทำงานบนเครื่องต้มข้าวเดียวกันถึงจะทำให้ฟังก์ชันนิรภัยถึงพร้อมทำงาน ดังนั้นเซตส่วนตัดและเซตส่วนตัดขั้นต่ำที่วิเคราะห์จากการทำงานแบบไม่สุ่มความผิดพลาดนี้ จึงมีค่าดังตารางที่ 3.6 และสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือจากเซตส่วนตัดขั้นต่ำได้ตามรูปที่ 3.8

ตารางที่ 3.6 เซตส่วนตัดและเซตส่วนตัดขั้นต่ำของกลุ่มวาล์วนิรภัย

เซตส่วนตัด	เซตส่วนตัดขั้นต่ำ
{V1, V2}	{V1, V2}
{V3, V4}	{V3, V4}
{V1, V2, V3}	
{V1, V2, V4}	
{V1, V3, V4}	
{V2, V3, V4}	
{V1, V2, V3, V4}	



รูปที่ 3.8 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของกลุ่มวาล์วนิรภัย

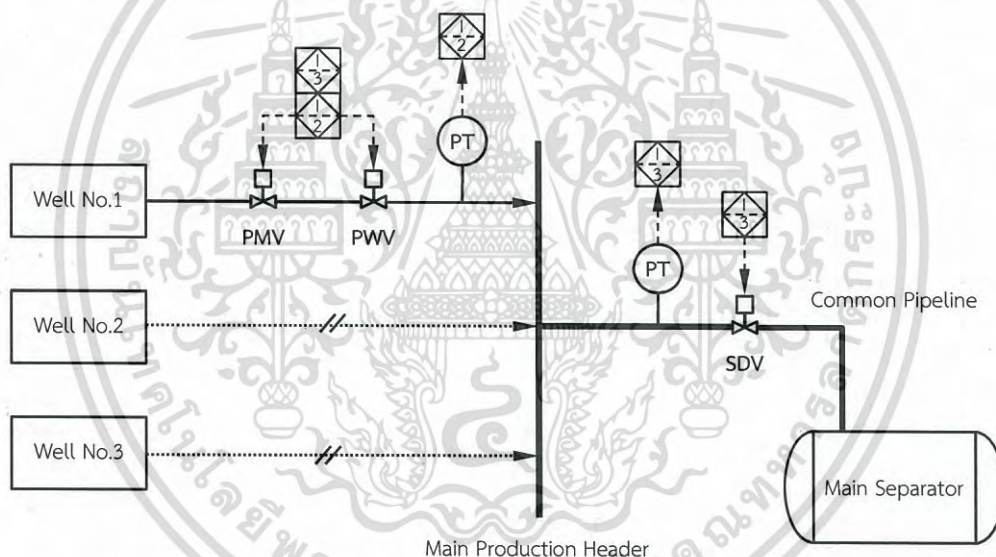
เมื่อพิจารณาบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.8 จะสามารถหาค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มวาล์วนิรภัยนี้ได้เท่ากับ

$$\begin{aligned}
 PFD_{avg,SV} &= PFD_{avg,G1} + PFD_{avg,G2} + PFD_{CCF} \\
 ; PFD_{avg,G1} &= PFD_{avg,G2} = PFD_{IND,1002} \\
 &= 2 \times PFD_{IND,1002} + PFD_{CCF} \\
 &= 2 \times 2 \times ((1 - \beta) \lambda_{DU} + (1 - \beta_D) \lambda_{DD})^2 \times t_1 t_2 + PFD_{CCF} \\
 &= 4((1 - \beta) \lambda_{DU} + (1 - \beta_D) \lambda_{DD})^2 t_1 t_2 + \beta \lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + PTT + MRT \right) + \beta_D \lambda_{DD} MTTR
 \end{aligned}
 \tag{3.17}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 กรณีศึกษาที่ 2: ระบบป้องกันความดันเกินในหลุมก๊าซธรรมชาติ

กระบวนการผลิตภายในแท่นหลุมก๊าซกลางทะเล (Wellhead platform) ถูกแสดงดังรูปที่ 3.9 โดยก๊าซธรรมชาติจากแต่ละหลุมจะถูกลำเลียงผ่านท่อของหลุมมายังท่อการผลิตหลัก (Main production header) ที่ทำหน้าที่รวมรวบก๊าซจากทุกหลุมและส่งต่อสารผลิตภัณฑ์ไปยังตัวแยกหลัก (Main separator) ในแท่นการผลิตกลางด้วยท่อส่งร่วม เพื่อแยกน้ำให้ออกจากก๊าซและน้ำมันก่อนที่จะถูกนำไปใช้ในการผลิตลำดับถัดไป สำหรับกระบวนการผลิตก๊าซธรรมชาติแล้วการควบคุมความดันภายในหลุมถือเป็นเรื่องที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากเนื่องจากความดันที่หัวหลุมมีค่าประมาณ 200 – 400 บาร์ ซึ่งถือเป็นความดันที่สูงมาก อีกทั้งก๊าซที่ถูกลำเลียงขึ้นมายังเป็นสารไวไฟที่ถ้าหากเกิดการรั่วไหลอาจทำให้เกิดเหตุการณ์อันตรายและสร้างเสียหายให้กับผู้ปฏิบัติงานและทรัพย์สินได้ ดังนั้นระบบป้องกันความดันเกินในหลุมจึงถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมความเสียหายให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด



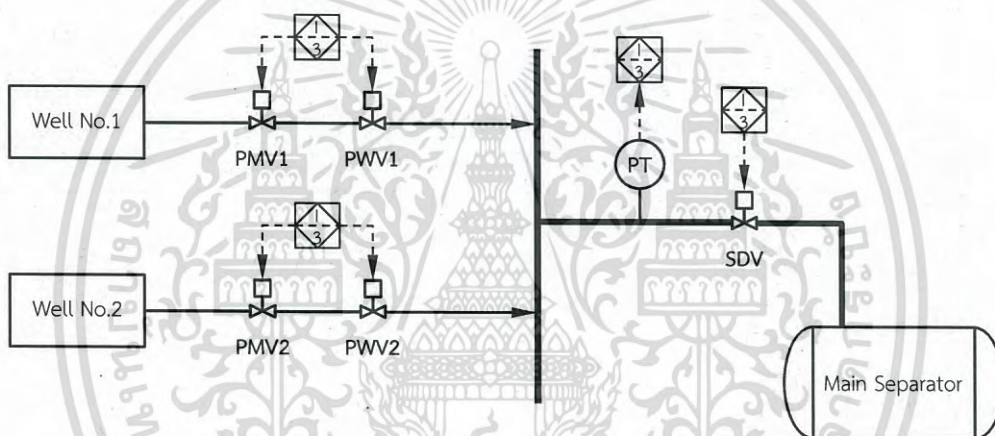
รูปที่ 3.9 ระบบป้องกันความดันเกินในหลุมก๊าซธรรมชาติ

ระบบป้องกันความดันเกินในหลุมก๊าซธรรมชาติประกอบไปด้วยวาล์วผลิตหลัก (Production master valve – PMV) และวาล์วผลิตย่อย (Production wing valve – PWV) อย่างละ 1 ตัวต่อหลุมก๊าซ รวมถึงยังมีวาล์วเปิดปิดร่วม (Common shutdown valve – SDV) 1 ตัวที่ติดตั้งบริเวณท่อส่งรวมก่อนที่จะส่งสารผลิตภัณฑ์ไปยังแท่นการผลิตกลาง โดยระบบนี้มีการทำงาน 2 ขั้นตอนหรือจำแนกเป็น 2 ฟังก์ชันนิรภัยคือ ฟังก์ชันแรกจะทำหน้าที่ป้องกันความดันเกินที่เกิดขึ้นในหลุมก่อนจะถูกส่งออกไปที่ท่อการผลิตหลักด้วยการใช้คำสั่งอินเตอร์ล๊อคที่มีต้นกำเนิดสัญญาณมาจากเซนเซอร์ตรวจวัดความดันภายในท่อลำเลียงของแต่ละหลุม จากตัวอย่างในรูปที่ 3.9 พบว่าคำสั่งอินเตอร์ล๊อค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I-2 จะทำหน้าที่ควบคุมให้วาล์วผลิตหลักและวาล์วผลิตย่อยที่ทำงานในหลุมที่ 1 ปิดเพื่อไม่ให้ความดันสูงเข้าไปยังท่อการผลิตหลัก ส่วนฟังก์ชันที่สองจะใช้สำหรับป้องกันท่อส่งร่วมที่ทำหน้าที่ลำเลียงสารผลิตภัณฑ์จากท่อการผลิตหลักไปยังแท่นการผลิตกลาง ซึ่งจากรูปที่ 3.9 ฟังก์ชันนี้จะเริ่มต้นทำงานด้วยคำสั่งอินเทอร์ล็อก I-3 ที่รับสัญญาณมาจากเซนเซอร์ตรวจวัดความดันภายในท่อส่งร่วม และส่งการควบคุมไปยังวาล์วผลิตหลัก วาล์วผลิตย่อย และวาล์วเปิดปิดร่วมของทุกหลุมให้ทำการปิดเพื่อไม่ให้ความดันสูงเข้าไปยังท่อส่งร่วมที่เป็นท่อความดันต่ำ

กรณีศึกษาที่กำหนดให้มีหลุมก๊าซอยู่ทั้งหมด 2 หลุมที่จะส่งสารผลิตภัณฑ์ไปยังแท่นการผลิตกลาง และมีการวิเคราะห์ค่า  $PFD_{avg}$  เฉพาะอุปกรณ์สุดท้ายนั้นคือวาล์วผลิตหลัก วาล์วผลิตย่อย และวาล์วเปิดปิดร่วมของฟังก์ชันที่สอง ซึ่งสามารถแสดงการทำงานของกลุ่มวาล์วได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การทำงานของกลุ่มวาล์วในฟังก์ชันนิรภัยที่สอง

จากการพิจารณาการทำงานของกลุ่มวาล์วนี้พบว่าฟังก์ชันนิรภัยจะพร้อมใช้งานก็ต่อเมื่อมีวาล์วผลิตหลักหรือวาล์วผลิตย่อยตัวใดตัวหนึ่งจำนวน 1 ตัวของแต่ละหลุมพร้อมทำงาน หรือก็ต่อเมื่อวาล์วเปิดปิดร่วมพร้อมทำงาน ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์เขตส่วนตัดและเขตส่วนตัดขั้นต่ำได้ดังตารางที่ 3.7 และสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือจากเขตส่วนตัดขั้นต่ำได้ตามรูปที่ 3.11

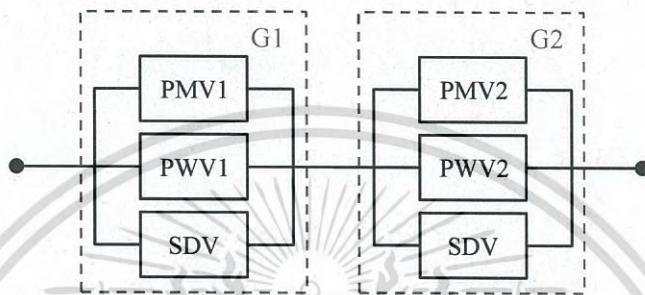
ตารางที่ 3.7 เขตส่วนตัดและเขตส่วนตัดขั้นต่ำของกลุ่มวาล์ว

เขตส่วนตัด	เขตส่วนตัดขั้นต่ำ
{PMV1, PWV1, SDV}	{ PMV1, PWV1, SDV}
{PMV2, PWV2, SDV}	{ PMV2, PWV2, SDV}
{PMV1, PWV1, PMV2, SDV}	
{PMV1, PWV1, PWV2, SDV}	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 เขตส่วนตัดและเขตส่วนตัดขั้นต่ำของกลุ่มวาล์ว (ต่อ)

เขตส่วนตัด	เขตส่วนตัดขั้นต่ำ
{PMV1, PMV2, PWV2, SDV}	
{PWV1, PMV2, PWV2, SDV}	
{PMV1, PWV1, PMV2, PWV2, SDV}	



รูปที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของกลุ่มวาล์ว

เมื่อพิจารณาบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.11 และกำหนดให้อุปกรณ์ชนิดเดียวกันมีอัตราความผิดพลาดอันตรายที่ตรวจจับได้และไม่ได้เท่ากันคือ  $\lambda_{PMV} = \lambda_{PMV1} = \lambda_{PMV2}$  และ  $\lambda_{PWV} = \lambda_{PWV1} = \lambda_{PWV2}$  จะทำให้สามารถหาค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มวาล์วนี้ได้เท่ากับ

$$\begin{aligned}
 PFD_{avg,V} &= PFD_{avg,G1} + PFD_{avg,G2} + PFD_{CCF} \\
 &; PFD_{avg,G1} = PFD_{avg,G2} = PFD_{IND,1003} \\
 &= 2 \times PFD_{IND,1003} + PFD_{CCF} \\
 &= 2 \times 6 \times ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^3 \times t_1 t_2 t_3 + PFD_{CCF} \\
 &; \lambda_{DU} = \sqrt[3]{\lambda_{DU,PMV} \times \lambda_{DU,PWV} \times \lambda_{DU,SDV}} \\
 &; \lambda_{DD} = \sqrt[3]{\lambda_{DD,PMV} \times \lambda_{DD,PWV} \times \lambda_{DD,SDV}} \\
 &= 12((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^3 t_1 t_2 t_3 + \beta \lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + PTT + MRT \right) + \beta_D \lambda_{DD} MTTR
 \end{aligned}$$

(3.18)

## บทที่ 4

### การอภิปรายผลการทดลอง

จากการออกแบบวิธีการวิเคราะห์ค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบไม่สุ่ม ความผิดพลาดในบทที่ 3 พบว่ามีการเลือกใช้เซตส่วนตัดขั้นต่ำร่วมกับบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือเป็นวิธีการวิเคราะห์การทำงานของกลุ่มอุปกรณ์ โดยมีการทดลองประยุกต์ใช้วิธีการนี้กับกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการจัดวางแบบพื้นฐานและกรณีศึกษาที่มีเงื่อนไขการทำงานจำนวน 2 กรณีแล้วให้ผลลัพธ์ค่า  $PFD_{avg}$  ในเชิงสมการ ดังนั้นเพื่อให้สามารถพิจารณาผลการทดลองได้ง่ายขึ้น ในบทนี้จึงมีการคำนวณผลลัพธ์เชิงตัวเลขด้วยการแทนค่าตัวแปรลงในสมการผลลัพธ์  $PFD_{avg}$  อีกทั้งอภิปรายถึงความถูกต้องและความเหมาะสมของค่า  $PFD_{avg}$  ที่ได้โดยการเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากสูตรพื้นฐานตามมาตรฐาน IEC 61508-6 [2] และผลลัพธ์จากวิธีการอื่นที่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการกล่าวมาแล้วนั่นคือสูตรทั่วไป KooN ของ Jahanian [9] และวิธีการบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของ Chung [11]

#### 4.1 รูปแบบการจัดวางแบบพื้นฐาน

จากการทดลองตรวจสอบวิธีการวิเคราะห์เซตส่วนตัดขั้นต่ำโดยการประยุกต์ใช้กับรูปแบบการจัดวางแบบพื้นฐานในหัวข้อที่ 3.2.1 ถึง 3.2.5 สามารถเขียนสรุปและเปรียบเทียบผลการทดลองเชิงสมการกับสูตรทั่วไปตามมาตรฐาน IEC 61508-6 [2] ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่า  $PFD_{avg}$  เชิงสมการของการจัดวางแบบพื้นฐาน

KooN	ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งาน ( $PFD_{avg}$ )	
	มาตรฐาน IEC 61508-6	วิธีการเซตส่วนตัดขั้นต่ำ
1001	$(\lambda_{DU} + \lambda_{DD})t_{CE}$	$(\lambda_{DU} + \lambda_{DD})t_1$
1002	$2((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^2 t_{CE} t_{GE} + PFD_{CCF}$	$2((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^2 t_1 t_2 + PFD_{CCF}$
2002	$2(\lambda_{DU} + \lambda_{DD})t_{CE}$	$2(\lambda_{DU} + \lambda_{DD})t_1$
1003	$6((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^3 t_{CE} t_{GE} t_{G2E} + PFD_{CCF}$	$6((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^3 t_1 t_2 t_3 + PFD_{CCF}$
2003	$6((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^2 t_{CE} t_{GE} + PFD_{CCF}$	$6((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^2 t_1 t_2 + PFD_{CCF}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $PF_{CCF}$  มีค่าดังสมการที่ 2.25 และ  $t_i$  มีค่าดังสมการที่ 2.23 เมื่อพิจารณาให้เวลาในการตรวจจับความผิดพลาดมีค่าน้อยมากจะสามารถพิสูจน์ได้ว่า

$$t_1 = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{\tau}{2} + PTT + MRT \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTTR \approx \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{\tau}{2} + MRT \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTTR = t_{CE}$$

$$t_2 = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{\tau}{3} + PTT + MRT \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTTR \approx \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{\tau}{3} + MRT \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTTR = t_{GE}$$

$$t_3 = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{\tau}{4} + PTT + MRT \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTTR \approx \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{\tau}{4} + MRT \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTTR = t_{G2E}$$

สังเกตว่าค่า  $PF_{avg}$  ของรูปแบบการจัดวางพื้นฐานที่ได้จากวิธีการเซตส่วนตัดชั้นต่ำมีสมการเหมือนกับสูตรตามมาตรฐาน IEC 61508-6 [2] ซึ่งเมื่อกำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวในกลุ่มโหนดมีความสามารถในการวินิจฉัยตัวเอง DC เท่ากับ 90% และมีการประเมินความผิดพลาดรวม  $\beta$  และ  $\beta_D$  เท่ากับ 10% และ 5% ตามลำดับ รวมถึงมีการทดสอบทุกปีหรือ  $\tau$  เท่ากับ 8640 ชั่วโมงและใช้เวลาในการซ่อมแซม  $MRT$  และเวลาเฉลี่ยที่ฟังก์ชันกลับมาทำงานใหม่  $MTTR$  แต่ละครั้ง 8 ชั่วโมงเท่ากัน จะทำให้สามารถเปรียบเทียบค่า  $PF_{avg}$  เชิงตัวเลขของวิธีการที่นำเสนอและสูตรตามมาตรฐานได้ดังตารางที่ 4.2 และสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดอันตรายและค่า  $PF_{avg}$  เชิงตัวเลขของการจัดวางแบบ 1001, 1002, 2002, 1003 และ 2003 ได้ดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.5 ตามลำดับ โดยที่อัตราความผิดพลาดอันตรายถูกกำหนดตามตารางรายละเอียดการทำงานโหมดความต้องการต่ำใน Annex B ของมาตรฐาน IEC 61508-6 [2]

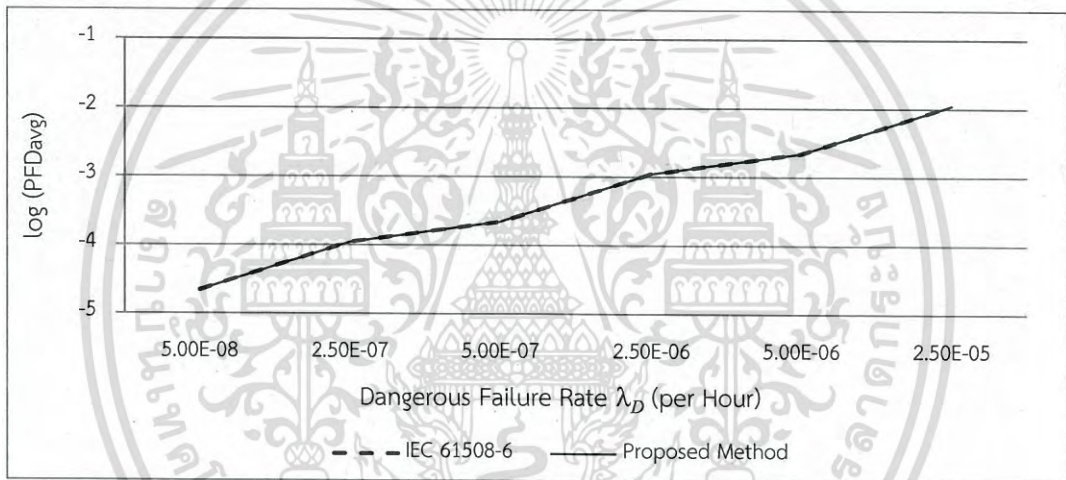
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่า  $PF_{avg}$  เชิงตัวเลขของการจัดวางแบบพื้นฐาน

KooN	ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งาน ( $PF_{avg}$ )					
$\lambda_D$	0.50E-07	2.50E-07	0.50E-06	2.50E-06	0.50E-05	2.50E-05
มาตรฐาน IEC 61508-6						
1001	2.20E-05	1.10E-04	2.20E-04	1.10E-03	2.20E-03	1.10E-02
1002	2.18E-06	1.09E-05	2.19E-05	1.11E-04	2.24E-04	1.24E-03
2002	4.40E-05	2.20E-04	4.40E-04	2.20E-03	4.40E-03	2.20E-02
1003	2.18E-06	1.09E-05	2.18E-05	1.09E-04	2.18E-04	1.09E-03
2003	2.18E-06	1.10E-05	2.20E-05	1.13E-04	2.36E-04	1.53E-03

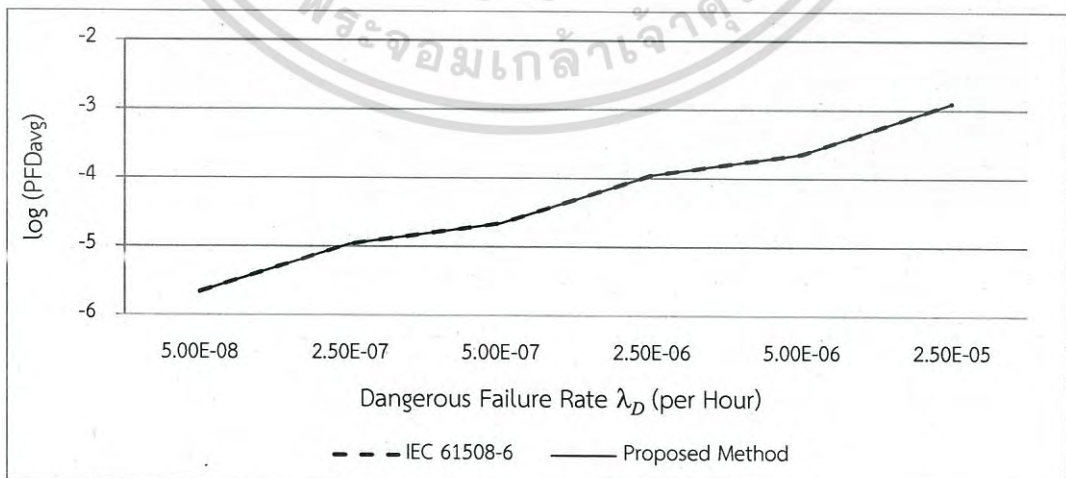
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่า PFD<sub>avg</sub> เซึ่งตัวเลขของการจัดวางแบบพื้นฐาน (ต่อ)

KooN	ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งาน (PFD <sub>avg</sub> )					
$\lambda_D$	0.50E-07	2.50E-07	0.50E-06	2.50E-06	0.50E-05	2.50E-05
วิธีการเซตส่วนตัดขั้นต่ำ						
1oo1	2.20E-05	1.10E-04	2.20E-04	1.10E-03	2.20E-03	1.10E-02
1oo2	2.18E-06	1.09E-05	2.19E-05	1.11E-04	2.24E-04	1.24E-03
2oo2	4.40E-05	2.20E-04	4.40E-04	2.20E-03	4.40E-03	2.20E-02
1oo3	2.18E-06	1.09E-05	2.18E-05	1.09E-04	2.18E-04	1.09E-03
2oo3	2.18E-06	1.10E-05	2.20E-05	1.13E-04	2.36E-04	1.53E-03

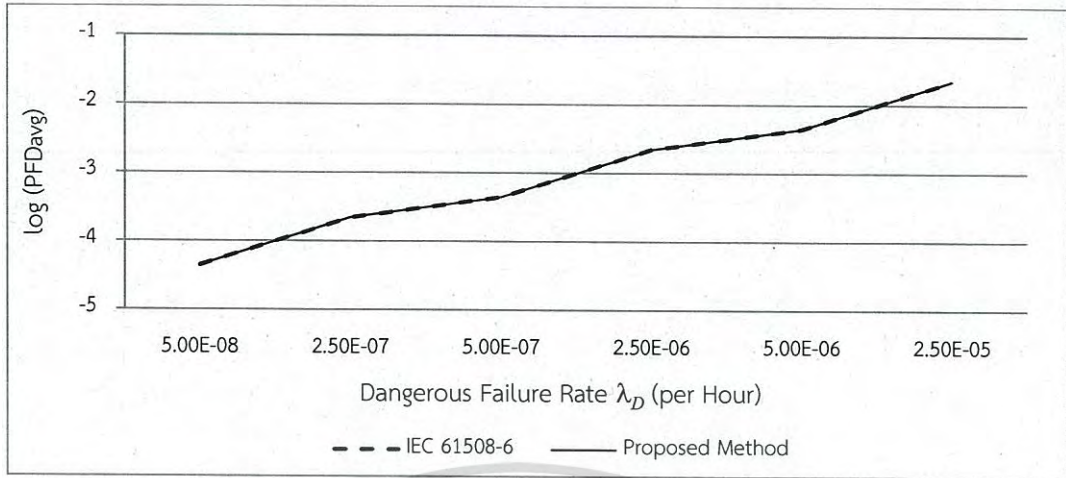


รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่า PFD<sub>avg</sub> เซึ่งตัวเลขของการจัดวางแบบ 1oo1

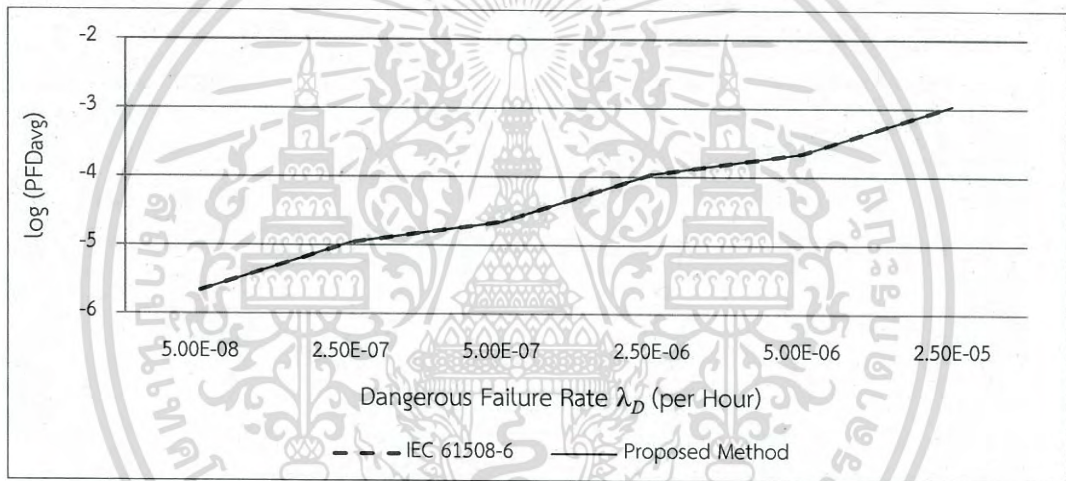


รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่า PFD<sub>avg</sub> เซึ่งตัวเลขของการจัดวางแบบ 1oo2

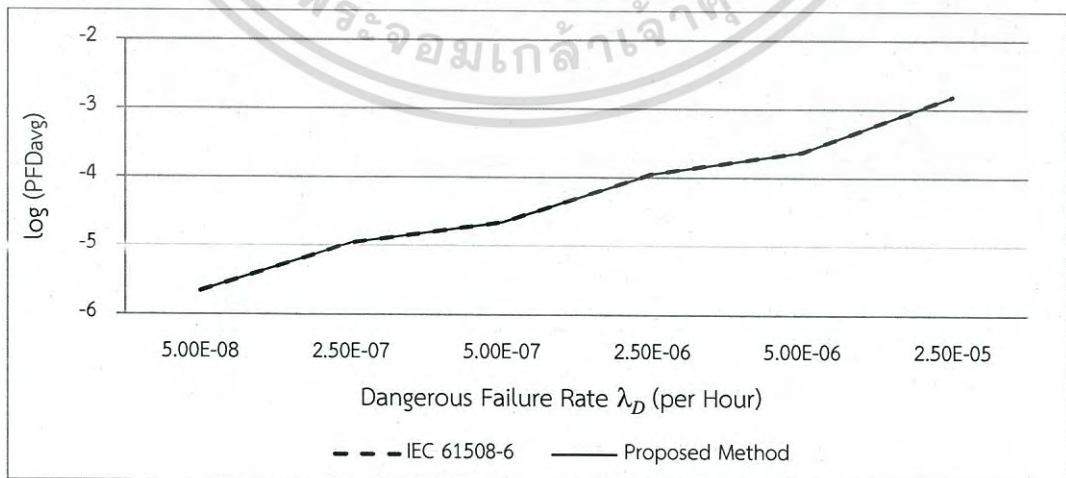
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่า PFD<sub>avg</sub> เซึ่งตัวเลขของการจัดวางแบบ 2oo2



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่า PFD<sub>avg</sub> เซึ่งตัวเลขของการจัดวางแบบ 1oo3



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่า PFD<sub>avg</sub> เซึ่งตัวเลขของการจัดวางแบบ 2oo3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงตัวเลขของรูปแบบการจัดวางพื้นฐานที่ได้จากการคำนวณด้วยสูตรตามมาตรฐาน IEC 61508-6 [2] และวิธีการเซตส่วนตัดขั้นต่ำที่รูปที่ 4.1 ถึง 4.5 พบว่ากราฟผลลัพธ์จากวิธีการทั้งสองมีค่าเท่ากันถึงแม้ว่าอัตราความผิดพลาดอันตรายเป็นการเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าวิธีการเซตส่วนตัดขั้นต่ำที่มีการนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสอดคล้องกับสูตรตามมาตรฐาน IEC 61508-6 [2] โดยให้ผลลัพธ์ที่เหมือนกันทั้งในเชิงสมการและเชิงตัวเลข สำหรับรูปแบบการจัดวาง KooN อื่นๆของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบสุมความผิดพลาดสามารถใช้วิธีการเซตส่วนตัดขั้นต่ำในการวิเคราะห์ค่า  $PFD_{avg}$  ได้เช่นกัน ซึ่งสูตรทั่วไปสำหรับคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ของการจัดวางแบบ KooN สามารถอ้างอิงได้จากสมการที่ 3.6 ที่เป็นสมการตั้งต้นของการวิเคราะห์เซตส่วนตัดขั้นต่ำ

## 4.2 กรณีศึกษาที่มีเงื่อนไขการทำงาน

เนื่องจากมาตรฐาน IEC 61508-6 [2] มีการกำหนดสูตรอย่างง่ายสำหรับการคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  เฉพาะของรูปแบบการจัดวางพื้นฐานเท่านั้น ดังนั้นการอภิปรายผลการทดลองของกรณีศึกษาที่มีเงื่อนไขการทำงานในหัวข้อนี้จึงใช้การเปรียบเทียบค่า  $PFD_{avg}$  ที่ได้จากวิธีการเซตส่วนตัดขั้นต่ำกับผลลัพธ์จากวิธีการอื่น 2 วิธีการคือสูตรทั่วไป KooN ของ Jahanian [9] ดังสมการที่ 2.29 และวิธีการบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของ Chung [11] ตามหัวข้อที่ 2.3.1 ซึ่งได้มีการแสดงวิธีการประยุกต์ใช้และผลลัพธ์เชิงสมการของกรณีศึกษานี้ในภาคผนวก ข และ ค ตามลำดับ

### 4.2.1 กรณีศึกษาที่ 1: ระบบการตัดแหล่งให้ความร้อนของเครื่องต้มข้าว

การเปรียบเทียบค่า  $PFD_{avg}$  เชิงสมการของกลุ่มวาล์วนิรภัยในระบบการตัดแหล่งให้ความร้อนของเครื่องต้มข้าวเป็นไปดังตารางที่ 4.3 ที่แสดงผลลัพธ์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการเซตส่วนตัดขั้นต่ำ สูตรทั่วไป KooN และวิธีการบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือตามสมการที่ 3.17, สมการที่ 1 ในภาคผนวก ข และสมการที่ 1 ในภาคผนวก ค ตามลำดับ และจากผลลัพธ์เหล่านั้นพบว่าวิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทั้งสามให้ผลการทดลองที่แตกต่างกัน เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างได้อย่างชัดเจนจึงกำหนดให้วาล์วนิรภัยทุกตัวมีความสามารถในการวินิจฉัยตัวเอง  $DC$  เท่ากับ 90% และมีการประเมินความผิดพลาดรวม  $\beta$  และ  $\beta_D$  เท่ากับ 10% และ 5% ตามลำดับ รวมถึงมีการทดสอบทุกปีหรือ  $\tau$  เท่ากับ 8640 ชั่วโมงและใช้เวลาในการซ่อมแซม  $MRT$  แต่ละครั้ง 8 ชั่วโมงเท่ากัน ซึ่งพิจารณาให้เวลาที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเวลาในการซ่อมแซม นั้นทำให้สามารถคำนวณและเปรียบเทียบค่า  $PFD_{avg}$  เชิงตัวเลขได้ดังตารางที่ 4.4 และเขียนกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

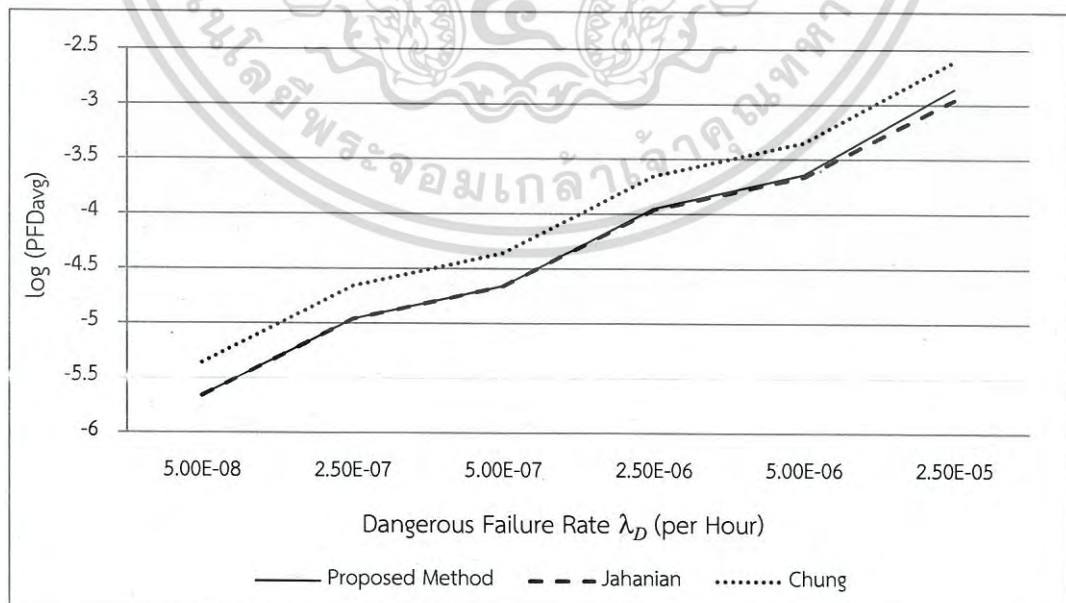
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดอันตรายและค่า PFD<sub>avg</sub> เซึ่งตัวเลขดังรูปที่ 4.6 โดยอ้างอิงอัตราความผิดพลาดอันตรายตามตารางรายละเอียดการทำงานโหมดความต้องการต่ำใน Annex B ของมาตรฐาน IEC 61508-6

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่า PFD<sub>avg</sub> เซึ่งสมการของกลุ่มวาล์วนิรภัย

วิธีการ	ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งาน (PFD <sub>avg</sub> ) ของกลุ่มวาล์วนิรภัย
MCS	$4((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^2 t_1 t_2 + \beta\lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + PTT + MRT \right) + \beta_D \lambda_{DD} MTTR$
Jahanian	$24((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^3 t_1 t_2 t_3 + \beta\lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + PTT + MRT \right) + \beta_D \lambda_{DD} MTTR$
Chung	$4((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^2 t_{CE} t_{GE} + 2 \left( \beta\lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + MRT \right) + \beta_D \lambda_{DD} MTTR \right)$

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่า PFD<sub>avg</sub> เซึ่งตัวเลขของกลุ่มวาล์วนิรภัย

วิธีการ	ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งาน (PFD <sub>avg</sub> ) ของกลุ่มวาล์วนิรภัย					
$\lambda_D$	0.50E-07	2.50E-07	0.50E-06	2.50E-06	0.50E-05	2.50E-05
MCS	2.18E-06	1.09E-05	2.19E-05	1.12E-04	2.30E-04	1.38E-03
Jahanian	2.18E-06	1.09E-05	2.18E-05	1.09E-04	2.18E-04	1.10E-03
Chung	4.37E-06	2.18E-05	4.38E-05	2.21E-04	4.48E-04	2.47E-03



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่า PFD<sub>avg</sub> เซึ่งตัวเลขของกลุ่มวาล์วนิรภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเปรียบเทียบค่า  $PFD_{avg}$  เชิงตัวเลขของกลุ่มวาล์วนิรภัยที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการเขตส่วนตัดขั้นต่ำ สูตรทั่วไป KooN ของ Jahanian [9] และวิธีการบล็อกโตะแกรมความน่าเชื่อถือของ Chung [11] ดังรูปที่ 4.6 พบว่ากราฟผลลัพธ์จากวิธีการของ Chung [11] มีค่ามากกว่าวิธีการอื่นประมาณ 2 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากการวิเคราะห์ที่มีการคำนวณความผิดพลาดรวมซ้ำซ้อนถึง 2 ครั้ง ซึ่งปกติจะมีการคำนวณแค่ครั้งเดียวเพราะว่าอุปกรณ์ชนิดเดียวกันที่มีการออกแบบและสั่งซื้อในครั้งเดียวกันหรือติดตั้งในตำแหน่งที่ใกล้กัน ความผิดพลาดรวมที่เกิดขึ้นมักจะส่งผลกับอุปกรณ์ทุกตัวและทำให้ฟังก์ชันนิรภัยไม่พร้อมใช้งาน ในทำนองเดียวกันวาล์วนิรภัยทั้ง 4 ตัวในระบบการตัดแหล่งให้ความร้อนของเครื่องต้มข้าก้เป็นวาล์วชนิดเดียวกันที่มีการออกแบบและติดตั้งใกล้กันจึงควรคิดความผิดพลาดรวมเพียง 1 ครั้ง ดังนั้นการวิเคราะห์กรณีศึกษาด้วยวิธีการของ Chung [11] จึงให้ค่า  $PFD_{avg}$  ที่สูงเกินไปหรือประเมินความปลอดภัยของกลุ่มอุปกรณ์ต่ำเกินไปกว่าความจริง ส่วนการนำสูตรทั่วไป KooN ของ Jahanian [9] ที่เป็นสูตรสำหรับการทำงานแบบสุ่มความผิดพลาดมาใช้ในการคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ของกลุ่มวาล์วนิรภัยที่มีการทำงานแบบไม่สุ่มความผิดพลาดนั้นถือว่าการประยุกต์ใช้งานที่ไม่เหมาะสม ซึ่งในกรณีศึกษาให้ผลลัพธ์  $PFD_{avg}$  ที่มีค่าต่ำเกินไปหรือมีการประเมินความปลอดภัยสูงเกินไปกว่าการทำงานจริงของกลุ่มอุปกรณ์ แต่อย่างไรก็ตามจากกราฟผลลัพธ์จากวิธีการเขตส่วนตัดขั้นต่ำกับวิธีการของ Jahanian [9] ในรูปที่ 4.6 สังเกตว่ากราฟผลลัพธ์ทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถพิจารณาความแตกต่างของผลลัพธ์เชิงตัวเลขจากวิธีการทั้งสองอย่างละเอียดได้ในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่า  $PFD_{IND}$   $PFD_{CCF}$  และ  $PFD_{avg}$  เชิงตัวเลขของกลุ่มวาล์วนิรภัย

วิธีการ	เขตส่วนตัดขั้นต่ำ (MCS)			สูตรทั่วไปของ Jahanian			$\frac{(I)-(2)}{(I)}$
	$PFD_{IND}$	$PFD_{CCF}$	$PFD_{avg}^{(1)}$	$PFD_{IND}$	$PFD_{CCF}$	$PFD_{avg}^{(2)}$	
0.50E-07	1.16E-09	2.18E-06	2.18E-06	7.39E-14	2.18E-06	2.18E-06	5.33E-04
2.50E-07	2.91E-08	1.09E-05	1.09E-05	9.23E-12	1.09E-05	1.09E-05	2.66E-03
0.50E-06	1.16E-07	2.18E-05	2.19E-05	7.39E-11	2.18E-05	2.18E-05	5.30E-03
2.50E-06	2.91E-06	1.09E-04	1.12E-04	9.23E-09	1.09E-04	1.09E-04	2.59E-02
0.50E-05	1.16E-05	2.18E-04	2.30E-04	7.39E-08	2.18E-04	2.18E-04	5.03E-02
2.50E-05	2.91E-04	1.09E-03	1.38E-03	9.23E-06	1.09E-03	1.10E-03	2.04E-01

การเปรียบเทียบค่า  $PFD_{IND}$   $PFD_{CCF}$  และ  $PFD_{avg}$  เชิงตัวเลขของกลุ่มวาล์วนิรภัยที่ได้จากวิธีการเขตส่วนตัดขั้นต่ำกับวิธีการของ Jahanian [9] ตามตารางที่ 4.5 พบว่าวิธีการทั้งสองให้ผลลัพธ์ค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานร่วมหรือ  $PFD_{CCF}$  ที่มากกว่าค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานอิสระหรือ  $PFD_{IND}$  อย่างมากจึงส่งผลให้ค่า  $PFD_{avg}$  ขึ้นอยู่กับ  $PFD_{CCF}$  เป็นหลัก และเนื่องจากวิธีการเขตส่วนตัดชั้นต่ำกับวิธีการของ Jahanian [9] มีการวิเคราะห์ค่า  $PFD_{CCF}$  ที่เท่ากัน ดังนั้นจึงทำให้  $PFD_{avg}$  มีค่าใกล้เคียงกัน

#### 4.2.2 กรณีศึกษาที่ 2: ระบบป้องกันความดันเกินในหลุมก๊าซธรรมชาติ

การเปรียบเทียบค่า  $PFD_{avg}$  เชิงสมการของกลุ่มวาล์วในฟังก์ชันนิรภัยที่สองของระบบป้องกันความดันเกินในหลุมก๊าซธรรมชาติเป็นไปดังตารางที่ 4.6 ที่แสดงผลลัพธ์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการเขตส่วนตัดชั้นต่ำ สูตรทั่วไป KooN และวิธีการบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือตามสมการที่ 3.18, สมการที่ 2 ในภาคผนวก ข และสมการที่ 2 ในภาคผนวก ค ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่า  $PFD_{avg}$  เชิงสมการของกลุ่มวาล์วในฟังก์ชันนิรภัยที่สอง

วิธีการ	ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งาน ( $PFD_{avg}$ ) ของกลุ่มวาล์ว
MCS	$12((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^3 t_1 t_2 t_3 + \beta\lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + PTT + MRT \right) + \beta_D \lambda_{DD} MTTR$ $; \lambda_{DU} = \sqrt[3]{\lambda_{DU,PMV} \times \lambda_{DU,PWV} \times \lambda_{DU,SDV}}$ $; \lambda_{DD} = \sqrt[3]{\lambda_{DD,PMV} \times \lambda_{DD,PWV} \times \lambda_{DD,SDV}}$
Jahanian	$12\alpha((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^5 t_1 t_2 t_3 t_4 t_5 + \beta\lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + PTT + MRT \right) + \beta_D \lambda_{DD} MTTR$ $; \lambda_{DU} = \sqrt[5]{(\lambda_{DU,PMV})^2 \times (\lambda_{DU,PWV})^2 \times \lambda_{DU,SDV}}$ $; \lambda_{DD} = \sqrt[5]{(\lambda_{DD,PMV})^2 \times (\lambda_{DD,PWV})^2 \times \lambda_{DD,SDV}}$
Chung	$12((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^3 t_{CET} t_{GET} t_{G2E} + 2 \left( \beta\lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + MRT \right) + \beta_D \lambda_{DD} MTTR \right)$ $; \lambda_{DU} = \sqrt[3]{\lambda_{DU,PMV} \times \lambda_{DU,PWV} \times \lambda_{DU,SDV}}$ $; \lambda_{DD} = \sqrt[3]{\lambda_{DD,PMV} \times \lambda_{DD,PWV} \times \lambda_{DD,SDV}}$

จากผลลัพธ์ข้างต้นพบว่า การวิเคราะห์ด้วยวิธีการทั้งสามให้ผลการทดลองเชิงสมการที่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของผลลัพธ์ได้อย่างชัดเจนจึงมีการคำนวณหาค่า  $PFD_{avg}$  เชิงตัวเลข โดยแยกออกเป็นสองกรณีคือ

1. กรณีที่อัตราความผิดพลาดอันตรายแบบตรวจจับได้และไม่ได้ของวาล์วทุกตัวมีค่าเท่ากัน นั่นคือ กำหนดให้ความสามารถในการวินิจฉัยตัวเอง  $DC = DC_{PMV} = DC_{PWV} = DC_{SDV}$  มีค่าเท่ากับ 90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กรณีที่อัตราความผิดพลาดอันตรายแบบตรวจจับได้และไม่ได้ของวาล์วทุกตัวมีค่าไม่เท่ากัน นั่นคือ กำหนดให้ความสามารถในการวินิจฉัยตัวเองของวาล์วผลิตหลัก  $DC_{PMV}$  วาล์วผลิตย่อย  $DC_{PWV}$  และวาล์วเปิดปิดรวม  $DC_{SDV}$  มีค่าเท่ากับ 60%, 90% และ 99% ตามลำดับ

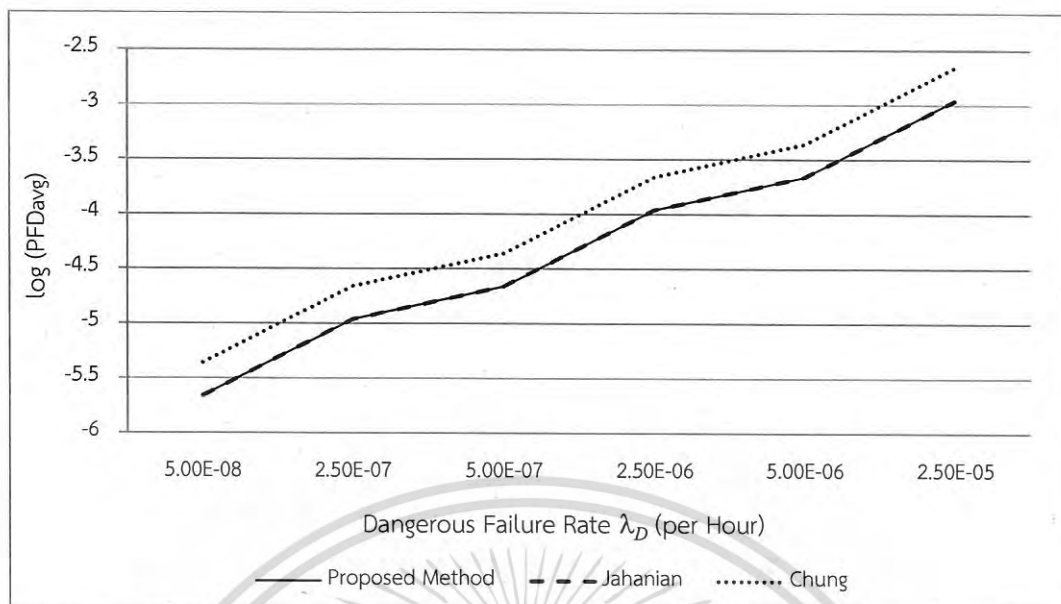
นอกจากนี้ยังสมมติให้ประเมินความผิดพลาดรวม  $\beta$  และ  $\beta_D$  ของกลุ่มวาล์วเท่ากับ 10% และ 5% ตามลำดับ รวมถึงมีการทดสอบทุกปีหรือ  $\tau$  เท่ากับ 8640 ชั่วโมงและใช้เวลาในการซ่อมแซม  $MRT$  แต่ละครั้ง 8 ชั่วโมงเท่ากัน ซึ่งพิจารณาให้เวลาที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับเวลาในการซ่อมแซม นั่นทำให้สามารถคำนวณและเปรียบเทียบค่า  $PFD_{avg}$  เชิงตัวเลขของทั้งสองกรณีได้ดังตารางที่ 4.7 และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดอันตรายและค่า  $PFD_{avg}$  เชิงตัวเลขของกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ โดยอ้างอิงอัตราความผิดพลาดอันตรายตามตารางรายละเอียดการทำงานโหมดความต้องการต่ำใน Annex B ของมาตรฐาน IEC 61508-6 [2]

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่า  $PFD_{avg}$  เชิงตัวเลขของกลุ่มวาล์วในฟังก์ชันนิรภัยที่สอง

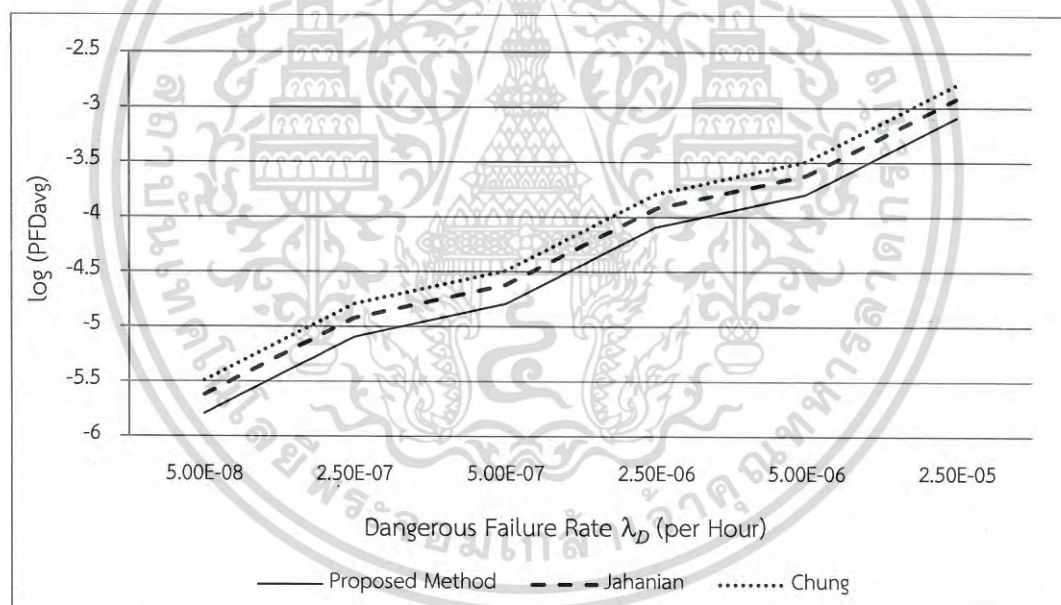
วิธีการ	ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งาน ( $PFD_{avg}$ ) ของกลุ่มวาล์ว					
$\lambda_D$	0.50E-07	2.50E-07	0.50E-06	2.50E-06	0.50E-05	2.50E-05
กรณีที่ 1 : $DC = DC_{PMV} = DC_{PWV} = DC_{SDV} = 90\%$						
MCS	2.18E-06	1.09E-05	2.18E-05	1.09E-04	2.18E-04	1.10E-03
Jahanian	2.18E-06	1.09E-05	2.18E-05	1.09E-04	2.18E-04	1.09E-03
Chung	4.36E-06	2.18E-05	4.36E-05	2.18E-04	4.36E-04	2.19E-03
กรณีที่ 2 : $DC_{PMV} = 60\%$ , $DC_{PWV} = 90\%$ และ $DC_{SDV} = 99\%$						
MCS	1.61E-06	8.05E-06	1.61E-05	8.05E-05	1.61E-04	8.07E-04
Jahanian	2.39E-06	1.20E-05	2.39E-05	1.20E-04	2.39E-04	1.20E-03
Chung	3.22E-06	1.61E-05	3.22E-05	1.61E-04	3.22E-04	1.61E-03

เมื่อเปรียบเทียบค่า  $PFD_{avg}$  เชิงตัวเลขของกลุ่มวาล์วในฟังก์ชันที่สองจะพบว่ากราฟผลลัพธ์ของวิธีการบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของ Chung [11] มีค่าประมาณ 2 เท่าของผลลัพธ์จากวิธีการเซตส่วนตัดขั้นต่ำในทั้งสองกรณีดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 นั่นเพราะว่าการวิเคราะห์การทำงานด้วยวิธีการของ Chung [11] คำนวณความผิดพลาดรวมซ้ำซ้อนดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2.1 จึงทำให้ผลลัพธ์  $PFD_{avg}$  ที่ได้มีค่าสูงไปหรือประเมินความปลอดภัยของกลุ่มอุปกรณ์ต่ำเกินไปกว่าความจริง ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์โดยวิธีการเซตส่วนตัดขั้นต่ำจึงมีความเหมาะสมมากกว่าสำหรับกรณีศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่า  $PFD_{avg}$  เชิงตัวเลขของกลุ่มวาล์วในฟังก์ชันที่สองกรณีที่ 1



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่า  $PFD_{avg}$  เชิงตัวเลขของกลุ่มวาล์วในฟังก์ชันที่สองกรณีที่ 2

นอกจากนี้สำหรับผลลัพธ์ค่า  $PFD_{avg}$  จากการคำนวณด้วยสูตรทั่วไป KooN ของ Jahanian [9] เมื่อถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ของวิธีการเซตส่วนตัดชั้นต่ำดังรูปกราฟข้างบนจะพบว่าค่า  $PFD_{avg}$  เชิงตัวเลขจากวิธีการทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันอย่างมากในกรณีที่ 1 โดยที่สูตรทั่วไปจะมีประเมิณความปลอดภัยของกลุ่มวาล์วที่สูงกว่าวิธีการเซตส่วนตัดชั้นต่ำเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามกลับมีค่าแตกต่างกันในกรณีที่ 2 โดยมีการประเมิณความปลอดภัยที่ต่ำกว่า ถ้าพิจารณาผลลัพธ์เชิงตัวเลขจากวิธีการทั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สองอย่างละเอียดดังตารางที่ 4.8 จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าค่า  $PFD_{avg}$  จากสูตรทั่วไป KooN จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่า  $PFD_{CCF}$  ทั้งนี้เนื่องจาก  $PFD_{IND}$  มีค่าน้อยกว่า  $PFD_{CCF}$  อย่างมากจึงส่งผลให้ค่า  $PFD_{avg}$  ขึ้นอยู่กับ  $PFD_{CCF}$  เป็นหลัก ซึ่งในกรณีที่อัตราความผิดพลาดอันตรายแบบตรวจจับได้และไม่ได้ของวาล์วทุกตัวมีค่าเท่ากันจะทำให้ค่าเฉลี่ยอัตราความผิดพลาดอันตราย  $\lambda_{DU}$  และ  $\lambda_{DD}$  ของวิธีการทั้งสองจะมีค่าเท่ากันตามอัตราความผิดพลาดอันตรายของวาล์วแต่ละตัวและส่งผลให้  $PFD_{CCF}$  มีค่าเท่ากัน ด้วยเหตุนี้ผลลัพธ์ค่า  $PFD_{avg}$  จากทั้งสองวิธีการจึงมีค่าใกล้เคียงกันมากตามอิทธิพลของค่า  $PFD_{CCF}$  ในทำนองเดียวกันกรณีที่อัตราความผิดพลาดอันตรายแบบตรวจจับได้และไม่ได้ของวาล์วมีค่าไม่เท่ากัน การคำนวณค่าเฉลี่ยอัตราความผิดพลาดอันตราย  $\lambda_{DU}$  และ  $\lambda_{DD}$  ของวิธีการทั้งสองจะได้ผลลัพธ์ที่ไม่เท่ากันและส่งผลให้  $PFD_{CCF}$  มีค่าไม่เท่ากันด้วย ดังนั้นค่า  $PFD_{avg}$  จากวิธีการทั้งสองจึงมีค่าแตกต่างกัน โดยสามารถสังเกตได้จากค่าเบี่ยงเบนตามตารางที่ 4.8 ในกรณีที่ 2 ที่มีค่าประมาณ 0.48 เท่ากันสำหรับทุกอัตราความผิดพลาดอันตรายนั้นเป็นผลมาจากความแตกต่างของค่า  $PFD_{CCF}$  ซึ่งแตกต่างกับในกรณีที่ 1 ที่มีค่าไม่ประมาณกันอันเป็นผลมาจากความแตกต่างของค่า  $PFD_{IND}$

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่า  $PFD_{IND}$   $PFD_{CCF}$  และ  $PFD_{avg}$  เชิงตัวเลขของกลุ่มวาล์ว

วิธีการ	เขตส่วนตัดขั้นต่ำ (MCS)			สูตรทั่วไปของ Jahanian			$\frac{(I)-(2)}{(I)}$
	$PFD_{IND}$	$PFD_{CCF}$	$PFD_{avg}^{(1)}$	$PFD_{IND}$	$PFD_{CCF}$	$PFD_{avg}^{(2)}$	(I)
กรณีที่ 1 : $DC = DC_{PMV} = DC_{PWW} = DC_{SDV} = 90\%$							
0.50E-07	3.69E-14	2.18E-06	2.18E-06	2.27E-23	2.18E-06	2.18E-06	1.69E-08
2.50E-07	4.62E-12	1.09E-05	1.09E-05	7.08E-20	1.09E-05	1.09E-05	4.23E-07
0.50E-06	3.69E-11	2.18-05	2.18-05	2.27E-18	2.18-05	2.18-05	1.69E-06
2.50E-06	4.62E-09	1.09E-04	1.09E-04	7.08E-15	1.09E-04	1.09E-04	4.23E-05
0.50E-05	3.69E-08	2.18-04	2.18-04	2.27E-13	2.18-04	2.18-04	1.69E-04
2.50E-05	4.62E-06	1.09E-03	1.10E-03	7.08E-10	1.09E-03	1.09E-03	4.21E-03
กรณีที่ 2 : $DC_{PMV} = 60\%$ , $DC_{PWW} = 90\%$ และ $DC_{SDV} = 99\%$							
0.50E-07	1.04E-14	1.61E-06	1.61E-06	1.94E-23	2.39E-06	2.39E-06	4.86E-01
2.50E-07	1.31E-12	8.05E-06	8.05E-06	6.07E-20	1.20E-05	1.20E-05	4.86E-01
0.50E-06	1.04E-11	1.61E-05	1.61E-05	1.94E-18	2.39E-05	2.39E-05	4.86E-01
2.50E-06	1.31E-09	8.05E-05	8.05E-05	6.07E-15	1.20E-04	1.20E-04	4.86E-01
0.50E-05	1.04E-08	1.61E-04	1.61E-04	1.94E-13	2.39E-04	2.39E-04	4.86E-01
2.50E-05	1.31E-06	8.05E-04	8.07E-04	6.07E-10	1.20E-03	1.20E-03	4.83E-01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองและการอภิปรายในหัวข้อที่ 4.1 พบว่าวิธีการเซตส่วนตัดขั้นต่ำสามารถวิเคราะห์การจัดวางของกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบสุ่มการเกิดความผิดพลาดได้ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากผลการทดลองค่า  $PFD_{avg}$  เชิงสมการและเชิงตัวเลขของการจัดวางแบบพื้นฐานดังตารางที่ 4.1 และกราฟรูปที่ 4.1 ถึง 4.5 ที่ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องและเท่ากันกับสูตรตามมาตรฐาน IEC 61508-6 [2] อีกทั้งในกรณีที่นอกเหนือจากที่มาตรฐานมีการกำหนดยังสามารถหาค่า  $PFD_{avg}$  ได้โดยใช้สูตรตามสมการที่ 3.6 ที่ได้จากวิเคราะห์สูตรทั่วไปของ Jahanian [9] เพื่อสมการตั้งต้นของการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเซตส่วนตัดขั้นต่ำ

นอกจากนี้การใช้วิธีการที่พัฒนาขึ้นนี้ในการวิเคราะห์ค่า  $PFD_{avg}$  ของกรณีศึกษาที่มีการทำงานแบบไม่สุ่มการเกิดความผิดพลาดหรือมีเงื่อนไขการทำงานทั้งสองกรณีในหัวข้อที่ 4.2 ยังให้ผลลัพธ์ที่มีความเหมาะสมกับการทำงานจริงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สูตรทั่วไป KooN ของ Jahanian [9] และวิธีการบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของ Chung [11] ทั้งนี้เนื่องจากสูตรทั่วไป KooN ของ Jahanian [9] เป็นสูตรสำหรับการทำงานแบบสุ่มความผิดพลาดจึงมีความไม่เหมาะสมเมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับกรณีศึกษาที่มีการทำงานแบบไม่สุ่มความผิดพลาด รวมไปถึงวิธีการของ Chung [11] ที่เป็นวิธีที่มีการวิเคราะห์ความผิดพลาดร่วมในทุกการจัดกลุ่ม โดยสำหรับอุปกรณ์ชนิดเดียวกันที่มีการออกแบบ จัดซื้อ หรือติดตั้งในบริเวณเดียวกันมักจะมีการคำนวณความผิดพลาดร่วมเกิดขึ้นเพียงหนึ่งครั้งเท่านั้น ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์ด้วยวิธีการนี้จึงมีการคำนวณความผิดพลาดร่วมซ้ำซ้อนและไม่เหมาะสมกับการทำงานของกรณีศึกษาที่มีการยกตัวอย่างมา และอีกเหตุผลหนึ่งที่สามารถยืนยันถึงความเหมาะสมของวิธีการเซตส่วนตัดขั้นต่ำคือการวิเคราะห์โอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดด้วยเซตส่วนตัดขั้นต่ำของวิธีการที่นำเสนอนี้เป็นการวิเคราะห์และจัดกลุ่มอุปกรณ์ตามการทำงานจริงที่สามารถตรวจสอบผลลัพธ์และแสดงขั้นตอนวิเคราะห์ได้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงทำให้วิธีการเซตส่วนตัดขั้นต่ำสามารถวิเคราะห์การทำงานแบบไม่สุ่มการเกิดความผิดพลาดได้

ในบางครั้งการประยุกต์ใช้วิธีการที่ไม่เหมาะสมกับการทำงานของกลุ่มอุปกรณ์อาจจะได้รับผลลัพธ์ที่มีความใกล้เคียงกับวิธีการที่มีการวิเคราะห์ตามการทำงานจริง ทั้งนี้สามารถหาสาเหตุได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอธิบายผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 ซึ่งพบว่าค่า  $PFD_{avg}$  ของรูปแบบการจัดวางส่วนใหญ่มีค่าขึ้นอยู่กับค่า  $PFD_{CCF}$  เนื่องจากความผิดพลาดรวมทั้งที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่ออุปกรณ์ในกลุ่มโหนดทั้งหมด และทำให้ฟังก์ชันนิรภัยเกิดความผิดพลาด จึงทำให้ค่าเฉลี่ย  $PFD_{CCF}$  มีค่ามากกว่า  $PFD_{IND}$  เป็นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้เมื่อวิธีการที่เหมาะสมและไม่เหมาะสมทั้งสองมีการคำนวณค่า  $PFD_{CCF}$  ที่เท่ากันจะทำให้ผลลัพธ์ค่า  $PFD_{avg}$  มีค่าใกล้เคียงกัน โดยสังเกตได้จากผลการทดลองของกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 ตามตารางที่ 4.5 และ 4.8 ตามลำดับ

ซึ่งสามารถกล่าวสรุปได้ว่าการวิเคราะห์และคำนวณค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานหรือ  $PFD_{avg}$  ด้วยวิธีการเซตส่วนตัดขั้นต่ำสามารถสร้างสมการใหม่ที่สอดคล้องกับสูตรตามมาตรฐาน IEC 61508-6 [2] และยังไปถึงครอบคลุมรูปแบบการจัดวางที่ไม่มีการกำหนดสูตรในมาตรฐาน เช่น รูปแบบการจัดวาง KooN ที่มีการทำงานแบบสุ่มการเกิดความผิดพลาดและรูปแบบการจัดวางที่มีการทำงานแบบไม่สุ่มการเกิดความผิดพลาดหรือมีเงื่อนไขการทำงาน และเนื่องจากวิธีการที่นำเสนอนี้พิจารณาไปตามเงื่อนไขการทำงานของกลุ่มอุปกรณ์จึงสามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย และให้ค่า  $PFD_{avg}$  ที่เหมาะสมกับการทำงานจริงของกลุ่มอุปกรณ์มากกว่าวิธีการอื่นๆ ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่สูงหรือต่ำเกินไปเนื่องจากการวิเคราะห์การทำงานที่ไม่ถูกต้อง นอกจากนี้ยังมีการใช้บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือเพื่อนำเสนอถึงแนวคิดและทำให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดสมมติในการศึกษาไว้ว่าฟังก์ชันนิรภัยแต่ละฟังก์ชันจะมีการทดสอบและการซ่อมแซมที่สมบูรณ์แบบ นั้นคือความผิดพลาดที่ยังเหลืออยู่ทั้งหมดจะถูกตรวจจับได้ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วจะไม่สามารถฟื้นฟูอุปกรณ์ได้เหมือนใหม่ จึงทำให้ผลลัพธ์ที่คำนวณได้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นแค่ค่า  $PFD_{avg}$  ของช่วงเวลาในการทดสอบแรก  $(0, \tau]$  เท่านั้น อย่างไรก็ตามในงานวิจัยต่อไปควรพิจารณาเรื่องความสามารถในการซ่อมบำรุงและระยะเวลาที่อุปกรณ์สามารถทำงานได้โดยไม่มีการเปลี่ยนชิ้นส่วนเพื่อให้ผลลัพธ์มีความใกล้เคียงกับค่าความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

ควรแบ่งแยกการพิจารณาความผิดพลาดรวมของกลุ่มอุปกรณ์ให้ชัดเจนเนื่องจากอุปกรณ์ในกลุ่มโหนดเดียวกันอาจประกอบอุปกรณ์หลากหลายชนิดที่มีการออกแบบและจัดซื้อแยกกัน แต่ติดตั้งบริเวณใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงควรมีบรรทัดฐานในการพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] PAControl.com. “Basic Fundamentals of Safety Instrumented Systems SIS.” [Online]. Available : <http://www.pacontrol.com/safetysystems.html>. 2014.
- [2] IEC 61508. **Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems**. Geneva : The International Electrotechnical Commission. 2010.
- [3] IEC 61511. **Functional Safety – Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector**. Geneva : The International Electrotechnical Commission. 2003.
- [4] ISA-TR84.00.02-2002 – Part 3. **Safety Instrumented Functions (SIF) – Safety Integrity Level (SIL) Evaluation Techniques Part 3: Determining the SIL of a SIF via Fault Tree Analysis**. United States of America : The Instrumentation, System, and Automation Society. 2002.
- [5] Zhang T. Long W. and Sato Y. “Availability of Systems with Self-diagnostic Components – Applying Markov Model to IEC 61508-6.” **Reliability Engineering & System Safety**. 80, 2003. Pp. 133-141.
- [6] Ding L. Wang H. Kang K. and Wang K. “A Novel Method for SIL Verification based on System Degradation Using Reliability Block Diagram.” **Reliability Engineering & System Safety**. 132, 2014. Pp. 36-45.
- [7] Innal F. “Contribution to Modelling Safety Instrumented Systems and to Assessing Their Performance: Critical Analysis of IEC 61508 Standard.” Doctoral School of Physical and Engineering Sciences, University of Bordeaux. 2008.
- [8] Rausand M. **Reliability of Safety-Critical Systems: Theory and Applications**. New Jersey : John Wiley & Sons. 2014.
- [9] Jahanian H. “Generalizing PFD Formulas of IEC 61508 for KooN Configurations.” **ISA Transactions**. 55, 2015. Pp. 168-174.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [10] Cetelani M. Ciani L. and Luongo V. "A Simplified Procedure for the Analysis of Safety Instrumented Systems in the Process Industry Application." *Microelectronics Reliability*. 51, 2011. Pp. 1503-1507.
- [11] Chung S. Kim S. and Yang Y. "Use of Hazardous Event Frequency to Evaluate Safety Integrity Level of Subsea Blowout Preventer." *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 8, 2016. Pp. 262-276.
- [12] William, M.G. and Harry, C. *Safety Instrumented Systems Verification: Practical Probabilistic Calculations*. United States of America : The Instrumentation, System, and Automation Society. 2005.
- [13] ทวีช ชูเมือง. ระบบควบคุมนิรภัยในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิต. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น. 2548.
- [14] IEC 61513. *Nuclear Power Plants – Instrumentation and Control Important to Safety – General Requirements for Systems*. Geneva : The International Electrotechnical Commission. 2011.
- [15] IEC 62061. *Safety of Machinery – Functional Safety of Safety-Related Electrical, Electronic and Programmable Electronic Control Systems*. Geneva : The International Electrotechnical Commission. 2005.
- [16] ทวีช ชูเมือง. การกำหนดค่าระดับความปลอดภัยสำหรับฟังก์ชันนิรภัย. กรุงเทพฯ : วีพรีนธ์ (1991). 2551.
- [17] Rausand, M. and Høyland, A. *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods and Applications*. 2nd ed. New Jersey : John Wiley & Sons. 2004.
- [18] Rome Laboratory and Reliability Analysis Center. *Reliability Toolkit: Commercial Practices Edition – A Practical Guide for Commercial Products and Military Systems Under Acquisition Reform*. Rome : Rome Laboratory and Reliability Analysis Center. 1995.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก  
(ตารางฟังก์ชันความน่าเชื่อถือของการจัดเรียงอุปกรณ์แบบซ้ำซ้อน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 สมการของการทำงานแบบซ้ำซ้อนสำหรับการคำนวณความน่าเชื่อถือ

รูปแบบการจัดวาง	สมการความน่าเชื่อถือ $R(t)$
1oo1	$e^{-\lambda_{DUt}}$
2oo2	$(e^{-\lambda_{DUt}})^2$
3oo3	$(e^{-\lambda_{DUt}})^3$
NooN	$(e^{-\lambda_{DUt}})^N$
1oo2	$2e^{-\lambda_{DUt}} - e^{-2\lambda_{DUt}}$
1oo3	$3e^{-\lambda_{DUt}} - 3e^{-2\lambda_{DUt}} + e^{-3\lambda_{DUt}}$
1oo4	$4e^{-\lambda_{DUt}} - 6e^{-2\lambda_{DUt}} + 4e^{-3\lambda_{DUt}} - e^{-4\lambda_{DUt}}$
1ooN	$\sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \frac{N!}{k!(N-k)!} e^{-k\lambda_{DUt}}$
2oo3	$3e^{-2\lambda_{DUt}} - 2e^{-3\lambda_{DUt}}$
3oo4	$4e^{-3\lambda_{DUt}} - 3e^{-4\lambda_{DUt}}$
(N-1)ooN	$Ne^{-(N-1)\lambda_{DUt}} - (N-1)e^{-N\lambda_{DUt}}$
2oo4	$3e^{-4\lambda_{DUt}} - 8e^{-3\lambda_{DUt}} + 6e^{-2\lambda_{DUt}}$
3oo5	$6e^{-5\lambda_{DUt}} - 15e^{-4\lambda_{DUt}} + 10e^{-3\lambda_{DUt}}$
(N-2)ooN	$\frac{N!}{2(N-2)!} e^{-(N-2)\lambda_{DUt}} + (2N - N^2)e^{-(N-1)\lambda_{DUt}} + \frac{(N-1)!}{2(N-3)!} e^{-N\lambda_{DUt}}$
KooN	$\sum_{k=K}^N \frac{N!}{k!(N-k)!} (e^{-\lambda_{DUt}})^k (1 - e^{-\lambda_{DUt}})^{(N-k)}$

(ที่มา: Rome Laboratory and Reliability Analysis Center [18])

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข  
(การวิเคราะห์  $PFD_{avg}$  ของกรณีศึกษาโดยการใช้สูตรทั่วไป Koon)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1. กรณีศึกษาที่ 1: ระบบการตัดแหล่งให้ความร้อนของเครื่องต้มข้าว

จากการทำงานของกลุ่มวาล์วนิรภัยที่ได้มีการอธิบายไปแล้วในหัวข้อที่ 3.3.1 พบว่าถ้ามีวาล์วนิรภัยอย่างน้อย 2 ใน 4 ตัวพร้อมทำงานจะทำให้ฟังก์ชันนิรภัยพร้อมทำงานด้วย จึงสามารถสรุปได้ว่ากลุ่มวาล์วนิรภัยนี้มีการจัดวางแบบ 2oo4 ซึ่งเมื่อใช้สูตรทั่วไป KooN ของ Jahanian [9] ดังสมการที่ 2.29 จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 PFD_{avg,SV} &= PFD_{avg,2oo4} \\
 &= \prod_{i=1}^3 (4-i+1) \times ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD}) \\
 &\quad \times \left( \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{\tau}{i+1} + PTT + MRT \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTTR \right) \\
 &\quad + \beta\lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + PTT + MRT \right) + \beta_D\lambda_{DD}MTTR \\
 &= (4 \cdot 3 \cdot 2) \times ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^3 t_1 t_2 t_3 \\
 &\quad + \beta\lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + PTT + MRT \right) + \beta_D\lambda_{DD}MTTR \\
 &= 24((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^3 t_1 t_2 t_3 + \beta\lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + PTT + MRT \right) + \beta_D\lambda_{DD}MTTR
 \end{aligned} \tag{1}$$

### 2. กรณีศึกษาที่ 2: ระบบป้องกันความดันเกินในหลุมก๊าซธรรมชาติ

จากการทำงานของฟังก์ชันนิรภัยที่สองที่ประกอบไปด้วยวาล์วผลิตหลัก 2 ตัว วาล์วผลิตย่อย 2 ตัว และวาล์วเปิดปิดร่วม 1 ตัว ดังรูปที่ 3.10 พบว่าถ้ามีวาล์วอย่างน้อย 1 ตัวจาก 5 ตัวพร้อมทำงานจะทำให้ฟังก์ชันนิรภัยพร้อมทำงานด้วย จึงสามารถตีความได้ว่ากลุ่มวาล์วนี้มีการจัดวางแบบ 1oo5 ซึ่งเมื่อใช้สูตรทั่วไป KooN ของ Jahanian [9] ดังสมการที่ 2.29 จะได้ค่า  $PFD_{avg}$  เท่ากับ

$$\begin{aligned}
 PFD_{avg,V} &= PFD_{avg,1oo5} \\
 &= \prod_{i=1}^5 (5-i+1) \times ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD}) \\
 &\quad \times \left( \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{\tau}{i+1} + PTT + MRT \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTTR \right) \\
 &\quad + \beta\lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + PTT + MRT \right) + \beta_D\lambda_{DD}MTTR
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
& ; \lambda_{DU} = \sqrt[5]{(\lambda_{DU,PMV})^2 \times (\lambda_{DU,PWV})^2 \times \lambda_{DU,SDV}} \\
& ; \lambda_{DD} = \sqrt[5]{(\lambda_{DD,PMV})^2 \times (\lambda_{DD,PWV})^2 \times \lambda_{DD,SDV}} \\
& ; \lambda_{PMV} = \lambda_{PMV1} = \lambda_{PMV2} \\
& ; \lambda_{PWV} = \lambda_{PWV1} = \lambda_{PWV2} \\
& = (5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1) \times ((1 - \beta) \lambda_{DU} + (1 - \beta_D) \lambda_{DD})^5 t_1 t_2 t_3 t_4 t_5 \\
& \quad + \beta \lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + PTT + MRT \right) + \beta_D \lambda_{DD} MTTR \\
& = 120 ((1 - \beta) \lambda_{DU} + (1 - \beta_D) \lambda_{DD})^5 t_1 t_2 t_3 t_4 t_5 + \beta \lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + PTT + MRT \right) + \beta_D \lambda_{DD} MTTR
\end{aligned}$$

(2)

หมายเหตุ : เนื่องจากการใช้สูตรทั่วไปไม่สามารถวิเคราะห์การทำงานแบบไม่สุ่มความผิดพลาดได้ จึงทำให้การวิเคราะห์ข้างต้นเป็นการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับการทำงานจริงเท่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

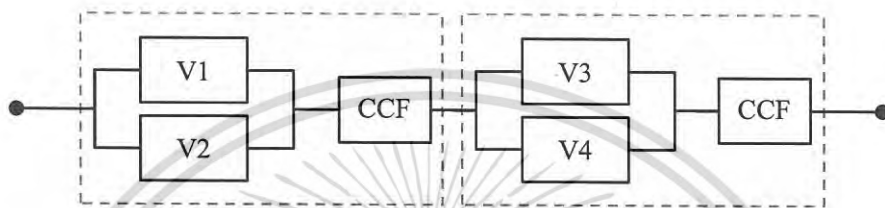


**ภาคผนวก ค**  
**(การวิเคราะห์ PFD<sub>avg</sub> ของกรณีศึกษาโดยการใช้วิธีการ**  
**บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือ)**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1. กรณีศึกษาที่ 1: ระบบการตัดแหล่งให้ความร้อนของเครื่องต้มข้าว

จากกลุ่มวาล์วนิรภัยในระบบการตัดแหล่งให้ความร้อนของเครื่องต้มข้าวดังรูปที่ 3.7 พบว่าการตัดแหล่งให้ความร้อนของเครื่องต้มข้าวแต่ละตัวจะประสบความสำเร็จก็ต่อเมื่อมีวาล์วนิรภัยอย่างน้อย 1 ตัวจาก 2 ตัวของเครื่องต้มข้าวทำงานตามคำสั่งปิด และจากวิธีการที่มีการประยุกต์ใช้ในบทความของ Chung [11] จะทำให้สามารถวิเคราะห์และแบ่งกลุ่มวาล์วนิรภัยตามการทำงานได้ดังบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือต่อไปนี้



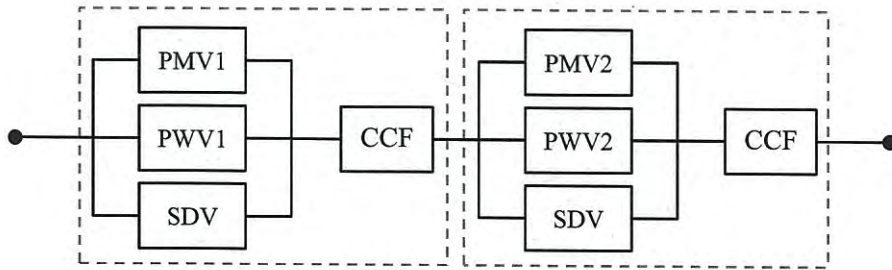
รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของกลุ่มวาล์วนิรภัย

ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า  $PFD_{avg}$  จากบล็อกไดอะแกรมได้เท่ากับ

$$\begin{aligned}
 PFD_{avg,SV} &= PFD_{avg,1002} + PFD_{avg,1002} \\
 &= 2 \times \left( 2((1-\beta_D)\lambda_{DD} + (1-\beta)\lambda_{DU})^2 t_{CETGE} + \beta_D \lambda_{DD} MTTR + \beta \lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + MRT \right) \right) \\
 &= 4((1-\beta_D)\lambda_{DD} + (1-\beta)\lambda_{DU})^2 t_{CETGE} + 2 \left( \beta_D \lambda_{DD} MTTR + \beta \lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + MRT \right) \right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

### 2. กรณีศึกษาที่ 2: ระบบป้องกันความดันเกินในหลุมก๊าซธรรมชาติ

จากกลุ่มอุปกรณ์สุดท้ายในฟังก์ชันนิรภัยที่สองของระบบป้องกันความดันเกินในหลุมก๊าซธรรมชาติดังรูปที่ 3.10 สังเกตว่าจะสามารถป้องกันความดันสูงที่ส่งจากแต่ละหลุมน้ำมันไปยังท่อส่งร่วมได้ก็ต่อเมื่อมีวาล์วผลิตหลักหรือวาล์วผลิตย่อยตัวใดตัวหนึ่งจาก 2 ตัวพร้อมทำงานด้วยการปิดตามคำสั่ง I-3 หรือนอกจากนั้นการที่วาล์วเปิดปิดร่วมทำงานตามคำสั่งปิด I-3 ก็สามารถป้องกันความดันสูงเข้าไปยังท่อส่งร่วมโดยภาพรวมได้เช่นกัน และจากวิธีการที่มีการประยุกต์ใช้ในบทความของ Chung [11] จะทำให้สามารถวิเคราะห์และแบ่งกลุ่มวาล์วตามการทำงานได้ดังบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือต่อไปนี้



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือของกลุ่มวาล์ว

จึงสามารถคำนวณหาค่า  $PFD_{avg}$  จากบล็อกไดอะแกรมได้เท่ากับ

$$\begin{aligned}
 PFD_{avg,V} &= PFD_{avg,1003} + PFD_{avg,1003} \\
 &= 2 \times \left( 6((1-\beta_D)\lambda_{DD} + (1-\beta)\lambda_{DU})^3 t_{CET} t_{G2E} + \beta_D \lambda_{DD} MTTR + \beta \lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + MRT \right) \right) \\
 ; \lambda_{DU} &= \sqrt[3]{\lambda_{DU,PMV} \times \lambda_{DU,PWV} \times \lambda_{DU,SDV}} \\
 ; \lambda_{DD} &= \sqrt[3]{\lambda_{DD,PMV} \times \lambda_{DD,PWV} \times \lambda_{DD,SDV}} \\
 ; \lambda_{PMV} &= \lambda_{PMV1} = \lambda_{PMV2} \\
 ; \lambda_{PWV} &= \lambda_{PWV1} = \lambda_{PWV2} \\
 &= 12((1-\beta_D)\lambda_{DD} + (1-\beta)\lambda_{DU})^3 t_{CET} t_{G2E} + 2 \left( \beta_D \lambda_{DD} MTTR + \beta \lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + MRT \right) \right) \quad (2)
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง  
(ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เรื่องได้การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 55 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

The Proceedings of  
**55<sup>th</sup> KU ANNUAL  
CONFERENCE**

Knowledge of the Land : Moving forward to Thailand

ศาสตร์แห่งแผ่นดินสู่ประเทศไทย

4.0

**SCIENCE TECHNOLOGY  
and ENVIRONMENT**

สาขาวิทยาศาสตร์และพันธุวิศวกรรม

*Science and Genetic Engineering*

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

*Architecture and Engineering*

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

*Agro-Industry*

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

*Natural Resources and Environment*

เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 55 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
The Proceedings of 55<sup>th</sup> Kasetsart University Annual Conference

เล่มที่ 2

สาขาวิทยาศาสตร์และพันธุวิศวกรรม

(Subject: Science and Genetic Engineering)

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

(Subject: Architecture and Engineering)

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Subject: Agro-Industry)

และสาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

(Subject: Natural Resources and Environment)

จัดโดย (Organized by)

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Kasetsart University)

ร่วมกับ (in cooperation with)

สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (Office of the Higher Education Commission)

กระทรวงศึกษาธิการ (Ministry of Education)

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (Ministry of Agriculture and Cooperatives)

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (Ministry of Science and Technology)

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

(Ministry of Natural Resource and Environment)

กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม (Ministry of Digital Economy and Society)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (National Research Council of Thailand)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (The Thailand Research Fund)

31 มกราคม - 3 กุมภาพันธ์ 2560 (January 31 – February 3, 2017)

ISBN (e-book) 978-616-278-368-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การตรวจสอบค่า $PFD_{avg}$ ของฟังก์ชันนิรภัยที่มีเงื่อนไขการทำงานโดยใช้เซตส่วนตัดขั้นต่ำ $PFD_{avg}$ Verification of the Conditional Safety Function based on Minimal Cut Set

ณัฐวดี เทียมธรรมวงศ์<sup>1</sup> ทวิช ชูเมือง<sup>2</sup> วิทยา ทิพย์สุวรรณพร<sup>1</sup> และ อาจินต์ น่วมสำราญ<sup>1</sup>

Nattawadee Thiemthummawong<sup>1</sup>, Twitch Chumuang<sup>2</sup>, Vittaya Tipsuwanporn<sup>1</sup> and Arjin Numsomran<sup>1</sup>

### บทคัดย่อ

ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานหรือ  $PFD_{avg}$  มีบทบาทสำคัญต่อความน่าเชื่อถือและความปลอดภัยของระบบนิรภัย การตรวจสอบค่า  $PFD_{avg}$  ในการศึกษาก่อนหน้านี้มีข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้กับการทำงานของฟังก์ชันนิรภัยที่มีเงื่อนไข ทำให้ผลลัพธ์จากการคำนวณค่าไม่เป็นจริงด้วยสาเหตุจากการวิเคราะห์เงื่อนไขการทำงานที่ไม่ถูกต้อง งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอวิธีการคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ที่สอดคล้องกับมาตรฐาน IEC 61508-6 และครอบคลุมการทำงานที่มีเงื่อนไขโดยใช้เซตส่วนตัดขั้นต่ำที่พิจารณาตามเงื่อนไขการทำงานจริงของฟังก์ชันนิรภัย ส่งผลให้วิธีการที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับทุกรูปแบบการจัดวาง รวมไปถึงสามารถอธิบายการทำงานของฟังก์ชันที่มีเงื่อนไขและให้ค่า  $PFD_{avg}$  ที่มีความถูกต้องกว่าวิธีการอื่น

### ABSTRACT

Average probability of dangerous failure on demand or  $PFD_{avg}$  plays a key role in reliability and safety of SIS. However, in the previous studies,  $PFD_{avg}$  verification had a limitation to apply with conditional safety function and the studies result calculated the estimated  $PFD_{avg}$  value that was not a realistic value due to the error of conditional analysis. Therefore, this research presented the  $PFD_{avg}$  calculation which complied with IEC 61508-6 and covered safety condition by using minimal cut set determined by each requirement of safety instrumented function. So the proposed new method can be applied with all architectures of the safety function. In conclusion, this developed method provides the solution for the conditional safety function problems and gives more accuracy  $PFD_{avg}$  value than the other methods.

Key Words: average probability of dangerous failure on demand, safety instrumented function, minimal cut set, safety condition, nonrandom failure, reliability, IEC 61508

\*Corresponding author; e-mail address: [nattawadee.th@hotmail.com](mailto:nattawadee.th@hotmail.com)

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

<sup>1</sup>Department of Instrument Engineering, Faculty of Engineering, KMITL, Bangkok 10520

<sup>2</sup>รองธุรกิจวิศวกรรม บริษัท พีทีที เมนเทนแนนซ์ แอนด์ เอนจิเนียริ่ง จำกัด ระยอง 21150

<sup>2</sup>Deputy Engineering Business, PTT Maintenance and Engineering Co.,Ltd., Rayong 21150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำนำ

ระบบวัดคูนินทรีย์ (Safety instrumented system; SIS) มีบทบาทสำคัญต่อความน่าเชื่อถือและความปลอดภัยของกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม เนื่องจากประกอบไปด้วยฟังก์ชันนินทรีย์ (Safety instrumented function; SIF) หลายฟังก์ชันทำหน้าที่ป้องกันการเกิดเหตุการณ์อันตรายที่ส่งผลกระทบต่อคน ทรัพย์สิน อุปกรณ์ และสิ่งแวดล้อม โดยแต่ละฟังก์ชันสามารถลดความเสี่ยงของแต่ละส่วนของกระบวนการให้ไปสู่ความปลอดภัยหรือความเสี่ยงที่ยอมรับได้ด้วยการทำงานตามเงื่อนไข ซึ่งมีระดับความปลอดภัย (Safety integrity level; SIL) เป็นตัวชี้วัดถึงความพร้อมหรือความน่าเชื่อถือในการทำงานของฟังก์ชันก็เมื่อมีความต้องการใช้งาน

การปรับปรุง SIL ของฟังก์ชันนินทรีย์ให้ดีขึ้นสามารถทำได้โดยการกำหนดรูปแบบการจัดวาง (Architecture) ของการทำงานแบบซ้ำซ้อน (Redundant) แล้วตรวจสอบ SIL ในรูปค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งาน (Average probability of dangerous failure on demand;  $PFD_{avg}$ ) ที่ขึ้นกับโหมดการทำงานของระบบตามมาตรฐาน IEC 61508/61511 (2010/2003) โหมดการทำงานมีทั้งหมด 2 โหมดคือ โหมดความต้องการต่ำ (Low demand mode) และโหมดความต้องการสูง (High demand mode) แต่อย่างไรก็ตามระบบในกระบวนการผลิตทั่วไปมักอยู่ในโหมดความต้องการต่ำ เนื่องจากมีความถี่ที่ต้องการใช้งานระบบ SIS น้อยกว่าหนึ่งครั้งต่อปีหรือ 2 เท่าของช่วงเวลาในการทดสอบ

มาตรฐาน IEC 61508-6 (2010) นำเสนอการตรวจสอบ SIL ของกลุ่มอุปกรณ์ซ้ำซ้อนโดยกำหนดสูตรในการคำนวณ  $PFD_{avg}$  ที่มีการจัดวางแบบ KooN (K out of N) พื้นฐานคือ 1oo1, 1oo2, 1oo3, 2oo2 และ 2oo3 ซึ่งเป็นการจัดวางที่พบได้ทั่วไปในกระบวนการทางอุตสาหกรรม โดยในรูปแบบการจัดวางที่นอกเหนือจากนี้ยังมีการนำเสนอด้วยวิธีการอื่นๆ เช่น การวิเคราะห์แผนผังความผิดพลาด (Fault tree analysis) (ISA-TR84.00.02, 2002) และรูปแบบมาร์คอฟ (Markov model) (Zhang *et al.*, 2003) แต่ผลลัพธ์ที่ได้ไม่สอดคล้องกับสูตรตาม IEC 61508-6 และถึงแม้ว่าการใช้การลดระดับของระบบ (System degradation) (Ding *et al.*, 2014) และสูตรทั่วไปของการจัดวางแบบ KooN (Innal, 2008; Rausand, 2014; Jahanian, 2015) ในการคำนวณ  $PFD_{avg}$  จะให้ผลลัพธ์ตรงกับมาตรฐาน แต่ก็ยังไม่สามารถประยุกต์ใช้กับฟังก์ชันที่ไม่สุ่มความผิดพลาด (Nonrandom failure) ได้ ในปี 2011 Catelani *et al.* ศึกษาขั้นตอนอย่างง่ายในการวิเคราะห์  $PFD_{avg}$  โดยวิธีการนี้สามารถประยุกต์ใช้กับความผิดพลาดแบบไม่สุ่ม แต่สูตรและการประยุกต์ใช้ยังนำเสนอได้ไม่ถูกต้องกับการใช้งานจริง รวมไปถึงวิธีการของ Chung (2016) ที่จัดกลุ่มอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกันด้วยบล็อกไดอะแกรมความน่าเชื่อถือ (Reliability block diagram; RBD) แล้วคำนวณ  $PFD_{avg}$  ด้วยสูตรตามมาตรฐาน ซึ่งเทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์ความผิดพลาดแบบไม่สุ่มได้ แต่ยังไม่มีการนำเสนอวิธีการวิเคราะห์ที่ชัดเจน

บทความนี้นำเสนอถึงวิธีการวิเคราะห์และคำนวณค่า  $PFD_{avg}$  ที่พัฒนาขึ้นใหม่ด้วยการใช้เซตส่วนตัดขั้นต่ำ (Minimal cut set; MCS) ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับมาตรฐาน IEC 61508-6 และสามารถวิเคราะห์การทำงานของฟังก์ชันที่ไม่สุ่มการเกิดความผิดพลาดหรือมีเงื่อนไขได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

## อุปกรณ์และวิธีการ

### 1. เทอมและสมมติฐาน

เพื่อให้เข้าใจบทความอย่างถูกต้อง จึงมีการกำหนดความหมายของเทอมที่ใช้ในบทความดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1 Terms

Abb.	Term	Abb.	Term
$PFD_{avg}$	Average probability of dangerous failure on demand	$\beta$	Fraction of undetected failure that have common cause
$PFD_{IND}$	Independent $PFD_{avg}$	$\beta_D$	Fraction of detected failure that have common cause
$PFD_{CCF}$	Common cause $PFD_{avg}$	$t_i$	The mean of $i^{th}$ downtime of voted group
$\tau$	Proof test interval	$t_{CE}$	The mean of 1 <sup>st</sup> downtime of voted group ( $t_{CE} = t_1$ )
$MRT$	Mean time to restoration	$t_{GE}$	The mean of 2 <sup>nd</sup> downtime of voted group ( $t_{GE} = t_2$ )
$MTTR$	Mean repair time ( $MTTR = MRT +$ Time to detect failure)	$t_{GE}$	The mean of 3 <sup>rd</sup> downtime of voted group ( $t_{GE} = t_3$ )
$\lambda_D$	Dangerous failure rate ( $\lambda_D = \lambda_{DD} + \lambda_{DU}$ )	$DC$	Diagnostic Coverage ( $DC = \lambda_{DD}/\lambda_D$ )
$\lambda_{DD}$	Detected dangerous failure rate	$1ooM$	1 out of M voted group
$\lambda_{DU}$	Undetected dangerous failure rate	$KooN$	K out of N voted group

และมีการกำหนดสมมติฐานเบื้องต้นเพื่อจำกัดขอบเขตของการคำนวณ  $PFD_{avg}$  ดังต่อไปนี้ โดยสมมติฐาน นอกเหนือจากนี้สามารถอ้างอิงได้จาก Annex B ของมาตรฐาน IEC 61508-6 (2010)

- a) อัตราความผิดพลาดคงที่ตลอดอายุการทำงานของระบบ
- b) อุปกรณ์ทุกตัวในกลุ่มโหวตมีอัตราความผิดพลาดและความสามารถในการวินิจฉัยเท่ากัน
- c) แต่ละฟังก์ชันนิรภัยจะมีการทดสอบและการซ่อมแซมที่สมบูรณ์ นั่นคือความผิดพลาดที่ตรวจจับไม่ได้จะถูกตรวจจับได้ทั้งหมดผ่านการทดสอบ
- d) อุปกรณ์ทุกตัวในกลุ่มโหวตมีช่วงเวลาในการทดสอบและ MRT เท่ากัน
- e) สำหรับอุปกรณ์ที่มีการวินิจฉัยตัวเอง ความผิดพลาดที่ตรวจจับไม่ได้จะถูกตรวจจับและซ่อมแซมภายในช่วงเวลา MTTR และเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการตรวจจับมีค่าน้อยมากจึงทำให้ MTTR มีค่าประมาณ MRT
- f) ความผิดพลาดของอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งไม่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดกับอุปกรณ์ตัวอื่นๆ ยกเว้นความผิดพลาดร่วม (Common cause failure; CCF)

2. การวิเคราะห์  $PFD_{avg}$  สำหรับการจัดวางแบบ 1ooM

$$PFD_{avg,1ooM} = \frac{(\lambda_{DU}\tau)^M}{M+1} \tag{1}$$

สูตร  $PFD_{avg}$  อย่างง่ายสำหรับการจัดวางแบบ 1ooM (1 out of M) ได้ถูกนำเสนอโดย Rausand (2014) ดังสมการที่ (1) โดยสมมติให้อุปกรณ์แต่ละตัวในกลุ่มโหวตไม่มีการวินิจฉัยอุปกรณ์ ( $\lambda_D = \lambda_{DU}$ ) รวมถึงไม่พิจารณาการซ่อมแซมและความผิดพลาดร่วม ( $PFD_{avg,1ooM} = PFD_{IND,1ooM}$ ) และสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ ดังสมการที่ (2) สังเกตว่าสมการนี้ประกอบด้วย 3 เทอมหลักคือจำนวนอุปกรณ์, อัตราความผิดพลาด และช่วงเวลาอุปกรณ์ไม่ทำงานเฉลี่ย โดยเทอมหลักนี้จะปรับเปลี่ยนรูปไปเมื่อข้อสมมติข้างต้นมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้

$$PFD_{avg,1ooM} = PFD_{IND,1ooM} = M! \times (\lambda_{DU})^M \times \prod_{i=1}^M \left( \frac{\tau}{i+1} \right) \tag{2}$$

2.1 การพิจารณาความสามารถในการวินิจฉัยและการซ่อมแซม ซึ่งส่งผลต่ออัตราความผิดพลาด ( $\lambda_D = \lambda_{DU} + \lambda_{DD}$ ) และการเพิ่มช่วงเวลาอุปกรณ์ไม่ทำงาน สมการที่ (2) จึงมีการปรับเปลี่ยนไปดังนี้

$$PFD_{avg,1ooM} = PFD_{IND,1ooM} = M! \times (\lambda_{DU} + \lambda_{DD})^M \times \prod_{i=1}^M (t_i) \tag{3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{โดยที่ } t_i = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{\tau}{i+1} + MRT \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTR$$

2.2 การพิจารณาความผิดพลาดร่วม จะมีการกล่าวถึงเมื่อใช้อุปกรณ์มากกว่า 2 ตัวในกลุ่มโหนด ค่า  $\beta$  และ  $\beta_D$  แสดงความน่าจะเป็นที่กลุ่มอุปกรณ์จะเกิดความผิดพลาดร่วมซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4) โดยอัตราความผิดพลาดที่ไม่รวมอยู่ในอัตราความผิดพลาดร่วมจะถูกใช้ในการคำนวณ  $PFD_{avg}$  ของความผิดพลาดอิสระดังสมการที่ (5) ดังนั้นสูตร  $PFD_{avg}$  ของการจัดวางแบบ 1ooM จึงมีการเปลี่ยนแปลงไปดังสมการที่ (6)

$$PFD_{CCF} = \beta \lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + MRT \right) + \beta_D \lambda_{DD} MTR \tag{4}$$

$$PFD_{IND,1ooM} = M! \times ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^M \times \prod_{i=1}^M (t_i) \tag{5}$$

$$PFD_{avg,1ooM} = PFD_{IND,1ooM} + PFD_{CCF} \tag{6}$$

### 3. การคำนวณค่า $PFD_{avg}$

การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์ในกลุ่มโหนดเกิดความผิดพลาดสามารถนำมาใช้ในการประเมินค่า  $PFD_{avg}$  โดยกลุ่มอุปกรณ์ที่เกิดความผิดพลาดอันตรายที่ตรวจจับไม่ได้พร้อมกันแล้วทำให้ฟังก์ชันไม่พร้อมทำงาน เรียกว่าเซตส่วนตัด (Cut Set) ส่วนเซตส่วนตัดที่ลดอุปกรณ์แล้วฟังก์ชันยังสามารถทำงานได้เรียกว่าเซตส่วนตัดขั้นต่ำ (Rausand and Hoyland, 2004) การวิเคราะห์เซตส่วนตัดขั้นต่ำของการจัดวางแบบพื้นฐานจะได้ผลลัพธ์ดัง Table 2 ซึ่งสมมติให้ตัวเลขภายในเซตบ่งบอกถึงหมายเลขของอุปกรณ์

Table 2 Minimal cut set of basic architecture

Architecture	Hardware Fault Tolerance (HFT)	Minimal Cut Set
1oo1	None	{1}
2oo2	None	{1}, {2}
1oo2	1	{1, 2}
1oo3	2	{1, 2, 3}
2oo3	1	{1, 2}, {1, 3}, {2, 3}

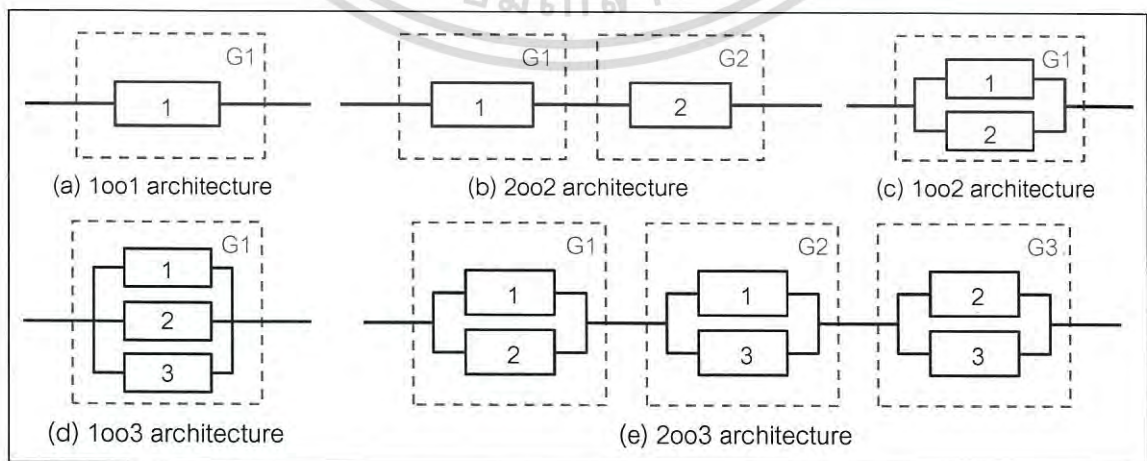


Figure 1 Reliability block diagrams from minimal cut set analysis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขตส่วนตัดขั้นต่ำข้างต้นสามารถเขียนเป็น RBD (Figure 1) โดยบล็อกของอุปกรณ์ที่อยู่ในเขตเดียวกันจะต่อแบบขนาน ในขณะที่บล็อกของเขตที่อยู่ในการจัดวางเดียวกันจะต่อแบบอนุกรม ซึ่งสูตร  $PFD_{avg}$  ของการจัดวางแบบพื้นฐานสามารถสร้างจากรBD ได้ดังสมการที่ (7) ถึง (11)

Table 3  $PFD_{avg}$  equation of basic architecture

Architecture	Average probability of dangerous failure on demand ( $PFD_{avg}$ )
1oo1 (No CCF effect)	$= PFD_{IND,G1} + PFD_{CCF} = PFD_{IND,1oo1} + PFD_{CCF}$ $= (\lambda_{DU} + \lambda_{DD})t_{CE} \tag{7}$
2oo2 (No CCF effect)	$= PFD_{IND,G1} + PFD_{IND,G2} + PFD_{CCF} = 2 PFD_{IND,1oo1} + PFD_{CCF}$ $= 2 (\lambda_{DU} + \lambda_{DD})t_{CE} \tag{8}$
1oo2	$= PFD_{IND,G1} + PFD_{CCF} = PFD_{IND,1oo2} + PFD_{CCF}$ $= 2 ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^2 t_{CE} t_{GE} + \beta \lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + MRT \right) + \beta_D \lambda_{DD} MTTR \tag{9}$
1oo3	$= PFD_{IND,G1} + PFD_{CCF} = PFD_{IND,1oo3} + PFD_{CCF}$ $= 6 ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^3 t_{CE} t_{GE} t_{G2E} + \beta \lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + MRT \right) + \beta_D \lambda_{DD} MTTR \tag{10}$
2oo3	$= PFD_{IND,G1} + PFD_{IND,G2} + PFD_{IND,G3} + PFD_{CCF} = 3 PFD_{IND,1oo2} + PFD_{CCF}$ $= 6 ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^2 t_{CE} t_{GE} + \beta \lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + MRT \right) + \beta_D \lambda_{DD} MTTR \tag{11}$

4. การประยุกต์ใช้งานกับกรณีศึกษาที่มีเงื่อนไขการทำงาน

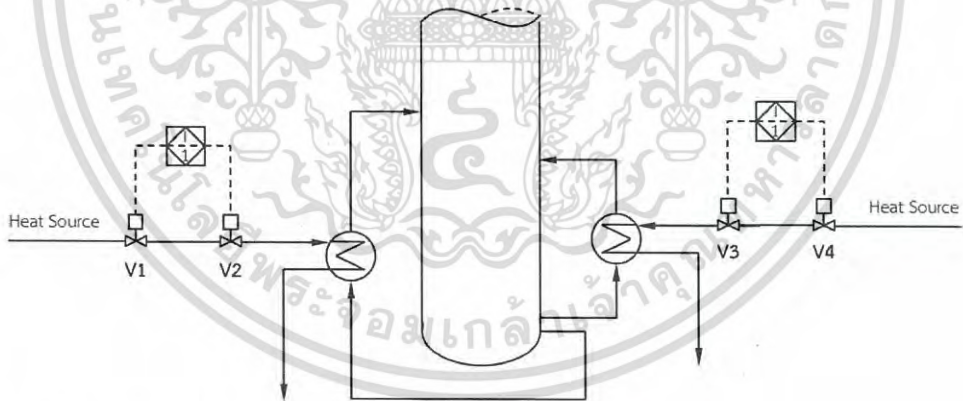


Figure 2 Heat source cutting system of two reboilers for distillation column

กรณีนี้ศึกษาการตรวจสอบ  $PFD_{avg}$  ของอุปกรณ์สุดท้ายนั้นคือวาล์วนิรภัย จากกระบวนการ (Figure 2) มีเครื่องต้มซ้ำ 2 ตัวทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิและย้อนกลับ (Reflux) สารผลิตภัณฑ์เข้าหอกลิ้น โดยใช้วาล์วนิรภัยตัดแหล่งให้ความร้อนเมื่อเงื่อนไขกระบวนการ (Process Condition) ผิดปกติ ซึ่งวาล์วจะปิดพร้อมกันด้วยคำสั่ง I-1 ดังนั้นระบบการตัดแหล่งให้ความร้อนจะพร้อมทำงานก็ต่อเมื่อมีวาล์วอย่างน้อย 2 จาก 4 ตัวพร้อมทำงาน จึงสามารถวิเคราะห์ HFT ได้เท่ากับ 2 และตีความว่ากลุ่มวาล์วนิรภัยนี้มีการจัดวางแบบ 2oo4 ที่มีเขตส่วนตัดขั้นต่ำดังแถวบนของ Table 4 แต่อย่างไรก็ตามกรณีศึกษานี้ยังมีเงื่อนไขการทำงานมากกว่านั้น เนื่องจากวาล์ว 2 จาก 4 ตัวที่พร้อมทำงานต้องไม่ทำงานบนท่อสายเดียวกัน เขตส่วนตัดขั้นต่ำปรับเปลี่ยนดังแถวล่างของ Table 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 4 Minimal cut sets of heat source cutting system

Architecture	Minimal Cut Set
2oo4	{V1, V2, V3}, {V1, V2, V4}, {V1, V3, V4}, {V2, V3, V4}
2oo4 with Safety Condition	{V1, V2}, {V3, V4}

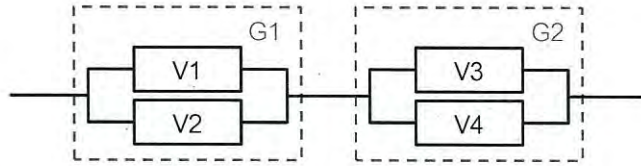


Figure 3 Reliability block diagrams of 2oo4 architecture with safety condition

เซตส่วนตัดขั้นต่ำของการจัดวางแบบ 2oo4 ที่มีเงื่อนไขถูกนำมาใช้ในการสร้าง RBD (Figure 3) ซึ่งส่งผลให้สมการ  $PF_{D_{avg}}$  จากการวิเคราะห์ RBD และการประยุกต์ใช้สมการที่ (6) สามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$PF_{D_{avg}} = PF_{D_{IND,G1}} + PF_{D_{IND,G2}} + PF_{D_{CCF}}$$

สังเกตว่ารูปแบบการจัดวางของ G1 และ G2 เป็นแบบ 1oo2 และจากสมมติฐานตามข้อ b) กับ d) จึงทำให้  $PF_{D_{avg,1oo2}} = PF_{D_{IND,G1}} = PF_{D_{IND,G2}}$  ซึ่งแทนค่าในสมการข้างต้นได้ว่า

$$\begin{aligned} PF_{D_{avg}} &= 2PF_{D_{IND,1oo2}} + PF_{D_{CCF}} \\ &= 2 \left( ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^2 t_{it2} \right) + \beta\lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + MRT \right) + \beta_D\lambda_{DD}MTTR \\ &= 4 \left( ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^2 t_{CETGE} \right) + \beta\lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + MRT \right) + \beta_D\lambda_{DD}MTTR \end{aligned} \quad (12)$$

ผลการทดลองและวิจารณ์

Table 5 Comparison of  $PF_{D_{avg}}$  equation of case study

Method	Average probability of dangerous failure on demand ( $PF_{D_{avg}}$ )
This Paper	$4 \left( ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^2 t_{CETGE} \right) + \beta\lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + MRT \right) + \beta_D\lambda_{DD}MTTR$
IEC 61508-6 (2010)	None
Chung (2016)	$4 \left( ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^2 t_{CETGE} \right) + 2\beta\lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + MRT \right) + 2\beta_D\lambda_{DD}MTTR \quad (13)$
Jahanian (2015) (2oo4 Architecture)	$24 \left( ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD})^3 t_{CETGE} \right) + \beta\lambda_{DU} \left( \frac{\tau}{2} + MRT \right) + \beta_D\lambda_{DD}MTTR \quad (14)$

จากหัวข้อที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบสมการผลลัพธ์จากวิธีการในบทความนี้ (Table 3) กับสูตรทั่วไปตาม IEC 61508-6 (2010) พบว่าสมการทั้งสองเท่ากัน จึงสามารถกล่าวได้ว่าการคำนวณ  $PF_{D_{avg}}$  โดยใช้เซตส่วนตัดขั้นต่ำสอดคล้องกับมาตรฐาน นอกจากนี้วิธีการที่นำเสนอนี้ถูกประยุกต์ใช้กับกรณีศึกษาที่มีการทำงานแบบไม่สุ่มหรือมีเงื่อนไขในหัวข้อที่ 4 โดยพบว่าผลลัพธ์ที่ได้ทั้งในรูปของสมการและเชิงตัวเลขมีความแตกต่างกับวิธีการอื่นๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่นับญาติให้มาเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงสมการ (Table 5) พบว่าไม่มีสูตรตามมาตรฐาน IEC 61508-6 ที่ครอบคลุมรูปแบบการจัดวางของกรณีศึกษา และเมื่อสังเกตสมการที่ (13) พบว่ามีการคำนวณความผิดพลาดร่วมซ้ำซ้อนซึ่งปกติความผิดพลาดร่วมจะถูกคิดเพียงแค่ครั้งเดียวเนื่องจากความผิดพลาดนี้จะส่งผลกับอุปกรณ์ทั้งหมดในกลุ่มโหนดแล้วทำให้ฟังก์ชันเกิดความผิดพลาด ด้วยเหตุนี้  $PFD_{avg}$  จากวิธีการของ Chung (2016) จึงมีค่าสูงหรือประเมินความปลอดภัยของฟังก์ชันนิรภัยต่ำกว่าความจริง โดยอ้างอิงจากการเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงตัวเลข (Figure 4) ที่กำหนดอัตราความผิดพลาดอันตรายตาม Annex B ในมาตรฐาน IEC 61508-6 (2010)

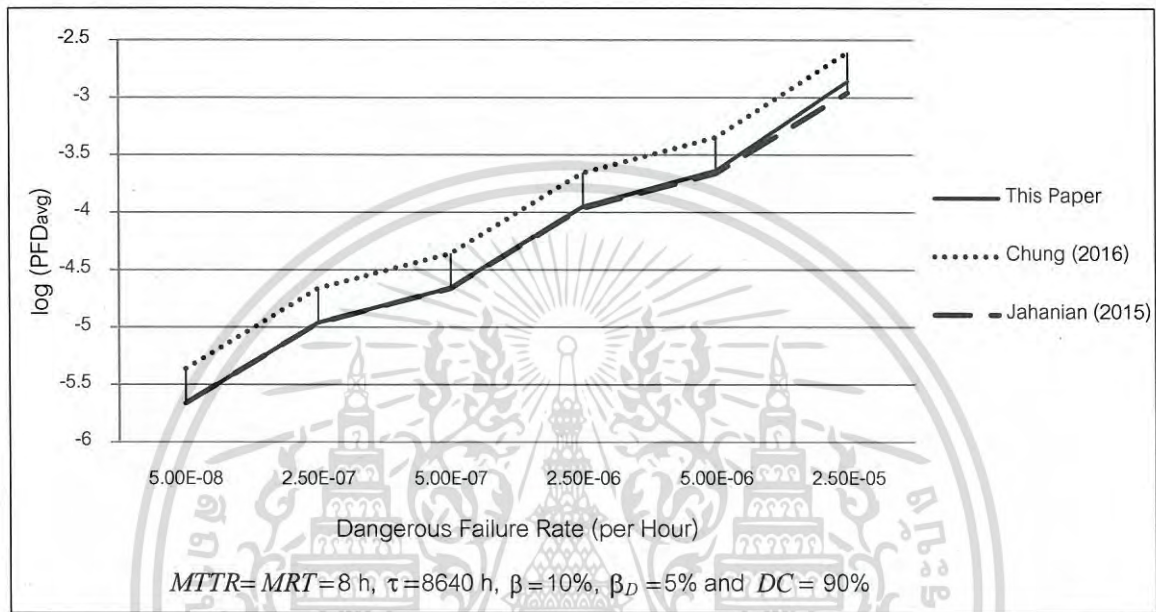


Figure 4 Comparison of the numerical  $PFD_{avg}$  value of case study

อีกทั้งผลลัพธ์ตามวิธีการของ Jahanian (2015) ที่เป็นการวิเคราะห์แบบสุ่มความผิดพลาดยังมีค่าต่ำหรือประเมินความปลอดภัยของฟังก์ชันนิรภัยสูงกว่าความจริง แต่อย่างไรก็ตามถ้าเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีอัตราความผิดพลาดต่ำ จะทำให้  $PFD_{avg}$  จากวิธีการที่พัฒนาและวิธีการของ Jahanian (2015) ใกล้เคียงกัน (Figure 4) ทั้งนี้เนื่องจาก  $PFD_{CCF}$  มีค่ามากกว่า  $PFD_{IND}$  อย่างมาก (Table 6)

Table 6 Comparison of  $PFD_{IND}$ ,  $PFD_{CCF}$  and  $PFD_{avg}$  value

Dangerous Failure Rate	This Paper			Jahanian (2015)			$\frac{ (2) - (1) }{(2)}$
	$PFD_{IND}$	$PFD_{CCF}$	$PFD_{avg}^{(1)}$	$PFD_{IND}$	$PFD_{CCF}$	$PFD_{avg}^{(2)}$	
5E-08	1.163E-09	2.182E-06	2.183E-06	7.386E-14	2.182E-06	2.182E-06	5.330E-04
2.5E-07	2.908E-08	1.091E-05	1.094E-05	9.233E-12	1.091E-05	1.091E-05	2.664E-03
5E-07	1.163E-07	2.182E-05	2.193E-05	7.386E-11	2.182E-05	2.182E-05	5.327E-03
2.5E-06	2.908E-06	1.091E-04	1.120E-04	9.233E-09	1.091E-04	1.091E-04	2.656E-02
5E-06	1.163E-05	2.182E-04	2.298E-04	7.386E-08	2.182E-04	2.183E-04	5.295E-02
2.5E-05	2.907E-04	1.091E-03	1.381E-03	9.233E-06	1.091E-03	1.100E-03	2.558E-01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุป

การวิเคราะห์และคำนวณค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเมื่อต้องการใช้งานหรือ  $PFD_{avg}$  ด้วยวิธีการเซตส่วนตัดขั้นต่ำสามารถสร้างสมการใหม่ที่สอดคล้องกับสูตรตามมาตรฐาน IEC 61508-6 และยังคงครอบคลุมรูปแบบการจัดวางที่ไม่มีการกำหนดสูตรในมาตรฐาน เช่น การจัดวางแบบ KooN และการจัดวางแบบมีเงื่อนไขการทำงานหรือไม่สู่การเกิดความผิดพลาด และเนื่องจากวิธีการที่นำเสนอนี้พิจารณาไปตามเงื่อนไขการทำงานของฟังก์ชันนิรภัย จึงสามารถประยุกต์ใช้กับทุกรูปแบบการจัดวางและให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมกับการทำงานจริงของฟังก์ชันมากกว่าวิธีการอื่นๆ ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่สูงหรือต่ำเกินไปเนื่องจากการวิเคราะห์การทำงานที่ไม่ถูกต้อง

## เอกสารอ้างอิง

- Cetelani M., Ciani L. and Luongo V. 2011. A Simplified Procedure for the Analysis of Safety Instrumented Systems in the Process Industry Application. *Microelectronics Reliability* 51: 1503-1507.
- Chung S., Kim S. and Yang Y. 2016. Use of Hazardous Event Frequency to Evaluate Safety Integrity Level of Subsea Blowout Preventer. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 8: 262-276.
- Ding L., Wang H., Kang K. and Wang K. 2014. A Novel Method for SIL Verification based on System Degradation Using Reliability Block Diagram. *Reliability Engineering & System Safety* 132: 36-45.
- IEC 61508. 2010. *Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems*. The International Electrotechnical Commission, Geneva.
- IEC 61511. 2003. *Functional Safety – Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector*. The International Electrotechnical Commission, Geneva.
- Innal F. 2008. *Contribution to Modelling Safety Instrumented Systems and to Assessing Their Performance: Critical Analysis of IEC 61508 Standard*. Ph.D. Thesis, University of Bordeaux.
- ISA-TR84.00.02-2002 – Part 3. 2002. *Safety Instrumented Functions (SIF) – Safety Integrity Level (SIL) Evaluation Techniques Part 3: Determining the SIL of a SIF via Fault Tree Analysis*. The Instrumentation, System, and Automation Society, United States of America.
- Jahanian H. 2015. *Generalizing PFD Formulas of IEC 61508 for KooN Configurations*. *ISA Transactions* 55: 168-174.
- Rausand M. 2014. *Reliability of Safety-Critical Systems: Theory and Applications*. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Rausand M. and Høyland A. 2004. *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods and Applications*. 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Zhang T., Long W. and Sato Y. 2003. Availability of Systems with Self-diagnostic Components – Applying Markov Model to IEC 61508-6. *Reliability Engineering & System Safety* 80: 133-141.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล           นางสาวณัฐดี เทียมธรรมวงศ์
- วัน-เดือน-ปีเกิด       14 เมษายน 2536
- ที่อยู่                    61/19 หมู่ 8 ซอยลาดกระบัง 16 ถนนอ่อนนุช ตำบลราชาเทวะ อำเภอบางพลี  
                                  จังหวัดสมุทรปราการ 10540
- ประวัติการศึกษา
- 2554 – 2558           วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม (เกียรตินิยมอันดับ 1)  
                                  สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ความชำนาญเฉพาะด้าน   1) ระดับความปลอดภัย (Safety Integrity Level – SIL)  
                                  2) เครื่องมือวัดและควบคุมในอุตสาหกรรมการผลิต
- ประสบการณ์ทำงาน
- 2558 – ปัจจุบัน       ตำแหน่งวิศวกรเครื่องมือวัดและควบคุม บริษัท พีทีที เมนเทนแนนซ์ แอนด์  
                                  เอนจิเนียริง จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้