



# วิทยานิพนธ์

การประเมินความเสี่ยงและออกแบบระบบควบคุมนิรภัยของระบบผลิต  
ไอน้ำที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

**RISK ASSESSMENT AND DESIGN OF SAFETY  
INSTRUMENTED SYSTEM FOR THE STEAM GENERATION  
SYSTEM IN PETROCHEMICAL INDUSTRIAL PLANT**

นายณัฐธณ อัสววิริยะกุล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. ๒๕๕๐



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมความปลอดภัย)

ปริญญา

วิศวกรรมความปลอดภัย

สาขา

โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา

ภาควิชา

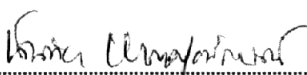
เรื่อง การประเมินความเสี่ยงและออกแบบระบบวัดคุมনিภัยของระบบผลิตไอน้ำที่ใช้ในโรงงาน  
อุตสาหกรรมปิโตรเคมี

Risk Assessment and Design of Safety Instrumented System for the Steam Generation  
System in Petrochemical Industrial Plant

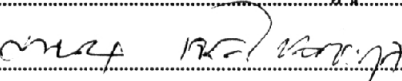
นามผู้วิจัย นายณัฐกร อัสววิริยะกุล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

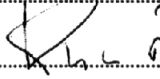
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์นันทิยา หาญศุภลักษณ์, Ph.D. )

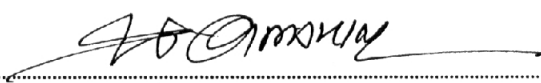
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์มานพ เจริญไชยตระกูล, Ph.D. )

ประธานสาขาวิชา

  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนนต์ วงษ์เกษม, M.S. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

  
( รองศาสตราจารย์วินัย อาจคงหาญ, M.A. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 22 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2550

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประเมินความเสี่ยงและออกแบบระบบวัดคุมনিรภัยของระบบผลิตไอน้ำที่ใช้ใน  
โรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

Risk Assessment and Design of Safety Instrumented System for the Steam  
Generation System in Petrochemical Industrial Plant

โดย

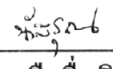
นายณัฐกร อัสววิริยะกุล

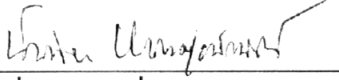
เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมความปลอดภัย)  
พ.ศ. 2550

นัศรณ อัสววิริยะกุล 2550: การประเมินความเสี่ยงและออกแบบระบบควบคุมนิรภัยของระบบผลิตไอน้ำที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมความปลอดภัย) สาขาวิศวกรรมความปลอดภัย โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์นันทยา หาญสุภลักษณ์, Ph.D. 100 หน้า

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อประเมินความเสี่ยงและออกแบบปรับปรุงระบบควบคุมนิรภัย (Safety Instrumented System, SIS) ของระบบผลิตไอน้ำที่มีอยู่ โดยอ้างอิงมาตรฐาน IEC 61508 และ IEC 61511 โดยทำการประเมินความเสี่ยงและหาค่าระดับความปลอดภัยของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม ( $SIL_{EUC}$ ) เพื่อเปรียบเทียบกับค่าระดับความปลอดภัยของฟังก์ชันควบคุมนิรภัย ( $SIL_{SIF}$ ) ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งถ้าค่า  $SIL_{SIF}$  ต่ำกว่า  $SIL_{EUC}$  จำเป็นต้องทำการปรับปรุงระบบควบคุมนิรภัยเพื่อเพิ่มค่าระดับความปลอดภัย ( $SIL$ ) ให้มีค่าเท่ากับ  $SIL_{EUC}$  จากการศึกษาพบว่าอุปกรณ์ที่เป็นฟังก์ชันควบคุมนิรภัย (SIF) ของระบบผลิตไอน้ำทั้งหมดจำนวน 7 ฟังก์ชันควบคุมนิรภัย (SIF) โดยพบว่า SIF หมายเลข 1, 2 และ 3 มีค่า  $SIL_{SIF}$  ต่ำกว่า  $SIL_{EUC}$  ดังนั้นจำเป็นต้องปรับปรุงระบบควบคุมนิรภัยของ SIF ทั้งหมด สำหรับ SIF หมายเลข 1 และ 2 พบว่าการเพิ่มความถี่ในการทดสอบระบบควบคุมนิรภัยจากทุกๆ 6 เดือนเป็นทุกๆ 3 เดือน ก็เพียงพอ แต่สำหรับ SIF หมายเลข 3 นั้นพบว่าต้องเพิ่มความถี่ในการทดสอบ ( $T$ ) ระบบควบคุมนิรภัยเป็นทุกๆ 3 เดือน และควรเพิ่มอุปกรณ์การวัด (Sensing Element) เป็น 3 ตัว โดยให้มีรูปแบบการทำงานเป็น 2oo3 และต้องเพิ่มอุปกรณ์ให้แก่ส่วนประมวลผลอีก 1 ชุด และให้มีรูปแบบการทำงานเป็น 2oo2 จึงจะได้ค่า  $SIL_{SIF}$  เท่ากับ  $SIL_{EUC}$

  
ลายมือชื่อนิสิต

  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

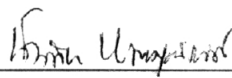
16 / 6 / 50

Nasrul Asawawiriyahkul 2007: Risk Assessment and Design of Safety Instrumented System for the Steam Generation System in Petrochemical Industrial Plant. Master of Engineering (Safety Engineering), Major Field: Safety Engineering, Interdisciplinary Graduate Program. Thesis Advisor: Assistant Professor Nanthiya Hansupalak, Ph.D. 100 pages.

This work was aimed to study the risk assessment and design of the safety instrumented system (SIS) for the steam generation system, based on IEC 61508 and IEC 61511 standard. By processing the risk assessment, the safety integrity level of equipment under control ( $SIL_{EUC}$ ) could be obtained and, in turn, used to compare with the safety integrity level of the related safety instrumented functions ( $SIL_{SIF}$ ). If  $SIL_{SIF}$  is lower than  $SIL_{EUC}$ , the SIS is needed to be improved to acquire higher safety integrity level until it equals to the value of  $SIL_{EUC}$ . It was found that there were 7 safety instrumented functions (SIF) in the steam generation system, 3 of which, having the values of  $SIL_{SIF}$  lower than those of  $SIL_{EUC}$ , were SIF no.1, 2 and 3. For the SIF no.1 and 2, increasing the frequency of proof-test interval ( $T$ ) of the SIS from once every 6 months to once every 3 months was enough to obtain the same value a  $SIL_{EUC}$ . As for SIF no.3, to obtain the same goal, 3 sensing elements (SE) using architectures 2oo3 and 2 sets of logic solver (LS) using architectures 2oo2 should be used instead of one SE using architectures 1oo1 and one set of LS using architectures 1oo1 in the current system.



Student's signature



Thesis Advisor's signature

16 / 6 / 50

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาเอาใจใส่ ชี้แนะแนวทางต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง เพื่อที่จะทำให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์จากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทิยา หาญสุภลักษณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ เจริญไชยตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชพล ชังชู ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย และ รองศาสตราจารย์ วิชัย พฤกษ์ธาราธิกุล ผู้ทรงคุณวุฒิ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทิยา หาญสุภลักษณ์ ที่กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา ให้กำลังใจตลอดจนแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ เพื่อนนิสิตวิศวกรรมความปลอดภัย รุ่นที่ 5 ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจและขอขอบคุณ บริษัท ปตท.เคมีคอล จำกัด (มหาชน) ที่มีส่วนสนับสนุนให้ทุนการศึกษา

ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัยนี้ขอมอบให้เป็นความดีกับ มารดา (นางสุพิศ คำพรหม) ที่เคารพรักและบิดา (มร. มาตังจั้ง) อดีตอาจารย์สอนหนังสือ ณ ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน ที่ให้ข้อคิดในการทำวิทยานิพนธ์นี้และมีส่วนสนับสนุนให้ทุนการศึกษา ตลอดจนภรรยาสุดที่รักที่ได้มีส่วนช่วยในการทำวิทยานิพนธ์และลูกๆที่น่ารักที่เป็นกำลังใจให้

นัสรุณ อัสวาวิริยะกุล

มิถุนายน 2550

## สารบัญ

หน้า

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| สารบัญ                                                        | (1) |
| สารบัญตาราง                                                   | (2) |
| สารบัญภาพ                                                     | (3) |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ                                     | (5) |
| คำนำ                                                          | 1   |
| วัตถุประสงค์                                                  | 2   |
| ขอบเขตของการวิจัย                                             | 2   |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                                     | 2   |
| การตรวจเอกสาร                                                 | 3   |
| แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบวัดคูลมน์นิรภัย             | 3   |
| มาตรฐาน IEC 61508 และ IEC 61511                               | 31  |
| งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                                         | 46  |
| อุปกรณ์และวิธีการ                                             | 47  |
| อุปกรณ์                                                       | 47  |
| วิธีการ                                                       | 47  |
| ผลและวิจารณ์                                                  | 49  |
| สรุปและข้อเสนอแนะ                                             | 65  |
| สรุป                                                          | 65  |
| ข้อเสนอแนะ                                                    | 65  |
| เอกสารและสิ่งอ้างอิง                                          | 66  |
| ภาคผนวก                                                       | 68  |
| ภาคผนวก ก การทำงานของระบบผลิตไอน้ำในโรงงานแห่งนี้             | 69  |
| ภาคผนวก ข แผนภาพวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์วัดคูลมน์นิรภัย     | 72  |
| ภาคผนวก ค การหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายจากแผนภาพต้นไม้     | 78  |
| ภาคผนวก ง ตารางค่าความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์วัดคูลมน์นิรภัย | 83  |
| ภาคผนวก จ แสดงการคำนวณหาค่าระดับความปลอดภัย                   | 89  |
| ประวัติการศึกษาและการทำงาน                                    | 100 |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่         |                                                                                                                                | หน้า |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1                | แสดงสัญลักษณ์ชื่อและความหมายของแผนภาพต้นไม้<br>(FAULT TREE ANALYSIS)                                                           | 23   |
| 2                | แสดงสมการของ Logic Gate                                                                                                        | 25   |
| 3                | แสดงความสัมพันธ์สมการทางคณิตศาสตร์ของการต่อแบบ AND Gate<br>หรือแบบขนาน                                                         | 29   |
| 4                | แสดงความสัมพันธ์สมการทางคณิตศาสตร์ของการต่อแบบ OR Gate<br>หรือแบบอนุกรม                                                        | 29   |
| 5                | แสดงค่าระดับความปลอดภัย                                                                                                        | 44   |
| 6                | แสดงจำนวนฟังก์ชันวัดความน่าเชื่อถือ (SIF)                                                                                      | 49   |
| 7                | การประเมินความเสี่ยงของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม                                                                                  | 52   |
| 8                | แสดงการเปรียบเทียบ SIL ระหว่าง $SIL_{EUC}$ และ $SIL_{SIF}$ ของแต่ละ SIF                                                        | 61   |
| <br>ตารางผนวกที่ |                                                                                                                                |      |
| ง1               | แสดงค่าอัตราความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์วัดความน่าเชื่อถือต่างๆ                                                                | 85   |
| ง2               | แสดงการหาค่าอัตราความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ SIS<br>ในระบบผลิตไอน้ำ                                                           | 87   |
| จ1               | แสดงการคำนวณหาค่า $PFD_{avg}$ ของ SIF หมายเลข 1 และ 2                                                                          | 91   |
| จ2               | แสดงการคำนวณหาค่า $PFD_{avg}$ ของ SIF หมายเลข 1 และ 2 หลังปรับปรุง                                                             | 92   |
| จ3               | แสดงการคำนวณหาค่า $PFD_{avg}$ ของ SIF หมายเลข 3                                                                                | 93   |
| จ4               | แสดงการคำนวณหาค่า $PFD_{avg}$ ของ SIF หมายเลข 3 ปรับปรุงครั้งที่ 1<br>(โดยเพิ่มอุปกรณ์ SE และ LS โดยมีรูปแบบการทำงานเป็น 2oo2) | 94   |
| จ5               | แสดงการคำนวณหาค่า $PFD_{avg}$ ของ SIF หมายเลข 3 ปรับปรุงครั้งที่ 2<br>(โดยเพิ่มอุปกรณ์ SE และ LS โดยมีรูปแบบการทำงานเป็น 2oo3) | 95   |
| จ6               | แสดงการคำนวณหาค่า $PFD_{avg}$ ของ SIF หมายเลข 4                                                                                | 96   |
| จ7               | แสดงการคำนวณหาค่า $PFD_{avg}$ ของ SIF หมายเลข 5                                                                                | 97   |
| จ8               | แสดงการคำนวณหาค่า $PFD_{avg}$ ของ SIF หมายเลข 6                                                                                | 98   |
| จ9               | แสดงการคำนวณหาค่า $PFD_{avg}$ ของ SIF หมายเลข 7                                                                                | 99   |



## สารบัญภาพ

| ภาพที่ |                                                                                         | หน้า |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1      | แสดงระดับชั้นการป้องกันอันตราย                                                          | 4    |
| 2      | ฟังก์ชันการควบคุม                                                                       | 7    |
| 3      | ฟังก์ชันการควบคุมระดับของเหลว                                                           | 7    |
| 4      | โครงสร้างระบบควบคุมพื้นฐาน                                                              | 8    |
| 5      | ฟังก์ชันวัดคูนินทรีย์                                                                   | 9    |
| 6      | ตัวอย่างระบบวัดคูนินทรีย์ที่มีฟังก์ชันวัดคูนินทรีย์ 3 ฟังก์ชัน                          | 11   |
| 7      | ตัวอย่างฟังก์ชันวัดคูนินทรีย์และฟังก์ชันการควบคุมที่ใช้ควบคุม<br>ความดันในกระบวนการผลิต | 12   |
| 8      | แสดงอุปกรณ์การวัดรูปแบบต่างๆ                                                            | 13   |
| 9      | แสดงอุปกรณ์ประมวลผลรูปแบบต่างๆ                                                          | 17   |
| 10     | แสดงอุปกรณ์สุดท้ายที่เป็นวาล์วนินทรีย์แบบต่างๆ                                          | 20   |
| 11     | แสดงเส้นโค้งอ่างอาบน้ำ (Bathtub Curve)                                                  | 26   |
| 12     | ความสัมพันธ์ระหว่าง MTTF และ MTTR                                                       | 30   |
| 13     | แสดงลำดับขั้นตอนการหาค่าระดับความปลอดภัยของอุปกรณ์<br>ภายใต้การควบคุม ( $SIL_{EUC}$ )   | 33   |
| 14     | แสดงกราฟความเสี่ยงสูญเสียต่อทรัพย์สิน                                                   | 39   |
| 15     | แสดงกราฟความเสี่ยงเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม                                                 | 39   |
| 16     | แสดงกราฟความเสี่ยงกระทบต่อชีวิตคน                                                       | 40   |
| 17     | แสดงลำดับขั้นตอนการหาค่าระดับความปลอดภัยของฟังก์ชัน<br>วัดคูนินทรีย์ ( $SIL_{SIF}$ )    | 42   |
| 18     | ฟังก์ชันวัดคูนินทรีย์ในระบบวัดคูนินทรีย์                                                | 45   |
| 19     | กราฟแสดงสาเหตุความผิดพลาดของระบบวัดคูนินทรีย์                                           | 46   |
| 20     | แสดงแผนภาพกระบวนการผลิตของระบบผลิตไอน้ำ                                                 | 50   |
| 21     | แสดงแผนภาพต้นไม้ของ SIF หมายเลข 3                                                       | 55   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพผนวกที่                                                              | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------|------|
| ข1      แสดงวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์นิรภัย SIF หมายเลข 1              | 74   |
| ข2      แสดงวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์นิรภัย SIF หมายเลข 2              | 74   |
| ข3      แสดงวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์นิรภัย SIF หมายเลข 3              | 75   |
| ข4      แสดงวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์นิรภัย SIF หมายเลข 3 หลังปรับปรุง | 75   |
| ข5      แสดงวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์นิรภัย SIF หมายเลข 4              | 76   |
| ข6      แสดงวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์นิรภัย SIF หมายเลข 5              | 76   |
| ข7      แสดงวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์นิรภัย SIF หมายเลข 6              | 77   |
| ข8      แสดงวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์นิรภัย SIF หมายเลข 7              | 77   |
| ค1      แสดงแผนภาพต้นไม้ของ SIF หมายเลข 1 และ 2                         | 79   |
| ค2      แสดงแผนภาพต้นไม้ของ SIF หมายเลข 3 (ปรับปรุงครั้งที่ 1)          | 80   |
| ค3      แสดงแผนภาพต้นไม้ของ SIF หมายเลข 3 (ปรับปรุงครั้งที่ 2)          | 80   |
| ค4      แสดงแผนภาพต้นไม้ของ SIF หมายเลข 4                               | 81   |
| ค5      แสดงแผนภาพต้นไม้ของ SIF หมายเลข 5                               | 81   |
| ค6      แสดงแผนภาพต้นไม้ของ SIF หมายเลข 6                               | 82   |
| ค7      แสดงแผนภาพต้นไม้ของ SIF หมายเลข 7                               | 82   |

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

### คำอธิบายสัญลักษณ์

|             |   |                                                                     |
|-------------|---|---------------------------------------------------------------------|
| 1oo1        | = | รูปแบบการทำงาน แบบลงมติการทำงานจาก 1 ใน 1 (One out of One voting)   |
| 1oo2        | = | รูปแบบการทำงาน แบบลงมติการทำงานจาก 1 ใน 2 (One out of Two voting)   |
| 1oo3        | = | รูปแบบการทำงาน แบบลงมติการทำงานจาก 1 ใน 3 (One out of Three voting) |
| 2oo2        | = | รูปแบบการทำงาน แบบลงมติการทำงานจาก 2 ใน 2 (Two out of Two voting)   |
| 2oo3        | = | รูปแบบการทำงาน แบบลงมติการทำงานจาก 2 ใน 3 (Two out of Three voting) |
| $\lambda$   | = | อัตราความผิดพลาด (ครั้งต่อหน่วยเวลา)                                |
| $\lambda^D$ | = | อัตราความผิดพลาดอันตราย (ครั้งต่อหน่วยเวลา)                         |
| $T$         | = | ช่วงระยะเวลาในการทดสอบการทำงาน (ชั่วโมง)                            |
| $W$         | = | อัตราการเกิดเหตุการณ์อันตราย                                        |
| P&ID        | = | แผนภาพกระบวนการผลิต (Piping and Instrument Diagram)                 |

### คำอธิบายคำย่อ

|      |   |                                                           |
|------|---|-----------------------------------------------------------|
| BPCS | = | ระบบควบคุมพื้นฐาน (Basic Process Control System)          |
| DCS  | = | Distributed Control System                                |
| ESD  | = | Emergency Shut Down System                                |
| EUC  | = | อุปกรณ์ภายใต้การควบคุม (Equipment Under Control)          |
| FE   | = | อุปกรณ์สุดท้าย (Final Element)                            |
| FTA  | = | การวิเคราะห์แบบแผนภาพต้นไม้ (Fault Tree Analysis)         |
| HSE  | = | (UK) Health and Safety Executive                          |
| IEC  | = | International Electrotechnical Commission                 |
| ISA  | = | Instrumentation, System and Automation Society            |
| LOPA | = | การวิเคราะห์ชั้นการป้องกัน (Layer of Protection Analysis) |
| LS   | = | ส่วนประมวลผล (Logic Solver)                               |
| MTBF | = | เวลาเฉลี่ยระหว่างความผิดพลาด (Mean Time Between Failure)  |
| MTTF | = | เวลาเฉลี่ยก่อนการเกิดความผิดพลาด (Mean Time to Failure)   |
| MTTR | = | เวลาเฉลี่ยในการซ่อมแซม (Mean Time to Repair)              |

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

|                    |   |                                                           |
|--------------------|---|-----------------------------------------------------------|
| R                  | = | ความเชื่อมั่น (Reliability)                               |
| P                  | = | ความผิดพลาดหรือโอกาสเกิดความผิดพลาด (Failure Probability) |
| PFD                | = | ค่าความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ในเวลาที่ต้องการ           |
| PFD <sub>avg</sub> | = | ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ในเวลาที่ต้องการ     |
| PLC                | = | Programmable Logic Controller                             |
| SE                 | = | อุปกรณ์การวัด (Sensing Element)                           |
| SIF                | = | ฟังก์ชันวัดคุมনিรภัย (Safety Instrumented Function)       |
| SIL                | = | ค่าระดับความปลอดภัย (Safety Integrity Level)              |
| SIL <sub>SIF</sub> | = | ค่าระดับความปลอดภัยของฟังก์ชันวัดคุมনিรภัย                |
| SIL <sub>EUC</sub> | = | ค่าระดับความปลอดภัยของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม              |
| SIS                | = | ระบบวัดคุมনিรภัย (Safety Instrumented System)             |

## การประเมินความเสี่ยงและออกแบบระบบวัดคุมনিรภัยของระบบผลิตไอน้ำที่ใช้ใน โรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

### Risk Assessment and Design of Safety Instrumented System for the Steam Generation System in Petrochemical Industrial Plant

#### คำนำ

ในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิต ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการเปลี่ยนสภาพของวัตถุดิบ เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ต้องมีการวัดและควบคุมตัวแปรต่างๆ เช่นการไหล (Flow) ระดับของเหลว (level) ความดัน (Pressure) อุณหภูมิ (Temperature) เป็นต้น เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการควบคุม ตัวแปรต่างๆ ในแต่ละฟังก์ชันควบคุมจะประกอบไปด้วย อุปกรณ์การวัด (Sensing Element) ตัวควบคุม (Controller) และอุปกรณ์สุดท้าย (Final Element ) ฟังก์ชันควบคุมสามารถเปลี่ยนแปลง ค่าที่กำหนด (Set Point) ได้ตามต้องการ ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์การวัด การปฏิบัติงาน ที่ผิดพลาด หรือการสึกหรอ การติดขัดของอุปกรณ์สุดท้าย เหตุการณ์เหล่านี้อาจเป็นสาเหตุทำให้ ค่าตัวแปรในกระบวนการผิดพลาดไปจากค่าที่ต้องการ ถ้าค่าตัวแปรต่างๆ มีค่าเกินกว่าจุดที่อุปกรณ์ ในกระบวนการผลิตจะทนได้ อาจทำให้สารที่อยู่ในกระบวนการผลิตเกิดการรั่วไหลออกมายัง บรรยากาศภายนอก ก็จะเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน สิ่งแวดล้อมและอุปกรณ์ได้ การป้องกัน อันตรายนี้สามารถทำได้โดยการติดตั้งระบบป้องกันหรือระบบนิรภัยเข้าไป ระบบนิรภัยสามารถ ทำได้หลายวิธี เช่น ออกแบบให้ถึงทนความดันได้สูงกว่าความดันของกระบวนการติดตั้งแล้ว นิรภัยทางกล (Safety Relief Valve) และจัดเตรียมฟังก์ชันนิรภัยของระบบวัดคุมนิรภัย (Safety Instrumented System, SIS) เป็นต้น ในโครงการวิจัยนี้ มุ่งสนใจระบบวัดคุมนิรภัย (SIS) หรือ เรียกว่าระบบ ESD (Emergency Shut Down System) ที่ใช้เพื่อป้องกันอันตราย โดยอ้างอิงมาตรฐาน IEC 61508 และ IEC 61511 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ได้ผ่านการรับรองจากสมาชิกของ IEC ให้มีการ ใช้งานในปี พ.ศ.2543 โดยก่อนปี พ.ศ.2543 การออกแบบระบบป้องกันหรือระบบวัดคุมนิรภัยใน กระบวนการผลิต เป็นการออกแบบบนพื้นฐานจากประสบการณ์ ธรรมเนียมปฏิบัติและสัญชาติ ญาณ ซึ่งอาจก่อให้เกิดความไม่น่าเชื่อถือและไม่สามารถป้องกันอันตรายจากความผิดพลาดของ ระบบวัดคุมนิรภัย ดังนั้นมาตรฐาน ดังกล่าว จึงได้มีการกำหนดค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายของ ฟังก์ชันวัดคุมนิรภัยต่างๆ ที่อยู่ในระบบวัดคุมนิรภัย ซึ่งค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตราย (Average Probability of a Failure on Demand, PFDavg) จะเรียกว่า ค่าระดับความปลอดภัย (Safety Integrity

Level, SIL) ของฟังก์ชันวัดคุมনিรภัย (Safety Instrumented Functions) ในระบบวัดคุมนิรภัย เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือและสามารถตรวจสอบได้

ระบบผลิตไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแห่งนี้ได้ใช้ความร้อนที่เหลือใช้จากการขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาผลิตไอน้ำ เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตหลัก ดังนั้นหากเกิดการทำงานผิดพลาดของระบบวัดคุมนิรภัยแล้วจะส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยและกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่องภายในโรงงาน ดังนั้นการวิจัยนี้จึงมุ่งประเมินความเสี่ยงและออกแบบระบบวัดคุมนิรภัยของระบบผลิตไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมีดังกล่าว

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการประเมินความเสี่ยงระบบวัดคุมนิรภัยของระบบผลิตไอน้ำ ที่สร้างก่อนปี พ.ศ. 2543 โดยใช้มาตรฐาน International Electrotechnical Commission IEC 61508 และ IEC 61511
2. ทำการออกแบบปรับปรุงระบบวัดคุมนิรภัยของระบบผลิตไอน้ำ

### ขอบเขตของการวิจัย

1. กรณีศึกษาระบบวัดคุมนิรภัยของระบบผลิตไอน้ำที่ได้ความร้อนเหลือใช้จากการขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแห่งหนึ่งในจังหวัดระยอง

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการประเมินความเสี่ยงและออกแบบระบบวัดคุมนิรภัย
2. สามารถนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาการประเมินความเสี่ยงและออกแบบระบบวัดคุมนิรภัยไปใช้กับหน่วยผลิตอื่นๆได้
3. นำเสนอผู้บริหารของบริษัทแห่งนี้เพื่อดำเนินการปรับปรุงตามที่ได้ประเมินความเสี่ยงและออกแบบไว้

## การตรวจเอกสาร

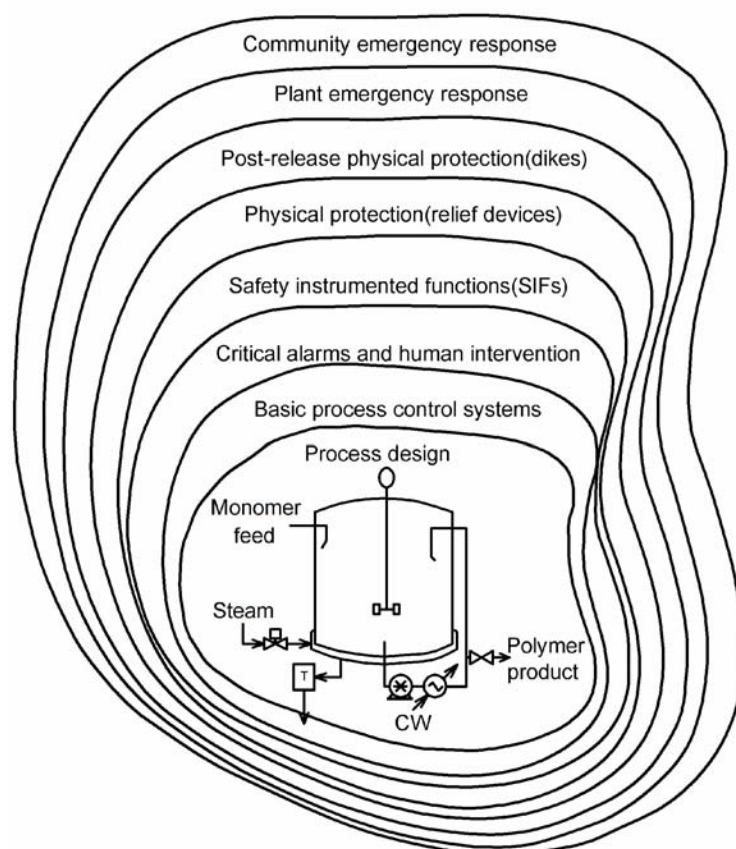
การวิจัยเรื่องประเมินความเสี่ยงและออกแบบระบบวัดคุนิรภัยของระบบผลิตไอน้ำที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี สามารถแบ่งแนวคิดทฤษฎี หลักการและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยได้ 3 กลุ่มหลักๆ ดังนี้

1. แนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับระบบวัดคุนิรภัย
2. มาตรฐาน IEC 61508 และ IEC 61511
3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## แนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับระบบวัดคุนิรภัย

### 1. การวิเคราะห์ชั้นการป้องกันอันตราย (Layer of Protection Analysis, LOPA)

Hyatt (2003) ได้กล่าวไว้ว่า ในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตที่อันตรายและมีผลกระทบที่รุนแรงจะใช้หลักการป้องกันหลายชั้น การวิเคราะห์ชั้นการป้องกันอันตรายนั้นเป็นการประเมินความเสี่ยงอันตรายของกระบวนการผลิตเพื่อหาทางป้องกันให้ความเสี่ยงลดลงโดยเพิ่มระดับชั้นการป้องกัน ซึ่งการแบ่งระดับชั้นการป้องกันอันตราย (Layer of Protection) ออกดังแสดงในภาพที่ 1 ได้ดังนี้



ภาพที่ 1 แสดงระดับชั้นการป้องกันอันตราย

ที่มา: Crowl and Louvar (2002)

1. การป้องกันโดยการออกแบบกระบวนการผลิต (Process Design) ให้มีความปลอดภัยที่ฝังอยู่ในตัวของมันเอง (Inherently Safer) โดยไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์เพิ่มเติม เช่น ออกแบบให้ถึงทนความดันได้สูงกว่าความดันของกระบวนการ
2. การป้องกันโดยระบบควบคุมพื้นฐาน (Basic Process Control System, BPCS) เป็นการควบคุมกระบวนการผลิตให้ดำเนินไปอย่างราบรื่นโดยมีการวัดและควบคุมตัวแปรต่างๆ เช่น การไหล (Flow), ระดับของเหลว (level), ความดัน (Pressure), อุณหภูมิ (Temperature)
3. การป้องกันโดยระบบแจ้งเตือน (Critical Alarm) และให้บุคคลเข้าไปจัดการ (Human Intervention) กับกระบวนการผลิตที่ระบบควบคุมพื้นฐานไม่สามารถควบคุมตัวแปรได้ตามวัตถุประสงค์



4. การป้องกันโดยใช้ฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย (Safety Instrumented Functions, SIF) ของระบบวัดคุมนิรภัย (Safety Instrumented System, SIS) ซึ่งระบบนี้จะทำงานแยกอิสระจากระบบควบคุมพื้นฐาน (BPCS) ความน่าเชื่อถือของระบบวัดคุมนิรภัยจะหาได้โดยอยู่ในรูปของค่าความผิดพลาดอันตราย (probability of failure on demand, PFD) และ ค่าระดับความปลอดภัย (Safety Integrity Level, SIL)

5. การป้องกันทางกายภาพ (Physical Protection) ได้แก่ การติดตั้งวาล์วนิรภัยทางกล (Safety Relief Valve) และอุปกรณ์ปล่อยความดันฉุกเฉิน (Rupture disc) เป็นต้น

6. การป้องกันทางกายภาพ หลังจากสารหรือพลังงานถูกปล่อยออกสู่ภายนอกอย่างรวดเร็ว (Post-release Physical Protection) ได้แก่ การสร้างกำแพงกันและผนังทนระเบิด เป็นต้น

7. การป้องกันโดยกำหนดภาวะฉุกเฉินในโรงงาน (Plant Emergency Response)

8. การป้องกันโดยกำหนดภาวะฉุกเฉินในชุมชน (Community Emergency Response)

จากชั้นการป้องกันอันตราย (Protection Layer) ข้างต้นเป็นการแสดงให้เห็นว่ามีการป้องกันกระบวนการผลิตเป็นระดับชั้นซึ่งก็แล้วแต่ๆกระบวนการผลิตที่มีความเสี่ยงเท่าใดและจะต้องมีระดับชั้นการป้องกันเพิ่มขึ้นไหม ในการวิจัยนี้จะมุ่งไปที่ระบบวัดคุมนิรภัยในกระบวนการผลิตที่มีอยู่เดิม เพื่อหาความเสี่ยงหรือความน่าเชื่อถือโดยอยู่ในรูปของค่าความผิดพลาดอันตราย (PFD) และ ค่าระดับความปลอดภัย (SIL)

## 2. ระบบการควบคุมพื้นฐาน (Basic Process Control System, BPCS)

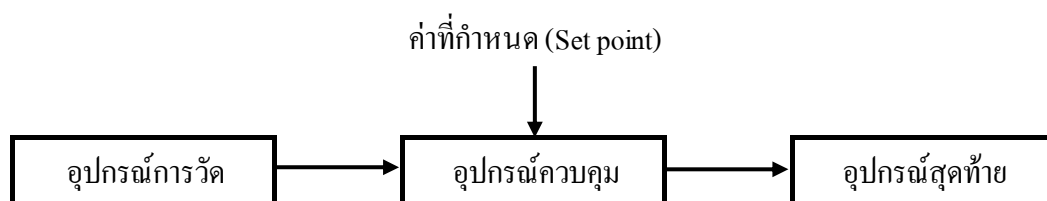
ทวิช (2548) ได้กล่าวไว้ว่า ระบบควบคุมพื้นฐาน หมายถึงการนำเครื่องมือวัดและเครื่องมือควบคุม ปฏิบัติหน้าที่ร่วมกัน เป็นเครื่องมือสำหรับใช้ใน โรงงานอุตสาหกรรมเพื่อตรวจสอบและควบคุมกระบวนการผลิตให้ดำเนินไปอย่างราบรื่น ตามวัตถุประสงค์ของกระบวนการผลิต ซึ่งจะมีตัวแปรทางกระบวนการต่างๆ ที่มีการควบคุมโดยระบบควบคุมพื้นฐาน ได้แก่ การไหล (Flow) ระดับของเหลว (Level) ความดัน (Pressure) เป็นต้น ดังนั้นเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้จึงต้องมีการจัดเตรียมระบบการวัดและควบคุมขึ้นในการกระบวนการผลิตดังแสดงในภาพที่ 2 และภาพที่ 3 โดยระบบการวัดและควบคุมจะประกอบไปด้วยฟังก์ชัน

การควบคุม (Control Function) หลายฟังก์ชัน อุปกรณ์พื้นฐานที่สำคัญของฟังก์ชันการควบคุมจะมีอยู่ 3 ส่วนดังนี้

1. อุปกรณ์การวัด (Sensing Element) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดสถานะของกระบวนการผลิตและทำหน้าที่ในการเปลี่ยนตัวแปรจากกระบวนการผลิตให้เป็น สัญญาณไฟฟ้ามาตรฐาน 4 ถึง 20 มิลลิแอมแปร์ (mA.) ที่แรงดัน 24 โวลต์กระแสตรง (VDC.) หรือสัญญาณมาตรฐานชนิดอื่น ๆ เพื่อส่งข้อมูลของตัวแปรต่าง ๆ ไปยังอุปกรณ์ควบคุม (Controller) และใช้แสดงค่าตัวแปรที่หน่วยแสดงผลของระบบควบคุม เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถสังเกตเห็น การเปลี่ยนแปลงและควบคุมตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้ได้ หน่วยแสดงผลอุปกรณ์การวัดพื้นฐานจะมีดังนี้ อุปกรณ์การวัดการไหล (Flow Transmitter) อุปกรณ์การวัดระดับของเหลว (Level Transmitter) อุปกรณ์การวัดความดัน (Pressure Transmitter) และ อุปกรณ์การวัดอุณหภูมิ (Temperature Transmitter)

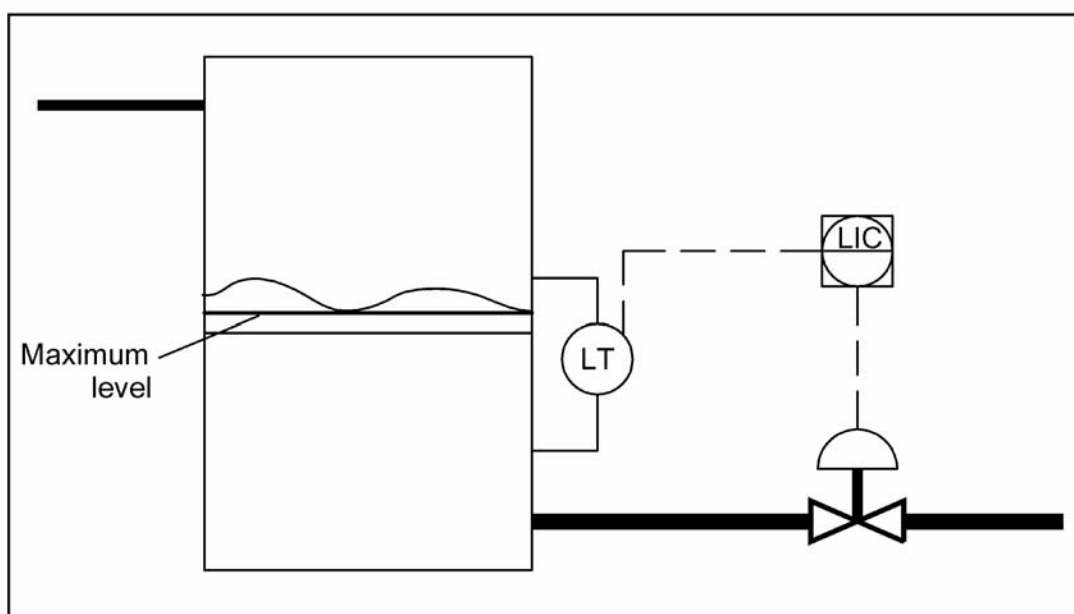
2. อุปกรณ์ควบคุม (Controller) จะทำการควบคุมตัวแปรจากกระบวนการผลิตให้อยู่ในค่าที่ต้องการ โดยการรับสัญญาณมาจากอุปกรณ์การวัดเพื่อมาทำการเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนด (Set point) และทำการประมวลผลจากนั้นจะส่งสัญญาณอะนาล็อก (analog) หรือสัญญาณไฟฟ้ามาตรฐาน 4 ถึง 20 มิลลิแอมแปร์ (mA.) ที่แรงดัน 24 โวลต์กระแสตรง (VDC.) ไปยังอุปกรณ์สุดท้าย เพื่อทำการปรับตัวแปรในกระบวนการให้อยู่ในค่าที่ต้องการ ตัวควบคุม (Controller) ประกอบด้วย อุปกรณ์หลักๆ ดังนี้ แหล่งจ่ายพลังงาน (Power Supply Unit) ตัวประมวลผลกลาง (Central Processor Unit) ส่วนรับและส่งสัญญาณ (Input and Output Cards) ส่วนติดต่อสื่อสาร (Communication Port) และ โปรแกรมในการควบคุม (Control Function Program)

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



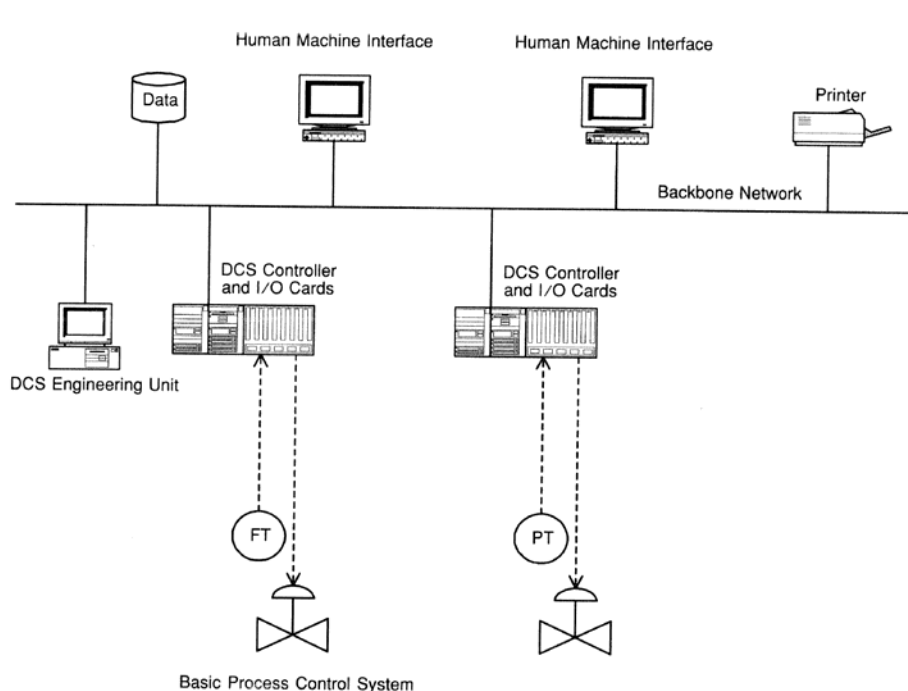
ภาพที่ 2 ฟังก์ชันการควบคุม

ที่มา: ทวิช (2548)



ภาพที่ 3 ฟังก์ชันการควบคุมระดับของเหลว

ระบบการควบคุมพื้นฐานที่ใช้งานกันอย่างกว้างขวางสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตในปัจจุบันคือระบบควบคุมแบบกระจาย (Distributed Control System, DCS) โดยโครงสร้างระบบควบคุมพื้นฐาน แสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 โครงสร้างระบบควบคุมพื้นฐาน  
ที่มา: ทวิช (2548)

### 3. ระบบวัดคุมนิรภัย (Safety Instrumented System, SIS)

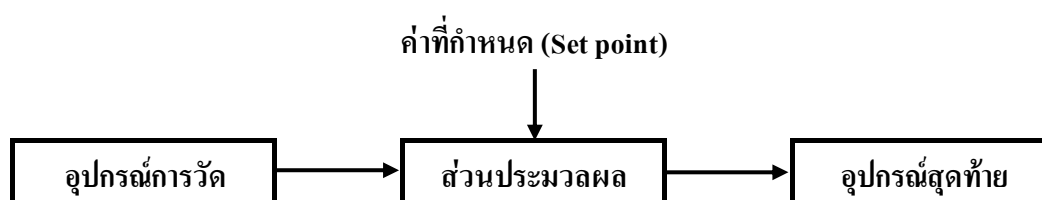
ระบบวัดคุมนิรภัย คือระบบที่ออกแบบมาให้ตอบสนองต่อสภาวะใดๆ จากกระบวนการผลิตซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายได้ และถ้าไม่มีการดำเนินการใดๆ อันตรายจะมีความรุนแรงมากขึ้น โดยระบบนิรภัยจะส่งสัญญาณออกไป เพื่อลดผลกระทบดังกล่าว รวมทั้งความรุนแรงของสิ่งที่เกิดตามมาได้ (HSE, 1987) นั่นคือระบบวัดคุมนิรภัยใช้เป็นระบบป้องกัน (Protection System) หรือระบบนิรภัย (Safety System) โดยมีส่วนประกอบของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าทางอิเล็กทรอนิกส์ และโปรแกรมทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electrical/Electronic/Programmable Electronic Systems) นอกจากนี้ระบบวัดคุมนิรภัยสามารถเรียกอีกชื่อได้ว่า ระบบ ESD ที่ย่อมาจาก Emergency Shut Down System

ระบบควบคุมนิรภัยประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. อุปกรณ์การวัด (Sensing Element) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดสถานะของกระบวนการผลิต และเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต (Process Parameter) ให้เป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้ามาตรฐาน 4 ถึง 20 มิลลิแอมแปร์ (mA.) ที่แรงดัน 24 โวลต์กระแสตรง (VDC.) เพื่อส่งไปยังส่วนประมวลผล (Logic Solver) ซึ่งเหมือนกับอุปกรณ์การวัดของระบบการควบคุมพื้นฐาน แต่จำนวนอุปกรณ์การวัดที่ใช้ในระบบควบคุมนิรภัยนี้อาจมีมากกว่าหนึ่งตัวที่ทำงานร่วมกัน ขึ้นอยู่กับอัตราความผิดพลาด (Failure rate) ที่ต้องการ กล่าวคือถ้าต้องการให้ระบบควบคุมนิรภัยมีความผิดพลาดในการทำงานน้อยที่สุด (หรือมีอัตราความผิดพลาดต่ำๆ) จำนวนอุปกรณ์การวัดที่ใช้ควรมีมากขึ้น

2. ส่วนประมวลผล (Logic Solver) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับประมวลผลทางตรรกะของระบบควบคุมนิรภัย เพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิตให้อยู่ในสภาวะปลอดภัย เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น โดยการรับสัญญาณมาจากอุปกรณ์การวัดเพื่อมาทำการเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนด (Set Point) และจากนั้นจะส่งสัญญาณแบบดิจิทัลไปยังอุปกรณ์สุดท้าย (สัญญาณจะเป็น ปิดหรือเปิด 0% หรือ 100 % เท่านั้น) ส่วนประมวลผลจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก ๆ ดังนี้ แหล่งจ่ายพลังงาน ตัวประมวลผลกลาง ส่วนรับและส่งสัญญาณ ส่วนติดต่อสื่อสารและโปรแกรมในการทำงาน

3. อุปกรณ์สุดท้าย (Final Element) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าจากส่วนประมวลผล ส่วนใหญ่จะเป็นสัญญาณไฟฟ้าแรงดัน 24 VDC หรือ 220 VAC, 50 Hz. ไปทำการปิดและเปิดอุปกรณ์สุดท้าย เช่น วาล์วนิรภัย (Shut Down Valve) หรือชุดควบคุมมอเตอร์ (Motor Control Center)



ภาพที่ 5 ฟังก์ชันควบคุมนิรภัย

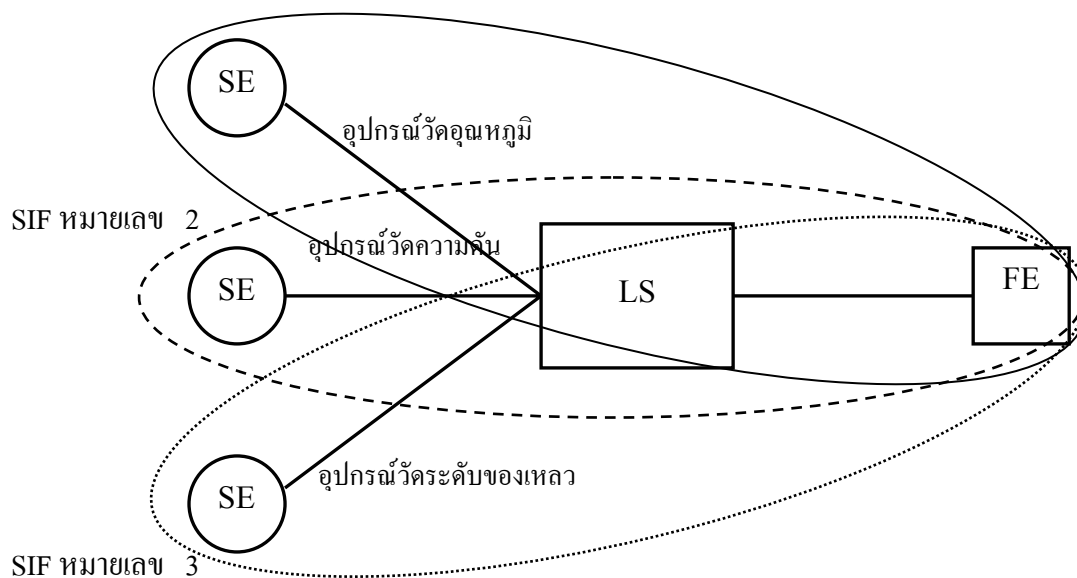
ที่มา: ทวิช (2548)

ภาพที่ 5 แสดงถึงแผนผังของส่วนประกอบของระบบวัดคูนินทรีย์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าฟังก์ชันวัดคูนินทรีย์จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับฟังก์ชันควบคุม (แสดงในภาพที่ 3) ส่วนที่แตกต่างกันคือ ส่วนประมวลผลของระบบวัดคูนินทรีย์จะประมวลผลเป็นแบบตรรกะ (ในขณะที่ส่วนประมวลผลของระบบควบคุมพื้นฐานจะประมวลผลแบบเชิงเส้น) โดยสัญญาณส่งออกจะมี 2 สถานะคือ ปิดและเปิด ซึ่งอุปกรณ์สุดท้ายของฟังก์ชันวัดคูนินทรีย์จึงต้องทำงานที่ 2 สถานะ (ปิดและเปิดเท่านั้น) ด้วย นอกจากนี้ขณะทำงานในสถานะปกติ ผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถเปลี่ยนค่าที่กำหนด (Set point) ได้ แต่สามารถกระทำได้ในช่วงการเขียนโปรแกรมการทำงาน ซึ่งต้องมีการควบคุมขั้นตอนในการเปลี่ยนแปลงอย่างเคร่งครัด ในการทำงานนั้น ตัวประมวลผลจะทำการอ่านค่าตัวแปรมาจากอุปกรณ์การวัดและเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับค่าที่กำหนด ซึ่งตัวประมวลผลจะไม่ทำงาน ถ้าค่าที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนด แต่ถ้าค่าที่อ่านได้มีค่ามากกว่าค่าที่กำหนด โดยตัวประมวลผลจะส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์สุดท้าย ให้ทำการปิดหรือเปิด

### ฟังก์ชันวัดคูนินทรีย์ (Safety Instrumented Functions, SIF)

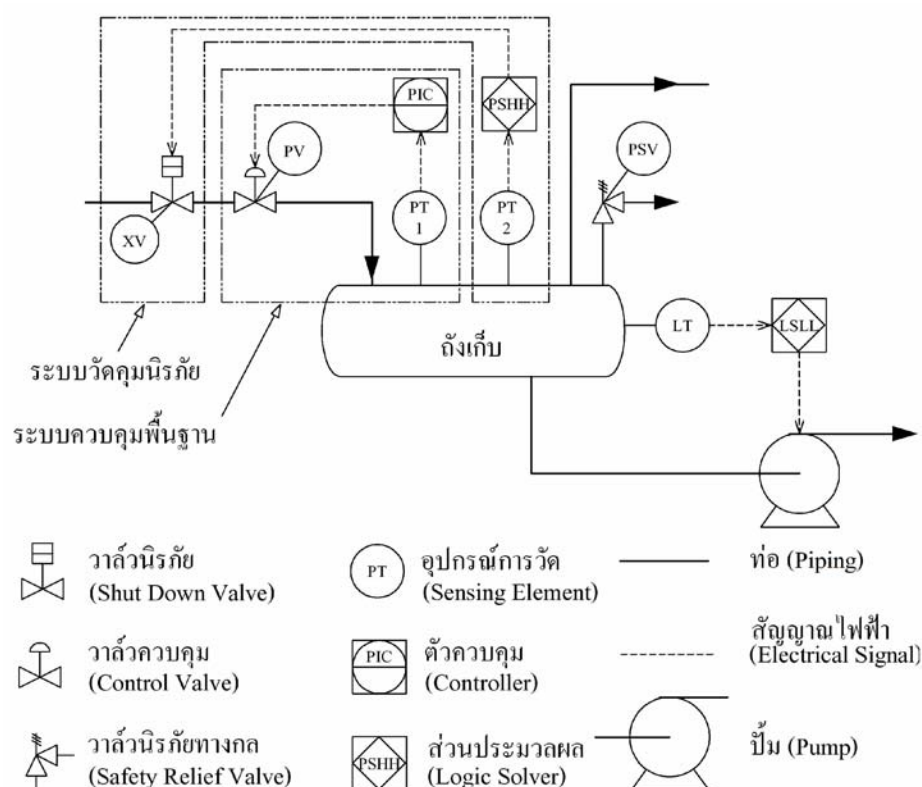
ระบบวัดคูนินทรีย์ประกอบด้วย 3 ระบบย่อย คือ ระบบการวัด (Sensing Element, SE) ระบบประมวลผล (Logic Solver, LS) และระบบอุปกรณ์สุดท้าย (Final Element, FE) ซึ่งในระบบวัดคูนินทรีย์หนึ่งๆ อาจจะมีหลายฟังก์ชันวัดคูนินทรีย์ (Safety Instrumented Functions, SIF) เช่นฟังก์ชันวัดคูนินทรีย์ที่ใช้ป้องกันเมื่อกระบวนการผลิตมีอุณหภูมิสูงมากหรือมีความดันสูงมาก เป็นต้น ภาพที่ 6 แสดงตัวอย่างระบบวัดคูนินทรีย์ที่ประกอบด้วยฟังก์ชันวัดคูนินทรีย์ 3 ฟังก์ชัน (หรือ SIF) โดย SIF หมายเลข 1 คือฟังก์ชันวัดคูนินทรีย์ที่ป้องกันกระบวนการผลิตเมื่อมีอุณหภูมิสูงหรือต่ำมาก ดังนั้นอุปกรณ์การวัดจะวัดได้เฉพาะอุณหภูมิ ในขณะที่ SIF หมายเลข 2 คือฟังก์ชันวัดคูนินทรีย์ที่ป้องกันกระบวนการผลิตเมื่อมีความดันสูงหรือต่ำมาก อุปกรณ์การวัดจึงวัดความดันได้เพียงอย่างเดียว และ SIF หมายเลข 3 คือฟังก์ชันวัดคูนินทรีย์ที่ป้องกันกระบวนการผลิตเมื่อมีระดับของเหลวสูงหรือต่ำมากและอุปกรณ์การวัดจึงวัดเฉพาะระดับของเหลวเท่านั้น โดยทั้งสาม SIF นี้จะใช้อุปกรณ์ประมวลผล และอุปกรณ์สุดท้ายชุดเดียวกัน

SIF หมายเลข 1



ภาพที่ 6 ตัวอย่างระบบวัดคูนินทรีย์ที่มีฟังก์ชันวัดคูนินทรีย์ 3 ฟังก์ชัน

โดยมีอุปกรณ์การวัด (SE) 3 ชนิดในขณะที่ใช้อุปกรณ์ประมวลผล (LS) และอุปกรณ์สุดท้าย (FE) ร่วมกัน โดย SIF หมายเลข 1, 2 และ 3 ใช้ปกป้องกระบวนการผลิตโดยทำการตรวจสอบอุณหภูมิ ความดัน และระดับของเหลว ตามลำดับ



ภาพที่ 7 ตัวอย่างฟังก์ชันวัดคูลมุนิรภัยและฟังก์ชันการควบคุมที่ใช้ควบคุมความดัน  
ในกระบวนการผลิต  
ที่มา: ทวิช (2548)

ภาพที่ 7 เป็นตัวอย่างที่แสดงถึงการใช้ระบบควบคุมพื้นฐาน และระบบวัดคูลมุนิรภัย ในการควบคุมความดันในถังเก็บสารเคมีซึ่งออกแบบมาให้ทนความดันเพียงระดับหนึ่งเท่านั้น ในกรณีที่สถานะทำงานเป็นปกติ (ค่าความดันอยู่ในช่วงปกติ) ระบบควบคุมพื้นฐานจะทำงานเท่านั้น เพื่อควบคุมการปิด-เปิดของวาล์ว ที่จะช่วยในการรักษาความดันในถังให้ได้ตามค่าที่กำหนดในอุปกรณ์ควบคุมของระบบดังกล่าว อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดสถานะผิดปกติ ที่ทำให้ความดันในถังเก็บนี้มีค่าเพิ่มขึ้นเกินจากค่าที่กำหนดของอุปกรณ์ควบคุมในระบบควบคุมพื้นฐาน แต่เนื่องจากระบบควบคุมพื้นฐานอาจทำงานไม่ทันหรือไม่ทำงาน ค่าความดันจึงอาจเพิ่มขึ้น และมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดไว้ในส่วนประมวลผลของระบบวัดคูลมุนิรภัย ซึ่งทำให้ระบบวัดคูลมุนิรภัยเริ่มทำงาน โดยจะส่งสัญญาณเพื่อปิดหรือเปิดวาล์ว ก่อนที่ความดันดังกล่าวจะก่อให้เกิดการระเบิดของถังเก็บนี้ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สิน

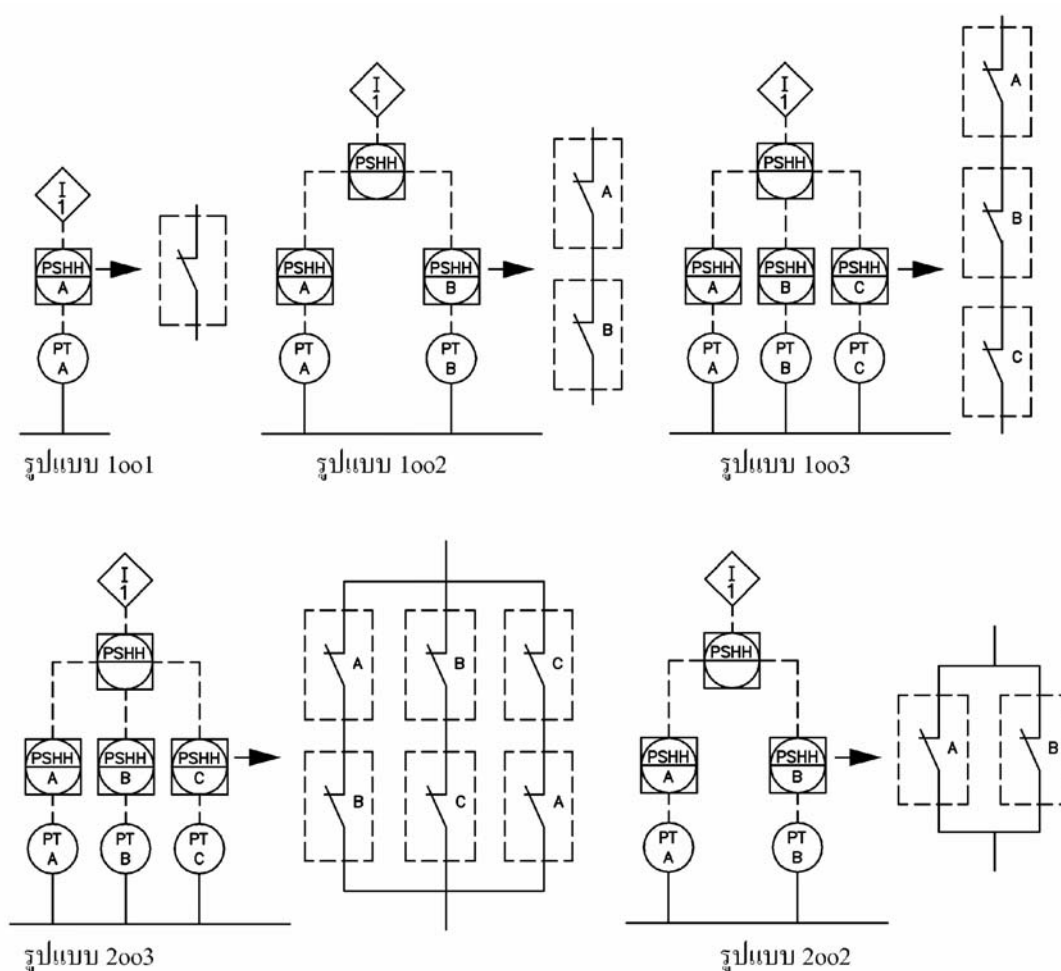


## รูปแบบของอุปกรณ์วัดคummินิรัย

ในส่วนนี้ ได้อธิบายถึงรูปแบบและลักษณะการทำงานต่างๆ ของอุปกรณ์การวัด ของระบบประมวลผล และของอุปกรณ์สุดท้าย เพื่อที่สามารถเลือกใช้งานได้อย่างเหมาะสม

### 1. รูปแบบของอุปกรณ์การวัดที่ใช้ในระบบวัดคummินิรัย (Sensing Element Architecture)

รูปแบบพื้นฐานที่เป็นส่วนของอุปกรณ์การวัดแบบซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบวัดคummินิรัยมี 5 รูปแบบดังนี้



ภาพที่ 8 แสดงอุปกรณ์การวัดรูปแบบต่างๆ

ที่มา: ทวิช (2548)

### 1.1 อุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1oo1 (One out of One voting)

อุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1oo1 ใช้อุปกรณ์การวัดเพียงตัวเดียวต่อกับระบบวัดคูลมุนิรภัยและเป็นรูปแบบพื้นฐานสำหรับระบบนิรภัยดังแสดงในภาพที่ 8 ในการทำงานถ้าอุปกรณ์วัดค่าความผิดปกติได้หรือถึงจุดทำงานที่กำหนดไว้ก็จะทำให้ระบบวัดคูลมุนิรภัยทำงานทันที ซึ่งสามารถแสดงการเปรียบเทียบได้ในรูปสวิตช์ปกติเปิดหนึ่งตัว (ในสภาวะทำงานหรือเมื่อจ่ายพลังงานให้อุปกรณ์จะทำให้สวิตช์จะอยู่ในตำแหน่งปิด) แต่ถ้าเกิดความผิดพลาดอันตรายขึ้นและระบบวัดคูลมุนิรภัยไม่สามารถตรวจจับความผิดพลาดนั้นได้ จะทำให้กระบวนการผลิตเข้าสู่สภาวะอันตรายเพราะระบบวัดคูลมุนิรภัยไม่สามารถทำงานได้ เป็นการทำงานแบบผิดพลาดนิรภัย (Fail Safe Design) คือ เมื่อเกิดปัญหาการผิดพลาดใด ๆ กับระบบจะทำให้อุปกรณ์สุดท้ายหยุดทำงาน นอกจากนั้นแล้วอุปกรณ์การวัดในรูปแบบนี้ที่ไม่มีการตรวจสอบความผิดพลาดด้วยตัวเอง ดังนั้นเมื่อเกิดความผิดพลาดอันตรายขึ้นในอุปกรณ์ เช่น อุปกรณ์การวัดไม่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรที่ต้องการวัด เป็นต้น ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้กระบวนการผลิตเกิดความผิดปกติขึ้นจะทำให้ระบบวัดคูลมุนิรภัยไม่สามารถทำงานได้ในเวลาที่ต้องการ โดยความผิดพลาดอันตรายในอุปกรณ์ของรูปแบบนี้จะถูกตรวจพบเมื่อถึงเวลาในการทดสอบการทำงานของระบบนิรภัย

### 1.2 อุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1oo2 (One out of Two Voting)

อุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1oo2 ใช้อุปกรณ์การวัดสองตัวต่อกับระบบวัดคูลมุนิรภัยให้มิกการทำงานเป็นแบบอนุกรมดังแสดงในภาพที่ 8 ในการทำงานถ้าอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งวัดค่าความผิดปกติได้หรือถึงจุดทำงานที่กำหนดไว้ก็จะทำให้ระบบวัดคูลมุนิรภัยทำงานทันที ซึ่งสามารถแสดงในรูปสวิตช์ปกติเปิดสองตัวต่ออนุกรมกัน (ในสภาวะทำงานหรือเมื่อจ่ายพลังงานให้อุปกรณ์จะทำให้สวิตช์จะอยู่ในตำแหน่งปิด) แต่ถ้าเกิดความผิดพลาดอันตรายในตัวอุปกรณ์การวัดตัวใดตัวหนึ่งและระบบวัดคูลมุนิรภัยไม่สามารถตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นได้ จะมีอุปกรณ์การวัดตัวที่สองยังคงทำหน้าที่ต่อไปได้ รูปแบบนี้ระบบวัดคูลมุนิรภัยจะไม่สามารถตรวจสอบความผิดพลาดของอุปกรณ์เหล่านี้ได้ด้วยตัวเอง ในการทำงานจะมีการลงมติจากหนึ่งในสอง ดังนั้นเมื่ออุปกรณ์ทั้งสองตัวเกิดความผิดพลาดอันตรายขึ้น เช่น อุปกรณ์การวัดไม่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าที่ต้องการวัด เป็นต้น ซึ่งจะทำให้กระบวนการผลิตเข้าสู่สภาวะอันตราย เพราะเมื่อกระบวนการผลิตเกิดความผิดพลาดอันตรายเพียงตัวเดียวจะยังคงเหลืออุปกรณ์อีกหนึ่งตัวทำงานในรูปแบบ 1oo1 โดยความผิดพลาดอันตรายของรูปแบบนี้จะสามารถตรวจพบได้เมื่อถึงเวลาในการทดสอบการ

ทำงานของระบบวัดคูนिरักย สามารถแสดงการลดรูปแบบการทำงานหลังจากอุปกรณ์เกิดความผิดพลาดขึ้น

### 1.3 อุปกรณ์การวัดรูปแบบ 1oo3 (One out of Three Voting)

อุปกรณ์การวัดแบบ 1oo3 ใช้อุปกรณ์การวัดสามตัวต่อกับระบบวัดคูนिरักยให้การทำงานเป็นแบบอนุกรมดังแสดงในภาพที่ 8 ในการทำงานถ้าอุปกรณ์การวัดตัวใดตัวหนึ่งวัดค่าความผิดปกติได้หรือถึงจุดทำงานที่กำหนดไว้ก็จะทำให้ระบบวัดคูนिरักยทำงานทันที ซึ่งสามารถแสดงในรูปสวิตช์ปกติเปิดสามตัวต่ออนุกรมกัน (ในสภาวะทำงานหรือเมื่อจ่ายพลังงานให้อุปกรณ์จะทำให้สวิตช์จะอยู่ในตำแหน่งปิด) แต่ถ้าเกิดความผิดพลาดอันตรายในตัวอุปกรณ์การวัดตัวที่หนึ่งหรือตัวที่สองและระบบวัดคูนिरักยไม่สามารถตรวจจับความผิดพลาดนั้นได้ จะมีอุปกรณ์ตัวที่สองหรือตัวที่สามยังคงทำหน้าที่ต่อไปได้ในรูปแบบ 1oo2 หรือ 1oo1 แต่ในรูปแบบนี้จะมีโอกาสให้เกิดการทำงานแบบไม่เป็นจริง (False Tip) ได้สูง เนื่องจากมีจำนวนอุปกรณ์มากกว่ารูปแบบอื่น ๆ

### 1.4 อุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2oo3 (Two out of Three Voting)

อุปกรณ์การวัดแบบ 2oo3 ใช้อุปกรณ์การวัดสามตัวต่อกับระบบวัดคูนिरักยให้การทำงานเป็นแบบลงมติ (Voting) จากสองในสามดังแสดงในภาพที่ 8 รูปแบบนี้ระบบวัดคูนिरักยจะทำงานก็ต่อเมื่ออุปกรณ์การวัดสองตัววัดค่าความผิดปกติได้ ซึ่งสามารถแสดงในรูปสวิตช์ปกติเปิดสามตัว โดยสวิตช์สองตัวต่ออนุกรมกันสามชุดจากนั้นนำมาต่อขนานกัน (ในสภาวะทำงานหรือเมื่อจ่ายพลังงานให้อุปกรณ์จะทำให้สวิตช์จะอยู่ในตำแหน่งปิด) แต่ถ้าเกิดความผิดพลาดอันตรายในอุปกรณ์การวัดตัวใดตัวหนึ่งและระบบวัดคูนिरักยไม่สามารถตรวจจับความผิดพลาดนั้นได้ จะมีอุปกรณ์ตัวที่สองและตัวที่สามยังคงทำหน้าที่ต่อไปได้ในรูปแบบ 2oo2 แต่ในรูปแบบนี้จะมีเชื่อมั่นในการทำงานน้อยกว่าในรูปแบบ 1oo3 ในรูปแบบ 2oo3 ระบบวัดคูนिरักยสามารถตรวจสอบความผิดพลาดของอุปกรณ์ได้ด้วยตนเอง โดยการเปรียบเทียบค่าการวัดที่ได้จากอุปกรณ์การวัดทั้งสามตัว ซึ่งสามารถทำให้ทราบได้ว่าอุปกรณ์ตัวใดเกิดความผิดพลาดขึ้นและถ้าอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งเกิดความผิดพลาดอันตรายก็สามารถซ่อมแซมได้ทันที แต่ถ้าอุปกรณ์ตั้งแต่สองตัวขึ้นไป (A & B, B & C, หรือ A & C) เกิดความผิดพลาดอันตรายขึ้น อาทิเช่น อุปกรณ์การวัดไม่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าที่ต้องการวัดจะทำให้กระบวนการผลิตเข้าสู่สภาวะอันตราย เพราะเมื่อกระบวนการผลิตเกิดความผิดปกติขึ้นจะทำให้ระบบวัดคูนिरักยไม่สามารถทำงานได้ แต่ถ้าอุปกรณ์เพียงตัวใดตัวหนึ่งเกิดความผิดพลาดอันตรายขึ้น ระบบจะเปลี่ยนการ

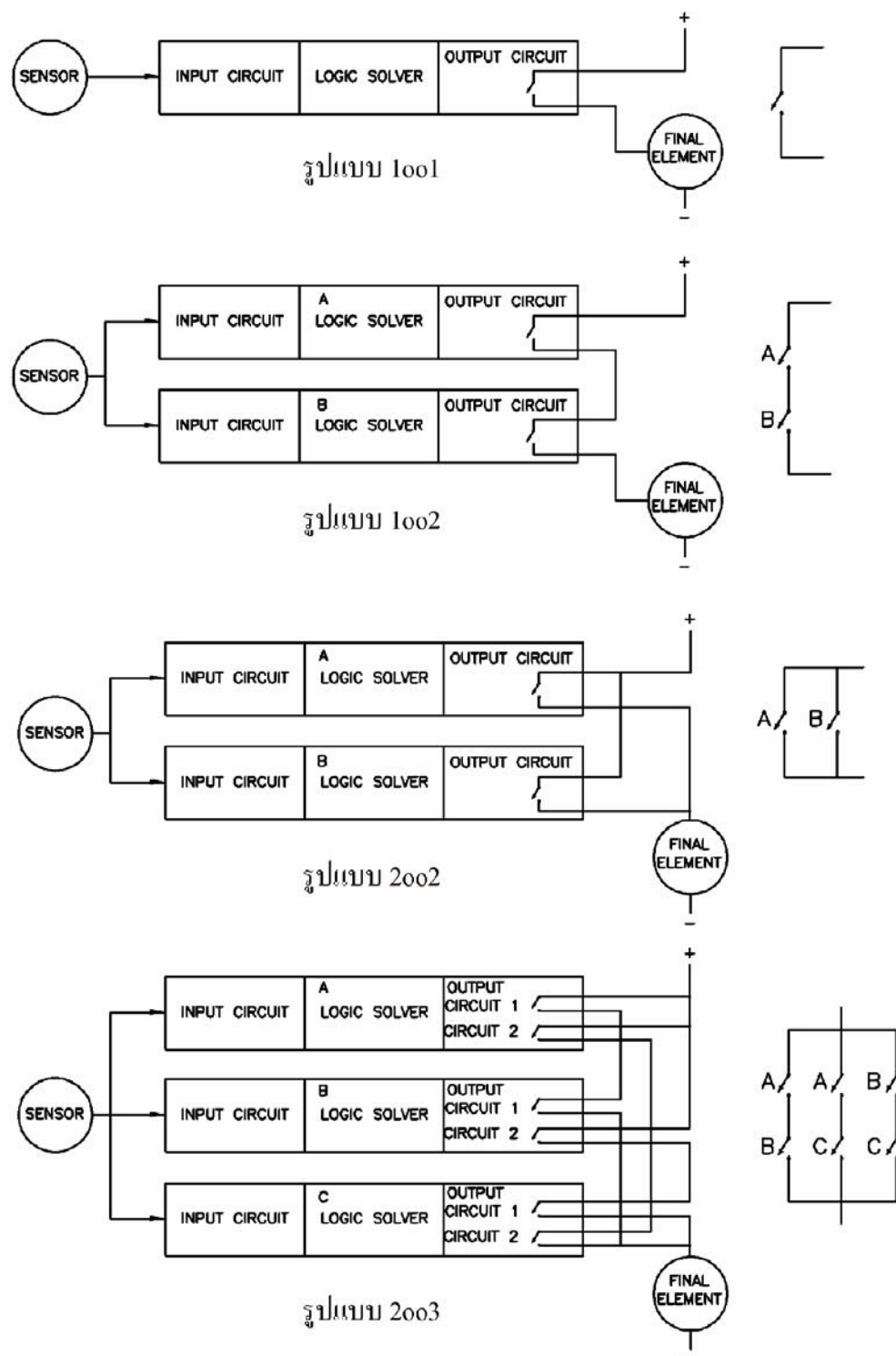
ทำงานไปเป็นรูปแบบ 2oo2 (Two out of Two Voting) สามารถแสดงการลดรูปแบบการทำงาน หลังจากอุปกรณ์เกิดความผิดพลาดขึ้น

### 1.5 อุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2oo2 (Two out of Two Voting)

อุปกรณ์การวัดแบบ 2oo2 ใช้อุปกรณ์สองตัวต่อกับระบบวัดคummุนิรภัยให้มีการทำงานเป็นแบบขนาน ดังแสดงในภาพที่ 8 รูปแบบนี้ระบบวัดคummุนิรภัยจะทำงานก็ต่อเมื่ออุปกรณ์การวัดสองตัววัดค่าความผิดปกติได้ ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปสวิตช์ปกติเปิดสองตัวต่อขนานกัน (ในสถานะทำงานหรือเมื่อจ่ายพลังงานให้อุปกรณ์จะทำให้สวิตช์จะอยู่ในตำแหน่งปิด) แต่ถ้าเกิดความผิดพลาดในตัวอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดอันตรายบนอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่ง และระบบวัดคummุนิรภัยไม่สามารถตรวจจับความผิดพลาดนั้นได้ จะทำให้ระบบวัดคummุนิรภัยไม่สามารถทำหน้าที่ได้อย่างถูกต้องต่อไปได้ เพราะการทำงานในรูปแบบนี้ต้องการอุปกรณ์ทั้งสองตัวในการทำงาน ในรูปแบบนี้จะมีการทำงานคล้ายกันกับในรูปแบบ 1oo1 แต่ในรูปแบบนี้จะมีค่าความพร้อมใช้งาน (Availability) สูงกว่าแบบ 1oo1

## 2. รูปแบบของระบบประมวลผล (Logic Solver Architecture)

ระบบประมวลผลที่ใช้งานกันในระบบวัดคummุนิรภัยจะมีการออกแบบด้วยเทคนิคพิเศษ เพื่อให้ระบบการประมวลผลมีความผิดพลาดในการทำงานอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ การจัดรูปแบบในส่วน of ระบบประมวลผล แบ่งตามลักษณะการทำงานได้ 4 รูปแบบ ดังนี้



ภาพที่ 9 แสดงอุปกรณ์ประมวลผลรูปแบบต่างๆ

ที่มา: Goble and Cheddie (2005)

### 2.1 รูปแบบ 1oo1 (One out of One Voting)

รูปแบบนี้จะเป็นระบบประมวลผลเดี่ยว ประกอบด้วย ตัวประมวลผล (Central Processing Unit) ส่วนรับสัญญาณ (Input) และส่วนขับสัญญาณ (Output) ดังแสดงในภาพที่ 9 รูปแบบ 1oo1 จะเป็นรูปแบบที่เล็กที่สุด ซึ่งจะเป็นรูปแบบที่ไม่มีระบบการตรวจสอบความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้น

### 2.2 รูปแบบ 1oo2 (One out of Two Voting)

รูปแบบนี้จะใช้ระบบประมวลผลสองชุดที่เชื่อมต่อการทำงานร่วมกัน เพื่อนำไปใช้กับระบบนิรภัยที่ต้องการลดผลกระทบที่เกิดจากความผิดพลาดอันตราย สำหรับระบบนิรภัยที่ถูกออกแบบให้ทำงานโดยการหยุดจ่ายพลังงาน (Deenergize to Trip) การเชื่อมต่อส่วนขับสัญญาณของระบบประมวลผลทั้งสองชุดจะเป็นไปในลักษณะอนุกรม เพื่อใช้ในการช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากความผิดพลาดอันตราย ในรูปแบบนี้จะใช้ตัวประมวลผลสองชุดที่เป็นอิสระต่อกัน ดังแสดงในภาพที่ 9 คุณสมบัติของการเชื่อมต่อในลักษณะนี้จะทำให้ระบบการประมวลผลมีค่าความผิดพลาดอันตรายลดลง แต่จะทำให้ความผิดพลาดนิรภัย หรือการทำงานที่ไม่เป็นจริง (False Trip) ได้สูง

### 2.3 รูปแบบ 2oo2 (Two out of Two Voting)

รูปแบบนี้จะใช้ระบบประมวลผลสองชุดเชื่อมต่อการทำงานร่วมกันอีกรูปแบบหนึ่ง รูปแบบนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้กับระบบนิรภัยที่ไม่ต้องการให้เกิดผลกระทบจากความผิดพลาดนิรภัย (Safe Failure) กับกระบวนการผลิตเพราะจะเป็นสาเหตุให้ความพร้อมใช้งาน (Availability) ของกระบวนการผลิตมีค่าลดลง ระบบการประมวลผลรูปแบบนี้จะถูกนำไปใช้งานกับระบบนิรภัยที่ต้องการให้ส่วนขับสัญญาณจ่ายพลังงานออกไปในสถานะการทำงาน (Energize to Trip) ซึ่งจะแตกต่างจากรูปแบบอื่นๆ ส่วนขับสัญญาณของระบบประมวลผลทั้งสองชุดถูกต่อเชื่อมต่อกันในลักษณะขนาน ดังแสดงในภาพที่ 9 ถ้าระบบประมวลผลชุดใดชุดหนึ่งเกิดความผิดพลาดนิรภัยหรือเปิดวงจรทำให้ส่วนขับสัญญาณไม่สามารถจ่ายพลังงานออกไปได้ เมื่อถึงเวลาในการทำงาน ก็จะมีระบบประมวลผลอีกชุดหนึ่งทำงานแทนได้ ข้อเสียของระบบประมวลผลรูปแบบนี้จะไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานกับระบบนิรภัยที่ต้องการออกแบบให้เป็นไปในลักษณะหยุดจ่ายพลังงานในการทำงาน (Deenergize to Trip)

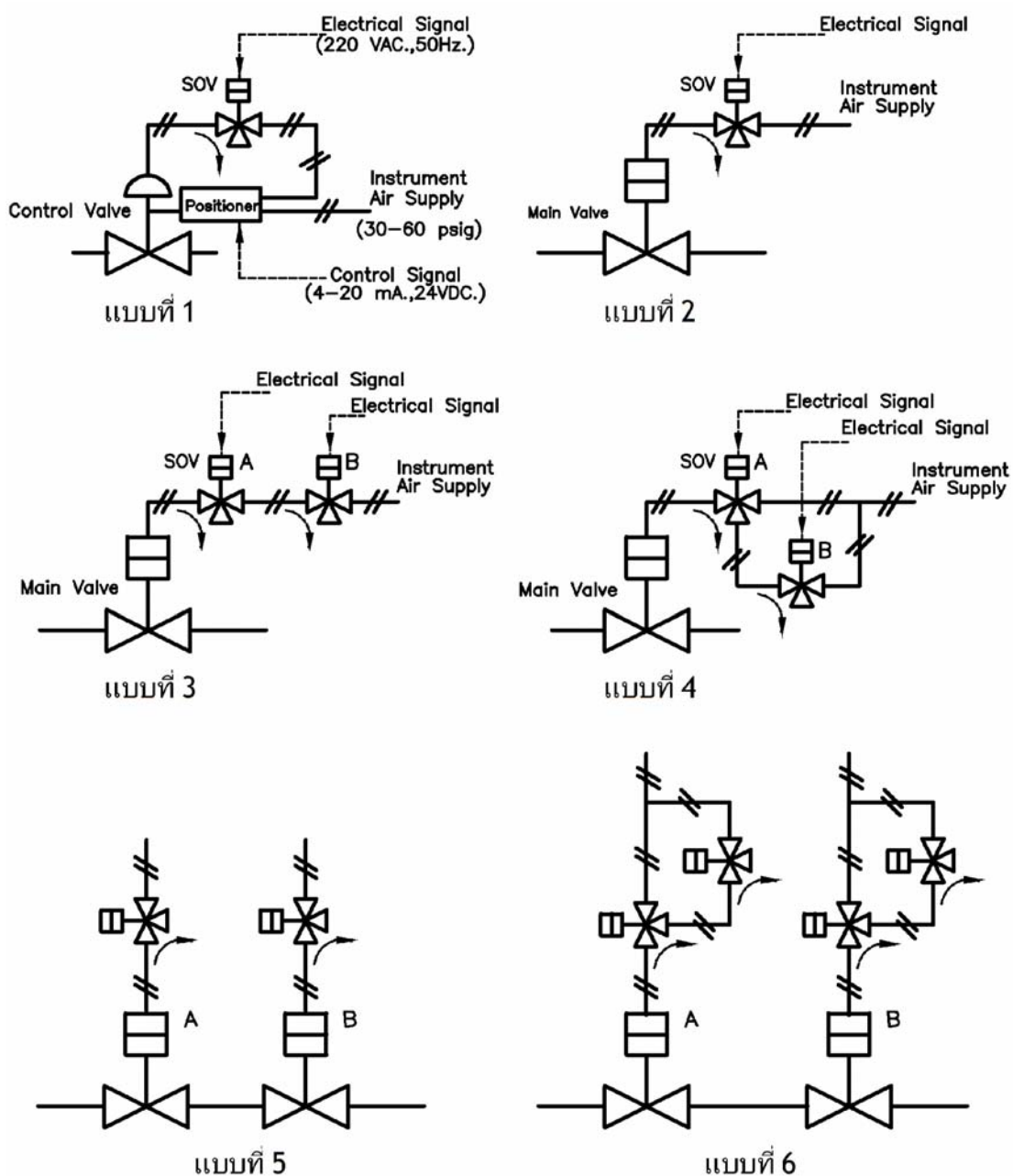
## 2.4 รูปแบบ 2oo3 (Two out of Three Voting)

ในการออกแบบระบบนิรภัยเป็นไปได้ยากที่จะออกแบบให้ระบบประมวลผลสามารถยอมรับค่าความผิดพลาดทั้ง 2 ชนิด คือ ความผิดพลาดอันตรายและความผิดพลาดนิรภัยที่อาจจะเกิดขึ้นได้ ผลที่ได้จากรูปแบบ 1oo2 นั้นจะทำให้ค่าความผิดพลาดอันตรายลดลง และรูปแบบ 2oo2 จะทำให้ค่าความผิดพลาดนิรภัยลดลง ซึ่งรูปแบบที่สามารถป้องกันความผิดพลาดทั้ง 2 ชนิดได้ยังเป็นที่ต้องการในการออกแบบระบบวัดคูนิรภัย ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบประมวลผลเพื่อจะทำให้ค่าความผิดพลาดทั้ง 2 ชนิดอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้และระบบประมวลผลแบบนี้ คือ ระบบประมวลผลรูปแบบ 2oo3 (ในการทำงานของระบบต้องการอุปกรณ์ทำงาน 2 ชุดจากอุปกรณ์ 3 ชุด) รูปแบบนี้สามารถทำให้การทำงานมีความเชื่อมั่นสูงโดยการใช้ระบบประมวลผล 3 ชุด รูปแบบนี้ต้องการส่วนขับเคลื่อนสัญญาณ 2 ชุดต่อหนึ่งชุดประมวลผล โดยส่วนขับเคลื่อนสัญญาณของทั้ง 2 ชุด จะถูกเชื่อมต่อกันในลักษณะการลงมติ (Voting Circuit) ดังแสดงในภาพที่ 9 เพื่อให้ค่าสัญญาณจริงที่จะถูกส่งออกไป พลังงานจะถูกจ่ายออกไปเมื่อส่วนขับเคลื่อนสัญญาณ 2 ชุดปิดวงจร และจะหยุดจ่ายพลังงานออกไปเมื่อส่วนขับเคลื่อนสัญญาณ 2 ชุดเปิดวงจร

## 3. รูปแบบอุปกรณ์สุดท้าย (Final Element)

อุปกรณ์ด้านปลายหรืออุปกรณ์สุดท้ายของระบบวัดคูนิรภัย เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กระทำกับกระบวนการเพื่อทำให้กระบวนการอยู่ในสภาวะที่ปลอดภัยเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น วาล์วนิรภัย (Shut Down Valve) เป็นอุปกรณ์สุดท้ายของระบบวัดคูนิรภัย (Safety Instrumented System, SIS) ที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตทั้งในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี การกลั่นน้ำมันและก๊าซ วาล์วนิรภัยจะถูกใช้เป็นตัวที่จะหยุดต้นเหตุของเหตุการณ์อันตรายหรือใช้เป็นตัวจำกัดขอบเขตความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้น เช่น ใช้ปิดของไหลต้นทางเมื่อเกิดความดันเกิน หรือปิดของไหลไม่ให้ไหลไปยังบริเวณที่เกิดเหตุการณ์อันตราย เป็นต้น ดังนั้นวาล์วนิรภัยจึงต้องถูกติดตั้งในบริเวณที่เหมาะสมและต้องมีความพร้อมใช้งาน (Availability) อยู่ตลอดเวลา เพื่อให้การทำงานมีประสิทธิภาพ วาล์วนิรภัยจะเป็นวาล์วที่มีลักษณะการทำงานเป็นแบบวาล์วปิดเปิดที่ถูกสั่งการมาจากระบบวัดคูนิรภัยด้วยสัญญาณไฟฟ้าไปยังวาล์วย่อย (Solenoid Valve) เพื่อใช้เปิดให้ความดันอากาศหรือน้ำมันไฮดรอลิกผ่านไปทำการเปิดปิดวาล์วหลัก (Main Valve) ในสภาวะปกติวาล์วนิรภัยจะไม่ทำงานและจะอยู่ในสภาวะเปิดหรือปิดขึ้นอยู่กับข้อกำหนดจากฟังก์ชันนิรภัย เมื่อถึงสภาวะทำงานวาล์วนิรภัยจะทำงานโดยระบบวัดคูนิรภัยจะหยุดจ่ายพลังงานให้กับวาล์วนิรภัยจึงทำให้วาล์วนิรภัยเปลี่ยนสถานะไป วาล์วนิรภัยจะมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ แบบไม่มีความดันอากาศวาล์วปิด (Air Failure Close) และแบบไม่มีความดันอากาศวาล์วเปิด (Air Failure Open) ซึ่งปกติ

แล้ววาล์วหลัก (Main Valve) ของทั้งสองแบบจะถูกปิดหรือเปิดด้วยแรงจากสปริงและจะถูก ปิดหรือเปิดจากความดันของอากาศผ่านวาล์วย่อย (Solenoid Valve) ที่ถูกควบคุมด้วยสัญญาณไฟฟ้าจากระบบวัดคูนินทรีย์ การจัดรูปแบบของอุปกรณ์สุดท้ายที่เป็นวาล์วนิรภัยซึ่งจะประกอบด้วยวาล์วย่อยกับวาล์วหลัก แบบต่างๆที่ใช้กันทั่วไปดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แสดงอุปกรณ์สุดท้ายที่เป็นวาล์วนิรภัยแบบต่างๆ

ที่มา: ทวิช (2548)



### 3.1 รูปแบบอุปกรณ์สุดท้ายแบบที่ 1

เป็นรูปแบบวาล์วนิรภัยที่ใช้งานร่วมกับวาล์วควบคุม (Control Valve) โดยการเพิ่มวาล์วปิดเปิดย่อยไว้ระหว่าง Positioner และ Actuator เพื่อทำการตัดสัญญาณลมจาก Positioner และระบายอากาศออกจาก Actuator ทำให้วาล์วควบคุมปิดเมื่อถูกสั่งการมาจากระบบควบคุมนิรภัยไปยังวาล์วย่อย จากลักษณะการทำงานจะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดความผิดพลาดอันตรายบนอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งจะทำให้กระบวนการผลิตอยู่ในสภาวะอันตรายเนื่องจากวาล์วนิรภัยจะไม่สามารถทำงานได้เมื่อเวลาที่ต้องการ

### 3.2 รูปแบบอุปกรณ์สุดท้ายแบบที่ 2

เป็นรูปแบบวาล์วนิรภัยพื้นฐานที่มีใช้งานในระบบนิรภัย โดยใช้วาล์วปิดเปิดย่อยต่อร่วมกับวาล์วปิดเปิดหลัก ลักษณะการทำงานจะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดความผิดพลาดอันตรายบนอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งจะทำให้กระบวนการผลิตอยู่ในสภาวะอันตราย

### 3.3 รูปแบบอุปกรณ์สุดท้ายแบบที่ 3

เป็นรูปแบบวาล์วนิรภัยที่มีการทำงานคล้ายกับแบบที่ 2 แต่จะใช้วาล์วปิดเปิดย่อยสองตัวต่อกันในลักษณะ 1oo2 (One out of Two) หรือมีการทำงานแบบอนุกรมร่วมกับวาล์วปิดเปิดหลัก วาล์วย่อยจะต้องตรงไปยังเอาต์พุตของระบบควบคุมนิรภัยโดยตรง วาล์วหลักจะทำงานเมื่อวาล์วย่อยตัวใดตัวหนึ่งทำงาน จากลักษณะการทำงานจะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดความผิดพลาดอันตรายบนวาล์วหลักและวาล์วปิดเปิดย่อยทั้งสองตัว จะทำให้กระบวนการผลิตอยู่ในสภาวะอันตราย แต่ถ้าเกิดความผิดพลาดอันตรายบนวาล์วย่อยเพียงตัวเดียว ระบบนิรภัยยังคงสามารถทำงานต่อไปได้ ข้อดีของรูปแบบนี้จะเห็นได้ว่ามีความเชื่อมั่นในการทำงานได้สูง ส่วนข้อเสียนั้นอาจจะทำให้กระบวนการผลิตหยุดทำงานบ่อยครั้งขึ้นหรือมีค่าความพร้อมใช้งานลดลง

### 3.4 รูปแบบอุปกรณ์สุดท้ายแบบที่ 4

เป็นรูปแบบวาล์วนิรภัยที่มีการทำงานคล้ายกับแบบที่ 3 แต่จะใช้วาล์วปิดเปิดย่อยสองตัวต่อกันในลักษณะ 2oo2 (Two out of Two) หรือมีการทำงานแบบขนานร่วมกับวาล์วปิดเปิดหลัก วาล์วหลักจะทำงานเมื่อวาล์วย่อยทำงานทั้งสองตัว จากลักษณะการทำงานจะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดความ

ผิดพลาดอันตรายบนวาล์วหลักหรือวาล์วปิดเปิดย่อยตัวใดตัวหนึ่ง จะทำให้กระบวนการผลิตอยู่ในสถานะอันตราย เนื่องจากวาล์วนิรภัยจะไม่สามารถทำงานได้ในเวลาที่ต้องการ ข้อดีของรูปแบบนี้จะมีค่าความพร้อมใช้งานเพิ่มขึ้น แต่จะมีค่าความเชื่อมั่นในการทำงานลดลง

### 3.5 รูปแบบอุปกรณ์สุดท้ายแบบที่ 5

เป็นรูปแบบวาล์วนิรภัยที่ใช้วาล์วนิรภัยในรูปแบบที่ 2 มาต่อกันในลักษณะ 1oo2 (One out of Two) หรือมีการทำงานแบบอนุกรม ลักษณะการทำงานจะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดความผิดพลาดอันตรายบนวาล์วหลักและวาล์วปิดเปิดย่อยตัวใดตัวหนึ่ง ระบบนิรภัยยังสามารถทำงานได้ในลักษณะ 1oo1 (One out of One) แต่ถ้ามีวาล์วหลักและวาล์วย่อยในแต่ละชุดเกิดความผิดพลาดอันตราย จะทำให้กระบวนการผลิตอยู่ในสถานะอันตราย ซึ่งโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์นี้จะมีน้อยลงหรืออาจกล่าวได้ว่ามีความเชื่อมั่นในการทำงานมากขึ้น

### 3.6 รูปแบบอุปกรณ์สุดท้ายแบบที่ 6

เป็นรูปแบบวาล์วนิรภัยที่ใช้วาล์วนิรภัยในรูปแบบที่ 4 มาต่อกันในลักษณะ 1oo2 (One out of Two) จากลักษณะการทำงานจะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดความผิดพลาดอันตรายบนวาล์วหลักและวาล์วย่อยตัวใดตัวหนึ่ง ระบบนิรภัยยังสามารถทำงานได้ในลักษณะ 1oo1 (One Out of One) แต่ถ้ามีวาล์วหลักและวาล์วย่อยของทั้งสองชุดเกิดความผิดพลาดอันตราย จะทำให้กระบวนการผลิตอยู่ในสถานะอันตราย ซึ่งโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์นี้จะมีน้อยลงหรืออาจกล่าวได้ว่ามีความเชื่อมั่นในการทำงานมากขึ้น

## 4. แผนภาพต้นไม้ (Fault Tree Analysis, FTA)

แผนภาพต้นไม้หรือ FTA เป็นการวิเคราะห์ปัญหาจากด้านบนลงไปสู่สาเหตุของปัญหา โดยใช้แอนด์เกต (AND Gate) หรือออร์เกต (OR Gate) เพื่อหาความเชื่อมโยงของสาเหตุต่าง ๆ ที่สนับสนุนให้เกิดความผิดพลาดขึ้น FTA เป็นตัวช่วยแสดงปัญหาในระบบที่ซับซ้อน เป็นวิธีการที่ใช้รวบรวมความผิดพลาดต่างๆที่เป็นสาเหตุให้เกิดปัญหา ซึ่งจะแสดงแต่ละส่วนของระบบที่เกี่ยวข้องกับความผิดพลาด ผลลัพธ์ของ FTA จะเป็นแผนภาพที่รวบรวมเหตุการณ์ที่ทำให้ระบบเกิดความผิดพลาด

ตารางที่ 1 แสดงสัญลักษณ์ ชื่อและความหมายของแผนภาพต้นไม้ (FAULT TREE ANALYSIS)

| สัญลักษณ์                                                                           | ชื่อ                                                    | ความหมาย                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | AND Gate<br>สาเหตุหลายสาเหตุ                            | เหตุการณ์จะเกิดขึ้นได้เนื่องจากสาเหตุหลายสาเหตุของ<br>เหตุการณ์ย่อย                                                                                        |
|    | OR Gate<br>สาเหตุใดสาเหตุหนึ่ง                          | เหตุการณ์จะเกิดขึ้นได้เนื่องจากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่งของ<br>เหตุการณ์ย่อย                                                                                     |
|    | Basic Event<br>เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้<br>โดยปกติ       | เหตุการณ์ย่อยที่เกิดขึ้นได้ตามปกติซึ่งทราบถึงสาเหตุที่<br>เห็นได้อย่างชัดเจนโดยไม่ต้องทำการวิเคราะห์หาสาเหตุ<br>ต่อไป ถือเป็นสาเหตุแรกของการเกิดอุบัติเหตุ |
|    | Fault Tree Event<br>เหตุการณ์ย่อย                       | เหตุการณ์ย่อยที่ส่งผลให้เกิดเหตุการณ์ต่อเนื่องจนเป็นเหตุ<br>ให้เกิดอุบัติเหตุ                                                                              |
|  | Undeveloped Event<br>เหตุการณ์ที่วิเคราะห์<br>ต่อไม่ได้ | เหตุการณ์ย่อยที่ไม่ต้องการวิเคราะห์หาสาเหตุต่อไป<br>เนื่องจากไม่มีข้อมูลสนับสนุน                                                                           |
|  | External Event<br>เหตุการณ์ภายนอก                       | เหตุการณ์ย่อยภายนอกหรือปัจจัยภายนอกที่เป็นสาเหตุที่<br>ทำให้เกิดเหตุการณ์ต่างๆ                                                                             |

ที่มา: Crowl and Louvar (2002)

สัญลักษณ์และความหมายที่ใช้ในการวิเคราะห์วิธีแผนภาพต้นไม้ ในปัจจุบันนี้มีสัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หลายสัญลักษณ์ บางครั้งผู้ใช้งานอาจจะดัดแปลงให้เหมาะสมกับลักษณะงานที่จะนำไปใช้ อย่างไรก็ตามเพื่อให้เนื้อหาอยู่ในขอบเขต ในที่นี้จะเสนอโครงสร้างและสัญลักษณ์ที่จำเป็นต้องนำมาใช้ โดยแต่ละสัญลักษณ์จะแสดงถึงเหตุการณ์และผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้นและมีลอจิกพื้นฐานดังแสดงในตารางที่ 1

ขั้นตอนเริ่มต้นทำ FTA ต้องมีความเข้าใจและรู้การทำงานของระบบ โดยทำการแสดงปัญหา ต่อจากนั้นค้นปัญหาทั้งหมดที่จะเกิดขึ้นระบุถึงสาเหตุและขั้นตอนที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงหรือข้อบกพร่องภายในระบบ (Intermediate Event) ซึ่งอาจจะเกิดจากสาเหตุย่อยหลายๆ สาเหตุ และสาเหตุพื้นฐาน (Basic Event) ที่สนับสนุนการเกิดเหตุย่อยขึ้น การวิเคราะห์จะใช้แอนด์เกตหรือ

ออกเพื่อหาความเชื่อมโยงของสาเหตุต่างๆ ที่สนับสนุนให้เกิดความผิดพลาดขึ้นแล้วนำไปเขียนแผนภาพ FTA จากด้านบนลงสู่ด้านล่าง

การใช้ FTA เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ ค่าความน่าจะเป็นเกิดเหตุการณ์เชิงปริมาณได้ดังนี้  
 ลอจิก AND หรือแอนด์เกตจะแสดงผลที่ออกมา เมื่อเหตุการณ์ที่เข้าทั้งหมดมีค่าเป็นจริง ถ้าให้  
 เหตุการณ์ที่เข้าแต่ละเหตุการณ์เป็นอิสระต่อกัน ความน่าจะเป็นเกิดเหตุการณ์  $A$  และเหตุการณ์  $B$   
 จะได้ผลที่ออกมาตามสมการที่ 1

$$P(A \cap B) = P(A) \times P(B) \quad (1)$$

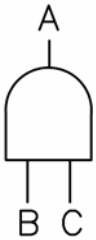
ลอจิก OR หรือออกเกตจะแสดงผลที่ออกมา เมื่อเหตุการณ์ที่เข้าเหตุการณ์ใดเหตุการณ์หนึ่ง  
 มีค่าเป็นจริง ถ้าให้เหตุการณ์ที่เข้าแต่ละเหตุการณ์เป็นอิสระต่อกัน ผลรวมของความน่าจะเป็นเกิด  
 เหตุการณ์  $A$  และเหตุการณ์  $B$  จะแสดงได้ดังสมการที่ 2

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) \quad (2)$$

แต่ถ้าเหตุการณ์มีความสัมพันธ์กัน ผลรวมของความน่าจะเป็นเกิดเหตุการณ์  $A$  และเหตุการณ์  
 $B$  จะแสดงได้ดังสมการที่ 3

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \times B) \quad (3)$$

ตารางที่ 2 แสดงสมการของ Logic Gate

| Logic Gate                                                                         | ความหมาย                                                             | ความสัมพันธ์กับ<br>พีชคณิตบูลีน | ความสัมพันธ์กับ<br>ความน่าจะเป็น                                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <b>AND</b><br>(เมื่อมีสาเหตุ B<br>และ C จึงจะ<br>เกิดเหตุการณ์<br>A) | $A = B \times C$                | $P(A) = P(B) \times P(C)$                                                                                                                 |
|  | <b>OR</b><br>(เมื่อมีสาเหตุ B<br>หรือ C จึงจะ<br>เกิดเหตุการณ์<br>A) | $A = B + C$                     | $P(A) = P(B) + P(C) - P(B) \times P(C)$<br>เนื่องจาก $P(B) \times P(C)$ มีค่าน้อยมาก<br>จึงสามารถลดสมการได้ดังนี้<br>$P(A) = P(B) + P(C)$ |

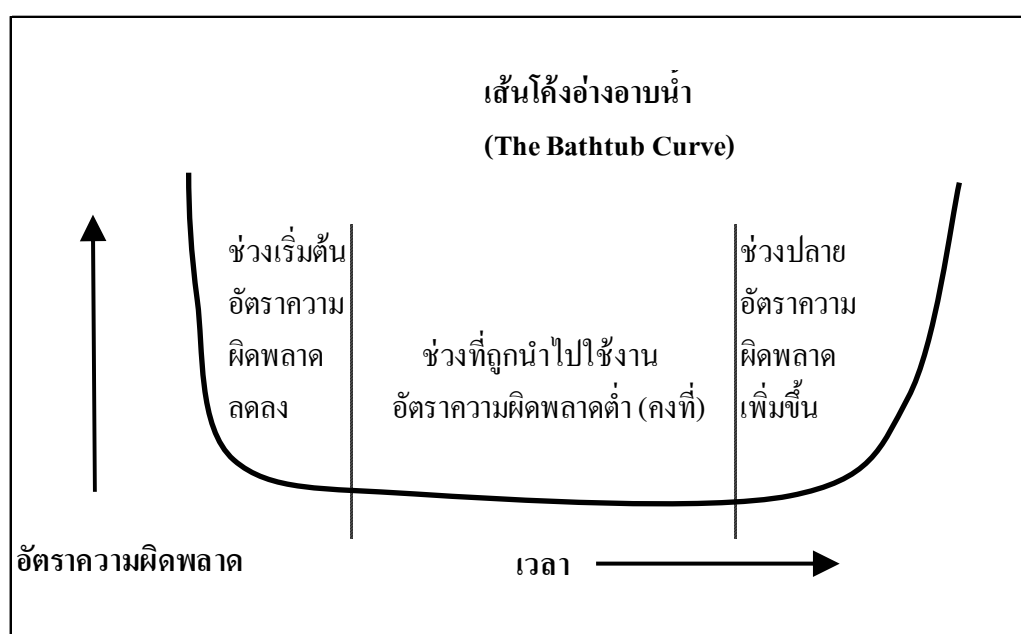
ที่มา: Hyatt (2003)

## 5. ทฤษฎีความเชื่อมั่น (Reliability Theory)

พิสมัย (2543) ได้กล่าวไว้ว่า ความน่าเชื่อถือ (Reliability) ของสินค้า หมายถึงโอกาสที่สินค้าจะปฏิบัติงานได้ตรงตามระดับการทำงานที่กำหนดภายในช่วงเวลาที่กำหนดและภายใต้สภาพแวดล้อมที่กำหนด ความน่าจะเป็น (Probability) หมายถึงความถี่ในระยะยาวที่จะเกิดเหตุการณ์หนึ่ง ความไม่น่าเชื่อถือหรือโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาด (Unreliability or Failure Probability) ของวัตถุคือโอกาสที่วัตถุนั้นไม่สามารถทำงานได้ตรงตามคุณสมบัติเฉพาะในช่วงเวลาที่กำหนดและภายใต้สภาพแวดล้อมที่กำหนด ความล้มเหลว (Failure) หมายถึงเวลาที่ระบบไม่สามารถปฏิบัติงานได้ตรงตามระดับการปฏิบัติงานที่กำหนดไว้ อัตราความล้มเหลว (Failure rate) หมายถึงจำนวนความล้มเหลวโดยเฉลี่ยต่อหนึ่งหน่วยเวลาของวัตถุซึ่งได้รับการซ่อมแซมในแต่ละครั้งที่ล้มเหลว

ความเชื่อมั่นหรือความเชื่อถือได้ (Reliability) เป็นตัวแปรที่สำคัญในทุกๆ ระบบ เนื่องจากในทางอุดมคติแล้วระบบต่างๆ จะต้องทำงานได้ตลอดเวลาโดยไม่มี ความผิดพลาด (Failure) ความเชื่อมั่นในการใช้งานหลายประเภทอาจจะเป็นที่ยอมรับได้ ถ้าจำนวนความผิดพลาดน้อยที่สุดและมีเทคนิควิธีการในการคาดคะเนหรือทำให้ความผิดพลาดลดลงในส่วนที่มีความสำคัญในการทำงาน ความเชื่อมั่น (Reliability) ของอุปกรณ์เป็นค่าที่ใช้แสดงโอกาสของอุปกรณ์ที่จะทำงานได้อย่างสมบูรณ์ในช่วงเวลาที่กำหนด ค่าความเชื่อมั่นจะเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับเวลา

การกระจายความผิดพลาดของอุปกรณ์ในระบบเครื่องกลและระบบไฟฟ้าจะนิยมใช้รูปเส้นโค้งอ่างอาบน้ำ (Bathtub Curve) ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 แสดงเส้นโค้งอ่างอาบน้ำ (Bathtub Curve)

ที่มา: Hyatt (2003); Crowl and Louvar (2002)

จากภาพที่ 11 แสดงเส้นโค้งอ่างอาบน้ำจะแบ่งเป็น 3 ช่วง คือช่วงเริ่มต้นการใช้งานอุปกรณ์ ความผิดพลาดต่างๆ จะเป็นเหมือนปัญหาของทารกแรกเกิด ซึ่งอุปกรณ์ใหม่อาจจะเกิด ความผิดพลาดเนื่องจากการออกแบบ จากการควบคุมคุณภาพที่ไม่ดี จากการเก็บชิ้นส่วนอยู่ใน สภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม จากการติดตั้ง จากการใช้งานไม่ถูกต้อง

ช่วงที่ 2 ระหว่างช่วงเริ่มต้นถึงช่วงท้ายหรือช่วงการใช้งาน เป็นช่วงที่ถูกนำไปใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพและประโยชน์สูงสุด ช่วงนี้ควรจะเป็นช่วงที่ยาวที่สุดของอายุการใช้งานซึ่งค่าความผิดพลาดในช่วงนี้จะมีค่าคงที่ เป็นความผิดพลาดที่ขึ้นอยู่กับเวลาในการใช้งาน และควรมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดในการทำงานในสภาวะปกติและเป็นช่วงที่จะนำไปวิเคราะห์หาค่าความผิดพลาดของอุปกรณ์

ช่วงท้ายของอุปกรณ์เมื่อถูกใช้งานเป็นระยะเวลานานๆย่อมมีการสึกหรอหรือความผิดพลาด ในช่วงนี้เกิดจากอายุการใช้งาน อัตราความผิดพลาดของช่วงนี้จะมีค่าสูงจะไม่สามารถยอมรับได้ในการใช้งานในระบบนิรภัย ซึ่งต้องมีการซ่อมแซมหรือทำการเปลี่ยนแปลงชิ้นส่วนที่สึกหรอ การใช้งานอุปกรณ์จะถูกออกแบบให้มีอายุการใช้งานไม่เกินช่วงเวลาการสึกหรอของส่วนประกอบต่างๆ ของอุปกรณ์ หรือต้องมีแผนการซ่อมบำรุงสำหรับอุปกรณ์ตามระยะเวลาการใช้งาน

จากการกระจายของไวบูลล์ (Weibull) ได้สมการความเชื่อมั่นและความผิดพลาดของอุปกรณ์ในช่วงความผิดพลาดคงที่หรือในช่วงการใช้งานจะเป็นตามสมการดังนี้

$$R(t) = e^{(-\lambda t)} \quad (4)$$

$$P(t) = 1 - e^{(-\lambda t)} \quad (5)$$

เมื่อ

$R$  คือ ความเชื่อมั่น(Reliability) ของอุปกรณ์

$P$  คือ ความผิดพลาดหรือโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาด(Failure Probability)ของอุปกรณ์

$\lambda$  คือ อัตราความผิดพลาด (Failure rate) [ครั้ง/หน่วยเวลา]

$t$  คือ ช่วงระยะเวลาในการทดสอบอุปกรณ์

การประมาณหาค่าความผิดพลาด จากสมการที่ 5 จะสามารถประมาณหาค่าความผิดพลาดได้ ถ้าอัตราความผิดพลาด มีค่าต่ำมากๆ โดยใช้สมการอนุกรมของเอกซ์โปเนนเชียล (Exponential) ดังนี้

$$e^x = 1 + x + \left(\frac{x^2}{2!}\right) + \left(\frac{x^3}{3!}\right) + \dots \quad (6)$$

เมื่อค่า  $x$  มีค่าน้อยมากๆ สามารถประมาณค่า โดยการลดรูปสมการดังนี้

$$e^x = 1 + x \quad (7)$$

แทนที่  $x$  ด้วย  $-\lambda t$  จะได้ดังนี้

$$e^{(-\lambda t)} = 1 - \lambda t \quad (8)$$

แทนค่า สมการที่ 8 ลงในสมการ 5 จะได้ดังนี้

$$P(t) = \lambda t \quad (9)$$

จากสมการที่ 9 จะเป็นการหาค่าความผิดพลาดอันตราย ณ เวลาที่กำหนด แต่สามารถหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายได้โดยการอินทิเกรต สมการที่ 9 ในช่วงเวลาที่ต้องการจะแสดงได้ดังสมการที่ 10

$$P_{avg} = \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T \lambda^D t dt \quad (10)$$

จะได้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายเป็นดังนี้

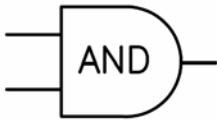
$$P_{avg} = \frac{1}{2} \lambda^D T \quad (11)$$

โดยค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์สามารถใช้สัญลักษณ์  $P_{avg}$  หรือ  $PFD_{avg}$

$$PFD_{avg} = \frac{1}{2} \lambda^D T \quad (12)$$

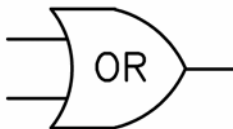


ตารางที่ 3 แสดงความสัมพันธ์สมการทางคณิตศาสตร์ของการต่อแบบ AND Gate หรือแบบขนาน

| Failure Probability                                                                                    | Reliability                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
|                       |                                                                |
| <p>การเชื่อมต่ออุปกรณ์แบบ AND Gate หรือแบบขนาน : ระบบจะผิดพลาดก็ต่อเมื่ออุปกรณ์ทั้งคู่ทำงานผิดพลาด</p> |                                                                |
| $P = P_1 \times P_2$ $P = 1 - \prod_{i=1}^n P_i$                                                       | $R = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2)$ $R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$ |

ที่มา: Crowl and Louvar (2002)

ตารางที่ 4 แสดงความสัมพันธ์สมการทางคณิตศาสตร์ของการต่อแบบ OR Gate หรือแบบอนุกรม

| Failure Probability                                                                                      | Reliability                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
|                       |                                              |
| <p>การเชื่อมต่ออุปกรณ์แบบ OR Gate หรือแบบอนุกรม : อุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งผิดพลาด มีผลให้ทั้งระบบผิดพลาด</p> |                                              |
| $P = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2)$ $P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i)$                                           | $R = R_1 \times R_2$ $R = \prod_{i=1}^n R_i$ |

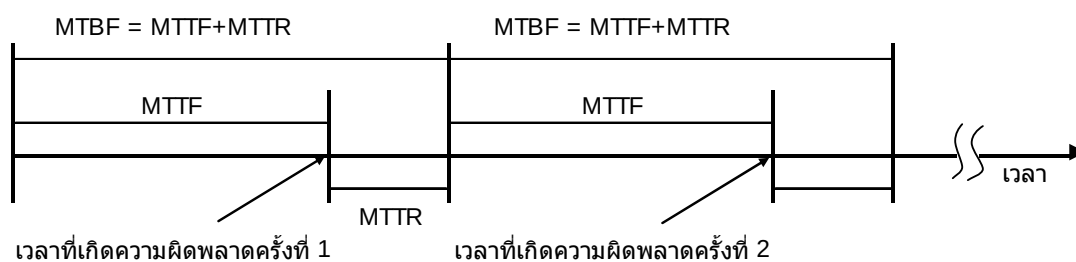
ที่มา: Crowl and Louvar (2002)

### เวลาเฉลี่ยระหว่างความผิดพลาด (Mean Time Between Failure, MTBF)

Hnatek (2003) กล่าวว่า ค่า MTBF คือระยะเวลาเฉลี่ยระหว่างความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์ หาได้จากค่าเวลาทั้งหมดหารด้วยจำนวนครั้งที่เกิดความเสียหาย

ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยก่อนความผิดพลาดของอุปกรณ์ (Mean Time To Failure, MTTF) และเวลาเฉลี่ยในการซ่อมแซม (Mean Time To Repair, MTTR) ดังแสดงในภาพที่ 12 โดยเฉลี่ยอุปกรณ์จะทำงานเป็นระยะเวลา MTTF ก่อนการเสียครั้งแรก จากนั้นก็ทำการซ่อมโดยใช้เวลา MTTR เพื่อที่จะซ่อมความเสียหายและนำอุปกรณ์กลับมาใช้ใหม่อีกครั้งหนึ่ง หลังจากการซ่อมอุปกรณ์สมบูรณ์เหมือนใหม่อีกครั้งหนึ่งและจะสามารถทำงานได้เฉลี่ยเท่ากับ MTTF ก่อนการเสียหายครั้งต่อไป ดังนั้น จะได้ค่า MTBF ดังสมการต่อไปนี้

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (13)$$



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $MTTF$  และ  $MTTR$

ที่มา: Hnatek (2003); Goble (1998)

$MTTF$  เป็นค่าที่ใช้ในการหาอัตราความผิดพลาด (Failure rate,  $\lambda$ ) ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\lambda = \frac{1}{MTTF} \quad (14)$$

เนื่องจากโดยทั่วไปแล้ว ค่า  $MTTR$  จะมีค่าน้อยกว่าค่า  $MTTF$  มาก ดังนั้นจึงประมาณ ค่า  $MTTF$  เท่ากับค่า  $MTBF$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (15)$$

## มาตรฐาน IEC 61508 และ IEC 61511

IEC (International Electrotechnical Commission) เป็นมาตรฐานและการรับรองระหว่างประเทศเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์และที่เกี่ยวข้อง คณะกรรมการที่พัฒนาและกำหนดมาตรฐาน IEC 61508 และ IEC 61511 มาจากองค์กรต่าง ๆ และผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องในด้านนี้ ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวได้ผ่านการรับรองจากสมาชิกของ IEC ให้มีการใช้งานในปี พ.ศ.2543

มาตรฐาน IEC 61508 เป็นมาตรฐานที่ครอบคลุมการทำงานที่เกี่ยวกับฟังก์ชันนิรภัยของระบบนิรภัยที่เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ทางอิเล็กทรอนิกส์และการโปรแกรมทางอิเล็กทรอนิกส์ และระบบนิรภัยที่เกี่ยวข้อง โดยผู้ที่ใช้งานมาตรฐานนี้คือผู้ผลิตและผู้จำหน่ายอุปกรณ์ ในขณะที่มาตรฐาน IEC 61511 นั้นจะเป็นมาตรฐานที่เกี่ยวกับฟังก์ชันนิรภัยของระบบควบคุมนิรภัยสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการ แต่ผู้ที่ใช้มาตรฐานนี้คือผู้ออกแบบและผู้ใช้งาน มาตรฐานทั้งสองนี้ได้กำหนดรายละเอียดของระบบควบคุมนิรภัยตั้งแต่ขั้นตอนออกแบบกระบวนการผลิตจนถึงขั้นตอนการใช้งาน

มาตรฐาน IEC 61508 ประกอบด้วย 7 ส่วน โดยส่วนที่ 1 กล่าวถึงข้อกำหนดทั่วไป ส่วนที่ 2 กล่าวถึงข้อกำหนดสำหรับอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ทางอิเล็กทรอนิกส์และการโปรแกรมทางอิเล็กทรอนิกส์ และระบบนิรภัยที่เกี่ยวข้อง ส่วนที่ 3 เป็นข้อกำหนดทางซอฟต์แวร์ ส่วนที่ 4 เป็นคำจำกัดความและคำย่อต่างๆ ส่วนที่ 5 เป็นตัวอย่างของวิธีการหาค่าระดับความปลอดภัย (SIL) ส่วนที่ 6 เป็นแนวทางการประยุกต์ใช้ IEC 61508-2 และ IEC 61508-3 และส่วนที่ 7 เป็นการอธิบายสรุปเทคนิคและการประเมิน ในขณะที่มาตรฐาน IEC 61511 ประกอบด้วย 3 ส่วน ในส่วนที่ 1 จะกล่าวถึงโครงสร้างโดยรวม คำจำกัดความ ระบบ ความต้องการด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ใน ส่วนที่ 2 กล่าวถึงแนวทางการประยุกต์ใช้ IEC 61511-1 และส่วนที่ 3 แนะนำการหาค่าระดับความปลอดภัย (SIL) ที่ต้องการ

มาตรฐาน IEC ทั้งสองนี้ได้ระบุไว้ว่า ในอุตสาหกรรมกระบวนการนี้ ต้องประเมินความเสี่ยงของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม (Equipment under control) ซึ่งหมายถึงอุปกรณ์ต่างๆ ของระบบควบคุมพื้นฐาน อุปกรณ์ไฟฟ้า และคน ที่อยู่ภายใต้การควบคุมของระบบควบคุมนิรภัย แล้วจึงหาค่าระดับความปลอดภัย (Safety Integrity Level, SIL) จากนั้นทำการลดค่าดังกล่าวด้วยการออกแบบและติดตั้งวาล์วนิรภัยทางกล (Safety Relief Valve) และ/หรือระบบควบคุมนิรภัยที่ให้ฟังก์ชันควบคุมนิรภัยที่มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตราย (PFDavg) ต่ำ

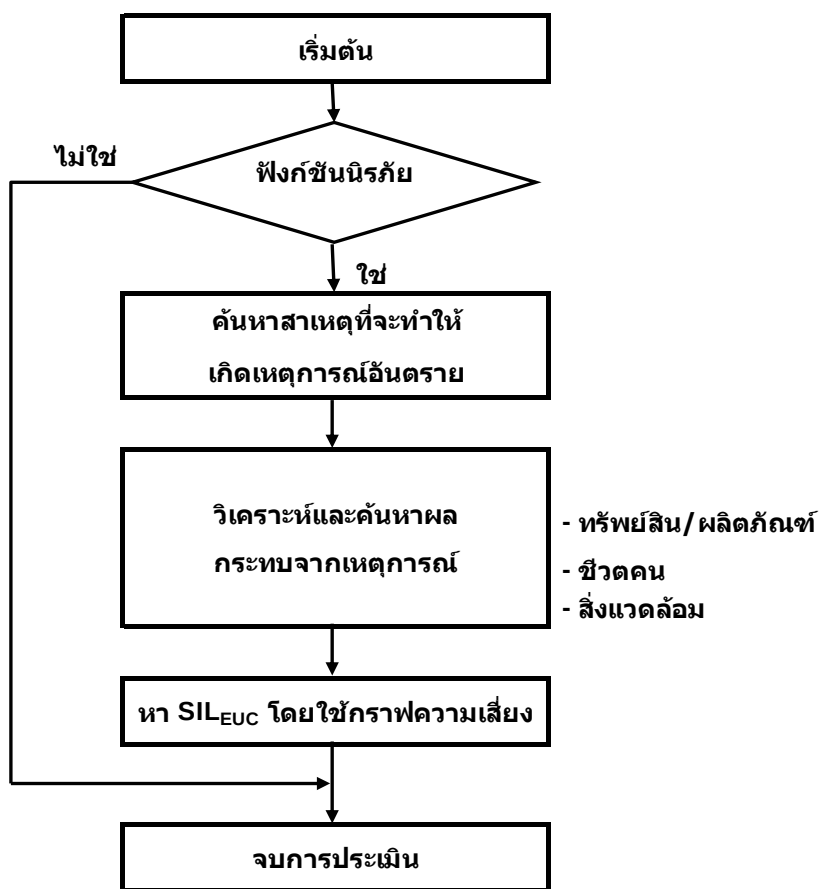
มาตรฐาน IEC 61508 และ IEC 61511 ได้แนะนำให้ทำการหาค่าระดับความปลอดภัยของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม และค่าดังกล่าวของระบบควบคุมนิรภัยและหรือวาล์วนิรภัยทางกล ที่ใช้งานอยู่นั้น จากนั้นเปรียบเทียบค่าทั้งสองตามหลักการของมาตรฐาน IEC 61508 และ IEC 61511 กล่าวคือ ถ้าค่าระดับความปลอดภัยของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม มีค่าสูงกว่าค่าระดับความปลอดภัยของระบบควบคุมนิรภัย และหรือวาล์วนิรภัยทางกล ที่ใช้งานอยู่นั้น จำเป็นต้องลดค่าดังกล่าวลง หรืออีกนัยหนึ่ง ให้เพิ่มค่าระดับความปลอดภัยของระบบควบคุมนิรภัย และหรือวาล์วนิรภัยทางกล ให้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าระดับความปลอดภัยของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม ซึ่งอาจทำได้โดยติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม หรือเปลี่ยนชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบควบคุมนิรภัย เป็นต้น

## 1. การหาค่าระดับความปลอดภัยของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม ( $SIL_{EUC}$ )

(Safety Integrity Level of Equipment Under Control,  $SIL_{EUC}$ )

การหาค่าระดับความปลอดภัยของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุมจะหาได้จากการประเมินความเสี่ยงของฟังก์ชันควบคุมนิรภัยในระบบควบคุมนิรภัยซึ่งเป็นการประเมินความเสี่ยงต่อเหตุการณ์อันตรายและผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น อันเนื่องมาจากความผิดปกติของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม (Equipment Under Control, EUC) หรือในฟังก์ชันการควบคุม หลังจากการประเมินผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่าระดับความปลอดภัยจะถูกกำหนดให้กับฟังก์ชันควบคุมนิรภัยนั้น

ก่อนเริ่มทำการประเมินความเสี่ยงต่อเหตุการณ์อันตรายเพื่อกำหนดค่าระดับความปลอดภัย จำเป็นต้องทำความเข้าใจกับเป้าหมายและวัตถุประสงค์ของการประเมิน เพื่อให้การตัดสินใจในขั้นตอนการประเมินให้มีประสิทธิภาพและถูกต้องมากที่สุด การประเมินต้องรู้ความผิดพลาดของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม ที่อาจเกิดขึ้นและมีโอกาส จะก่อให้เกิดเหตุการณ์อันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ทรัพย์สิน และสิ่งแวดล้อมโดยแสดงลำดับขั้นตอนการประเมินความเสี่ยงดังภาพที่ 13 ซึ่งข้อมูลที่ได้จะถูกวิเคราะห์และเก็บรวบรวมบันทึกไว้ในเอกสารการประเมินเพื่อนำไปใช้อ้างอิงในการออกแบบระบบควบคุมนิรภัย



ภาพที่ 13 แสดงลำดับขั้นตอนการหาค่าระดับความปลอดภัยของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม (SIL<sub>EUC</sub>)  
ที่มา: ทวีช (2548)

การประเมินจะใช้สมมุติฐานที่ว่าอุปกรณ์อยู่ภายใต้การควบคุมปกติ โดยที่ไม่มีระบบป้องกันอื่น ๆ มาเกี่ยวข้อง การประเมินอาจจะแสดงได้ 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. กำหนดความอันตราย
2. วิเคราะห์ความอันตราย
3. ประเมินความเสี่ยง

การประเมินความเสี่ยง จะต้องรวบรวมความคิดเห็นของผู้ที่มีประสบการณ์ ในทุกส่วนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต เช่น ด้านออกแบบกระบวนการผลิต และออกแบบระบบเครื่องมือวัดและควบคุม ด้านการควบคุมกระบวนการผลิต ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านความปลอดภัย ด้านการบำรุงรักษา เป็นต้น

## 1. เกณฑ์ความเสี่ยงและกราฟความเสี่ยง

มาตรฐาน IEC 61508 และ IEC 61511 เป็นมาตรฐานที่อยู่บนการประเมินความเสี่ยงที่จะเกิดเหตุการณ์อันตรายและการใช้งานมาตรฐานนี้ ต้องมีเกณฑ์ความเสี่ยงที่ยอมรับได้ การกำหนดเกณฑ์การยอมรับได้ของความเสี่ยงเป็นสมมุติฐานที่สำคัญในการใช้กำหนดรูปแบบกระบวนการตัดสินใจในขั้นตอนการประเมิน การตั้งเกณฑ์ความเสี่ยงจะขึ้นอยู่กับ ผู้ปฏิบัติงาน วัฒนธรรม และกฎเกณฑ์สิ่งแวดล้อมของพื้นที่ที่จะนำมาตรฐานนี้ไปใช้งาน โดยการตั้งเกณฑ์ประกอบด้วย 2 หลักการ ดังนี้

เกณฑ์คุณลักษณะ (Qualitative criteria) เป็นการบ่งบอกถึงความเป็นไปได้ที่จะเกิดเหตุการณ์ เช่น บางที บ่อยครั้ง ไม่น่าเป็นไปได้ เป็นต้น และบ่งบอกถึงผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้นหลังเกิดเหตุการณ์ เช่น ใหญ่กว่า เล็กน้อย รุนแรง ส่วนเกณฑ์ปริมาณ (Quantitative criteria) เป็นการบ่งบอกถึงปริมาณหรือจำนวนอัตราที่จะเกิดเหตุการณ์และความรุนแรงของเหตุการณ์ เช่น ภายใน 1 ปี หรือ เกิน 1 ปีแต่ไม่เกิน 10 ปี เป็นต้น

ในการประเมินความเสี่ยงของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม จำเป็นต้องใช้เครื่องมือในการประเมินความเสี่ยง กราฟความเสี่ยงและตารางความเสี่ยงเป็นเครื่องมือที่ IEC 61508 และ IEC 61511 ได้ระบุให้ใช้ในการประเมินความเสี่ยง และจะต้องมีการปรับเทียบก่อน หลักการปรับเทียบเกณฑ์ความเสี่ยงและกราฟความเสี่ยงซึ่งจะถูกปรับเทียบจากคุณลักษณะของการใช้งานและให้สอดคล้องกับความเสี่ยงและให้เหมาะสมกับสิ่งแวดล้อม โดยใช้หลักการตัวอย่างในภาคผนวก D ของ IEC 61508 ส่วนที่ 5 หรือในภาคผนวก D ของ IEC 61511 ส่วนที่ 3

เกณฑ์ความเสี่ยงและกราฟความเสี่ยงที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้ดัดแปลงมาจากเกณฑ์ความเสี่ยงและตารางความเสี่ยงของบริษัทเซลล์ ซึ่งเป็นผู้ปรับเทียบเกณฑ์ความเสี่ยงและตารางความเสี่ยงให้กับโรงงานแห่งนี้ โดยเกณฑ์ความเสี่ยงและกราฟความเสี่ยงที่ใช้ในการวิจัยมีดังนี้

## 2. อัตราการเกิดเหตุการณ์ (Demand rate, W)

อัตราการเกิดเหตุการณ์ของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุมที่ทำงานผิดพลาด สามารถหาได้จากฐานข้อมูลที่เชื่อถือได้ เช่น บริษัทเซลล์ หรือจากประสบการณ์ของพนักงานที่เกี่ยวข้อง ในที่นี่ได้แบ่งอัตราการเกิดเหตุการณ์ (W) เป็น 5 ระดับ ดังนี้

W1 หมายถึงอัตราการเกิดเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นเมื่อเวลาเกิน 100 ปี (Very Low)

W2 หมายถึงอัตราการเกิดเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นในช่วงเวลา 20 ปี แต่ไม่เกิน 100 ปี (Low)

W3 หมายถึงอัตราการเกิดเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นในช่วงเวลา 4 ปี แต่ไม่เกิน 20 ปี (Medium)

W4 หมายถึงอัตราการเกิดเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นในช่วงเวลา 0.5 ปี แต่ไม่เกิน 4 ปี (High)

W5 หมายถึงอัตราการเกิดเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นในเวลาภายใน 0.5 ปี (Very High)

โดยอัตราการเกิดเหตุการณ์ฯ นี้หมายถึงจำนวนครั้งที่อุปกรณ์ดังกล่าวทำงานผิดพลาดในช่วงระยะเวลาเฉลี่ย เช่น โรงงานแห่งหนึ่งที่ได้ดำเนินการมา 20 ปี โดยอุปกรณ์ A นี้ได้เคยทำงานผิดพลาดในปีที่ 3, 7 และ 16 ดังนั้นระยะเวลาในแต่ละช่วงของการทำงานผิดพลาดจะเป็น 3, 4 และ 9 ตามลำดับ โดยค่าเฉลี่ยของระยะเวลาทั้ง 3 จะมีค่าเป็น 5 ปี ดังนั้นอัตราการเกิดเหตุการณ์ที่อุปกรณ์ A ได้ทำงานผิดพลาดจึงมีค่าเป็น 1 ครั้งในระยะเวลา 5 ปี ดังนั้นจะได้ อัตราการเกิดเหตุการณ์เป็น W3

## 3. ผลกระทบต่อชีวิตคน (Consequences Concerning People, C)

ในที่นี่ได้แบ่งผลกระทบต่อชีวิตคน (C) เป็น 5 ระดับ ดังนี้

C0 หมายถึงไม่มีการบาดเจ็บ (No Injury)

C1 หมายถึงบาดเจ็บเล็กน้อย ระดับปฐมพยาบาล แต่ไม่หยุดงาน (Slight Injury)

C2 หมายถึงบาดเจ็บเล็กน้อย ระดับปฐมพยาบาลหรือหยุดงานเป็นระยะเวลาสั้นๆ (Minor Injury)

C3 หมายถึงบาดเจ็บสาหัสหรือพิการถาวรบางส่วน (Serious Permanent Injury or Major Injury)

C4 หมายถึงเสียชีวิตหรือพิการถาวรหลายส่วน (Death to People or Single Fatality)

#### 4. ระยะเวลาในบริเวณอันตราย (Frequency of Exposure Time, F)

ในที่นี้ได้แบ่งระยะเวลาในบริเวณอันตราย (F) เป็น 2 ระดับ ดังนี้

F1 หมายถึงการมีผู้ปฏิบัติงานและผู้เกี่ยวข้องอยู่ในบริเวณที่อาจจะเกิดเหตุการณ์น้อยกว่าครึ่งวัน (Half of The Time)

F2 หมายถึงการมีผู้ปฏิบัติงานและผู้เกี่ยวข้องอยู่ในบริเวณที่อาจจะเกิดเหตุการณ์มากกว่าครึ่งวัน (Always People Around)

#### 5. การหลีกเลี่ยงจากบริเวณอันตราย (Possibility of Avoiding, P)

ในที่นี้ได้แบ่งการหลีกเลี่ยงจากบริเวณอันตราย (P) เป็น 2 ระดับ ดังนี้

P1 หมายถึงสามารถที่จะหลีกเลี่ยงจากเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นได้ (Possible Under Certain Conditions)

P2 หมายถึงไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงจากเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นได้ (Almost Impossible)



## 6. ความสูญเสียต่อทรัพย์สิน (Asset & Production Loss, L)

ความสูญเสียต่อทรัพย์สินได้รวมถึง ค่าใช้จ่ายที่ต้องทำการซ่อมหรือเปลี่ยนอุปกรณ์ ค่าแรงในการซ่อมหรือเปลี่ยนอุปกรณ์ ค่าสูญเสียผลผลิต และค่าสูญเสียคุณภาพของผลผลิต รวมทั้งค่าปรับที่ไม่สามารถส่งผลกระทบต่อลูกค้าได้ ในที่นี้ได้แบ่งความสูญเสียต่อทรัพย์สิน (L) เป็น 6 ระดับ

LO หมายถึง ไม่มีการสูญเสีย (No Operation Upset / No Damage to Equipment)

L1 หมายถึง สูญเสียเล็กน้อยมาก คิดเป็นเงินอยู่ในช่วง 0 ถึง 10,000 เหรียญสหรัฐ (Slight Operation Upset / Minor Damage to Equipment)

L2 หมายถึง สูญเสียเล็กน้อยแต่ต้องหยุดกระบวนการผลิต คิดเป็นเงินอยู่ในช่วง 10,000 ถึง 100,000 เหรียญสหรัฐ (Minor Operation Upset / Moderate Damage to Equipment)

L3 หมายถึง สูญเสียปานกลางแต่ต้องหยุดกระบวนการผลิตเป็นช่วงสั้นๆ คิดเป็นเงินอยู่ในช่วง 100,000 ถึง 1,000,000 เหรียญสหรัฐ (Moderate Operation Upset / Moderate Damage to Equipment)

L4 หมายถึง สูญเสียมากและต้องหยุดกระบวนการผลิตเป็นเวลานาน คิดเป็นเงินอยู่ในช่วง 1,000,000 ถึง 10,000,000 เหรียญสหรัฐ (Major Damage to Essential Equipment)

L5 หมายถึง สูญเสียมากเป็นบริเวณกว้างและต้องหยุดกระบวนการผลิตเป็นเวลานาน คิดเป็นเงินมากกว่า 10,000,000 เหรียญสหรัฐ (Extensive Damage to Essential Equipment)

หมายเหตุ เนื่องจากบริษัทแห่งนี้มีการซื้อขายคิดมูลค่าผลิตภัณฑ์โดยใช้หน่วยเป็น เหรียญสหรัฐ

## 7. ความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental damage, E)

ในที่นี้ได้แบ่งความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม (E) เป็น 6 ระดับ ดังนี้

E0 หมายถึงไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (No Release/ No Effect)

E1 หมายถึงกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเล็กน้อยมาก (Release with Slight Damage to Environment)

E2 หมายถึงกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเล็กน้อย (Release with Minor Damage to Environment)

E3 หมายถึงกระทบต่อสิ่งแวดล้อมชั่วคราวแต่ออกไปภายในขอบเขต (Release Outside Fence Moderate with Temporary Damage to Environment)

E4 หมายถึงกระทบต่อสิ่งแวดล้อมถาวรและออกไปภายนอกขอบเขต (Release outside Fence Major with Permanent Major Damage to Environment)

E5 หมายถึงกระทบต่อสิ่งแวดล้อมถาวรมากและออกไปภายนอกขอบเขต (Release outside Fence Massive with Permanent Massive Damage to Environment)

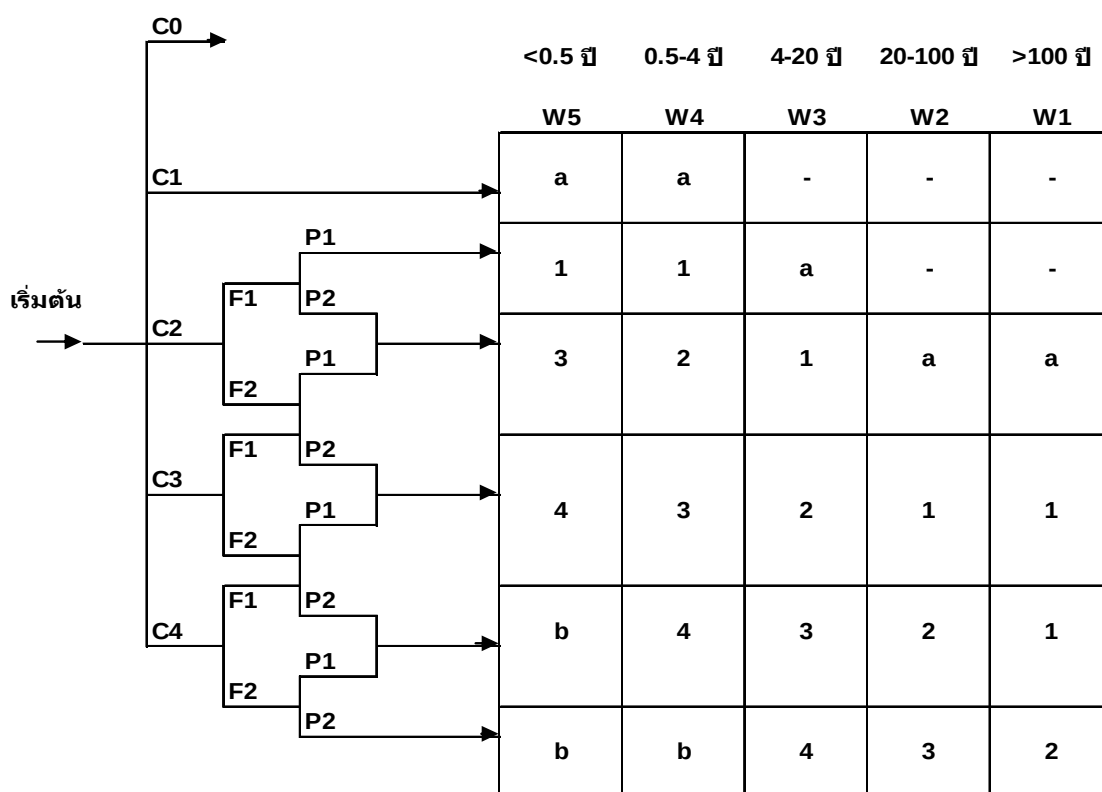
มาตรฐาน IEC 61508 ได้เสนอแนวทางในการประเมินความเสี่ยงต่อเหตุการณ์อันตรายที่อาจเกิดขึ้น โดยใช้กราฟความเสี่ยง (Risk Graph) เพื่อหาค่าระดับความปลอดภัย ซึ่งค่าระดับความปลอดภัยจะขึ้นอยู่กับ อัตราการเกิดเหตุการณ์และความเสียหายต่อชีวิตคน ทรัพย์สิน และสิ่งแวดล้อม ดังแสดงในภาพที่ 14, 15 และ 16

|            |    | <0.5 ปี | 0.5-4 ปี | 4-20 ปี | 20-100 ปี | >100 ปี |
|------------|----|---------|----------|---------|-----------|---------|
|            |    | W5      | W4       | W3      | W2        | W1      |
| เริ่มต้น → | L0 | a       | a        | -       | -         | -       |
|            | L1 | 1       | 1        | a       | -         | -       |
|            | L2 | 3       | 2        | 1       | a         | a       |
|            | L3 | 4       | 3        | 2       | 1         | 1       |
|            | L4 | b       | 4        | 3       | 2         | 1       |
|            | L5 | b       | b        | 4       | 3         | 2       |

ภาพที่ 14 แสดงกราฟความเสี่ยงสูญเสียต่อทรัพย์สิน

|            |    | <0.5 ปี | 0.5-4 ปี | 4-20 ปี | 20-100 ปี | >100 ปี |
|------------|----|---------|----------|---------|-----------|---------|
|            |    | W5      | W4       | W3      | W2        | W1      |
| เริ่มต้น → | E0 | a       | a        | -       | -         | -       |
|            | E1 | 1       | 1        | a       | -         | -       |
|            | E2 | 3       | 2        | 1       | a         | a       |
|            | E3 | 4       | 3        | 2       | 1         | 1       |
|            | E4 | b       | 4        | 3       | 2         | 1       |
|            | E5 | b       | b        | 4       | 3         | 2       |

ภาพที่ 15 แสดงกราฟความเสี่ยงเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม



ภาพที่ 16 แสดงกราฟความเสี่ยงกระทบต่อชีวิตคน

หมายเหตุ สัญลักษณ์และความหมายของผลลัพธ์ในกราฟ

- หมายถึง ไม่ต้องกำหนดค่าความปลอดภัย (No safety requirements)
- a หมายถึง กำหนดให้มีสัญญาณเตือน (Alarm requirements)
- b หมายถึง ระบบวัดคูนินรภัยที่เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์อย่างเดียวไม่เพียงพอ  
(A single E/E/PES is not sufficient)
- 1,2,3,4 หมายถึง ค่าระดับความปลอดภัย (Safety integrity level, SIL)

## 2. การหาค่าระดับความปลอดภัยของฟังก์ชันวัดคุมনিรภัย (SIL<sub>SIF</sub>)

(Safety Integrity Level of Safety Instrumented Functions, SIL<sub>SIF</sub>)

ทวิช (2548) ได้กล่าวไว้ว่าในออกแบบระบบวัดคุมนิรภัย ความผิดพลาดพื้นฐานสำคัญที่จะต้องพิจารณามีอยู่ 2 ชนิด คือความผิดพลาดนิรภัย (Safe Failure) เมื่อเกิดขึ้นแล้วจะไม่มีผลกระทบต่อความเชื่อมั่นของการทำงาน (Reliability) แต่จะทำให้ระบบนิรภัยมีการทำงานที่ไม่เป็นจริง (False Trip) ตามวัตถุประสงค์ที่ได้ออกแบบไว้และจะเป็นผลทำให้ความพร้อมใช้งาน (Availability) มีค่าลดลง ส่วนความผิดพลาดอันตราย (Dangerous Failure) รูปแบบนี้เมื่อเกิดขึ้นแล้วทำให้มีผลกระทบต่อความเชื่อมั่นของการทำงาน (Reliability) และจะทำให้ระบบนิรภัยไม่สามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ได้ออกแบบไว้

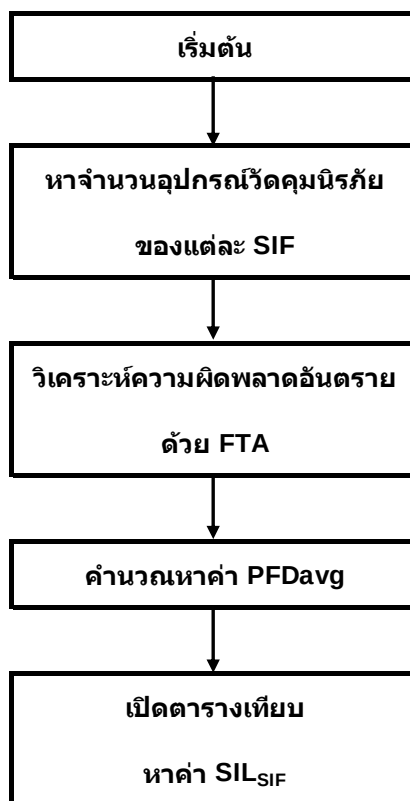
ในการออกแบบจะต้องพิจารณาตั้งแต่ อุปกรณ์การวัด ไปจนถึงอุปกรณ์สุดท้าย โดยวิธีการหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายของระบบย่อยที่ประกอบอยู่ในระบบวัดคุมนิรภัย แล้วนำค่าความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์เหล่านั้นมารวมกันและค่าที่ได้จะต้องมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ในแต่ละระดับความปลอดภัย การออกแบบระบบวัดคุมนิรภัย เป็นการเลือกใช้รูปแบบและชนิดของอุปกรณ์ต่างๆที่จะนำไปใช้ในระบบวัดคุมนิรภัย เพื่อให้ระบบมีค่าระดับความปลอดภัยตรงกับความต้องการ หรือตรงกับค่าระดับความปลอดภัยที่ได้ถูกกำหนดหลังจากขั้นตอนการประเมินความเสี่ยง

การหาค่าความผิดพลาดของอุปกรณ์ที่ใช้งานกับฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย จะกำหนดให้อุปกรณ์เหล่านี้มีระยะเวลาสำหรับทดสอบการทำงานเมื่อเวลาการใช้งานของอุปกรณ์ผ่านไป หลังจากทดสอบการทำงานแล้วพบความผิดพลาดก็จะทำการซ่อมแซมให้กลับมาใช้งานได้ตามปกติ ถ้าค่าอัตราความผิดพลาดของอุปกรณ์ที่ทำการพิจารณามีค่าต่ำๆ สามารถหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายในช่วงเวลาที่ต้องการ จากสมการที่ 12

$$PFD_{avg} = \frac{1}{2} \lambda^D T \quad (12)$$

โดย  $PFD_{avg}$  = ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์  
 $\lambda^D$  = อัตราความผิดพลาดอันตราย หน่วย ครั้ง/ชั่วโมง  
 $T$  = ช่วงระยะเวลาในการทดสอบอุปกรณ์ หน่วย ชั่วโมง

ในการหาค่าระดับความปลอดภัยของฟังก์ชันวัดคูนिरภัย จำเป็นต้องรู้รูปแบบและการทำงานของอุปกรณ์วัดคูนिरภัย เพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์ความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์วัดคูนिरภัย โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยแผนภาพต้นไม้ (FTA) จากนั้นก็นำสมการที่วิเคราะห์ได้นั้นไปคำนวณหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตราย (PFDavg) เพื่อจะได้นำค่า PFDavg ไปเทียบตารางหาค่าระดับความปลอดภัย (SIL) โดยแสดงลำดับขั้นตอนดังในภาพที่ 17



ภาพที่ 17 แสดงลำดับขั้นตอนการหาค่าระดับความปลอดภัยของฟังก์ชันวัดคูนिरภัย ( $SIL_{SIF}$ )

#### 1. ค่าระดับความปลอดภัยหรือค่าระดับความน่าเชื่อถือ (Safety Integrity Level, SIL)

ระบบวัดคูนिरภัยจะถูกใช้งานในการทำหน้าที่ป้องกันหรือจำกัดขอบเขตความเสียหายของกระบวนการอันเนื่องมาจากความผิดปกติของกระบวนการ ความผิดพลาดที่เกิดจากฟังก์ชันการควบคุมหรือความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบนिरภัยเอง ดังนั้น มาตรฐาน IEC 61508 จึงได้มีการกำหนดค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายของฟังก์ชันวัดคูนिरภัยต่างๆ ที่อยู่ในระบบวัดคูนिरภัยสำหรับนำไปใช้ในการป้องกันหรือจำกัดขอบเขตความเสียหาย ซึ่งค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตราย

(Average Probability of a Failure on Demand, PFDavg) เรียกว่า ค่าระดับความปลอดภัย (SIL) ของ ฟังก์ชันวัดคุมনিรภัย (Safety Instrumented Functions) ในระบบวัดคุมนิรภัย

มาตรฐาน IEC 61508 ได้กำหนดตารางค่าระดับความปลอดภัย (SIL) เพื่อแสดงค่า ระดับความปลอดภัยที่อัตราการเกิดเหตุการณ์อันตรายต่ำและตารางแสดงค่าระดับความปลอดภัย ที่อัตราการเกิดเหตุการณ์อันตรายสูงโดยในตารางได้แบ่งค่าระดับความปลอดภัยออกเป็น 4 ระดับ ตามช่วงค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ในเวลาที่ต้องการ (Average Probability of a Failure on Demand, PFDavg) หรือค่าความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ต่อชั่วโมง (Probability of a dangerous failure per hour) เป็นช่วงๆ ละสิบเท่า

ในกระบวนการผลิตที่มีอัตราการเกิดเหตุการณ์อันตราย (Demand rate) ของระบบมี คำน้อยกว่า 1 ครั้งต่อปี จะใช้หาค่าระดับความปลอดภัย (SIL) ที่อัตราการเกิดเหตุการณ์อันตรายต่ำ (Low demand mode of operation) ตามช่วงค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ในเวลา ที่ต้องการ (PFDavg) ส่วนกระบวนการผลิตที่มีอัตราการเกิดเหตุการณ์อันตราย (Demand rate) ของ ระบบมีค่ามากกว่า 1 ครั้งต่อปี จะใช้หาค่าระดับความปลอดภัย (SIL) ที่อัตราการเกิดเหตุการณ์ ันตรายสูง (High demand mode of operation) ตามช่วงค่าความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ต่อ ชั่วโมง (Probability of a dangerous failure per hour) ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงค่าระดับความปลอดภัย

| ค่าระดับความปลอดภัย<br>(Safety Integrity Level) | อัตราการเกิดเหตุการณ์<br>อันตรายต่ำ (Low demand<br>mode of operation)                                                                                       | อัตราการเกิดเหตุการณ์<br>อันตรายสูง (High demand<br>mode of operation)                                    |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                 | ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตราย<br>ของอุปกรณ์<br>(ครั้งต่อในเวลาที่ต้องการ*)<br>(Average probability of<br>failure to perform its design<br>function on demand) | ค่าความผิดพลาดอันตราย<br>ของอุปกรณ์ (ครั้งต่อชั่วโมง)<br>(Probability of a dangerous<br>failure per hour) |
|                                                 |                                                                                                                                                             |                                                                                                           |
|                                                 |                                                                                                                                                             |                                                                                                           |
| 4                                               | $< 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$                                                                                                                                  | $< 10^{-9}$ to $< 10^{-8}$                                                                                |
| 3                                               | $< 10^{-4}$ to $< 10^{-3}$                                                                                                                                  | $< 10^{-8}$ to $< 10^{-7}$                                                                                |
| 2                                               | $< 10^{-3}$ to $< 10^{-2}$                                                                                                                                  | $< 10^{-7}$ to $< 10^{-6}$                                                                                |
| 1                                               | $< 10^{-2}$ to $< 10^{-1}$                                                                                                                                  | $< 10^{-6}$ to $< 10^{-5}$                                                                                |

หมายเหตุ \*เวลาที่ต้องการหมายถึงช่วงระยะเวลาในการทดสอบอุปกรณ์ของแต่ละโรงงาน  
เป็นผู้กำหนด เช่น ทุกๆ 6 เดือน

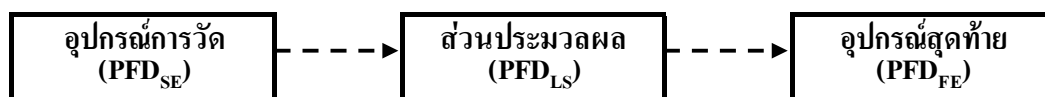
ที่มา: IEC 61508 (2000)

2. ค่าความผิดพลาดอันตราย (Probability of a Failure on Demand, PFD) ของระบบวัด  
คูนนิรภัย

ระบบวัดคูนนิรภัยทำหน้าที่การป้องกันอันตรายในกระบวนการผลิต การใช้งานจริง  
อุตสาหกรรมกระบวนการผลิตจะมีฟังก์ชันวัดคูนนิรภัย (Safety Instrumented Functions) ได้หลาย  
ฟังก์ชันนิรภัย ระบบวัดคูนนิรภัยประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ อุปกรณ์การวัด (Sensing  
Element) ส่วนประมวลผล (Logic Solver) และอุปกรณ์สุดท้าย (Final Element) ดังแสดงในภาพที่ 18  
ซึ่งในแต่ละส่วนจะมีค่าความผิดพลาดอันตราย (PFD) ของตัวเอง จากนั้นนำค่าเฉลี่ยความผิดพลาด  
อันตรายของอุปกรณ์ทุกๆ ส่วนในฟังก์ชันวัดคูนนิรภัยมารวมกัน ดังแสดงผลรวมค่าเฉลี่ยความ  
ผิดพลาดอันตรายดังสมการที่ 16 นำผลรวมค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์วัดคูนนิรภัย



ไปเทียบกับค่าระดับความปลอดภัยในตารางที่ 5 จะได้ค่าระดับความปลอดภัย (SIL) ของอุปกรณ์วัดคุนิรภัย ซึ่งจะถูกกำหนดเป็นค่าระดับความปลอดภัยของฟังก์ชันวัดคุนิรภัยในระบบวัดคุนิรภัย



ภาพที่ 18 ฟังก์ชันวัดคุนิรภัยในระบบวัดคุนิรภัย

ที่มา: IEC-61508 (2000)

$$PFDavg_{(SIF)} = PFDavg_{(SE)} + PFDavg_{(LS)} + PFDavg_{(FE)} \quad (16)$$

เมื่อ

$PFDavg_{(SIF)}$  = ผลรวมค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายของฟังก์ชันวัดคุนิรภัย

$PFDavg_{(SE)}$  = ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์การวัด

$PFDavg_{(LS)}$  = ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายของส่วนประมวลผล

$PFDavg_{(FE)}$  = ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์สุดท้าย

จากสมการที่ 16 จะเห็นได้ว่าการออกแบบสามารถทำได้โดยการเลือกใช้อุปกรณ์ในรูปแบบต่าง ๆ ทั้ง 3 ส่วน เพื่อให้ผลรวมค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายมีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายของค่าระดับความปลอดภัยที่ต้องการ

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Health and Safety Executive (2003) ได้วิเคราะห์ เหตุการณ์ผิดปกติ 34 กรณี พบว่าความผิดพลาดที่เกิดจากระบบวัดคุมনির্যแล้วนำไปสู่เหตุการณ์อันตราย มีดังนี้

44 % จากการกำหนดรายละเอียดด้านวิศวกรรมของระบบวัดคุมনির্যไม่เพียงพอ

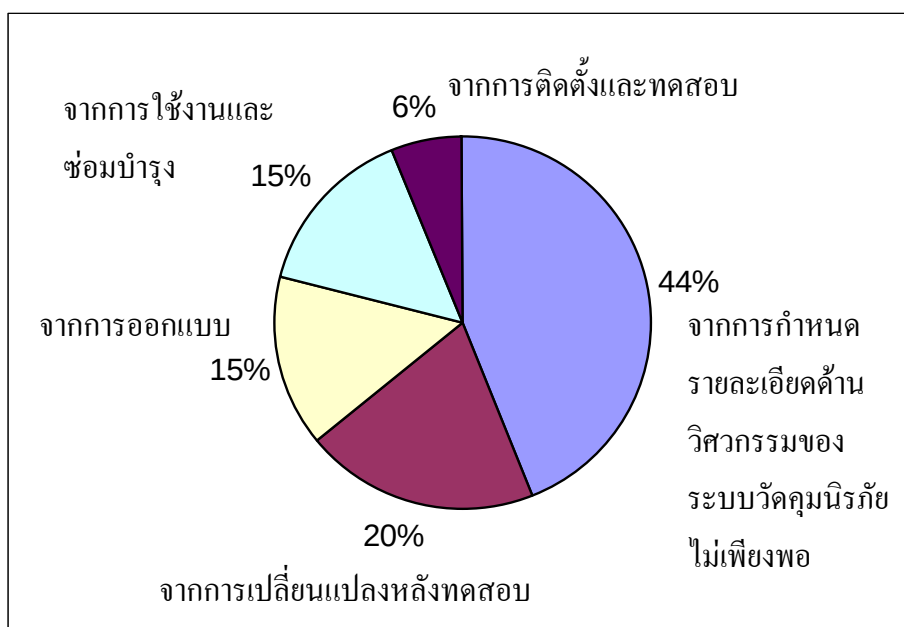
20 % จากการเปลี่ยนแปลงหลังทดสอบ

15 % จากการออกแบบ

15 % จากการใช้งานและซ่อมบำรุง

6 % จากการติดตั้งและทดสอบ

ประมาณ 3 ใน 5 ของความผิดพลาดในระบบวัดคุมনির্যทั้งหมด มีสาเหตุมาจากขั้นตอนในการออกแบบและกำหนดรายละเอียดด้านวิศวกรรมของระบบวัดคุมনির্য ดังแสดงในภาพที่ 19 ซึ่งสาเหตุเหล่านี้สามารถทำให้ลดลงได้ก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง



ภาพที่ 19 กราฟแสดงสาเหตุความผิดพลาดของระบบวัดคุมনির্য

ที่มา: HSE (2003)

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล รุ่น Pentium (R) ความเร็วหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) 3 GHz. ความจุหน่วยความจำสำรอง (HDD.) 80 GB. ความจุหน่วยความจำหลัก (RAM) 1 GB.
2. โปรแกรม AUTO CAD Version 2005

### วิธีการ

1. ศึกษาและหาตำแหน่งอุปกรณ์วัดคุมที่เป็นฟังก์ชันวัดคุมনিရ်จากแผนภาพกระบวนการผลิตของระบบผลิตไอน้ำ (Piping and Instrument Flow Diagram, P&ID) ดังแสดงในภาพที่ 20
2. หาค่าระดับความปลอดภัยของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม ( $SIL_{EUC}$ ) โดยการประเมินความเสี่ยงต่อเหตุการณ์อันตรายและผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากความผิดปกติของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม (Equipment Under Control, EUC)
  - 2.1 รวบรวมความคิดเห็นของผู้มีประสบการณ์ (วิศวกรออกแบบกระบวนการผลิต วิศวกรออกแบบระบบวัดคุมনিရ် พนักงานฝ่ายควบคุมกระบวนการผลิต พนักงานฝ่ายบำรุงรักษา พนักงานฝ่ายความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม) แล้วค้นหาสาเหตุที่จะทำให้เกิดเหตุการณ์อันตรายและผลกระทบในด้าน ทรัพย์สิน สิ่งแวดล้อมและชีวิตคน จากนั้นทำการหาค่าอัตราการเกิดเหตุการณ์ (Demand rate, W) ความสูญเสียต่อทรัพย์สิน (Asset & Production Loss, L) ความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม (Environment damage, E) และผลกระทบต่อชีวิตคน (Consequences Concerning People, C) ความถี่หรือระยะเวลาของผู้ที่อยู่ในบริเวณอันตราย (Frequency of Exposure, F) ความสามารถหลีกเลี่ยงจากบริเวณอันตราย (Possibility of Avoiding, P)

2.2 นำข้อมูลที่ได้ไปหาค่าระดับความปลอดภัยของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม ( $SIL_{EUC}$ ) โดยใช้กราฟความเสี่ยงทั้ง 3 กราฟ ได้แก่ กราฟความสูญเสียต่อทรัพย์สิน ความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม และผลกระทบต่อชีวิตคน

### 3. หาค่าระดับความปลอดภัยของอุปกรณ์วัดคุนิรภัย ( $SIL_{SIF}$ ) ดังนี้

3.1 หาค่าอัตราความผิดพลาดอันตราย (Failure rate,  $\lambda^D$ ) ของอุปกรณ์แต่ละตัว

3.2 หาค่าความผิดพลาดอันตรายต่อช่วงระยะเวลาในการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์วัดคุนิรภัย (Probability of failure on demand, PFD) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบแผนภาพต้นไม้ (Fault Tree Analysis, FTA) จากนั้นก็นำค่า PFD ดังกล่าวมาหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์วัดคุนิรภัยแต่ละระบบย่อย (Average probability of failure on demand, PFDavg)

3.3 หาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์วัดคุนิรภัย (PFDavg) แต่ละฟังก์ชันวัดคุนิรภัย (SIF)

3.4 หาค่าระดับความปลอดภัยของอุปกรณ์วัดคุนิรภัย ( $SIL_{SIF}$ ) ของแต่ละฟังก์ชันวัดคุนิรภัย (SIF)

4. ทำการเปรียบเทียบค่าระดับความปลอดภัยที่ได้จากการประเมินความผิดปกติของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม ( $SIL_{EUC}$ ) ที่ได้จากข้อ 2.2 กับระดับความปลอดภัยของอุปกรณ์วัดคุนิรภัย ( $SIL_{SIF}$ ) ที่ได้จากข้อ 3.4 แล้วทำการออกแบบเพื่อปรับปรุงระบบวัดคุนิรภัย เพื่อให้ค่าระดับความปลอดภัย ( $SIL_{SIF}$ ) สูงกว่าหรือเท่ากับค่าระดับความปลอดภัยของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม ( $SIL_{EUC}$ ) โดยการเพิ่มจำนวนอุปกรณ์และจัดรูปแบบของอุปกรณ์วัดคุนิรภัยให้เหมาะสม เลือกชนิดของอุปกรณ์วัดคุนิรภัย และออกแบบการต่อเชื่อมต่ออุปกรณ์วัดคุนิรภัย

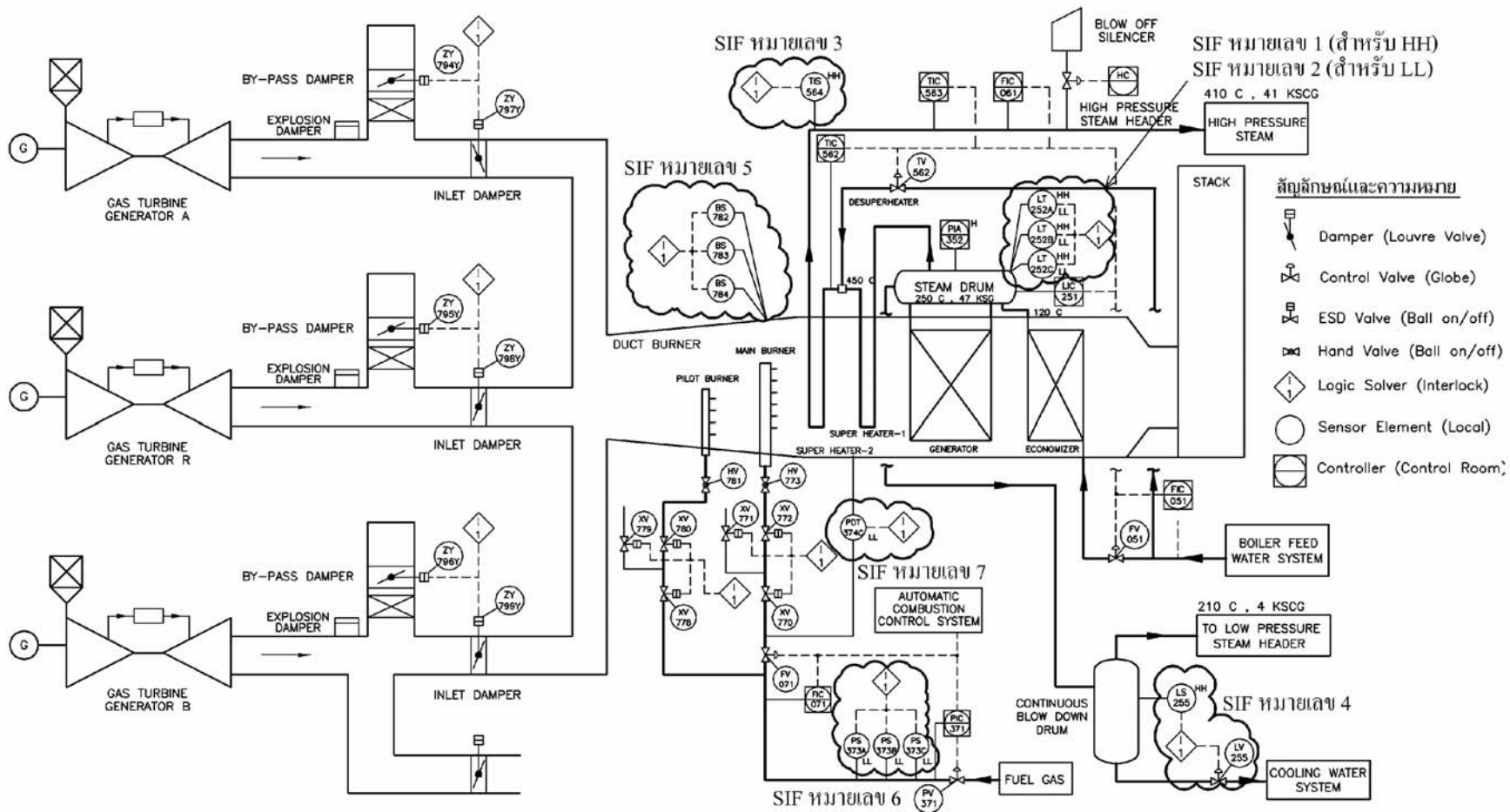
## ผลและวิจารณ์

### 1. ศึกษาและหาตำแหน่งอุปกรณ์วัดคุมที่เป็นฟังก์ชันวัดคุมনিရ်ยของระบบผลิตไอน้ำ

ภาพที่ 20 ได้แสดงแผนภาพกระบวนการผลิตของระบบผลิตไอน้ำ โดยได้พบว่ามี การติดตั้งอุปกรณ์การวัดนิรภัย (Sensing Element) ที่เป็นส่วนหนึ่งของฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย (SIF) เป็นจำนวน 7 ชุด อยู่บนอุปกรณ์หลักทั้ง 5 ดังแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งได้แสดงหมายเลขของแต่ละ อุปกรณ์การวัดนิรภัยไว้ด้วยเพื่อความสะดวกในการสื่อสาร (ดูภาพผนวกที่ ข1, ข2, ข3, ข5, ข6, ข7 และ ข8 สำหรับแผนภาพวงจรการเชื่อมต่อของแต่ละอุปกรณ์วัดคุมนิรภัย)

ตารางที่ 6 แสดงจำนวนฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย (SIF)

| อุปกรณ์หลัก                  | SIF<br>หมายเลข | อุปกรณ์การวัดนิรภัย                          | หมายเลข<br>อุปกรณ์การวัดนิรภัย |
|------------------------------|----------------|----------------------------------------------|--------------------------------|
| Steam Drum                   | 1              | Level Transmitter High High                  | LTHH-252 A/B/C                 |
|                              | 2              | Level Transmitter Low Low                    | LTLL-252 A/B/C                 |
| High Pressre Steam<br>Header | 3              | Temperature Switch High High                 | TISHH-564                      |
| Continuous Blow<br>Down Drum | 4              | Level Switch High High                       | LSHH-255                       |
| Duct Burer                   | 5              | Burner Frame Failure Switch                  | BS-781/782/783                 |
| Fuel Gas System              | 6              | Pressure Switch Low Low                      | PSLL-373 A/B/C                 |
|                              | 7              | Differential Pressure Transmitter<br>Low Low | PDTLL-374C                     |



ภาพที่ 20 แสดงแผนภาพกระบวนการผลิตของระบบผลิตไอน้ำ

## 2. การหาค่าระดับความปลอดภัยจากอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม ( $SIL_{EUC}$ )

ในการหาค่าระดับความปลอดภัยจากอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม ( $SIL_{EUC}$ ) จำเป็นต้องเริ่มจากการประเมินความเสี่ยงของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุมของทั้ง 7 SIF ซึ่งรวมถึงอัตราการเกิดเหตุการณ์ (W) และผลกระทบต่อทรัพย์สิน ชีวิตคนและสิ่งแวดล้อม ดังแสดงในตารางที่ 7 โดย W ได้มาจากการสอบถามพนักงานที่มีประสบการณ์ในโรงงาน หรือจากฐานข้อมูลที่เชื่อถือได้ของบริษัทเซลล์ โดยจะใช้ค่าที่บ่งบอกถึงความเสี่ยงที่มากกว่าในวิสัยนี้เท่านั้น ทั้งนี้โรงงานแห่งนี้ได้บำรุงรักษาอุปกรณ์ตามข้อแนะนำหรือข้อกำหนดของผู้ผลิตอุปกรณ์เป็นปกติอยู่แล้ว สำหรับการพิจารณาผลกระทบต่อทรัพย์สิน (L) ต่อชีวิตคน (C) และต่อสิ่งแวดล้อม (E) จะเป็นการประเมินตามเหตุผลและประสบการณ์ของพนักงานในโรงงานนี้เท่านั้น

เนื่องจากมีจำนวนฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย (SIF) มากถึง 7 ฟังก์ชัน ดังนั้นในผลและวิจารณ์นี้ผู้วิจัยจึงขออธิบายเฉพาะการหาค่าระดับความปลอดภัยของอุปกรณ์ใน SIF หมายเลข 3 เท่านั้น โดยตารางที่ 7 ได้แสดงถึงผลของการหาค่าดังกล่าวของ SIF อื่นๆ ไว้แล้ว นอกจากนี้ตารางที่ 8 ยังได้แสดง  $SIL_{EUC}$  ของทุก SIF ไว้ด้วยในการเปรียบเทียบกับ  $SIL_{SIF}$

ตารางที่ 7 ได้แสดงการหาอัตราการเกิดเหตุการณ์ผิดพลาดของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุมใน SIF หมายเลข 3 ไว้ โดยพบว่าชุดควบคุม TIC-562, TIC-563 และ FT-061 มีโอกาสทำงานผิดพลาด 1 ครั้งใน 10 ปี ในขณะที่ปั๊มน้ำมีโอกาสที่จะหยุดทำงาน หรือผิดพลาด 1 ครั้งใน 10 ปี และระบบฉีดน้ำเข้า Desuperheater โอกาสทำงานผิดพลาด เนื่องจากเกิดการอุดตัน 1 ครั้งใน 10 ปี ดังนั้นอัตราการเกิดเหตุการณ์รวมทั้งหมดของอุปกรณ์ทั้งสามนี้จึงมีค่าเป็น 3 ครั้งใน 10 ปี หรือ 3.33 ปีต่อครั้ง ซึ่งเมื่อเทียบกับเกณฑ์ความเสี่ยง อัตราการเกิดเหตุการณ์นี้จะอยู่ในช่วง 0.5 ปีถึง 4 ปี และได้ตัวแปรในระดับ W4 นั่นเอง

ตารางที่ 7 การประเมินความเสี่ยงของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม

| SIF     | รายละเอียด            | จุดมุ่งหมายของการออกแบบ                                                                  | อัตราการใช้เหตุการณ์ เมื่ออุปกรณ์ภายใต้                                                |                                  | ผลกระทบ                                                                                                                                                  | ผลกระทบ                                                  | ผลกระทบต่อ                     | ค่าระดับความปลอดภัย            |                                 |
|---------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| หมายเลข |                       | เพื่อป้องกัน                                                                             | การควบคุมทำงานผิดพลาด (Demand Rate)                                                    |                                  | ต่อทรัพย์สิน                                                                                                                                             | ต่อชีวิตคน                                               | สิ่งแวดล้อม                    | จากกราฟความเสี่ยง              |                                 |
|         |                       |                                                                                          | ( W )                                                                                  |                                  | ( L )                                                                                                                                                    | ( C )                                                    | ( E )                          | SIL <sub>EUC</sub>             |                                 |
| 1       | Steam Drum Level      | ไม่ให้ น้ำ เข้าไปใน Superheater #1                                                       | LIC-251A , FIC-051 , FT-061                                                            | 5 ปี/ครั้ง                       | 1.Superheater Fin Tube #1 แตก                                                                                                                            | จากเกณฑ์                                                 | จากเกณฑ์                       | L3 --> W3 ==> SIL2             |                                 |
|         | High High Detection   | (เนื่องจากน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำ แล้วเกิดการขยายตัวทำให้ Superheater #1 แตกเสียหายได้) | รวม Demand Rate                                                                        | 5 ปี/ครั้ง                       | ซึ่งต้องทำการเปลี่ยน 50 % ของทั้งหมด<br>2.เครื่องผลิตไอน้ำหยุดทำงาน 30 วัน<br>สูญเสียโอกาสที่จะได้น้ำ ( 14 KUSD./วัน )<br>รวมมูลค่าทรัพย์สิน คิดเป็นเงิน | 200 KUSD.*<br><br>420 KUSD.<br>620 KUSD.                 | ความเสี่ยง<br>ไม่มีผล<br>กระทบ | ความเสี่ยง<br>ไม่มีผล<br>กระทบ |                                 |
|         |                       |                                                                                          |                                                                                        |                                  | จากเกณฑ์ความเสี่ยงอยู่ในช่วง 4 ปี ถึง 20 ปี (W3)                                                                                                         | จากเกณฑ์ความเสี่ยงอยู่ในช่วง 100 KUSD ถึง 1000 KUSD (L3) | (C0)                           | (E0)                           |                                 |
|         |                       |                                                                                          |                                                                                        |                                  |                                                                                                                                                          |                                                          |                                |                                |                                 |
| 2       | Steam Drum Level      | ไม่ให้ความร้อนเกินที่ Superheater #1,#2                                                  | FIC-051                                                                                | 10 ปี/ครั้ง                      | 1.Generator Tubes เสียหาย                                                                                                                                | จากเกณฑ์                                                 | จากเกณฑ์                       | L3 --> W3 ==> SIL2             |                                 |
|         | Low Low Detection     | และ Generator Tubes                                                                      | รวม Demand Rate                                                                        | 10 ปี/ครั้ง                      | ซึ่งต้องทำการเปลี่ยนจำนวน 51 tubes<br>2.เครื่องผลิตไอน้ำหยุดทำงาน 15 วัน<br>สูญเสียโอกาสที่จะได้น้ำ ( 14 KUSD./วัน )<br>รวมมูลค่าทรัพย์สิน คิดเป็นเงิน   | 75 KUSD.<br><br>210 KUSD.<br>285 KUSD.                   | ความเสี่ยง<br>ไม่มีผล<br>กระทบ | ความเสี่ยง<br>ไม่มีผล<br>กระทบ |                                 |
|         |                       |                                                                                          |                                                                                        |                                  | จากเกณฑ์ความเสี่ยงอยู่ในช่วง 4 ปี ถึง 20 ปี (W3)                                                                                                         | จากเกณฑ์ความเสี่ยงอยู่ในช่วง 100 KUSD ถึง 1000 KUSD (L3) | (C0)                           | (E0)                           |                                 |
|         |                       |                                                                                          |                                                                                        |                                  |                                                                                                                                                          |                                                          |                                |                                |                                 |
| 3       | Steam Header          | ไม่ให้ความร้อนเกินที่ Superheater #1,#2                                                  | 1.TIC-562, TIC-563, FT-061                                                             | 10 ปี/ครั้ง                      | 1.Superheater Fin Tube #2 แตก                                                                                                                            | จากเกณฑ์                                                 | จากเกณฑ์                       | L3 --> W4 ==> SIL3             |                                 |
|         | Temperature High High | และ Generator Tubes                                                                      | 2.ปั๊มจ่ายน้ำหยุดทำงาน                                                                 | 10 ปี/ครั้ง                      | ซึ่งต้องทำการเปลี่ยน 50 % ของทั้งหมด<br>2.เครื่องผลิตไอน้ำหยุดทำงาน 30 วัน<br>สูญเสียโอกาสที่จะได้น้ำ ( 14 KUSD./วัน )<br>รวมมูลค่าทรัพย์สิน คิดเป็นเงิน | 200 KUSD.<br><br>420 KUSD.<br>620 KUSD.                  | ความเสี่ยง<br>ไม่มีผล<br>กระทบ | ความเสี่ยง<br>ไม่มีผล<br>กระทบ | E0 --> W4 ==> SIL a             |
|         | Detection             |                                                                                          | 3.ระบบ Desuperheater Fails<br>(ระบบฉีดน้ำเข้า Desuperheater อุดตัน)<br>รวม Demand Rate | 10 ปี/ครั้ง<br><br>3.33 ปี/ครั้ง |                                                                                                                                                          |                                                          | กระทบ                          | กระทบ                          | เลือก SIL ที่สูงสุดคือ<br>SIL 3 |
|         |                       |                                                                                          |                                                                                        |                                  | จากเกณฑ์ความเสี่ยงอยู่ในช่วง 0.5 ปี ถึง 4 ปี (W4)                                                                                                        | จากเกณฑ์ความเสี่ยงอยู่ในช่วง 100 KUSD ถึง 1000 KUSD (L3) | (C0)                           | (E0)                           |                                 |
| 4       | Continuous Blow Down  | ไม่ให้ น้ำ (Blow down water)                                                             | ท่อน้ำหล่อเย็นไหลกลับ อุดตัน                                                           | 12 ปี/ครั้ง                      | 1.ท่อและตัวค้ำยัน (Pipe and support)                                                                                                                     | จากเกณฑ์                                                 | จากเกณฑ์                       | L2 --> W3 ==> SIL1             |                                 |
|         | Level High High       | ล้นเข้าไปที่ท่อ Low Pressure Steam                                                       | (Cooling water return line Plug)                                                       |                                  | ของ SL Header เสียหาย / ค่าซ่อมแซม                                                                                                                       | 1 KUSD.                                                  | ความเสี่ยง                     | ความเสี่ยง                     |                                 |
|         | Detection             | Header (SL Header)<br>(เป็นสาเหตุให้เกิด Water Hammering ในท่อ SL Header)                | จากตะกอน (Scaling) ทำให้ขัดขวางการไหล<br>รวม Demand Rate                               | 12 ปี/ครั้ง                      | 2.เครื่องผลิตไอน้ำหยุดทำงาน 4 วัน<br>สูญเสียโอกาสที่จะได้น้ำ ( 14 KUSD./วัน )<br>รวมมูลค่าทรัพย์สิน คิดเป็นเงิน                                          | 56 KUSD.<br>57 KUSD.                                     | ไม่มีผล<br>กระทบ               | ไม่มีผล<br>กระทบ               |                                 |
|         |                       |                                                                                          |                                                                                        |                                  | จากเกณฑ์ความเสี่ยงอยู่ในช่วง 4 ปี ถึง 20 ปี (W3)                                                                                                         | จากเกณฑ์ความเสี่ยงอยู่ในช่วง 10 KUSD ถึง 100 KUSD (L2)   | (C0)                           | (E0)                           |                                 |



ตารางที่ 7 (ต่อ)

| SIF<br>หมายเลข | รายละเอียด                                         | จุดมุ่งหมายของการออกแบบ<br>เพื่อป้องกัน | อัตราการผลิตเหตุการณ์ เมื่ออุปกรณ์ภายใต้<br>การควบคุมทำงานผิดพลาด (Demand Rate) |                                             | ผลกระทบ<br>ต่อทรัพย์สิน                                  |           | ผลกระทบ<br>ต่อชีวิตคน | ผลกระทบต่อ<br>สิ่งแวดล้อม | ค่าระดับความปลอดภัย<br>จากกราฟความเสี่ยง |
|----------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------|-----------------------|---------------------------|------------------------------------------|
|                |                                                    |                                         | ( W )                                                                           |                                             | ( L )                                                    |           | ( C )                 | ( E )                     | SIL <sub>EUC</sub>                       |
| 5              | Burner Frame Failure<br><br>Detection              | ไม่ให้อากาศเชื้อเพลิง (Fuel gas) สะสม   | PIC-371 หรือ FIC-071                                                            | 10 ปี/ครั้ง                                 | 1.Duct Casing และ Boiler Tube เสียหาย                    | 250 KUSD. | จากเกณฑ์              | จากเกณฑ์                  | L3 --> W3 ==> SIL2                       |
|                |                                                    | ภายใน Duct Burner                       | (ความดันในท่อก๊าซเชื้อเพลิงสูงทำให้ปลวไฟดับ)                                    |                                             | 2.เครื่องผลิตไอน้ำหยุดทำงาน 45 วัน                       |           | ความเสี่ยง            | ความเสี่ยง                |                                          |
|                |                                                    | (เป็นสาเหตุทำให้เกิดการระเบิด)          | รวม Demand Rate                                                                 | 10 ปี/ครั้ง                                 | สูญเสียโอกาสที่จะได้อิอน้ำ ( 14 KUSD./วัน )              | 630 KUSD. | ไม่มีผล               | ไม่มีผล                   |                                          |
|                |                                                    |                                         |                                                                                 | รวมมูลค่าทรัพย์สิน คิดเป็นเงิน              | 880 KUSD.                                                | กระทบ     | กระทบ                 |                           |                                          |
|                |                                                    |                                         |                                                                                 |                                             |                                                          | กระทบ     | กระทบ                 |                           |                                          |
|                |                                                    |                                         | จากเกณฑ์ความเสี่ยงอยู่ในช่วง 4 ปี ถึง 20 ปี (W3)                                |                                             | จากเกณฑ์ความเสี่ยงอยู่ในช่วง 100 KUSD ถึง 1000 KUSD (L3) |           | (C0)                  | (E0)                      |                                          |
| 6              | Fuel Gas Pressure<br><br>Low Low Detection         | ไม่ให้อิไฟย้อนกลับ (Fire back) เข้าไปใน | PIC-371                                                                         | 10 ปี/ครั้ง                                 | 1.Main Burner #1 (Valve HV-773) เสียหาย                  | 0.1 KUSD. | จากเกณฑ์              | จากเกณฑ์                  | L2 --> W3 ==> SIL1                       |
|                |                                                    | Bunner                                  | รวม Demand Rate                                                                 | 10 ปี/ครั้ง                                 | 2.หัว Burner #1 ร้อนเกิน (Overheat) เสียหาย              | 25 KUSD.  | ความเสี่ยง            | ความเสี่ยง                |                                          |
|                |                                                    | (เป็นสาเหตุให้หัว Bunner เกิด Overheat) |                                                                                 |                                             | 3.เครื่องผลิตไอน้ำหยุดทำงาน 5 วัน                        |           | ไม่มีผล               | ไม่มีผล                   |                                          |
|                |                                                    |                                         |                                                                                 | สูญเสียโอกาสที่จะได้อิอน้ำ ( 14 KUSD./วัน ) | 70 KUSD.                                                 | กระทบ     | กระทบ                 |                           |                                          |
|                |                                                    |                                         |                                                                                 | รวมมูลค่าทรัพย์สิน คิดเป็นเงิน              | 95.1 KUSD.                                               | กระทบ     | กระทบ                 |                           |                                          |
|                |                                                    |                                         | จากเกณฑ์ความเสี่ยงอยู่ในช่วง 4 ปี ถึง 20 ปี (W3)                                |                                             | จากเกณฑ์ความเสี่ยงอยู่ในช่วง 10 KUSD ถึง 100 KUSD (L2)   |           | (C0)                  | (E0)                      |                                          |
| 7              | Burner Different Pressure<br><br>Low Low Detection | ไม่ให้อิไฟย้อนกลับ (Fire back) เข้าไปใน | PIC-371                                                                         | 10 ปี/ครั้ง                                 | 1.Main Burner #1 (Valve HV-773) เสียหาย                  | 0.1 KUSD. | จากเกณฑ์              | จากเกณฑ์                  | L2 --> W3 ==> SIL1                       |
|                |                                                    | Bunner                                  | FIC-071A, 37-FY-071A                                                            | 20 ปี/ครั้ง                                 | 2.หัว Burner #1 ร้อนเกิน (Overheat) เสียหาย              | 25 KUSD.  | ความเสี่ยง            | ความเสี่ยง                |                                          |
|                |                                                    | (เป็นสาเหตุให้หัว Bunner เกิด Overheat) | รวม Demand Rate                                                                 | 6.67 ปี/ครั้ง                               | 3.เครื่องผลิตไอน้ำหยุดทำงาน 5 วัน                        |           | ไม่มีผล               | ไม่มีผล                   |                                          |
|                |                                                    |                                         |                                                                                 | สูญเสียโอกาสที่จะได้อิอน้ำ ( 14 KUSD./วัน ) | 70 KUSD.                                                 | กระทบ     | กระทบ                 |                           |                                          |
|                |                                                    |                                         |                                                                                 | รวมมูลค่าทรัพย์สิน คิดเป็นเงิน              | 95.1 KUSD.                                               | กระทบ     | กระทบ                 |                           |                                          |
|                |                                                    |                                         | จากเกณฑ์ความเสี่ยงอยู่ในช่วง 4 ปี ถึง 20 ปี (W3)                                |                                             | จากเกณฑ์ความเสี่ยงอยู่ในช่วง 10 KUSD ถึง 100 KUSD (L2)   |           | (C0)                  | (E0)                      |                                          |

หมายเหตุ \* KUSD. หมายถึง 1,000 เหรียญสหรัฐ

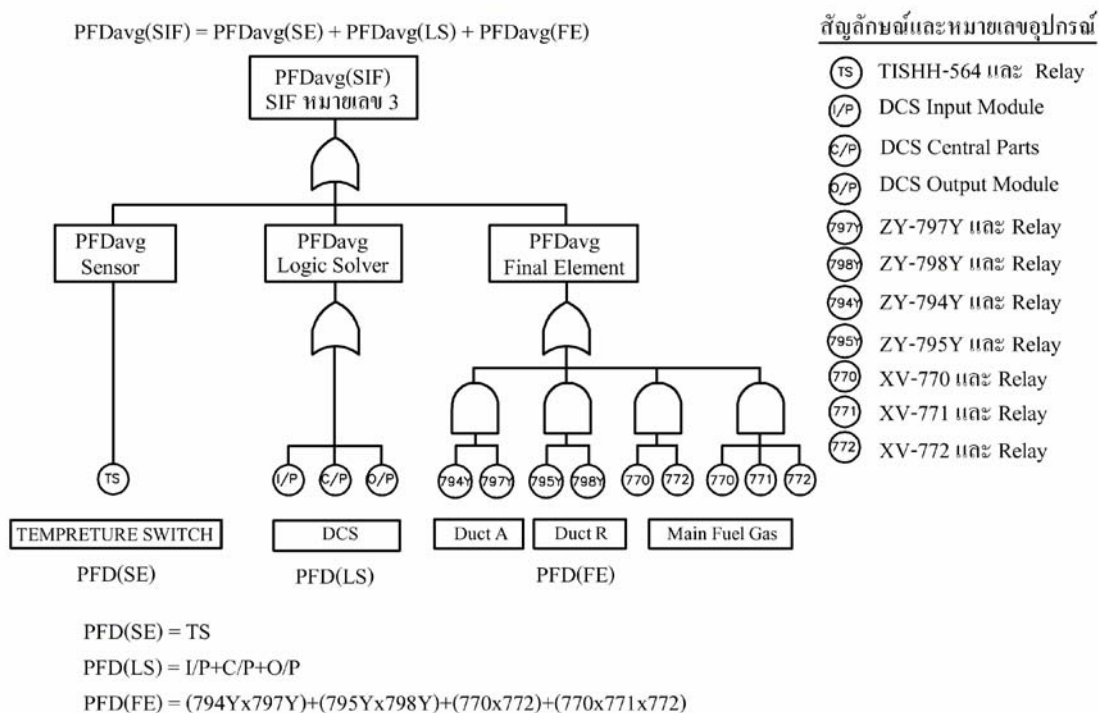
การประเมินผลกระทบต่อทรัพย์สิน (L) พบว่าเมื่ออุปกรณ์ภายใต้การควบคุมทำงานอันใดอันหนึ่งหรือทั้งหมดได้ทำงานผิดพลาด จะทำให้ Superheater Fin Tube #2 เสียหายมากถึง 50 % ของทั้งหมด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ต้องเปลี่ยน Superheater Fin Tube #2 ประมาณ 51 ชิ้น ซึ่งมีค่าใช้จ่ายประมาณ 200,000 เหรียญสหรัฐ นอกจากนี้ระบบผลิตไอน้ำจะหยุดทำงาน 30 วัน ทำให้เกิดความสูญเสียโอกาสที่จะผลิตไอน้ำ คิดเป็น 14,000 เหรียญสหรัฐต่อวัน หรือเป็นจำนวนเงินทั้งสิ้น 420,000 เหรียญสหรัฐ รวมความเสียหายทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากทั้งสองกรณีเป็นเงินมูลค่า 620,000 เหรียญสหรัฐ ดังนั้นเมื่อเทียบกับเกณฑ์ความเสี่ยง มูลค่าความเสียหายนี้จะอยู่ในช่วง 100,000 เหรียญสหรัฐ ถึง 1,000,000 เหรียญสหรัฐ จึงได้ตัวแปรผลกระทบต่อทรัพย์สินอยู่ในระดับ L3

สำหรับผลกระทบต่อชีวิตคน (C) พบว่าเมื่ออุปกรณ์ภายใต้การควบคุมทำงานผิดพลาด จะไม่มีผลกระทบต่อชีวิตคน ดังนั้นเมื่อเทียบกับเกณฑ์ความเสี่ยง (ผลกระทบต่อชีวิตคน) จึงได้ตัวแปรอยู่ในระดับ C0 และด้วยเหตุนี้จึงไม่ต้องทำการประเมินระยะเวลาของผู้ที่อยู่ในบริเวณอันตราย (F) และความสามารถหลีกเลี่ยงของคนจากบริเวณอันตราย (P) สำหรับการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (E) เมื่ออุปกรณ์ภายใต้การควบคุมทำงานผิดพลาด พบว่าไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงได้ตัวแปรความสูญเสียต่อสิ่งแวดล้อมอยู่ในระดับ E0

จากการประเมินความเสี่ยงที่ได้กล่าวข้างต้นพบว่าเมื่ออุปกรณ์ภายใต้การควบคุมทำงานของ SIF หมายเลข 3 ผิดพลาดที่ระดับ W4 จะก่อให้เกิดเสียหายในด้านต่างๆ เป็นระดับ L3, C0 และ E0 นำค่าตัวแปรเหล่านี้ไปเปรียบเทียบกับในกราฟความเสี่ยง 3 ชนิด (กราฟความเสี่ยงสูญเสียต่อทรัพย์สิน กราฟความเสี่ยงต่อผลกระทบต่อชีวิตคน และกราฟความเสี่ยงเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม) เพื่อหาค่าระดับความปลอดภัยของอุปกรณ์ภายใต้ควบคุม ซึ่งจากภาพที่ 14, 15, 16 จะได้ว่าค่าระดับความปลอดภัยมีค่าเป็น SIL 3 และ SIL a (มีความเสี่ยงน้อยมาก) ตามลำดับ (ได้สรุปผลดังกล่าวไว้ในตารางที่ 7 และ 8) แต่การเปรียบเทียบระหว่างค่า W4 และ C0 ในภาพที่ 16 จะได้ว่าไม่สามารถกำหนดค่าระดับความปลอดภัย เนื่องจากไม่มีความเสี่ยง ค่าระดับความปลอดภัยที่สูงที่สุดในทั้งสามค่านี้จะถือเป็นค่าระดับความปลอดภัยของอุปกรณ์ภายใต้ของ SIF หมายเลข 3 นั่นเอง เนื่องจากเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเสี่ยงของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุมที่จะทำงานผิดพลาดมากที่สุด รวมถึงความเสียหายที่สูงที่สุด

### 3. การหาค่าระดับความปลอดภัยของระบบวัดคุมনিรภัย (SIL<sub>SIF</sub>)

ในที่นี้ได้แสดงเฉพาะแผนภาพต้นไม้ (FTA) ของ SIF หมายเลข 3 เท่านั้น (ดูภาพที่ 21) โดยแผนภาพต้นไม้ (FTA) ของ SIF อื่นๆ ได้แสดงในภาคผนวก ก ในภาพที่ 21 แสดงถึงสมการที่ใช้คำนวณหาความผิดพลาดอันตราย (PFD) ของแต่ละระบบย่อย (คืออุปกรณ์การวัด ส่วนประมวลผล และอุปกรณ์สุดท้าย) โดยใช้หลักการของแผนภาพต้นไม้ที่ได้อธิบายในส่วนของทฤษฎีไว้แล้ว จากนั้น หาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายในเวลาที่ต้องการ (PFDavg) ของแต่ละระบบย่อย โดยใช้สมการที่ 10 ผลรวมของค่าดังกล่าวของทั้ง 3 ระบบย่อยเรียกว่า PFDavg ของฟังก์ชันวัดคุมนิรภัยดังกล่าวดังแสดงในสมการที่ 16 ได้แสดงรายละเอียดการคำนวณหาค่าระดับความปลอดภัยของฟังก์ชันวัดคุมนิรภัย (SIL<sub>SIF</sub>) ของ SIF หมายเลข 3 ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 21 แสดงแผนภาพต้นไม้ของ SIF หมายเลข 3

การคำนวณแต่ละระบบย่อยของฟังก์ชันวัดคุณนริภัย SIF หมายเลข 3 ดังนี้

1. ระบบย่อยที่เป็นอุปกรณ์การวัด (SE)

เนื่องจากในส่วนของอุปกรณ์การวัดในภาพที่ 21 มีอุปกรณ์เพียง 1 ตัว ซึ่งเป็น Temperature Switch มีหมายเลขอุปกรณ์ เป็น TISHH-564 และ Relay มีรูปแบบการทำงานเป็นแบบ 1oo1 จากการวิเคราะห์อุปกรณ์การวัด (SE) ด้วย FTA ในภาพดังกล่าวได้สมการดังนี้

$$PFD_{(SE)} = TS \quad (17)$$

เมื่อ  $TS$  คือค่า PFD ของอุปกรณ์ (TS) โดย  $TS$  มีค่าเท่ากับ  $\lambda^D t$

ดังนั้นได้ว่า

$$PFD_{(SE)} = \lambda^D t \quad (18)$$

และค่า  $PFD_{avg}$  ของ อุปกรณ์การวัด (SE) มีค่าเป็น

$$PFD_{avg_{(SE)}} = \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T \lambda^D t dt \quad (19)$$

$$PFD_{avg_{(SE)}} = \frac{1}{2} \lambda^D T \quad (20)$$

เนื่องจากผู้วิจัยไม่สามารถหาค่า อัตราความผิดพลาดอันตราย ( $\lambda^D$ ) ของแต่ละอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบผลิตไอน้ำได้จริง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลที่นำมาจากฐานข้อมูลในโปรแกรม SIFpro ของบริษัทเชลล์ (Shell, 2003) ซึ่งแสดงในหน่วยของจำนวนครั้งที่อุปกรณ์ทำงานผิดพลาดในหนึ่งปี ดังแสดงในตารางผนวก ที่ ง1 เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือในผลงานวิจัยนี้มากที่สุด ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ค่า  $\lambda^D$  สูงสุดจากตารางดังกล่าว และต้องเปลี่ยนหน่วยเป็น จำนวนครั้งที่อุปกรณ์ทำงานผิดพลาดต่อหนึ่งชั่วโมงด้วย

เปิดตารางผนวกที่ ง2 เพื่อหาค่า  $\lambda^D$  โดยจะได้ว่า

ค่า  $\lambda^D$  ของอุปกรณ์ (TS) มีค่าเท่ากับ  $1.05 \times 10^{-5}$  ครั้ง/ชั่วโมง โดยสำหรับโรงงานนี้ได้กำหนดช่วงระยะเวลาการทดสอบ ( $T$ ) ของฟังก์ชันวัดความน่าเชื่อถือ (ซึ่งครอบคลุมถึงอุปกรณ์การวัด ส่วนประมวลผล และอุปกรณ์สุดท้าย) เป็น 6 เดือน หรือ 4,380 ชั่วโมง แทนค่าลงในสมการที่ 20 จะได้ว่า

$$PFD_{avg(SE)} = \frac{1}{2} \times (1.05 \times 10^{-5}) \times (4,380)$$

$$PFD_{avg(SE)} = 2.3 \times 10^{-2} \text{ ครั้ง ต่อ 6 เดือน}$$

## 2. ระบบย่อยที่เป็นส่วนประมวลผล (LS)

ในส่วนของอุปกรณ์ประมวลผลในภาพที่ 21 ประกอบด้วย 3 อุปกรณ์ คือ DCS Input Module DCS Central Part และ DCS Output Module โดยมีค่า PFD เป็น  $I/P$ ,  $C/P$  และ  $O/P$  ตามลำดับ แต่ละอุปกรณ์มีการทำงานแบบ 1oo1 จากการวิเคราะห์ส่วนประมวลผล (LS) ด้วย FTA ในภาพดังกล่าวได้สมการดังนี้

$$PFD_{(LS)} = (I/P) + (C/P) + (O/P) \quad (21)$$

เมื่อ  $I/P$  คือค่า PFD ของอุปกรณ์ (I/P),  $C/P$  คือ ค่า PFD ของอุปกรณ์ (C/P),  $O/P$  คือ ค่า PFD ของอุปกรณ์ (O/P) โดยที่ค่า  $I/P$  มีค่าเท่ากับ  $(\lambda_{I/P}^D)t$ ,  $C/P$  มีค่าเท่ากับ  $(\lambda_{C/P}^D)t$  และ  $O/P$  มีค่า เท่ากับ  $(\lambda_{O/P}^D)t$

ดังนั้นได้ว่า

$$PFD_{(LS)} = (\lambda_{I/P}^D + \lambda_{C/P}^D + \lambda_{O/P}^D)t \quad (22)$$

และค่า  $PFD_{avg}$  ของ ส่วนประมวลผล มีค่าเป็น

$$PFD_{avg(LS)} = \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T (\lambda_{I/P}^D + \lambda_{C/P}^D + \lambda_{O/P}^D) t dt \quad (23)$$

$$PFD_{avg(LS)} = \frac{1}{2} (\lambda_{I/P}^D + \lambda_{C/P}^D + \lambda_{O/P}^D) T \quad (24)$$

เปิดตารางผนวกที่ 2 เพื่อหาค่า  $\lambda^D$  โดยจะได้ว่า

ค่า  $\lambda^D$  ของอุปกรณ์ (I/P), (C/P) และ (O/P) มีค่าเท่ากับ  $2.51 \times 10^{-6}$ , ครั้ง/ชั่วโมง,  $2.63 \times 10^{-8}$  ครั้ง/ชั่วโมง และ  $1.71 \times 10^{-7}$  ครั้ง/ชั่วโมง ตามลำดับ  
แทนค่าลงในสมการที่ 24 จะได้ว่า

$$PFD_{avg(LS)} = (1/2)[(2.51 \times 10^{-6}) + (2.63 \times 10^{-8}) + (1.71 \times 10^{-7})] \times 4,380$$

$$PFD_{avg(LS)} = 5.93 \times 10^{-3} \text{ ครั้ง ต่อ 6 เดือน}$$

### 3. ระบบย่อยที่เป็นอุปกรณ์สุดท้าย (FE)

ในส่วนของอุปกรณ์สุดท้ายในภาพที่ 21 จะติดตั้งบริเวณ Duct A Duct R และ Main Fuel Gas ซึ่งจำนวนอุปกรณ์รวมทั้งหมคมมี 7 อุปกรณ์ คือ ZY-794Y, ZY-795Y, ZY-797Y, ZY-798Y, XV-770, XV-771, XV-772 และอุปกรณ์แต่ละตัวต่ออนุกรมกับ Relay จากการวิเคราะห์อุปกรณ์สุดท้าย (FE) ด้วย FTA ในภาพดังกล่าวได้สมการดังนี้

$$PFD_{(FE)} = (794Y \times 797Y) + (795Y \times 798Y) + (770 \times 772) + (770 \times 771 \times 772) \quad (25)$$

เมื่อ 794Y คือค่า PFD ของอุปกรณ์ (794Y), 795Y คือ ค่า PFD ของอุปกรณ์ (795Y), 797Y คือ ค่า PFD ของอุปกรณ์ (797Y), 798Y คือ ค่า PFD ของอุปกรณ์ (798Y), 770 คือ ค่า PFD ของอุปกรณ์ (770), 771 คือ ค่า PFD ของอุปกรณ์ (771), 772 คือ ค่า PFD ของอุปกรณ์ (772) โดยที่ค่า 794, 795Y, 797Y และ 798Y มีค่าเท่ากัน (เท่ากับ  $\lambda_{ZX}^D t$ ) ในขณะที่ค่า 771, 771 และ 772 มีค่าเท่ากัน (เท่ากับ  $\lambda_{XV}^D t$ )

ดังนั้นได้ว่า

$$PFD_{(FE)} = (\lambda_{ZX}^D)^2 t^2 + (\lambda_{ZX}^D)^2 t^2 + (\lambda_{XV}^D)^2 t^2 + (\lambda_{XV}^D)^3 t^3 \quad (26)$$

$$PFD_{(FE)} = 2(\lambda_{ZX}^D)^2 t^2 + (\lambda_{XV}^D)^2 t^2 + (\lambda_{XV}^D)^3 t^3 \quad (27)$$

และค่า  $PFD_{avg}$  ของ อุปกรณ์สุดท้าย มีค่าเป็น

$$PFDavg_{(FE)} = \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T 2(\lambda_{ZX}^D)^2 t^2 dt + \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T (\lambda_{XV}^D)^2 t^2 dt + \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T (\lambda_{XV}^D)^3 t^3 dt \quad (28)$$

$$PFDavg_{(FE)} = \frac{2}{3}(\lambda_{ZX}^D)^2 T^2 + \frac{1}{3}(\lambda_{XV}^D)^2 T^2 + \frac{1}{4}(\lambda_{XV}^D)^3 T^3 \quad (29)$$

เปิดตารางผนวกที่ 2 เพื่อหาค่า  $\lambda^D$  โดยจะได้ว่า

ค่า  $\lambda^D$  ของอุปกรณ์ (794Y), (795Y), (797Y) และ (798Y) มีค่าเท่ากับ  $8.89 \times 10^{-6}$  ครั้ง/ชั่วโมง,  $\lambda^D$  ของอุปกรณ์ (770), (771) และ (772) มีค่าเท่ากับ  $6.32 \times 10^{-6}$  ครั้ง/ชั่วโมง

แทนค่าลงในสมการที่ 29 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} PFDavg_{(FE)} &= (2/3)(8.89 \times 10^{-6})^2 (4,380)^2 + (1/3)(6.32 \times 10^{-6})^2 (4,380)^2 + \\ &\quad (1/4)(6.32 \times 10^{-6})^3 (4,380)^3 \\ &= (1.011 \times 10^{-3}) + (2.554 \times 10^{-4}) + (5.303 \times 10^{-6}) \\ PFDavg_{(FE)} &= 1.272 \times 10^{-3} \text{ ครั้ง ต่อ 6 เดือน} \end{aligned}$$

นำค่า  $PFDavg$  ของแต่ละระบบย่อยมาแทนค่าลงในสมการที่ 16 ได้ดังนี้

$$PFDavg_{(SIF)} = PFDavg_{(SE)} + PFDavg_{(LS)} + PFDavg_{(FE)} \quad (16)$$

$$PFDavg_{(SIF \text{ no.3})} = (2.3 \times 10^{-2}) + (5.93 \times 10^{-3}) + (1.272 \times 10^{-3})$$

$$PFDavg_{(SIF \text{ no.3})} = 3.02 \times 10^{-2} \text{ ครั้ง ต่อ 6 เดือน}$$

เนื่องจากค่าอัตราการเกิดเหตุการณ์ (W) ของ SIF หมายเลข 3 ที่ได้ประเมินในส่วนของ  $SIL_{EUC}$  ไปแล้วนั้นมีค่าเป็น 0.3 ครั้งต่อปี ดังนั้นในตารางที่ 5 ต้องใช้อัตราการเกิดเหตุการณ์ต่ำในการเลือกค่าระดับความปลอดภัย ซึ่งในที่นี้ค่า  $PFDavg$  ของ SIF หมายเลข 3 เท่ากับ  $3.02 \times 10^{-2}$  ครั้งต่อ 6 เดือน จึงได้  $SIL_{SIF}$  มีค่าเป็น SIL 1

ดังนั้นสำหรับ SIF อื่นๆ จะหาได้ในทำนองเดียวกันและได้สรุปในตารางภาคผนวก จ

#### 4. เปรียบเทียบค่าระดับความปลอดภัย

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าระดับความปลอดภัยที่ได้จากการประเมินความผิดปกติของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม ( $SIL_{EUC}$ ) กับการคำนวณหาค่าระดับความปลอดภัยของฟังก์ชันวัดคูลมุนิรภัย ( $SIL_{SIF}$ ) ดังแสดงในตารางที่ 8 จะเห็นว่า SIF หมายเลข 4, 5, 6 และ 7 มีค่าระดับความปลอดภัย  $SIL_{SIF}$  มากกว่าหรือเท่ากับ  $SIL_{EUC}$  แสดงว่า ระบบวัดคูลมุนิรภัยนี้มีความเหมาะสม สามารถใช้ป้องกันอันตรายที่เกิดจากการทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุมได้ จึงไม่ต้องทำการปรับปรุงและจะเห็นว่า SIF หมายเลข 1, 2, 3 มีค่าระดับความปลอดภัย  $SIL_{SIF}$  น้อยกว่า  $SIL_{EUC}$  แสดงว่า ระบบวัดคูลมุนิรภัยที่ติดตั้งอยู่นี้ไม่เหมาะสม หรือไม่สามารยใช้ป้องกันอันตรายที่เกิดจากการทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์ภายใต้การควบคุมได้ จึงต้องทำการออกแบบปรับปรุงระบบวัดคูลมุนิรภัย เพื่อให้ค่าระดับความปลอดภัย  $SIL_{SIF}$  มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า  $SIL_{EUC}$  ซึ่งจะสามารถใช้ป้องกันอันตรายจากเหตุการณ์เมื่ออุปกรณ์ภายใต้การควบคุมทำงานผิดพลาด



ตารางที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบ SIL ระหว่าง SIL<sub>EUC</sub> และ SIL<sub>SIF</sub> ของแต่ละ SIF

| SIF | หมายเลขอุปกรณ์การวัดนิรภัย<br>(Sensing Element )            | ค่า SIL                   |              |                    | ค่า SIL |                    | เปรียบเทียบ                             | ค่า SIL หลังปรับปรุง |                    |
|-----|-------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------|--------------------|---------|--------------------|-----------------------------------------|----------------------|--------------------|
|     |                                                             | จากอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม | ตัวแปรที่ได้ | SIL <sub>EUC</sub> | PFDavg  | SIL <sub>SIF</sub> |                                         | PFDavg               | SIL <sub>SIF</sub> |
| 1   | LTHH-252A/B/C                                               | ทรัพย์สิน                 | L3 , W3      | 2                  | 0.01422 | 1                  | SIL <sub>SIS</sub> < SIL <sub>EUC</sub> | 0.0067               | 2                  |
|     |                                                             | ชีวิตคน                   | C0 ,W3       | -                  |         |                    |                                         |                      |                    |
|     |                                                             | สิ่งแวดล้อม               | E0 ,W3       | -                  |         |                    |                                         |                      |                    |
| 2   | LTLL-252A/B/C                                               | ทรัพย์สิน                 | L3 , W3      | 2                  | 0.01422 | 1                  | SIL <sub>SIS</sub> < SIL <sub>EUC</sub> | 0.0067               | 2                  |
|     |                                                             | ชีวิตคน                   | C0 ,W3       | -                  |         |                    |                                         |                      |                    |
|     |                                                             | สิ่งแวดล้อม               | E0 ,W3       | -                  |         |                    |                                         |                      |                    |
| 3   | TISHH-564<br>(หลังการปรับปรุงเปลี่ยนเป็น<br>TISHH-564A/B/C) | ทรัพย์สิน                 | L3 , W4      | 3                  | 0.0302  | 1                  | SIL <sub>SIS</sub> < SIL <sub>EUC</sub> | 0.00086              | 3                  |
|     |                                                             | ชีวิตคน                   | C0 ,W4       | a                  |         |                    |                                         |                      |                    |
|     |                                                             | สิ่งแวดล้อม               | E0 ,W4       | -                  |         |                    |                                         |                      |                    |
| 4   | LSHH-255                                                    | ทรัพย์สิน                 | L2 , W3      | 1                  | 0.02244 | 1                  | SIL <sub>SIS</sub> ≥ SIL <sub>EUC</sub> | -                    | -                  |
|     |                                                             | ชีวิตคน                   | C0 ,W3       | -                  |         |                    |                                         |                      |                    |
|     |                                                             | สิ่งแวดล้อม               | E0 ,W3       | -                  |         |                    |                                         |                      |                    |
| 5   | BS-781/782/783                                              | ทรัพย์สิน                 | L3 , W3      | 2                  | 0.00708 | 2                  | SIL <sub>SIS</sub> ≥ SIL <sub>EUC</sub> | -                    | -                  |
|     |                                                             | ชีวิตคน                   | C0 ,W3       | -                  |         |                    |                                         |                      |                    |
|     |                                                             | สิ่งแวดล้อม               | E0 ,W3       | -                  |         |                    |                                         |                      |                    |

ตารางที่ 8 (ต่อ)

| SIF     | หมายเลขอุปกรณ์การวัดนิรภัย | ค่า SIL                   |              |                    | ค่า SIL                |                    |                            | ค่า SIL หลังปรับปรุง   |                    |
|---------|----------------------------|---------------------------|--------------|--------------------|------------------------|--------------------|----------------------------|------------------------|--------------------|
|         |                            | จากอุปกรณ์ภายใต้การควบคุม |              |                    | ของฟังก์ชันวัดคูนิรภัย |                    |                            | ของฟังก์ชันวัดคูนิรภัย |                    |
| หมายเลข | (Sensing Element )         | ผลกระทบต่อ                | ตัวแปรที่ได้ | SIL <sub>EUC</sub> | PFDavg                 | SIL <sub>SIF</sub> | เปรียบเทียบ                | PFDavg                 | SIL <sub>SIF</sub> |
| 6       | PSLL-373A/B/C              | ทรัพย์สิน                 | L2 , W3      | 1                  | 0.00798                | 2                  | $SIL_{SIS} \geq SIL_{EUC}$ | -                      | -                  |
|         |                            | ชีวิตคน                   | C0 ,W3       | -                  |                        |                    |                            |                        |                    |
|         |                            | สิ่งแวดล้อม               | E0 ,W3       | -                  |                        |                    |                            |                        |                    |
| 7       | PDTLL-374C                 | ทรัพย์สิน                 | L2 , W3      | 1                  | 0.01995                | 1                  | $SIL_{SIS} \geq SIL_{EUC}$ | -                      | -                  |
|         |                            | ชีวิตคน                   | C0 ,W3       | -                  |                        |                    |                            |                        |                    |
|         |                            | สิ่งแวดล้อม               | E0 ,W3       | -                  |                        |                    |                            |                        |                    |

## 5. การออกแบบปรับปรุงระบบวัดคูนินทรีย์

การออกแบบปรับปรุงระบบวัดคูนินทรีย์เพื่อให้ได้ค่าระดับความปลอดภัยที่สูงขึ้นนั้นสามารถทำได้ด้วยการหาค่า SIL ของแต่ละระบบย่อยของระบบวัดคูนินทรีย์ ด้วยวิธีที่ได้อธิบายก่อนหน้านี้ แล้วทำการปรับปรุงเฉพาะระบบย่อยที่มีค่า SIL ต่ำกว่า  $SIL_{EUC}$  โดยมีเป้าหมายให้ทุกระบบย่อยมีค่า SIL เท่ากับ  $SIL_{EUC}$  ในการปรับปรุงนี้สามารถทำได้ด้วยการเพิ่มเวลาที่ระยะเวลาในการทดสอบ (T) ระบบวัดคูนินทรีย์ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ง่ายที่สุดและประหยัดที่สุด หรือทำการเพิ่มอุปกรณ์และเปลี่ยนแปลงรูปแบบการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าว ในแต่ละระบบย่อยที่ต้องการปรับปรุง จากที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4 ของผลและวิจารณ์นี้ว่า SIF หมายเลข 1, 2 และ 3 มีค่า  $SIL_{SIF}$  ต่ำกว่า  $SIL_{EUC}$  ดังนั้นต้องปรับปรุงดังจะได้อีกต่อไป

### 5.1 การปรับปรุงระบบวัดคูนินทรีย์ SIF หมายเลข 1 และ 2

ในระบบวัดคูนินทรีย์ SIF หมายเลข 1 พบว่าค่า SIL ของระบบย่อยที่เป็นอุปกรณ์การวัด ส่วนประมวลผล และอุปกรณ์สุดท้าย มีค่าเป็น SIL2, SIL1 และ SIL2 ตามลำดับ และในระบบวัดคูนินทรีย์ SIF หมายเลข 2 พบว่าค่า SIL ของระบบย่อยที่เป็นอุปกรณ์การวัด ส่วนประมวลผล และอุปกรณ์สุดท้าย มีค่าเป็น SIL2, SIL1 และ SIL2 ตามลำดับ ในการปรับปรุงนี้ สิ่งที่ทำง่ายที่สุดและประหยัดที่สุดคือ เพิ่มเวลาที่ระยะเวลาในการทดสอบ (T) ระบบวัดคูนินทรีย์แทน ซึ่งในที่นี้สำหรับทั้ง 2 SIF ได้เปลี่ยนจากทุกๆ 6 เดือน เป็นทุกๆ 3 เดือน ซึ่งก็คือค่า T ตัวใหม่ และจะทำให้ค่า  $PFDavg$  ของฟังก์ชันวัดคูนินทรีย์ทั้ง 2 มีค่าลดลงเป็น 0.0067 ซึ่งส่งผลให้ค่าระดับความปลอดภัยมีค่าเพิ่มเป็น SIL2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $SIL_{EUC}$  (วิธีคำนวณได้แสดงในตารางผนวกที่ จ2)

### 5.2 การปรับปรุงระบบวัดคูนินทรีย์ SIF หมายเลข 3

ในระบบวัดคูนินทรีย์ SIF หมายเลข 3 พบว่าค่า SIL ของระบบย่อยที่เป็นอุปกรณ์การวัดส่วนประมวลผล และอุปกรณ์สุดท้าย มีค่าเป็น SIL1, SIL2 และ SIL2 ตามลำดับ การปรับปรุงขั้นแรก ได้ทำโดยเพิ่มเวลาที่ระยะเวลาในการทดสอบ (T) จากทุกๆ 6 เดือน เป็นทุกๆ 3 เดือน แต่พบว่าค่า SIL ของระบบย่อยที่เป็นอุปกรณ์การวัด ส่วนประมวลผล และอุปกรณ์สุดท้าย มีค่าเป็น SIL1, SIL2 และ SIL2 ตามลำดับ ซึ่งผลรวมของ  $SIL_{SIF}$  มีค่าต่ำกว่า  $SIL_{EUC}$  เนื่องจากการเพิ่มเวลาที่ระยะเวลาในการทดสอบ (T) ที่ทำน้อยกว่าทุกๆ 3 เดือนนี้ไม่เหมาะสมในความเป็นจริง ดังนั้นผู้วิจัยจึงมิได้ทำการลดจำนวนเดือนต่อไปอีก แต่ปรับปรุงอุปกรณ์ในส่วน of ระบบย่อยทั้งสองแทน

ในส่วนของอุปกรณ์การวัดนิรภัย (Sensor Element, SE) ที่เป็น Temperature Switch ได้ปรับปรุงโดยเพิ่มจำนวนจาก 1 ตัวเป็น 2 ตัว (เลือกใช้อุปกรณ์ชนิดเดียวกัน) และเปลี่ยนรูปแบบการทำงานของอุปกรณ์การวัดนิรภัยจากรูปแบบ 1oo1 เป็น รูปแบบ 2oo2 ในส่วนของอุปกรณ์ประมวลผล (Logic Solver) ที่เป็น DCS โดยการเพิ่มจาก 1 ชุดเป็น 2 ชุดและต่อแบบขนานเพื่อใช้เป็นชุดสำรอง (Redundant) หรือในรูปแบบ 2oo2 และกำหนดให้มีการเพิ่มความถี่ในการทดสอบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิจากทุกๆ 6 เดือน เป็นทุกๆ 3 เดือน ดังแสดง วงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิหลังปรับปรุงของ SIF หมายเลข 3 ครั้งที่ 1 แสดงในภาพผนวกที่ ข4 พบว่าค่า SIL ของระบบย่อยที่เป็นอุปกรณ์การวัดนิรภัย ส่วนประมวลผล และอุปกรณ์สุดท้าย มีค่าเป็น SIL3, SIL4 และ SIL3 ตามลำดับ ดังแสดงวิธีการคำนวณในตารางผนวกที่ จ4 นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงเพิ่มเติม โดยใช้รูปแบบ 2oo3 สำหรับอุปกรณ์การวัดนิรภัย (SE) ที่เป็น Temperature Switch ซึ่งต้องเพิ่มจากจำนวน 2 ตัวเป็น 3 ตัว (เลือกใช้อุปกรณ์ชนิดเดียวกัน) ดังแสดงวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิหลังปรับปรุงของ SIF หมายเลข 3 ครั้งที่ 2 แสดงในภาพผนวกที่ ข4 โดยจากการคำนวณดังแสดงในตารางผนวกที่ จ5 พบว่าค่า SIL ของอุปกรณ์การวัดนิรภัย (SE) มีค่าเป็น SIL 3 ซึ่งจะเห็นว่ามีค่าเท่ากับค่า SIL ของอุปกรณ์การวัดนิรภัย (SE) ที่มีอุปกรณ์เพียง 2 ตัวและมีรูปแบบการทำงานเป็น 2oo2 แต่เนื่องจากอุปกรณ์การวัดรูปแบบ 2oo2 จะมีผลต่อระบบนิรภัยให้การทำงานที่ไม่เป็นจริง (False Trip) ซึ่งมีผลทำให้ความพร้อมใช้งาน (Availability) ต่ำกว่ารูปแบบ 2oo3 ดังนั้นรูปแบบ 2oo3 จะมีค่าความพร้อมใช้งานที่ดีกว่า อีกทั้งบริษัทแห่งนี้ได้กำหนดอุปกรณ์การวัดให้เป็นรูปแบบ 1oo1 หรือ 2oo3 เท่านั้น ดังนั้นจึงได้ว่าสำหรับ SIF หมายเลข 3 นี้ ควรปรับปรุงด้วยการเพิ่มอุปกรณ์การวัดนิรภัย (SE) เป็นรูปแบบ 2oo3 อุปกรณ์ประมวลผล (LS) เป็นรูปแบบ 2oo2 และความถี่ในการทดสอบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเป็นทุกๆ 3 เดือน

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

จากการศึกษาพบว่ามียุทธวิธีที่เป็นฟังก์ชันวัดคุณนํ้าของระบบผลิตไอน้ำทั้งหมดจำนวน 7 SIF โดยพบว่า SIF หมายเลข 1, 2 และ 3 มีค่า  $SIL_{SIF}$  ต่ำกว่า  $SIL_{EUC}$  ซึ่งจำเป็นต้องการปรับปรุงระบบวัดคุณนํ้าเพื่อเพิ่มค่า SIL ของระบบดังกล่าวให้มีค่าเท่ากับ  $SIL_{EUC}$  สำหรับ SIF หมายเลข 1 และ 2 พบว่าการเพิ่มความถี่ในการทดสอบ ( $T$ ) ของฟังก์ชันวัดคุณนํ้าจากทุกๆ 6 เดือนเป็นทุกๆ 3 เดือน ก็เพียงพอ แต่สำหรับ SIF หมายเลข 3 นั้นพบว่าต้องเพิ่มความถี่ในการทดสอบ ( $T$ ) ของระบบวัดคุณนํ้าเป็นทุกๆ 3 เดือน และควรเพิ่มยุทธวิธีการวัดให้เป็น 3 ตัว โดยให้มีรูปแบบการทำงานเป็น 2oo3 และต้องเพิ่มยุทธวิธีให้แก่ส่วนประมวลผลอีกหนึ่งชุด และมีรูปแบบการทำงานเป็น 2oo2 จึงจะได้ค่า  $SIL_{SIF}$  เท่ากับ  $SIL_{EUC}$

### ข้อเสนอแนะ

ในการประเมินความเสี่ยงจากยุทธวิธีภายใต้การควบคุมควรต้องได้ข้อมูลจากพนักงานที่มีประสบการณ์สูง และควรมีพนักงานที่เกี่ยวข้องครบทุกด้าน เช่น ด้านวิศวกรรมกระบวนการผลิต ด้านวิศวกรรมเครื่องมือวัดคุณนํ้า ด้านควบคุมกระบวนการผลิต ด้านซ่อมบำรุงและด้านความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะทำให้ได้ผลการประเมินความเสี่ยงที่มีความน่าเชื่อถือ

ส่วนการหาค่าระดับความปลอดภัยของระบบวัดคุณนํ้า ควรหาอัตราความผิดพลาดอันตรายของยุทธวิธีจากผู้ผลิตที่ได้รับการรับรองจากสถาบันการตรวจสอบที่เชื่อถือได้ หรือจากแหล่งข้อมูลที่เชื่อถือได้เป็นที่ยอมรับ หรือข้อมูลจากการเก็บประวัติของโรงงานนั้นๆ และควรต้องเข้าใจการทำงานของระบบผลิตไอน้ำ เพื่อให้การวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายจากแผนภาพต้นไม้มีความถูกต้อง ในการออกแบบให้ระบบวัดคุณนํ้าสามารถลดความเสี่ยงให้ได้ครอบคลุมนั้นต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมหลายด้านเช่นด้านความถี่ในการทดสอบยุทธวิธีวัดคุณนํ้า ส่วนรูปแบบการทำงานของยุทธวิธีการวัดนอกจากพิจารณาจากความเชื่อมั่นแล้วยังต้องคำนึงถึงความพร้อมใช้งานด้วย ผลจากการออกแบบในการทำวิจัยนี้สามารถนำไปปรับปรุงได้จริงซึ่งจะได้นำเสนอผู้บริหารของโรงงานแห่งนี้ต่อไป

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- พิศมัย สุภัทรานนท์. 2543. การวัดและการทดสอบทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์. ซีเอ็ดดูเคชั่น, กรุงเทพฯ. แปลจาก W. Bolton. 1992. **Electrical and Electronic Measurement and Testing**. Longman Group, London.
- ทวิช ชูเมือง. 2548. ระบบวัดคุณภาพในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิต. ครั้งที่ 1. ซีเอ็ดดูเคชั่น, กรุงเทพฯ.
- Crowl, D.A. and J.F. Louvar. 2002. **Chemical Process Safety : Fundamentals with Applications**. 2 ed. Prentice Hall PTR, New Jersey.
- Goble, W.M. 1998. **Control Systems Safety Evaluation and Reliability**. 2 ed. ISA, United States of America.
- \_\_\_\_\_ and H. Cheddie. 2005. **Safety Instrumented System Verification : Practical Probabilistic Calculations**. 1 ed. ISA, United States of America.
- Health and Safety Executive. 2003. **Out of Control**. 2 ed. HSE Book, London.
- Hnatek, E.R. 2003. **Practical Reliability of Electronic Equipment and Products**. 1 ed. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Hyatt, N. 2003. **Guidelines for Process Hazards Analysis , Identification and Risk Analysis**. 3 ed. Dyadem Press, Ontario.
- International Electrotechnical Commission. 2000. **Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems**. IEC-61508.

International Electrotechnical Commission. 2003. **Functional Safety - Safety Instrumented Systems for The Process Industry Sector.** IEC-61511.

Marszal, E.M. and E.W. Scharpf. 2002. **Safety Integrity Level Selection : Systematic Methods Including Layer of Protection Analysis.** 1 ed. ISA, United States America.

Shell Global Solutions. 2003. **Program SIFpro.**

## ภาคผนวก



#### ภาคผนวก ก

การทำงานของระบบผลิตไอน้ำในโรงงานแห่งนี้

## การทำงานของระบบผลิตไอน้ำในโรงงานแห่งนี้

จากแผนภาพกระบวนการผลิตของระบบผลิตไอน้ำ (Piping and Instrument Diagram, P&ID.) ดังภาพที่ 20 กล่าวถึงการทำงานของระบบผลิตไอน้ำ โดยเริ่มจากการนำความร้อนเหลือใช้จากระบบกังหันก๊าซของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งมีอยู่ 3 ตัว ในสภาวะปกติจะมีการเดินเครื่องกังหันก๊าซของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 ตัวและอีกหนึ่งตัวจะเป็นตัวสำรอง ความร้อนที่เหลือใช้ดังกล่าวจะไหลผ่านท่อส่ง (Duct) ผ่านเขื่อนกันขาเข้า (Inlet Damper) และผ่านห้องตัวเผาไหม้ (Duct Burner) เพื่อไปให้ความร้อนกับท่อต้มน้ำ (Boiler Tube) โดยมีชื่อเรียกเฉพาะดังนี้ Superheater # 2 Superheater # 1 Generator และ Economizer โดยมีระบบควบคุมการเผาไหม้อัตโนมัติ (Automatic Combustion Control System) ประกอบด้วยชุดควบคุมความดันหมายเลข PIC-371 และชุดควบคุมการไหล หมายเลข FIC-071 เพื่อควบคุมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงและให้ความร้อนเพิ่มที่ตัวเผาไหม้หลัก (Main Burner) และมีตัวเผาไหม้นำร่อง (Pilot Burner) เป็นอุปกรณ์ที่ให้มีเปลวไฟจุดติดไว้ตลอดเวลา และมีน้ำจากระบบจ่ายน้ำเข้าหม้อต้ม (Boiler Feed Water System) ไหลผ่าน ชุดควบคุมการไหลหมายเลข FIC-051 และผ่านชุด Economizer เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับน้ำ เป็นการอุ่นน้ำก่อนเข้าถังไอน้ำ (Steam Drum) โดยใช้ความร้อนใน ห้องตัวเผาไหม้ (Duct Burner) ก่อนที่จะปล่อยไอร้อนออกสู่บรรยากาศภายนอกผ่านปล่อง (Stack)

ใน ถังไอน้ำ (Steam Drum) มีส่วนหนึ่งที่เป็นน้ำและอีกส่วนหนึ่งเป็นไอน้ำ ที่ถูกผลิตมาจากชุด Generator เมื่อไอน้ำ ผสมกับน้ำจะถูกเรียกว่าไอน้ำอิ่มตัว (Saturation Steam) จากนั้นไอน้ำอิ่มตัวจะไหลออกสู่ด้านบนของ ถังไอน้ำ (Steam Drum) ไปเข้า Superheater #1 เพื่อให้กลายเป็นไอน้ำยิ่งยวด (Superheat Steam) ในระหว่าง Superheater # 1 และ Superheater # 2 จะมีอุปกรณ์ที่เรียกว่า ตัวลดความเป็นไอน้ำยิ่งยวด (Desuperheater) จะรักษาอุณหภูมิสุดท้ายของไอน้ำ ให้ได้ตามค่าที่กำหนด (Set point) โดยใช้ชุดควบคุมอุณหภูมิหมายเลข TIC-562 และวาล์วควบคุมหมายเลข TV-562 ของ ตัวลดความเป็นไอน้ำยิ่งยวด (Desuperheater) ทำการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำไม่ให้สูงเกินไป กล่าวคือถ้าไอน้ำนั้นมีอุณหภูมิสูงเกินค่าที่กำหนด (Set point) ชุดควบคุมอุณหภูมิ หมายเลข TIC-562 จะสั่งให้ วาล์วควบคุมหมายเลข TV-562 ของตัวลดความเป็นไอน้ำยิ่งยวด (Desuperheater) ฉีดน้ำจากระบบจ่ายน้ำเข้าหม้อต้ม (Boiler Feed Water System) เข้าไปในระหว่าง Superheater #1 และ # 2 ทำให้อุณหภูมิของไอน้ำลดลง ชุดควบคุมอุณหภูมิหมายเลข TIC-563 จะทำการควบคุมร่วมกับชุดควบคุมอุณหภูมิหมายเลข TIC-562 เพื่อให้อุณหภูมิของไอน้ำที่ หัวจ่ายไอน้ำความดันสูง (High Pressure Steam Header) คงที่

ถังถ่ายน้ำต่อเนื่อง (Continuous Blow Down Drum) มีทำหน้าที่ควบคุมความเข้มข้นของสารเคมี เช่น ฟอสเฟต ที่ถูกเติมลงไป ใน ถังไอน้ำ (Steam Drum) และเป็นการเอาสิ่งสกปรก โดยเฉพาะคราบเมือก ที่สะสมอยู่ใน ถังไอน้ำ (Steam Drum) ออก โดย ถังถ่ายน้ำต่อเนื่อง (Continuous Blow Down Drum) รับน้ำและไอน้ำบางส่วนมาจาก ถังไอน้ำ (Steam Drum) น้ำจะมีการปล่อยออกอย่างต่อเนื่องไปเข้าสู่ระบบน้ำหล่อเย็น (Cooling Water System) และอีกส่วนหนึ่งจะเป็นไอน้ำความดันต่ำ (Low Pressure Steam) ถูกส่งไปยัง หัวจ่ายไอน้ำความดันสูง (Low Pressure Steam Header)

การศึกษาหาตำแหน่งอุปกรณ์วัดคุณนिरภัยที่เป็นฟังก์ชันวัดคุณนिरภัย (Safety Instrumented Functions, SIF) ได้จากลักษณะการทำงานแบบป้องกันหรือทำงานแบบ Interlock เมื่อฟังก์ชันวัดคุณนिरภัยไม่ทำงาน จะมีผลกระทบ (Consequence) ตามมา ตัวอย่างเช่น SIF หมายเลข 4 ที่แสดงใน P&ID ของระบบผลิตไอน้ำของภาพที่ 20 ที่อุปกรณ์หลัก ถังถ่ายน้ำต่อเนื่อง (Continuous Blow Down Drum) มีฟังก์ชันวัดคุณนिरภัยที่ประกอบด้วยอุปกรณ์การวัดระดับของเหลวหมายเลข LSHH-255 อุปกรณ์ประมวลผลและอุปกรณ์สุดท้ายหมายเลข LV-255 ไม่ทำงานตามฟังก์ชัน หากระดับของเหลวสูงขึ้นจนสูงสุด (High High) จะทำให้น้ำล้นเข้าที่ท่อ หัวจ่ายไอน้ำความดันสูง (Low Pressure Steam Header) เป็นสาเหตุให้เกิดน้ำกระแทก (Water Hammering) ในท่อมีผลกระทบทำให้ท่อ (Piping) และตัวค้ำยันท่อ (Piping Support) เสียหาย จึงกำหนดให้เป็นหนึ่ง SIF ของอุปกรณ์วัดคุณนिरภัย ในการหาตำแหน่งอุปกรณ์วัดคุณนिरภัยที่เป็น SIF ของการวิจัยนี้ ได้ทั้งหมด 7 SIF ดังแสดงใน P&ID ดังกล่าว

**ภาคผนวก ข**

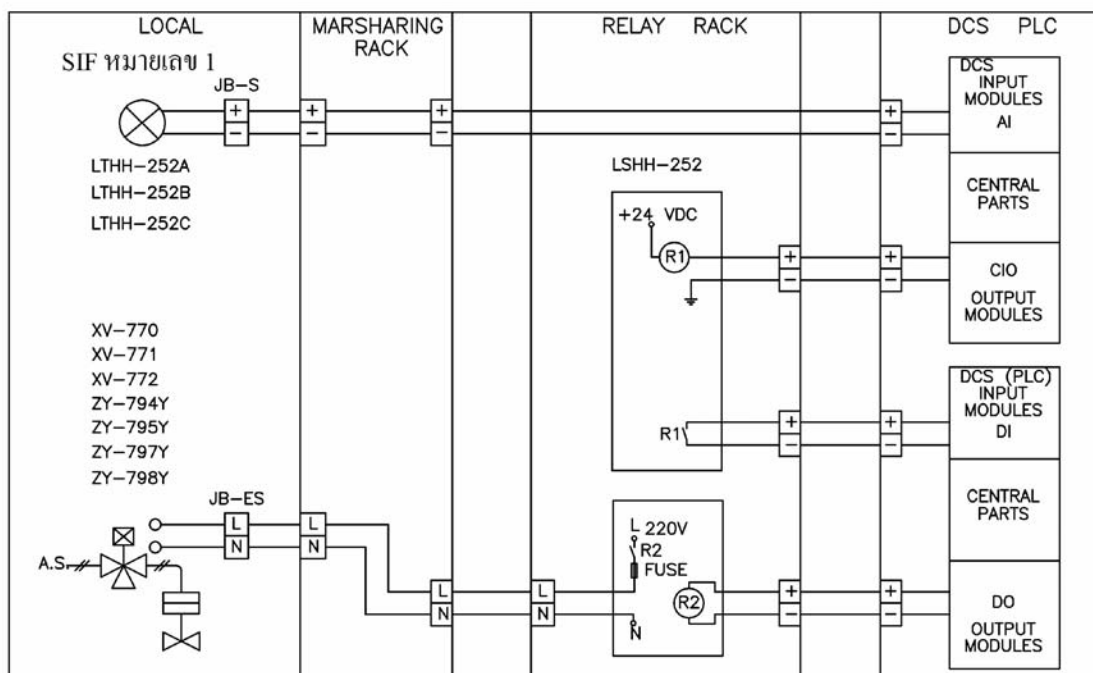
แผนภาพวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์วัดคุณภาพน้ำ

### แผนภาพวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์วัดคุณสมบัติ (Instrument Loop Connection Diagram)

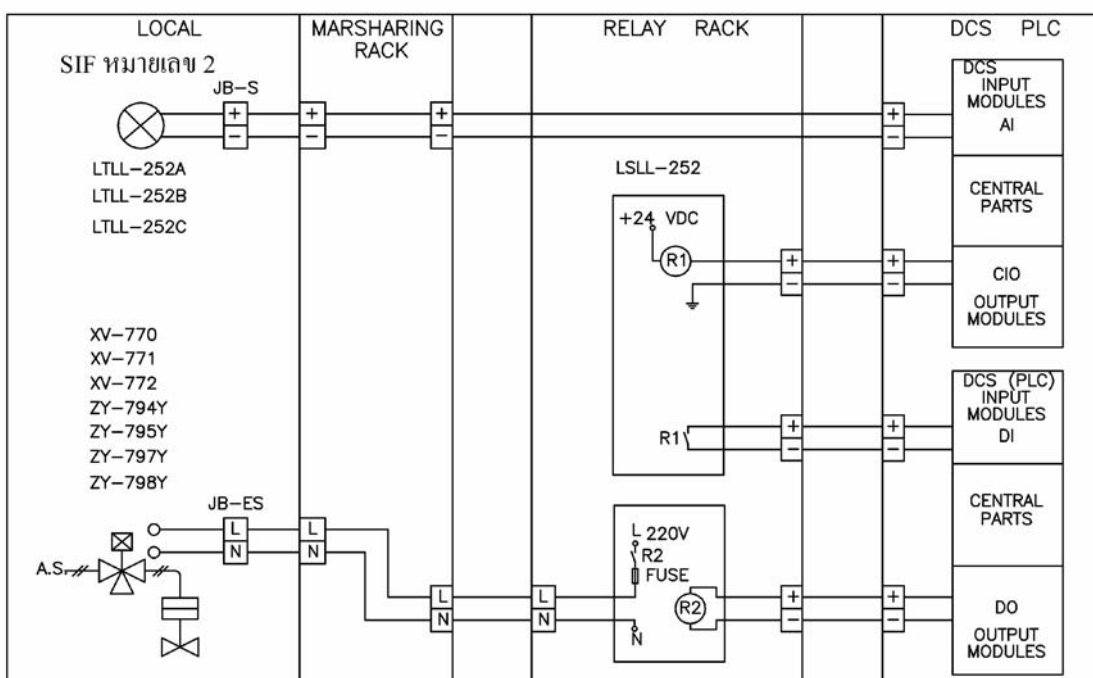
จากแผนภาพวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์วัดคุณสมบัติดังในภาคผนวก ค1 มีทั้งหมด 7 SIF การทำงานของวงจรแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือวงจรที่มีอุปกรณ์การวัดคุณสมบัติเป็นอุปกรณ์วัดต่อเนื่อง (Analogue Transmitter) และเป็นอุปกรณ์วัดแบบหน้าสัมผัส (Contact Switch) ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 1 แผนภาพวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์วัดคุณสมบัติของ SIF หมายเลข 1 ดังในภาพผนวก ข1 ซึ่งจะอธิบายได้ดังนี้ จากอุปกรณ์การวัดคุณสมบัติ หมายเลข LTHH-252A/B/C เป็นอุปกรณ์วัดต่อเนื่อง (Analogue Transmitter) จำนวน 3 ตัว เพื่อวัดระดับของเหลวใน ถังไอน้ำ (Steam Drum) ซึ่งส่งสัญญาณอะนาล็อก (Analogue Signal) (เป็นสัญญาณมาตรฐาน กระแสไฟฟ้า 4 ถึง 20 มิลลิแอมแปร์ 24 โวลต์กระแสตรง) ผ่าน กล่องต่อสาย (Junction Box) และตู้พักสายไฟ (Marsharing Rack) ไปที่ด้านขาเข้า (Input Module) และประมวลผลที่ส่วนกลาง (Central Part) ของ คิวซีเอส (DCS) ชุดที่ 1 สัญญาณจะถูกแยกไปแสดงค่าระดับของเหลว จากนั้นเมื่อระดับของเหลวสูงขึ้น ถึงค่าสัญญาณที่กำหนดไว้ (Set Point) ซึ่งกำหนดค่าที่ คิวซีเอส (DCS) จะแปลงสัญญาณออกมาเป็นสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal) และทำการประมวลผล เป็นแบบ 2oo3 จากด้านขาออก (Output Module) ส่งต่อไปที่ตู้รีเลย์ (Relay Rack) จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปที่ ด้านขาเข้า (Input Module) และทำฟังก์ชันลอจิกประมวลผลที่ ส่วนกลาง (Central Part) ของคิวซีเอส (DCS) ชุดที่ 2 จากด้านขาออก (Output Module) ส่งไปเข้าที่ ตู้รีเลย์ (Relay Rack) เพื่อแปลงสัญญาณดิจิทัล เป็น สัญญาณไฟฟ้าโดยมีแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์กระแสสลับ (VAC.) ความถี่ 50 ครั้งต่อวินาที (Hz.) จะ ได้ไปจ่ายให้กับวาล์วย่อย (Solenoid Valve) เพื่อใช้เปิดให้ความดันอากาศผ่านไปทำการปิดเปิด วาล์วหลัก (Main Valve) ที่เป็นอุปกรณ์สุดท้าย

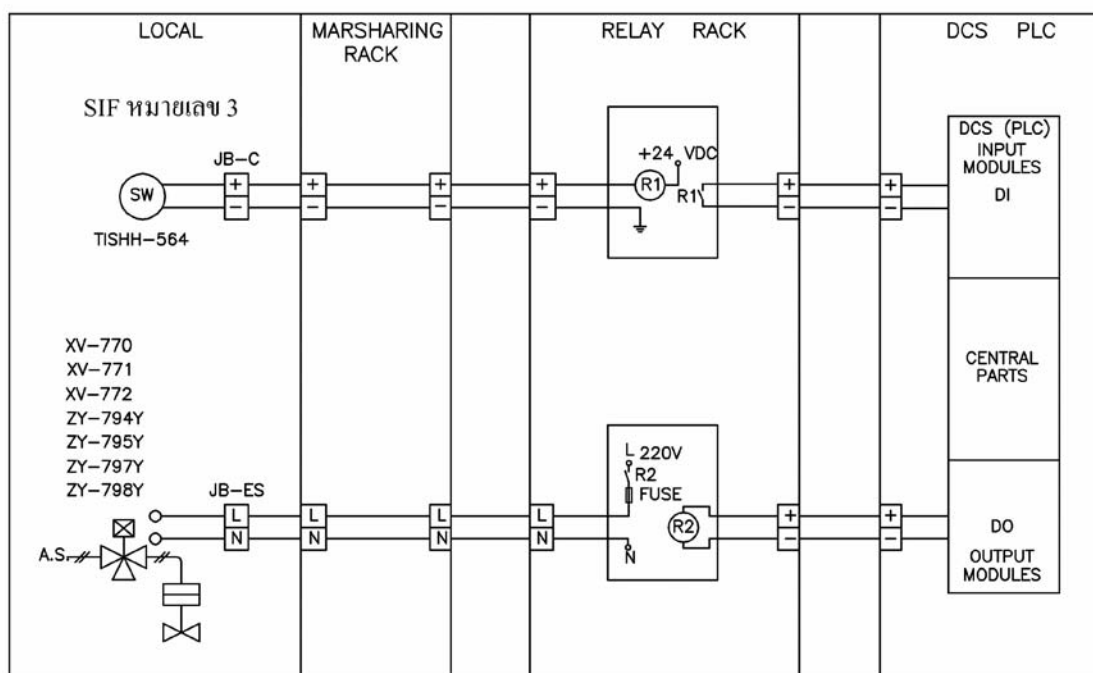
ตัวอย่างที่ 2 แผนภาพวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์วัดคุณสมบัติของ SIF หมายเลข 3 ดังในภาพผนวก ข3 ซึ่งจะอธิบายได้ดังนี้ จากอุปกรณ์การวัดคุณสมบัติ หมายเลข TISHH-564 เป็นอุปกรณ์วัดแบบหน้าสัมผัส (Contact Switch) เพื่อวัดอุณหภูมิใน High Pressure Steam Header เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงค่าที่กำหนด (Set Point) จะส่งสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal) ผ่านกล่องต่อสาย (Junction Box) และ ตู้พักสายไฟ (Marsharing Rack) ไปเข้าตู้รีเลย์ (Relay Rack) จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปที่ ด้านขาเข้า (Input Module) และทำฟังก์ชันลอจิกประมวลผลเป็นแบบ 1oo1 ที่ ส่วนกลาง (Central Part) ของคิวซีเอส (DCS) จากด้านขาออก (Output Module) ส่งไปเข้าที่ ตู้รีเลย์ (Relay Rack) เพื่อแปลงสัญญาณดิจิทัล เป็นสัญญาณไฟฟ้าโดยมีแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์กระแสสลับ (VAC.) ความถี่ 50 ครั้งต่อวินาที (Hz.) จะได้ไปจ่ายให้กับวาล์วย่อย (Solenoid Valve) เพื่อใช้เปิดให้ความดันอากาศผ่านไปทำการปิดเปิดวาล์วหลัก (Main Valve) ที่เป็นอุปกรณ์สุดท้าย



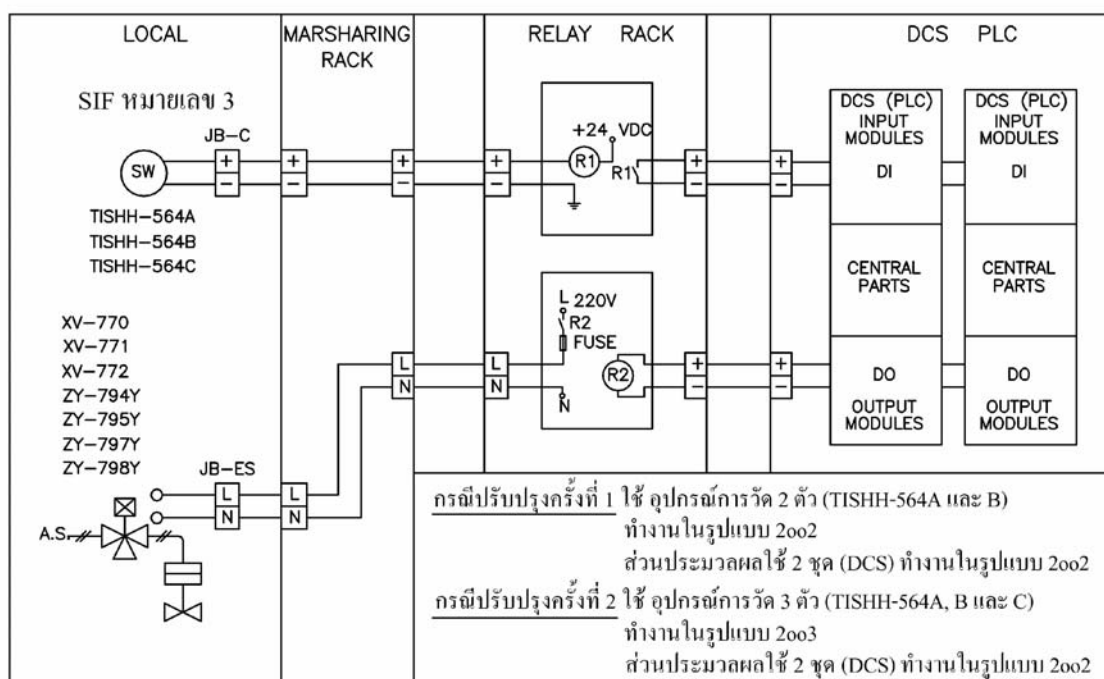
ภาพผนวกที่ ข1 แสดงวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์นิรภัย SIF หมายเลข 1



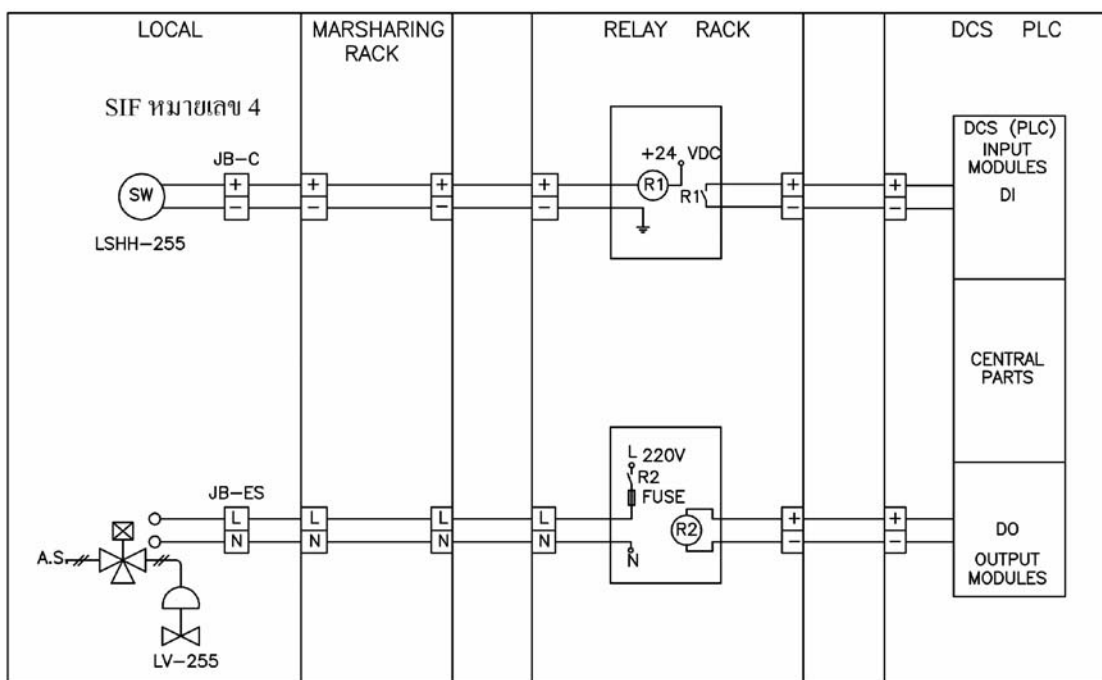
ภาพผนวกที่ ข2 แสดงวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์นิรภัย SIF หมายเลข 2



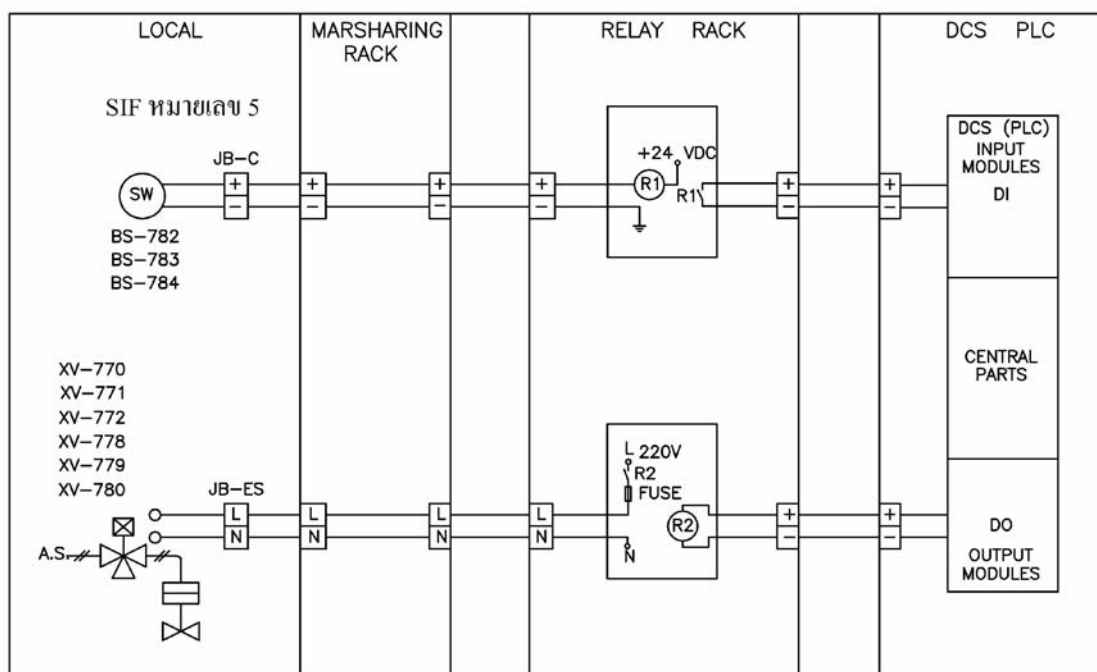
ภาพผนวกที่ ข3 แสดงวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์นิรภัย SIF หมายเลข 3



ภาพผนวกที่ ข4 แสดงวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์นิรภัย SIF หมายเลข 3 หลังปรับปรุง

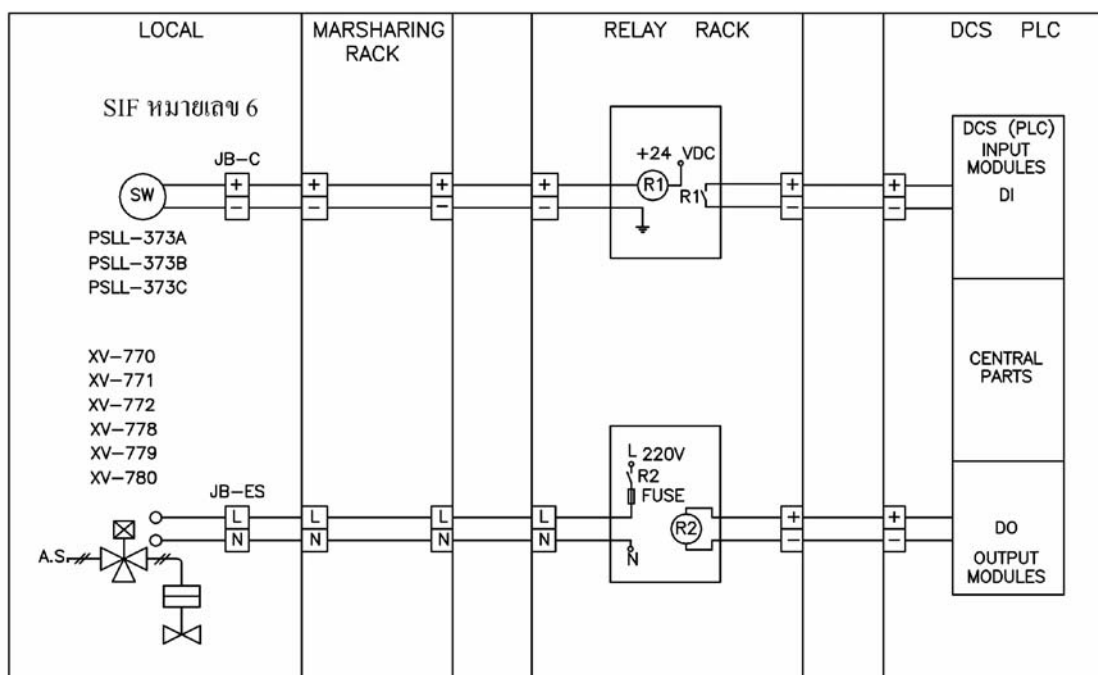


ภาพผนวกที่ ข5 แสดงวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์นํ้ารั่ว SIF หมายเลข 4

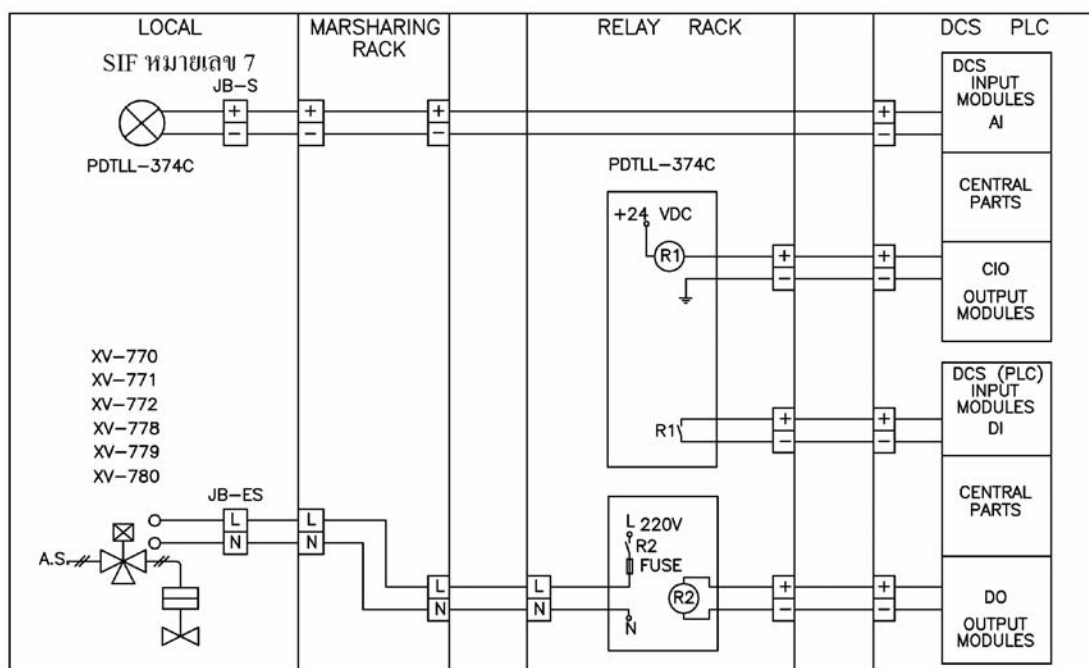


ภาพผนวกที่ ข6 แสดงวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์นํ้ารั่ว SIF หมายเลข 5





ภาพผนวกที่ ข7 แสดงวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์นํ้ารัย SIF หมายเลข 6



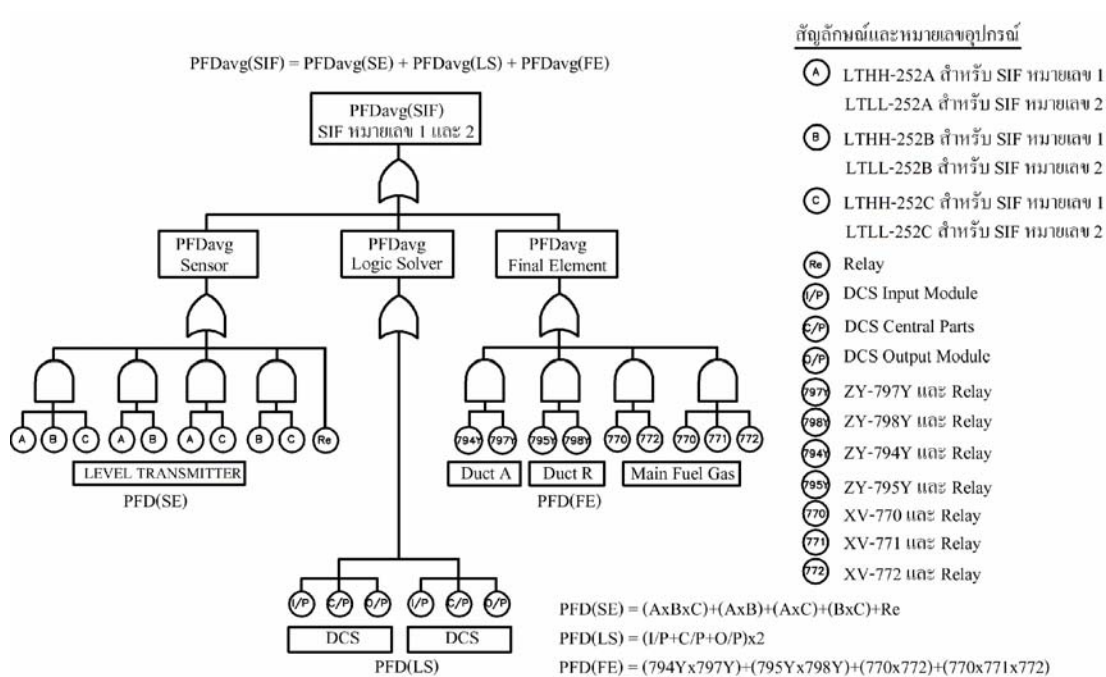
ภาพผนวกที่ ข8 แสดงวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์นํ้ารัย SIF หมายเลข 7

#### ภาคผนวก ค

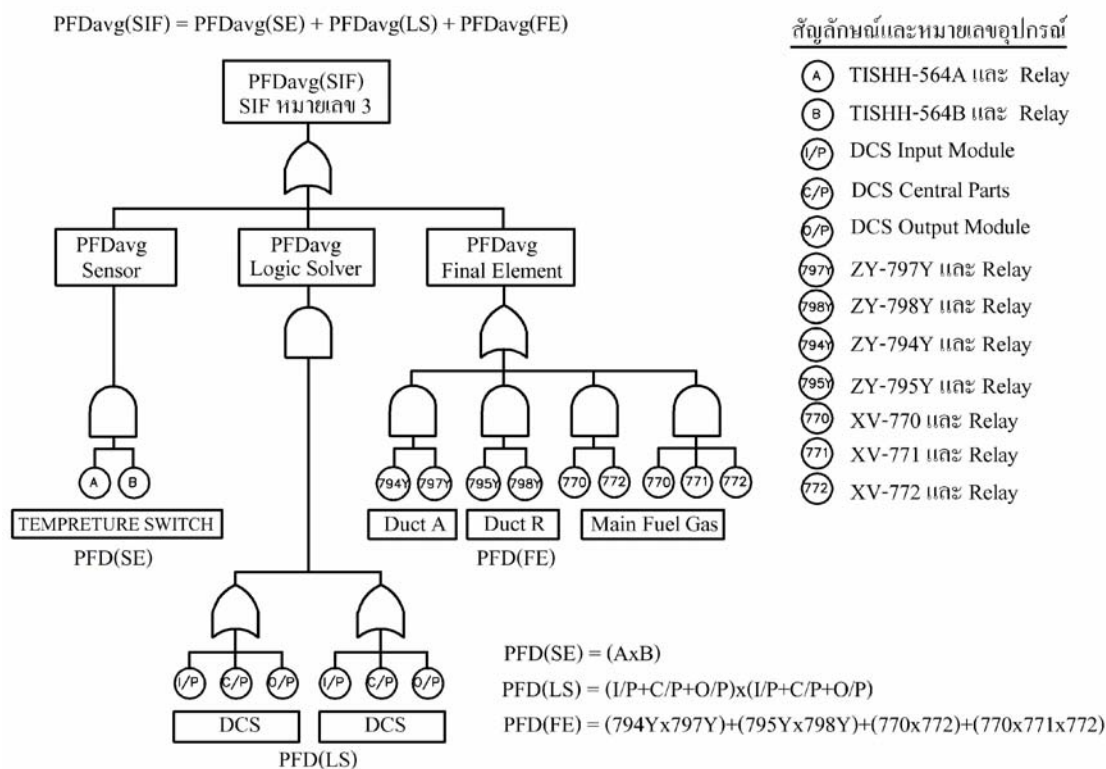
การหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายจากแผนภาพต้นไม้

## การหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายจากแผนภาพต้นไม้

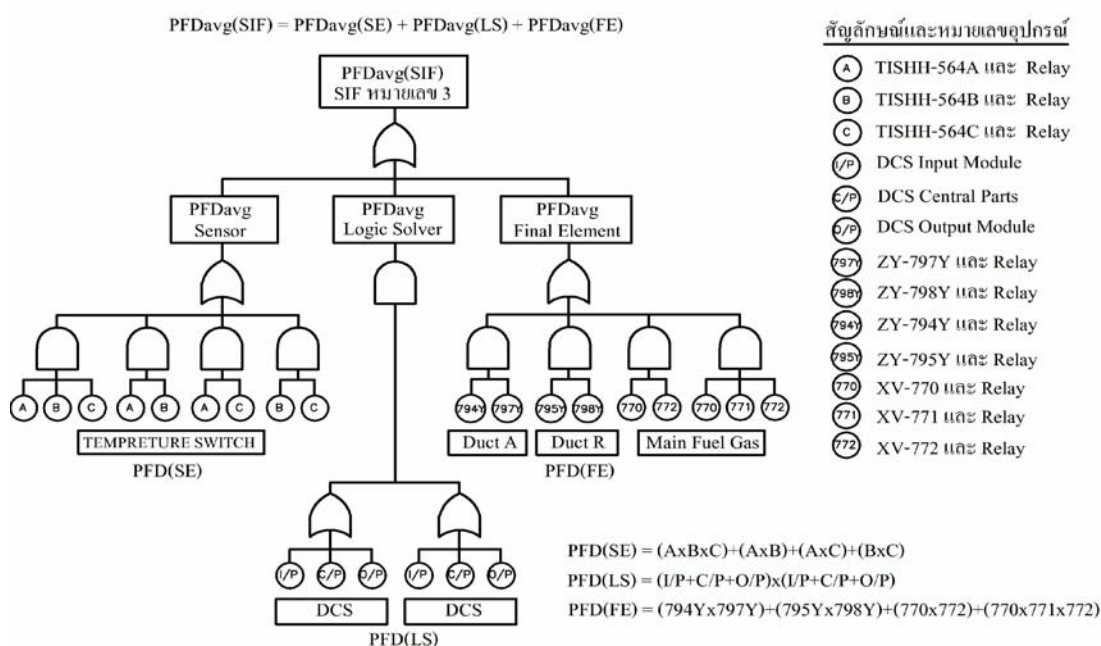
แสดงการหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตราย (PFDavg) ได้จากแผนภาพต้นไม้ ดังแสดงในภาพต่อไปนี้



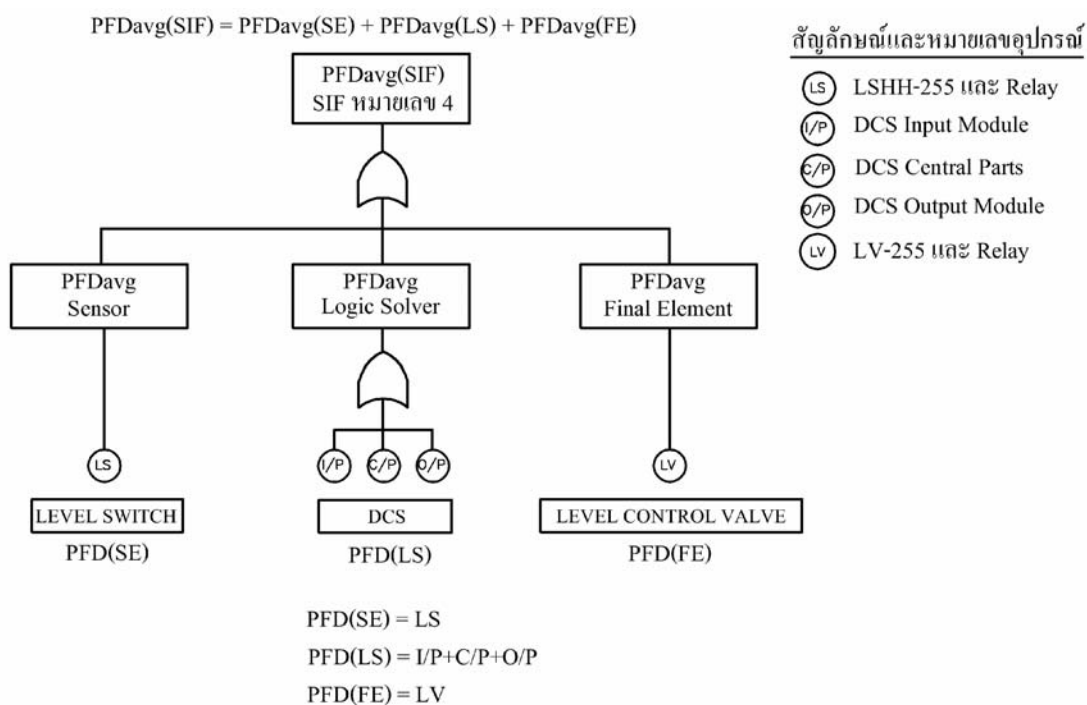
ภาพผนวกที่ ค1 แสดงแผนภาพต้นไม้ของ SIF หมายเลข 1 และ 2



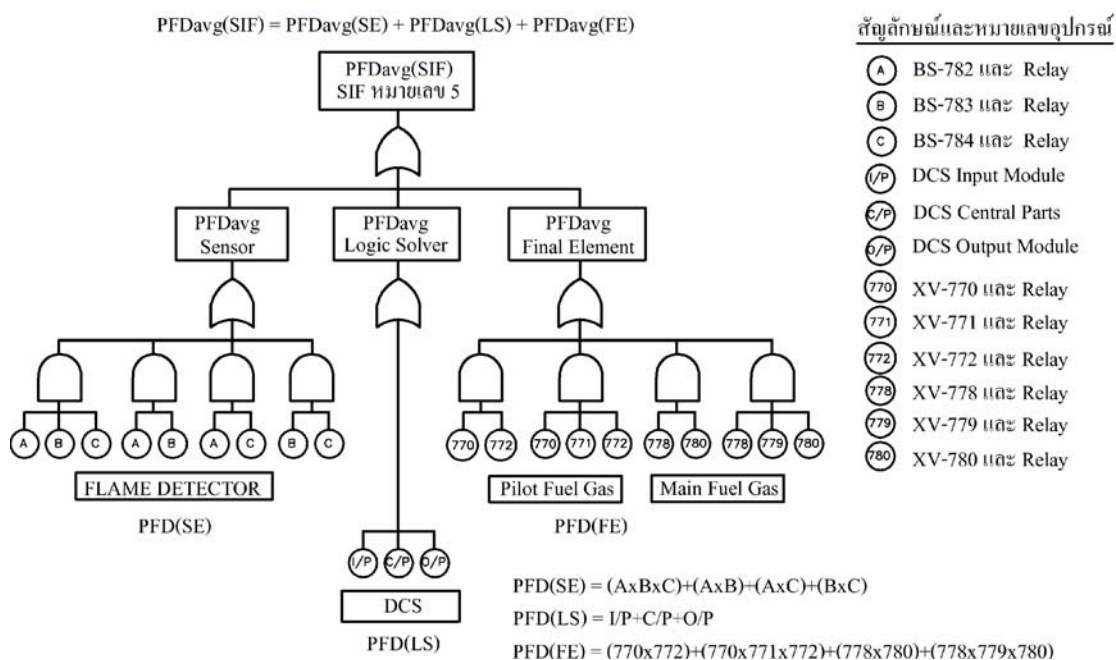
ภาพผนวกที่ ค2 แสดงแผนภาพต้นไม้ของ SIF หมายเลข 3 (ปรับปรุงครั้งที่ 1)



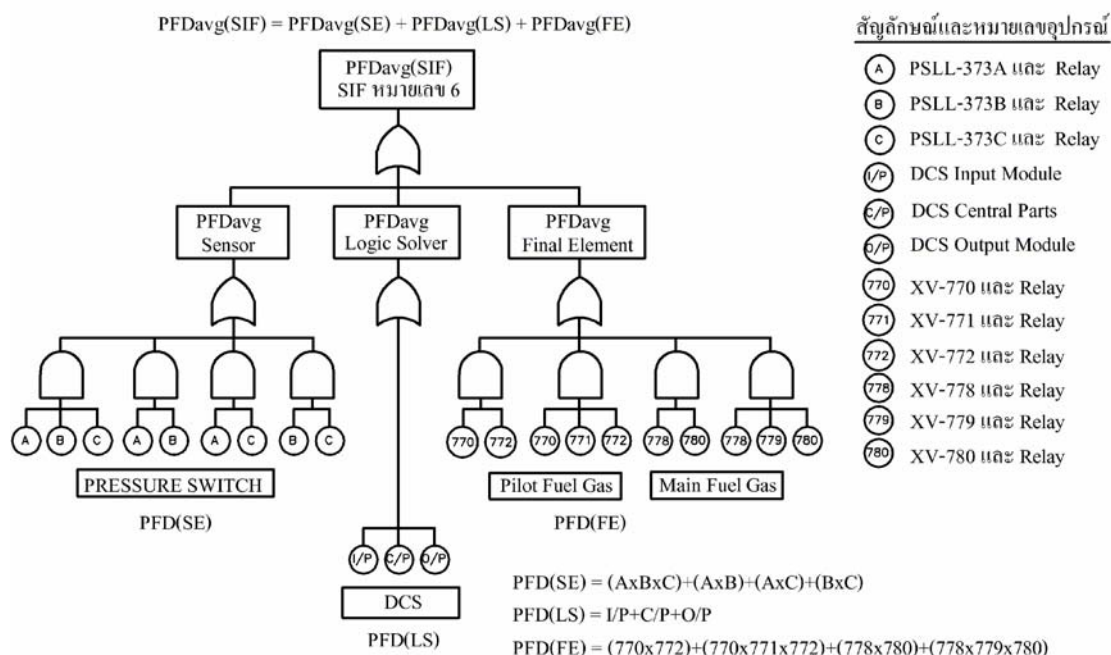
ภาพผนวกที่ ค3 แสดงแผนภาพต้นไม้ของ SIF หมายเลข 3 (ปรับปรุงครั้งที่ 2)



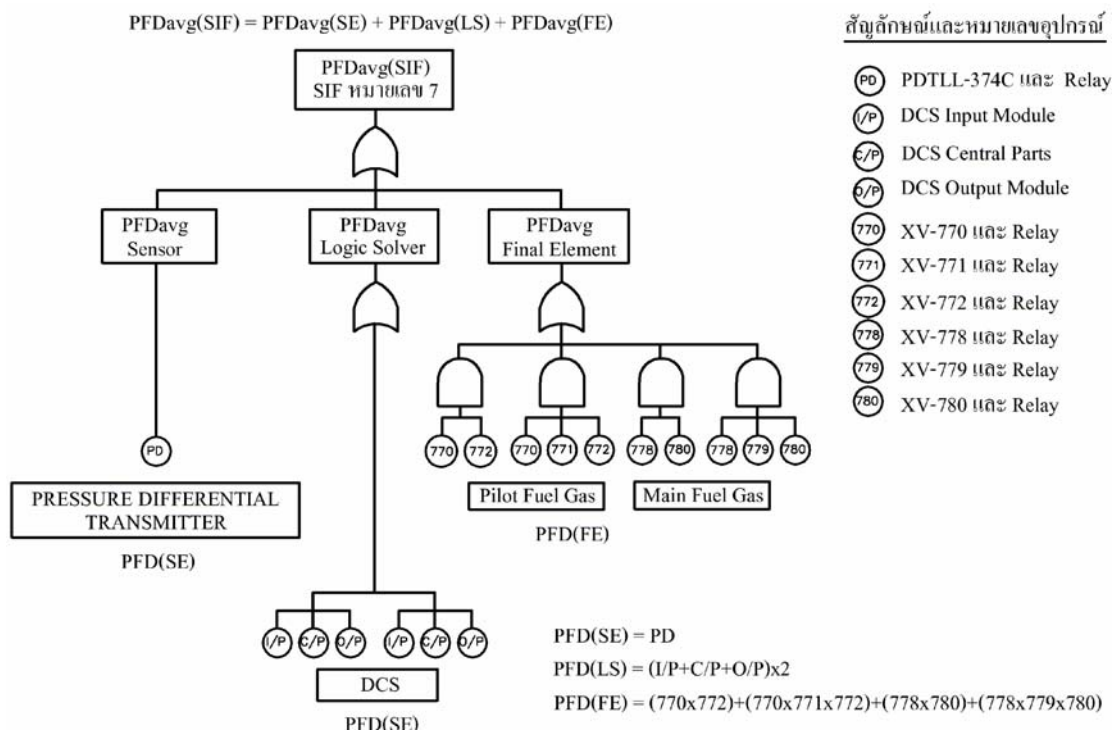
ภาพผนวกที่ ค4 แสดงแผนภาพต้นไม้ของ SIF หมายเลข 4



ภาพผนวกที่ ค5 แสดงแผนภาพต้นไม้ของ SIF หมายเลข 5



ภาพผนวกที่ ค6 แสดงแผนภาพต้นไม้ของ SIF หมายเลข 6



ภาพผนวกที่ ค7 แสดงแผนภาพต้นไม้ของ SIF หมายเลข 7

#### ภาคผนวก ง

ตารางค่าความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์วัดคummน์ร้ย

### ค่าความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์วัดคูลมน์นิรภัย

ค่าอัตราความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์วัดคูลมน์นิรภัย ซึ่งแสดงในตารางผนวกที่ ง1 เป็นค่าที่นำมาจากฐานข้อมูลของบริษัทเซลล์ ซึ่งมีการบันทึกเก็บเป็นประวัติของอุปกรณ์แต่ละชนิดและเป็นค่าที่ยอมรับในระดับสากล จากตารางผนวกที่ ง1 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ ได้เทียบชนิดอุปกรณ์วัดคูลมน์นิรภัยที่ใช้ในระบบผลิตไอน้ำกับฐานข้อมูลของบริษัทเซลล์ที่เป็นอุปกรณ์ชนิดเดียวกัน เพื่อให้มีความเชื่อมั่นสูงจึงนำค่าอัตราความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ ( $\lambda^D$ ) ครั้งต่อปี ที่เป็นค่าความผิดพลาดอันตรายด้านสูง (Upper) มาใช้หาค่าอัตราความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ ( $\lambda^D$ ) ครั้งต่อชั่วโมง โดยแสดงในตารางผนวกที่ ง2



ตารางผนวกที่ ๑1 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์วัดคูนีรภัยต่างๆ

| หมายเลขอุปกรณ์<br>ที่ใช้ในระบบผลิตไอน้ำ | หมายเลขอุปกรณ์<br>จาก บริษัทเชลล์ | ชนิดของอุปกรณ์    | รายละเอียดของอุปกรณ์                                                                | อัตราความผิดพลาดอันตราย<br>(Failure Rate, $\lambda^D$ ) (ครั้ง/ปี) |          |
|-----------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------|
|                                         |                                   |                   |                                                                                     | Lower                                                              | Upper    |
| DCS C/P                                 | DCS @ Any                         | DCS Central Parts | Generic DCS type Logic Solver-Central Parts                                         | 5.80E-05                                                           | 2.30E-04 |
| DCS I/P                                 | DCS @ input                       | DCS input         | Generic DCS type Logic Solver-input channel non-redundant                           | 2.10E-03                                                           | 2.20E-02 |
| DCS O/P                                 | DCS @ output                      | DCS output        | Generic DCS type Logic Solver-output channel non-redundant                          | 2.80E-04                                                           | 1.50E-03 |
| BS-781/782/783                          | Flame det @any                    | Flame detector    | UV/IR flame detector,electronics and signal line to LS<br>(for use burner)          | 7.47E-03                                                           | 5.33E-02 |
| LTHH-252A/B/C                           | L dp.E @ water                    | L dp.E            | dp cell type level Transmitter with inpulse lines<br>Trans.&signal lines to LS      | 5.06E-03                                                           | 3.84E-02 |
| LTLL-252A/B/C                           | L dp.E @ water                    | L dp.E            | dp cell type level Transmitter with inpulse lines<br>Trans.&signal lines to LS      | 5.06E-03                                                           | 3.84E-02 |
| LSHH-255                                | L sw.mech @ water                 | L sw.mech.        | float type level sw.&signal lines to LS                                             | 2.12E-03                                                           | 2.50E-02 |
| PDTLL-374C                              | PE @ fuel gas                     | PE                | pressure & differential (press.meter with impulse line<br>trans.&signal lines to LS | 5.40E-03                                                           | 2.80E-02 |
| PSLL-373A/B/C                           | P sw. @ flue gas                  | P sw.             | pressure sw. with impulse line &signal lines to LS                                  | 6.73E-03                                                           | 7.92E-02 |
| TISHH-564                               | T sw. @ any                       | T sw.             | local temperture sw. with signal line to LS                                         | 6.50E-03                                                           | 8.89E-02 |

ตารางผนวกที่ ง1 (ต่อ)

| หมายเลขอุปกรณ์<br>ที่ใช้ในระบบผลิตไอน้ำ | หมายเลขอุปกรณ์<br>จาก บริษัทเชลล์ | ชนิดของอุปกรณ์       | รายละเอียดของอุปกรณ์                                                                           | อัตราความผิดพลาดอันตราย<br>(Failure Rate, $\lambda^D$ ) (ครั้ง/ปี) |          |
|-----------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------|
|                                         |                                   |                      |                                                                                                | Lower                                                              | Upper    |
| XV-778/779/780                          | sov @ any                         | sov                  | de-energise to trip sov for instrument air (as used on valve actuature) with signal line to LS | 6.43E-04                                                           | 3.05E-02 |
| XV-770/771/772                          | Vlv ball @ flue gas               | Vlv ball on/off      | ESD pneumatic ball valve on/off non-TSO with sov & signal lines from LS                        | 9.11E-03                                                           | 5.25E-02 |
| LV-255                                  | Vlv glb @ water                   | Vlv globe TSO on/off | ESD pneumatic globe valve on/off with sov                                                      | 2.75E-03                                                           | 3.53E-02 |
| ZY-794Y/795Y/798Y/799Y                  | Vlv Lvr @ gas gen                 | Vlv louvre           | ESD pneumatic louvre type (as in air ducts) valve on/off with sov & signal lines from LS       | 1.45E-02                                                           | 7.50E-02 |
| Relay                                   | Relay @ any                       | Relay                | Signal industrial relay only                                                                   | 2.93E-04                                                           | 2.89E-03 |

ที่มา: Shell (2003)

ตารางผนวกที่ 2 แสดงการหาค่าอัตราความผิดพลาดอันตรายของอุปกรณ์ SIS ในระบบผลิตไอน้ำ

| หมายเลขอุปกรณ์<br>วัดคูลมน์ | ชื่ออุปกรณ์<br>วัดคูลมน์       | อัตราความ<br>ผิดพลาดอันตราย<br>(Upper Failure Rate , $\lambda^D$ )<br>(ครั้ง/ปี) (ข้อมูลจากบริษัทเชลล์) | อัตราความ<br>ผิดพลาดอันตราย<br>(Failure Rate , $\lambda^D$ )<br>(ครั้ง/ชั่วโมง) |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| DCS C/P                     | DCS central part               | 2.30E-04                                                                                                | 2.63E-08                                                                        |
| DCS I/P                     | DCS input                      | 2.20E-02                                                                                                | 2.51E-06                                                                        |
| DCS O/P                     | DCS output                     | 1.50E-03                                                                                                | 1.71E-07                                                                        |
| BS-781 และ relay            | Burner Frame<br>Failure Switch | 5.62E-02                                                                                                | 6.42E-06                                                                        |
| BS-782 และ relay            | Burner Frame<br>Failure Switch | 5.62E-02                                                                                                | 6.42E-06                                                                        |
| BS-783 และ relay            | Burner Frame<br>Failure Switch | 5.62E-02                                                                                                | 6.42E-06                                                                        |
| LTHH-252A                   | Level Transmitter              | 3.84E-02                                                                                                | 4.38E-06                                                                        |
| LTHH-252B                   | Level Transmitter              | 3.84E-02                                                                                                | 4.38E-06                                                                        |
| LTHH-252C                   | Level Transmitter              | 3.84E-02                                                                                                | 4.38E-06                                                                        |
| LTLL-252A                   | Level Transmitter              | 3.84E-02                                                                                                | 4.38E-06                                                                        |
| LTLL-252B                   | Level Transmitter              | 3.84E-02                                                                                                | 4.38E-06                                                                        |
| LTLL-252C                   | Level Transmitter              | 3.84E-02                                                                                                | 4.38E-06                                                                        |
| LTHH-252A และ relay         | Level Transmitter              | 4.13E-02                                                                                                | 4.71E-06                                                                        |
| LTHH-252B และ relay         | Level Transmitter              | 4.13E-02                                                                                                | 4.71E-06                                                                        |
| LTHH-252C และ relay         | Level Transmitter              | 4.13E-02                                                                                                | 4.71E-06                                                                        |
| LTLL-252A และ relay         | Level Transmitter              | 4.13E-02                                                                                                | 4.71E-06                                                                        |
| LTLL-252B และ relay         | Level Transmitter              | 4.13E-02                                                                                                | 4.71E-06                                                                        |
| LTLL-252C และ relay         | Level Transmitter              | 4.13E-02                                                                                                | 4.71E-06                                                                        |
| LSHH-255 และ relay          | Level Switch                   | 2.79E-02                                                                                                | 3.18E-06                                                                        |
| PSLL-373A และ relay         | Pressure Switch                | 8.21E-02                                                                                                | 9.37E-06                                                                        |
| PSLL-373B และ relay         | Pressure Switch                | 8.21E-02                                                                                                | 9.37E-06                                                                        |
| PSLL-373C และ relay         | Pressure Switch                | 8.21E-02                                                                                                | 9.37E-06                                                                        |
| PDTLL-374C และ relay        | Diff.Pressure<br>Transmitter   | 3.09E-02                                                                                                | 3.53E-06                                                                        |
| TISHH-564A และ relay        | Temperature Switch             | 9.18E-02                                                                                                | 1.05E-05                                                                        |

ตารางผนวกที่ ๖2 (ต่อ)

| หมายเลขอุปกรณ์<br>วัดคูลมน์ | ชื่ออุปกรณ์<br>วัดคูลมน์       | อัตราความ<br>ผิดพลาดอันตราย<br>(Upper Failure Rate , $\lambda^D$ )<br>(ครั้ง/ปี) (ข้อมูลจากบริษัทเชลล์) | อัตราความ<br>ผิดพลาดอันตราย<br>(Failure Rate , $\lambda^D$ )<br>(ครั้ง/ชั่วโมง) |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| TISHH-564B และ relay        | Temperature Switch             | 9.18E-02                                                                                                | 1.05E-05                                                                        |
| TISHH-564C และ relay        | Temperature Switch             | 9.18E-02                                                                                                | 1.05E-05                                                                        |
| XV-770 และ relay            | ESD Valve (ball<br>on/off)     | 5.54E-02                                                                                                | 6.32E-06                                                                        |
| XV-771 และ relay            | ESD Valve (ball<br>on/off)     | 5.54E-02                                                                                                | 6.32E-06                                                                        |
| XV-772 และ relay            | ESD Valve (ball<br>on/off)     | 5.54E-02                                                                                                | 6.32E-06                                                                        |
| XV-778 และ relay            | ESD Valve (sov)                | 3.34E-02                                                                                                | 3.81E-06                                                                        |
| XV-779 และ relay            | ESD Valve (sov)                | 3.34E-02                                                                                                | 3.81E-06                                                                        |
| XV-780 และ relay            | ESD Valve (sov)                | 3.34E-02                                                                                                | 3.81E-06                                                                        |
| LV-255 และ relay            | Level Control valve<br>(globe) | 3.82E-02                                                                                                | 4.36E-06                                                                        |
| ZY-794Y และ relay           | Damper (louvre)                | 7.79E-02                                                                                                | 8.89E-06                                                                        |
| ZY-795Y และ relay           | Damper (louvre)                | 7.79E-02                                                                                                | 8.89E-06                                                                        |
| ZY-798Y และ relay           | Damper (louvre)                | 7.79E-02                                                                                                | 8.89E-06                                                                        |
| ZY-799Y และ relay           | Damper (louvre)                | 7.79E-02                                                                                                | 8.89E-06                                                                        |
| Relay                       | Relay                          | 2.89E-03                                                                                                | 3.30E-07                                                                        |

**ภาคผนวก จ**

แสดงการคำนวณหาค่าระดับความปลอดภัย

### การคำนวณหาค่าระดับความปลอดภัย

ในการคำนวณหาค่าระดับความปลอดภัยของแต่ละฟังก์ชันวัดคุณนिरภัย ( $SIL_{SIF}$ ) เริ่มต้นจากการหา PFD ของแต่ละระบบย่อย (SE, LS, FE) โดยใช้แผนภูมิต้นไม้ (ดูภาคผนวก ก) แล้วหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายในเวลาที่ต้องการ ( $PFD_{avg}$ ) ของแต่ละระบบย่อย โดยใช้หลักการคำนวณในสมการที่ 9 และ 10 ผลรวมของค่าดังกล่าวของทั้ง 3 ระบบย่อยเรียกว่า  $PFD_{avg}$  ของฟังก์ชันวัดคุณนिरภัยดังแสดงในสมการที่ 16

ตารางผนวกที่ จ1 แสดงการคำนวณหาค่า PFDavg ของ SIF หมายเลข 1 และ 2

| ระบบย่อย                                   | สมการ PFD                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | สมการ PFDavg                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | ผลลัพธ์ PFDavg                                                                       |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| อุปกรณ์การวัด<br>(SE)                      | $= (A \times B \times C) + (A \times B) + (A \times C) + (B \times C) + \text{Re}$ <p>โดย A, B และ C มีค่าเท่ากัน (เท่ากับ <math>\lambda^D t</math>) และค่า</p> $\text{Re} = (\lambda_{\text{Re}}^D) t$ $= (\lambda^D)^3 t^3 + 3(\lambda^D)^2 t^2 + (\lambda_{\text{Re}}^D) t$                                                                      | $= \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T (\lambda^D)^3 t^3 dt + \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T 3(\lambda^D)^2 t^2 dt + \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T (\lambda_{\text{Re}}^D) t dt$ $= \frac{1}{4} (\lambda^D)^3 T^3 + (\lambda^D)^2 T^2 + \frac{1}{2} (\lambda_{\text{Re}}^D) T$                           | $= 1.0925 \times 10^{-3}$ <p>ครั้ง ต่อ 6 เดือน</p> <p>(SIL<sub>SE</sub> = SIL2 )</p> |
| ส่วน<br>ประมวลผล<br>(LS)                   | $= [(I/P) + (C/P) + (O/P)] \times 2$ <p>โดย I/P มีค่าเท่ากับ <math>(\lambda_{I/P}^D) t</math>, C/P มีค่าเท่ากับ</p> <p><math>(\lambda_{C/P}^D) t</math> และ O/P มีค่าเท่ากับ <math>(\lambda_{O/P}^D) t</math></p> $= 2[(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)] \cdot t$                                                          | $= \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T 2[(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)] \cdot t dt$ $= [(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)] \cdot T$                                                                                                                             | $= 1.186 \times 10^{-2}$ <p>ครั้ง ต่อ 6 เดือน</p> <p>(SIL<sub>SE</sub> = SIL1 )</p>  |
| อุปกรณ์สุดท้าย<br>(FE)                     | $= (794Y \times 797Y) + (795Y \times 798Y) + (770 \times 772) + (770 \times 771 \times 772)$ <p>โดย 794, 795Y, 797Y และ 798 มีค่าเท่ากัน (เท่ากับ <math>\lambda_{ZX}^D t</math>)</p> <p>และ 770, 771 และ 772 มีค่าเท่ากัน (เท่ากับ <math>\lambda_{XV}^D t</math>)</p> $= 2(\lambda_{ZX}^D)^2 t^2 + (\lambda_{XV}^D)^2 t^2 + (\lambda_{XV}^D)^3 t^3$ | $= \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T 2(\lambda_{ZX}^D)^2 t^2 dt + \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T (\lambda_{XV}^D)^2 t^2 dt + \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T (\lambda_{XV}^D)^3 t^3 dt$ $= \frac{2}{3} (\lambda_{ZX}^D)^2 T^2 + \frac{1}{3} (\lambda_{XV}^D)^2 T^2 + \frac{1}{4} (\lambda_{XV}^D)^3 T^3$ | $= 1.272 \times 10^{-3}$ <p>ครั้ง ต่อ 6 เดือน</p> <p>(SIL<sub>SE</sub> = SIL2 )</p>  |
| ค่า PFDavg ของ SIF หมายเลข 1 และ 2 เท่ากับ |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | $PFDavg_{(SIF)} = PFDavg_{(SE)} + PFDavg_{(LS)} + PFDavg_{(FE)}$                                                                                                                                                                                                                                                    | $= 1.422 \times 10^{-2}$ <p>ครั้ง ต่อ 6 เดือน</p>                                    |
| SILของ SIF หมายเลข 1 และ 2 เท่ากับ         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | SIL 1                                                                                |

ตารางผนวกที่ จ2 แสดงการคำนวณหาค่า PFDavg ของ SIF หมายเลข 1 และ 2 หลังปรับปรุง

| ระบบย่อย                                                | สมการ PFD                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | สมการ PFDavg                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | ผลลัพธ์ PFDavg                                                                           |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| อุปกรณ์การวัด<br>(SE)                                   | $= (A \times B \times C) + (A \times B) + (A \times C) + (B \times C) + \text{Re}$ <p>โดย A, B และ C มีค่าเท่ากับ <math>(\lambda^D t)</math> และค่า<br/> <math>\text{Re} = (\lambda_{\text{Re}}^D) t</math><br/> <math>= (\lambda^D)^3 t^3 + 3(\lambda^D)^2 t^2 + (\lambda_{\text{Re}}^D) t</math></p>                                            | $= \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T (\lambda^D)^3 t^3 dt + \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T 3(\lambda^D)^2 t^2 dt + \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T (\lambda_{\text{Re}}^D) t dt$ $= \frac{1}{4} (\lambda^D)^3 T^3 + (\lambda^D)^2 T^2 + \frac{1}{2} (\lambda_{\text{Re}}^D) T$                           | $= 4.536 \times 10^{-4} \text{ ครั้ง}$ <p>ต่อ 3 เดือน<br/> (SIL<sub>SE</sub> = SIL3)</p> |
| ส่วนประมวลผล<br>(LS)                                    | $= [(I/P) + (C/P) + (O/P)] \times 2$ <p>โดย I/P มีค่าเท่ากับ <math>(\lambda_{I/P}^D) t</math>, C/P มีค่าเท่ากับ<br/> <math>(\lambda_{C/P}^D) t</math> และ O/P มีค่าเท่ากับ <math>(\lambda_{O/P}^D) t</math><br/> <math>= 2[(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)] \cdot t</math></p>                                          | $= \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T 2[(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)] \cdot t dt$ $= [(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)] \cdot T$                                                                                                                         | $= 5.93 \times 10^{-3} \text{ ครั้ง}$ <p>ต่อ 3 เดือน<br/> (SIL<sub>SE</sub> = SIL2)</p>  |
| อุปกรณ์สุดท้าย<br>(FE)                                  | $= (794Y \times 797Y) + (795Y \times 798Y) + (770 \times 772) + (770 \times 771 \times 772)$ <p>โดย 794, 795Y, 797Y และ 798 มีค่าเท่ากับ <math>(\lambda_{ZX}^D t)</math><br/> และ 770, 771 และ 772 มีค่าเท่ากับ <math>(\lambda_{XV}^D t)</math><br/> <math>= 2(\lambda_{ZX}^D)^2 t^2 + (\lambda_{XV}^D)^2 t^2 + (\lambda_{XV}^D)^3 t^3</math></p> | $= \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T 2(\lambda_{ZX}^D)^2 t^2 dt + \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T (\lambda_{XV}^D)^2 t^2 dt + \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T (\lambda_{XV}^D)^3 t^3 dt$ $= \frac{2}{3} (\lambda_{ZX}^D)^2 T^2 + \frac{1}{3} (\lambda_{XV}^D)^2 T^2 + \frac{1}{4} (\lambda_{XV}^D)^3 T^3$ | $= 3.172 \times 10^{-4} \text{ ครั้ง}$ <p>ต่อ 3 เดือน<br/> (SIL<sub>SE</sub> = SIL3)</p> |
| ค่า PFDavg ของ SIF หมายเลข 1 และ 2 หลังปรับปรุง เท่ากับ |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | $PFDavg_{(SIF)} = PFDavg_{(SE)} + PFDavg_{(LS)} + PFDavg_{(FE)}$                                                                                                                                                                                                                                              | $= 6.7 \times 10^{-3} \text{ ครั้ง}$ <p>ต่อ 3 เดือน</p>                                  |
| SILของ SIF หมายเลข 1 และ 2 หลังปรับปรุง เท่ากับ         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | SIL 2                                                                                    |



ตารางผนวกที่ ๑3 แสดงการคำนวณหาค่า PFDavg ของ SIF หมายเลข 3

| ระบบย่อย                             | สมการ PFD                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | สมการ PFDavg                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ผลลัพธ์ PFDavg                                                              |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| อุปกรณ์การวัด<br>(SE)                | $= TS$<br>โดย $TS$ เท่ากับ $\lambda^D t$<br>$= \lambda^D t$                                                                                                                                                                                                                                                                | $= \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T \lambda^D t dt$<br>$= \frac{1}{2} \lambda^D T$                                                                                                                                                                                                                                  | $= 2.3 \times 10^{-2}$ ครั้ง<br>ต่อ 6 เดือน<br>(SIL <sub>SE</sub> = SIL1)   |
| ส่วนประมวลผล<br>(LS)                 | $= (I/P) + (C/P) + (O/P)$<br>โดย $I/P$ มีค่าเท่ากับ $(\lambda_{I/P}^D)t$ , $C/P$ มีค่าเท่ากับ $(\lambda_{C/P}^D)t$ และ $O/P$ มีค่าเท่ากับ $(\lambda_{O/P}^D)t$<br>$= [(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)] \cdot t$                                                                                  | $= \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T [(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)] \cdot t dt$<br>$= \frac{1}{2} [(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)] \cdot T$                                                                                                                  | $= 5.93 \times 10^{-3}$<br>ครั้ง ต่อ 6 เดือน<br>(SIL <sub>SE</sub> = SIL2)  |
| อุปกรณ์สุดท้าย<br>(FE)               | $= (794Y \times 797Y) + (795Y \times 798Y) + (770 \times 772) + (770 \times 771 \times 772)$<br>โดย 794, 795Y, 797Y และ 798 มีค่าเท่ากัน (เท่ากับ $\lambda_{ZX}^D t$ )<br>และ 770, 771 และ 772 มีค่าเท่ากัน (เท่ากับ $\lambda_{XV}^D t$ )<br>$= 2(\lambda_{ZX}^D)^2 t^2 + (\lambda_{XV}^D)^2 t^2 + (\lambda_{XV}^D)^3 t^3$ | $= \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T 2(\lambda_{ZX}^D)^2 t^2 dt + \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T (\lambda_{XV}^D)^2 t^2 dt + \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T (\lambda_{XV}^D)^3 t^3 dt$<br>$= \frac{2}{3} (\lambda_{ZX}^D)^2 T^2 + \frac{1}{3} (\lambda_{XV}^D)^2 T^2 + \frac{1}{4} (\lambda_{XV}^D)^3 T^3$ | $= 1.272 \times 10^{-3}$ ครั้ง<br>ต่อ 6 เดือน<br>(SIL <sub>SE</sub> = SIL2) |
| ค่า PFDavg ของ SIF หมายเลข 3 เท่ากับ |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $PFDavg_{(SIF)} = PFDavg_{(SE)} + PFDavg_{(LS)} + PFDavg_{(FE)} = 3.02 \times 10^{-2}$<br>ครั้ง ต่อ 6 เดือน                                                                                                                                                                                                            |                                                                             |
| SIL ของ SIF หมายเลข 3 เท่ากับ        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | SIL 1                                                                       |

ตารางผนวกที่ ๑4 แสดงการคำนวณหาค่า PFDavg ของ SIF หมายเลข 3 ปรับปรุงครั้งที่ 1 (โดยเพิ่มอุปกรณ์ SE และ LS โดยมีรูปแบบการทำงานเป็น 2oo2)

| ระบบย่อย                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | สมการ PFD | สมการ PFDavg                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ผลลัพธ์ PFDavg                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| <b>อุปกรณ์การวัด</b><br><b>(SE)</b><br>$= A \times B$<br>โดย A และ B มีค่าเท่ากัน (เท่ากับ $\lambda^D t$ )<br>$= (\lambda^D)^2 t^2$                                                                                                                                                                                                                                |           | $= \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T (\lambda^D)^2 t^2 dt$<br>$= \frac{1}{3} (\lambda^D)^2 T^2$                                                                                                                                                                                                                      | $= 1.762 \times 10^{-4}$ ครั้ง<br>ต่อ 3 เดือน<br>(SIL <sub>SE</sub> = SIL3) |
| <b>ส่วน</b><br><b>ประมวลผล</b><br><b>(LS)</b><br>$= [(I/P) + (C/P) + (O/P)] \times [(I/P) + (C/P) + (O/P)]$<br>โดย I/P มีค่าเท่ากับ $(\lambda_{I/P}^D)t$ , C/P มีค่าเท่ากับ $(\lambda_{C/P}^D)t$<br>และ O/P มีค่าเท่ากับ $(\lambda_{O/P}^D)t$<br>$= [(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)]^2 t^2$                                             |           | $= \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T [(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)]^2 t^2 dt$<br>$= \frac{1}{3} [(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)]^2 T^2$                                                                                                                      | $= 1.172 \times 10^{-5}$ ครั้ง<br>ต่อ 3 เดือน<br>(SIL <sub>SE</sub> = SIL4) |
| <b>อุปกรณ์สุดท้าย</b><br><b>(FE)</b><br>$= (794Y \times 797Y) + (795Y \times 798Y) + (770 \times 772) + (770 \times 771 \times 772)$<br>โดย 794, 795Y, 797Y และ 798 มีค่าเท่ากัน (เท่ากับ $\lambda_{ZX}^D t$ )<br>และ 770, 771 และ 772 มีค่าเท่ากัน (เท่ากับ $\lambda_{XV}^D t$ )<br>$= 2(\lambda_{ZX}^D)^2 t^2 + (\lambda_{XV}^D)^2 t^2 + (\lambda_{XV}^D)^3 t^3$ |           | $= \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T 2(\lambda_{ZX}^D)^2 t^2 dt + \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T (\lambda_{XV}^D)^2 t^2 dt + \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T (\lambda_{XV}^D)^3 t^3 dt$<br>$= \frac{2}{3} (\lambda_{ZX}^D)^2 T^2 + \frac{1}{3} (\lambda_{XV}^D)^2 T^2 + \frac{1}{4} (\lambda_{XV}^D)^3 T^3$ | $= 3.172 \times 10^{-4}$ ครั้ง<br>ต่อ 3 เดือน<br>(SIL <sub>SE</sub> = SIL3) |
| ค่า PFDavg ของ SIF หมายเลข 3 ปรับปรุงครั้งที่ 1 เท่ากับ                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |           | $PFDavg_{(SIF)} = PFDavg_{(SE)} + PFDavg_{(LS)} + PFDavg_{(FE)} = 5.051 \times 10^{-4}$ ครั้ง<br>ต่อ 3 เดือน                                                                                                                                                                                                           |                                                                             |
| SILของ SIF หมายเลข 3 ปรับปรุงครั้งที่ 1 เท่ากับ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | SIL 3                                                                       |

ตารางผนวกที่ ๑5 แสดงการคำนวณหาค่า PFDavg ของ SIF หมายเลข 3 ปรับปรุงครั้งที่ 2 (โดยเพิ่มอุปกรณ์ SE และ LS โดยมีรูปแบบการทำงานเป็น 2oo3)

| ระบบย่อย                                                       | สมการ PFD                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | สมการ PFDavg                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | ผลลัพธ์ PFDavg                                                                             |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>อุปกรณ์การวัด</b><br><b>(SE)</b>                            | $= (A \times B \times C) + (A \times B) + (A \times C) + (B \times C)$ <p>โดย A, B และ C มีค่าเท่ากัน (เท่ากับ <math>\lambda^D t</math>)</p> $= (\lambda^D)^3 t^3 + 3(\lambda^D)^2 t^2$                                                                                                                                                             | $= \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T (\lambda^D)^3 t^3 dt + \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T 3(\lambda^D)^2 t^2 dt$ $= \frac{1}{4} (\lambda^D)^3 T^3 + (\lambda^D)^2 T^2$                                                                                                                                    | $= 5.32 \times 10^{-4} \text{ ครั้ง}$ <p>ต่อ 3 เดือน</p> <p>(SIL<sub>SE</sub> = SIL3)</p>  |
| <b>ส่วน</b><br><b>ประมวลผล</b><br><b>(LS)</b>                  | $= [(I/P) + (C/P) + (O/P)] \times [(I/P) + (C/P) + (O/P)]$ <p>โดย I/P มีค่าเท่ากับ <math>(\lambda_{I/P}^D)t</math>, C/P มีค่าเท่ากับ <math>(\lambda_{C/P}^D)t</math></p> <p>และ O/P มีค่าเท่ากับ <math>(\lambda_{O/P}^D)t</math></p> $= [(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)]^2 t^2$                                          | $= \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T [(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)]^2 t^2 dt$ $= \frac{1}{3} [(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)]^2 T^2$                                                                                                                  | $= 1.172 \times 10^{-5} \text{ ครั้ง}$ <p>ต่อ 3 เดือน</p> <p>(SIL<sub>SE</sub> = SIL4)</p> |
| <b>อุปกรณ์สุดท้าย</b><br><b>(FE)</b>                           | $= (794Y \times 797Y) + (795Y \times 798Y) + (770 \times 772) + (770 \times 771 \times 772)$ <p>โดย 794, 795Y, 797Y และ 798 มีค่าเท่ากัน (เท่ากับ <math>\lambda_{ZX}^D t</math>)</p> <p>และ 770, 771 และ 772 มีค่าเท่ากัน (เท่ากับ <math>\lambda_{XV}^D t</math>)</p> $= 2(\lambda_{ZX}^D)^2 t^2 + (\lambda_{XV}^D)^2 t^2 + (\lambda_{XV}^D)^3 t^3$ | $= \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T 2(\lambda_{ZX}^D)^2 t^2 dt + \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T (\lambda_{XV}^D)^2 t^2 dt + \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T (\lambda_{XV}^D)^3 t^3 dt$ $= \frac{2}{3} (\lambda_{ZX}^D)^2 T^2 + \frac{1}{3} (\lambda_{XV}^D)^2 T^2 + \frac{1}{4} (\lambda_{XV}^D)^3 T^3$ | $= 3.172 \times 10^{-4} \text{ ครั้ง}$ <p>ต่อ 3 เดือน</p> <p>(SIL<sub>SE</sub> = SIL3)</p> |
| <b>ค่า PFDavg ของ SIF หมายเลข 3 ปรับปรุงครั้งที่ 2 เท่ากับ</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | $PFDavg_{(SIF)} = PFDavg_{(SE)} + PFDavg_{(LS)} + PFDavg_{(FE)}$                                                                                                                                                                                                                                              | $= 8.61 \times 10^{-4} \text{ ครั้ง}$ <p>ต่อ 3 เดือน</p>                                   |
| <b>SILของ SIF หมายเลข 3 ปรับปรุงครั้งที่ 2 เท่ากับ</b>         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>SIL 3</b>                                                                               |

ตารางผนวกที่ จ6 แสดงการคำนวณหาค่า PFDavg ของ SIF หมายเลข 4

| ระบบย่อย                             | สมการ PFD                                                                                                                                                                                                                                 | สมการ PFDavg                                                                                                                                                                                          | ผลลัพธ์ PFDavg                                                              |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| อุปกรณ์การวัด<br>(SE)                | $= LS$<br>โดย $LS$ เท่ากับ $\lambda^D t$<br>$= \lambda^D t$                                                                                                                                                                               | $= \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T \lambda^D t dt$<br>$= \frac{1}{2} \lambda^D T$                                                                                                                 | $= 6.964 \times 10^{-3}$ ครั้ง<br>ต่อ 6 เดือน<br>(SIL <sub>SE</sub> = SIL2) |
| ส่วน<br>ประมวลผล<br>(LS)             | $= (I/P) + (C/P) + (O/P)$<br>โดย $I/P$ มีค่าเท่ากับ $(\lambda_{I/P}^D)t$ , $C/P$ มีค่าเท่ากับ $(\lambda_{C/P}^D)t$ และ $O/P$ มีค่าเท่ากับ $(\lambda_{O/P}^D)t$<br>$= [(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)] \cdot t$ | $= \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T [(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)] \cdot t dt$<br>$= \frac{1}{2} [(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)] \cdot T$ | $= 5.93 \times 10^{-3}$<br>ครั้ง ต่อ 6 เดือน<br>(SIL <sub>SE</sub> = SIL2)  |
| อุปกรณ์สุดท้าย<br>(FE)               | $= LV$<br>โดย $LV$ เท่ากับ $\lambda^D t$<br>$= \lambda^D t$                                                                                                                                                                               | $= \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T \lambda^D t dt$<br>$= \frac{1}{2} \lambda^D T$                                                                                                                 | $= 9.548 \times 10^{-3}$ ครั้ง<br>ต่อ 6 เดือน<br>(SIL <sub>SE</sub> = SIL2) |
| ค่า PFDavg ของ SIF หมายเลข 4 เท่ากับ |                                                                                                                                                                                                                                           | $PFDavg_{(SIF)} = PFDavg_{(SE)} + PFDavg_{(LS)} + PFDavg_{(FE)}$                                                                                                                                      | $= 2.244 \times 10^{-2}$ ครั้ง<br>ต่อ 6 เดือน                               |
| SILของ SIF หมายเลข 4 เท่ากับ         |                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                       | SIL 1                                                                       |

ตารางผนวกที่ จ7 แสดงการคำนวณหาค่า PFDavg ของ SIF หมายเลข 5

| ระบบย่อย                             | สมการ PFD                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | สมการ PFDavg                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | ผลลัพธ์ PFDavg                                                                    |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| อุปกรณ์<br>การวัด<br>(SE)            | $= (A \times B \times C) + (A \times B) + (A \times C) + (B \times C)$ <p>โดย A, B และ C มีค่าเท่ากัน (เท่ากับ <math>\lambda^D t</math>)</p> $= (\lambda^D)^3 t^3 + 3(\lambda^D)^2 t^2$                                                                                                                                                                                 | $= \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T (\lambda^D)^3 t^3 dt + \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T 3(\lambda^D)^2 t^2 dt$ $= \frac{1}{4} (\lambda^D)^3 T^3 + (\lambda^D)^2 T^2$                                                                                                                                                                                                                                          | $= 7.963 \times 10^{-4}$ <p>ครั้งต่อ 6 เดือน</p> <p>(SIL<sub>SE</sub> = SIL3)</p> |
| ส่วน<br>ประมวลผล<br>(LS)             | $= (I / P) + (C / P) + (O / P)$ <p>โดย I / P มีค่าเท่ากับ <math>(\lambda_{I/P}^D) t</math>, C / P มีค่าเท่ากับ <math>(\lambda_{C/P}^D) t</math> และ O / P มีค่าเท่ากับ <math>(\lambda_{O/P}^D) t</math></p> $= [(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)] \cdot t$                                                                                     | $= \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T [(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)] \cdot t dt$ $= \frac{1}{2} [(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)] \cdot T$                                                                                                                                                                                                                    | $= 5.93 \times 10^{-3}$ <p>ครั้งต่อ 6 เดือน</p> <p>(SIL<sub>SE</sub> = SIL2)</p>  |
| อุปกรณ์<br>สุดท้าย<br>(FE)           | $= (770 \times 772) + (770 \times 771 \times 772) + (778 \times 780) + (778 \times 779 \times 780)$ <p>โดย 770, 771 และ 772 มีค่าเท่ากัน (เท่ากับ <math>\lambda_{XV}^D t</math>) และ 778, 779 และ 780 มีค่าเท่ากัน (เท่ากับ <math>\lambda_{XV1}^D t</math>)</p> $= (\lambda_{XV}^D)^2 t^2 + (\lambda_{XV}^D)^3 t^3 + (\lambda_{XV1}^D)^2 t^2 + (\lambda_{XV1}^D)^3 t^3$ | $= \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T (\lambda_{XV}^D)^2 t^2 dt + \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T (\lambda_{XV}^D)^3 t^3 dt + \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T (\lambda_{XV1}^D)^2 t^2 dt + \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T (\lambda_{XV1}^D)^3 t^3 dt$ $= \frac{1}{3} (\lambda_{XV}^D)^2 T^2 + \frac{1}{4} (\lambda_{XV}^D)^3 T^3 + \frac{1}{3} (\lambda_{XV1}^D)^2 T^2 + \frac{1}{4} (\lambda_{XV1}^D)^3 T^3$ | $= 3.547 \times 10^{-4}$ <p>ครั้งต่อ 6 เดือน</p> <p>(SIL<sub>SE</sub> = SIL3)</p> |
| ค่า PFDavg ของ SIF หมายเลข 5 เท่ากับ |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | $PFDavg_{(SIF)} = PFDavg_{(SE)} + PFDavg_{(LS)} + PFDavg_{(FE)}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $= 7.081 \times 10^{-3}$ <p>ครั้งต่อ 6 เดือน</p>                                  |
| SIL ของ SIF หมายเลข 5 เท่ากับ        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | SIL 2                                                                             |

ตารางผนวกที่ จ8 แสดงการคำนวณหาค่า PFDavg ของ SIF หมายเลข 6

| ระบบย่อย                             | สมการ PFD                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | สมการ PFDavg                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | ผลลัพธ์ PFDavg                                                                    |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| อุปกรณ์<br>การวัด<br>(SE)            | $= (A \times B \times C) + (A \times B) + (A \times C) + (B \times C)$ <p>โดย A, B และ C มีค่าเท่ากัน (เท่ากับ <math>\lambda^D t</math>)</p> $= (\lambda^D)^3 t^3 + 3(\lambda^D)^2 t^2$                                                                                                                                                                                 | $= \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T (\lambda^D)^3 t^3 dt + \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T 3(\lambda^D)^2 t^2 dt$ $= \frac{1}{4} (\lambda^D)^3 T^3 + (\lambda^D)^2 T^2$                                                                                                                                                                                                                                          | $= 1.702 \times 10^{-3}$ <p>ครั้งต่อ 6 เดือน</p> <p>(SIL<sub>SE</sub> = SIL2)</p> |
| ส่วน<br>ประมวลผล<br>(LS)             | $= (I/P) + (C/P) + (O/P)$ <p>โดย I/P มีค่าเท่ากับ <math>(\lambda_{I/P}^D)t</math>, C/P มีค่าเท่ากับ <math>(\lambda_{C/P}^D)t</math> และ O/P มีค่าเท่ากับ <math>(\lambda_{O/P}^D)t</math></p> $= [(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)] \cdot t$                                                                                                    | $= \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T [(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)] \cdot t dt$ $= \frac{1}{2} [(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)] \cdot T$                                                                                                                                                                                                                    | $= 5.93 \times 10^{-3}$ <p>ครั้งต่อ 6 เดือน</p> <p>(SIL<sub>SE</sub> = SIL2)</p>  |
| อุปกรณ์<br>สุดท้าย<br>(FE)           | $= (770 \times 772) + (770 \times 771 \times 772) + (778 \times 780) + (778 \times 779 \times 780)$ <p>โดย 770, 771 และ 772 มีค่าเท่ากัน (เท่ากับ <math>\lambda_{XV}^D t</math>) และ 778, 779 และ 780 มีค่าเท่ากัน (เท่ากับ <math>\lambda_{XV1}^D t</math>)</p> $= (\lambda_{XV}^D)^2 t^2 + (\lambda_{XV}^D)^3 t^3 + (\lambda_{XV1}^D)^2 t^2 + (\lambda_{XV1}^D)^3 t^3$ | $= \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T (\lambda_{XV}^D)^2 t^2 dt + \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T (\lambda_{XV}^D)^3 t^3 dt + \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T (\lambda_{XV1}^D)^2 t^2 dt + \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T (\lambda_{XV1}^D)^3 t^3 dt$ $= \frac{1}{3} (\lambda_{XV}^D)^2 T^2 + \frac{1}{4} (\lambda_{XV}^D)^3 T^3 + \frac{1}{3} (\lambda_{XV1}^D)^2 T^2 + \frac{1}{4} (\lambda_{XV1}^D)^3 T^3$ | $= 3.547 \times 10^{-4}$ <p>ครั้งต่อ 6 เดือน</p> <p>(SIL<sub>SE</sub> = SIL3)</p> |
| ค่า PFDavg ของ SIF หมายเลข 6 เท่ากับ |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | $PFDavg_{(SIF)} = PFDavg_{(SE)} + PFDavg_{(LS)} + PFDavg_{(FE)}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $= 7.986 \times 10^{-3}$ <p>ครั้งต่อ 6 เดือน</p>                                  |
| SIL ของ SIF หมายเลข 6 เท่ากับ        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | SIL 2                                                                             |

ตารางผนวกที่ ๑๑ แสดงการคำนวณหาค่า PFDavg ของ SIF หมายเลข 7

| ระบบย่อย                             | สมการ PFD                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | สมการ PFDavg                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ผลลัพธ์ PFDavg                                                             |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| อุปกรณ์<br>การวัด<br>(SE)            | $= PD$<br>โดย $PD$ เท่ากับ $\lambda^D t$<br>$= \lambda^D t$                                                                                                                                                                                                                                                                                        | $= \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T \lambda^D t dt$<br>$= \frac{1}{2} \lambda^D T$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $= 7.731 \times 10^{-3}$<br>ครั้งต่อ 6 เดือน<br>(SIL <sub>SE</sub> = SIL2) |
| ส่วน<br>ประมวลผล<br>(LS)             | $= [(I/P) + (C/P) + (O/P)] \times 2$<br>โดย $I/P$ มีค่าเท่ากับ $(\lambda_{I/P}^D) t$ , $C/P$ มีค่าเท่ากับ $(\lambda_{C/P}^D) t$ และ $O/P$ มีค่าเท่ากับ $(\lambda_{O/P}^D) t$<br>$= 2[(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)] \cdot t$                                                                                           | $= \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T 2[(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)] \cdot t dt$<br>$= [(\lambda_{I/P}^D) + (\lambda_{C/P}^D) + (\lambda_{O/P}^D)] \cdot T$                                                                                                                                                                                                                               | $= 1.186 \times 10^{-2}$<br>ครั้งต่อ 6 เดือน<br>(SIL <sub>SE</sub> = SIL1) |
| อุปกรณ์<br>สุดท้าย<br>(FE)           | $= (770 \times 772) + (770 \times 771 \times 772) + (778 \times 780) + (778 \times 779 \times 780)$<br>โดย 770, 771 และ 772 มีค่าเท่ากัน (เท่ากับ $\lambda_{XV}^D t$ ) และ 778, 779 และ 780 มีค่าเท่ากัน (เท่ากับ $\lambda_{XV1}^D t$ )<br>$= (\lambda_{XV}^D)^2 t^2 + (\lambda_{XV}^D)^3 t^3 + (\lambda_{XV1}^D)^2 t^2 + (\lambda_{XV1}^D)^3 t^3$ | $= \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T (\lambda_{XV}^D)^2 t^2 dt + \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T (\lambda_{XV}^D)^3 t^3 dt + \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T (\lambda_{XV1}^D)^2 t^2 dt + \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T (\lambda_{XV1}^D)^3 t^3 dt$<br>$= \frac{1}{3} (\lambda_{XV}^D)^2 T^2 + \frac{1}{4} (\lambda_{XV}^D)^3 T^3 + \frac{1}{3} (\lambda_{XV1}^D)^2 T^2 + \frac{1}{4} (\lambda_{XV1}^D)^3 T^3$ | $= 3.547 \times 10^{-4}$<br>ครั้งต่อ 6 เดือน<br>(SIL <sub>SE</sub> = SIL3) |
| ค่า PFDavg ของ SIF หมายเลข 7 เท่ากับ |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $PFDavg_{(SIF)} = PFDavg_{(SE)} + PFDavg_{(LS)} + PFDavg_{(FE)}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | $= 1.995 \times 10^{-2}$<br>ครั้งต่อ 6 เดือน                               |
| SIL ของ SIF หมายเลข 7 เท่ากับ        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | SIL 1                                                                      |

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

|                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อ –นามสกุล                  | นายณัฏฐณ อัสววิริยะกุล                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| วัน เดือน ปี ที่เกิด           | วันที่ 21 พฤศจิกายน 2509                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| สถานที่เกิด                    | อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ประวัติการศึกษา                | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. วท.บ. สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม<br/>คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม<br/>มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์</li> <li>2. ประกาศนียบัตร สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า<br/>คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ช่างเทคนิคอาวุโส บริษัท ปตท.เคมีคอล จำกัด (มหาชน)</li> <li>2. วิศวกรที่ปรึกษา บริษัท เอส เอส เค พลาสติก จำกัด</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| สถานที่ทำงานปัจจุบัน           | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. บริษัท ปตท.เคมีคอล จำกัด (มหาชน) ต.มาบตาพุด<br/>อ.เมือง จ.ระยอง และ</li> <li>2. บริษัท เอส เอส เค พลาสติก จำกัด ต.ราชาเทวะ<br/>อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ออกแบบระบบเครื่องมือวัดคุมให้เกิดประโยชน์สูงสุด<br/>สามารถลดงบประมาณโครงการได้ถึง 3 แสนบาท<br/>(พ.ศ.2540) ของบริษัทปตท.เคมีคอล จำกัด (มหาชน)</li> <li>2. จัดทำคู่มือตรวจสอบรายการเอกสารวิศวกรรม<br/>(Electrical and Instrument Engineering Document<br/>Guide) เพื่อใช้ในการออกแบบงานวิศวกรรมไฟฟ้าและ<br/>เครื่องมือวัดคุม บริษัทปตท.เคมีคอล จำกัด (มหาชน)</li> <li>3. ให้การปรึกษาออกแบบเพื่อให้เกิดความปลอดภัยและ<br/>ประหยัดพลังงาน กับชุดความร้อนของเครื่องฉีด<br/>พลาสติกของบริษัท เอส เอส เค พลาสติก จำกัด</li> </ol> |
| ทุนการศึกษาที่ได้รับ           | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. จากบริษัทปตท.เคมีคอล จำกัด (มหาชน)</li> <li>2. จาก มร. มาตงจิ่ง (Mr. MaTongJing)</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |