



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา	วิศวกรรมโยธา
สาขา	ภาควิชา
เรื่อง	การตรวจสอบสภาพเขื่อนดินโดยวิธีดัชนีความเสี่ยง Earth-fill Dam Inspection by Risk Index Method
نامผู้วิจัย	นายรัชชัย ปิ่นสุข
ได้พิจารณาเห็นชอบโดย	
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	( ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, Ph.D. )
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	( รองศาสตราจารย์วรกร ไม้เรียง, Ph.D. )
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	( รองศาสตราจารย์สุธาริน สถาปิตานนท์, Ph.D. )
หัวหน้าภาควิชา	( รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงกูร, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วัน ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การตรวจสอบภาพเขื่อนดินโดยวิธีดัชนีความเสี่ยง

Earth-fill Dam Inspection by Risk Index Method

โดย

นายรัชชัย ปั่นสุข

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รัชชชัย ปันสุข 2553: การตรวจสอบสภาพเขื่อนดินโดยวิธีดัชนีความเสี่ยง ประิณญาวิศวกรรม  
ศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, Ph.D. 351 หน้า

การวิจัยนี้ได้มุ่งหมายการตรวจสอบสภาพเขื่อนดินด้วยสายตาโดยวิธีดัชนีความเสี่ยง โดยใช้ Fault tree diagram กำหนดสาเหตุการพิบัติของเขื่อนและการหาน้ำหนักความสำคัญที่เหมาะสมของสภาพความเสี่ยงที่สามารถตรวจได้จากสายตา ได้ทดสอบการตรวจสอบสภาพเขื่อนโดยวิธีดัชนีความเสี่ยงกับเขื่อน 3 เขื่อนของกรมชลประทานได้แก่ เขื่อนปิดช่องเขาต่ำ โครงการเขื่อนขุนด่านปราการชล, เขื่อนแก่งกระเจาน และเขื่อนปราณบุรี

ผลการวิจัยแสดงการใช้ผลค่าดัชนีความเสี่ยงจากการวิเคราะห์ Fault tree ในการปรับปรุงค่าดัชนีความเสี่ยงให้เหมาะสม ค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้รับการพิสูจน์จากการทดสอบสภาพความเสี่ยงสำหรับใช้ในแต่ละกรณี ต้นแบบค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้พิสูจน์มีการลดลงของจำนวนสภาพความเสี่ยงที่ตรวจด้วยสายตาของแต่ละลักษณะการพิบัติ การกักเซาะภายในมีจำนวน 9 สภาพ การเลื่อนไถล 12 สภาพ และการไหลล้นข้ามสันเขื่อน 17 สภาพ จากการวิเคราะห์ Fault tree สภาพความเสี่ยงที่ตรวจได้เป็นตัวบอกถึงสาเหตุการพิบัติแค่ส่วนหนึ่งแต่ยังมีสภาพความเสี่ยงที่ตรวจไม่ได้อีก สำหรับการนำค่าดัชนีความเสี่ยงไปใช้งานจะทำการกำหนดระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูงสำหรับสภาพก่อนการพิบัติ สำหรับระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูงของการกักเซาะ-ภายในเท่ากับ 1.604 และ 1.894 ตามลำดับ ระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูงของการเลื่อนไถลเท่ากับ 1.903 และ 2.128 ตามลำดับ ระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูงของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนเท่ากับ 1.924 และ 2.367 ตามลำดับ สำหรับการประเมินค่าดัชนีความเสี่ยงของ 3 เขื่อน ผลค่าดัชนีความเสี่ยงที่มีค่ามากที่สุดของเขื่อนปิดช่องเขาต่ำ, เขื่อนแก่งกระเจาน และเขื่อนปราณบุรี มีค่าเท่ากับ 1.46 (การเลื่อนไถล), 2.36 (การเลื่อนไถล), 2.46 (การเลื่อนไถล), ตามลำดับ

Thawatchai Punsook 2010: Earth-fill Dam Inspection by Risk Index Method. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Suttisuk Soralump, Ph.D. 351 pages.

This research concentrated on a visual inspection of the earth-fill dam by introducing risk index method. The fault tree diagram was used to determine the causes of failure and assigned the appropriate weighting to each visual condition. 3 earthfill dams were used for testing the method: the saddle dam of Khun Dan Prakarnchon dam irrigation project, Kaeng Krachan dam irrigation project and Pranburi dam irrigation project.

The results show that the using of the fault tree analysis resulted in better improvement of the index. This is proved by condition testing to severe cases. The improved risk index model then reduce the visual inspection condition to became 9 conditions for piping, 12 conditions for sliding and 17 conditions for overtopping. Regarding the fault tree analysis, those inspected conditions are considered as a part of the causes of failure, some part can not be inspected since there is no visual condition to perform. For implementation, the levels of danger and high risk were calculated for each failure condition. The results found that the danger level and high risk level of piping has a value of 1.604 and 1.894 respectively. The danger level and high risk level of sliding are equal to 1.903 and 2.128 respectively. The danger level and high risk level of overtopping are equal to 1.924 and 2.367 respectively. As for the evaluation of 3 dams, It's found that the highest risk index of the saddle dam, Kaeng Krachan dam and Pranburi dam are 1.46 (sliding), 2.36 (sliding), 2.46 (sliding), respectively.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.วรากร ไม้เรียง และ ผศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมภ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษางานวิจัย และการศึกษาด้านวิศวกรรมปฐพี และคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้

ขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.สมภพ สุจริต และขอบคุณ รุ่นพี่ รุ่นน้อง ของกรมชลประทาน ที่ได้สนับสนุน ให้กำลังใจในการศึกษาและจัดทำวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้ให้สำเร็จลุล่วง

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง และขอบคุณเพื่อนๆ ที่เป็นกำลังใจ และสนับสนุนช่วยเหลือในการศึกษาตลอดจนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบคุณ คุณชินรศ ทองธรรมชาติ ที่เป็นแรงบันดาลใจให้อยากเรียนวิศวกรรมปฐพี คุณฐิติพร พันธุ์ท่าช้าง ที่เสนอให้เข้ามาศึกษาวิศวกรรมปฐพีซึ่งเป็นแรงเสริมประกอบกับความอยากเรียนรู้ด้านวิศวกรรมเขื่อน

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ห้องศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือให้การทำวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ โครงการเขื่อนขุนด่านปราการชล, โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาแก่งกระเจาน และโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาปราณบุรี ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่ และข้อมูลสำหรับการตรวจสอบสภาพเขื่อน

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยชิ้นนี้จักเป็นประโยชน์กับงานด้านวิศวกรรมเขื่อนต่อไป

รัชชัย ปันสุข

เมษายน 2553

## สารบัญ

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(10)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(26)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการวิจัย	99
อุปกรณ์	99
วิธีการวิจัย	99
ผลการวิจัย	103
สรุปและข้อเสนอแนะ	203
สรุป	203
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	204
ภาคผนวก	207
ภาคผนวก ก ภาพคะแนนสภาพเขื่อนแก่งกระจาน	208
ภาคผนวก ข เส้นทางการพิบัติ	230
ภาคผนวก ค ตารางผนวกแสดงค่าดัชนีความเสี่ยงของการทดสอบสภาพ ที่สำคัญก่อนเกิดการพิบัติ, สภาพบ่งชี้ว่าอาจเกิดความบกพร่อง และสภาพเบื้องต้นหรือต้นกำเนิดความบกพร่อง	278
ภาคผนวก ง แสดงภาพค่าดัชนีความเสี่ยงการทดสอบสภาพที่สำคัญก่อนเกิด การพิบัติ, สภาพบ่งชี้ว่าอาจเกิดความบกพร่อง และสภาพเบื้องต้น หรือต้นกำเนิดความบกพร่อง	326
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	351

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สาเหตุการพิบัติของเขื่อนใหญ่จากขั้นตอนการดำเนินการก่อสร้าง โดย ICOLD	21
2	ผลการสำรวจอัตราการพิบัติของเขื่อน	22
3	บันทึกการพิบัติของเขื่อนที่ทำให้มีผู้เสียชีวิตมากกว่า 10 คน ตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1860	23
4	สรุปสถิติสาเหตุการพิบัติของเขื่อน โดย USCOLD	29
5	สรุปสถิติสาเหตุการพิบัติของเขื่อนดิน โดย ICOLD ในปี 1995	30
6	โอกาสเกิดการพิบัติจากสาเหตุต่างๆ ของเขื่อนของ USBR	30
7	สถิติการพิบัติของเขื่อนดินถมขนาดใหญ่ถึงปี 1986	31
8	สถิติการพิบัติของเขื่อนดินถมขนาดใหญ่ (Zone Dams) ถึงปี 1986	33
9	สรุปผลการตรวจเขื่อนดินในประเทศไทย (สำนักนายกรัฐมนตรี้, 2534)	34
10	กรณีการพิบัติหรือความเสียหายของเขื่อนในประเทศไทย	35
11	สภาพความเสี่ยงของเขื่อนตามลักษณะการไหลล้นข้ามสันเขื่อน	50
12	สภาพความเสี่ยงของเขื่อนตามลักษณะการกัดเซาะภายใน	51
13	สภาพความเสี่ยงของเขื่อนตามลักษณะการเคลื่อนตัวของเขื่อน	52
14	สเกลดัชนีสภาพของวิธี REMR	66
15	การแบ่งชั้นของสภาพความสมบูรณ์ตามดัชนีสภาพ (Condition Index)	70
16	การให้น้ำหนักความสำคัญของข้อมูลรายละเอียดเขื่อนเทียบกับสภาพเขื่อน จากการตรวจในสนาม	72
17	น้ำหนักความสำคัญของ Surface Protective Cover จาก Interaction Matrix	77
18	ความน่าจะเป็นของการพิบัติในรูปแบบต่างๆ จากปัญหาด้านต่างๆ	88
19	ตัวอย่างการคำนวณหาความสำคัญเชิงสัมพัทธ์ของสภาพทางกายภาพ	89
20	คำอธิบายกับความเป็นไปได้ (Likelihood) สำหรับการวิเคราะห์ความเสี่ยง	91
21	สภาพความเสี่ยงต่อการไหลล้นข้ามสันเขื่อน	104
22	สภาพความเสี่ยงต่อการกัดเซาะภายใน	105

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
23	สภาพความเสี่ยงต่อการเคลื่อนตัวของเขื่อน	106
24	การหาค่าน้ำหนักของสภาพความเสี่ยง สำหรับการพิบัติแบบการไหลล้น ข้ามสัน-เขื่อน	108
25	การหาค่าน้ำหนักของสภาพความเสี่ยง สำหรับการพิบัติแบบการกัดเซาะ ภายใน	109
26	การหาค่าน้ำหนักของสภาพความเสี่ยง สำหรับการพิบัติแบบการเคลื่อนตัว ของ-เขื่อน	111
27	คะแนนการตรวจสภาพสันเขื่อนและไหล่ทางช่วง สถานี 0+500 ถึง 0+550	130
28	คะแนนการตรวจสภาพลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำช่วง สถานี 0+500 ถึง 0+550	130
29	คะแนนการตรวจสภาพลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำและพื้นที่ด้านท้ายน้ำ ช่วง สถานี 0+500 ถึง 0+550	131
30	คะแนนการตรวจสภาพทางระบายน้ำล้นและอาคารท่อส่งน้ำ	132
31	สภาพความเสี่ยงจาก Fault tree ที่สามารถตรวจสภาพได้ด้วยสายตาของ ลักษณะการพิบัติแบบการกัดเซาะภายใน	153
32	สภาพความเสี่ยงจาก Fault tree ที่สามารถตรวจสภาพได้ด้วยสายตาของ ลักษณะการพิบัติแบบการเลื่อนไถล	155
33	สภาพความเสี่ยงจาก Fault tree ที่สามารถตรวจสภาพได้ด้วยสายตาของ ลักษณะการพิบัติแบบการไหลล้นข้ามสันเขื่อน	156
34	ระดับความเสี่ยงเชิงปริมาณเพื่อหาค่าน้ำหนักความสำคัญที่เหมาะสม	159
35	เส้นทางสภาพของการกัดเซาะภายในที่ตรวจพบจากสาเหตุใน Fault tree ที่นำไปสู่การพิบัติ	160
36	เส้นทางสภาพของการเลื่อนไถลที่ตรวจพบจากสาเหตุใน Fault tree ที่นำไปสู่การพิบัติ	162
37	เส้นทางสภาพของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนที่ตรวจพบจากสาเหตุ ใน Fault tree ที่นำไปสู่การพิบัติ	165

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
38	จำนวนสภาพความเสี่ยงที่สามารถตรวจได้จากบริเวณตัวเขื่อนและ Fault tree ของการกัดเซาะภายใน	168
39	จำนวนสภาพความเสี่ยงที่สามารถตรวจได้จากบริเวณตัวเขื่อนและ Fault tree ของการเลื่อนไถล	169
40	จำนวนสภาพความเสี่ยงที่สามารถตรวจได้จากบริเวณตัวเขื่อนและ Fault tree ของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน	170
41	ผลรวมจำนวนสภาพที่ตรวจสอบได้ตามระดับสภาพความเสี่ยงต่อการกัดเซาะ-ภายใน	171
42	ผลรวมจำนวนสภาพที่ตรวจสอบได้ตามระดับสภาพความเสี่ยงต่อการเลื่อนไถล	171
43	ผลรวมจำนวนสภาพที่ตรวจสอบได้ตามระดับสภาพความเสี่ยงต่อการไหลล้น-ข้ามสันเขื่อน	171
44	ตัวอย่างค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้จากการทดสอบแต่ละกรณีของการกัดเซาะภายใน-เส้นทางการพิบัติที่ 1.1.1	172
45	ระดับความเสี่ยงที่ทำการปรับแก้ของการกัดเซาะภายใน	174
46	ระดับความเสี่ยงที่ทำการปรับแก้ของการเลื่อนไถล	175
47	ระดับความเสี่ยงที่ทำการปรับแก้ของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน	175
48	น้ำหนักความสำคัญของการกัดเซาะภายใน	176
49	น้ำหนักความสำคัญของการเลื่อนไถล	177
50	น้ำหนักความสำคัญของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน	178
51	สรุปค่าดัชนีความเสี่ยงระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง	191
52	ค่าดัชนีความเสี่ยงของเขื่อนหลักของเขื่อนแก่งกระจาน	192
53	ค่าดัชนีความเสี่ยงของเขื่อนปิดช่องเขาหมายเลข 1	193
54	ค่าดัชนีความเสี่ยงของเขื่อนปิดช่องเขาหมายเลข 2	193
55	ค่าดัชนีความเสี่ยงของเขื่อนปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์	196
56	ค่าดัชนีความเสี่ยงของเขื่อนปิดช่องเขาต้า โครงการเขื่อนขุนด่านปราการชล จังหวัดนครนายก	200

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก1	คะแนนสภาพทางระบายน้ำล้นของเขื่อนแก่งกระจาน	229
ก2	คะแนนสภาพอาคารท่อดังน้ำของเขื่อนแก่งกระจาน	229
ค1	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ บนเส้นทางกรพบัติของการกัดเซาะภายในที่ 1.1.1	279
ค2	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ บนเส้นทางกรพบัติของการกัดเซาะภายในที่ 1.1.2	280
ค3	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ บนเส้นทางกรพบัติของการกัดเซาะภายในที่ 1.1.3	281
ค4	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ บนเส้นทางกรพบัติของการกัดเซาะภายในที่ 1.1.4	282
ค5	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ บนเส้นทางกรพบัติของการกัดเซาะภายในที่ 1.2	283
ค6	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ บนเส้นทางกรพบัติของการกัดเซาะภายในที่ 1.3	284
ค7	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ บนเส้นทางกรพบัติของการกัดเซาะภายในที่ 1.4	285

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ค8	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนน้ำโคลนไหลออกทาง- อาคารประกอบ หรือจุดควบคุมการระบาย บนเส้นทางการพิบัติของ- การกักเซาะภายในที่ 2	286
ค9	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ บนเส้นทางการพิบัติของ- การกักเซาะภายในที่ 3.1	287
ค10	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ บนเส้นทางการพิบัติของ- การกักเซาะภายในที่ 3.2	288
ค11	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของ- ทางระบายน้ำล้น บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 1.1	289
ค12	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของ- ทางระบายน้ำล้น บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 1.2	290
ค13	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของ- ทางระบายน้ำล้น บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 1.3	291
ค14	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของ- ทางระบายน้ำล้น บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 1.4	292
ค15	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของ- ทางระบายน้ำล้น บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 1.5	293
ค16	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของ- ทางระบายน้ำล้น บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 1.6	294
ค17	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของ- ทางระบายน้ำล้น บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 1.7	295
ค18	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของ- ทางระบายน้ำล้น บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 1.8	296

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ค19	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการยวบตัวในแนวตั้งของ- ทางระบายน้ำล้น บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 1.9	297
ค20	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเคลื่อนตัวของ- รางระบายน้ำท้ายเขื่อน บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 2.1	298
ค21	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเคลื่อนตัวของ- รางระบายน้ำท้ายเขื่อน บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 2.2	299
ค22	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเคลื่อนตัวของ- รางระบายน้ำท้ายเขื่อน บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 2.3	300
ค23	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเคลื่อนตัวของ- รางระบายน้ำท้ายเขื่อน บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 2.4	301
ค24	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเคลื่อนตัวของ- รางระบายน้ำท้ายเขื่อน บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 2.5	302
ค25	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเคลื่อนตัวของ- รางระบายน้ำท้ายเขื่อน บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 2.6	303
ค26	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเคลื่อนตัวของ- รางระบายน้ำท้ายเขื่อน บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 2.7	304
ค27	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเคลื่อนตัวของ- รางระบายน้ำท้ายเขื่อน บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 2.8	305
ค28	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเคลื่อนตัวของ- รางระบายน้ำท้ายเขื่อน บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 2.9	306
ค29	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยวบตัว, อุดตัว บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 3.1	307
ค30	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยวบตัว, อุดตัว บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 3.2	308

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ค31	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไหลที่ 3.3	309
ค32	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไหลที่ 3.4	310
ค33	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไหลที่ 3.5	311
ค34	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไหลที่ 3.6	312
ค35	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไหลที่ 3.7	313
ค36	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไหลที่ 3.8	314
ค37	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไหลที่ 3.9	315
ค38	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนระดับสันเขื่อนต่ำกว่าระดับน้ำหน้าเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด บนเส้นทางการพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนที่ 1	316
ค39	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนปริมาณน้ำมากเกินสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด บนเส้นทางการพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนที่ 2.1	317
ค40	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนปริมาณน้ำมากเกินสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด บนเส้นทางการพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนที่ 2.2	318
ค41	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนปริมาณน้ำมากเกินสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด บนเส้นทางการพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนที่ 2.3	319
ค42	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนปริมาณน้ำมากเกินสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด บนเส้นทางการพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนที่ 2.4	320

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ค43	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนปริมาณน้ำมากเกินสันเขื่อนหรือระดับน้ำสูงสุด บนเส้นทางการพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนที่ 2.5	321
ค44	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนปริมาณน้ำมากเกินสันเขื่อนหรือระดับน้ำสูงสุด บนเส้นทางการพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนที่ 2.6	322
ค45	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนปริมาณน้ำมากเกินสันเขื่อนหรือระดับน้ำสูงสุด บนเส้นทางการพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนที่ 2.7	323
ค46	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนปริมาณน้ำมากเกินสันเขื่อนหรือระดับน้ำสูงสุด บนเส้นทางการพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนที่ 2.8	324
ค47	ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนปริมาณน้ำมากเกินสันเขื่อนหรือระดับน้ำสูงสุด บนเส้นทางการพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนที่ 2.9	325

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ชนิดเขื่อน	5
2	หน้าตัดเขื่อนห้วยอ่างหิน (เขื่อนดินถมเนื้อเดียว) อ่างเก็บน้ำห้วยอ่างหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ สำนักชลประทานที่ 14 กรมชลประทาน	7
3	หน้าตัดเขื่อนแม่ฮื่อน 2 (เขื่อนดินถมแบ่งส่วน) โครงการอ่างเก็บน้ำแม่ฮื่อน 2 จังหวัดลำปาง สำนักชลประทานที่ 2 กรมชลประทาน	8
4	หน้าตัดเขื่อนแกน้อย (เขื่อนหินลาดหน้า) จังหวัดพิษณุโลก สำนัก ชลประทานที่ 3 กรมชลประทาน	10
5	หน้าตัดเขื่อนถมด้วยระบบสูบ	11
6	ทางระบายน้ำล้นใช้งานของโครงการแม่สอง จังหวัดแพร่ สำนักชลประทาน ที่ 2 กรมชลประทาน	13
7	ทางระบายน้ำล้นสนับสนุนของโครงการเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ จังหวัดลพบุรี สำนักชลประทานที่ 10 กรมชลประทาน	14
8	ทางระบายน้ำล้นฉุกเฉินของโครงการอ่างเก็บน้ำแม่จัด จังหวัดเชียงใหม่ สำนักชลประทานที่ 1 กรมชลประทาน	15
9	หน้าตัดเขื่อนแม่จัด โครงการอ่างเก็บน้ำแม่จัด จังหวัดเชียงใหม่ สำนัก ชลประทาน-ที่ 1 กรมชลประทาน	15
10	อาคารส่งน้ำของเขื่อนแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี สำนักชลประทานที่ 14 กรมชลประทาน (ถ่ายเมื่อ ปี พ.ศ. 2550)	17
11	อาคารส่งน้ำของโครงการอ่างเก็บน้ำลำปายมาศ จังหวัดนครราชสีมา สำนักชลประทานที่ 8 กรมชลประทาน	18
12	โรงไฟฟ้าของเขื่อนวชิราลงกรณ์, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย	19
13	แสดงผลการพิบัติของเขื่อนตามช่วงอายุหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ	27
14	ลักษณะการพิบัติของเขื่อนในสหรัฐอเมริกา (จาก ENR.)	27
15	ลักษณะการพิบัติที่พบในเขื่อนประเภทต่างๆ	28
16	บริเวณในตัวเขื่อนที่สำคัญที่อาจเกิดการกัดเซาะได้	36

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
17	การแตกตามขวาง	38
18	การแตกตามแนวนาน	39
19	เขื่อน Teton เกิดการพิบัติจากการกัดเซาะภายใน	43
20	เขื่อน Fontenelle เกิดการพิบัติจากการกัดเซาะภายใน	44
21	ตำแหน่งการรั่วซึมของเขื่อนมูลบนก่อนการปรับปรุงซ่อมแซม	45
22	การพิบัติของเขื่อน Baldwin Hills	46
23	การพิบัติลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำของเขื่อน Lower San Fernando เนื่องจาก เกิดแผ่นดินไหว	48
24	การประเมินความปลอดภัยเขื่อนโดยทั่วไป	56
25	ขั้นตอนการดำเนินการประเมินความปลอดภัยเขื่อน	57
26	ขั้นตอนการเข้าถึงการประเมินความปลอดภัยเขื่อนสำหรับทางด้านน้ำ (The Hydrologic Safety of Dams)	58
27	การประเมินความเสี่ยงของเขื่อน	62
28	เกณฑ์การยอมรับความเสี่ยงในประเทศสหรัฐอเมริกา	63
29	กระบวนการแบ่งองค์ประกอบของสภาพของวิธี REMR	65
30	การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีสภาพตามเวลาของวิธี REMR	65
31	แผนการทำงานของวิธี SEED	68
32	ตัวอย่างแบบบันทึกการตรวจสอบสภาพเขื่อนดินโดยวิธี SEED	69
33	การจำแนกองค์ประกอบของเขื่อนสำหรับการประเมินสภาพ โดยวิธีดัชนีสภาพ	73
34	Interaction Matrix สำหรับวัตถุประสงค์ด้าน Protective Surface Cover	76
35	การคำนวณค่าดัชนีสภาพของเขื่อนและองค์ประกอบ	80
36	การเปรียบเทียบความพอใจจากการซ่อมแซมด้วยวิธีที่ต่างกัน	81
37	ความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องมือวัดกับรูปแบบการพิบัติ	83
38	ความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องมือวัดกับรูปแบบการพิบัติ	84
39	Fault tree diagram	94

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
40	Fault tree of loss of contaminated fluid	95
41	A sump pump system	97
42	Fault tree for basement flooding	98
43	วิธีการหาค่าดัชนีความเสี่ยง	100
44	ระดับคะแนนสภาพรอยแตกตามยาว ตรวจสอบบริเวณสันเขื่อนและ ไหล่ทาง, ลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำ, ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	114
45	ตัวอย่างการนำเสนอค่าดัชนีสภาพตามระยะสถานีเขื่อน	115
46	การเดินตรวจสภาพสันเขื่อนและไหล่ทาง	117
47	การเดินตรวจสภาพลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	117
48	สภาพลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำเขื่อนแก่งกระจาน	125
49	สภาพลาดเขื่อนท้ายน้ำเขื่อนแก่งกระจาน	125
50	การแบ่งพื้นที่การตรวจสภาพเขื่อนแก่งกระจาน	126
51	สภาพหลุมยุบคะแนนระดับ 4 บริเวณลาดเขื่อนท้ายน้ำ ระดับที่ 1 ช่วงสถานี 350 ถึง 400	126
52	สภาพหลุมยุบคะแนนระดับ 4 บริเวณลาดเขื่อนท้ายน้ำ ระดับที่ 3 ช่วงสถานี 300 ถึง 350	127
53	สภาพหลุมยุบคะแนนระดับ 4 บริเวณลาดเขื่อนท้ายน้ำ ระดับที่ 4 ช่วงสถานี 450 ถึง 500	127
54	สภาพหลุมยุบคะแนนระดับ 3 บริเวณลาดเขื่อนท้ายน้ำ ระดับที่ 1 ช่วงสถานี 650 ถึง 700	128
55	สภาพหลุมยุบคะแนนระดับ 3 บริเวณลาดเขื่อนท้ายน้ำ ระดับที่ 2 ช่วงสถานี 600 ถึง 650	128
56	สภาพหลุมยุบคะแนนระดับ 3 บริเวณลาดเขื่อนท้ายน้ำ ระดับที่ 4 ช่วงสถานี 450 ถึง 500	129
57	การแสดงผลค่าคะแนนสภาพจากการตรวจวัด ตัวอย่างกรณีสภาพหลุมยุบ บริเวณตัวเขื่อนแก่งกระจาน	129

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
58	ตัวอย่างแสดงคะแนนระดับ 3 ของการกัดเซาะ โดยคลื่น ลาดเขื่อน ด้านเหนือน้ำ	133
59	ตัวอย่างแสดงคะแนนระดับ 4 ของต้นไม้, วัชพืช ลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำ	133
60	ตัวอย่างคะแนนระดับ 3 ของสภาพหลุมยุบ ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	134
61	ตัวอย่างคะแนนระดับ 3 ของสภาพรู, โพรง, ท่อ, ถ้ำ ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	134
62	คะแนนระดับ 4 ของต้นไม้, วัชพืช ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	135
63	การเปรียบเทียบดัชนีความเสี่ยงโดยการใช้คะแนนน้อยที่สุด คะแนนเฉลี่ย และคะแนนมากที่สุดของการกัดเซาะภายใน	136
64	ตัวอย่างสภาพต้นไม้, วัชพืช ที่เกิดขึ้นที่มีคะแนน 4 ช่วงสถานี 0+400 ถึง 0+450 ที่มีความเสี่ยงต่อการกัดเซาะภายใน	136
65	การเปรียบเทียบดัชนีความเสี่ยงโดยการใช้คะแนนน้อยที่สุด คะแนนเฉลี่ย และคะแนนมากที่สุดของการเคลื่อนตัวของเขื่อน	137
66	ตัวอย่างสภาพการเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ขุดตัว หรืออุดตัวที่เกิดขึ้นที่มี คะแนน 3 ที่ช่วงสถานี 0+400 ถึง 0+450 ที่มีความเสี่ยงต่อการเลื่อนไถล	138
67	การเปรียบเทียบดัชนีความเสี่ยงโดยการใช้คะแนนน้อยที่สุด คะแนนเฉลี่ย และคะแนนมากที่สุดของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน	139
68	สภาพสันเขื่อนช่วง สถานี 0+300 ถึง 0+350	139
69	ดัชนีความเสี่ยงโดยการใช้คะแนนเฉลี่ยตามลักษณะการพิบัติ	140
70	ดัชนีความเสี่ยงโดยการใช้คะแนนมากที่สุดตามลักษณะการพิบัติ	141
71	ลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำของเขื่อนปิดช่องเขาต่ำของโครงการเขื่อนขุนด่าน ปราการชล	142
72	ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำของเขื่อนปิดช่องเขาต่ำของโครงการเขื่อนขุนด่าน ปราการชล	142
73	ค่าดัชนีความเสี่ยง (ใช้ค่ามาก) ของเขื่อนปิดช่องเขาต่ำ (Saddle Dam) เขื่อนขุนด่านปราการชล	143
74	ค่าดัชนีความเสี่ยง (ใช้ค่ามาก) ของเขื่อนปราณบุรี	144

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
75	ค่าดัชนีความเสี่ยง (ใช้ค่ามาก) ของเขื่อนปราณบุรี	144
76	ค่าดัชนีความเสี่ยง (ใช้ค่ามาก) ของเขื่อนปราณบุรี	145
77	การจำลองสภาพพื้นที่เปียก, น้ำซึม, น้ำไหล, น้ำโคลนไหลเพื่อทดสอบ ค่าดัชนีความเสี่ยง บริเวณ กม. 0+500 ถึง 0+550	146
78	กราฟแสดงค่าดัชนีความเสี่ยง กรณีจำลองการเกิดพื้นที่เปียก, น้ำซึม, น้ำไหล, น้ำโคลนไหล บริเวณ กม. 0+500 ถึง 0+550	146
79	การจำลองสภาพรอยแตกตามขวางเพื่อทดสอบค่าดัชนีความเสี่ยง บริเวณ กม. 0+500 ถึง 0+550	147
80	กราฟแสดงค่าดัชนีความเสี่ยงกรณีจำลองการเกิดรอยแตกตามขวาง บริเวณ กม. 0+500 ถึง 0+550	147
81	การจำลองสภาพการยุบตัวของสันเขื่อนเพื่อทดสอบค่าดัชนีความเสี่ยง บริเวณ กม. 0+500 ถึง 0+550	148
82	กราฟแสดงค่าดัชนีความเสี่ยงกรณีเกิดการยุบตัวสันเขื่อน บริเวณ กม. 0+500 ถึง 0+550	148
83	Fault Tree ของการกัดเซาะภายใน	151
84	Fault Tree ของการเลื่อนไถล	152
85	Fault Tree ของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน	153
86	การแบ่งระดับสภาพความเสี่ยงออกเป็น 3 ระดับได้แก่ สภาพที่สำคัญ ก่อนเกิดพิบัติ, สภาพบ่งชี้ว่าอาจเกิดความบกพร่อง และสภาพเบื้องต้น หรือค้นกำเนิดความบกพร่อง	157
87	เส้นทางการพิบัติที่ 1.1.1 ของการกัดเซาะภายใน	160
88	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างกรณีที่พิจารณากับค่าดัชนีความเสี่ยง	173
89	ความสัมพันธ์ระหว่างสถานีเขื่อนกับดัชนีความเสี่ยงโดยการใช้น้ำหนัก ความสำคัญของสภาพความเสี่ยงจากสาเหตุใน Fault tree เขื่อนแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี	180

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
90	การเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสี่ยงที่ใช้น้ำหนักจาก Fault tree กับน้ำหนักเดิมของการกักเซาะภายใน	181
91	การเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสี่ยงที่ใช้น้ำหนักจาก Fault tree กับน้ำหนักเดิมของการเลื่อนไถล	182
92	การเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสี่ยงที่ใช้น้ำหนักจาก Fault tree กับน้ำหนักเดิมของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน	183
93	การเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสี่ยงของการจำลองสภาพพื้นที่เปียก, น้ำซึม, น้ำใสไหล และน้ำโคลนไหล โดยใช้น้ำหนักเดิมกับน้ำหนักที่พิจารณาจาก Fault tree	184
94	การเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสี่ยงของการจำลองสภาพรอยแตกตามขวาง โดยใช้น้ำหนักเดิมกับน้ำหนักที่พิจารณาจาก Fault tree	185
95	การเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสี่ยงของการจำลองสภาพการยุบตัวของสันเขื่อน โดยใช้น้ำหนักเดิมกับน้ำหนักที่พิจารณาจาก Fault tree	185
96	การกำหนดระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง	186
97	แสดงค่าดัชนีความเสี่ยงตามสถานีเขื่อนกรณีพิจารณาความเสี่ยงตามเส้นทาง-การพิบัติของการกักเซาะภายในในระดับอันตราย	187
98	แสดงค่าดัชนีความเสี่ยงตามสถานีเขื่อนกรณีพิจารณาความเสี่ยงตามเส้นทาง-การพิบัติของการกักเซาะภายในในระดับความเสี่ยงสูง	187
99	แสดงค่าดัชนีความเสี่ยงระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูงของการกักเซาะภายใน	188
100	แสดงค่าดัชนีความเสี่ยงตามสถานีเขื่อนกรณีพิจารณาความเสี่ยงตามเส้นทาง-การพิบัติของการเลื่อนไถลในระดับอันตราย	188
101	แสดงค่าดัชนีความเสี่ยงตามสถานีเขื่อนกรณีพิจารณาความเสี่ยงตามเส้นทาง-การพิบัติของการเลื่อนไถลในระดับความเสี่ยงสูง	189
102	แสดงค่าดัชนีความเสี่ยงระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูงของการเลื่อนไถล	189
103	แสดงค่าดัชนีความเสี่ยงตามสถานีเขื่อนกรณีพิจารณาความเสี่ยงตามเส้นทาง-การพิบัติของการเลื่อนไถลในระดับอันตราย	190

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
104	แสดงค่าดัชนีความเสี่ยงตามสถานีเขื่อนกรณีพิจารณาความเสี่ยงตามเส้นทาง- การพิบัติของการเลื่อนไถลในระดับความเสี่ยงสูง	190
105	แสดงค่าดัชนีความเสี่ยงระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูงของ- การไหลล้นข้ามสันเขื่อน	191
106	ค่าดัชนีความเสี่ยงของการกัดเซาะภายในของเขื่อนแก่งกระจานเทียบกับ- ระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง	194
107	ค่าดัชนีความเสี่ยงของการเลื่อนไถลของเขื่อนแก่งกระจานเทียบกับ- ระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง	195
108	ค่าดัชนีความเสี่ยงของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนของเขื่อนแก่งกระจานเทียบ กับระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง	195
109	ความสัมพันธ์ระหว่างสถานีเขื่อนกับดัชนีความเสี่ยงโดยการใช้น้ำหนัก ความสำคัญของสภาพความเสี่ยงจากสาเหตุใน Fault tree เขื่อนปราณบุรี	198
110	ค่าดัชนีความเสี่ยงของการกัดเซาะภายในของเขื่อนปราณบุรีเทียบกับ- ระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง	198
111	ค่าดัชนีความเสี่ยงของการเลื่อนไถลของเขื่อนปราณบุรีเทียบกับ- ระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง	199
112	ค่าดัชนีความเสี่ยงของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนของเขื่อนปราณบุรีเทียบกับ- ระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง	199
113	ความสัมพันธ์ระหว่างสถานีเขื่อนกับดัชนีความเสี่ยงโดยการใช้น้ำหนัก ความสำคัญของสภาพความเสี่ยงจากสาเหตุใน Fault tree เขื่อนปิดช่องเขาต้า	201
114	ค่าดัชนีความเสี่ยงของการกัดเซาะภายในของเขื่อนปิดช่องเขาต้าเทียบกับ- ระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง	201
115	ค่าดัชนีความเสี่ยงของการเลื่อนไถลของเขื่อนปิดช่องเขาต้าเทียบกับ- ระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง	202
116	ค่าดัชนีความเสี่ยงของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนของเขื่อนปิดช่องเขาต้าเทียบ กับระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง	202

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ก1	คะแนนสภาพขุบตัวที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน	209
ก2	คะแนนสภาพรอยแตกตามขวางที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน	210
ก3	คะแนนสภาพหลุมขุบที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน	211
ก4	คะแนนสภาพต้นไม้, วัชพืชที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน	212
ก5	คะแนนสภาพการขุดหรือย้ายวัสดุถมเขื่อนที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน	213
ก6	คะแนนสภาพรู, โปรง, ท่อ หรือถ้ำที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน	214
ก7	คะแนนสภาพชนิดของหินบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน	215
ก8	คะแนนสภาพการผุสลายของหินบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน	216
ก9	คะแนนสภาพการกัดเซาะ โดยคลื่นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน	217
ก10	คะแนนสภาพบริเวณพื้นที่เปียก, น้ำซึม, น้ำไหล, น้ำโคลนไหล บริเวณเขื่อนแก่งกระจาน	218
ก11	คะแนนสภาพน้ำผุด, พื้นที่เปียก, การไหลซึม ที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน	219
ก12	คะแนนสภาพพื้นที่เปียกเป็นแอ่งกระทะที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน	220
ก13	คะแนนสภาพรอยแตกตามขวางและการบิดออกจากแนวที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน	221
ก14	คะแนนสภาพรอยแตกตามยาวที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน	222
ก15	คะแนนสภาพสันเขื่อนบิดออกจากแนวที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน	223
ก16	คะแนนสภาพการกัดเซาะบริเวณสันเขื่อนที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน	224
ก17	คะแนนสภาพการเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ขุบตัว, อุดตัวที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน	225
ก18	คะแนนสภาพการขุบตัว (Consolidation) ที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน	226
ก19	คะแนนสภาพพื้นที่ร่องลึกจากการกัดเซาะจากน้ำฝนที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน	227
ก20	คะแนนสภาพพื้นที่อุดขึ้นบริเวณท้ายน้ำที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน	228
ข1	เส้นทางการพิบัติของการกัดเซาะภายใน เส้นทางที่ 1.1.1	231
ข2	เส้นทางการพิบัติของการกัดเซาะภายใน เส้นทางที่ 1.1.2	232

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข3	เส้นทางการพิบัติของการกัดเซาะภายใน เส้นทางที่ 1.1.3	233
ข4	เส้นทางการพิบัติของการกัดเซาะภายใน เส้นทางที่ 1.1.4	234
ข5	เส้นทางการพิบัติของการกัดเซาะภายใน เส้นทางที่ 1.2	235
ข6	เส้นทางการพิบัติของการกัดเซาะภายใน เส้นทางที่ 1.3	236
ข7	เส้นทางการพิบัติของการกัดเซาะภายใน เส้นทางที่ 1.4	237
ข8	เส้นทางการพิบัติของการกัดเซาะภายใน เส้นทางที่ 2	238
ข9	เส้นทางการพิบัติของการกัดเซาะภายใน เส้นทางที่ 3.1	239
ข10	เส้นทางการพิบัติของการกัดเซาะภายใน เส้นทางที่ 3.2	240
ข11	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 1.1	241
ข12	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 1.2	242
ข13	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 1.3	243
ข14	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 1.4	244
ข15	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 1.5	245
ข16	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 1.6	246
ข17	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 1.7	247
ข18	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 1.8	248
ข19	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 1.9	249
ข20	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 2.1	250
ข21	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 2.2	251
ข22	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 2.3	252
ข23	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 2.4	253
ข24	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 2.5	254
ข25	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 2.6	255
ข26	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 2.7	256
ข27	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 2.8	257

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข28	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 2.9	258
ข29	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 3.1	259
ข30	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 3.2	260
ข31	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 3.3	261
ข32	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 3.4	262
ข33	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 3.5	263
ข34	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 3.6	264
ข35	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 3.7	265
ข36	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 3.8	266
ข37	เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 3.9	267
ข38	เส้นทางการพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน เส้นทางที่ 1	268
ข39	เส้นทางการพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน เส้นทางที่ 2.1	269
ข40	เส้นทางการพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน เส้นทางที่ 2.2	270
ข41	เส้นทางการพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน เส้นทางที่ 2.3	271
ข42	เส้นทางการพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน เส้นทางที่ 2.4	272
ข43	เส้นทางการพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน เส้นทางที่ 2.5	273
ข44	เส้นทางการพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน เส้นทางที่ 2.6	274
ข45	เส้นทางการพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน เส้นทางที่ 2.7	275
ข46	เส้นทางการพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน เส้นทางที่ 2.8	276
ข47	เส้นทางการพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน เส้นทางที่ 2.9	277
ง1	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1.1.1 ของการทดสอบคะแนนสภาพน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	327
ง2	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1.1.2 ของการทดสอบคะแนนสภาพน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	327

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ง3	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1.1.3 ของการทดสอบคะแนนสภาพน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	328
ง4	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1.1.4 ของการทดสอบคะแนนสภาพน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	328
ง5	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1.2 ของการทดสอบคะแนนสภาพน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	329
ง6	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1.3 ของการทดสอบคะแนนสภาพน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	329
ง7	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1.4 ของการทดสอบคะแนนสภาพน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	330
ง8	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2 ของการทดสอบคะแนนน้ำโคลนไหลออกทางอาคารประกอบหรือจุดควบคุมการระบาย	330
ง9	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 3.1 ของการทดสอบคะแนนสภาพน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	331
ง10	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 3.2 ของการทดสอบคะแนนสภาพน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	331

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ง11	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1.1 ของการทดสอบคะแนนสภาพการขุบตัวในแนวคิ่งของทางระบายน้ำล้น	332
ง12	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1.2 ของการทดสอบคะแนนสภาพการขุบตัวในแนวคิ่งของทางระบายน้ำล้น	332
ง13	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1.3 ของการทดสอบคะแนนสภาพการขุบตัวในแนวคิ่งของทางระบายน้ำล้น	333
ง14	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1.4 ของการทดสอบคะแนนสภาพการขุบตัวในแนวคิ่งของทางระบายน้ำล้น	333
ง15	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1.5 ของการทดสอบคะแนนสภาพการขุบตัวในแนวคิ่งของทางระบายน้ำล้น	334
ง16	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1.6 ของการทดสอบคะแนนสภาพการขุบตัวในแนวคิ่งของทางระบายน้ำล้น	334
ง17	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1.7 ของการทดสอบคะแนนสภาพการขุบตัวในแนวคิ่งของทางระบายน้ำล้น	335
ง18	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1.8 ของการทดสอบคะแนนสภาพการขุบตัวในแนวคิ่งของทางระบายน้ำล้น	335

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ง19	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1.9 ของการทดสอบคะแนนสภาพการขุดตัวในแนวโค้งของทางระบายน้ำล้น	336
ง20	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.1 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน	336
ง21	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.2 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน	337
ง22	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.3 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน	337
ง23	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.4 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน	338
ง24	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.5 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน	338
ง25	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.6 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน	339
ง26	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.7 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน	339
ง27	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.8 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน	340

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ง28	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.9 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำ-ท้ายเขื่อน	340
ง29	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 3.1 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว	341
ง30	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 3.2 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว	341
ง31	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 3.3 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว	342
ง32	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 3.4 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว	342
ง33	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 3.5 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว	343
ง34	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 3.6 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว	343
ง35	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 3.7 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว	344

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ง36	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 3.8 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว	344
ง37	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 3.9 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว	345
ง38	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1 ของการทดสอบคะแนนสภาพระดับสันเขื่อนต่ำกว่าระดับน้ำหน้าเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด	345
ง39	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.1 ของการทดสอบคะแนนสภาพปริมาณน้ำมากเกินไปสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด	346
ง40	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.2 ของการทดสอบคะแนนสภาพปริมาณน้ำมากเกินไปสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด	346
ง41	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.3 ของการทดสอบคะแนนสภาพปริมาณน้ำมากเกินไปสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด	347
ง42	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.4 ของการทดสอบคะแนนสภาพปริมาณน้ำมากเกินไปสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด	347
ง43	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.5 ของการทดสอบคะแนนสภาพปริมาณน้ำมากเกินไปสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด	348

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ง44	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาง- การพิบัติที่ 2.6 ของการทดสอบคะแนนสภาพปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด	348
ง45	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาง- การพิบัติที่ 2.7 ของการทดสอบคะแนนสภาพปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด	349
ง46	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาง- การพิบัติที่ 2.8 ของการทดสอบคะแนนสภาพปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด	349
ง47	แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาง- การพิบัติที่ 2.9 ของการทดสอบคะแนนสภาพปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด	350

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	Abutments
a, b, c	=	ค่าคงที่ซึ่งประมาณได้จากข้อมูลในอดีต
age <sub>i</sub>	=	อายุของโครงสร้าง i
CF <sub>j</sub>	=	Condition Function ขององค์ประกอบที่ตรวจสอบ j
CS	=	Crest and shoulder
C <sub>in</sub>	=	สภาพเขื่อนด้านข้อมูล
C <sub>con</sub>	=	การตรวจสอบ
DE	=	Dam embankment
DG	=	Downstream groins
DS	=	Downstream slope
DV <sub>MD</sub> (i)	=	Diagnostic Value of Monitoring Device i
D <sub>1</sub>	=	ความเพียงพอของทางระบายน้ำล้น
D <sub>2</sub>	=	สัดส่วนความปลอดภัยต่อการเคลื่อนตัว
E <sub>1</sub>	=	อายุของเขื่อน
E <sub>2</sub>	=	แรงแผ่นดินไหว (Seismicity)
H	=	ความเสี่ยงภัยของพื้นที่ท้ายน้ำของเขื่อน
I <sub>dam</sub>	=	ความสำคัญของเขื่อน
I <sub>1</sub>	=	ความสูงของเขื่อน
I <sub>2</sub>	=	ประเภทของเขื่อน
I <sub>3</sub>	=	ชนิดของฐานรากเขื่อน
I <sub>4</sub>	=	ปริมาณเก็บกักน้ำ
ICOLD	=	International Commission of Large Dams
IDA	=	An incremental damage assessment
IDF	=	The inflow design flood
K <sub>i</sub>	=	ค่าความสำคัญที่ได้จากสัมพันธกับงบประมาณการซ่อมแซมบำรุงรักษา

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$LN(,)$	=	ฟังก์ชันการกระจายความน่าจะเป็นแบบ Lognormal
MN	=	Management
$n_{AC}$	=	จำนวน สภาพอันตรายทั้งหมดใน Indicator j
$n_i$	=	จำนวน Indicator ทั้งหมด
NZSOLD	=	The New Zealand Society on Large Dams
Obj i	=	วัตถุประสงค์ i
OL	=	Outlets
$P[AC_k/f]$	=	ความน่าจะเป็นของการพิบัติเมื่อเกิดสภาพอันตรายแบบ k
$P[C/M_j]$	=	ความน่าจะเป็นของการพิบัติในรูปแบบการพิบัติแบบ i จากสภาพทางกายภาพ j
$P[M/F]$	=	ความน่าจะเป็นของการพิบัติของเขื่อนด้วยรูปแบบการพิบัติแบบ i
$P[X/M_i \cap F]$	=	ความน่าจะเป็นที่เกิดเหตุการณ์ $X_i$ ในรูปแบบการพิบัติแบบ i และเขื่อนพิบัติ
$P''[M/X_i \cap F]$	=	ความน่าจะเป็นของการพิบัติรูปแบบ i จากเหตุการณ์ $X_i$ และเขื่อนพิบัติ
PMF	=	The probability maximum flood
$PR_i$	=	Priority ranking of the device i
$R_i$	=	คะแนนของสภาพความเสี่ยงขององค์ประกอบใดๆ
RA	=	Risk assessment
$rank_i$	=	ลำดับของวัตถุประสงค์ที่พิจารณา
$RDV_j(k)$	=	Relative Diagnostic Value ของ Indicator j ในสภาพอันตรายแบบ k
$RDV_{MDi}(j)$	=	Relative Diagnostic Value ของเครื่องมือตรวจวัด i ใน Indicator j

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

REMR	=	Repair, Evaluation, Maintenance and Rehabilitation
$RI_i$	=	ดัชนีความเสี่ยงจากลักษณะการพิบัติใดๆ
$RI_j$	=	ความสำคัญเชิงสัมพัทธ์ของสภาพทางกายภาพ j
RW	=	Reservoir and watershed area
SEED	=	Safety Evaluation of Existing Dams
$size_i$	=	ขนาดของโครงสร้าง i
SW	=	Spillway
UG	=	Upstream groins
US	=	Upstream slope
USACE	=	U.S. Army Corps of Engineers
USBR	=	U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation
V	=	ความล่อแหลมของเขื่อน
$W_i$	=	น้ำหนักปัจจัยร่วมของสภาพขององค์ประกอบใดๆ
$W_{in}$	=	น้ำหนักความสำคัญด้านข้อมูล
$W_{con}$	=	น้ำหนักความสำคัญด้านการตรวจสอบ
$X_i$	=	เหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องเนื่องถึงการพิบัติ
$\mu_i$	=	ค่าดัชนีสภาพเฉลี่ยของโครงสร้าง i
$\mu$	=	ค่าเฉลี่ย
$\sigma$	=	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## การตรวจสอบสภาพเขื่อนดินโดยวิธีดัชนีความเสี่ยง

### Earthfill Dam Inspection by Risk Index Method

#### คำนำ

การเก็บกักน้ำเพื่อใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ จำเป็นที่จะต้องมีเขื่อนที่ก่อสร้างในบริเวณพื้นที่ที่เหมาะสม และมีการบำรุงรักษาเขื่อนอย่างถูกต้อง เพื่ออายุการใช้งานเขื่อนที่ยาวนาน เพราะถ้าหากเขื่อนขาดการบำรุงรักษาให้คงสภาพที่ดี หรือมีการบำรุงรักษาไม่เหมาะสม จะทำให้เขื่อนมีอายุการใช้งานลดลง อาจเกิดการพิบัติกับเขื่อนได้ และก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิต และทรัพย์สินท้ายเขื่อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีเขื่อนจะต้องมีการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสมซึ่งมีหลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีจะมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน สำหรับการตรวจสอบสภาพเขื่อนด้วยสายตาเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้กันในระดับสากล และใช้สำหรับการตรวจสอบเขื่อนจากอดีตมาจนกระทั่งถึงปัจจุบัน อีกทั้งยังได้มีการพัฒนาให้มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น การตรวจสอบสภาพเขื่อนด้วยสายตาทำให้ทราบถึงความเหมาะสมในการบำรุงรักษาเขื่อนสำหรับแต่ละองค์ประกอบของเขื่อนได้

การตรวจสอบสภาพเขื่อนที่ใช้ในปัจจุบันใช้การตรวจสอบสภาพเขื่อนด้วยสายตา และมีหลายหน่วยงานที่คิดค้นการตรวจสอบสภาพเขื่อน เช่น การตรวจสอบสภาพเขื่อนโดยวิธี REMR (Repair, Evaluation, Maintenance, and Rehabilitation, ช่วงปี ค.ศ. 1994-1998) เป็นงานวิจัยของ U.S. Army Corps of Engineers [USACE], การตรวจสอบสภาพโดยวิธี SEED (Safety Evaluation of Existing Dams, ปี ค.ศ. 1995) ของ U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation [USBR], การประเมินความปลอดภัยและวางแผนบำรุงรักษาเขื่อนดินโดยวิธีดัชนีสภาพ (อนุสรณ์, 2542) นำโดย ดร.วรากร ไม้เรียง เป็นที่ปรึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ใช้ในการตรวจสอบสภาพเขื่อนของสำนักชลประทานที่ 9 กรมชลประทาน เป็นต้น สำหรับการวิจัยชิ้นนี้ได้้นำแต่ละวิธีของการตรวจสอบสภาพเขื่อนด้วยสายตาข้างต้น นำมาประยุกต์ใช้รวมกันกับหลักการความเสี่ยงจะได้ออกมาเป็นวิธีดัชนีความเสี่ยง (Risk Index) เพื่อใช้สำหรับประเมินความปลอดภัยเขื่อนดินที่ใช้งานสำหรับเก็บกักน้ำ ดังจะได้กล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

## วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการวิจัย มีดังนี้

1. เพื่อศึกษาและเสนอการตรวจสอบสภาพเขื่อนด้วยสายตาของเขื่อนดินโดยวิธีดัชนีความเสี่ยง สำหรับการประเมินดัชนีความเสี่ยงของเขื่อน
2. เพื่อหาวิธีการให้นำหนักความสำคัญของสภาพความเสี่ยงให้เหมาะสมกับสภาพที่เกิดขึ้นและแสดงถึงความเสี่ยงที่แท้จริง

### ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของการวิจัยมีดังนี้

1. การตรวจสอบสภาพเขื่อนจะใช้วิธีการที่อยู่บนพื้นฐานของการตรวจสอบสภาพเขื่อนด้วยสายตา
2. การทดสอบการตรวจสอบสภาพเขื่อนดินโดยวิธีดัชนีความเสี่ยง โดยการใช้เขื่อนตัวอย่างคือ เขื่อนปิดช่องเขาดำ (Saddle Dam) ของโครงการเขื่อนขุนด่านปราการชล จังหวัดนครนายก, เขื่อนแก่งกระจานของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี, เขื่อนปราณบุรีของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

## การตรวจเอกสาร

### เขื่อน

เขื่อนที่ได้ทำการก่อสร้างขึ้นเพื่อใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ นั้น ได้มีหน่วยงาน หรือ ผู้ให้นิยามไว้หลายนิยาม ดังนี้ คือ

State Engineer's Office State of Colorado ได้ให้นิยามไว้ว่า “เขื่อน คือ สิ่งปิดกั้นที่มนุษย์สร้างขึ้น ถูกสร้างขึ้นบนพื้นที่ธรรมชาติเพื่อควบคุมหรือเก็บกักน้ำ” (State Engineer's Office State of Colorado, 1995 (พิมพ์ใหม่ 2001))

The New Zealand Society on Large Dams ให้นิยามไว้ว่า “เขื่อน คือ โครงสร้างที่สามารถเก็บกักน้ำ หรือ ฝันน้ำ โดยทั่วไปเขื่อนขนาดเล็กถูกสร้างโดยดินถมบดอัด แต่อาจสร้างด้วยคอนกรีต, หินก่อ, หรือไม้” (The New Zealand Society on Large Dams [NZSOLD], 1997)

British Columbia ให้นิยามไว้ว่า “เขื่อน คือ สิ่งที่มนุษย์สร้างขึ้นเพื่อเก็บกักน้ำ หรือ ฝันน้ำ เขื่อนที่กล่าวนี้จะรวมถึงงาน (ส่วนประกอบ) ทั่วไป, จำเป็นสำหรับ, หรือเกี่ยวข้องกับ, การปิดกั้น” (British Columbia, 1998)

วรากร ไ้ไม่เรียง นิยามไว้ว่า “เขื่อนถม คือ เขื่อนที่ก่อสร้างจากวัสดุที่เป็นดินและหินเป็นส่วนใหญ่ นำมาบดอัดเป็นตัวเขื่อนซึ่งมักมีรูปตัดเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู ที่มีฐานผายกว้างออกไป และส่วนสันแคบลง โดยมีขนาดกว้างราว 5 ถึง 15 เมตร” (วรากร, 2542)

## ชนิดของเขื่อน

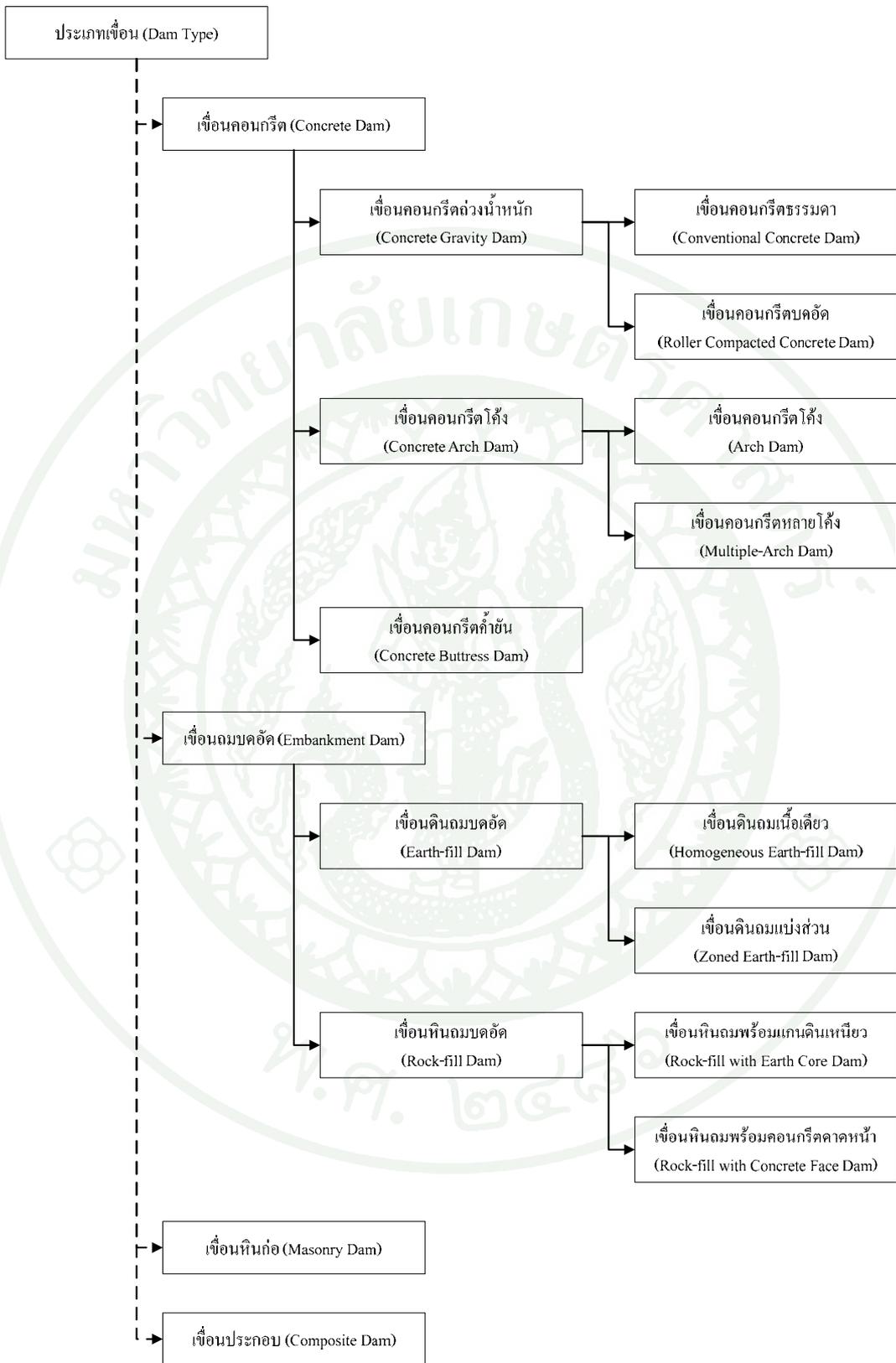
ชนิดของเขื่อนหากทำการแบ่งโดยวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างเขื่อน จะมีอยู่ 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ เขื่อนคอนกรีต (Concrete Dam) และเขื่อนถมบดอัด (Embankment Dam) มีรายละเอียด ดังนี้

Robert (1988) ได้เขียนไว้ในหนังสือชื่อ Advanced Dam Engineering for Design, Construction, and Rehabilitation ว่า “เขื่อนโดยปกติแบ่งในเทอมของวัสดุและรูปร่าง ชนิดธรรมดา โดยทั่วไปคือดินถมเนื้อเดียวหรือดินถมแบ่งส่วน, เขื่อนหินทิ้งพร้อมแกนดินเหนียวหรือคอนกรีต คาคาน้ำ และเขื่อนคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกระแสน้ำที่ผ่านคือ การถ่วงน้ำหนัก, การโค้ง หรือ ค้ำยัน โครงสร้างถูกสนับสนุนโดยการค้ำยันถูกแบ่งประเภท เช่น flat-slab (Ambursen), multiple-arch, หรือ massive-head บางเขื่อนประกอบด้วยวัสดุหลายชนิด คือ ดินถมบดอัด, หินถมบดอัด, หินก่อ และคอนกรีต เขื่อนที่มีเพียงเล็กน้อย คือ timber, asphaltic หรือ synthetic membranes” อาจเขียนแสดงในภาพที่ 1 ชนิดของเขื่อน

สำหรับในการวิจัยชิ้นนี้จะทำการศึกษาวิจัยเฉพาะกรณีของเขื่อนดินถมบดอัดเท่านั้น มีรายละเอียดดังนี้

เขื่อนถม คือ เขื่อนที่ก่อสร้างจากวัสดุที่เป็นดินและหินเป็นส่วนใหญ่ นำมาบดอัดเป็นตัว เขื่อนซึ่งมักมีรูปตัดเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู ที่มีฐานผายกว้างออกไป และส่วนสันแคบลง วัสดุที่ใช้จะพยายามใช้วัสดุธรรมชาติที่มีอยู่ใกล้บริเวณสถานที่ก่อสร้างให้มากที่สุด เพราะต้องใช้เป็นปริมาณ มาก จึงไม่เป็นการประหยัดถ้าจะต้องขนย้ายมาจากที่ห่างไกล เขื่อนถมมักเหมาะกับช่องเขาที่มี ลักษณะผายกว้าง และไหล่เขาไม่ชันมากนัก ลักษณะหินฐานรากไม่จำเป็นต้องแข็งแรงมากเหมือน ของเขื่อนคอนกรีต จึงเป็นแบบที่เหมาะสมกับสภาพภูมิประเทศและธรณีวิทยาสำหรับประเทศไทย (วรากร, 2542)

ดังนั้นเขื่อนส่วนใหญ่ในประเทศไทยจึงเป็นเขื่อนประเภทนี้ เขื่อนถมสามารถแบ่งออกได้ หลายชนิด (4 ชนิด) ดังนี้ คือ เขื่อนดินเนื้อเดียว (Homogeneous Dam), เขื่อนถมแบ่งส่วน (Zoned Dam), เขื่อนหินคาน้ำ (Faced Dam) และเขื่อนถมด้วยระบบสูบ (Hydraulic Filled Dam) ได้อธิบายลักษณะเขื่อนดินถมชนิดต่างๆ ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 1 ชนิดเขื่อน

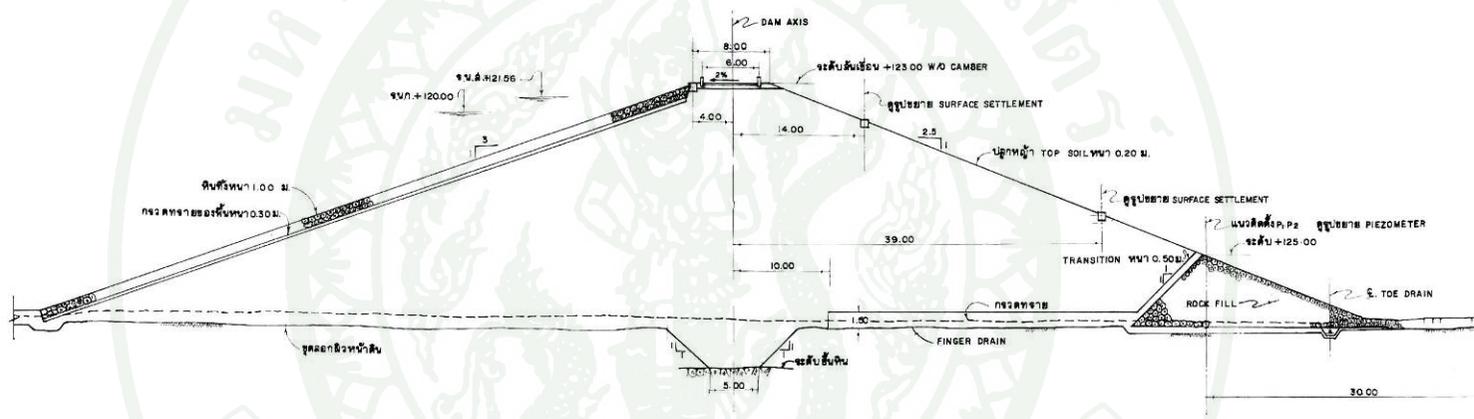
เขื่อนดินเนื้อเดียว (Homogeneous Dam) เป็นเขื่อนที่ก่อสร้างจากการบดอัด วัสดุชนิดเดียวกันเป็นส่วนใหญ่ ส่วนมากจะเป็นดินในกลุ่มของ GC, SC, ML, CL (Unified Soil-Classification) ซึ่งสามารถบดอัดได้ดีมีความแข็งแรงและที่บ้น้ำพอสมควร เขื่อนชนิดนี้จะต้องมีส่วนที่สำคัญ คือ ชั้นกรองน้ำ (Filter) หรือระบายน้ำ (Drain) ทางด้านท้ายน้ำที่ดินเขื่อน หรือภายในตัวเขื่อน เพื่อเป็นทางระบายป้องกันการกัดเซาะที่เกิดจากน้ำไหลผ่านตัวเขื่อน หรือ ฐานราก เนื่องจากวัสดุที่ใช้ไม่มีความแข็งแรงมากนักจึงไม่ควรก่อสร้างเป็นเขื่อนขนาดใหญ่ ซึ่งความสูงเกิน 40 เมตร เพราะจะไม่ปลอดภัยและไม่ประหยัด (วรารกร, 2542)

ภาพที่ 2 แสดงหน้าตัดเขื่อนห้วยอ่างหิน (เขื่อนดินถมเนื้อเดียว) ของกรมชลประทาน ตั้งอยู่ที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ความสูงเขื่อน 23 เมตร ความยาว 483 เมตร และความกว้างสันเขื่อน 8 เมตร ประกอบด้วยชั้นระบายน้ำแนวนอน (Horizontal Drain) และหินท้ายเขื่อน (Rock Toe)

เขื่อนถมแบ่งส่วน (Zoned Dam) ใช้ในกรณีเขื่อนถมที่ค่อนข้างใหญ่ มักจะใช้วัสดุหลายชนิดมาประกอบกัน โดยเลือกใช้วัสดุให้มีประสิทธิภาพสูงสุดตามศักยภาพ คือนำเอาคุณสมบัติที่ดีของแต่ละอย่างมาใช้อย่างเต็มที่ เช่น ใช้ดินเหนียวเป็นส่วนที่ที่บ้น้ำ เรียกว่า “แกนเขื่อน” (Core Zone) ดินปนกรวดหรือหินที่มีความแข็งแรงมากกว่ามาใช้ในส่วนนอก เพื่อให้เกิดความมั่นคง เรียกว่า “ส่วนเปลือก” (Shell) ในกรณีที่มีวัสดุมากกว่า 2 ชนิด (วรารกร, 2542)

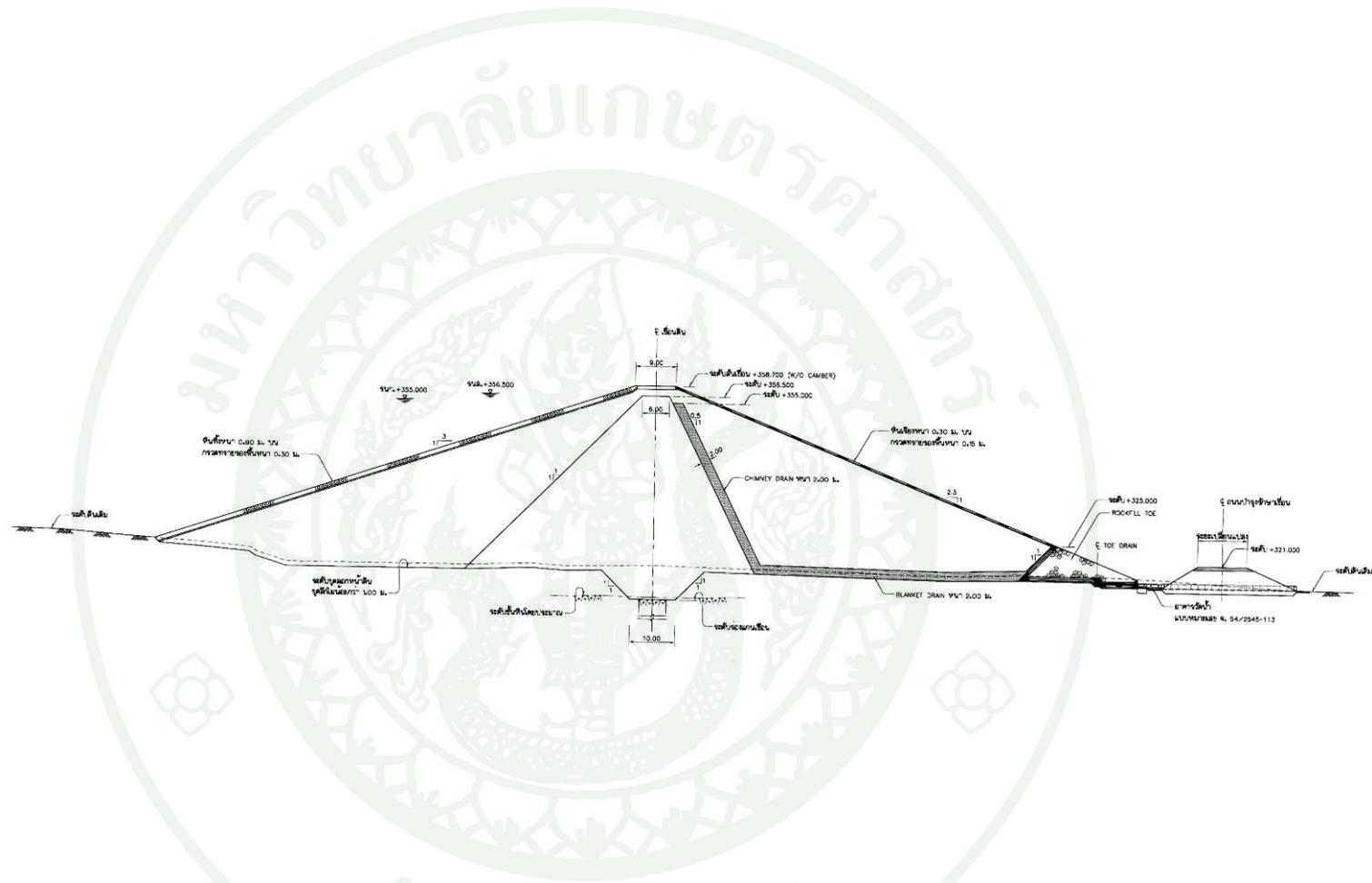
ภาพที่ 3 หน้าตัดเขื่อนแม่ฮ้อน 2 (เขื่อนดินถมแบ่งส่วน) ของกรมชลประทาน ตั้งอยู่ที่จังหวัดลำปาง ความสูงเขื่อน 38.7 เมตร ความยาวเขื่อน 430.57 เมตร และความกว้างสันเขื่อน 9 เมตร ประกอบด้วยดินเหนียวแกนกลางเขื่อน (Clay Core) ชั้นระบายน้ำแนวเอียง (Chimney Drain) ชั้นระบายน้ำแนวนอน (Horizontal Drain) และหินท้ายเขื่อน (Rock Toe)

เขื่อนหินคาดหน้า (Faced Dam) เมื่อมีวัสดุก่อสร้างเป็นหินหาได้ง่ายในบริเวณที่ตั้งของโครงการ และราคาถูกก็สามารถนำมาบดอัดเป็นตัวเขื่อนให้มีลาดเขื่อนชันขึ้นได้อีก เพราะหินมีความแข็งแรงสูง โดยจะก่อสร้างส่วนที่ที่บ้น้ำไว้ทางด้านลาดเขื่อนเหนือน้ำ ซึ่งคาดด้วยแผ่นพื้นคอนกรีตหรือแอสฟัลซีเมนต์ หรือวัสดุอื่นๆ ซึ่งกันน้ำได้ปิดกั้นหน้าลาดเขื่อนแล้วเชื่อมต่อกับแนวอัดค้ำน้ำปูนในฐานราก (วรารกร, 2542)



ภาพที่ 2 หน้าตัดเขื่อนหัวอ่างหิน (เขื่อนดินถมเนื้อเดียว) อ่างเก็บน้ำหัวอ่างหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์  
สำนักชลประทานที่ 14 กรมชลประทาน

ที่มา: กองออกแบบ กรมชลประทาน. หมายเลขแบบ 67901



ภาพที่ 3 หน้าตัดเขื่อนแม่ฮ่องสอน 2 (เขื่อนดินถมแบ่งส่วน) โครงการอ่างเก็บน้ำแม่ฮ่องสอน 2 จังหวัดลำปาง  
สำนักชลประทานที่ 2 กรมชลประทาน

ที่มา: กรมชลประทาน, กองออกแบบ, หมายเลขแบบ จ.54/2545-104

ภาพที่ 4 หน้าตัดเขื่อนแควน้อย (เขื่อนหินถมคาบหน้าด้วยคอนกรีต) จังหวัดพิษณุโลก ความสูงเขื่อน 75 เมตร ความยาวสันเขื่อน 681 เมตร ความกว้างสันเขื่อน 9 เมตร ตัวเขื่อนประกอบด้วยหินถมคาบหน้าด้วยคอนกรีต

เขื่อนถมด้วยระบบสูบ (Hydraulic Filled Dam) สามารถก่อสร้างจากดินตะกอน กรวดทราย ที่สูบขึ้นมาจากแหล่งวัสดุเหลือทิ้งของเหมืองหรือแหล่งอื่นๆ ที่จำเป็นต้องใช้แหล่งน้ำเพื่อการผลิตส่งมาตามท่อแล้วปล่อยออกให้ไหลจากลาดเขื่อนด้านนอกเข้าหาแกนดินหรือกรวดทรายที่มีเม็ดใหญ่กว่าก็ขึ้นเอง โดยธรรมชาติของการตกตะกอน แกนเขื่อนก็จะทับน้ำเพราะเป็นดินเม็ดเล็ก ในขณะที่ภายนอกจะมีความแข็งแรงเพราะเป็นเม็ดใหญ่ แต่เนื่องจากเขื่อนประเภทนี้ไม่มีการบดอัด ดังนั้นจึงต้องมีลาดเขื่อนที่แบนราบมาก เพื่อให้เกิดความมั่นคงของลาดเขื่อน (วรากร, 2542) ดังภาพที่ 5

### โครงสร้างประกอบเขื่อน

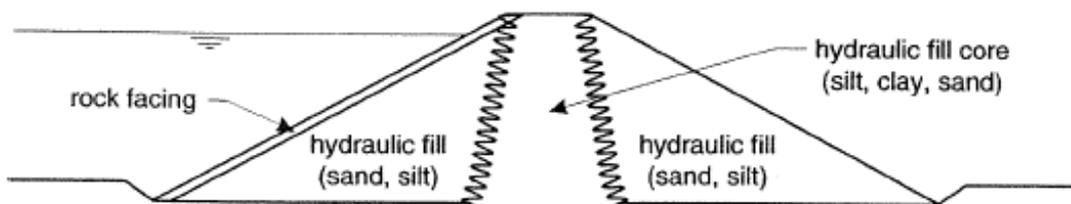
โครงสร้างประกอบเขื่อนที่สร้างขึ้นบริเวณเขื่อนเพื่อช่วยให้เขื่อนสามารถส่งน้ำหรือระบายน้ำได้ มีหลายหน่วยงานให้นิยามไว้ ดังนี้

โครงสร้างประกอบเขื่อน หมายถึง โครงสร้างและอุปกรณ์ในบริเวณโครงการ หรืออื่นๆ ที่ตัวเขื่อนมี และเพื่อความสะดวก เช่น ทางระบายน้ำล้น, ทุ่นลอย (Log Booms), หอทางเข้าของน้ำ (Intake Towers), โครงสร้างโรงไฟฟ้า, ท่อ, คลอง, ท่อส่งน้ำไปโรงไฟฟ้า (Penstocks), ท่อส่งน้ำระดับต่ำ, ถังความดันและหอคอย (Surge Tank and Tower), เครื่องกว้านบานระบายและโครงสร้างรองรับ (Gate Hoist Mechanisms and Their Support Structures), และการควบคุมน้ำระดับวิกฤติ และเครื่องช่วยลดระดับวิกฤติ รวมถึงการควบคุมระบบเครื่องกลและไฟฟ้า และระบบพลังงานไฟฟ้าสำรองที่อยู่บริเวณ โรงไฟฟ้า หรือศูนย์ควบคุมระยะไกล (Ministry of Environment, Lands and Parks Water Management Branch of British Columbia, 1998)



ภาพที่ 4 หน้าตัดเขื่อนแควน้อย (เขื่อนหินลาดหน้า) จังหวัดพิษณุโลก สำนักชลประทานที่ 3  
กรมชลประทาน

ที่มา: สำนักออกแบบวิศวกรรมและสถาปัตยกรรม, หมายเลขแบบ กจ.17/2540-1-0203 (2545)



HYDRAULIC FILL – SCALE B

## NOTES:

1. Crest detailing and downstream slope protection not shown.
2. Scales relate to overall size, details are not drawn to scale.

Scale B 0 20 40m

ภาพที่ 5 หน้าตัดเขื่อนถมด้วยระบบสูบ

ที่มา: Robin *et al.* (2005)

โครงสร้างประกอบเขื่อน หมายถึง โครงสร้างที่สนับสนุนตัวเขื่อน เช่น ท่อส่งน้ำ, ทางระบายน้ำล้น, โรงไฟฟ้า, อุโมงค์ เป็นต้น (U.S. Department of Homeland Security Federal Emergency Management Agency, 2004)

### ทางระบายน้ำล้น (Spillway)

ทางระบายน้ำล้นสร้างขึ้นมาประกอบเขื่อนที่ตั้งอยู่บนฐานหินแข็ง บริเวณฐานยันเขื่อนฝั่งซ้าย หรือขวาของตัวเขื่อน ในบางครั้งอาจตั้งอยู่บริเวณกลางเขื่อนหากฐานรากเป็นหินแข็งแรง หรือบางครั้งอาจตั้งอยู่นอกตัวเขื่อน ในบริเวณที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างทางระบายน้ำล้น ได้มีหน่วยงานนิยามทางระบายน้ำล้น ดังนี้

ทางระบายน้ำล้น คือ โครงสร้างที่น้ำในอ่างเก็บน้ำไหลผ่าน ถ้าหากอัตราการไหลผ่านถูกควบคุมโดยอุปกรณ์เครื่องกล เช่น บาน ทางนั้นจะถูกพิจารณาเป็นทางระบายน้ำล้นที่ถูกควบคุม แต่ถ้าหากควบคุมโดยสันฝายของอาคารเท่านั้นจะพิจารณาเป็นทางระบายน้ำล้นที่ไม่ถูกควบคุม (U.S. Department of Homeland Security Federal Emergency Management Agency October, 1998 (จัดพิมพ์ใหม่ เมษายน 2004))

สำหรับหน้าที่ของทางระบายน้ำล้น คือ ระบายน้ำที่มากเกินไปเกินความต้องการออกไป เพื่อป้องกันอันตรายจากการที่น้ำเอ่อล้นสันเขื่อน ในเขื่อนหนึ่งๆ อาจมีทางระบายน้ำล้นเพียงทางเดียว หรือสองทางแล้วแต่ความจำเป็น (วารากร, 2542) คือ

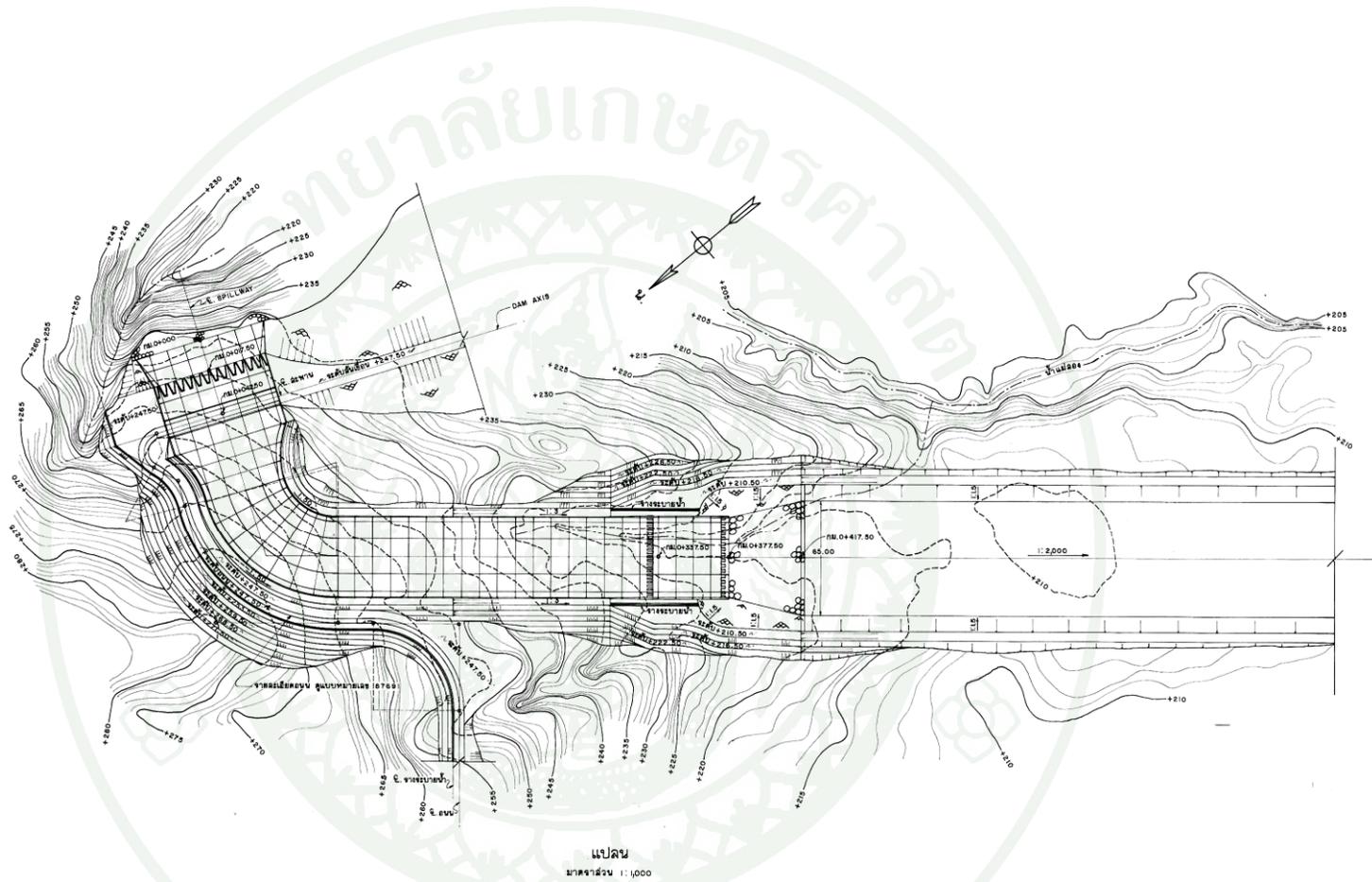
นอกจากนี้ทางระบายน้ำล้นยังแบ่งออกเป็นหลายชนิด ดังนี้

ทางระบายน้ำล้นใช้งาน (Service Spillway) จะใช้ในการควบคุมระดับน้ำในเขื่อนมีหลายประเภท ซึ่งเขื่อนทุกเขื่อนจำเป็นต้องมี (วารากร, 2542) (ภาพที่ 6)

ทางระบายน้ำล้นใช้งาน หมายถึง ทางที่ได้ออกแบบเพื่อระบายน้ำโดยการถูกบังคับด้วยบาน หรือปล่อยน้ำอย่างอิสระ ออกจากอ่างเก็บน้ำซึ่งปราศจากความเสียหายของเขื่อนหรืออาคารประกอบ เรียกว่า ทางระบายน้ำล้นหลัก (U.S. Department of Homeland Security Federal Emergency Management Agency October, 1998 (จัดพิมพ์ใหม่ เมษายน 2004))

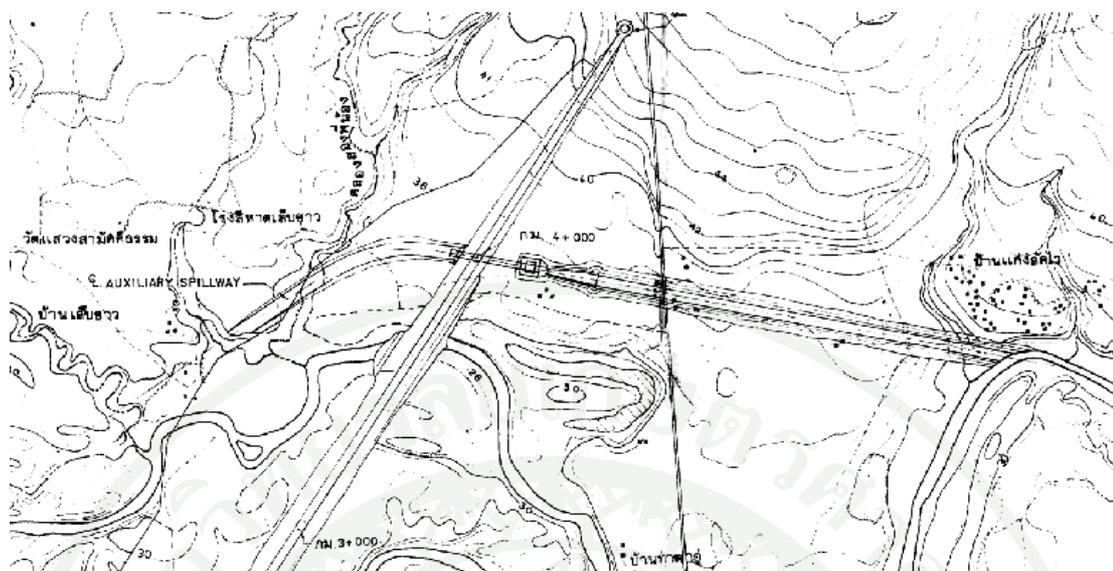
ทางระบายน้ำฉุกเฉิน (Emergency Spillway) หรือทางระบายน้ำล้นสนับสนุน (Auxiliary Spillway) ได้มีผู้นิยามไว้ ได้แก่

U.S. Department of Homeland Security Federal Emergency Management Agency October (1998) ได้นิยามไว้ดังนี้ คือเป็นทางระบายน้ำล้นอันดับสอง หรืออันดับรอง ที่ถูกออกแบบเพื่อปล่อยน้ำนานๆ ครั้ง อาจมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดความเสียหาย หรือการกัดเซาะ โครงสร้างของอาคารระบายน้ำขณะปล่อยน้ำ (ภาพที่ 7)



ภาพที่ 6 ทางระบายน้ำล้นใช้งานของโครงการแม่สอง จังหวัดแพร่ สำนักชลประทานที่ 2 กรมชลประทาน

ที่มา: กองออกแบบ, งานออกแบบเขื่อน 1, หมายเลขแบบ 87700, วันที่ 20 กรกฎาคม 2530

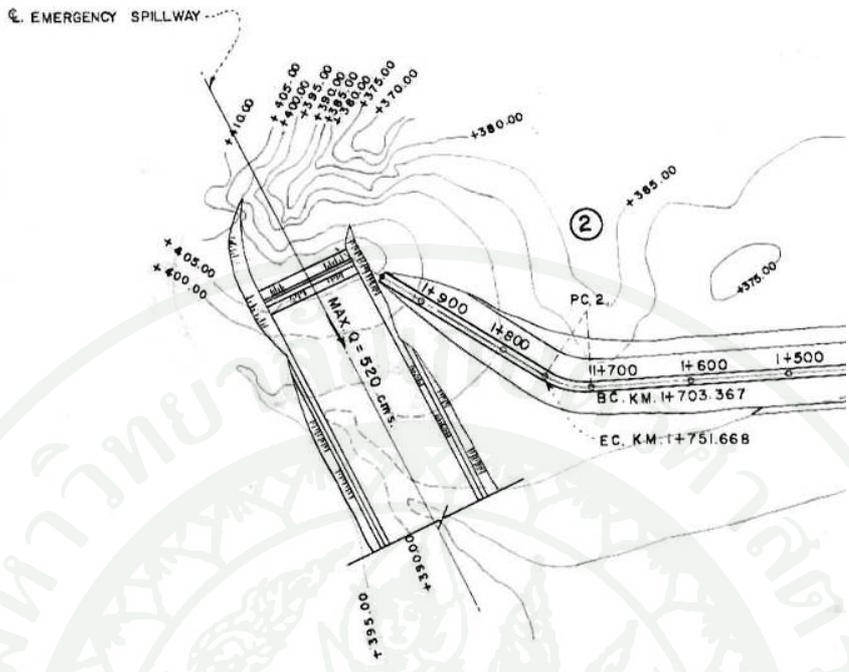


ภาพที่ 7 ทางระบายน้ำล้นสนับสนุนของโครงการเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ จังหวัดลพบุรี  
สำนักชลประทานที่ 10 กรมชลประทาน

ที่มา: กองออกแบบ, งานออกแบบเขื่อน 3, หมายเลขแบบ 132751 (2537)

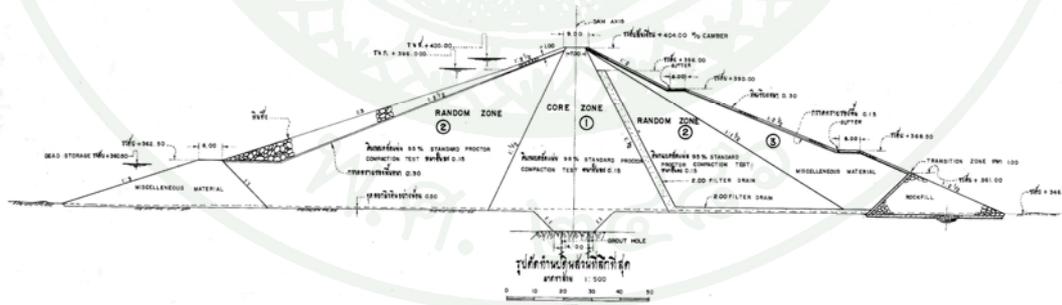
วรากร (2542) นิยามไว้ดังนี้ ในกรณีที่ทางระบายน้ำใช้งานเป็นแบบ “Pressure Flow” ซึ่งต้องไหลภายใต้ความดัน ปริมาณน้ำที่จะระบายได้จะไม่เพิ่มมากนักเมื่อระดับน้ำสูงขึ้นเหนือระดับสันระบาย เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของทางน้ำมีจำกัด จึงจำเป็นต้องมีทางระบายน้ำล้นฉุกเฉินมาช่วยในกรณีที่น้ำบ่ามาก ซึ่งมักจะออกแบบให้อยู่ห่างจากตัวเขื่อน โดยมักเปิดเป็นช่องกว้างมีคันดิน หรือหินขนาดเล็กกั้นอยู่ เมื่อน้ำสูงถึงระดับที่ต้องระบายออกจะท่วมคันดิน จะเกิดการกัดเซาะคันดินจนเปิดกว้างให้น้ำลดลงไปแล้ว ตามปกติแล้วระดับของทางระบายน้ำล้นฉุกเฉินจะอยู่สูงกว่าทางระบายน้ำล้นใช้งานพอสมควร เพื่อให้มีการระบายตามปกติได้ระยะหนึ่งก่อน

ภาพที่ 8 แสดงตัวอย่างทางระบายน้ำล้นฉุกเฉิน และภาพที่ 9 หน้าตัดของเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล จังหวัดเชียงใหม่



ภาพที่ 8 ทางระบายน้ำล้นฉุกเฉินของโครงการอ่างเก็บน้ำแม่จัด จังหวัดเชียงใหม่  
สำนักชลประทานที่ 1 กรมชลประทาน

ที่มา: กองออกแบบ, งานออกแบบเขื่อน, หมายเลขแบบ มง-ข2-001 (2521)



ภาพที่ 9 หน้าตัดเขื่อนแม่จัด โครงการอ่างเก็บน้ำแม่จัด จังหวัดเชียงใหม่  
สำนักชลประทานที่ 1 กรมชลประทาน

ที่มา: กองออกแบบ, งานออกแบบเขื่อน, หมายเลขแบบ มง-ข2-001 (2521)

## อาคารส่งน้ำ

อาคารส่งน้ำ (Outlet) ทำหน้าที่รับน้ำจากอ่างฯ ส่งน้ำออกด้านท้ายเขื่อนโดยมีการควบคุมปริมาณได้อย่างเหมาะสม เพื่อนำน้ำไปใช้งานตามวัตถุประสงค์ เช่น ส่งจ่ายเข้าคลองชลประทานนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า ระบายลงลำน้ำเดิม ส่งเข้าเส้นท่อเพื่อใช้ทางอุตสาหกรรม หรือใช้ระบายน้ำออกจากอ่างเพื่อลดระดับน้ำแล้วทำการซ่อมแซมเขื่อนหรืออาคารประกอบได้ (วารกร, 2542) (ภาพที่ 10, ภาพที่ 11)

ส่วนประกอบของทางส่งน้ำ อาจแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้ คือ

1. ส่วนโครงสร้างรับน้ำ (Intake Structure) ซึ่งจะรับน้ำจากอ่าง ณ ที่ระดับที่ต้องการระดับต่ำที่สุดที่น้ำสามารถจะไหลเข้าโครงสร้างรับน้ำนี้ได้เรียกว่า ระดับเก็บกักน้ำต่ำสุด (Low Water Level) ปริมาณน้ำที่อยู่ต่ำกว่าระดับนี้จะไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (วารกร, 2542)

2. ส่วนทางส่งน้ำ (Water Way) ต่อจากโครงสร้างรับน้ำจะเป็นท่ออุโมงค์ หรือทางเปิดเพื่อส่งน้ำไปยังท้ายน้ำ ส่วนนี้อาจใช้ร่วมกันกับทางผันน้ำในระหว่างการก่อสร้างก็ได้ ในส่วนนี้อาจมีประตูน้ำควบคุมปริมาณน้ำหรือมีถังระบบความดัน (Surge Tank) อยู่ด้วยก็ได้ ถ้าทางส่งน้ำยาวมากและเป็นท่อปิด (วารกร, 2542)

3. ส่วนโครงสร้างจ่ายน้ำ (Terminal Structure) เป็นส่วนที่มักจะอยู่ท้ายน้ำจะมีประตูน้ำที่ควบคุมปริมาณน้ำอย่างสมบูรณ์ และจะมีส่วนที่สลายพลังงานของน้ำให้อยู่ในความเร็วที่จะไม่เกิดอันตรายจากการกัดเซาะทางด้านท้ายน้ำในบางครั้งจะมีท่อแยกนำน้ำไปผลิตกระแสไฟฟ้าก่อนแล้วจึงปล่อยลงลำน้ำ (วารกร, 2542)

## อาคารควบคุม (Control House)

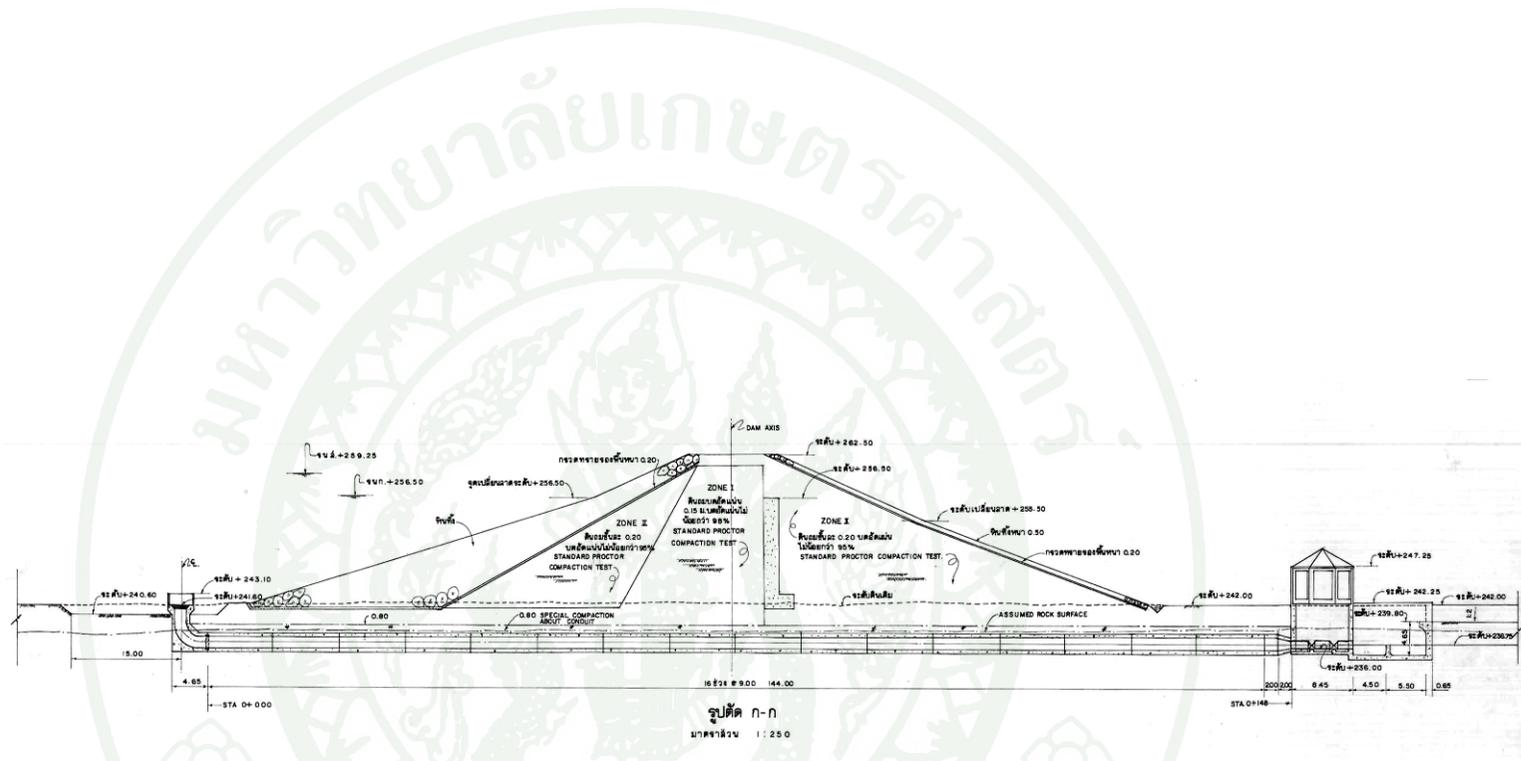
อาคารควบคุมในโครงการเขื่อนใหญ่ๆ จะเป็นศูนย์กลางในการควบคุมการทำงานของเขื่อน โดยมักจะมีอุปกรณ์ไฟฟ้าและแผงควบคุมแสดงการทำงานของส่วนต่างๆ ของเขื่อน และ



**ภาพที่ 10** อาคารส่งน้ำของเขื่อนแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี สำนักชลประทานที่ 14 กรมชลประทาน (ถ่ายเมื่อ ปี พ.ศ. 2550)

สามารถจะควบคุมหรือสั่งการจากระยะไกล ในขณะที่เขื่อนขนาดกลางขนาดเล็ก การควบคุมมักจะทำที่ตำแหน่งบานระบายของท่อส่งน้ำโดยใช้คนปิดเปิดโดยตรง (วรากร, 2542) การควบคุม ส่วนใหญ่มักจะเป็นงานของฝ่ายบำรุงรักษาโดยจะดูแลในเรื่องต่างๆ ต่อไปนี้

1. ปริมาณน้ำส่งออก
2. การปิด-เปิดบานระบาย
3. ตรวจสอบระดับน้ำ
4. วัดปริมาณน้ำฝน
5. ตรวจสอบเครื่องมือวัดพฤติกรรมของเขื่อน
6. ดูแลบำรุงรักษาตัวเขื่อน และอุปกรณ์ประกอบเขื่อน



ภาพที่ 11 อาคารส่งน้ำของโครงการอ่างเก็บน้ำลำปลายมาศ จังหวัดนครราชสีมา สำนักชลประทานที่ 8 กรมชลประทาน

ที่มา: กองออกแบบ, งานออกแบบเขื่อน 2, หมายเลขแบบ 84957 (2534)

## โรงไฟฟ้า

ในกรณีที่เขื่อนสร้างเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นวัตถุประสงค์หลักโรงไฟฟ้าคือหัวใจของตัวเขื่อน ซึ่งจะมีที่รับน้ำลงมาหมุนกังหันน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และอาจจะรวมเอาอาคารควบคุมเข้าไปอยู่ด้วยกัน ตำแหน่งที่ตั้งของโรงไฟฟ้าจะต้องอยู่บนฐานรากที่แข็งแรง เพราะจะต้องรองรับอุปกรณ์ที่มีน้ำหนักมาก ส่วนมากจะอยู่ใกล้บริเวณเขื่อนทางด้านท้ายน้ำ แต่ในบางกรณีจะอยู่ห่างออกมาเป็นหลายกิโลเมตรเพื่อจะรับน้ำในระดับต่ำลงมาเข้าสู่โรงไฟฟ้า โดยส่งน้ำจากเขื่อนมาตามท่อเหล็กหรืออุโมงค์ ซึ่งแรงดันน้ำที่สูงขึ้นจากความต่างระดับของน้ำในอ่างฯและโรงไฟฟ้า เช่น เขื่อนจุฬาภรณ์, เขื่อนแม่ผอง, เขื่อนแม่มาว, เขื่อนห้วยปะทาว เป็นต้น (วารกร, 2542) (ภาพที่ 12)



ภาพที่ 12 โรงไฟฟ้าของเขื่อนจุฬาภรณ์, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

## การพิบัติของเขื่อน

การพิบัติของเขื่อนอาจเกิดได้หลายลักษณะตามสภาพที่ กระทำกับตัวเขื่อนแล้วทำให้เกิด ความเสียหายกับเขื่อนเกินกว่าที่เขื่อนหรือระบบเขื่อนสามารถรับแรงกระทำนั้น หรือสลายแรง กระทำนั้นได้ ทำให้เขื่อนเกิดการสูญเสียกำลังของดินตัวเขื่อน หรือเกิดการสูญเสียเนื้อเขื่อนไป จึงทำให้เขื่อนเกิดความเสียหายและพิบัติได้

### นิยามของการพิบัติของเขื่อน

สำหรับคำนิยามของคำว่า “การพิบัติของเขื่อน” ได้มีหน่วยงานนิยามไว้ดังนี้ คือ

State of Oregon, Water Resources Department (2007) ได้ให้นิยามของการพิบัติของเขื่อน ดังนี้ “การพิบัติของเขื่อน คือ ชนิดความเสียหายของความเสียหายจากลักษณะโดยทันทีทันใด, อย่างรวดเร็ว, และการปล่อยน้ำที่ไม่สามารถควบคุมได้ของน้ำที่เก็บกักไว้”

### การพิบัติในงานเขื่อน

ความเสียหายหรือการพิบัติในงานเขื่อน อาจแบ่งเป็น 2 ระดับของความรุนแรง (วารากร, 2542) คือ

1. การพิบัติที่รุนแรง (Catastrophic Failure) หมายถึง การพิบัติเกิดขึ้นฉับพลัน มีความรุนแรงมาก และทำความเสียหายอย่างกว้างขวาง การพิบัติในกรณีนี้มักมีสาเหตุมาจากน้ำล้น สันเขื่อน การกัดเซาะภายในตัวเขื่อนและฐานราก การเคลื่อนพังของลาดเขื่อน การเกิด Liquefaction จากแผ่นดินไหว เป็นต้น

2. การเสียหายเพียงเล็กน้อย (Minor Damage) หมายถึง ความเสียหายที่มีปรากฏการณ์หรือ ข้อบ่งชี้ให้เห็นล่วงหน้า เมื่อสามารถตรวจพบตั้งแต่ระยะแรกก็จะเป็นความเสียหายซึ่งสามารถ ซ่อมแซมแก้ไขได้ แต่ถ้ามีการปล่อยปะละเลยก็อาจขยายตัวเป็นการพิบัติที่รุนแรงต่อมาได้มีหลาย หน่วยงานที่รวบรวมสถิติการพิบัติของเขื่อนไว้ พร้อมทั้งสาเหตุของการพิบัติเหล่านั้น สำหรับใน สหรัฐอเมริกา ซึ่งตั้งเป็นหน่วยตรวจสอบความปลอดภัยของเขื่อน (U.S. Army Corps of Engineer's,

National Dam Inspection Program) ภายหลังจากได้เกิดการพิบัติของหลายเขื่อนติดต่อกัน ได้แถลงว่า จาก 4,906 เขื่อน ซึ่งได้ตรวจสอบถึงเดือนมีนาคม ค.ศ. 1980 มีเขื่อนที่ไม่ปลอดภัยอยู่ถึง 32% หรือ 1,563 เขื่อน

ในระดับนานาชาติ "คณะกรรมการเขื่อนใหญ่ระหว่างประเทศ" (International Commission of Large Dams, ICOLD) ได้รายงานการพิบัติในเขื่อนใหญ่ใน ค.ศ. 1973 ไว้ตามขั้นตอนของการดำเนินโครงการเขื่อนดังแสดงในตารางที่ 1 โดยสำรวจจาก 466 เขื่อน กรณีพิบัติในเขื่อนประเภทต่างๆ ซึ่งมีข้อสังเกตว่า ในเขื่อนดินจะมีจำนวนการพิบัติมากกว่าเขื่อนประเภทอื่นและส่วนมากจากสาเหตุของขั้นตอนการสำรวจและออกแบบ

ตารางที่ 1 สาเหตุแห่งการพิบัติของเขื่อนใหญ่จากขั้นตอนการดำเนินการก่อสร้าง โดย ICOLD

ขั้นตอนที่เป็น สาเหตุ	จำนวนที่เกิดขึ้น						รวม
	A	B	G	E	R	M	
การสำรวจ	9	5	6	49	2	1	72
วัสดุก่อสร้าง	1	-	2	8	-	-	11
การวางตำแหน่ง	-	1	4	17	3	-	25
การออกแบบ	4	6	13	48	3	2	76
การก่อสร้าง	1	1	2	32	5	-	41
การใช้งาน	-	-	-	5	1	-	6
การควบคุม	1	1	-	3	-	-	5
<b>รวม</b>	<b>16</b>	<b>14</b>	<b>27</b>	<b>162</b>	<b>14</b>	<b>3</b>	<b>236</b>

หมายเหตุ A = Arch, B = Buttress, G = Gravity, E = Earthfill, R = Rockfill, M = Miscellaneous

ที่มา: Thomas (1976)

Baecher *et al.* (1980) ได้ทำการสำรวจอัตราการพิบัติของเขื่อนดังตารางที่ 2

## ตารางที่ 2 ผลการสำรวจอัตราการวิบัติของเขื่อน

Area	Reference	Failures	Total Dam Years	Period (years)	Rate (dam years) <sup>-1</sup>
United State	Gruner (1976)	33	1764	40	$5 \times 10^{-4}$
	Babb and Mermel (1968)	12	3100	14	$3 \times 10^{-4}$
	USCOLD (1975)	74	4914	23	$7 \times 10^{-4}$
World	Mark and Stuart-Alexander (1977)	125	7500	40	$4 \times 10^{-4}$
	Middlebrooks (1953)	9	7833	6	$2 \times 10^{-4}$
Japan	Takase (1967)	1046	$2 \times 10^6$	15	$4 \times 10^{-5}$
Spain	Gruner (1967)	150	1620	145	$6 \times 10^{-4}$

ที่มา: Baecher *et al.* (1980)

ถ้าจะพิจารณาทางด้านลักษณะ หรือพฤติกรรมในการพิบัติของเขื่อนในหลายประเทศ ซึ่ง V.P. Jauhari (1999) ได้รวบรวมเขื่อนที่เกิดการพิบัติอย่างรุนแรงอันเป็นเหตุให้มีคนเสียชีวิตมากกว่า 10 คนขึ้นไป โดยมีแหล่งที่มาของข้อมูลจากหลายแห่ง ดังแสดงในตารางที่ 3

จากสถิติดังกล่าว หากทำการศึกษาถึงสถิติของอายุเขื่อนที่เกี่ยวข้องกับการพิบัติ จะสามารถเปรียบเทียบได้ดังภาพที่ 13 จากภาพดังกล่าวพบว่าเขื่อนโดยทั่วไปมีสถิติการพิบัติในช่วง 10 ปีแรก ที่ค่อนข้างสูง จากนั้นสถิติการพิบัติจะลดลง แต่ยังคงพบสถิติการพิบัติอย่างต่อเนื่อง

ในประเทศสหรัฐอเมริกา มีการรวบรวมและประมวลสาเหตุของเขื่อนพิบัติโดยนำเสนอข้อมูลใน Engineering News Record แสดงใน ภาพที่ 14

ในประเทศสเปน รายงานใน ค.ศ. 1961 จากเขื่อนจำนวน 1,620 เขื่อน 19% อยู่ในสภาพวิกฤตจากสาเหตุ

ตารางที่ 3 บันทึกการพิบัติของเขื่อนที่ทำให้มีผู้เสียชีวิตมากกว่า 10 คน ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1860

ชื่อเขื่อน	ประเทศ	ชนิด เขื่อน	ความสูง (เมตร)	ปีที่ ก่อสร้าง เสร็จ (ค.ศ.)	ปีที่เกิด การพิบัติ (ค.ศ.)	สาเหตุ ของ การ พิบัติ	จำนวน คนที่ เสียชีวิต	มูลค่า ความ เสียหาย
Dale Dyke (Bradfield)	England	E	29	1858	1864		250(1)	£0.5 m
Iruhaike	Japan	E	28	1863	1868	OT	>1000(2)	
Mill River	MA, USA	E	13	1865	1874	SF	143	>\$1m
El Habra†	Algeria	R	36		1881	OT	209	
Valparaíso	Chile	E	17		1888	SF	>100	
South Fork, Johnstown	PA, USA	E	22	1853	1889	OT	2,209	
Walnut Grove	AZ, USA	R	34	1888	1890	OT	150	
Bouzey	France	G	15	1881	1895	SF	150(1)	
Austin	PA, USA	G	15	1909	1911	SF	80	
Lower Otay	CA, USA	R	40	1897	1916	OT	30	
Bila Desna	Czecho- slovakia	E	17	1915	1916	SF	65	
Tigra	India	G	24	1917	1917	OT	>1,000(2)	
Gleno	Italy	M, G	44	1923	1923	SF	600	
Eigiau/Coed ty §	Wales	G/E	11	1908/19	1925	PI/OT	16	
St.Francis	CA, USA	A	62	1926	1928	SF	450	
Alla Sella Zerbino	Italy	G	12	1923	1935	OT	> 100	
Vega de Terra (Ribadelago)	Spain	B	34	1957	1959	SF	145	

## ตารางที่ 3 (ต่อ)

ชื่อเขื่อน	ประเทศ	ชนิดเขื่อน	ความสูง (เมตร)	ปีที่ก่อสร้างเสร็จ (ค.ศ.)	ปีที่เกิด การพิบัติ (ค.ศ.)	สาเหตุ ของ การ พิบัติ	จำนวน คนที่ เสียชีวิต	มูลค่า ความ เสียหาย
Malpasset (Fréjus)	France	A	61	1954	1959	F	421	
Orós	Brazil	E	54	const	1960	OT	c.1,000	
Babii Yar	Ukraine	E			1961	OT	145	
Panshet/ Khadakwasl a	India	E/R	54/42	const/18 79	1961	SF, OT/OT	> 1,000(2)	
Vaiont	Italy	A	261	1960	1963	OT	2,600	
Zgorigrad (Vratza)	Bulgaria	Ta	12			OT	> 96	
Nanaksagar	India	E	16	1962	1967	SF/OT	c.100	
Sempor	Indonesia	R	54	const	1967	SF/OT	c.200	
Frias	Argentina	R	15	1940	1970	OT	> 42	
Buffalo Creek	WV, USA	Ta	32	const	1972	OT	125	\$30- 50m(15)
Canyon Lake	SD, USA	E	6	1938	1972	OT	237*	\$60m
Baniqao, Shimantan,	China	E		late 1950s	1975	OT	≤230,000 (4)	
Teton	ID, USA	E	90	1976	1976	SF	11-14	\$0.4-1bn
Laurel Run	PA, USA				1977		39(3)	\$20- 45m(2)
Kelly Barnes (Toccoa Falls)	GA, USA	E	13	1899	1977	SF	39(3)	
Machhu II	India	E	26	1972	1979	OT	> 2000	\$15m

## ตารางที่ 3 (ต่อ)

ชื่อเขื่อน	ประเทศ	ชนิดเขื่อน	ความสูง (เมตร)	ปีที่ก่อสร้างเสร็จ (ค.ศ.)	ปีที่เกิด การพิบัติ (ค.ศ.)	สาเหตุ ของ การ พิบัติ	จำนวน คนที่ เสียชีวิต	มูลค่า ความ เสียหาย
Gopinatham	India			1980	1981	OT	47(5)	
Taus	Sapin	R	77	1980	1982	OT	> 20(6)	
Stava	Italy	Ta		1960s	1985		269(7)	
Kantalai	Sri Lanka	R	15	1952	1986	PI	82(8)	
Sargazon	Tadjikis- tan		23	1980	1987		> 19(9)	
Belci	Romania	E	18	1962	1991	OT	c.48(10)	
Gouhou	China	R	71	1987	1993	PI	342(11)	\$18m
Tirlyan	Russia	E	10	<1987	1994	OT	19-37 (12)	Rs40bn
Virginia No.15	S.Africa	Ta	47		1994		39(13)	\$15m
Lake Blackshear, Flint River Dam	GA, USA	E	< 15		1994	OT	15(14)	

## หมายเหตุ

ชนิดเขื่อน: E = เขื่อนดินถม; R = เขื่อนหินถม; G = เขื่อนถ่วงน้ำหนัก;

M = เขื่อนคอนกรีตหลายโค้ง; B = เขื่อนค้ำยัน; A = เขื่อนคอนกรีตโค้ง;

Ta = เขื่อนเหมืองหิน

สาเหตุการพิบัติ: OT = การไหลล้นข้ามสันเขื่อน; PI = การกัดเซาะภายใน; SF = โครงสร้างพิบัติ;

F = ลักษณะธรณีหรือฐานรากมีปัญหา

\* unable to distinguish dam break fatalities with those caused by 'natural' flood.

† EI Habra first failed in 1872 without loss of life. It was then rebuilt, failed again in 1881, rebuilt again, then failed again in 1927 (without fatalities) and was then abandoned.

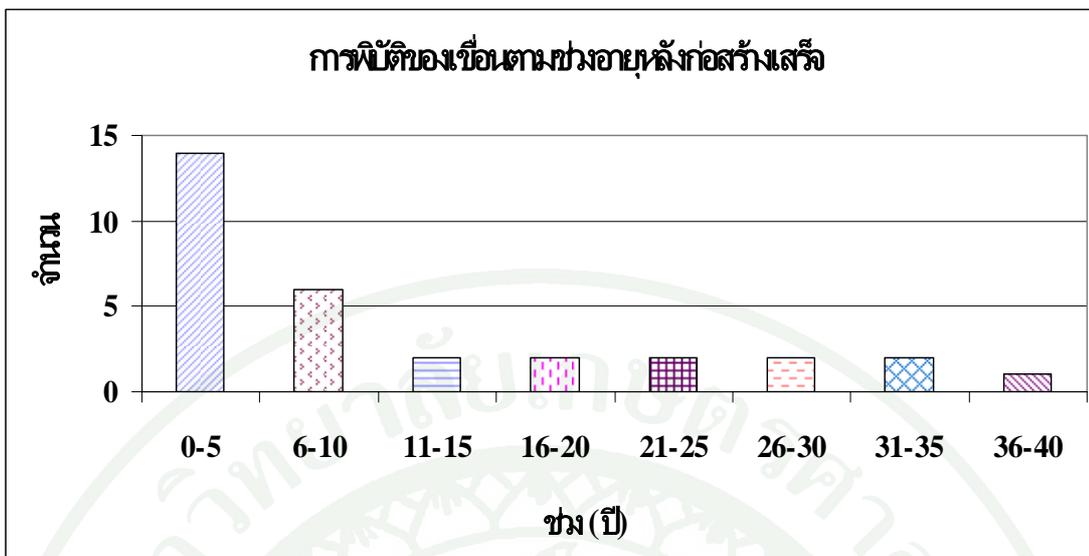
§ The flood from the collapse of the first dam breached the second dam downstreams.

Source:

1. N. Smith, *A History of Dams*, Peter Davies, London 1971.
2. F. Lemperiere, 'Dams That Have Failed by Flooding. An Analysis of 70 Failures', *Water Power and Dam Construction*, October 1993.
3. J.E. Costa, 'Floods from Dam Failures', in V.R. Baker et al. (eds.), *Flood Geomorphology*, Wiley, New York 1998.
4. Human Rights Watch/Asia. *The Three Gorges Dam in China: Forced Resettlement, Suppression of Dissent and Labour Rights Concerns*. New York, February, 1995.
5. Centre of Science and Environment, *The State of India's Environment-1982: A Citizen's Report*, CSE, New Delhi 1982.
6. 'Overtopped Spanish Dam Collapses as Spillway Gates Stay Shut', *World Water*, November 1982.
7. 'South African Dam Breach Followed Warnings', *Construction Today*, March, 1994.
8. 'Kantalai Failure Leaves 18,000 Homeless', *Water Power & Dam Construction*, May 1986.
9. 'Burst Raises Doubts about Soviet Hydroelectricity Dam', *Nature*, 26 March 1987.
10. 'Flooding and Landslides Cause Three Major Failures in Romania', *Water Power & Dam Construction*, October 1991.
11. 'China Disciplines 15 for Dam Break', *Tibetan Environment & Development News*, Issue 16, 1994.
12. 'The Tirlyan Breakthrough', *Moscow News*, 19 August, 1994.
13. 'When the Bough Breaks....', *Higher values (Minewatch Bulletin)*, April 1994.
14. 'Georgia Flood Deaths', *International Water Power & Dam Construction*, August 1994.
15. B. Ellingwood et al. 'Assessing Costs of Dam Failure', *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 119, No.1, January/February 1993.

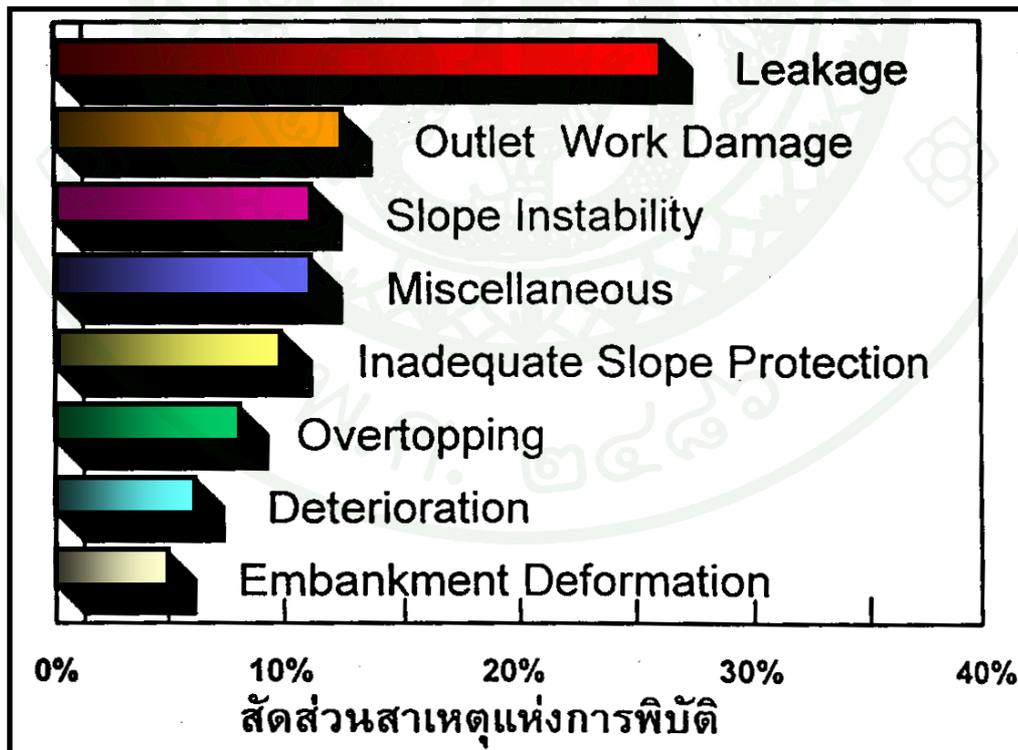
All others : R.B.Jansen, *Dams and Public Safety*, US Department of the Interior, Washington DC, 1990.

ที่มา: Jauhari (1999)



ภาพที่ 13 แสดงผลการพิบัติของเขื่อนตามช่วงอายุหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ

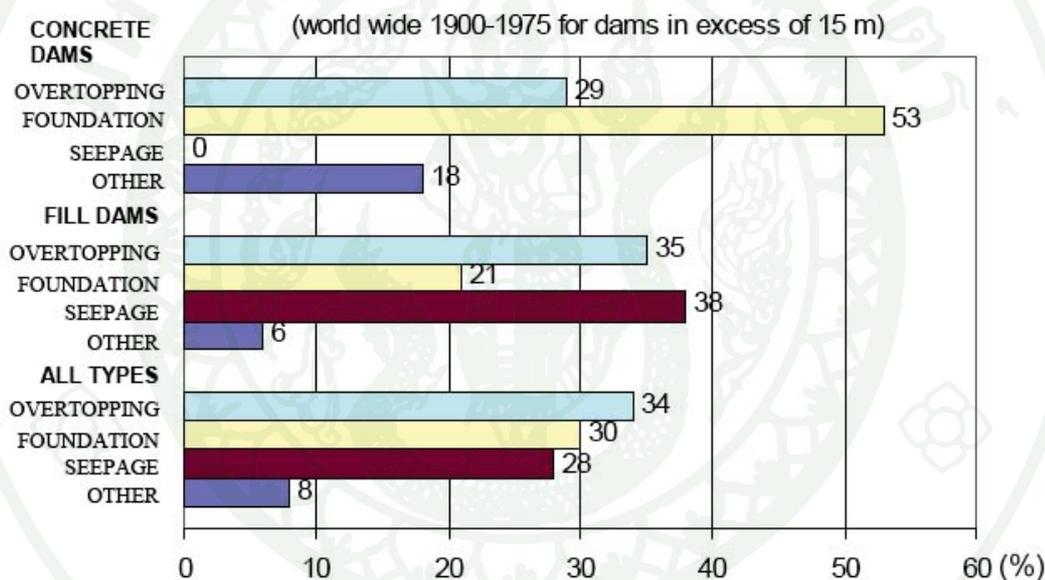
ที่มา: Jauhari (1999)



ภาพที่ 14 ลักษณะการพิบัติของเขื่อนในสหรัฐอเมริกา (จาก ENR.)

เกี่ยวกับฐานราก	40%
ทางระบายน้ำล้นไม่เพียงพอ	23%
การก่อสร้างไม่เหมาะสม	12%

จะเห็นได้ว่าสาเหตุใหญ่อยู่ที่การรั่วซึมเสียเป็นส่วนมาก ต่อมา คือ ทางระบายน้ำล้นไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดการเอ่อล้นสันเขื่อน และการเคลื่อนพังของลาดเขื่อนหรือส่วนอื่นๆ ภายในอ่างเป็นสาเหตุที่มีมากเป็นอันดับรอง นอกจากนี้ Gulliver and Arndt ได้กล่าวว่า National Research Council ได้ทำการรวบรวมเปอร์เซ็นต์การพิบัติของเขื่อนประเภทต่างๆ ในช่วงปี 1900-1975 ดัง ภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ลักษณะการพิบัติที่พบในเขื่อนประเภทต่างๆ

ที่มา: Gulliver and Arndt (1991)

ในปี ค.ศ. 1983 USCOLD ได้สรุปสถิติสาเหตุการพิบัติของเขื่อนจำนวน 240 เขื่อนในสหรัฐอเมริกา ดังแสดงใน ตารางที่ 4

#### ตารางที่ 4 สรุปสถิติสาเหตุการพิบัติของเขื่อนโดย USCOLD

สาเหตุที่ทำให้เกิดการพิบัติ	% จาก 240 เขื่อน
การกัดเซาะภายนอก (การไหลล้นข้ามสันเขื่อน/แรงกระทำของคลื่น)	29
การกัดเซาะภายใน (ตัวเขื่อน/ฐานราก)	38
ความไม่มั่นคงของฐานราก	14
การเปลี่ยนรูปที่มากเกินไปของเขื่อน	13
การผุสลาย (ทางเคมี/ทางกายภาพ)	2
บานไม่สามารถทำงานได้ (Malfunction of Gate)	2
ผลกระทบจากแผ่นดินไหว (Earthquake Effects)	1
ความผิดพลาดจากการก่อสร้าง (Construction Error)	1

ที่มา: Hoeg (1996)

ในปี ค.ศ 1995 ICOLD ได้ออกเอกสารแสดงสถิติการพิบัติของเขื่อนทั่วโลกยกเว้นประเทศจีน จำนวน 181 เขื่อน ซึ่งเป็นเขื่อนดินจำนวน 129 เขื่อน โดยสามารถสรุปสถิติสาเหตุการพิบัติของเขื่อนดินได้ดัง ตารางที่ 5

ในขณะที่การศึกษาของ USBR (1998) ด้านความเสี่ยงจากลักษณะการพิบัติของเขื่อนที่อยู่ในความรับผิดชอบภายในหน่วยงาน โดยวิเคราะห์จากประวัติที่มีการบันทึก พบว่าโอกาสเกิดการพิบัติมากที่สุดมาจากสาเหตุของฐานรากเขื่อน รองลงมาได้แก่จากแผ่นดินไหว ดังแสดงใน ตารางที่ 6

Foster *et al.* (2000) ได้สรุปสถิติการพิบัติของเขื่อนดินขนาดใหญ่ ถึงปี ค.ศ. 1986 ดังแสดงใน ตารางที่ 7 และ ตารางที่ 8

ตารางที่ 5 สรุปสถิติสาเหตุการพิบัติของเขื่อนดินโดย ICOLD ในปี 1995

สาเหตุการพิบัติของเขื่อนดิน	เขื่อนดินถมบดอัด (%)	เขื่อนหินถมบดอัด (%)	เขื่อนหินถมและ เขื่อนดินถมบดอัด (%)
การไหลล้นข้ามสันเขื่อน (Overtopping (of Crow))	23	45	31
การกัดเซาะภายในตัวเขื่อน	20	8	23
การกัดเซาะบริเวณฐานราก	13	13	15
สาเหตุทางโครงสร้างอื่นๆ	29	25	23
สาเหตุอื่นๆ	15	9	8
<b>ผลรวม (เปอร์เซ็นต์)</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
<b>ผลรวม (จำนวนเขื่อน)</b>	<b>92</b>	<b>24</b>	<b>13</b>

ที่มา: Hoeg (1996)

ตารางที่ 6 โอกาสเกิดการพิบัติจากสาเหตุต่างๆ ของเขื่อนของ USBR

ชนิดของการ พิบัติ	ความน่าจะเป็น ในการเกิด อุบัติเหตุของ Von Thun	ความน่าจะเป็น ของการพิบัติ ของ Von Thun	ความน่าจะเป็น โดยเฉลี่ย	จำนวนตัวอย่าง จากการศึกษา ความเสี่ยง
การไหลล้นข้าม สันเขื่อน	$1.84 \times 10^{-5}$	$1.57 \times 10^{-4}$	$4.70 \times 10^{-5}$	16
ฐานราก	$9.22 \times 10^{-5}$	$1.88 \times 10^{-5}$	$1.34 \times 10^{-3}$	17
การกัดเซาะ ภายใน	$9.24 \times 10^{-5}$	$9.51 \times 10^{-5}$	$3.19 \times 10^{-5}$	20
การเลื่อนไถล	$8.07 \times 10^{-5}$	$6.90 \times 10^{-6}$	$6.38 \times 10^{-7}$	5
โครงสร้าง	$1.69 \times 10^{-4}$	$3.52 \times 10^{-5}$	$9.71 \times 10^{-5}$	9

ตารางที่ 6 (ต่อ)

ชนิดของการ พิบัติ	ความน่าจะเป็น ในการเกิด อุบัติเหตุของ Von Thun	ความน่าจะเป็น ของการพิบัติ ของ Von Thun	ความน่าจะเป็น โดยเฉลี่ย	จำนวนตัวอย่าง จากการศึกษา ความเสี่ยง
อาคารระบายน้ำ	$2.82 \times 10^{-5}$	$8.86 \times 10^{-6}$	$6.81 \times 10^{-5}$	12
แผ่นดินไหว	$1.18 \times 10^{-5}$	$6.90 \times 10^{-6}$	$1.85 \times 10^{-4}$	42

ที่มา: Tatalovich (1998)

ตารางที่ 7 สถิติการพิบัติของเขื่อนดินขนาดใหญ่ถึงปี 1986

Mode of failure	No of cases		% failures (where known)		Average frequency of Failure ( $\times 10^{-3}$ )	
	All failures	Failures in operation	All failures	Failures in operation	All failures	Failures in operation
<b>Overtopping and appurtenant</b>						
Overtopping	46	40	35.9	34.2	4.1	3.6
Spillway-gate	16	15	12.5	12.8	1.4	1.3
Subtotal	62	55	48.4	47.0	5.5	4.9
<b>Piping</b>						
Through embankment	39	38	30.5	32.5	3.5	3.4
Through foundation	19	18	14.8	15.4	1.7	1.6
From embankment into foundation	2	2	1.6	1.7	0.18	0.18
Subtotal	59	57	46.1	48.7	5.3	5.1

ตารางที่ 7 (ต่อ)

Mode of failure	No of cases		% failures (where known)		Average frequency of Failure (x 10 <sup>-3</sup> )	
	All failures	Failures in operation	All failures	Failures in operation	All failures	Failures in operation
<b>Slides</b>						
Downstream	6	4	4.7	3.4	0.54	0.36
Upstream	1	1	0.8	0.9	0.09	0.09
Subtotal	7	5	5.5	4.3	0.63	0.45
Earthquake-liquefaction	2	2	1.6	1.7	0.18	0.18
Unknown mode	8	7				
Total no. of failures	136	124			12.2(1.2%)	11.1 (1.1%)
Total no. of failures where mode of failure known	128	117				
No. of embankment dams	11 192	11 192				

**Note:** Subtotals and totals do not necessarily sum to 100%, as some failures were classified as multiple modes of failure.

ที่มา: Foster *et al.* (2000)

จากข้อมูลข้างต้นที่กล่าวมาพอสรุปได้ว่า เขื่อนดินถมจะมีรูปแบบการพิบัติอันเนื่องจากการรั่วซึมมากที่สุด โดยมีการพิบัติในช่วงก่อน ค.ศ.1950 อาจเนื่องจากยังไม่มีเครื่องมือในการก่อสร้างหรือบดอัดที่มีประสิทธิภาพมากพอ จนถึงในปัจจุบันจะมีอัตราการรั่วซึมน้อยลงเมื่อเทียบกับสมัยก่อนแต่ก็ยังมีเปอร์เซ็นต์ที่สูงกว่าการพิบัติกรณีอื่นๆ รองลงมาเป็นการพิบัติอันเนื่องมาจากน้ำล้นสันเขื่อน โดยจะมีมากกว่าสมัยก่อนอาจเนื่องมาจากในปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงสภาพทางธรรมชาติมากทำให้ค่าปริมาตรน้ำฝนที่คาดการณ์ไว้ต่างจากข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบ

ตารางที่ 8 สถิติการพิบัติของเขื่อนดินขนาดใหญ่ (Zone Dams) ถึงปี 1986

Dam zoning type	% of population	No. of failures cases	% of failure cases	Mode of failure								
				Piping			Slope instability		Earthquake	Overtopping	Spillway-gate failure	Unknown
				Through embankment	Through foundation	From embankment into foundation	Downstream slide	Upstream slide				
Homogeneous earthfill	9.5	23 (17)	28 (32)	14	2	0	1	0	1	6	0	0
Earthfill with filter	15	4 (2)	5 (4)	2	0	0	0	0	0	2	0	0
Earthfill with rock toe	6.1	9 (9)	11 (17)	5	3	1	0	0	0	0	0	0
Zoned earthfill	35.9	7 (5)	9 (9)	4	1	0	0	0	0	2	0	0
Zoned earthfill and rockfill	9.3	4 (3)	5 (6)	1	0	1	1	0	0	1	0	0
Central core earthfill and rockfill	8.4	4 (1)	5 (2)	0	0	0	1	0	0	3	0	0
Concrete face earthfill	4.1	4 (4)	5 (8)	2	3	0	0	0	0	0	0	0
Concrete face rockfill	2.8	1 (0)	1 (0)	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Puddle core earthfill	4.7	5 (4)	6 (8)	4	0	0	0	0	0	0	1	0
Earthfill with concrete corewall	2.4	11 (3)	13 (6)	0	2	0	0	1	0	4	3	1
Rockfill with concrete corewall	0.9	0 (0)	0 (0)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydraulic fill	0.9	5 (3)	6 (6)	0	1	0	2	0	0	0	2	0
Other	-	5 (3)	6 (6)	1	2	0	0	0	0	1	1	0
Unknown	-	54 (13)		6	5	0	1	0	1	26	9	7
Total	100	136 (66)	100 (100)	39	19	2	6	1	2	46	16	8

Note: The values in parentheses refer to statistics for structural modes of failure, comprising piping, slope instability, and earthquake modes of failure. The number of failure cases for the modes of failure do not necessarily sum to the total number of failure cases because some dams were classified as multiple modes of failure.

ที่มา: Foster et al. (2000)

สำหรับในประเทศไทยภายหลังจากเหตุการณ์การรั่วของเขื่อนมูลบน เมื่อตุลาคม 2533 ทางรัฐบาลก็ได้แต่งตั้ง คณะอนุกรรมการตรวจสอบสภาพเขื่อนทั่วประเทศที่อยู่ในข่ายที่มีอันตราย ความเสี่ยงสูง ซึ่งเป็นเขื่อนขนาดกลางและใหญ่ ที่มีขนาดความจุตั้งแต่ 20 ล้านลบ.เมตร และ/หรือ ความสูงตั้งแต่ 15 เมตรขึ้นไป จำนวน 225 เขื่อน ปรากฏผลการตรวจดังแสดงใน ตารางที่ 9 และตารางที่ 10

ตารางที่ 9 สรุปผลการตรวจเขื่อนดินในประเทศไทย (สำนักนายกรัฐมนตรี, 2534)

หน่วยงานที่ดำเนินการ	จำนวนเขื่อน	สภาพเขื่อน			
		มั่นคง	ใช้ได้	ต้องแก้ไข	อื่นๆ
กรมชลประทาน	188	122	29	4	33
การไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ	3	1	2	-	-
การพลังงานฯ	2	1	1	-	-
รพช.	32	4	16	8	4
<b>รวม</b>	<b>225</b>	<b>128</b>	<b>48</b>	<b>12</b>	<b>37</b>

หมายเหตุ อื่นๆ หมายถึง เขื่อนดินที่ไม่เข้าหลักเกณฑ์ในการตรวจสอบ เช่น กำลังก่อสร้าง หรือยังไม่ได้ก่อสร้างและมีการยกเลิกโครงการจึงไม่ได้ดำเนินการตรวจสอบ

ที่มา: วรากร (2550)

#### ลักษณะการพิบัติของเขื่อน

การพิบัติของเขื่อนที่เกิดขึ้นจากอดีตจนกระทั่งมาถึงในปัจจุบัน ได้มีหลายหน่วยงาน รวบรวมและบันทึกเป็นสถิติไว้ พร้อมทั้งแสดงถึงสาเหตุที่ทำให้เขื่อนเกิดการพิบัติ ดังนั้นในการที่จะทราบถึงลักษณะการพิบัติของเขื่อนจึงได้ระบุไว้เป็นเอกสารเผยแพร่ต่างๆ

ตารางที่ 10 กรณีการพิบัติหรือความเสียหายของเขื่อนในประเทศไทย

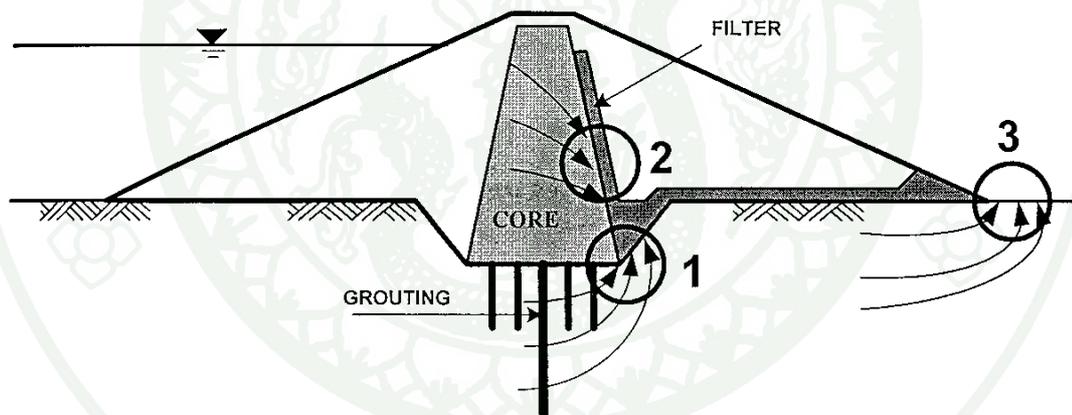
ปี พ.ศ.	ชื่อเขื่อน	จังหวัด	สังกัด	สาเหตุ	ผลสืบเนื่อง
2513 ถึง 2515	- ลำสำราย - ลำเชียงไกร - อ่าบือล - ห้วยสวาย	นครราชสีมา	กรมชลฯ	ดินตัวเขื่อนเป็นดินกระจายตัว เกิดการกัดเซาะละลายน้ำได้	เสียหายทั้งหมด และมีการก่อสร้างขึ้นใหม่ โดยใช้ปูนขาวผสม มีการศึกษาปัญหาดินกระจายตัวและกำหนดการทดสอบและแก้ไข
2521	อุบลรัตน์	ขอนแก่น	กฟผ.	ปริมาณน้ำหลากมากกว่าที่ออกแบบ ในอ่างสูงเกือบถึงสันเขื่อนและเกิดน้ำท่วมท้ายน้ำจากการระบาย	ทบทวนการคำนวณทางอุทกวิทยา ยกระดับสันเขื่อนและทางระบายน้ำสัน การจัดตั้ง "กองตรวจสอบและบำรุงรักษาเขื่อน" กฟผ.
2533	มูลบน	นครราชสีมา	กรมชลฯ	การรั่วซึมผ่านฐานรากเขื่อน	การซ่อมแซมปรับปรุงเขื่อนโดยใช้กำแพงทึบน้ำใต้ดิน การตั้งคณะกรรมการตรวจสอบสภาพเขื่อนดินทั่วประเทศ จัดทำคู่มือตรวจสอบและประเมินความปลอดภัยเขื่อน

ที่มา: ปรับปรุงจาก Dam Safety Project Preparation Report (1996)

สำหรับสาเหตุโดยส่วนใหญ่ที่ทำให้เขื่อนเกิดการพิบัติ ได้แก่

### การรั่วซึมของฐานรากและตัวเขื่อน

เมื่อสร้างเขื่อนขึ้นสำหรับเก็บกักน้ำย่อมทำให้เกิดความแตกต่างของระดับน้ำในอ่างฯ และด้านท้ายน้ำและเป็นธรรมดาที่น้ำจะพยายามหาทางซึมจากระดับสูงไปต่ำ โดยผ่านทั้งตัวเขื่อนฐานรากหรือฐานยัน ดังนั้นในการออกแบบวิศวกรจะพยายามลดการรั่วซึมนี้ให้น้อยที่สุด โดยการบดอัดดินเหนียวเป็นแกนเขื่อนหรืออัดนํ้าปูนในฐานราก แต่น้ำก็จะพยายามหาช่องทางที่จะซึมผ่านไปได้ง่ายที่สุดโดยถ้ามีความเร็วหรือแรงดันมากพอก็จะกัดเซาะพาเอาเม็ดดินไหลตามไปพร้อมๆ กันด้วย ยิ่งถ้าการกัดเซาะเกิดขึ้นภายในตัวเขื่อนซึ่งไม่สามารถตรวจพบได้โดยง่าย และทำการแก้ไขเสียก่อน ก็อาจจะเกิดการกัดเซาะต่อเนื่องจนเป็นสาเหตุให้เขื่อนพังได้ในที่สุด ตำแหน่งสำคัญในตัวเขื่อนที่เกิดการกัดเซาะได้โดยง่าย (วรากร, 2542) (ภาพที่ 16) คือ



ภาพที่ 16 บริเวณในตัวเขื่อนที่สำคัญที่อาจเกิดการกัดเซาะได้

ที่มา: วรากร (2542)

**บริเวณที่ 1** รอยต่อของฐานราก แคนดินเหนียว และชั้นกรอง (Filter) น้ำจากฐานรากที่ไหลผ่านแนวหน้าปูนจะไหลเข้าสู่ชั้นกรองอย่างรวดเร็ว

**บริเวณที่ 2** รอยต่อของแคนดินเหนียว และชั้นกรองด้านท้ายน้ำ โดยน้ำที่ซึมผ่านแกนจะไหลเข้าสู่ชั้นกรอง

**บริเวณที่ 3** ฐานรากด้านท้ายน้ำ โดยน้ำที่ซึมจากฐานรากจะไหลขึ้นสู่ผิวดินอาจเกิดการลอยตัวของเม็ดดิน (Boiling) ได้

**บริเวณที่ 4** ทั้งสองข้างของท่อส่งน้ำ (Outlet) ซึ่งยากต่อการบดอัดดินให้ดี

ในบริเวณที่ 1 และ 2 ถ้ามีการออกแบบชั้นกรอง (Filter) ที่ดีพอการกัดเซาะก็จะไม่เกิดขึ้น ส่วนกรณีที่เกิดในบริเวณที่ 3 อาจต้องทำบ่อลดแรงดันน้ำบริเวณฐานราก (Relief Well) หรือท่อระบายน้ำในชั้นกรองท้ายเขื่อน (Toe Drain) ที่จะทำให้การระบายน้ำออกจากฐานรากได้โดยไม่ให้เกิดการกัดเซาะ ส่วนบริเวณที่ 4 จะต้องมีการบดอัดอย่างระมัดระวัง โดยใช้ดินที่มีความชื้นสูงกว่าปกติ เพื่อให้ยึดติดกับผนังท่อส่งน้ำได้ดี

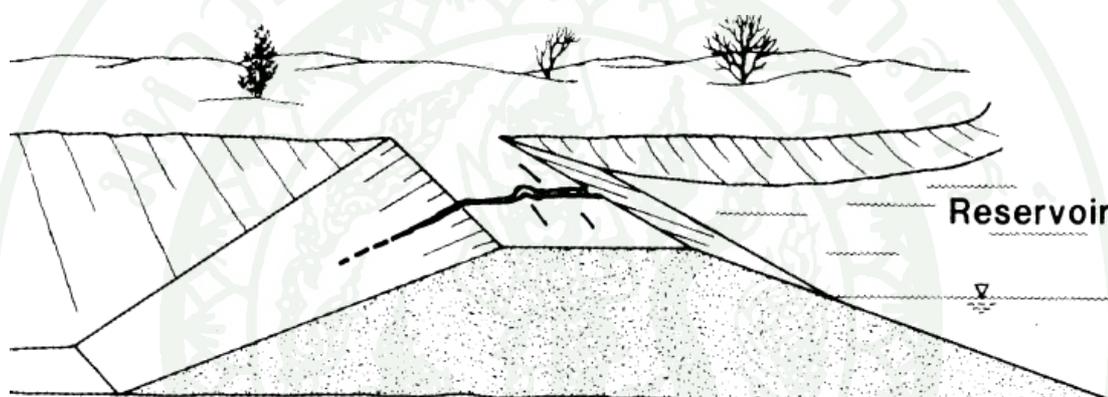
#### การทรุดตัวต่างกันทำให้เกิดรอยแยกในตัวเขื่อน

ธรรมชาติของดินหรือวัสดุก่อสร้างใดๆ จะมีการยุบตัวหรือทรุดเนื่องจากการเปลี่ยนรูปของวัสดุ เมื่อมีแรงหรือน้ำหนักมากกดทับ ถ้าการทรุดตัวเกิดขึ้นสม่ำเสมอเท่าๆ กันในบริเวณพื้นที่หนึ่งๆ ที่พิจารณาก็ไม่ค่อยมีอันตราย แต่ถ้าการทรุดตัวเกิดขึ้นต่างกันบริเวณพื้นที่เดียวกันก็มักจะมีผลทำให้เกิดรอยแตกแยกขึ้นได้บริเวณผิวนอกของตัวเขื่อน ซึ่งสามารถเห็นได้หรือภายในตัวเขื่อนซึ่งยากต่อการตรวจพบแล้วยังเป็นสาเหตุต่อเนื่องทำให้เกิดการรั่วซึมของตัวเขื่อนได้หากเกิดรอยแยกต่อเนื่องภายในตัวเขื่อน

การทรุดตัวและแตกแยกในตัวเขื่อน อาจเกิดขึ้นได้ดังนี้ คือ

#### 1. การแตกตามขวาง (Transverse Crack)

เกิดจากลักษณะช่องเขาเป็นขั้นตะพัก (Terrace) โดยมีความลาดไม่สม่ำเสมอหรือความหนาของชั้นดินฐานรากไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดรอยแตกขวางกับแนวสันเขื่อน ซึ่งมีอันตรายสูงในการที่จะเกิดการรั่วของน้ำผ่านตัวเขื่อน (วรากร, 2542) ตัวอย่างการแตกแยกลักษณะนี้ ดังภาพที่ 17

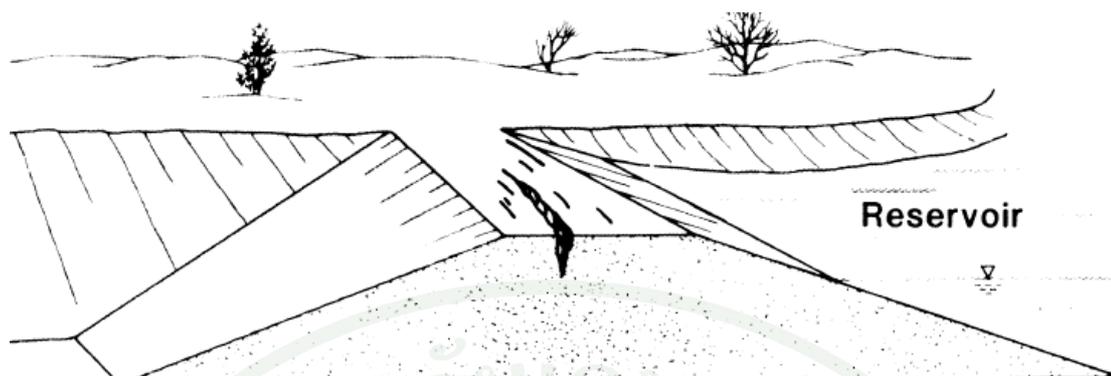


ภาพที่ 17 การแตกตามขวาง

ที่มา: Dam Safety Guidelines, Inspection and Maintenance of Dams, British Columbia (1998)

#### 2. การแตกตามแนวยาว (Longitudinal Crack)

เกิดจากการทรุดตัวตามแนวตัดขวางของตัวเขื่อนไม่เท่ากัน อาจเพราะมีอิทธิพลของร่องแกน (Cutoff Trench) หรือ จากความยืดหยุ่นของวัสดุในส่วนต่างๆ ของเขื่อนแตกต่างกัน (วรากร, 2542) ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 การแตกตามแนวขนาน

ที่มา: Dam Safety Guidelines, Inspection and Maintenance of Dams, British Columbia (1998)

### 3. การแตกภายในตัวเขื่อน (Internal Crack)

เกิดจากการทรุดตัวต่างกันของวัสดุก่อสร้างสองชนิดที่มีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นแตกต่างกันมาก เช่น แกนดินเหนียว ซึ่งทรุดตัวมากกว่าส่วนหินภายนอก หรือส่วนที่เป็นคอนกรีตกับส่วนที่เป็นดิน เป็นต้น การแตกจะเกิดในลักษณะ Tension Crack เป็นส่วนมาก และมีอันตรายสูงสุดเพราะไม่สามารถตรวจพบจากภายนอกได้ นอกจากจะมีการติดตั้งเครื่องมือวัด การเคลื่อนตัวในเขื่อน (วรากร, 2542)

### 4. การแตกเนื่องจากการแห้งของดินตัวเขื่อน (Desiccation Crack)

ในระหว่างการก่อสร้างในฤดูแล้งหรือผิวหน้าดินตัวเขื่อนที่บดอัดทิ้งไว้โดยไม่มีวัสดุปกคลุมหรือมีการให้ความชื้นอย่างสม่ำเสมอ ความชื้นจากผิวหน้าของตัวเขื่อนจะสูญเสียนออกไปโดยการระเหยทำให้เกิดการหดตัวของดินและเกิดการแตกเป็นกริดที่เรียกว่า “แตกกระแหง” ได้ การแตกในลักษณะนี้จะปกคลุมทั่วพื้นที่เป็นตารางกริดขนาดต่างๆ และไม่เป็นอันตรายมากนักแก้ไขได้ง่ายโดยการปาดดินส่วนนี้ออกจนถึงดินที่มีความชื้นสม่ำเสมอและไม่มีรอยแตก แล้วบดอัดกลับปิดทับให้เหมือนเดิม หากผิวหน้าใดต้องทิ้งไว้นานเนื่องจากหยุดหรือชะลอการก่อสร้างให้ใช้ดินชนิดเดียวกันเกลี่ยคลุมไว้โดยไม่ต้องบดอัด (วรากร, 2542)

## 5. การแตกบนสันเขื่อนเนื่องจากการเคลื่อนตัวของผิวบน (Creep Tension Crack)

การแตกเป็นแนวยาวตามสันเขื่อน อาจเกิดจากการถล่มหินที่กั้นคลื่นเพิ่มเติมด้านเหนือ น้ำหรือมีการปรับขระดับสันเขื่อนสูงขึ้น จะเกิดการเคลื่อนตัวของผิวบนเนื่องจากน้ำหนักของวัสดุที่เพิ่มขึ้น รอยแตกลักษณะนี้จะเกิดขึ้นภายหลังการปรับปรุงหรือเพิ่มเติมวัสดุดังกล่าว แล้วจะหยุดหรือมีความกว้างของรอยแตกคงที่ และไม่เป็นอันตรายใดๆ ซึ่งจะต้องมีการวัดและเฝ้าสังเกต จึงจะทราบพฤติกรรมดังกล่าวแล้วควรมีการแก้ไขโดยการอุดปะด้วยวัสดุที่บ่มน้ำโดยไม่ให้เกิดการทำให้นดินในตัวเขื่อนอ่อนตัวหรือถูกกัดเซาะโดยง่าย (วารากร, 2542)

### การเคลื่อนพังของลาดเขื่อนและฐานราก

การวิบัติลักษณะนี้มักจะเกิดขึ้นอย่างฉับพลัน โดยมีการบอกเหตุล่วงหน้าน้อยมาก และมักเกิดร่วมกับความดันน้ำภายในตัวเขื่อนหรือฐานรากสูงขึ้นเนื่องจากการบดอัดหรือเก็บกักช่วงวิกฤตที่อาจเกิดการวิบัติ คือ

1. ในระยะหลังของการก่อสร้าง (End of Construction) ในระหว่างการบดอัดตัวเขื่อน จะทำให้เพิ่มความดันน้ำขึ้นในตัวเขื่อน โดยเฉพาะดินที่มีความชื้นสูงและการบดอัดในอัตราที่เร็ว และยิ่งเขื่อนสูงขึ้นความดันน้ำก็จะยิ่งมากด้วย ทำให้ความแข็งแรงของดินลดลงจนอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินที่ถมตัวเขื่อนขึ้นได้ ซึ่งจะสามารถเกิดได้ทั้งทางด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ (วารากร, 2542)

2. ในระหว่างเก็บกักน้ำ (Impounding of Reservoir) ในระหว่างการเก็บกักน้ำจะมีการไหลของน้ำซึมผ่านตัวเขื่อน จากด้านเหนือน้ำไปท้ายน้ำ ความดันน้ำในตัวเขื่อนจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นหากระบายน้ำไม่ดีพอ โอกาสที่จะเกิดการเคลื่อนพังทางด้านท้ายน้ำจะมีมาก (วารากร, 2542)

3. ในระหว่างการลดระดับของน้ำในอ่างอย่างรวดเร็ว (Rapid Drawdown) เมื่อระดับน้ำในอ่างลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการนำน้ำในอ่างไปใช้ในอัตราสูง หรือการระบายทิ้งเพื่อซ่อมแซมแก้ไข หรือเหตุผลอื่นใดก็ตาม ทิศทางการไหลซึมของน้ำในตัวเขื่อนจะย้อนกลับมาทางด้านเหนือน้ำก่อให้เกิดการเคลื่อนพังทางด้านเหนือน้ำได้ (วารากร, 2542)

นอกจากการเคลื่อนตัวของตัวเชื่อมเองแล้ว ในกรณีที่ดินหรือหินฐานรากมีชั้นอ่อนอยู่ ฝิวการเคลื่อนตัวของดินชั้นลึกลงไปถึงฐานรากด้วย ซึ่งจะมีลักษณะเป็นไปตามฝิวของชั้นอ่อนนั้น ซึ่งจะต้องระมัดระวังและสำรวจให้ทราบตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบ

ส่วนการเคลื่อนตัวของลาดดินธรรมชาติในบริเวณขอบอ่าง ก็อาจเป็นอันตรายต่อเขื่อนได้ กล่าวคือ จะทำให้เกิดคลื่นขนาดใหญ่ เนื่องจากการถล่มของดินลงในอ่างขนาดของคลื่นจะใหญ่กว่าที่คาดการณ์ไว้จากแรงลม ซึ่งอาจจะทำให้ซัดปะทะและถล่มเขื่อนได้

#### การพิบัติจากผลของแผ่นดินไหว

ตัวเขื่อนซึ่งมีมวลและน้ำหนักมาก เมื่อเกิดการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว นอกจากจะเกิดแรงกระทำทั้งในแนวตั้ง และด้านข้างจากแรงสั่นสะเทือนแล้ว ยังทำให้คุณสมบัติของดินและหินเปลี่ยนไป เช่น ในดินที่มีขนาดเม็ดระหว่างทรายละเอียด และดินเหนียวปนทราย ดังเส้นโค้งการกระจายของขนาดเม็ดดิน จะเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินและเกิดการสะสมความดันน้ำ จึงทำให้สูญเสียความแข็งแรงและลอยตัวเป็นของเหลว เรียกว่า “Liquefaction” จึงเกิดการเคลื่อนตัวของดิน ในชั้นหินก็จะเกิดการแตกร้าวและการเคลื่อนตัวในระหว่างรอยต่อของชั้นหินมากขึ้น ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องพิจารณาว่าที่ตั้งเขื่อนอยู่ใกล้บริเวณที่มีโอกาสเกิดแผ่นดินไหวมากน้อยเพียงใดด้วยและต้องเผื่อแรงจากแผ่นดินไหวไว้ด้วย (วรากร, 2542)

#### การพิบัติจากการกัดเซาะ

การพิบัติของเขื่อนยังอาจเกิดจากการกัดเซาะของคลื่น ที่พัดเข้ากระทบลาดเขื่อนเหนือน้ำ การกัดเซาะจากน้ำฝน ปกติจะป้องกันได้จากการปลูกหญ้า หินทิ้ง หรือเรียงหินคลุมไว้ แต่ถ้าดินมีลักษณะกระจายตัวในน้ำได้ง่าย (Dispersive Clay) ก็จะเกิดการกัดเซาะบนลาดเขื่อนได้มากจนเป็นเหตุให้เกิดความเสียหายได้ ดังที่เกิดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนใต้ของประเทศไทยได้ จึงต้องมีการผสมปูนขาวลงในดินที่บดอัดเป็นตัวเขื่อน เพื่อลดการกระจายตัว (วรากร, 2542)

## การพิบัติจากน้ำล้นสันเขื่อน

การพิบัติจากน้ำล้นสันเขื่อนอาจเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ (วรากร, 2542) อาจสรุปได้ดังนี้  
คือ

1. การคาดการณ์ทางอุทกวิทยาไม่เหมาะสม
2. การเปิด-ปิดบานระบายน้ำล้นไม่ถูกต้อง
3. มีการถล่มของดินลงในอ่างทำให้เกิดคลื่นใหญ่
4. การออกแบบระยะเพื่อล้น (Freeboard) ไม่เหมาะสม

เมื่อน้ำล้นข้ามสันเขื่อนก็จะเกิดการกัดเซาะวัสดุจากสันเขื่อนไปตามกระแสน้ำให้เป็นร่องลึกลงไปจนใหญ่ขึ้นเป็นร่องน้ำใหญ่จนเขื่อนพิบัติได้ในที่สุด

### กรณีตัวอย่างการพิบัติของเขื่อนถม

ตัวอย่างการพังเนื่องจากการรั่วซึม และการกัดเซาะฐานเขื่อน และในตัวเขื่อน

เขื่อน Teton , มลรัฐไอดาโฮ สหรัฐอเมริกา เดือนมิถุนายน ค.ศ. 1976 เป็นเขื่อนดินสูง 90 เมตร เก็บน้ำประมาณ 360 ล้าน ลบ.ม. แกนกลางเป็นดินทรายปน (Silt) บดอัดที่ความชื้น 0.5 – 1.57 % ไปทางด้านแห้ง (Dry of Optimum) มีร่องแกนลึก 21 เมตร ความกว้างของกันร่องแกน 10 เมตร แล้ว บดอัดกลับด้วยวัสดุชนิดเดียวกับแกนเขื่อน คณะกรรมการกลางค้นหาสาเหตุการพัง เชื่อว่าเกิดจากการกัดเซาะภายในผ่านร่องแกน (ภาพที่ 19) โดยได้ให้ข้อสรุป ดังนี้

สาเหตุเบื้องต้นของการพัง อาจเนื่องมาจากสภาพทางธรณี และการออกแบบเป็นผลร่วมกัน สาเหตุทางธรณี คือ



ภาพที่ 19 เขื่อน Teton เกิดการพังทลายจากการกัดเซาะภายใน

ที่มา: Richard Lyman (2002)

1. ลักษณะหินที่ปักเขื่อน (Abutment) มีรอยแตกมาก

2. วัสดุทำแกนเขื่อนที่ดีกว่าดินทรายปน หยากรจึงจำเป็นต้องใช้ ส่วนสาเหตุทางการออกแบบ คือ

การควบคุมการซึมของน้ำผ่านร่องแกน และแนวอัดค้ำน้ำปูนไม่ดีพอ

รูปหน้าตัดของร่องแกน ก่อให้เกิด Arching Crack และ Hydraulic Fracturing เพราะดินร่องแกนอยู่ไม่มีความเหนียวและง่ายต่อการกัดเซาะ

ใช้ดินที่บ่น้ำอุคตามรอยแยก เพื่อป้องกันการกัดเซาะภายใน (Piping) นอกจากรอยแยกใหญ่ จึงอุดด้วยคอนกรีต ซึ่งไม่เพียงพอ

ไม่มีส่วนที่จะรับซึ่งไหลผ่านหินฐานราก และแนวอัดค้ำได้เพียงพอ และปล่อยให้ไหลออกอย่างปลอดภัย

พฤติกรรมการกัดเซาะที่คาดว่าจะเกิดขึ้นที่ก้นร่องแกนของเขื่อน Teton ภัยพิบัติครั้งนี้ยังผลให้เกิดความเสียหายคิดเป็นมูลค่ากว่า 1,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐ เทียบกับราคาก่อสร้าง 39.5 ล้านดอลลาร์สหรัฐ คนเสียชีวิต 11 คน บาดเจ็บ 80 และ สูญหาย 135 คน

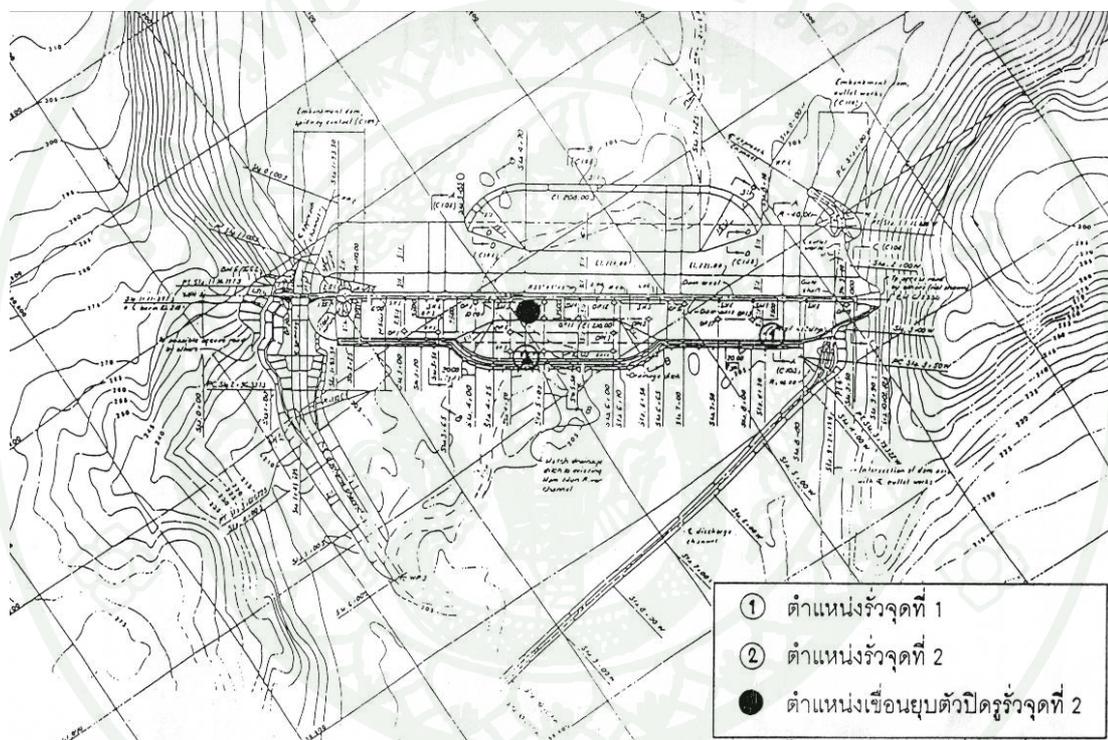
เขื่อน Fontenelle มลรัฐไวโอมิง สหรัฐอเมริกา ค.ศ. 1965 เป็นเขื่อนดินแบ่งส่วน (Zoned Earth Dam) สูง 50 เมตร เกิดน้ำซึมผ่านที่ปีกฝั่งขวา เมื่อน้ำถึงระดับเก็บกัก ได้มีอัดฉีดน้ำปูน และ คอยตรวจตราอย่างใกล้ชิด หลายเดือนผ่านไปมีน้ำซึมเกิดขึ้นอีก โดยมีปริมาณถึง 10 - 12 ล้านแกลลอนต่อวัน ทำให้เกิดเป็นรูทางด้านลาดเขื่อนท้ายน้ำแต่มีการระบายน้ำออกจากอ่างได้อย่างรวดเร็วตัวเขื่อนจึงไม่ได้รับอันตราย (วรากร, 2542) ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 เขื่อน Fontenelle เกิดการพังทลายจากการกัดเซาะภายใน

ที่มา: Richard (2002)

เขื่อนมูลบน อ.ครบุรี จ.นครราชสีมา เป็นเขื่อนดินเนื้อเดียว (Homogeneous) สูง 32 เมตร ในช่วงปีแรกของการใช้งานมีน้ำไหลเข้าอ่างน้อยมาก จนปีถัดมา ในเดือนตุลาคม 2533 มีพายุฝนจากใต้ฝุ่นทำให้มีน้ำไหลเข้าอ่างในช่วง 18 วัน มากกว่า 100 ล้าน ลบ.ม. ทำให้เกิดรูรั่วผ่านใต้ฐานเขื่อนมาไหลออกที่ตีนเขื่อน 2 แห่ง โดยมีการพัฒนาเอาดินตะกอนออกมาพร้อมน้ำถึง 2 - 6 ลบ.ม. ต่อวินาที ได้มีความพยายามที่จะอุดรูรั่วด้วยวิธีต่างๆ และลดระดับน้ำในอ่างโดยวิธีกักน้ำ โดยใช้เวลารวมประมาณ 10 วัน จึงสามารถควบคุมปริมาณน้ำที่รั่วให้อยู่ในระดับปลอดภัย (วารสาร, 2542) ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ตำแหน่งการรั่วซึมของเขื่อนมูลบนก่อนการปรับปรุงซ่อมแซม

ที่มา: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2540)

สาเหตุของการชำรุดเสียหายสรุปได้ดังนี้ คือ

1. การรั่วของเขื่อนเกิดจากการกัดเซาะใต้ฐานรากเขื่อน เนื่องจากเขื่อนไม่มีร่องแกนแต่ใช้ลาดเขื่อนด้านเหนือหน้า ทำหน้าที่ยึดทางเดินของน้ำออกไป

2. ชั้นกรองด้านท้ายน้ำไม่สามารถรับน้ำและระบายน้ำที่ไหลผ่านดินฐานรากได้เพียงพอ
3. จุดรั่วซึมเป็นบริเวณลำนน้ำเดิมและลำนน้ำที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแนวลำนน้ำทำให้มีแถบดินทรายตกตะกอนอยู่เป็นแนวการไหลของน้ำได้ดี

การแก้ไขซ่อมแซมใช้งบประมาณกว่า 300 ล้านบาท เมื่อเทียบกับราคาค่าก่อสร้างครั้งแรกราว 150 ล้านบาท

#### ตัวอย่างการพังเนื่องจากการทรุดตัวต่างกันของตัวเขื่อนและฐานราก

เขื่อน Baldwin Hills มลรัฐแคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา เป็นเขื่อนสึ่ด้านล้อมอ่างเก็บน้ำอยู่บนยอดเขา ส่วนสูงสุดประมาณ 50 เมตร เขื่อนสร้างในปี ค.ศ. 1948 – 1949 แต่ใน ค.ศ. 1963 เกิดการรั่วซึมจากการเคลื่อนตัวและยุบของรอยแตกของหิน ซึ่งตรวจพบแล้วตั้งแต่การก่อสร้าง แต่วิศวกรและนักธรณีวิทยารายงานว่าไม่น่าจะมีการเคลื่อนตัว โชคดีที่มีการตรวจพบการรั่วซึมที่ผิดปกติก่อนเพียง 3 – 4 ชม. ก่อนการพัง จึงได้มีการอพยพผู้คนออกไปจากบริเวณได้ จึงมีผู้เสียชีวิตเพียง 5 คน ค่าเสียหาย 50 ล้านดอลลาร์สหรัฐ เทียบกับค่าก่อสร้าง 4.5 ล้านดอลลาร์ (วารสาร, 2542) ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 การพิบัติของเขื่อน Baldwin Hills

ที่มา: [cee.engr.ucdavis.edu](http://cee.engr.ucdavis.edu)

### ตัวอย่างการพิบัติจากการถล่มของลาดเขื่อน

เขื่อน North Ridge ในแคนาดา ปี คศ. 1953 ในขณะที่กำลังก่อสร้างเหลือเพียงเล็กน้อยก็จะเสร็จแล้ว เกิดรอยแตกบนลาดเขื่อน ทั้งด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ กว้างสูงสุด 6 นิ้ว ลึก 11 ฟุต และ 22 ฟุต ทางด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ ตามลำดับ นอกจากนั้นที่ตีนเขื่อนก็มีรอยโป่งของดินฐานราก การเคลื่อนตัวของลาดด้านท้ายทางด้านแนวราบถึง 4.4 ฟุต และแนวตั้ง 0.7 ฟุต การแก้ไขทำโดยการหยุดการก่อสร้างแล้วมีการบดอัดคันดินเพิ่มขึ้นที่ตีนลาดที่สองข้างของเขื่อน (Counter Weight Berm) ภายหลังเมื่อความดันน้ำในตัวเขื่อนซึ่งวัดได้จาก Piezometer ได้ลดลงแล้ว จึงมีการก่อสร้างต่อจนเสร็จสมบูรณ์ โดยไม่มีความเสียหายอีก (วารากร, 2542)

เขื่อน Great Western มลรัฐโคโลราโด สหรัฐอเมริกา ปี คศ. 1958 เขื่อนสูง 50 ฟุต ได้มีการเพิ่มความสูงของเขื่อนขึ้นเล็กน้อยจากระดับเดิม จึงเกิดการเคลื่อนพังไปทางด้านท้ายน้ำ เมื่อระดับน้ำขึ้นสูงสุด แนวเคลื่อนพาดผ่านผิวของลาดเหนือน้ำ ไปจนดินฐานรากทางด้านท้ายน้ำ โดยทำลายท่อลอดส่งน้ำผ่านเขื่อน แต่น้ำยังไม่ไหลทะลักจึงมีการลดระดับน้ำอย่างรวดเร็วโดยใช้กาลักน้ำ (Siphon) ทำให้ลดระดับน้ำลงได้ประมาณ 1 ฟุต ต่อวัน ในขณะที่ดินในบริเวณที่พังก็เคลื่อนที่ลงทางด้านท้ายน้ำประมาณฟุตต่อวันเช่นเดียวกัน แต่ในที่สุดก็สามารถควบคุมได้ และซ่อมแก้ไขจนใช้งานได้อีก (วารากร, 2542)

เขื่อน Carsington ที่เมือง Derbyshire ในประเทศอังกฤษสูง 35 เมตร ออกแบบให้จุน้ำได้ 35 ล้าน ลบ.ม. ในเดือนมิถุนายน คศ. 1984 ขณะที่กำลังก่อสร้างใกล้เสร็จ ได้เกิดรอยแตกบนสันเขื่อนและในวันต่อมาได้มีการเคลื่อนพังของลาดเขื่อนเป็นทางยาวประมาณ 500 เมตร ทางด้านเหนือน้ำ จะเห็นได้ว่าแนวการพิบัติเกิดขึ้นลึกลงไปถึงผิวหน้าระหว่างตัวเขื่อนและดินฐานรากและมีลักษณะเป็นเส้นโค้งผสมกับเส้นตรงในบางส่วน ซึ่งพบว่าดินเดิมซึ่งมีคุณสมบัติเป็นดินแข็งแรงต่ำกว่าที่ใช้ในการออกแบบ ในระหว่างการก่อสร้างวิศวกรที่ปรึกษาของบริษัทรับเหมาก่อสร้างได้ทำการวิเคราะห์ความมั่นคง และได้ผลว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำกว่าที่ออกแบบไว้แล้วได้เสนอต่อผู้ออกแบบ แต่ก็ไม่ได้มีการแก้ไขให้ดีขึ้น ผู้รับเหมาจึงเสนอว่าควรมีการขุดลอกหน้าดินอ่อนที่ฐานรากออกไปอีก แต่วิศวกรมีความเห็นที่แตกต่างไป (วารากร, 2542)

### ตัวอย่างการพิบัติจากแผ่นดินไหว

เขื่อน Lower San Fernando มลรัฐแคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา ปี คศ. 1971 เป็น Hydraulic Fill สูง 44 เมตร ยาว 663 เมตร เกิดแผ่นดินไหวขนาด 6.6 มาตรการichter ทำให้เกิด Liquefaction ตัวเขื่อนถล่มลงในอ่างเป็นระยะ 550 เมตร ทำให้คนเสียชีวิต 64 คน ภายหลังมีการสำรวจพบว่าฐานรากและตัวเขื่อนสั้นด้วยความเร่งในแนวราบเฉลี่ย 0.38 g. เปรียบเทียบกับที่ออกแบบไว้ 0.15g. โดยมีอัตราส่วนปลอดภัย 1.01 (วรากร, 2542) (ภาพที่ 23)



ภาพที่ 23 การพิบัติลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำของเขื่อน Lower San Fernando เนื่องจากเกิดแผ่นดินไหว

ที่มา: [www.emporia.edu/.../dahms3/san\\_fernando3.jpg](http://www.emporia.edu/.../dahms3/san_fernando3.jpg)

เขื่อน Minase ญี่ปุ่น คศ. 1964 เป็นเขื่อนดินและหิน สูง 66.5 เมตร เกิดแผ่นดินไหวที่ชื่อว่า “Niigata Earthquake” ขนาด 7.5 มาตรการichter ห่างจากตัวเขื่อน 144 กิโลเมตร ตัวเขื่อนได้รับความเสียหายและปริมาณน้ำซึมผ่านมากขึ้น แต่ก็สามารถซ่อมแซมได้ (วรากร, 2542)

### ตัวอย่างการพิบัติจากการกัดเซาะของดินกระจายตัว

เขื่อนลำเชียงไกร เขื่อนลำสำราญ จังหวัดนครราชสีมา, เขื่อนอำปือล จังหวัด สุรินทร์, เขื่อนห้วยสวาย จังหวัดบุรีรัมย์ เป็นเขื่อนขนาดกลางและขนาดเล็ก ความสูง 10, 14, 10 และ 8 เมตร ตามลำดับ เกิดการกัดเซาะจากน้ำฝน ทั้งๆ ที่ยังไม่ได้ใช้งาน จนบางเขื่อนมีรอยร้าวใหญ่จนเขื่อนใช้การไม่ได้ลักษณะดินเป็นดินทราย ความเหนียวต่ำ และมีประจุบวกเป็นโซเดียมปนอยู่มาก ซึ่งทำให้ดินสามารถฟุ้งกระจายในน้ำได้ดี จึงสามารถถูกกัดเซาะจากน้ำฝนได้รวดเร็ว จึงได้มีการระวางในการเลือกวัสดุที่ใช้ก่อสร้างเขื่อนจะต้องมีการตรวจสอบการพังกระจาย (Dispersive Test) เขื่อนดังกล่าวได้ทำการแก้ไขซ่อมแซม โดยใช้ปูนขาวผสมในดินบดอัดเพื่อให้แคลเซียมไปแทนที่โซเดียมในดินลดความแตกตัวลง และยังใช้ทรายและกรวดปูผิวนอกของเขื่อนเพื่อกรองไม่ให้เม็ดดินถูกชะออกจากเขื่อนได้ (วรากร, 2542)

### สภาพความเสี่ยงที่ได้จากการพิบัติของเขื่อน

การตรวจสอบเขื่อนจากอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องจากวิศวกร หรือนายช่าง ที่ปฏิบัติงานด้านความปลอดภัยเขื่อน โดยหน่วยงานต่างๆ อาทิเช่น USBR USACE EGAT RID เป็นต้น การตรวจสอบเขื่อนด้วยการใช้สายตาจากหน่วยงานด้านความปลอดภัยเขื่อนต่างๆ ได้มีการวิจัยและพัฒนาจนเกิดการตรวจสอบเขื่อนอย่างเป็นระบบที่เรียกว่า วิธีดัชนีสภาพ (Condition Index: CI) หลังจากนั้นมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นำโดย รศ.ดร.วรากร ไม้เรียง ได้พัฒนาให้เหมาะสมกับการตรวจสอบเขื่อนดินของประเทศไทย แต่เนื่องจากสภาพที่ได้จาก CI (วรากร, 2542) มีมากจนผู้ทำการตรวจสอบบางรายไม่สามารถระบุสภาพที่แน่นอนได้ทำให้การตรวจสอบใช้เวลาากเกินปกติ ดังนั้นทางมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นำโดย ผศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมภ์ และคณะ (2550) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ได้พยายามพัฒนาระบบของ CI ให้สามารถตรวจเฉพาะสภาพที่สามารถทำให้เขื่อนเกิดการพิบัติได้เท่านั้นเพื่อการระบุสภาพที่ชัดเจนตามลักษณะการพิบัติของเขื่อนและใช้เวลาน้อยกว่าวิธี CI จึงได้ออกมาเป็นระบบการตรวจสอบเขื่อนที่เรียกว่า วิธีดัชนีความเสี่ยง (Risk Index: RI)

วิธีการตรวจสอบสภาพโดยวิธีดัชนีความเสี่ยงได้จากการคัดเลือกสภาพผิดปกติจากการตรวจสอบสภาพที่กล่าวถึงข้างต้น และจากงานวิจัยโครงการความเสี่ยงเขื่อน (สุทธิศักดิ์ และคณะ, 2550) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สภาพความเสี่ยงที่ได้จากการพิบัติของเขื่อนในกรณีต่างๆ ได้นำมาจัดตามลักษณะการพิบัติของเขื่อน แยกตามองค์ประกอบเขื่อน ได้ดังตารางที่ 11, ตารางที่ 12 และตารางที่ 13

ตารางที่ 11 สภาพความเสี่ยงของเขื่อนตามลักษณะการไหลล้นข้ามสันเขื่อน

สภาพความเสี่ยง	องค์ประกอบเขื่อน	สันเขื่อนและไหล่ทาง	อาคารระบายน้ำล้น	อาคารส่งน้ำ
การขุดตัวของสันเขื่อน		x		
สภาพของบานระบาย			x	
ประสิทธิภาพของระบบควบคุมบาน			x	x
ประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังไฟฟ้าสำรอง			x	
สภาพผนังคอนกรีตของอาคารระบายน้ำล้น (Wing Wall)			x	
ความไม่มั่นคงของลาดทางเข้าอาคารระบายน้ำล้น			x	
สภาพของท่อนกันสวะ			x	x
ประสิทธิภาพของการเปิดวาล์วของท่อส่งน้ำ				x
สภาพของตะแกรง				x

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)

ตารางที่ 12 สภาพความเสี่ยงของเขื่อนตามลักษณะการกัดเซาะภายใน

สภาพความเสี่ยง	องค์ประกอบเขื่อน	สันเขื่อนและไหล่ทาง	ลาดเขื่อนด้านเหนือหน้า	ลาดเขื่อนด้านท้ายหน้า	พื้นที่ด้านท้ายหน้า	อาคารระบายน้ำต้น	อาคารส่งน้ำ
หลุมยุบ (Sinkhole)		X	X	X			
ดินไม้, วัชพืช		X	X	X			
รอยแตกตามขวาง		X		X			
การขุดหรือย้ายวัสดุถมเขื่อน		X	X	X			
รู, โพรง, ท่อ, ถ้ำ		X	X	X			
การผุสลายของหิน			X	X			
การกัดเซาะโดยคลื่น			X				
รอยร้าวบริเวณผิวคอนกรีตลาดหน้า			X				
ชนิดของหิน			X				
น้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก				X			
น้ำผุด, พื้นที่เปียก, การไหลซึม					X		
พื้นที่เปียกเป็นแอ่งกระทะ					X		
รอยร้าวบริเวณผนังด้านข้างทางระบายน้ำ (Retaining Wall)						X	
น้ำโคลนไหลออกจากจุดควบคุมการระบาย น้ำท้ายเขื่อน							X
การรั่วซึมของท่อส่งน้ำ							X

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)

ตารางที่ 13 สภาพความเสี่ยงของเขื่อนตามลักษณะการเคลื่อนตัวของเขื่อน

สภาพความเสี่ยง	องค์ประกอบเขื่อน	สันเขื่อนและไหล่ทาง	ลาดเขื่อนด้านเหนือ	ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	พื้นที่ด้านท้ายน้ำ	ระบบระบายน้ำ	อาคารระบายน้ำสัน
รอยแตกตามยาว		X	X	X			
สันเขื่อนบิดออกจากแนว		X					
รอยแตกตามขวาง และการบิดออกจากแนวเขื่อน		X					
การกัดเซาะบริเวณสันเขื่อน		X					
การเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว หรืออูดตัว			X	X			
ร่องน้ำลึกจากการกัดเซาะของน้ำฝน (Oversteep area)			X	X			
การยุบตัว (Consolidation)			X	X			
ประสิทธิภาพของระบบระบายน้ำลาดเขื่อน (Slope Drain)					X		
ประสิทธิภาพของระบบระบายน้ำท้ายเขื่อน (Toe Drain)					X		
การเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน (Drain Ditch)				X			
พื้นที่อูดขึ้นบริเวณท้ายน้ำ					X		
การปิดกั้นการระบายน้ำ						X	
การยุบตัวในแนวตั้ง							X
พื้นคอนกรีตของสันอาคารระบายน้ำสันแตกร้าว							X

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)

## ความปลอดภัยเขื่อน

ความปลอดภัยเขื่อนมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการดำเนินงานด้านการบำรุงรักษาเขื่อน เพราะการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม และถูกวิธีตามหลักของความปลอดภัยเขื่อนจะทำให้ลดความเสี่ยงในการพิบัติของเขื่อนและยืดอายุการใช้งานเขื่อนที่ใช้งานในปัจจุบัน การพัฒนาวิธีการในการเข้าถึงความปลอดภัยเขื่อนอย่างเป็นระบบ ทำให้รู้ถึงข้อบกพร่องในการบำรุงรักษา ทำให้เกิดการพัฒนาแนวทางการเข้าถึงความปลอดภัยเขื่อนและสามารถนำไปใช้ปฏิบัติได้จริงซึ่งหลายหน่วยงานทั้งจากภายในประเทศและต่างประเทศได้มีการพัฒนาและนำไปปฏิบัติซึ่งได้นำเสนอในรูปแบบต่างๆ เช่น เอกสารรายงาน, งานวิจัย เป็นต้น ข้อความที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยเขื่อนบางส่วนจากเอกสารต่างๆ จากการค้นคว้ามีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เรื่องฤทธิ์ (2535) ได้กล่าวถึงความปลอดภัยเขื่อนไว้ดังนี้ “ระบบตรวจวัดพฤติกรรมเขื่อน โดยใช้อุปกรณ์ที่ติดตั้งไว้ทั้งภายนอกและภายในจะต้องอ่านและบันทึก ตามตารางที่กำหนดไว้ ตลอดระยะเวลาก่อสร้าง การตรวจสอบ การทดสอบ และการติดตามผล จะมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อความปลอดภัยของเขื่อน การประสานงานและร่วมมือกัน ระหว่างผู้ออกแบบ ผู้ก่อสร้างจะเป็นกุญแจสำคัญในการใช้ประสิทธิภาพและเทคโนโลยีร่วมกัน ถ้าหากมีปัญหาเกิดขึ้นก็จะได้ร่วมกันแก้ไขให้ถูกต้องเพื่อเป็นหนทางนำไปสู่ความสำเร็จในการสร้างเขื่อนที่ปลอดภัย การตรวจสอบและติดตามผลจากมาตรวัดชนิดต่างๆ ที่ติดตั้งไว้ในตัวเขื่อนมิใช่จะจบสิ้นแต่เพียงในระยะเวลาก่อสร้างเท่านั้น แต่ระบบติดตามผลจะเป็นระยะสำคัญที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของเขื่อนในระยะใช้งานอีกด้วย ผลการติดตามพฤติกรรมของเขื่อนดินจะบอกให้ทราบล่วงหน้าได้ในสิ่งที่ผิดปกติในพฤติกรรม ก่อนที่จะเกิดความเสียหายจนสายเกินกว่าที่จะแก้ไขได้ การติดตามพฤติกรรมของเขื่อนจากมาตรและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ติดตั้งไว้ทั้งภายนอกและภายในตัวเขื่อน รวมทั้งการตรวจสอบด้วยสายตา บางบริเวณที่สำคัญทั้งบริเวณตัวเขื่อนและอาคารประกอบจะต้องจัดทำเป็นรายงานประจำ เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลสำหรับประเมินค่าความปลอดภัยต่อไป ข้อมูลที่สำคัญที่จะต้องติดตามก็คือ แรงดันน้ำภายในตัวเขื่อน การทรุดตัวทั้งภายนอกและภายใน การเปรียบเทียบพฤติกรรมที่ได้จากมาตรวัด และอุปกรณ์ต่างๆ กับข้อสมมติฐาน ที่ใช้ในการออกแบบว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร และจะมีคุณค่าเป็นอย่างยิ่ง สำหรับใช้เพื่อการออกแบบและก่อสร้างเขื่อนอื่นๆ ต่อไป การตรวจสอบพฤติกรรมเขื่อนจากมาตรวัดอุปกรณ์ และจากการตรวจสอบในสนาม โดยเฉพาะการรั่วซึมบริเวณดินเขื่อนท้ายน้ำ เพื่อหาสิ่งผิดปกติ จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการประเมินล่วงหน้าว่าเขื่อนอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยหรือไม่ การแก้ไขปัญหาที่เกิดภายหลังก่อสร้าง

เสร็จและกำลังเก็บกักน้ำ จะต้องเสียค่าใช้จ่ายแพงมากและอาจไม่ประสบความสำเร็จก็ได้ ปัญหาเหล่านี้สามารถจะหลีกเลี่ยงมิให้เกิดขึ้นได้หากได้ให้ความสนใจเป็นพิเศษในระยะเริ่มแรกตั้งแต่การเลือกทำเลที่ตั้งตัวเขื่อน การสำรวจและวิเคราะห์ข้อมูลทางปฐพีและธรณีวิทยา ความละเอียดถี่ถ้วนในด้านการออกแบบและก่อสร้าง โดยใช้วิศวกรและนักธรณีวิทยาที่มีประสบการณ์สูงพอเพียง การใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมทั้งในด้านการออกแบบและก่อสร้าง ก็เป็นกุญแจสำคัญอีกประการหนึ่ง การสร้างเขื่อนให้ปลอดภัยจะต้องเริ่มต้นด้วย การวางแผน การกำหนดวิธีการปรับปรุงฐานรากที่เหมาะสมกับลักษณะทางธรณีวิทยาของแต่ละแห่ง การבודัดบริเวณรอยเชื่อมต่อระหว่างฐานรากฐานยัน และอาคารที่ฝังในตัวเขื่อนให้แนบสนิทกับแกนที่บ้น้ำ เพื่อมิให้น้ำรั่วลอดผ่านได้ การควบคุมการבודัดทุกชั้นตอนให้เป็นไปตามแบบแปลน และข้อกำหนดรายละเอียดทางด้านวิศวกรรมที่วางไว้ ความปลอดภัยเขื่อนขึ้นอยู่กับความร่วมมือและประสานงานระหว่างผู้ออกแบบทั้งวิศวกร นักธรณีวิทยาและวิศวกรผู้ก่อสร้างร่วมมือกันใช้ประสบการณ์และการตัดสินใจที่ถูกต้อง เพื่อให้ได้มาซึ่งผลงานก่อสร้างที่ดีตามเป้าหมายที่วางไว้”

### **หลักการของความปลอดภัยเขื่อน (Principle of Dam Safety)**

หลักการของความปลอดภัยเขื่อน โดยทั่วไป คือ การรักษาเขื่อนให้ปลอดภัยจากอันตรายต่างๆ ที่ก่อให้เกิดเขื่อนเกิดการพิบัติ และเขื่อนสามารถใช้งานได้ตามปกติ รวมถึงการบำรุงรักษา ซ่อมแซม ปรับปรุงเขื่อนอย่างถูกต้อง เหมาะสม และแนวทางป้องกันรักษาเขื่อนตามหลักวิชาการ

### **องค์ประกอบของความปลอดภัยเขื่อน (Component of Dam Safety)**

จากการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับความปลอดภัยของเขื่อน และปรึกษาผู้เชี่ยวชาญ ได้พบว่า องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยเขื่อนประกอบด้วย 4 องค์ประกอบ ได้แก่

1. ประวัติเขื่อน (Dam History) จะกล่าวถึงการที่เขื่อนเกิดความเสียหายจากแรงกระทำต่างๆ ทำการศึกษาเพื่อป้องกัน หรือบรรเทาการเกิดความเสียหายกับเขื่อน
2. องค์ประกอบเขื่อน (Dam Component) องค์ประกอบเขื่อนที่กล่าวถึง เช่น ดินเหนียว แกนกลางเขื่อน, ชั้นกรอง, ดินเหนียวปูพรมด้านเหนือน้ำ เป็นต้น

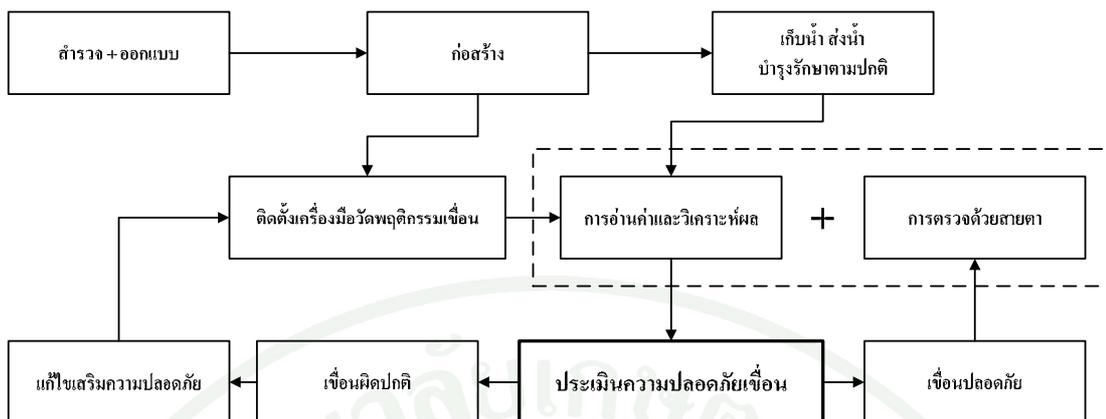
3. การตรวจสอบสภาพเขื่อน (Dam Inspection) จะตรวจสอบบริเวณพื้นที่เขื่อน เช่น ล้นเขื่อน, ลาดเขื่อนด้านเหนือหน้า, ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ, พื้นที่ท้ายน้ำ เป็นต้น

4. เครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมเขื่อน (Dam Instrumentation) เช่น เครื่องมือตรวจวัดความดันน้ำ, เครื่องมือตรวจวัดการเคลื่อนตัว เป็นต้น

### การประเมินความปลอดภัยเขื่อน (Dam Safety Evaluation)

การประเมินความปลอดภัยเขื่อนเป็นภาระกิจที่สำคัญและต้องกระทำหากเขื่อนได้ก่อสร้างและใช้งานสำหรับเก็บกักน้ำ สำหรับการประเมินความปลอดภัยเขื่อนได้มีคำอธิบายดังนี้

วารากร ไม้เรียง (2550) ได้อธิบายเกี่ยวกับความปลอดภัยเขื่อนไว้บางส่วนดังนี้ คือ ในขบวนการสำรวจ ออกแบบ ก่อสร้าง ใช้งานและบำรุงรักษาเขื่อน โดยปกติแล้วผู้ที่เกี่ยวข้องพยายามจะดำเนินการให้เป็นไปตามมาตรฐานที่ดีของขั้นตอนดังกล่าว แต่ในสภาพความเป็นจริงที่มีความแปรปรวนของปัจจัยที่เกี่ยวข้องจึงมักจะมีข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยไม่ได้ตั้งใจหรือไม่คาดคิดอยู่เสมอ วิศวกรมักจะเผื่อส่วนนี้ไว้โดยใช้อัตราส่วนปลอดภัย (Factor of Safety) ในการออกแบบ แต่ก็มักจะมีคำถามที่เกิดขึ้นเสมอว่าสภาพความปลอดภัยของเขื่อนจริงๆ นั้นมีมากน้อยเพียงใด ถ้าหากเกิดการพิบัติขึ้นจะทำความเสียหายมากน้อยเพียงใด และจะมีการเตรียมการในกรณีฉุกเฉินอย่างไร ดังนั้นเขื่อนขนาดใหญ่หรือมีความเสี่ยงสูงจึงต้องมีการวิเคราะห์ความเสี่ยง (Risk Analysis) และประเมินความเสี่ยง (Risk Assessment) ซึ่งในปัจจุบันนี้ยังไม่ได้มีการดำเนินการอย่างเต็มรูปแบบในประเทศไทย แต่หลายหน่วยงาน เช่น การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยและกรมชลประทานได้มีการจัดตั้งหน่วยงานที่ตรวจสอบความปลอดภัยของเขื่อน (Dam Safety - Evaluation) ซึ่งเป็นเพียงองค์ประกอบหนึ่งของการประเมินความเสี่ยงเขื่อนเท่านั้น ขั้นตอนในการประเมินความปลอดภัยเขื่อนโดยทั่วไปนั้นได้ดำเนินการดังภาพที่ 24



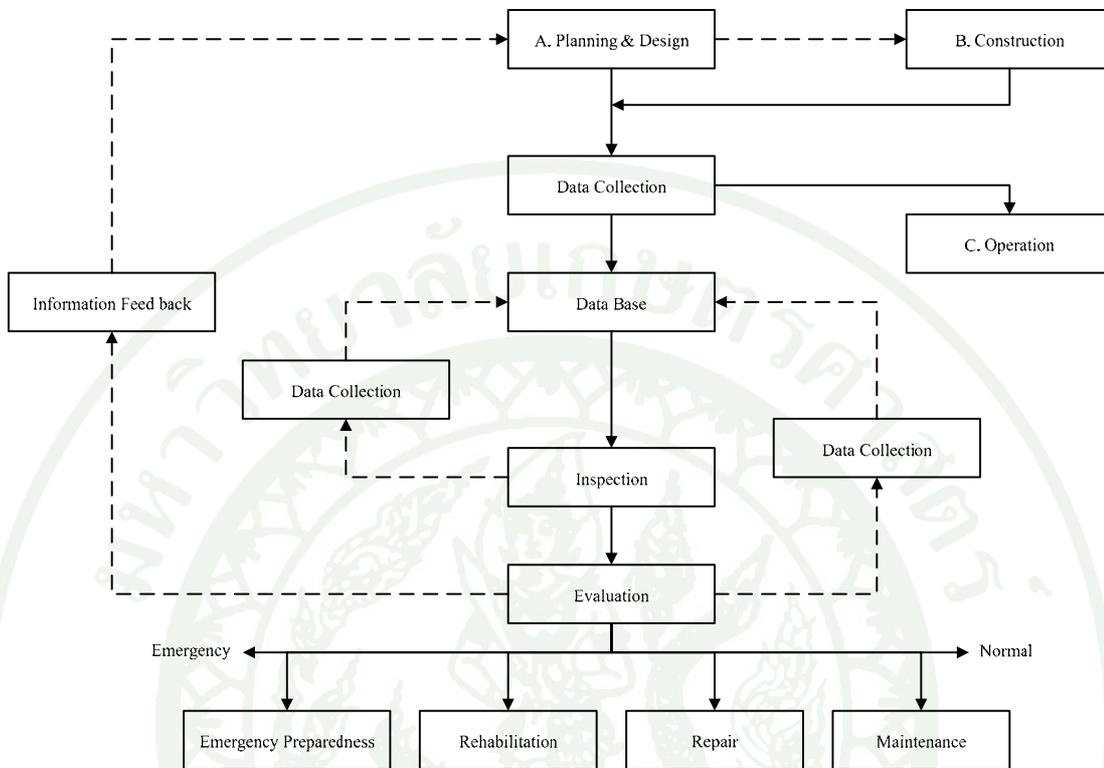
ภาพที่ 24 การประเมินความปลอดภัยเขื่อนโดยทั่วไป

ที่มา: วรากร (2550)

วรากร (2550) ได้กล่าวถึงการประเมินความปลอดภัยเขื่อนไว้ในเอกสารการอบรม ชื่อ ความปลอดภัยเขื่อนในสภาวะปกติและสภาวะอันตราย ไว้ดังนี้ “การประเมินความปลอดภัยของเขื่อน ตามปกติจะหมายถึง การเก็บรวบรวมข้อมูลทางด้านเทคนิคเขื่อนทั้งในระหว่างการสำรวจ ออกแบบ ก่อสร้าง ใช้งาน ตลอดจนการตรวจสอบสภาพด้วยตา และตรวจสอบพฤติกรรมจากเครื่องมือวัดในตัวเขื่อนนำมาประมวลและประเมินลำดับความปลอดภัยหรือความเสี่ยงออกมาเป็นตัวเลขหรือเชิงปริมาณ (Quantitative) ซึ่งสามารถบ่งชี้ความสมบูรณ์หรือความเสี่ยงของเขื่อนได้อย่างชัดเจน ผลจากการประเมินดังกล่าว จะส่งผลให้มีการดำเนินการด้านความปลอดภัยของเขื่อนได้ดังต่อไปนี้

1. การซ่อมแซมให้คืนสภาพ (Rehabilitation)
2. การซ่อมแซมแก้ไขปรับปรุงปกติ (Repairing)
3. การกำหนดการบำรุงรักษาในระยะยาว (Maintenance)
4. การติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดพฤติกรรมเพิ่มเติม (Re-instrumentation)
5. การกำหนดแผนการฉุกเฉิน (Emergency Action Plan)
6. การทบทวนวิธีการสำรวจ ออกแบบ และก่อสร้าง”

ขั้นตอนของการประเมินความปลอดภัยเขื่อนได้แสดงดังภาพที่ 25



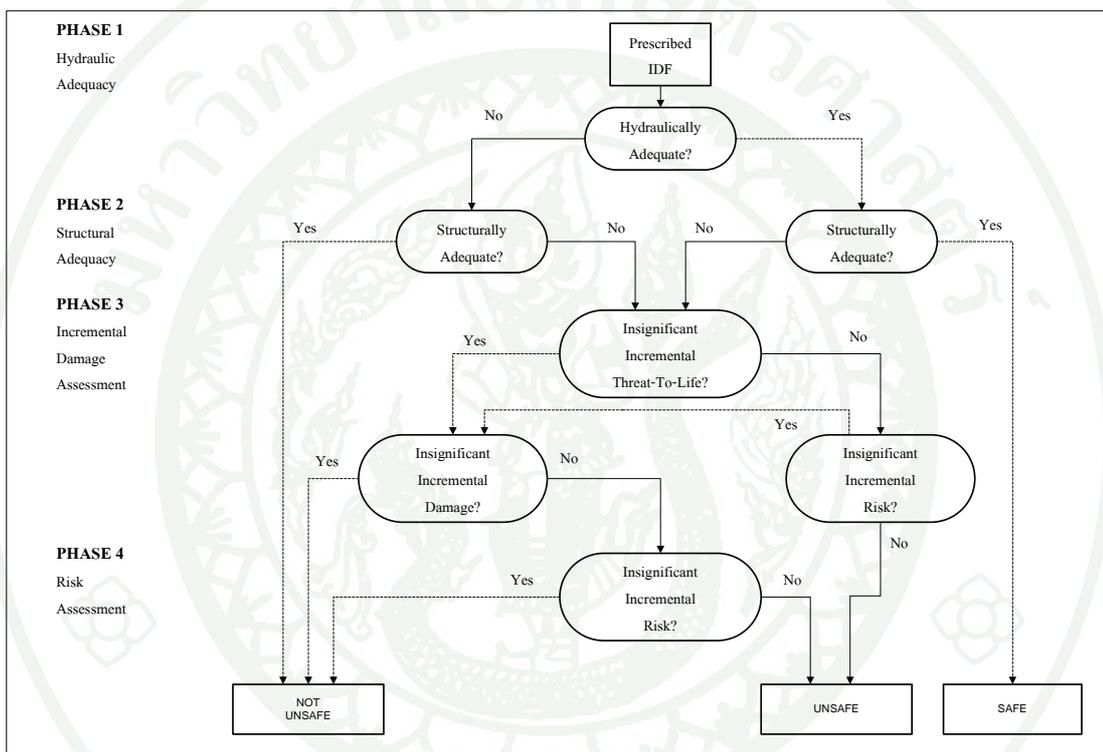
ภาพที่ 25 ขั้นตอนการดำเนินการประเมินความปลอดภัยของเขื่อน

ที่มา: วรากร (2550)

David *et al.* (1993) ได้กล่าวถึงขั้นตอน (Phases) ของการประเมินความปลอดภัยเขื่อนในส่วนที่เกี่ยวข้องกับทางด้านน้ำ (The Hydrologic Safety of Dams) ไว้ดังนี้ พื้นฐานหลายขั้นตอน (4 ขั้นตอน) สำหรับการกำหนดความปลอดภัยเขื่อนด้านน้ำได้อธิบายในภาพที่ 26 ก่อนการอธิบายขั้นตอนดังกล่าวจะได้กล่าวถึงบทบาทของการกำหนดเกณฑ์เกี่ยวกับขนาดและอันตรายก่อน โดยได้สรุปดังนี้

การแบ่งขนาดและอันตราย (Hazard and Size Classification)

ข้อบังคับหลายอย่างในการจัดแบ่งหมวดหมู่ของเขื่อนโดยจะใช้อันตราย (สูง, ปานกลาง และ ต่ำ) และขนาด (เล็กมาก, เล็ก, ใหญ่ และ ปานกลาง) อันตรายบ่งชี้ศักยภาพของการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินเมื่อเขื่อนเกิดการพิบัติ การแบ่งขนาดตั้งอยู่บนพื้นฐานของความสูงของน้ำและความจุของน้ำในอ่างฯ



ภาพที่ 26 ขั้นตอนการเข้าถึงการประเมินความปลอดภัยเขื่อนสำหรับทางด้านน้ำ (The Hydrologic Safety of Dams)

ที่มา: Bowles (1993)

ตัวอย่างของการแบ่งประเภทนี้ (อันตราย และ ขนาด) กฎเกณฑ์ที่สนับสนุนความปลอดภัยเขื่อนของรัฐยูทาห์ (Utah) คือ IDF (the Inflow design Flood) ซึ่งอยู่บนพื้นฐานบนการแบ่งอันตรายของเขื่อน ลักษณะเฉพาะของกฎนี้ คือ “สำหรับบางเขื่อนที่อันตรายในด้านความสูงซึ่งเป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สิน PMF (the Probable Maximum Flood) จะกลายเป็น IDF” (R625-11-4A)

อย่างไรก็ตาม สำหรับเขื่อนที่อันตรายสูงและปานกลาง “วิศวกรของรัฐ (the State -Engineer) ต้องยอมรับ IDF (ในส่วนที่มีการพิจารณา) น้อยกว่า PMF ซึ่งอยู่บนพื้นฐานจากผลของ IDA (an Incremental Damage Assessment) ซึ่งแสดงการพิบัติของเขื่อนจะเป็นสาเหตุของความเสียหายของทรัพย์สินที่เพิ่มขึ้นแต่ไม่เพิ่มในการสูญเสียชีวิต” (R625-11-4B) ผู้ที่เป็นเจ้าของเขื่อนควรต้องยอมรับการชดใช้ค่าเสียหาย และ IDF ที่อยู่บนพื้นฐานของ IDA พิสูจน์โดยวิศวกรของรัฐ (the State Engineer) จะไม่น้อยกว่าผลของการคำนวณเหตุการณ์ฝน 100 ปี “ทั้งหมดของเขื่อนที่อันตรายต่ำต้องผ่านน้ำป่า (Flood) ที่เกิดจากฝน 100 ปีที่มีการกระจายและช่วงของฝนอยู่ในช่วงวิกฤต” (R625-11-4D)

ตั้งแต่อันตรายที่วัดศักยภาพของการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินเมื่อเขื่อนพิบัติ (และความไม่เพียงพอของตัวเขื่อนเอง) การแบ่งอันตรายต้องเปลี่ยนตามเวลา เช่นเดียวกับที่มีการเปลี่ยนสภาพต่างๆ ด้านท้ายน้ำ สำหรับตัวอย่าง เขื่อนที่ต้องทำการแบ่งอันตรายใหม่ และ เขื่อนที่ IDF เพิ่มขึ้นตามเวลา เพราะว่ามีเพิ่มขึ้นของชีวิตและทรัพย์สินด้านท้ายน้ำ

#### ขั้นตอนที่ 1 การประเมินความพอเพียงด้านน้ำ (Hydraulic Adequacy Assessment)

บางข้อกำหนด เช่น รัฐเท็กซัส (Texas) เป็นต้น ในการแบ่งเขื่อนเกี่ยวกับความพอเพียงด้านน้ำ (Hydraulically Adequate) ถ้าไม่มีการไหลล้นข้ามสันเขื่อน โดย IDF (IDF จากการแบ่งอันตรายและขนาด) ตลอดจนการผิดปกติของเขื่อนที่ถูกออกแบบให้สามารถไหลล้นข้ามได้ (บางเขื่อนคอนกรีตหรือหินก่อที่ยอมให้เกิดการไหลล้นที่พิจารณาจากความสูง) ดังนั้น เขื่อนมีความไม่เพียงพอด้านน้ำ (a Hydraulically Inadequate) จะไม่เกิดการพิบัติ

#### ขั้นตอนที่ 2 การประเมินความพอเพียงด้านโครงสร้าง (Structural Adequacy Assessment)

การกำหนดของเขื่อนคอนกรีตหรือหินก่อที่จะพิบัติเมื่อเกิดการไหลล้นมีความต้องการวิเคราะห์ด้านโครงสร้างสำหรับสภาพต่างๆ เช่น การพลิกคว่ำ (Overturning) และการไถล (Sliding) (ในส่วนเพิ่มเติม สภาพฐานรากต้องดีหากเกิดการไหลล้น) ถ้าเขื่อนมีความต้องการความปลอดภัยระหว่างช่วงเกิด IDF ซึ่งถูกกำหนดจากความพอเพียงด้านโครงสร้าง (Structurally Adequate) เขื่อนดินถมที่ถูกพิจารณาเกี่ยวกับการพิบัติอย่างรวดเร็วระหว่างการกัดเซาะโดยการไหลล้น ดังนั้น จะพิจารณาจากความพอเพียงด้านโครงสร้าง ถ้าเกิดการไหลล้นจาก IDF

### ขั้นตอนที่ 3 การประเมินความเสียหายที่เพิ่มขึ้น (Incremental Damage Assessment)

เขื่อนที่มีความพอเพียงด้านโครงสร้างและน้ำ บ่อยครั้งที่ต้องการงานด้านการแก้ไข เพื่อความจุที่มากที่ไม่ทำให้เกิดการไหลล้น (เช่น ความจุของอาคารระบายน้ำล้นที่มาก หรือการเพิ่มความสูงเขื่อน) หรือการจัดหาความแข็งแรงด้านโครงสร้าง (เช่น การยึดรั้ง) ดังนั้นการพิบัติจะไม่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม การพิบัติของเขื่อนไม่ได้เกิดขึ้นอัตโนมัติที่นำไปสู่ความเสียหายด้านท้ายน้ำ ถ้าการพิบัติไม่เกิดขึ้นหากความเสียหายเกิดขึ้นระหว่างน้ำบ่าถ้าเขื่อนไม่พิบัติ รวมถึงค่าใช้จ่ายในการตัดสินใจด้านความปลอดภัยเขื่อนของการวัดโครงสร้างและไม่ใช่โครงสร้าง มีความสำคัญที่ทำให้เข้าใจความเสียหายที่เกิดขึ้นจากเขื่อนพิบัติ ในบางกรณี IDA ต้องให้เหตุผลของภารกิจเขื่อนหรือปรับปรุงเขื่อนที่ผ่านน้ำบ่าที่น้อยกว่า IDF จากการจัดหมวดหมู่โดยใช้เกณฑ์อันตรายและขนาด

การเข้าถึงผลกระทบด้านท้ายน้ำจากการพิบัติของเขื่อนต้องการวิเคราะห์การแตกของเขื่อน (Dam Breach Analyses) และการไหลของน้ำบ่า (Flood Routings) อย่างไรก็ตาม การจัดหาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์นี้ยังไม่สมบูรณ์ในการเป็นตัวแทนกลไก การแตกของเขื่อนที่แท้จริงและน้ำบ่าด้านท้ายน้ำ ดังนั้นวิศวกรควรศึกษาการเข้าถึงผลของความไม่แน่นอนต่างๆ ในการป้อนข้อมูล การปฏิบัติโดยใช้ค่าสำหรับตัวแปรเขื่อนแตกสำหรับพื้นที่น้ำท่วมใช้ในแผนปฏิบัติการฉุกเฉิน อย่างไรก็ตาม การไม่พิจารณาในการใช้ค่าสำหรับตัวแปรในการแตกที่ใช้ในการกำหนดกราฟน้ำของการแตก (the Breach Hydrograph) สามารถลดการ IDA ผิด ผลที่ได้สามารถนำไปฟื้นฟูสภาพเขื่อนได้ เมื่อเกิดความเสียหายที่เพิ่มขึ้นด้านท้ายเขื่อน ความเสียหายที่เพิ่มขึ้นสามารถแสดงในเทอมของเศรษฐกิจหรือชีวิต แต่โดยส่วนใหญ่ IDA จะนำเสนอในรูปแบบของความลึกของน้ำบ่า ในบางเหตุการณ์ เมืองที่ทำการวิเคราะห์ IDA (และ RA (Risk Assessment)) ของน้ำบ่าของกราฟน้ำ (Flood Hydrographs) ของการแตก (Breach) หรือไม่แตก (Non-breach) หมายถึงการบ่งชี้ของลักษณะการพิบัติ (การมอบหมายของตัวแปรการแตก) และความแน่นอนและตัวแทนของการไหลของน้ำบ่าควรระมัดระวังที่ถูกประเมินโดยวิศวกรและข้อกำหนด

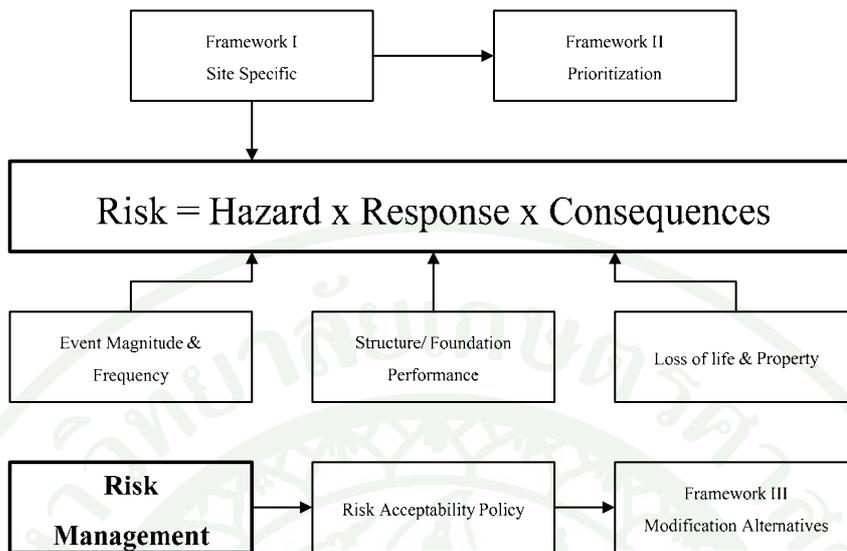
### ขั้นตอนที่ 4 การประเมินความเสี่ยง (Risk Assessment)

ข้อจำกัดของ IDA ไม่มีข้อมูลของการนำจะเป็นที่เขื่อนจะพิบัติและผลความเสียหายด้านท้ายน้ำ ข้อจำกัดนี้ของ IDA (และข้อกำหนดเขื่อน, ผู้เป็นเจ้าของ, ผู้ปฏิบัติ และ ผู้รับประกันภัย) พร้อมข้อมูลเพิ่มเติมที่มีความสำคัญสำหรับการตัดสินใจ การปฏิบัติ RA (Risk Assessment) เคยถูก

พัฒนาสำหรับการประเมินความปลอดภัยเขื่อน ตัวแทนต่างๆ ของสหรัฐอเมริกาด้านความปลอดภัยเขื่อนได้ให้เงินสนับสนุนในส่วนนี้ (เช่น the American Society of Civil -Engineers, the National Research Council, และมหาวิทยาลัยต่างๆ รวมถึง Utah State University) ได้มีบันทึกในส่วนนี้ถึงแนวทางการปฏิบัติในการเข้าถึงความเสี่ยงซึ่ง USBR (1989) ได้เป็นผู้พัฒนา

RA ได้เพิ่มมิติของที่น่าจะเป็นของการพิบัติของเขื่อน หรือ เหตุการณ์ต่อเนื่องด้านท้ายน้ำที่มีข้อมูลจาก IDA RA เป็นงานประจำที่ใช้ในหลายพื้นที่ของความปลอดภัยสาธารณะ เช่น การออกแบบทางยกระดับ และข้อกำหนดด้านสิ่งแวดล้อม RA สามารถใช้เพื่อเตรียมรูปการด้านเศรษฐกิจของการตัดสินใจความปลอดภัยเขื่อนเท่านั้น หรือ จัดหาข้อมูลความปลอดภัยในชีวิต เช่นเดียวกับการใช้ IDA แนวทางสามารถพัฒนาสำหรับการตัดสินใจความปลอดภัยเขื่อนตั้งอยู่บนพื้นฐานของข้อมูลที่ได้จาก RA (แต่ RA พิจารณาปัจจัยเฉพาะบริเวณ) RA ได้ถูกแนะนำให้ผู้กำหนดการใช้ต้องพิจารณาอย่างระมัดระวังในกรณีคุณสมบัติของเจ้าของ RA สามารถจัดการความเข้าใจในผลลัพธ์ขององค์ประกอบความเสียหายที่เพิ่มขึ้น หรือ อันตรายต่อชีวิต เช่นเดียวกับผลของเขื่อนพิบัติ ค่าของ RA จะต้องถูกนำโดยวิศวกรซึ่งจะเปลี่ยนการออกแบบและการประเมินความปลอดภัยเขื่อน

สำหรับการวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงของเขื่อนนั้นจะต้องมีขั้นตอนที่เพิ่มขึ้นจากการประเมินความปลอดภัยมากดังแผนภูมิแสดงกรอบการประเมินของ U.S. Army Corps of Engineers (2001) ดังภาพที่ 27

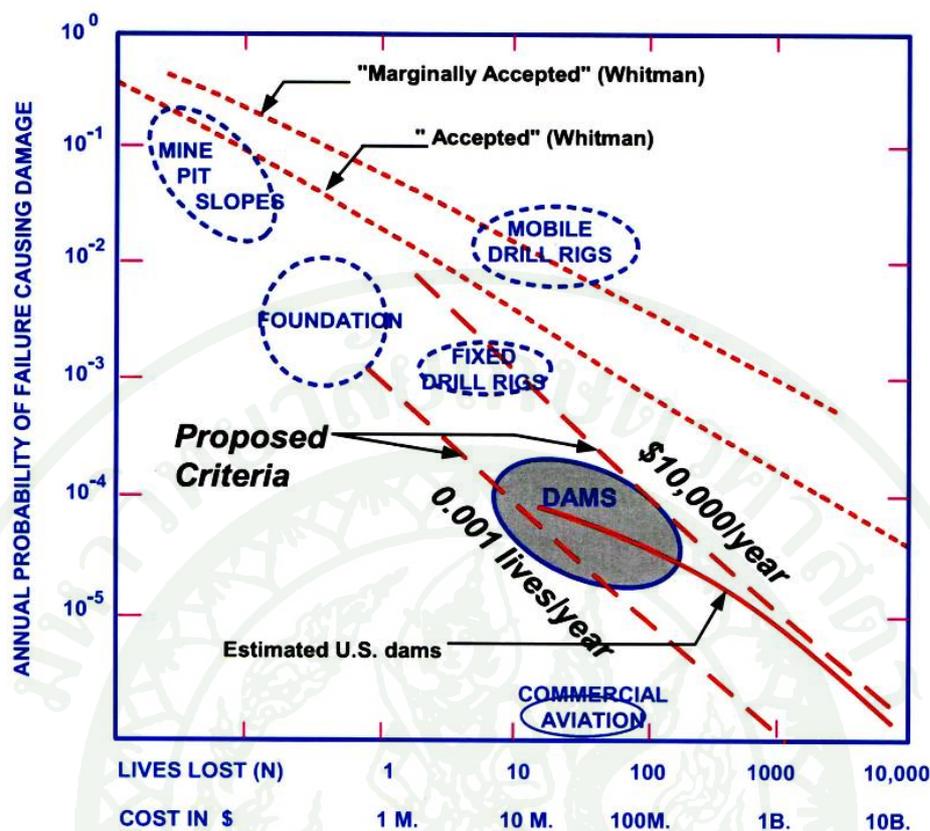


ภาพที่ 27 การประเมินความเสี่ยงของเขื่อน

ที่มา: USACE (2001)

สำหรับเกณฑ์การยอมรับความเสี่ยงของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้มีการกำหนดตัวเลขที่สำคัญ 3 ค่า (ภาพที่ 28) คือ

1. จำนวนเขื่อนที่มีโอกาสพิบัติที่ยอมรับในหนึ่งปีเทียบกับจำนวนเขื่อนที่มีอยู่ทั้งหมดของประเทศ ในสหรัฐกำหนดไว้มากที่สุดประมาณไม่เกิน 1 เขื่อนใน 10,000 เขื่อนในหนึ่งปี
2. จำนวนคนที่อาจสูญเสียชีวิตในการเกิดการพิบัติของเขื่อนในรอบหนึ่งปี ในสหรัฐกำหนดไว้มากที่สุดประมาณไม่เกิน 200 คนในหนึ่งปี
3. มูลค่าความเสียหายที่ยอมรับได้อันเกิดจากเขื่อนพิบัติ ในสหรัฐกำหนดไว้มากที่สุดประมาณไม่เกิน 200 ล้านดอลลาร์



ภาพที่ 28 เกณฑ์การยอมรับความเสี่ยงในประเทศสหรัฐอเมริกา

ที่มา: Whitman (1984)

### การตรวจสอบภาพเขื่อนด้วยสายตา (Visual Inspection)

การตรวจสอบภาพเขื่อนจะใช้วิธีการตรวจสอบภาพเขื่อนที่เรียกว่าการตรวจสอบภาพเขื่อนด้วยสายตา (Visual inspection) โดยทั่วไปการตรวจสอบภาพเขื่อนด้วยสายตาจะมีองค์ประกอบดังนี้

1. วัตถุประสงค์ของการตรวจสอบภาพเขื่อนด้วยสายตา
2. รูปแบบของการตรวจสอบภาพเขื่อนด้วยสายตา
3. การได้มาซึ่งสภาพ และสภาพที่เกี่ยวข้อง
4. หลักการให้ระดับความปลอดภัย
5. วิธีการตรวจสอบภาพ

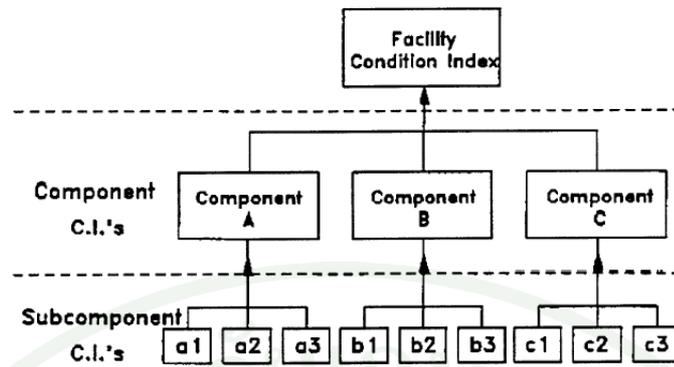
## 6. การนำเสนอผลของการตรวจสอบสภาพ

ได้มีหลายหน่วยงานได้ใช้วิธีการนี้ในการตรวจสอบสภาพเขื่อน พอสรุปได้ ดังนี้

Repair, Evaluation, Maintenance and Rehabilitation Research Program (REMR - Research Program) (USACE, 1998)

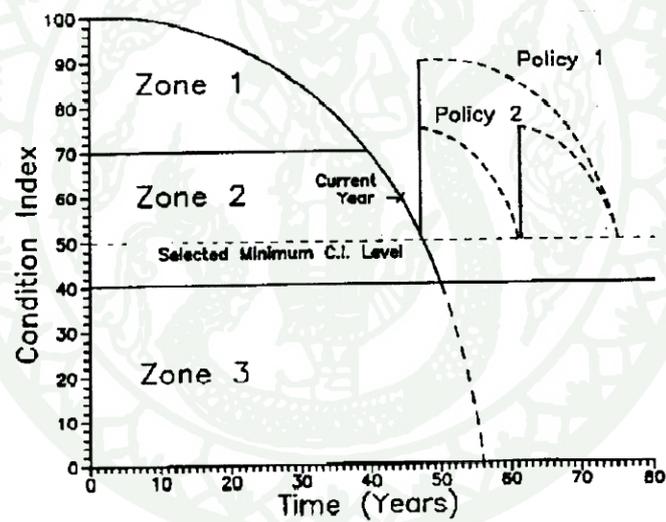
เริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1984 และได้ทำเสร็จในปี ค.ศ. 1998 ซึ่งเทคโนโลยีของวิธี REMR ได้ถูกพัฒนามา 14 ปี ที่มีจุดมุ่งหมายเพื่อทำการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับ 14 เรื่อง ได้แก่ คอนกรีตและเหล็ก, ปฐพี หรือธรณีเทคนิค, พลังงานน้ำ (Hydraulic), ไฟฟ้าและเครื่องกล, ลิ่งแวกล้อม, ชายฝั่ง, และการบริหารจัดการ สำหรับวัตถุประสงค์แรกของการตรวจสอบสภาพด้วย วิธี REMR คือ การวิจัยเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีทางสาขารูปโภคพื้นฐาน การตรวจสอบจะใช้สายตา และเครื่องมือ หรืออุปกรณ์ตรวจสอบหากเกินความสามารถของผู้ตรวจ หรือเพื่อให้เกิดความสะดวกในการตรวจ เช่น การใช้กล้องวิดีโอสำหรับการตรวจสอบสภาพใต้น้ำ ผู้ตรวจสอบจะต้องมีความรู้ในเรื่องที่ตรวจสอบ สำหรับจำนวนองค์ประกอบของการตรวจเขื่อน (องค์ประกอบหลัก คือ โครงสร้างเหล็ก, โครงสร้างคอนกรีต, วัชพืช) การให้คะแนนสภาพมีคะแนนอยู่ระหว่าง 0 - 100 คะแนนเท่ากับ 0 หมายถึง สภาพแย่มากต้องทำการซ่อมแซม คะแนนเท่ากับ 100 หมายถึง สภาพดี สมบูรณ์ และมีการแบ่งคะแนนเป็น 3 ส่วน ส่วนที่ 1 คะแนนระหว่าง 70 - 100 หมายถึง สภาพและการทำงานของเขื่อนอยู่ในสภาพปกติซึ่งต้องการการบำรุงรักษาตามการตรวจสอบสภาพตาม การบำรุงรักษาปกติ ส่วนที่ 2 คะแนนอยู่ระหว่าง 40 - 69 หมายถึง สภาพปานกลางและหน้าที่ผิดปกติ ต้องการการเตือนเพราะอยู่ช่วงการเชื่อมต่อ (Transition) ซึ่งต้องการการบำรุงรักษาอย่างมาก และการซ่อมแซมส่วนที่เสียหาย และส่วนที่ 3 คะแนนอยู่ระหว่าง 0 - 39 สภาพอยู่ในสภาวะชำร่วยต้องการการบำรุงรักษาทันทีทันใด วิธีนี้ไม่มีวิธีการให้น้ำหนักขององค์ประกอบ วิธีการตัดสินใจถึงความปลอดภัยจะใช้คะแนนเป็นเกณฑ์ จำนวนผู้ตรวจสอบสภาพ ขึ้นอยู่กับพื้นที่ทำการตรวจสอบสภาพ และปริมาณ และความชำนาญในแต่ละด้านของผู้ตรวจสอบสภาพ

ได้แสดงรายละเอียดขั้นตอนในภาพที่ 29, 30 และตารางที่ 14



ภาพที่ 29 กระบวนการแบ่งองค์ประกอบของสภาพของวิธี REMR

ที่มา: USACE (1996)



ภาพที่ 30 การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีสภาพตามเวลาของวิธี REMR

ที่มา: USACE (1996)

ตารางที่ 14 สเกลดัชนีสภาพของวิธี REMR

Condition			
Zone	Index	Condition Description	Recommended Action
1	85 to 100	<b>Excellent:</b> No noticeable defects. Some aging or wear may be visible.	Immediate action is not required.
	70 to 84	<b>Good:</b> Only minor deterioration or defects are evident.	
2	55 to 69	<b>Fair:</b> Some deterioration or defects are evident, but function is not significantly affected.	Economic analysis of repair alternative is recommended to determine appropriate action.
	40 to 54	<b>Marginal:</b> Moderate deterioration. Function is still adequate.	
3	25 to 39	<b>Poor:</b> Serious deterioration in at least some portions of the structure. Function is inadequate.	Detailed evaluation is required to determine the need for repair, rehabilitation, or reconstruction. Safety evaluation is recommended.
	10 to 24	<b>Very Poor:</b> Extensive deterioration. Barely functional.	
	0 to 9	<b>Failed:</b> No longer functions. General failure or complete failure of a major structural component.	

ที่มา: USACE (1996)

SEED (Safety Evaluation of Existing Dams) (USBR, 1995)

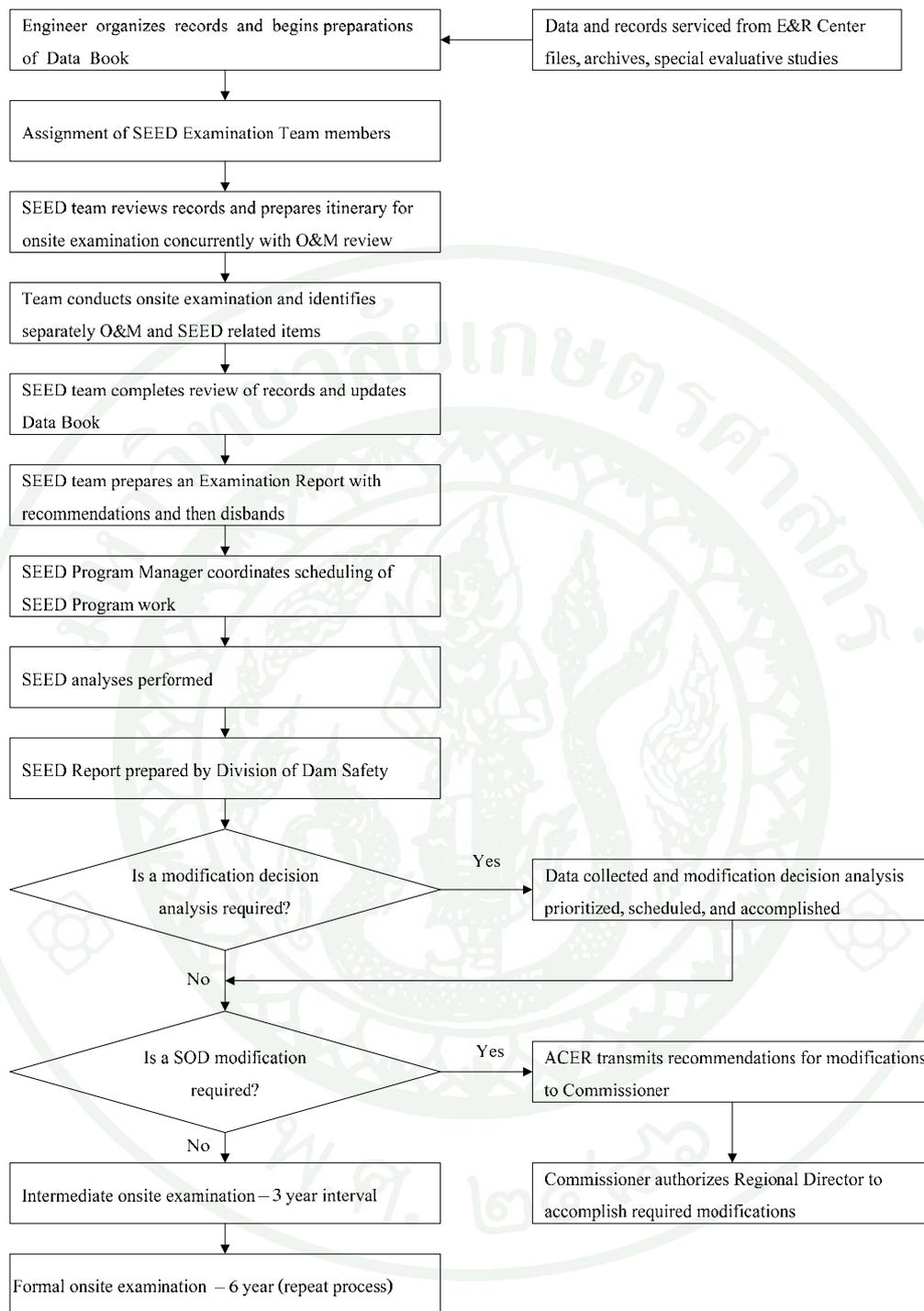
การตรวจสอบสภาพเขื่อนตามวิธีของ SEED วัตถุประสงค์เพื่อหาข้อบกพร่อง หรือส่วนที่เสียหาย หรือเสื่อมสภาพ ตามองค์ประกอบของเขื่อน ลักษณะการตรวจสอบโดยวิธีนี้จะใช้สายตามองหาสภาพที่ผิดปกติ แล้วใช้แบบฟอร์มการตรวจสอบเขื่อนอธิบายลักษณะสภาพที่ ตรวจพบ และทำการเขียนรายงานการตรวจสอบเขื่อน คุณสมบัติของผู้ตรวจสอบจะต้องมีความรู้ในองค์ประกอบเขื่อนและสภาพที่ ทำการตรวจพบ สำหรับการตรวจสอบด้วยวิธี SEED ไม่มี

วิธีการให้คะแนน แต่จะใช้การเขียนอธิบายสภาพจากการตรวจวัดด้วยสายตาของผู้ทำการตรวจสภาพโดยใช้ความรู้ ความชำนาญ และประสบการณ์ของผู้ตรวจสภาพ การตัดสินใจในความปลอดภัยของเขื่อนจะขึ้นอยู่กับการประเมินสภาพของผู้ตรวจฯ แล้วทำการเขียนรายงานความปลอดภัยโดยใช้แบบบันทึกการตรวจสภาพ การตรวจสภาพโดยวิธี SEED จะใช้ผู้ตรวจสภาพอย่างน้อย 1 คน ในการเดินตรวจสภาพภายในบริเวณพื้นที่ตรวจสภาพ และจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ตรวจสภาพ ได้อธิบายขั้นตอนและตัวอย่างในภาพที่ 31 และภาพที่ 32

การตรวจเขื่อนดินโดยวิธีดัชนีสภาพ (Condition Index) (วารากร, 2542)

ในปี พ.ศ. 2538 ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้นำระบบวิธีดัชนีสภาพ (Condition Index) มาใช้กับเขื่อนของสำนักชลประทานที่ 9 จำนวน 32 เขื่อน และตรวจสภาพเขื่อนเพื่อการชลประทาน รวมทั้งระบบชลประทาน ซึ่งเป็นระบบวิธีการประเมินสภาพเขื่อนเพื่อความปลอดภัยเขื่อนที่พัฒนาขึ้นจากหน่วยทหารช่างของสหรัฐอเมริกา (United State Army Corp of Engineer, USACE) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการซ่อมแซมและบำรุงรักษาเขื่อนและอาคารประกอบ ด้วยวิธีการนี้ช่วยให้ทางราชการจัดสรรงบประมาณตามสภาพชำรุดหรือความเสียหายได้ตรงกับความเป็น

ระบบดัชนีสภาพ (Condition Index System) เป็นระบบการประเมินสภาพเขื่อนเพื่อความปลอดภัยเขื่อนที่พัฒนาขึ้นมาโดยหน่วยทหารช่างของสหรัฐอเมริกา (United State Army Corp of Engineer) เป้าหมายของการตรวจสอบด้วยวิธีการนี้ คือ ประเมินค่าดัชนีอย่างเป็นระบบที่ระบุสภาพความสมบูรณ์ของเขื่อน เพื่อการวางแผนซ่อมแซมและบำรุงรักษาเขื่อนให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในประเทศไทย กรมชลประทาน ได้นำวิธีการประเมินสภาพเขื่อนนี้ไปใช้งานจริงในเขื่อนในความดูแลของสำนักงานชลประทานที่ 9 โดยจัดจ้างให้คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เป็นที่ปรึกษา นำระบบดังกล่าวมาใช้ตรวจสภาพเขื่อน จำนวนทั้งสิ้น 32 เขื่อน



ภาพที่ 31 แผนการทำงานของวิธี SEED

ที่มา: USBR (1995)

**CHECKLIST FOR  
EXAMINATION OF AN EMBANK-  
MENT DAM**

**DAM**

**UPSTREAM FACE**

Slope protection	_____
Erosion-beaching	_____
Vegetative growth	_____
Settlement	_____
Debris	_____
Burrows or burrowing animals	_____
Unusual conditions	_____

**DOWNSTREAM FACE**

Signs of movement	_____
Seepage or wet areas	_____
Vegetative growth	_____
Channelization	_____
Condition of slope protection	_____
Burrows or burrowing animals	_____
Unusual conditions	_____

**ABUTMENTS**

Seepage	_____
Cracks, joints, and bedding planes	_____
Channelization	_____
Slides	_____
Vegetation	_____
Signs of movement	_____

**CREST**

Surface cracking	_____
Durability	_____
Settlement	_____
Lateral movement (alinement)	_____
Camber	_____

ภาพที่ 32 ตัวอย่างแบบบันทึกการตรวจสภาพเขื่อนดินโดยวิธี SEED

ที่มา: USBR (1995)

ผู้เชี่ยวชาญ วิศวกรและเจ้าหน้าที่ จะเป็นผู้ระบุสภาพความสมบูรณ์ขององค์ประกอบย่อย ๆ ของเขื่อนเป็นคะแนนหรือตัวเลข องค์ประกอบที่ให้คะแนนนี้ได้จากการแบ่งตัวเขื่อนเป็นองค์ประกอบย่อย โดยมีความละเอียดที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ในแต่ละระดับกำหนดค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละองค์ประกอบ ทั้งจากข้อมูลทางสถิติ หรือการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลกระทบ (Cause and Effect) ขององค์ประกอบนั้นต่อความเสียหายโดยรวมของตัวเขื่อนเปรียบเทียบกับองค์ประกอบอื่นๆ ที่เรียกว่า Interaction Matrix ในองค์ประกอบระดับสุดท้ายที่ได้ประเมินระดับคะแนนในองค์ประกอบนั้น จะวิเคราะห์หาค่าดัชนี-สภาพของตัวเขื่อน (Condition Index, CI) ที่มีค่าเป็นตัวเลขตั้งแต่ 0 - 100 ความสมบูรณ์ของตัวเขื่อนสามารถจำแนกได้ดังตารางที่ 15

การประยุกต์ใช้ผลการประเมินในการวางแผนซ่อมบำรุงตัวเขื่อน ในเบื้องต้นมีเกณฑ์ที่ว่า หาก CI มีค่า 70 ขึ้นไป สภาพตัวเขื่อนสามารถใช้งานได้ปกติไม่จำเป็นต้องบำรุงรักษาโดยทันที ในกรณี CI มีค่าอยู่ระหว่าง 40 - 69 จำเป็นต้องเปรียบเทียบความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อคัดเลือกองค์ประกอบที่จะปรับปรุง และในกรณี CI มีค่าน้อยกว่า 40 จำเป็นต้องวิเคราะห์หาองค์ประกอบที่ต้องซ่อมแซมและฟื้นฟูสภาพโดยทันที

ตารางที่ 15 การแบ่งชั้นของสภาพความสมบูรณ์ตามดัชนีสภาพ (Condition Index)

ระดับดัชนีสภาพ (CI)	สภาพความสมบูรณ์	คำอธิบาย
85 – 100	ดีเยี่ยม	ไม่ปรากฏความเสียหายที่ชัดเจน แต่อาจพบการสึกหรอตามอายุได้บ้าง
70 – 84	ดีมาก	ปรากฏความเสียหายหรือความเสื่อมสภาพเพียงเล็กน้อย
55 – 69	ดีพอใช้	ปรากฏความเสียหายหรือความเสื่อมสภาพบ้าง แต่ไม่มีผลต่อสภาพการใช้งาน
40 - 54	ปกติ	เสื่อมสภาพปานกลาง มีสภาพการใช้งานเพียงพอภายใต้แรงสูงสุดที่คาดว่าจะเกิดขึ้น
25 – 39	เสียหาย	เสื่อมสภาพอย่างรุนแรงในโครงสร้างบางส่วน การใช้งานอาจไม่เพียงพอภายใต้แรงสูงสุดที่คาดว่าจะเกิด
10 – 24	เสียหายมาก	เสื่อมสภาพรุนแรงอย่างต่อเนื่อง มีสภาพการใช้งานไม่เพียงพอ
0 - 9	พังทลาย	สูญเสียสภาพการใช้งาน เกิดการพังทลายทั่วไป หรือองค์ประกอบที่สำคัญ เกิดการพังทลายภายใต้แรงสูงสุดที่อาจจะเกิด

ที่มา: อนุสรณ์ (2542)

รูปแบบการประเมินสภาพโดยแบ่งเขื่อนหนึ่งเป็นองค์ประกอบย่อย ซึ่งเรียกว่า Simple Model และยังสามารถแบ่งองค์ประกอบย่อยหนึ่งออกเป็นองค์ประกอบที่เล็กลง เรียกรวมได้เป็น Extended Model และเมื่อได้รวมองค์ประกอบย่อยอีกหลายชั้นได้อย่างเป็นระบบ เรียกว่า Complex Model องค์ประกอบย่อยเหล่านั้นมีค่าน้ำหนักความสำคัญประจำตัวแต่ละองค์ประกอบด้วย ค่าน้ำหนักความสำคัญที่กำหนดขึ้นนี้ได้จากการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบเหล่านั้นด้วย (Interaction Relationship) ในการประเมินสภาพเขื่อนของสำนักงานชลประทานที่ 9 ได้แบ่งดัชนีสภาพเขื่อน (CI-Dam) ออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ คือ

1. สภาพข้อมูลรายละเอียดเขื่อน (Dam Information) หมายถึง ความสมบูรณ์ของข้อมูล ที่จำเป็นและควรจัดเก็บอย่างเป็นระบบ พร้อมทั้งจะใช้งานได้ทันทีเมื่อเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉิน หรือวิเคราะห์อ้างอิงในการดูแลบำรุงรักษาตามปกติ ข้อมูลดังกล่าวได้แก่

- 1.1 ประวัติความเป็นมาของเขื่อน
- 1.2 ข้อมูลจากการสำรวจภูมิประเทศและธรณีวิทยา
- 1.3 รายงานการศึกษาออกแบบ
- 1.4 รายงานการก่อสร้างและควบคุมคุณภาพงาน
- 1.5 ข้อมูลการแก้ไขซ่อมแซมในระหว่างการใช้งาน (ถ้ามี)

2. สภาพตัวเขื่อนจากการตรวจในสนาม (Dam Condition) หมายถึง สภาพความสมบูรณ์ของตัวเขื่อน อาคารประกอบ สภาพอ่างเก็บน้ำและพื้นที่รับน้ำ ตลอดจนจนถึงการจัดการในการบำรุงรักษาตัวเขื่อน ซึ่งได้จากการตรวจสภาพในสนามด้วยสายตา (Visual Inspection)

การแบ่งน้ำหนักความสำคัญของการประเมินจากข้อมูลใน 2 ส่วนนี้ ได้พิจารณาตามขนาดของเขื่อน และระยะเวลาหลังจากการประเมินเป็นเกณฑ์ ดังตารางที่ 16

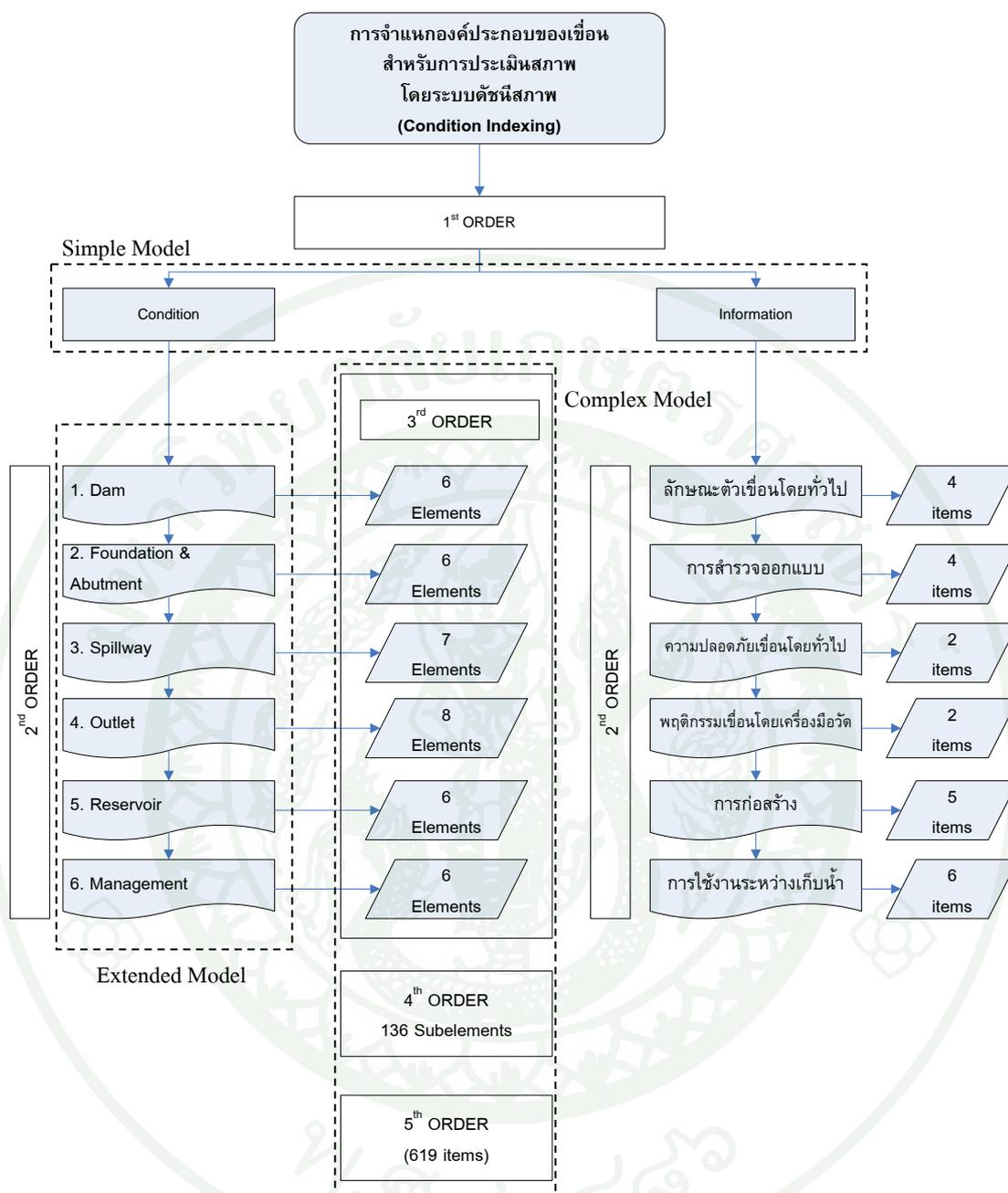
ตารางที่ 16 การให้น้ำหนักความสำคัญของข้อมูลรายละเอียดเขื่อนเทียบกับสภาพเขื่อน  
จากการตรวจในสนาม

ขนาดของ เขื่อน	ความสูงเขื่อน (h), ม. และ ความจุของอ่างเก็บน้ำ (v), ล้าน ลบ.ม.	น้ำหนักความสำคัญ			
		ช่วง 5 ปีหลังการประเมิน		ช่วงถาวรหลัง 5 ปี	
		ข้อมูล Information	ข้อมูล Condition	ข้อมูล Information	ข้อมูล Condition
ขนาดเล็ก	$h \leq 5$ และ $0.05 \leq v < 1.0$	10	90	20	80
ขนาดกลาง	$15 \leq h < 30$ และ $0.5 \leq v < 100$ หรือ $10 \leq h$ และ $1.0 \leq v < 100$	15	85	25	75
ขนาดใหญ่	$h \geq 30$ และ $v \geq 10$ หรือ $h > 20$ และ $v > 100$	20	80	30	70

- หมายเหตุ: 1. ข้อมูล Information หมายถึง รายละเอียดของประวัติ การสำรวจ ออกแบบ ก่อสร้าง และใช้งานบำรุงรักษา ที่เก็บรวบรวมไว้ที่ฝ่ายส่งน้ำและบำรุงรักษา หรือ โครงการชลประทานจังหวัด หรือสำนักงานชลประทานที่ 9 อย่างเป็นระบบและพร้อมที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้ทันที
2. ข้อมูล Condition หมายถึง สภาพเขื่อนที่ได้มีการตรวจด้วยคณะผู้เชี่ยวชาญจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และจัดเก็บในฐานข้อมูลที่จะประเมินสภาพเขื่อนได้ทันที

ที่มา: อนุสรณ์ (2542)

สำหรับการจำแนกองค์ประกอบในโครงการจะแบ่งลงไปถึง 5 ลำดับชั้น โดยในชั้นที่ 5 จะมีองค์ประกอบที่ต้องประเมินถึง 619 รายการ ดังในภาพที่ 33



ภาพที่ 33 การจำแนกองค์ประกอบของเงื่อนไขสำหรับการประเมินสภาพ โดยวิธีดัชนีสภาพ

ที่มา: อนุสรณ์ (2542)

## การกำหนดน้ำหนักความสำคัญขององค์ประกอบเขื่อน

เนื่องจากองค์ประกอบในชั้นลำดับเดียวกันนั้น ย่อมมีความสำคัญต่อความปลอดภัยเขื่อนที่แตกต่างกันไป โดยมีหลักการให้ความสำคัญแก่องค์ประกอบใดๆ ดังนี้

1. จากสถิติความเสียหายหรือการพิบัติของเขื่อน นำมาใช้ระบุนองค์ประกอบที่เมื่อเกิดความเสียหายได้ง่าย หรือมีการพิบัติบ่อยครั้งกว่า ย่อมมีน้ำหนักความสำคัญมากกว่า
2. องค์ประกอบใดที่เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นแล้ว ก่อให้เกิดผลสืบเนื่องกระทบต่อองค์ประกอบส่วนอื่น ๆ เกิดความเสียหายตามมา ย่อมมีน้ำหนักความสำคัญมาก
3. องค์ประกอบใดเมื่อองค์ประกอบส่วนอื่นๆ ที่สัมพันธ์กันเกิดความเสียหายขึ้นแล้ว ส่งผลให้องค์ประกอบที่พิจารณามาก ย่อมมีน้ำหนักความสำคัญมาก
4. องค์ประกอบใดเมื่อมีข้อพิจารณาทางทฤษฎี แสดงให้เห็นว่าเป็นส่วนสำคัญของตัวเขื่อนโดยรวม ย่อมมีน้ำหนักความสำคัญมาก

วิธีการคำนวณน้ำหนักความสำคัญขององค์ประกอบในลำดับที่ 3, 4 และ 5 ซึ่งเป็น Complex Model จะใช้ระบบ Interaction Matrix ดังที่ Anderson and Torrey (1995) ได้เสนอว่าควรพิจารณาสภาพของเขื่อน โดยรวมจาก องค์ประกอบของวัตถุประสงค์ (Objective) ในการใช้งาน ในการป้องกันความเสียหายของเขื่อนในด้านต่างๆก่อน แทนที่จะเป็นองค์ประกอบทางกายภาพของเขื่อน เช่น

- วัตถุประสงค์ที่ 1 ด้านป้องกันน้ำล้นสันเขื่อน (Overtopping)
- วัตถุประสงค์ที่ 2 ด้านป้องกันการกัดเซาะภายในตัวเขื่อน (Internal Erosion)
- วัตถุประสงค์ที่ 3 ด้านป้องกันการกัดเซาะผิวนอกของตัวเขื่อน (External Erosion)
- วัตถุประสงค์ที่ 4 ด้านป้องกันการทรุดตัวและเคลื่อนตัวของเขื่อน (Deformation)
- วัตถุประสงค์ที่ 5 ด้านป้องกันการพังทลายของลาดเขื่อน (Sliding)
- วัตถุประสงค์ที่ 6 ด้านการระบายน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำ (Reservoir regulation)
- วัตถุประสงค์ที่ 7 ด้านการติดตามพฤติกรรมของตัวเขื่อน (Monitoring)
- วัตถุประสงค์ที่ 8 ด้านการบริหารจัดการและจัดเก็บข้อมูล  
(Management and data gathering)

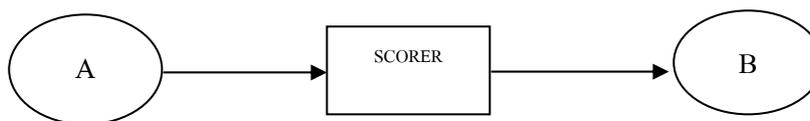
แล้วจึงพิจารณาว่าในแต่ละวัตถุประสงค์นั้นมีอาคาร หรือส่วนประกอบของเขื่อนใดบ้างที่เข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น

การไหลล้นข้ามสันเขื่อน (Overtopping) มีองค์ประกอบของเขื่อนที่เกี่ยวข้อง คือ

1. อ่างเก็บน้ำ (Reservoir) และพื้นที่รับน้ำ (Watershed area)
2. ตัวเขื่อน (Dam Embankment)
3. สันเขื่อน (Dam Crest)
4. อาคารระบายน้ำล้น (Spillway)
5. อาคารส่งน้ำ (Outlets) เป็นต้น

และจากสมมุติฐานที่ว่าองค์ประกอบของเขื่อนดังกล่าวมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องซึ่งกันและกัน การหาค่าน้ำหนักความสำคัญ (Weight) จึงต้องพิจารณาเป็น Matrix ที่เรียกว่า “Interaction Matrix” ดังที่ Hudson (1992) เคยเสนอไว้ และ Anderson and Torrey (1995) ได้นำมาประยุกต์กับเขื่อนตัวอย่างดังแสดงในภาพที่ 34 สำหรับวัตถุประสงค์ของการป้องกันการกัดเซาะที่ผิวหน้าเขื่อน โดยตัวเลขในตารางคือ น้ำหนักความสัมพันธ์ที่ส่งผลถึงหรือเกี่ยวข้องกันในระหว่างองค์ประกอบต่างๆ โดยมีระดับดังนี้

0	=	A	เสียหายไม่เกี่ยวข้องกับ B
1	=	A	เสียหายส่งผลให้ B เสียหายน้อยกว่า
2	=	A	เสียหายส่งผลให้ B เสียหายเท่ากัน หรือน้อยกว่าเล็กน้อย
3	=	A	เสียหายส่งผลให้ B เสียหายเท่ากันหรือสูงขึ้นเล็กน้อย
4	=	A	เสียหายส่งผลให้ B เสียหายในระดับที่สูงขึ้น



Row	Column								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Crest and Shoulders	→ 1	1	1	1			1	
2	1 ↑	Upstream Slope	↓	1					
3	1	←	Down-stream Slope		1				
4	1	1		Upstream Groins Areas	→				
5	1		1		Downstream Groins Areas			↓	
6				1	1	Abutments			
7	2	1	1	2	2		Foundation	↓	
8	2	3	1	3	← 1	2		Reservoir	
9	2	2	2	2	2			3	Environmental Loading

ภาพที่ 34 Interaction Matrix สำหรับวัตถุประสงค้ด้าน Protective Surface Cover

องค์ประกอบของเขื่อนที่เกี่ยวข้องกับ “Protective Surface Cover” แสดงไว้ในแนวเส้นทแยงมุมของ Matrix และตัวเลขทั้ง 2 ด้านของเส้นทแยงมุม เป็นน้ำหนักความสำคัญที่องค์ประกอบหนึ่งมีต่ออีกองค์ประกอบหนึ่งในทิศทางเวียนตามเข็มนาฬิกา ตัวอย่างเช่น Crest and- Shoulder มีอิทธิพลต่อ Downstream Slope ในระดับที่ 1 ในขณะที่ Downstream Slope มีอิทธิพลต่อ Crest and Shoulder ในระดับที่ 1 ด้วยเช่นกัน แต่ถ้าพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Upstream Groin- Areas และ Reservoir จะแตกต่างกันคือ Upstream Groin Area ไม่มีอิทธิพลต่อ Reservoir เลย ในขณะที่ Reservoir มีอิทธิพลต่อ Upstream Groin Area ในระดับที่ 3 เป็นต้น

ดังนั้นหากองค์ประกอบใดที่มีความสำคัญมาก เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นก็จะเป็นสาเหตุ (Cause) ให้ส่งผลถึงองค์ประกอบอื่นๆที่เกี่ยวข้องเสียหายตามมาด้วยมาก ในขณะที่เดียวกัน องค์ประกอบที่ได้รับผลกระทบ (Effect) ที่เป็นผลจากความเสียหายขององค์ประกอบอื่นมากก็ย่อมมีความสำคัญมากเช่นเดียวกัน ด้วยแนวความคิดนี้จึงสามารถคำนวณหาน้ำหนักความสำคัญขององค์ประกอบของเขื่อนได้ดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 น้ำหนักความสำคัญของ Surface Protective Cover จาก Interaction Matrix

Subunit	Notation	Cause score	Effect score	Total score	Weight Score
Crest and shoulder	CS	5	10	15	$15/63 = 0.238$
Upstream slope	US	2	8	10	$10/63 = 0.159$
Downstream slope	DS	2	6	8	$8/63 = 0.127$
Upstream groins	UG	3	10	13	$13/63 = 0.206$
Downstream groins	DG	3	8	11	$11/63 = 0.175$
Abutments	A	2	4	6	$6/63 = 0.095$
Total		17	46	$\Sigma = 63$	1.000

การคำนวณน้ำหนักความสำคัญ (Weight) สามารถทำได้ดังสมการที่ 1

$$\begin{aligned} \text{Weight Score (CS)} &= \frac{(\text{Cause} + \text{Effect})}{\Sigma(\text{Cause} + \text{Effect})} \quad (1) \\ &= \frac{15}{63} = 0.238 \end{aligned}$$

ด้วยวิธีดังกล่าวจะได้ค่าความสำคัญของสภาพตัวเขื่อน (Condition) สำหรับองค์ประกอบหลักซึ่งแบ่งเป็น 6 กลุ่ม ซึ่งมีค่าน้ำหนักความสำคัญดังนี้

1. ตัวเขื่อน (DE)	$W_1 = 0.36$
2. ฐานรากเขื่อนและไหล่เขา (DFA)	$W_2 = 0.24$
3. ทางระบายน้ำล้น (SW)	$W_3 = 0.19$
4. ท่อส่งน้ำ (OL)	$W_4 = 0.09$
5. อ่างเก็บน้ำและพื้นที่รับน้ำ (RW)	$W_5 = 0.06$
6. การจัดการในการบำรุงรักษา (MN)	$W_6 = 0.07$

ในแต่ละกลุ่มนี้ยังสามารถแยกออกเป็นองค์ประกอบย่อยๆ ในลำดับต่อไป (ลำดับที่ 3) ได้ เช่น ตัวเขื่อน (Dam Embankment, DE) สามารถแยกย่อยได้พร้อมน้ำหนักความสำคัญของส่วนต่าง ๆ ซึ่งได้จากการสร้าง Interaction Matrix ดังนี้

- สันเขื่อนและไหลถนนบนสันเขื่อน	$W_{11} = 0.12$
- ลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำ	$W_{12} = 0.12$
- ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	$W_{13} = 0.12$
- ระบบระบายน้ำในตัวเขื่อน	$W_{14} = 0.16$
- ระบบปิดกั้นน้ำในตัวเขื่อน	$W_{15} = 0.18$
- ส่วนเปลือกนอกเพิ่มความแข็งแรง	$W_{16} = 0.30$

การพิจารณาค่าน้ำหนักในลำดับที่ 4 อาจใช้ข้อมูลทางสถิติของความเสียหายทางด้านทฤษฎี และวิชาการมาประกอบ หรือใช้การประมวลจาก Interaction Matrix เมื่อในส่วนย่อยต่างๆ เหล่านี้ มีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องซึ่งกันและกัน

หลังจากการตรวจสภาพเขื่อนในสนามในลำดับที่ 3 ถึงลำดับที่ 5 จะคำนวณและให้คะแนนสภาพความสมบูรณ์ (Condition Score, CS) บนฐานของความสมบูรณ์สูงสุด (100 %) นำไปคูณกับค่าน้ำหนักความสำคัญ (Weight) แล้วรวมกันเป็นสภาพความสมบูรณ์ในระดับที่สูงขึ้นมาอีกชั้นหนึ่ง จนสามารถคำนวณหาดัชนีสภาพของตัวเขื่อนโดยรวมได้ดังสมการที่ 2

$$CI-Dam = C_{in} \cdot W_{in} + C_{con} \cdot W_{con} \quad (2)$$

เมื่อ  $C_{in}, C_{con}$  = สภาพเขื่อนด้านข้อมูลและการตรวจสอบ ตามลำดับ  
 $W_{in}, W_{con}$  = น้ำหนักความสำคัญของด้านข้อมูลและด้านการตรวจสอบ ตามลำดับ

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าดัชนีสภาพในลำดับที่ 1 และ 2 แสดงในภาพที่ 35

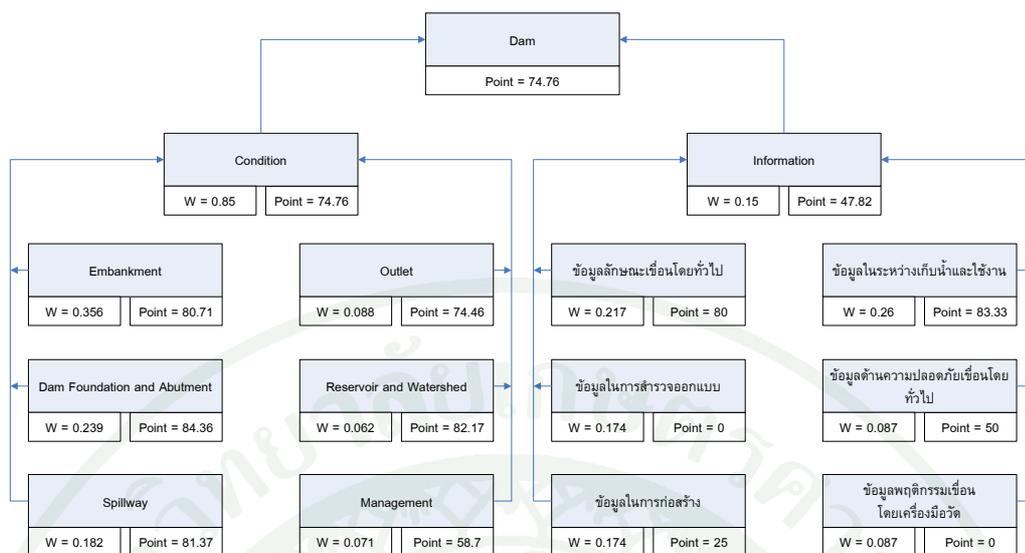
การตรวจสภาพความเสี่ยงโดยวิธีดัชนีความเสี่ยง (Risk Index)

ในต่างประเทศการตรวจสภาพเขื่อนด้วยดัชนีสภาพได้พัฒนาอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2538 โดย USACE ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อการซ่อมแซมและบำรุงให้องค์ประกอบนั้นทำหน้าที่ได้ตามประสงค์ (Function-Base) และต่อมาวิธีการวิเคราะห์ได้ปรับปรุงให้มีความสำคัญกับความเสี่ยงยิ่งขึ้น (Risk-Base) เช่น การใช้เครื่องมือการตรวจวัดพฤติกรรมเขื่อนเพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงต่อการพิบัติในรูปแบบต่างๆ

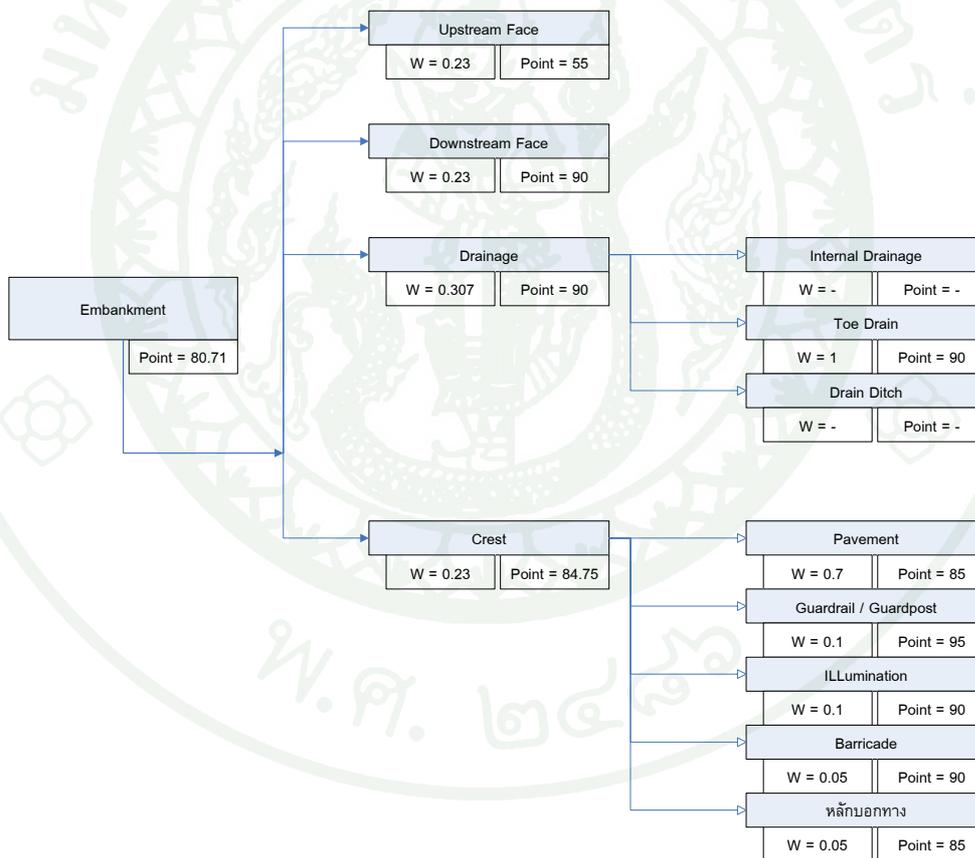
Chouinard et al. (1996) ได้สร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่าดัชนีสภาพของโครงสร้างพื้นฐานทางวิศวกรรมโยธาด้วยวิธีทางสถิติ โดยกำหนดให้ค่าดัชนีสภาพมีความสัมพันธ์กับลักษณะทางกายภาพของโครงสร้าง เช่น อายุ, ขนาดของโครงสร้าง ดังสมการที่ 3

$$\mu_i = a + b \cdot age_i + c \cdot size_i \quad (3)$$

เมื่อ  $\mu_i$  = ค่าดัชนีสภาพเฉลี่ย ของโครงสร้าง  $i$   
 $age_i$  = อายุของโครงสร้าง  $i$   
 $size_i$  = ขนาดของโครงสร้าง  $i$   
 $a, b, c$  = ค่าคงที่ ซึ่งประมาณได้จากข้อมูลในอดีต



(ก) เขื่อนทั้งหมด

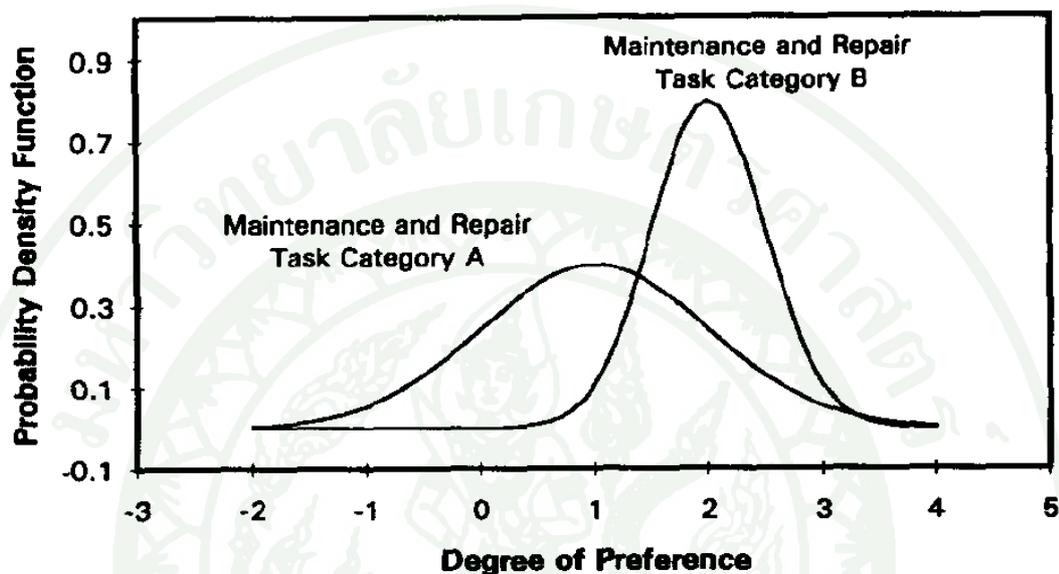


(ข) องค์ประกอบคันดินตัวเขื่อน

ภาพที่ 35 การคำนวณหาค่าดัชนีสภาพของเขื่อนและองค์ประกอบ

ที่มา: อนุสรณ์ (2542)

การจัดลำดับค่าดัชนีสภาพนี้ จัดในเชิงสัมพัทธ์ระหว่างการบำรุงซ่อมแซม 2 วิธี ตัวอย่าง เช่น ในกรณีของเขื่อนแห่งหนึ่ง ซึ่งพิจารณาค่าดัชนีสภาพเพื่อการป้องกันการกัดเซาะ (A) กับ ค่าดัชนีสภาพเพื่อการรวบรวมข้อมูลพฤติกรรมเขื่อน (B) ดังแสดงในภาพที่ 36



ภาพที่ 36 การเปรียบเทียบความพอใจจากการซ่อมแซมด้วยวิธีที่ต่างกัน

ที่มา: Chouinard *et al.* (1996)

การจัดลำดับข้อมูลการซ่อมบำรุงจากฐานข้อมูล Automated Budget System ในสนามได้จากการนำค่าดัชนีสภาพที่ได้ (CI) มาจัดเรียง ซึ่งได้จากค่าน้ำหนักความสำคัญ (Weighting function) ที่สัมพันธ์กันระหว่างองค์ประกอบเขื่อนและวัตถุประสงค์ สมการที่ 4 และ สมการที่ 5

$$\text{rank}_i \propto K_i \cdot CI_{\text{REMR Obj } i}^* \quad (4)$$

เมื่อ  $\text{rank}_i$  = ลำดับของวัตถุประสงค์ที่พิจารณา  
 $K_i$  = ค่าความสำคัญที่ได้จากสัมพันธ์กับงบประมาณการซ่อมบำรุงรักษาเขื่อน

$$CI_{REMR\ Obj\ i}^* = 1 - CI_{REMR\ Obj\ i}^* \quad (5)$$

$$Obj\ i = \text{วัตถุประสงค์ } i$$

สมมติให้ฟังก์ชันการกระจายความน่าจะเป็นของ  $CI_{REMR\ Obj\ i}^*$  มีการกระจายเป็นแบบ Lognormal ซึ่งสามารถเขียนให้รูปสมการที่ 6

$$CI_{REMR\ Obj\ i}^* \sim LN(\mu, \sigma) \quad (6)$$

เมื่อ  $LN(.,.)$  = ฟังก์ชันการกระจายความน่าจะเป็น แบบ Lognormal  
 $\mu$  = ค่าเฉลี่ย  
 $\sigma$  = ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ความสำคัญของวัตถุประสงค์ทั้งสองประการ สามารถเปรียบเทียบได้ด้วย ผลคูณของค่าความสำคัญกับค่าดัชนีสภาพระหว่างวัตถุประสงค์ที่พิจารณา ดังนี้ สมการที่ 7

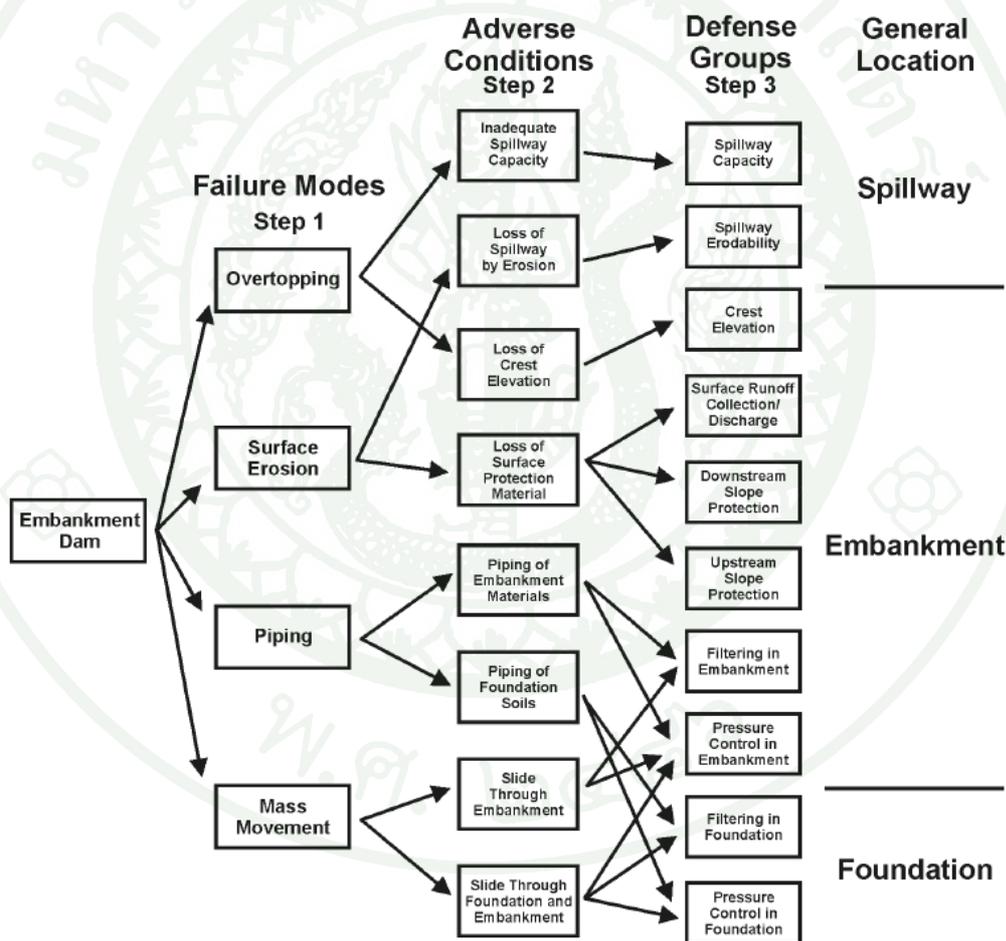
$$K_i \cdot CI_{REMR\ Obj\ i}^* \text{ Versus } K_j \cdot CI_{REMR\ Obj\ j}^* \quad (7)$$

หรือ  $\ln(K_i) + \ln(CI_{REMR\ Obj\ i}^*)$  Versus  $\ln(K_j) + \ln(CI_{REMR\ Obj\ j}^*)$   
 สมมติให้  $\ln(CI_{REMR\ Obj\ i}^*)$  และ  $\ln(CI_{REMR\ Obj\ j}^*)$  มีการกระจายแบบ Normal  
 และ  $K_i, K_j$  มีค่าคงตัว

จะได้  $\ln(K_i) + \ln(CI_{REMR\ Obj\ i}^*) \sim N(\mu_i, \sigma)$   
 $\ln(K_j) + \ln(CI_{REMR\ Obj\ j}^*) \sim N(\mu_j, \sigma)$

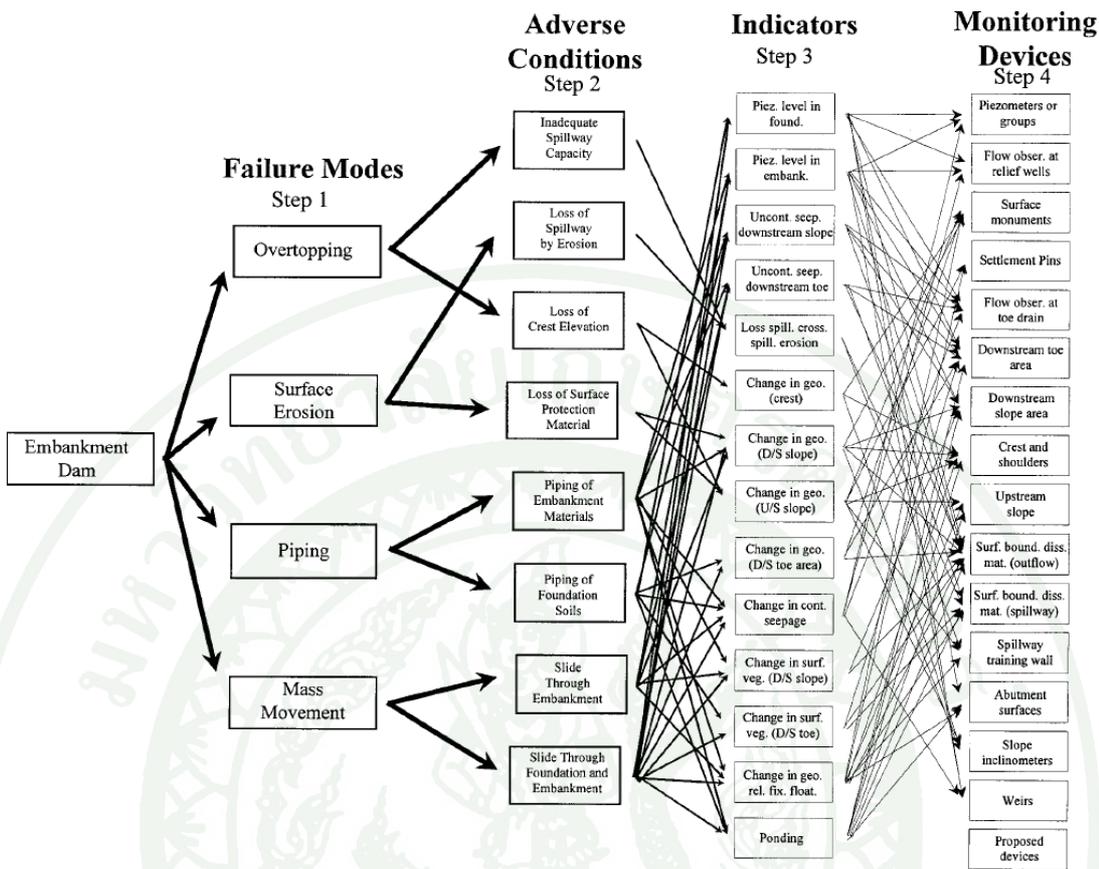
$\mu_i, \mu_j$  แสดงถึงความพอใจในเชิงสัมพัทธ์ของระบบที่พิจารณา ขณะที่ค่าส่วน-เบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงถึง ความแปรปรวนของค่าดัชนีสภาพ ในวัตถุประสงค์ 2 ประการ ได้แก่  $i, j$  ตามลำดับ

Anderson *et al.* (1999) ได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของตัวเชื่อมกับรูปแบบการพิบัติเชื่อมให้กับเชื่อมในความดูแลของ USACE ดังแสดงความสัมพันธ์ในภาพที่ 37 และต่อมา Anderson *et al.* (1999b) ได้ใช้การตรวจสภาพของเชื่อมด้วยเครื่องมือตรวจวัดในตัวเชื่อมกับความเสถียรต่อการพิบัติเชื่อม และเสนอแนะการใช้ความน่าจะเป็นของอันตรายที่นำไปสู่การพิบัติของตัวเชื่อม ในการวิจัยนี้ได้จัดลำดับการบำรุงรักษาและซ่อมแซมองค์ประกอบของเชื่อม จากการตรวจสภาพเชื่อมด้วยเครื่องมือตรวจวัด และได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องมือตรวจวัด (Monitoring Device) หรือองค์ประกอบ กับ ตัวบ่งชี้ความผิดปกติ (Indicator) กับสภาพที่เป็นอันตราย (Adverse Condition) จนถึงรูปแบบของการพิบัติของเชื่อม (Mode of Failure) ดังภาพที่ 38



ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องมือวัดกับรูปแบบการพิบัติ

ที่มา: USACE (1999)



ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องมือวัดกับรูปแบบการพิบัติ

ที่มา: Anderson *et al.* (1999)

เครื่องมือหรือองค์ประกอบเงื่อนไขแต่ละจุดในภาพที่ 38 จะมีค่า Diagnostic Value, DV ที่แสดงความสำคัญขององค์ประกอบนั้นๆ ซึ่ง Anderson *et al.* ได้ใช้ค่า DV ของแต่ละองค์ประกอบที่ประเมินได้จากข้อมูลเกินกว่า 600 แห่ง และจัดลำดับองค์ประกอบของเงื่อนไขเพื่อการบำรุงรักษาได้ โดยนำผลมาเข้าร่วมกับการประเมินสภาพเงื่อนไขระบบดัชนีสภาพตาม Anderson *et al.* (1995) และ Diagnostic Value ที่ประเมินได้นี้ตั้งสมการที่ 8

$$PR_i = \frac{CI_i^*}{100} \cdot DV_{MD}(i) \tag{8}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 PR_i &= \text{Priority ranking of the device } i \\
 CI_i^* &= 1 - CI_i \\
 DV_{MD}(i) &= \text{Diagnostic Value of Monitoring Device } i
 \end{aligned}$$

ค่า DV ของแต่ละองค์ประกอบหรือเครื่องมือ มีค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 1 และผลรวมของค่า DV จากองค์ประกอบทั้งหมดเป็น 1 ซึ่งคล้ายกับค่าความสำคัญขององค์ประกอบ (Weighting function) ความสำคัญขององค์ประกอบประมาณเป็นค่า DV ด้วยสมการที่ 9

$$DV_{MD}(i) = \sum_{j=1}^{n_i} RDV_{MDi}(j) \cdot \left[ \sum_{k=1}^{n_{AC}} RDV_j(k) \cdot P[AC_k|f] \right] \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } P[AC_k|f] &= \text{ความน่าจะเป็นของการพิบัติ เมื่อเกิดสภาพอันตรายแบบ } k \\
 RDV_j(k) &= \text{Relative Diagnostic Value ของ Indicator } j \text{ ในสภาพอันตรายแบบ } k \\
 n_{AC} &= \text{จำนวน สภาพอันตรายทั้งหมดใน Indicator } j \\
 RDV_{MDi}(j) &= \text{Relative Diagnostic Value ของเครื่องมือตรวจวัด } i \text{ ใน Indicator } j \\
 n_i &= \text{จำนวน Indicator ทั้งหมด}
 \end{aligned}$$

โดยค่า Relative Diagnostic Value มีวิธีการประเมินที่เป็นระบบดังนี้

ในเวลาต่อมา Anderson et al. (2001) ได้เสนอวิธีการจัดลำดับเขื่อนเพื่อการซ่อมแซมและบำรุงรักษา ซึ่งพัฒนาจากตรวจสภาพเขื่อนด้วยระบบดัชนีสภาพ สำหรับเขื่อนที่มีขนาดเล็ก โดยเฉพาะ โดยที่ตัวเขื่อนมีความสูงน้อยกว่า 30 เมตร และเขื่อนนั้นไม่มีข้อมูลการก่อสร้างและเครื่องมือตรวจวัดที่เพียงพอ การเรียงลำดับความสำคัญของเขื่อนใช้ตัวแปรทางวิศวกรรมที่เรียกว่า ดัชนีความเสี่ยง (Risk Index) เขื่อนแต่ละแห่งมีความสำคัญต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับความล่อแหลม (Vulnerability) และความเสี่ยงภัย (Hazard) ดังสมการที่ 10

$$I_{dam} = V \times H \quad (10)$$

เมื่อ	$I_{dam}$	ความสำคัญของเขื่อนที่พิจารณา
	$V$	ความล่อแหลมของเขื่อน
	$H$	ความเสี่ยงภัยของพื้นที่ท้ายน้ำของเขื่อน

ความล่อแหลมของเขื่อนกำหนดให้เป็นฟังก์ชันของความสูงเขื่อน, ชนิดของเขื่อน, ชนิดของฐานรากเขื่อน, ความจุของอ่าง, อายุ, ที่ตั้งของเขื่อนจากแหล่งแผ่นดินไหว, ขนาดของทางระบายน้ำล้น ดังสมการที่ 11 ซึ่งแต่ละปัจจัยมีเกณฑ์การให้คะแนนตั้งแต่ 0 ถึง 10 ขึ้นอยู่กับตามระดับความเสี่ยง และค่าความปลอดภัยต่อการเคลื่อนพัง ส่วนความเสี่ยงภัยเป็นความเสี่ยงภัยต่อชีวิตและทรัพย์สินเมื่อเขื่อนพิบัติ มีค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 10 เช่นกัน ดังนั้นความสำคัญของเขื่อนจึงมีค่าได้มากที่สุดเป็น 10,000

$$V = \frac{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}{4} \cdot \frac{E_1 + E_2}{2} \cdot \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (11)$$

โดย	$I_1$	ความสูงของเขื่อน
	$I_2$	ประเภทของเขื่อน
	$I_3$	ชนิดของฐานรากเขื่อน
	$I_4$	ปริมาณเก็บกักน้ำ
	$E_1$	อายุของเขื่อน
	$E_2$	แรงแผ่นดินไหว (Seismicity)
	$D_1$	ความเพียงพอของทางระบายน้ำล้น
	$D_2$	สัดส่วนความปลอดภัยต่อการเคลื่อนตัว

Anderson *et al.* ได้กำหนดความสำคัญขององค์ประกอบของตัวเขื่อนตามเหตุและผลที่ส่งผลต่อความปลอดภัยของเขื่อนนั้น เรียกว่า ความสำคัญเชิงสัมพัทธ์ (Relative Importance of Condition) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 12

$$RI_j = P[C_j/M_j] \cdot P[M_i/F] \cdot I_{dam} \quad (12)$$

เมื่อ

 $RI_j$  = ความสำคัญเชิงสัมพัทธ์ของสภาพทางกายภาพ  $j$ 
 $P[C_j|M_i]$  = ความน่าจะเป็นของการพิบัติในรูปแบบการพิบัติแบบ  $i$  จากสภาพทางกายภาพ  $j$ 
 $P[M_i|F]$  = ความน่าจะเป็นของการพิบัติของเขื่อน ด้วยรูปแบบการพิบัติแบบ  $i$ 
 $I_{dam}$  = ความสำคัญของเขื่อน

ความสำคัญเชิงสัมพัทธ์ หรือ  $RI$  ระบุถึงความน่าจะเป็นของเหตุการณ์เริ่มต้นที่นำไปสู่ขององค์ประกอบ ณ สภาพใดๆ ซึ่งจะได้จากการประเมินข้อมูล การก่อสร้างเขื่อน การทำงานและพฤติกรรมของเขื่อน เพื่อนำไปหาค่าความน่าจะเป็นของการพิบัติเขื่อนในทั้ง 4 รูปแบบ คือ การล้นข้ามสันเขื่อน การเลื่อนของลาดเขื่อน การเกิดการกัดเซาะภายใน (Piping) และการกัดเซาะของลาดเขื่อน สำหรับค่าความน่าจะเป็นที่มีเงื่อนไขประเมินอย่างเป็นระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ ดังสมการที่ 13

$$P''[M_i|X_i \cap F] = \frac{P[X_i|M_i \cap F] \cdot P[M_i|F]}{\sum_{i=1}^4 P[X_i|M_i \cap F] \cdot P[M_i|F]} \quad (13)$$

เมื่อ

 $X_i$  = เหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องถึงการพิบัติ ตัวอย่างในตารางที่ 18

 $P''[M_i|X_i \cap F]$  = ความน่าจะเป็นของการพิบัติรูปแบบ  $i$  จากเหตุการณ์  $X_i$  และเขื่อนพิบัติ

 $P[X_i|M_i \cap F]$  = ความน่าจะเป็นที่เกิดเหตุการณ์  $X_i$  ในรูปแบบการพิบัติแบบ  $i$  และเขื่อนพิบัติ

 $P[M_i|F]$  = ความน่าจะเป็นของการพิบัติรูปแบบ  $i$  หากเขื่อนพิบัติ

ตารางที่ 18 แสดงรายการที่นำไปสู่การพิบัติของเขื่อน และความน่าจะเป็น ซึ่งแบ่งตามความมั่นใจของสถานะเขื่อน 4 กรณี ได้แก่ A- ทราบว่าผ่าน (Known to be present) B- สงสัยว่าผ่าน (Suspected to be present) C – สงสัยว่าไม่ผ่าน (Suspected to be absent) และ D – ทราบว่าไม่ผ่าน (Known to be absent)

ตารางที่ 18 ความน่าจะเป็นของการพิบัติในรูปแบบต่างๆ จากปัญหาด้านต่าง ๆ

Attributes	Failure Modes															
	Surface Erosion				Piping				Mass Movement				Overtop - ping			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
Spillway capacity is less than that required for the design flood																
Erodable (pipable) embankment material without a defense mechanism																
Outlet pipe or gate materials that corrode or degrade easily																
Erodable/degradeable material in spillway channel or under sill and training walls																
Riprap/upstream surface protection improperly sized for reservoir fetch and storm conditions																
Downstream slope protection material inadequate against surface runoff																
Gate for outlet works at downstream toe (conduit under full head of water)																
Erodable (pipable) foundation material without a defense mechanism																
Factor of safety against slide in embankment does not meet design criteria																
Poorly compacted material in embankment, around instrument risers, or around conduits																
Poorly treated foundation with expansive clay shale, limestone, gypsum, highly fractured rock, etc.																
Coarse and properly filtered toe drain																
Dense and relatively incompressible foundation material																

Probabilities to be determined from expert elicitation

ที่มา: Anderson *et al.* (2001)

ตารางที่ 19 ตัวอย่างการคำนวณหาความสำคัญเชิงสัมพัทธ์ของสภาพทางกายภาพตามลักษณะการพิบัติของเขื่อน

ตารางที่ 19 ตัวอย่างการคำนวณหาความสำคัญเชิงสัมพัทธ์ของสภาพทางกายภาพ

Conditional probabilities for failure modes	Conditional probabilities for physical conditions	Relative importance of observable physical conditions conditional to dam	Relative importance of observable physical conditions to inventory $I_{dam} = 1,000$
Overtopping (60%)	Loss of or inadequacy in spillway capacity 30%	$30\% \times 60\% = 18\%$	$0.18 \times 1000 = 180$
Overtopping (60%)	Loss of crest elevation 10%	$10\% \times 60\% = 6\%$	$0.06 \times 1000 = 60$
Overtopping (60%)	Loss of function of outlet works 60%	$60\% \times 60\% = 36\%$	$0.36 \times 1000 = 360$
External Erosion (0%)	-*	-*	-*
Piping (30%)	-*	$70\% \times 30\% = 21\%$	$0.21 \times 1000 = 210$
Piping (30%)	Piping in embankment 70%	$30\% \times 30\% = 9\%$	$0.09 \times 1000 = 90$
Mass movement (10%)	Piping in foundation 30%	$50\% \times 10\% = 5\%$	$0.05 \times 1000 = 50$
Mass movement (10%)	Slide in embankment 50%	$50\% \times 10\% = 5\%$	$0.05 \times 1000 = 50$
	Slide in embankment and foundation 50%		

\* No further calculations are necessary because the initial conditional probability was assessed to be less than 10%

ที่มา: Anderson *et al.* (2001)

จากนั้นดำเนินการประเมินสภาพที่บกพร่องขององค์ประกอบ (Condition Function) ซึ่งได้จากการสำรวจและบันทึกลงในแบบฟอร์มการตรวจเขื่อนในทำนองเดียวกันกับวิธีดัชนีสภาพสภาพที่ตรวจสอบมี 9 ประการ ประกอบด้วย

1. ปริมาณการไหลผ่านทางระบายน้ำล้น
2. ระดับสันเขื่อนหรือระดับฝื่อน้ำล้น
3. การสูญเสียประสิทธิภาพของระบบระบายน้ำ
4. การกัดกร่อนของทางระบายน้ำล้น
5. ส่วนป้องกันการกัดเซาะของลาดเขื่อน
6. การเกิดการกัดเซาะภายใน (Piping) ในตัวเขื่อน
7. การเกิดการกัดเซาะภายใน (Piping) ในชั้นฐานราก
8. การเลื่อนไถลหรือรอยแยกผ่านลาดเขื่อน
9. การเลื่อนไถลหรือรอยแยกผ่านลาดเขื่อนและฐานราก

ค่าสภาพขององค์ประกอบจะมีค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 10 นำไปหาดัชนีความเสี่ยงของเขื่อน (Risk Index) ในสภาพความบกพร่องระดับนั้นด้วย สมการที่ 14

$$\text{Risk Index for } j^{\text{th}} \text{ Condition} = RI_j \cdot \frac{10 - CF_j}{10} \quad (14)$$

เมื่อ  $CF_j$  = Condition Function ขององค์ประกอบที่ตรวจสอบ  $j$

Slunga (2001) ได้เสนอแผนภูมิกิ่งของเหตุการณ์ (Event Tree) ของการวิเคราะห์ความเสี่ยงที่พิจารณาถึงสภาพขององค์ประกอบ เช่น ประสิทธิภาพของวัสดุกรอง ความสามารถของทางระบายน้ำล้นและประตูระบายน้ำ และ ความบกพร่องทางโครงสร้างตัวเขื่อน หรือมีสภาพความสมบูรณ์ต่างกัน ความบกพร่องหรือความไม่สมบูรณ์นี้ย่อมเป็นผลให้เกิดเหตุการณ์ด้วยความเป็นไปได้ที่ระดับต่างกันด้วย ซึ่งระดับของความเป็นไปได้สามารถเป็นค่าตัวเลขได้ของความน่าจะเป็นที่เกิดการเสื่อมสภาพ ตาม ตารางที่ 20

ตารางที่ 20 คำอธิบายกับความเป็นไปได้ (Likelihood) สำหรับการวิเคราะห์ความเสี่ยง

ระดับความเป็นไปได้	ความน่าจะเป็นต่อการสูญเสียเสถียรภาพ
เป็นไปได้ไม่ได้ (Virtually impossible)	0.01 (0.001)
ไม่น่าเป็นไปได้ (Very unlikely)	0.10
ไม่แน่ใจ (Completely uncertain)	0.50
เป็นไปได้ (Very likely)	0.90
แน่ใจ (Virtually certain)	0.90 (0.999)

ที่มา: Hoeg (1996)

งานศึกษาวิจัยในอดีตชี้ให้เห็นการพัฒนาการประเมินสภาพเขื่อน จากเพื่อการบำรุงรักษา เป็นการประเมินเพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงภัย โดยเฉพาะ Anderson et al. ที่ได้นำปัจจัยของตัวเขื่อน ประเมินความสำคัญของเขื่อน ปัจจัยของผลจากเครื่องมือวัดบอกถึงสภาวะความปลอดภัยของเขื่อน ต่อการพิบัติเขื่อน

#### การปฏิบัติสำหรับการตรวจสอบสภาพเขื่อนโดยวิธีดัชนีสภาพ

เพื่อตรวจสอบสภาพความเสี่ยงเขื่อน และประเมินความปลอดภัยเขื่อน โดย ค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้จากการตรวจสอบสภาพเขื่อนในสนาม การเดินเรียงหน้ากระดานตามขวางบริเวณลาดเขื่อนจากฐานเขื่อนฝั่งหนึ่งไปยังอีกฝั่งหนึ่ง และทำการให้คะแนนตามเกณฑ์การตรวจสอบสภาพเขื่อน โดยผู้ชำนาญการตรวจสอบ ส่วนบริเวณอื่นๆ ขององค์ประกอบเขื่อนจะใช้จำนวนผู้ตรวจสอบฯ ตามความเหมาะสม โดยทั่วไปจะใช้อย่างน้อย 2 คน มีความชำนาญการให้คะแนนตามเกณฑ์สภาพความเสี่ยง ให้คะแนนตามระดับความเสี่ยงของสภาพที่เกิดด้วยสายตา คะแนนจะอยู่ระหว่าง 1-4 (สภาพปกติ-สภาพความเสี่ยงสูงสุด) แล้วเข้าสู่กระบวนการหาค่าดัชนีความเสี่ยง การให้น้ำหนักของสภาพความเสี่ยงใช้เกณฑ์ 3 ลักษณะเพื่อพิจารณาในเบื้องต้น คือ ความรุนแรง หรือความเสียหายที่เกิดขึ้น, ความยากง่ายในการแก้ไขซ่อมแซม และลักษณะการพิบัติที่เกี่ยวข้อง การตัดสินใจถึงความปลอดภัยเขื่อน จะขึ้นอยู่กับค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้จากการตรวจสอบสภาพเขื่อน ในสนามการตรวจสอบโดยวิธีดัชนีความเสี่ยงจะมีผู้ตรวจสอบเขื่อนขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ตามลาดเขื่อน โดยทั่วไปจะใช้ 5 กลุ่ม กลุ่มละ 2 คน เดินตามลาดเขื่อน

## การเปรียบเทียบวิธีดัชนีความเสี่ยงกับวิธีการตรวจสอบเงื่อนไขโดยวิธีอื่นๆ

การตรวจสอบเงื่อนไขโดยวิธีการต่างๆ ที่ได้นำเสนอ เช่น REMR SEED และ Condition Index เป็นต้น จะใช้เจ้าหน้าที่ที่ได้รับการฝึกอบรมมา หรือเจ้าหน้าที่ผู้เชี่ยวชาญ ทำการเข้าตรวจสอบสภาพเงื่อนไขเพื่อประเมินสภาพ โดยมีแบบบันทึกการตรวจสอบที่ใช้เขียนอธิบาย หรือแบบใช้การให้คะแนน เพื่อประเมินสภาพเงื่อนไขในการดูแลบำรุงรักษาต่อไป แต่จะไม่เน้นการประเมินความเสี่ยงอย่างชัดเจนจากสภาพที่เกิดขึ้น โดยแท้จริงจากสภาพเงื่อนไขในสนาม

สำหรับวิธีดัชนีความเสี่ยงจะเน้นในการประเมินความเสี่ยงของเงื่อนไขจากการตรวจสอบเงื่อนไขโดยใช้สายตาตามวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการประเมินความเสี่ยงเงื่อนไขและไม่เน้นสภาพผิดปกติโดยทั่วไปที่เกิดขึ้น

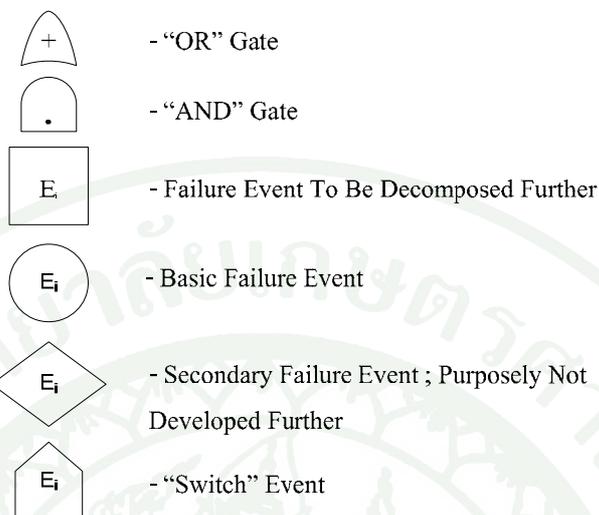
### การวิเคราะห์ Fault Tree

การวิเคราะห์ Fault tree อาจรวมถึงการประเมินเชิงปริมาณของความน่าจะเป็นของความเสียหายต่างๆ หรือเหตุการณ์ความเสียหายที่นำไปสู่เหตุการณ์สุดท้ายในการคำนวณความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ความเสียหายหลัก (เหตุการณ์สุดท้าย หรือเหตุการณ์ด้านบนสุด Top Event) จะใช้ในรูปแบบเชิงปริมาณ การวิเคราะห์ Fault tree (FTA) เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์จากการพิสูจน์เส้นทางที่เป็นสาเหตุการพิบัติ ที่มีผลของเหตุการณ์วิกฤตออกมาในรูปแบบเดี่ยว (Single out) ซึ่งสนับสนุนแนวโน้มของการพิบัติของระบบและแสดงเส้นทางรอง (ถ้ามี) ในระบบ

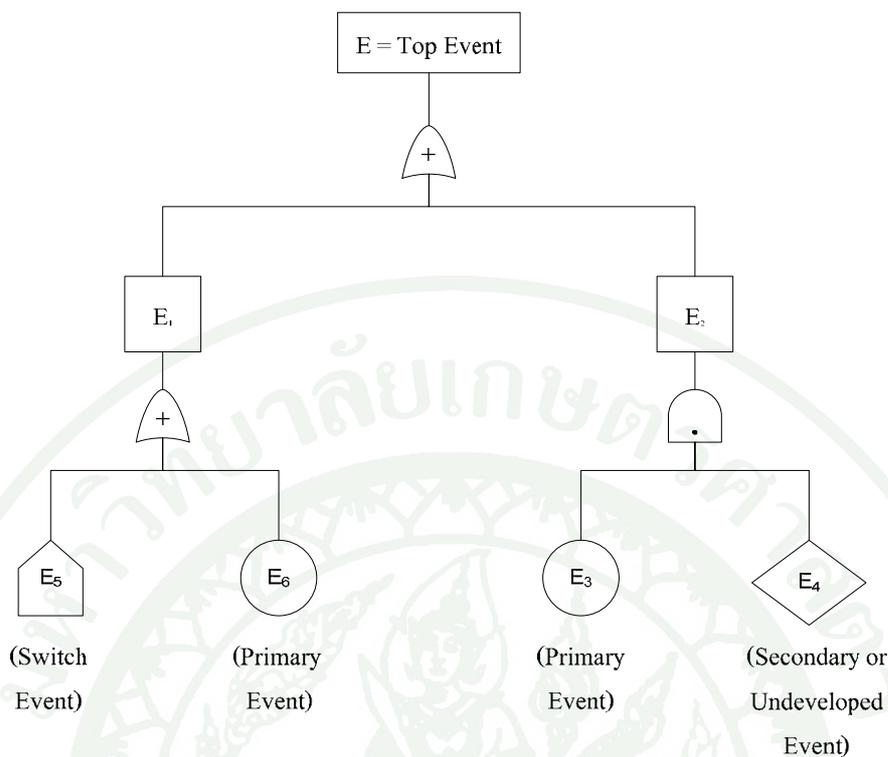
### การเขียน Fault tree

วัตถุประสงค์ของ Fault tree คือการชี้เฉพาะเจาะจงและแบบ (Model) ของสภาพระบบต่างๆ (Faults) ที่สามารถมีผลในการเกิดของเหตุการณ์ไม่พึงประสงค์ที่รู้จักว่า “top event” แผนภาพ Fault tree เป็นการแยกออกเป็น ส่วนโดยใช้เส้นแสดงของ Top event (Major fault) ภายในการรวม (Union) และ/หรือ การที่เหมือนกัน (Intersection) ของเหตุการณ์ย่อย ทางเลือกของเหตุการณ์ที่นำไปสู่ความเสียหายนั้นคือนำไปสู่เหตุการณ์สูงสุด (Top event) คือเหตุผลความสัมพันธ์โดยใช้ประตู “OR” และประตู “AND”

## สัญลักษณ์ในการเขียน Fault tree มีดังนี้



ภาพที่ 39 Fault tree diagram E2 เป็นการพบกันระหว่างเหตุการณ์ย่อย E3 และ E4 หมายถึงการเกิดเหตุการณ์ทั้ง E3 และ E4 จึงจะทำให้เกิดเหตุการณ์ E2 ในแต่ละเหตุการณ์ย่อยจะถูกแยกจนกระทั่งถึงเหตุการณ์ที่เป็นสาเหตุเริ่มแรกของเหตุการณ์ที่สนใจ เรียกว่า “Basic event” เหตุการณ์แรก (Basic event) เป็นเหตุการณ์ปกติที่มีโอกาสเกิดขึ้นอาจจะถูกประเมินเสร็จแล้วสำหรับเหตุการณ์หลัก และเหตุการณ์ย่อยเป็นตัวแทนชนิดชี้เฉพาะของเหตุการณ์ในการวิเคราะห์ Fault tree รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (เช่น F, E1, E2) หมายถึงเหตุการณ์ความเสียหายจะพัฒนาต่อไปภายในเหตุการณ์ย่อยอื่นๆ ตลอดประตูลูกศร (Logic gate) รูปวงกลม (เช่น E3 และ E6) หมายถึงความเสียหายเบื้องต้นของชิ้นส่วนของระบบ และเป็นเหตุการณ์ความเสียหายแรกเริ่ม รูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน (เช่น E4) แสดงเหตุการณ์ความเสียหายลำดับที่ 2 ซึ่งไม่พัฒนาต่อไป อาทิเช่น เหตุการณ์ลำดับที่ 2 เป็นสาเหตุโดยทั่วไป คือ สิ่งแวดล้อมที่เพิ่มมากขึ้น หรือ ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนขณะปฏิบัติงาน และอาจรวมถึงความผิดพลาดของมนุษย์ รูป Switch หมายถึง เหตุการณ์ที่เกิดจะเปลี่ยนแปลงสภาพการปฏิบัติงานของระบบ



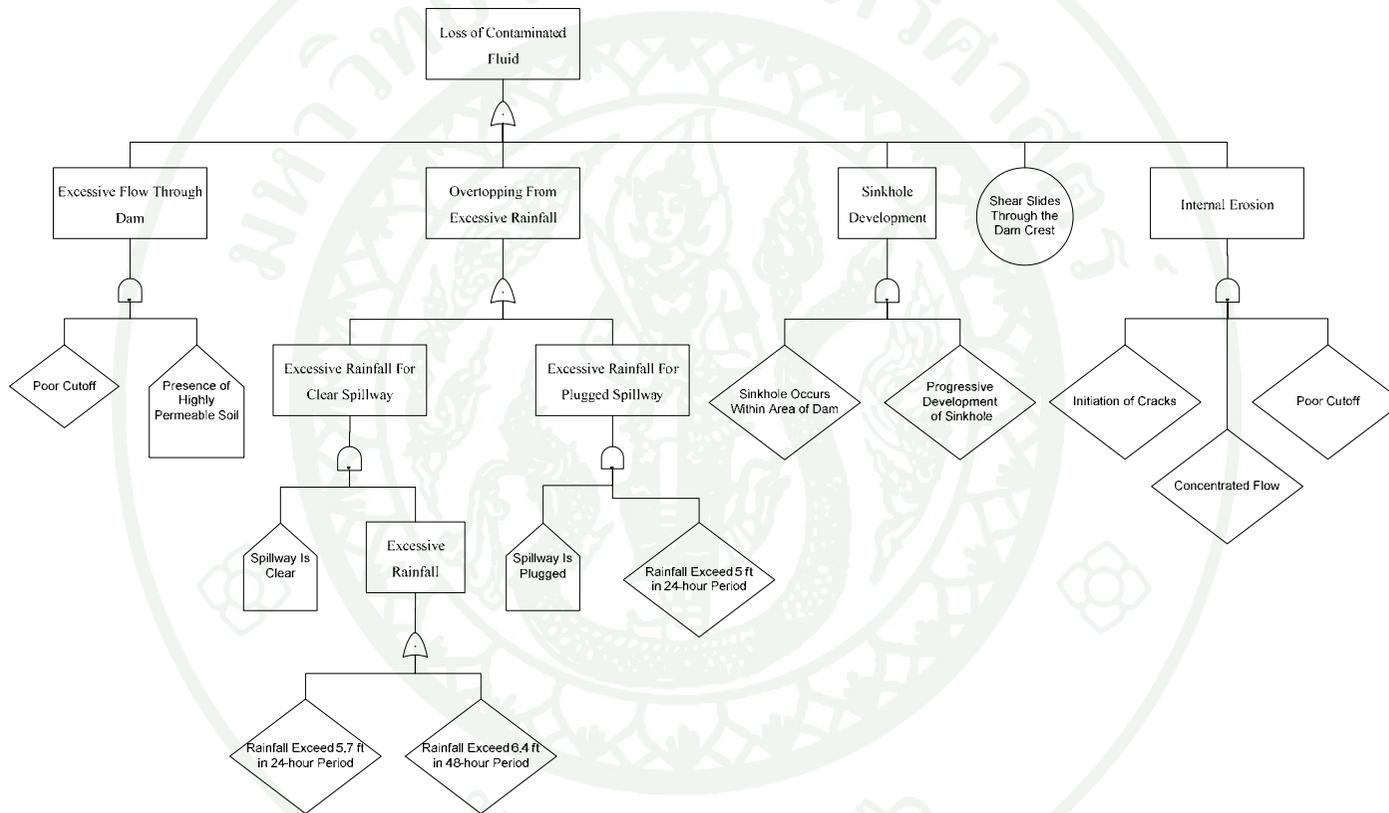
ภาพที่ 39 Fault tree diagram

ที่มา: Alfredo (1984)

ภาพที่ 40 Fault tree of loss of contaminated fluid ในการประเมินความปลอดภัยของการออกแบบเขื่อนสำหรับเก็บของเสีย เหตุการณ์ที่สำคัญจะประกอบด้วย การสูญเสียของเหลวที่โสโครกที่เก็บกักไว้ในที่เก็บกักของเสีย ตามกลไกความเสียหาย 5 แบบ ที่เป็นผลมาจากการสูญเสียของเหลวโสโครก

1. การไหลที่มากเกินไปผ่านตลอดเขื่อนซึ่งเป็นผลมาจากดินที่มีค่าความชื้นน้ำสูงของเขื่อน และระบบ Cutoff ที่ไม่ดี

2. การไหลล้นข้ามสันเขื่อนจากฝนตกหนัก เหตุการณ์นี้สามารถเกิดขึ้นได้ถ้าฝนตกเกิน 5.7 ฟุตภายใน 24 ชั่วโมง หรือ 6.4 ฟุตภายใน 48 ชั่วโมง ในกรณีนี้ทางระบายน้ำล้นควรไหลได้สะดวก ถ้าทางระบายน้ำล้นไหลไม่สะดวกจากวัชพืชหนาแน่นและขยะ การไหลล้นข้ามสันเขื่อนสามารถเกิดขึ้นถ้าฝนตกเกิน 5 ฟุต ภายใน 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 40 Fault tree of loss of contaminated fluid

ที่มา: Alfredo (1984)

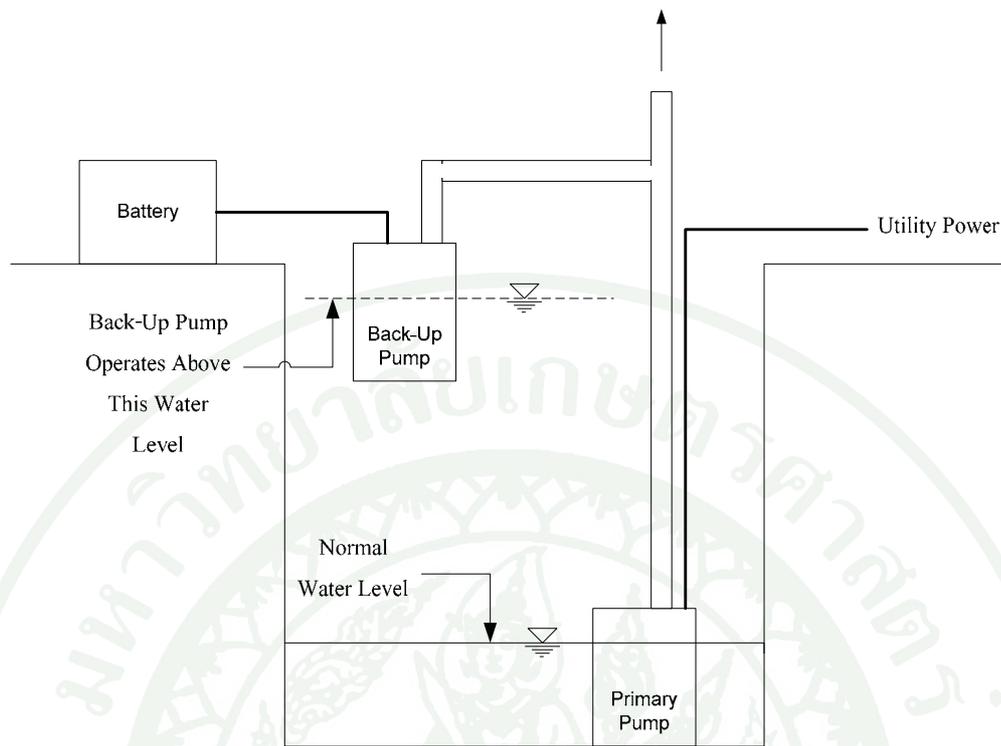
3. เกิดหลุมยุบ (Sinkhole) ภายในบริเวณเขื่อนนั้นทำให้เกิดการสูญเสียของของเหลวเสีย

4. การเลื่อนไถลแบบแรงเฉือนผ่านตลอดจากสันเขื่อน

5. Piping (หรือการกัดเซาะภายใน) เกิดจากฐานรากที่เป็นทรายแป้ง (Silty sand foundation) ได้อ่างเก็บน้ำ Piping เกิดจากรอยร้าวเล็กนำไปสู่การไหลที่มากขึ้นของของเหลว โสโครก

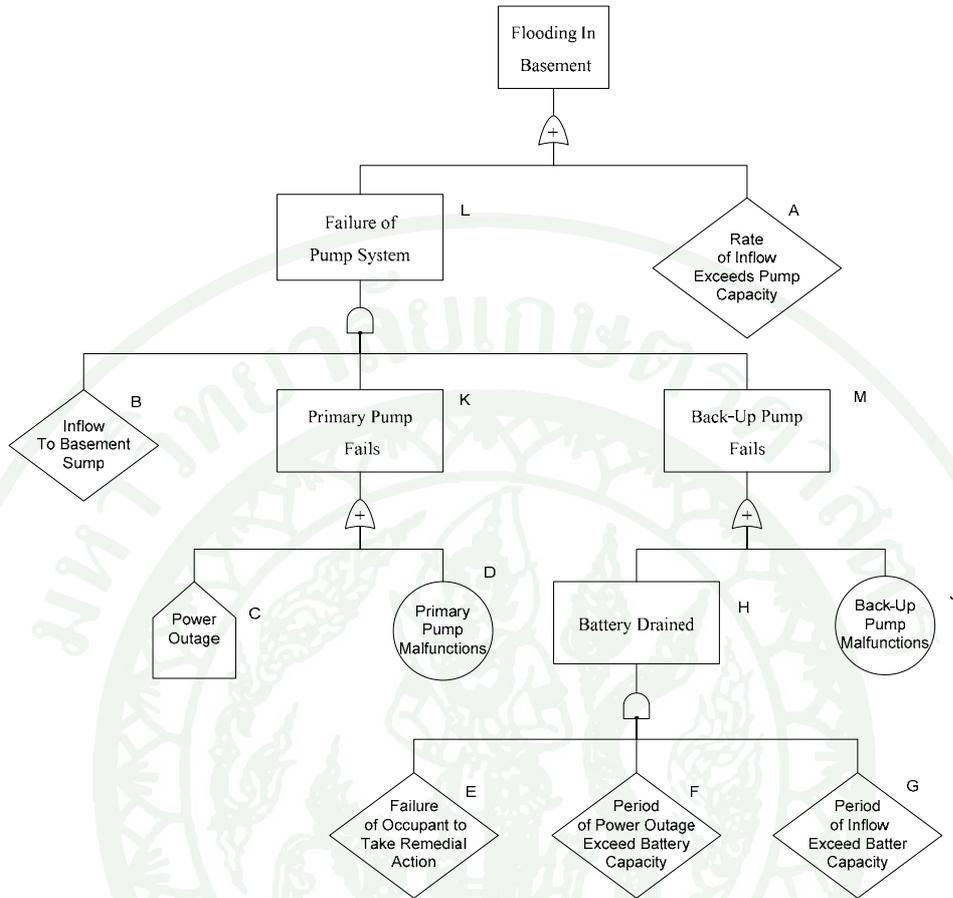
ภาพที่ 41 A sump pump system ระหว่างที่เกิดพายุฝน การสร้างฐานปล่องโดยใช้อุปกรณ์พร้อมกับระบบสูบน้ำอาจเกิดน้ำท่วมถ้าอัตราการไหลของน้ำฝนมากกว่าประสิทธิภาพการสูบน้ำปกติ อย่างไรก็ตาม พายุฝนเล็กๆ สามารถทำให้น้ำท่วมได้ในฐานปล่องถ้าระบบสูบน้ำไม่ทำงาน สมมุติว่า ระบบสูบน้ำประกอบด้วยระบบสูบน้ำหลัก (Primary pump) ได้ทำงานโดยใช้พลังงานไฟฟ้าหลัก และระบบสูบน้ำสำรองที่ใช้พลังงานหม้อกำเนิดไฟฟ้าสำรอง (Battery) จะทำงานอัตโนมัติระหว่างที่พลังงานไฟฟ้าหลักเสียหาย

ภาพที่ 42 Fault tree for basement flooding ความเสียหายของระบบสูบน้ำจะเกิดขึ้นถ้าพลังงานไฟฟ้าหลักและพลังงานหม้อกำเนิดไฟฟ้าสำรองเกิดเสียหายในขณะที่ทำงานระหว่างน้ำไหลเข้ามาขณะฝนตก ระบบสูบน้ำหลักจะเสียถ้าพลังงานไฟฟ้าหลักขัดข้อง ระบบสูบน้ำสำรองจะเสียถ้าระบบสูบน้ำไม่ทำงาน หรือพลังงานจากหม้อกำเนิดไฟฟ้าสำรองหมด หม้อกำเนิดไฟฟ้าสำรองหมดถ้าทั้งช่วงเวลาพลังงานไฟฟ้าหลักเสียและช่วงเวลาที่น้ำไหลเข้ามากกว่าประสิทธิภาพของหม้อกำเนิดไฟฟ้า ทั้งหมดของสาเหตุความเสียหาย (Faults) สามารถเป็นสาเหตุของน้ำท่วม (Flooding) ฐานปล่องได้สรุปอยู่ใน Fault tree



ภาพที่ 41 A sump pump system

ที่มา: Alfredo (1984)



ภาพที่ 42 Fault tree for basement flooding

ที่มา: Alfredo (1984)

## อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### อุปกรณ์

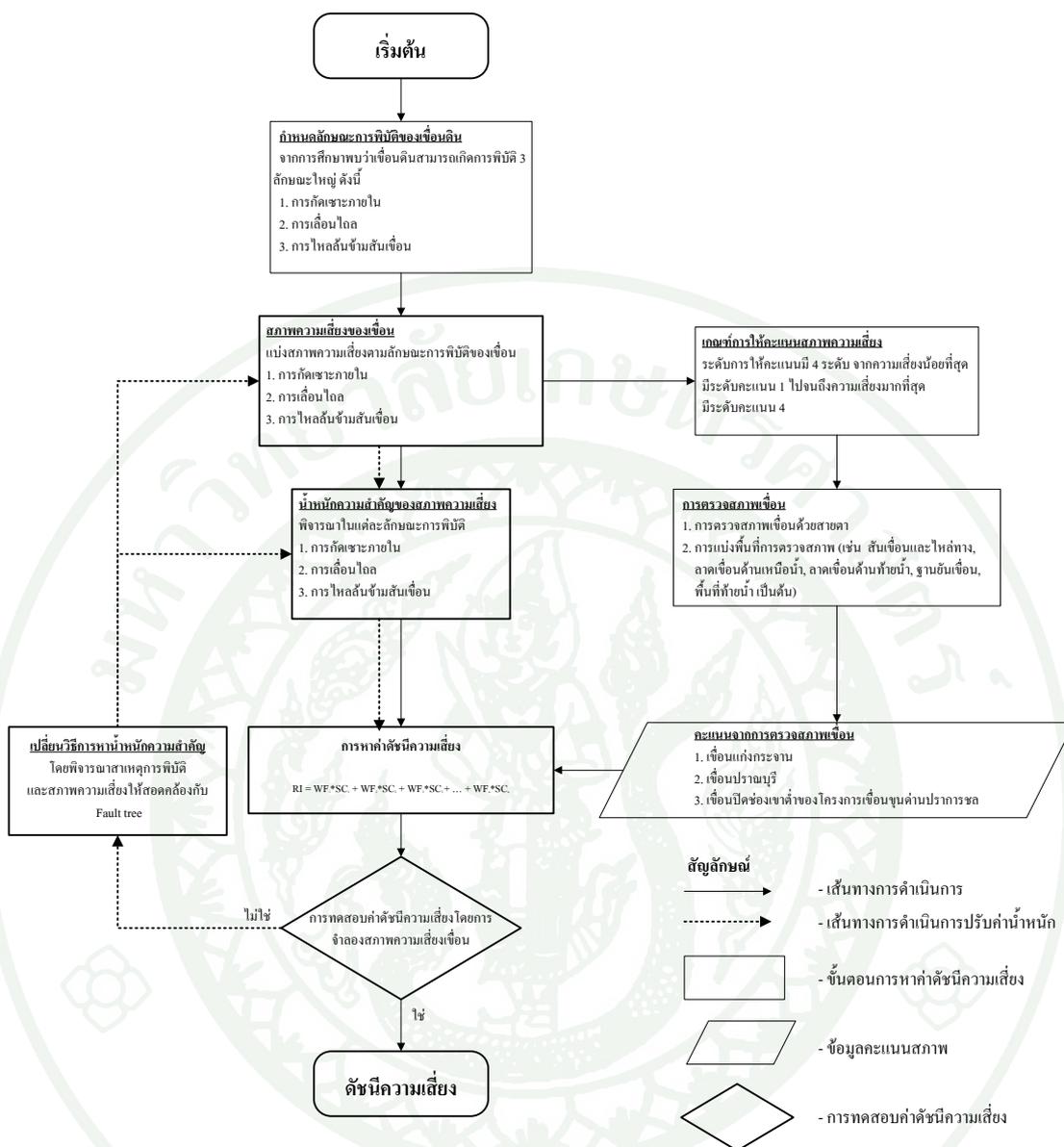
อุปกรณ์สำหรับประเมินความเสี่ยงเขื่อน โดยวิธีดัชนีความเสี่ยง มีดังนี้

1. เครื่องคอมพิวเตอร์
2. แบบบันทึกการตรวจสภาพเขื่อน และเครื่องเขียน
3. หมวกปีกแคบ หรือหมวกปีกกว้าง
4. เสื้อคลุม กางเกงขายาว
5. ถุงเท้า และรองเท้าผ้าใบ
6. กล้องถ่ายรูป

### วิธีการวิจัย

#### วิธีการดำเนินการหาค่าดัชนีความเสี่ยง (Risk Index)

การดำเนินการวิจัยดัชนีความเสี่ยง เริ่มจากการศึกษาลักษณะการพิบัติของเขื่อนจากเอกสาร รายงาน ต่างๆ แล้วสามารถสรุปได้เป็น 3 ลักษณะ คือ การกัดเซาะภายใน การเคลื่อนตัวของเขื่อน และการไหลล้นข้ามสันเขื่อน ในเบื้องต้นของการทำวิจัยในการให้น้ำหนักความสำคัญของสภาพ ได้ทำการกำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้องไว้ 3 ปัจจัย คือ ความรุนแรงของผลกระทบเสียหายที่เกิดขึ้น ความยากง่ายของการแก้ไขซ่อมแซม และจำนวนรูปแบบที่เกี่ยวข้อง และคัดเลือกสภาพความเสี่ยง ต่างๆ จากวิธีดัชนีสภาพ (Condition Index) นำมากำหนดเกณฑ์การให้คะแนนสภาพความเสี่ยง แล้วจึงทำการตรวจสภาพเขื่อน แล้วนำมาหาค่าดัชนีความเสี่ยง และทำการทดสอบค่าดัชนี ความเสี่ยง ตามแผนภาพที่ 43



ภาพที่ 43 วิธีการหาค่าดัชนีความเสี่ยง

## ลักษณะการพิบัติของเขื่อนดิน

การศึกษาลักษณะการพิบัติของเขื่อนดิน โดยการเก็บรวบรวมข้อมูลจากเอกสารรายงานต่างๆ คู่มือ ปรึกษาผู้เชี่ยวชาญงานด้านเขื่อน สถิติต่างๆ ทำให้สามารถสรุปเป็นลักษณะการพิบัติของเขื่อนดินเป็น 3 ลักษณะใหญ่ๆ คือ การกัดเซาะภายใน การเลื่อนไถล และ การไหลล้นข้ามสันเขื่อน การกัดเซาะภายในเกิดจากการที่น้ำไหลซึมผ่านตัวเขื่อนเริ่มพัฒนาปริมาณการไหลที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งกัดเซาะดินตัวเขื่อนออกไปทางด้านท้ายน้ำและพัฒนาเป็นโพรงการไหลในปริมาณน้ำที่มากจนทำให้เขื่อนเกิดการพิบัติ การเลื่อนไถลของตัวเขื่อนจากการที่น้ำเข้าไปในตัวเขื่อนทำให้ดินถมตัวเขื่อนมีกำลังลดลงจนกระทั่งด้านทานน้ำหนักตัวไม่ได้จึงเกิดการเลื่อนไถลจนทำให้เขื่อนเกิดการพิบัติได้ในที่สุด สำหรับการไหลล้นข้ามสันเขื่อนอาจเกิดการน้ำไหลบ่าที่มากเกินไปเกินกว่าความสามารถในการระบายน้ำของทางระบายน้ำล้น หรือไม่สามารถปิด-เปิดบานระบายน้ำได้ทันและมีวัชพืช ต้นไม้กีดขวางการไหลของน้ำทำให้เกิดการไหลล้นข้ามสันเขื่อนไปทางด้านท้ายน้ำจนทำให้เขื่อนเกิดการพิบัติได้

## สภาพความเสี่ยงของเขื่อน

สภาพความเสี่ยงที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนได้จากการรวบรวมข้อมูล เอกสาร คู่มือการตรวจสภาพเขื่อนต่างๆ และนำมาปรับให้เข้ากับสาเหตุการพิบัติของเขื่อนจาก Fault tree รวมทั้งได้ทำการปรึกษาผู้เชี่ยวชาญงานเขื่อนทำให้สามารถสรุปสภาพที่สำคัญที่ทำให้เขื่อนเกิดการพิบัติได้ และทำการแบ่งระดับความเสี่ยงของสภาพจาก Fault tree สรุปได้เป็น 3 ระดับ คือ สภาพที่สำคัญก่อนเกิดการพิบัติ (ระดับความเสี่ยงสูงสุด) สภาพบ่งชี้ว่าอาจเกิดความบกพร่อง (ระดับความเสี่ยง-ปานกลาง) และสภาพเบื้องต้น หรือต้นกำเนิดความบกพร่อง (ระดับความเสี่ยงต่ำสุด)

## เกณฑ์การให้คะแนนสภาพความเสี่ยง

เกณฑ์การให้คะแนนสภาพแบ่งออกเป็น 4 ระดับคะแนนได้แก่ คะแนน 1 หมายถึง สภาพองค์ประกอบมีความสมบูรณ์หรือทำหน้าที่เป็นปกติ คะแนน 2 หมายถึง สภาพองค์ประกอบมีความเสียหายเล็กน้อย (มีแนวโน้มไปทางปกติ) คะแนน 3 หมายถึง สภาพองค์ประกอบมีความเสียหายควรวิเคราะห์หรือตรวจวัดและติดตามพฤติกรรมเป็นพิเศษเพื่อประเมินความปลอดภัยอาจสามารถ

รอกการซ่อมแซมได้ (มีแนวโน้มไปทางไม่ปกติ) และคะแนน 4 หมายถึง สภาพองค์ประกอบมีความเสียหายมาก มีผลต่อการพิบัติอย่างเห็นได้ชัด จำเป็นที่ต้องการซ่อมแซมโดยทันที

### การตรวจสภาพเขื่อน

การตรวจสภาพเขื่อนด้วยสายตาโดยการเดินตรวจสภาพเขื่อนตามองค์ประกอบเขื่อน เช่น สันเขื่อน, ลาดเขื่อนด้านเหนือหน้า, ทางระบายน้ำล้น เป็นต้น สำหรับการเดินตรวจสภาพตัวเขื่อน จะทำการแบ่งเป็นช่วงๆ ความยาวเขื่อนตามสถานีเขื่อน โดยการเดินและบันทึกสภาพตามระดับคะแนนของสภาพจากฝั่งหนึ่งไปยังอีกฝั่งหนึ่งของเขื่อน สำหรับการเดินตรวจสภาพลาดเขื่อน โดยการแบ่งระยะผู้ตรวจสภาพเป็นช่วงๆ ช่วงละประมาณ 10 เมตร ตามความยาวลาดเขื่อน (ตั้งฉากกับความยาวสันเขื่อน)

### การหาค่าดัชนีความเสี่ยง

การหาค่าดัชนีความเสี่ยงโดยใช้สมการ  $RI = WF_1 * SC_1 + WF_2 * SC_2 + WF_3 * SC_3 + \dots + WF_n * SC_n$ ,  $SC$  = คะแนนสภาพ,  $WF$  = น้ำหนักความสำคัญ คะแนนที่ได้จากการตรวจสภาพเขื่อนในสนามนำมาคูณกับน้ำหนักความสำคัญของสภาพนั้นๆ เมื่อนำมาบวกกันจะได้ค่าดัชนี-ความเสี่ยงที่นำไปใช้งานได้

## ผลการวิจัย

ผลจากการวิจัยการตรวจสภาพเขื่อนดิน โดยวิธีดัชนีความเสี่ยงสามารถได้ผลดังนี้

1. ลักษณะการพิบัติของเขื่อนดิน
2. สภาพความเสี่ยงของเขื่อน
3. น้ำหนักความสำคัญของสภาพความเสี่ยง
4. เกณฑ์การให้คะแนนสภาพความเสี่ยง
5. การหาค่าดัชนีความเสี่ยง
6. วิธีการตรวจสภาพเขื่อน
7. การทดสอบการตรวจสภาพเขื่อน
8. การทดสอบประสิทธิภาพวิธีดัชนีความเสี่ยง-ในกรณีวิกฤติ และ
9. การปรับแก้ค่าน้ำหนักสภาพ ดังจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

### 1. ลักษณะการพิบัติของเขื่อนดิน

ลักษณะการพิบัติของเขื่อนดินได้จากการศึกษา การรวบรวมข้อมูลจากสถิติบันทึกรายงานการพิบัติโดยหน่วยงานต่างๆ หลังจากที่ได้ทำการรวบรวมและสรุปเป็นลักษณะการพิบัติโดยส่วนใหญ่ (Anderson *et al.* 1999, 2001) ของเขื่อนดินพบว่าลักษณะการพิบัติมี 3 ลักษณะ คือ การไหลล้นข้ามสันเขื่อน, การกัดเซาะภายใน และการเคลื่อนตัวของเขื่อน เพราะเมื่อเกิดลักษณะการพิบัติจาก 3 ลักษณะดังกล่าวข้างต้นจะทำให้เขื่อนและอาคารประกอบได้รับความเสียหายมากที่สุดและเกิดการพิบัติของเขื่อนตามมาซึ่งไม่สามารถทำการแก้ไขได้อย่างทันท่วงที นอกจากจะทำการทำนาย (Prediction) จากสถิติ สูตร หรือ สมการต่างๆ ที่ได้มีผู้ทำการคิดค้นขึ้นมา หรือทำการตรวจสภาพเขื่อนก่อนเพื่อทำการแก้ไขซ่อมแซมส่วนที่เสียหายและลดอันตรายต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นกับเขื่อน

### 2. สภาพความเสี่ยงของเขื่อน

สภาพความเสี่ยงของเขื่อนจากการรวบรวมสภาพผิดปกติบริเวณเขื่อนจากวิธีการดัชนีสภาพ (Condition Index) (อนุสรณ์, 2542) และจากคู่มือ แนวทาง ของ USACE USBR แล้วจึงนำมาจำแนกสภาพความเสี่ยงของเขื่อนตามลักษณะการพิบัติของเขื่อนที่ได้นำเสนอข้างต้น ดังตารางที่ 21, ตารางที่ 22 และตารางที่ 23 ได้ทำการเลือกสภาพที่มีผลให้เกิดการพิบัติได้ และได้แยกสภาพตามลักษณะการพิบัติ

### 3. น้ำหนักความสำคัญของสภาพความเสี่ยง

การหาค่าดัชนีความเสี่ยงของเขื่อนดิน โดยวิธีการตรวจสอบเขื่อนด้วยสายตา (Visual Inspection) เป็นวิธีการให้คะแนนสภาพที่เกิดขึ้นโดยเน้นสภาพที่มีแนวโน้มให้เขื่อนเกิดการพิบัติ แล้วใช้ค่าน้ำหนักเป็นตัวแทนบอกถึงความสำคัญของสภาพขององค์ประกอบเขื่อนที่พิจารณาความเสี่ยง การประเมินความเสี่ยงของเขื่อนจะพิจารณาสภาพที่ทำให้เขื่อนเกิดความเสียหายหรือพิบัติได้ และให้คะแนนสภาพนั้นตามที่ตรวจพบในสนาม สภาพความเสี่ยงที่ทำให้เขื่อนเกิดความเสียหายมากมีคะแนนเป็น 4 และการไม่เกิดสภาพความเสี่ยง (ตัวเขื่อนและอาคารประกอบมีสภาพสมบูรณ์) มีคะแนนเป็น 1 การวิเคราะห์หาค่าความเสี่ยงของเขื่อนในรูปแบบตามลักษณะการพิบัติหนึ่งๆ ทำได้โดยหาผลรวมของค่าน้ำหนักปัจจัยร่วมของสภาพขององค์ประกอบใดๆ คูณกับค่าคะแนนของสภาพขององค์ประกอบนั้น ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 15

#### ตารางที่ 21 สภาพความเสี่ยงต่อการไหลล้นข้ามสันเขื่อน

องค์ประกอบเขื่อน	สภาพที่ ทำการตรวจสอบ
สันเขื่อนและไหล่ทาง อาคารระบายน้ำล้น	การยุบตัวของสันเขื่อน
	สภาพของบานระบาย
	ประสิทธิภาพของระบบควบคุมบาน
	ประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังไฟฟ้าสำรอง
	สภาพผนังคอนกรีตของอาคารระบายน้ำล้น (Wing Wall)
	ความไม่มั่นคงของลาดทางเข้าอาคารระบายน้ำล้น
	สภาพตะแกรง
อาคารส่งน้ำ	สภาพท่อนกันสวะ
	ประสิทธิภาพในการเปิดควาล์วของท่อส่งน้ำ
	สภาพตะแกรง
	สภาพท่อนกันสวะ
	ประสิทธิภาพของระบบควบคุมบาน

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)

ตารางที่ 22 สภาพความเสี่ยงต่อการกัดเซาะภายใน

องค์ประกอบเขื่อน	สภาพที่ ทำการตรวจสอบ
สันเขื่อนและไหล่ทาง	หลุมยุบ (Sinkhole)
	ต้นไม้, วัชพืช
	รอยแตกตามขวาง
	การขุดหรือย้ายวัสดุถมเขื่อน
	รู, โพรง, ท่อ, ถ้ำ
ลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำ	หลุมยุบ (Sinkhole)
	รู, โพรง, ท่อ หรือถ้ำ
	การขุดหรือย้ายวัสดุถมเขื่อน
	การผุสลายของหินกันคลื่น
	การกัดเซาะโดยคลื่น
	รอยร้าวที่ผิวคอนกรีตลาดหน้า
	ต้นไม้, วัชพืช
	ชนิดของหิน
ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	น้ำไหล, น้ำซึม, น้ำไส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก
	หลุมยุบ (Sinkhole)
	รู, โพรง, ท่อ, ถ้ำ
	รอยแตกตามขวาง
	การขุดหรือย้ายวัสดุถมเขื่อน
	ต้นไม้, วัชพืช
	การผุสลายของหิน
พื้นที่ด้านท้ายน้ำ	น้ำผุด, พื้นที่เปียก, การไหลซึม
	พื้นที่เปียกเป็นแอ่งกระทะ
อาคารระบายน้ำล้น	รอยร้าวบริเวณผนังด้านข้างทางระบายน้ำ (Retaining Wall)
อาคารส่งน้ำ	น้ำโคลนไหลออกจากจุดควบคุมการระบายน้ำท้ายเขื่อน
	การรั่วซึมของท่อส่งน้ำ

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)

ตารางที่ 23 สภาพความเสี่ยงต่อการเคลื่อนตัวของเขื่อน

องค์ประกอบเขื่อน	สภาพที่ทำการตรวจสอบ
สันเขื่อนและไหล่ทาง	รอยแตกตามยาว
	สันเขื่อนบิโดออกจากแนว
	รอยแตกตามขวางและการบิโดออกจากแนวเขื่อน
	การกัดเซาะบริเวณสันเขื่อน
ลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำ	การเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ขยุบตัว, อุดตัว
	ร่องน้ำลึกจากการกัดเซาะของน้ำฝน (Oversteep area)
	รอยแตกตามยาว
	การขยุบตัวจากการคายน้ำ (Consolidation)
ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	การเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ขยุบตัว, อุดตัว
	ร่องน้ำลึกจากการกัดเซาะของน้ำฝน (Oversteep area)
	รอยแตกตามยาว
	การขยุบตัวจากการคายน้ำ (Consolidation)
	ประสิทธิภาพของระบบระบายน้ำลาดเขื่อน (Slope Drain)
	ประสิทธิภาพของระบบระบายน้ำท้ายเขื่อน (Toe Drain)
พื้นที่ด้านท้ายน้ำ	พื้นที่อุ้มน้ำบริเวณท้ายน้ำ
	การปิดกั้นการระบายน้ำ
อาคารระบายน้ำล้น	การขยุบตัวในแนวตั้ง
	พื้นคอนกรีตของสันอาคารระบายน้ำล้นแตกร้าว

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)

$$RI_i = W_1 * R_1 + W_2 * R_2 + W_3 * R_3 + \dots + W_n * R_n \quad (15)$$

เมื่อ  $RI_i =$  คำนวณความเสี่ยงจากลักษณะการพิบัติใดๆ  
 $W_i =$  น้ำหนักปัจจัยรวมของสภาพขององค์ประกอบใดๆ  
 $R_i =$  คะแนนของสภาพความเสี่ยงขององค์ประกอบใดๆ

น้ำหนักความสำคัญของสภาพความเสี่ยงสามารถกำหนดโดยพิจารณาปัจจัยต่างๆ ในการให้น้ำหนัก ดังตารางที่ 24 ตารางที่ 25 และ ตารางที่ 26 ซึ่งได้แก่ ความรุนแรงของผลกระทบเสียหายที่เกิดขึ้น ( $F_1$ ) ความยากง่ายของการแก้ไขซ่อมแซม ( $F_2$ ) และจำนวนรูปแบบการพิบัติที่เกี่ยวข้อง ( $F_3$ ) มีวิธีการคำนวณหาน้ำหนักตามสมการที่ 16

$$WF = F_1 * F_2 * F_3 \quad (16)$$

เมื่อ  $WF =$  น้ำหนักความสำคัญ  
 $F_1 =$  ความรุนแรงของผลกระทบเสียหายที่เกิดขึ้น  
 $F_2 =$  ความยากง่ายของการแก้ไขซ่อมแซม  
 $F_3 =$  จำนวนรูปแบบการพิบัติที่เกี่ยวข้อง

ด้านความรุนแรง ได้แก่ระดับของผลกระทบจากสภาพความเสียหายในองค์ประกอบ โดยมีเกณฑ์ของระดับคะแนนความรุนแรง ดังนี้

ระดับ 1 คือ องค์ประกอบที่เกิดความเสียหาย ไม่ส่งผลโดยตรงต่อการพิบัติของเขื่อนโดยตรง (บำรุงรักษาตามปกติ)

ระดับ 2 คือ องค์ประกอบที่เกิดความเสียหาย ทำให้เขื่อนพิบัติได้ในที่สุด หากไม่ปรับปรุงแก้ไข (ซ่อมบำรุงเป็นพิเศษ)

ระดับ 3 คือ องค์ประกอบที่เกิดความเสียหาย จะทำให้เขื่อนพิบัติได้ทันที หรือในระยะเวลาอันสั้น (ต้องแก้ไขในทันที)

ตารางที่ 24 การหาค่าน้ำหนักของสภาพความเสี่ยง สำหรับการพิบัติแบบการไหลล้นข้ามสันเขื่อน

องค์ประกอบ เขื่อน	สภาพที่ทำการ ตรวจสอบ	รหัส สภาพ ความเสี่ยง	ความ รุนแรงของ ผลกระทบ เสียหายที่ เกิดขึ้น	ความยาก ง่ายของ การแก้ไข ซ่อมแซม	จำนวน รูปแบบ การพิบัติ	ผล คูณ	ค่า น้ำหนัก
สันเขื่อนและ ไหล่ทาง	การยุบตัวของสัน เขื่อน	RO01	3	1	1	3	0.037
	อาคารระบาย น้ำล้น	สภาพของบาน ระบาย	RO02	3	3	1	9
	ประสิทธิภาพของ ระบบควบคุมบาน	RO03	3	3	1	9	0.111
	ประสิทธิภาพของ ระบบส่งกำลังไฟฟ้า สำรอง	RO04	2	1	1	2	0.025
	สภาพผนังคอนกรีต ของอาคารระบายน้ำ ล้น (Wing Wall)	RO05	3	3	2	18	0.222
	ความไม่มั่นคงของ ลาดทางเข้าอาคาร ระบายน้ำล้น	RO06	3	3	1	9	0.111
	สภาพตะแกรง	RO07	2	3	1	6	0.074
	สภาพท่อนกันสวะ	RO08	2	1	1	2	0.025
อาคารส่งน้ำ	ประสิทธิภาพในการ เปิดวาล์วของท่อส่ง น้ำ	RO09	2	3	1	6	0.074
	สภาพตะแกรง	RO10	2	3	1	6	0.074
	สภาพท่อนกันสวะ	RO11	2	1	1	2	0.025
	ประสิทธิภาพของ ระบบควบคุมบาน	RO12	3	3	1	9	0.111

หมายเหตุ อักษรย่อ ของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน; R = Risk, O = Overtopping

ตารางที่ 25 การหาค่าน้ำหนักของสภาพความเสี่ยง สำหรับการพิบัติแบบการกัดเซาะภายใน

องค์ประกอบ เงื่อนไข	สภาพที่ทำการ ตรวจสอบ	รหัส สภาพ ความเสี่ยง	ความ รุนแรงของ ผลกระทบ เสียหายที่ เกิดขึ้น	ความยาก ง่ายของ การแก้ไข ซ่อมแซม	จำนวน รูปแบบ การพิบัติ	ผล คูณ	ค่า น้ำหนัก
สันเขื่อนและ ไหล่ทาง	หลุมยุบ (Sinkhole)	RP01	3	3	2	18	0.083
	ต้นไม้, วัชพืช	RP02	2	1	1	2	0.009
	รอยแตกตามขวาง	RP03	3	3	2	18	0.083
	การขุดหรือย้ายวัสดุถม เขื่อน	RP04	1	1	2	2	0.009
	รู, โพรง, ท่อ, ถ้ำ	RP05	1	1	1	1	0.005
ลาดเขื่อนด้าน เหนือน้ำ	หลุมยุบ (Sinkhole)	RP06	3	3	1	9	0.042
	รู, โพรง, ท่อ หรือถ้ำ	RP07	3	3	1	9	0.042
	การขุดหรือย้ายวัสดุถม เขื่อน	RP08	3	1	2	6	0.028
	การผุสลายของหิน กันคลื่น	RP09	2	2	1	4	0.019
	การกัดเซาะโดยคลื่น	RP10	3	2	2	12	0.056
	รอยร้าวที่ผิวคอนกรีต ลาดหน้า	RP11	3	3	1	9	0.042
	ต้นไม้, วัชพืช	RP12	3	1	1	3	0.014
	ชนิดของหิน	RP13	1	3	1	3	0.014
ลาดเขื่อนด้าน ท้ายน้ำ	น้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่ เปียก	RP14	3	3	2	18	0.083
	หลุมยุบ (Sinkhole)	RP15	3	3	1	9	0.042
	รู, โพรง, ท่อ, ถ้ำ	RP16	3	1	1	3	0.014
	รอยแตกตามขวาง	RP17	3	3	2	18	0.083

หมายเหตุ อักษรย่อ ของการกัดเซาะภายใน; R = Risk, P = Piping

ตารางที่ 25 (ต่อ)

องค์ประกอบ เขื่อน	สภาพที่ทำการ ตรวจสอบ	รหัส สภาพ ความ เสี่ยง	ความ รุนแรงของ ผลกระทบ เสียหายที่ เกิดขึ้น	ความยาก ง่ายของ การแก้ไข ซ่อมแซม	จำนวน รูปแบบ การพิบัติ	ผล คูณ	ค่า น้ำหนัก
ลาดเขื่อนด้าน ท้ายน้ำ (ต่อ)	การขุดหรือย้ายวัสดุถม เขื่อน	RP18	2	1	2	4	0.019
	ต้นไม้, วัชพืช	RP19	3	1	1	3	0.014
	การผุสลายของหิน	RP20	1	2	1	2	0.009
พื้นที่ด้านท้าย น้ำ	น้ำผุด, พื้นที่เปียก, การไหลซึม	RP21	3	3	2	18	0.083
	พื้นที่เปียกเป็นแอ่ง กระทะ	RP22	3	3	2	18	0.083
อาคารระบาย น้ำล้น	รอยรั่วบริเวณผนัง ด้านข้างทางระบาย น้ำ (Retaining Wall)	RP23	3	3	1	9	0.042
อาคารส่งน้ำ	น้ำโคลนไหลออก จากจุดควบคุมการ ระบายน้ำท้ายเขื่อน	RP24	3	3	1	9	0.042
	การรั่วซึมของท่อส่ง น้ำ	RP25	3	3	1	9	0.042

หมายเหตุ อักษรย่อ ของการกัดเซาะภายใน; R = Risk, P = Piping

ตารางที่ 26 (ต่อ)

องค์ประกอบ เขื่อน	สภาพที่ทำการ ตรวจสอบ	รหัส สภาพ ความ เสี่ยง	ความ รุนแรงของ ผลกระทบ เสียหายที่ เกิดขึ้น	ความยาก ง่ายของ การแก้ไข ซ่อมแซม	จำนวน รูปแบบ การพิบัติ	ผล คูณ	ค่า น้ำหนัก
สันเขื่อนและ ไหล่ทาง	รอยแตกตามยาว	RM01	3	3	1	9	0.059
	สันเขื่อนบิโดออกจาก แนว	RM02	3	3	1	9	0.059
	รอยแตกตามขวาง และการบิโดออกจาก แนวเขื่อน	RM03	3	3	2	18	0.118
	การกัดเซาะบริเวณ สันเขื่อน	RM04	1	1	1	1	0.007
ลาดเขื่อนด้าน เหนือน้ำ	การเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ขูดตัว, ขูดตัว	RM05	3	3	2	18	0.118
	ร่องน้ำลึกจากการกัด เซาะของน้ำฝน (Oversteep area)	RM06	3	2	1	6	0.039
	รอยแตกตามยาว	RM07	3	3	1	9	0.059
	การขูดตัวจากการคาย น้ำ (Consolidation)	RM08	1	2	1	2	0.013
ลาดเขื่อนด้าน ท้ายน้ำ	การเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ขูดตัว, ขูดตัว	RM09	3	2	2	12	0.079
	ร่องน้ำลึกจากการกัด เซาะของน้ำฝน (Oversteep area)	RM10	3	2	1	6	0.039
	รอยแตกตามยาว	RM11	3	3	1	9	0.059

หมายเหตุ อักษรย่อ ของการเคลื่อนตัวของเขื่อน; R = Risk, M = Mass movement

ตารางที่ 26 (ต่อ)

องค์ประกอบ เขื่อน	สภาพที่ทำการ ตรวจสอบ	รหัส สภาพ ความ เสี่ยง	ความ รุนแรงของ ผลกระทบ เสียหายที่ เกิดขึ้น	ความยาก ง่ายของ การแก้ไข ซ่อมแซม	จำนวน รูปแบบ การพิบัติ	ผล คูณ	ค่า น้ำหนัก
ลาดเขื่อนด้าน ท้ายน้ำ (ต่อ)	การยุบตัวจากการคาย น้ำ (Consolidation)	RM12	1	2	1	2	0.013
	ประสิทธิภาพของ ระบบระบายน้ำลาด เขื่อน (Slope Drain)	RM13	1	3	1	3	0.020
	ประสิทธิภาพของ ระบบระบายน้ำท้าย เขื่อน (Toe Drain)	RM14	3	3	1	9	0.059
	การเคลื่อนตัวของราง ระบายน้ำท้ายเขื่อน (Drain Ditch)	RM15	3	2	1	6	0.039
พื้นที่ด้านท้าย น้ำ	พื้นที่อุดขึ้นบริเวณ ท้ายน้ำ	RM16	3	2	1	6	0.039
ระบบระบาย น้ำ	การปิดกั้นการระบาย น้ำ	RM17	3	3	1	9	0.059
อาคารระบาย น้ำล้น	การยุบตัวในแนวตั้ง	RM18	3	3	1	9	0.059
	พื้นคอนกรีตของสัน อาคารระบายน้ำล้น แตกร้าว	RM19	3	3	1	9	0.059

หมายเหตุ อักษรย่อ ของการเคลื่อนตัวของเขื่อน; R = Risk, M = Mass movement

ด้านความยากง่ายในการแก้ไขซ่อมแซม บ่งบอกถึงเวลาในการแก้ไขปัญหาโดยมีเกณฑ์ของระดับคะแนนความยากง่าย ดังนี้

ระดับ 1 คือ การปรับปรุง ซ่อมแซม ไม่จำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญ ใช้เครื่องจักรหรือเทคนิคที่ทำได้ง่าย และใช้เวลาสั้น

ระดับ 2 คือ การปรับปรุง ซ่อมแซม ใช้ผู้เชี่ยวชาญ ใช้เครื่องจักรเฉพาะหรือเทคนิคที่ทำได้ยากหรือใช้เวลานาน

ระดับ 3 คือ การปรับปรุง ซ่อมแซม ใช้ผู้เชี่ยวชาญเฉพาะและต้องมีการวิเคราะห์ใช้เครื่องจักรเฉพาะหรือเทคนิคขั้นสูง หรือใช้เวลานาน

จำนวนรูปแบบการพิบัติเขื่อนที่เกี่ยวข้องบ่งบอกถึงสภาพที่ตรวจพบดังกล่าวอาจนำไปสู่ลักษณะการพิบัติได้หลายลักษณะ โดยระดับที่มากที่สุดคือ 3 หรือก่อให้เกิดการพิบัติได้ 3 ลักษณะ เช่น หลุมยุบ (Sinkhole) บริเวณสันเขื่อน ข่อมแสดงถึงความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนภายในตัวเขื่อนดินถม หรือการยุบตัวบริเวณสันเขื่อนดังกล่าว อาจเพิ่มโอกาสในการไหลล้นข้ามสันเขื่อน ในกรณีนี้จะมีคะแนนเป็น 2

#### 4. เกณฑ์การให้คะแนนสภาพความเสี่ยง

การประเมินสภาพขององค์ประกอบโดยอาศัยการจำแนกสภาพตามระดับความเสี่ยงภัย โดยแบ่งเป็น 4 ระดับ (อ้างอิงการแบ่งสภาพตาม สุทธิศักดิ์ และคณะ, 2550) ดังตัวอย่างแสดงในภาพที่ 44 โดยมีการบ่งบอกถึงระดับความเสียหายหรือความเสี่ยงต่อการพิบัติ ตามหลักเกณฑ์พื้นฐานดังต่อไปนี้

ระดับ 1. หมายถึง สภาพองค์ประกอบ มีความสมบูรณ์หรือทำหน้าที่เป็นปกติ

ระดับ 2. หมายถึง สภาพองค์ประกอบ มีความเสียหายเล็กน้อย

(มีแนวโน้มไปทางปกติ)

ระดับ 3. หมายถึง สภาพองค์ประกอบ มีความเสียหาย ควรวิเคราะห์หรือตรวจวัด และติดตามพฤติกรรมเป็นพิเศษเพื่อประเมินความปลอดภัย อาจสามารถรอการซ่อมแซมได้ (มีแนวโน้มไปทางไม่ปกติ)

ระดับ 4. หมายถึง สภาพองค์ประกอบ มีความเสียหายมาก มีผลต่อการขับขี่อย่างเห็นได้ชัด จำเป็นที่ต้องการซ่อมแซมโดยทันที



ภาพที่ 44 ระดับคะแนนสภาพรอยแตกตามยาว ตรวจสอบบริเวณสันเขื่อนและไหล่ทาง, ลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำ, ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ

หมายเหตุ \* การเฝ้าระวัง : ตรวจสอบระดับตามแนวหน้าตัด (Section) ตั้งฉากกับรอยร้าว

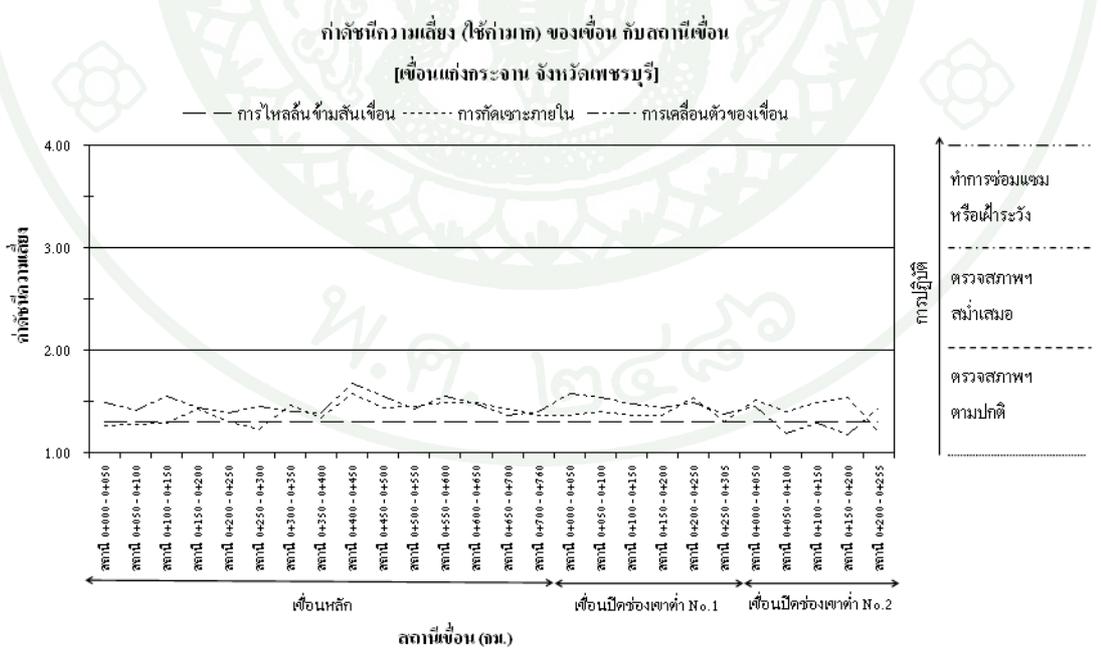
\*\* การแก้ไขเบื้องต้น : เพิ่มน้ำหนักที่ตื้นเขินโดยดิน หรือหินถมเพื่อป้องกันการไหลตัว

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)

### 5. การหาค่าดัชนีความเสี่ยง

การพิจารณาความเสี่ยงจะพิจารณาโดยใช้หลักการของความสัมพันธ์แบบห่วงโซ่ ทั้งนี้ โดยพิจารณาว่าดั่งโซ่ข้อใดขาด เส้นโซ่ทั้งหมดจะใช้การไม่ได้ตามประสงค์ หลักการนี้สามารถเปรียบเทียบกับเชือก หากเกิดการพิบัติของเชือกในช่วง หรือ ระหว่าง กม.เชือกใดๆ เชือกจะหมดประสิทธิภาพในการเก็บกักน้ำ

การหาค่าดัชนีความเสี่ยง ได้จากสมการที่ 18 โดยเมื่อได้น้ำหนักความสำคัญของสภาพความเสี่ยงนำมาคูณกับคะแนนจากการตรวจสอบสภาพเชือก ในสนามจะได้ค่าดัชนีความเสี่ยง และสามารถนำเสนอได้ดังภาพที่ 45 เส้นดัชนีความเสี่ยงได้จำแนกตามลักษณะการพิบัติเชือก 3 ลักษณะ คือ การไหลล้นข้ามสันเชือก การกัดเซาะภายใน และการเคลื่อนตัวของเชือก ลักษณะของเส้นความสัมพันธ์ที่ได้ดัชนีความเสี่ยงจะมีค่าสูงขึ้น หรือต่ำลงตามสภาพที่ตรวจพบในแต่ละช่วงสถานีเชือก ทั้งนี้จากตัวอย่างที่เสนอพบว่า การไหลล้นข้ามสันเชือกไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีความเสี่ยงตามระยะทางเนื่องจากสภาพโดยส่วนใหญ่จะสามารถตรวจได้ที่อาคารประกอบ และไม่มีการยุบตัวของสันเชือก



ภาพที่ 45 ตัวอย่างการนำเสนอค่าดัชนีสภาพตามระยะสถานีเชือก

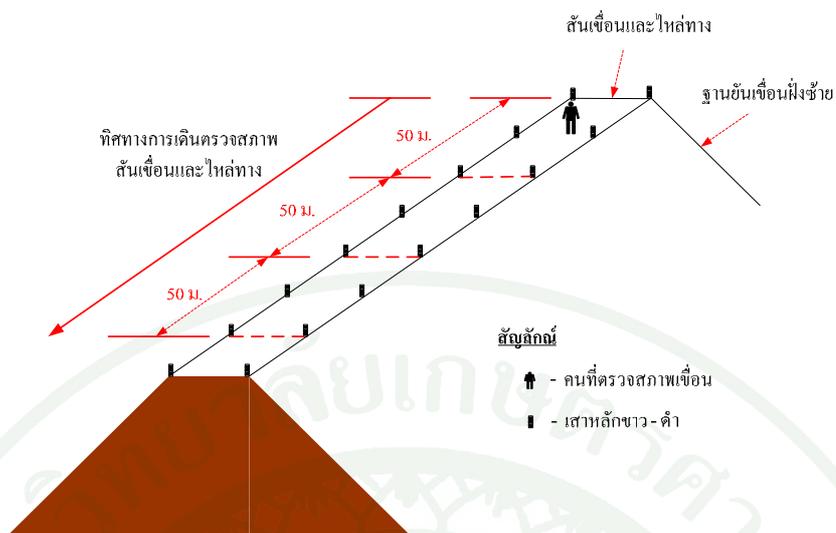
## 6. วิธีการตรวจสอบเขื่อน

วิธีการตรวจสอบเขื่อนกระทำโดยการศึกษาวีธีการตรวจสอบเขื่อนดินจากคู่มือ แนวทางการตรวจสอบเขื่อนจากต่างประเทศ และภายในประเทศ และทำการศึกษาคำอธิบายการเดินตรวจสอบเขื่อน โดยวิธีต่างๆ จากผู้ที่ศึกษาก่อนหน้านี้

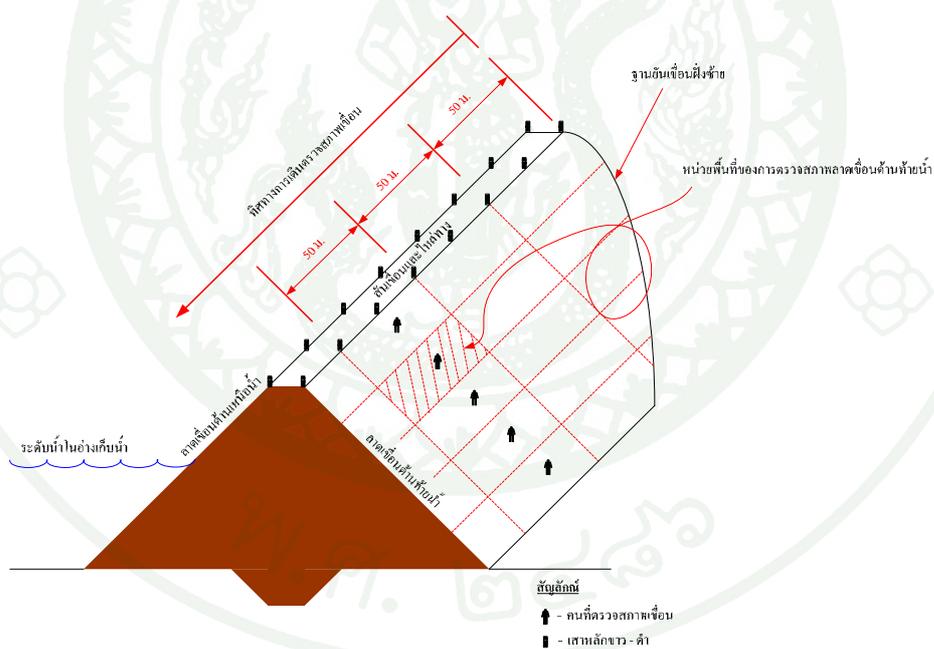
การดำเนินงานในการตรวจสอบเขื่อนดินภาคสนามและการหาค่าของดัชนีความเสี่ยงจากการตรวจสอบเขื่อน เริ่มจากการเตรียมข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับตัวเขื่อนที่จะเข้าตรวจสอบ เช่น ข้อมูลทั่วไปของเขื่อน, แบบเขื่อน, แบบบันทึกการตรวจสอบเขื่อน, อุปกรณ์การตรวจสอบเขื่อน เป็นต้น หลังจากนั้นจึงทำการเข้าตรวจสอบเขื่อนในสนามร่วมกับผู้เชี่ยวชาญเขื่อนและนิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ แล้วจึงนำปัญหาต่างๆ มาวิเคราะห์ปรับแก้เพื่อให้เข้าถึงค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้จากการตรวจสอบเขื่อนภาคสนาม และเพื่อความสะดวกของการตรวจสอบด้วยวิธีดัชนีความเสี่ยง

การตรวจสอบสันเขื่อนและไหล่ทางได้แบ่งตามช่วงระยะความยาวขนานกับสันเขื่อน ช่วงละ 50 เมตร ส่วนความกว้างจะเท่ากับความกว้างของสันเขื่อน (ภาพที่ 46) ซึ่งเป็นระยะที่เหมาะสมจากการเดินตรวจสอบจริงสำหรับการให้คะแนน หากระยะความยาวสั้นกว่านี้พื้นที่ของการตรวจสอบจะละเอียดเกินไป หรือหากระยะที่มากเกินไปจะเป็นระยะที่มากเกินไปทำให้ผู้ทำการตรวจสอบอาจพิจารณาสภาพที่ ตรวจพบได้ไม่ละเอียดเท่าที่ควร

การตรวจสอบลาดเขื่อน บริเวณลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ จะทำการแบ่งเป็นช่วงตามความยาวสันเขื่อน เพื่อความเหมาะสมของการให้คะแนน การแบ่งช่วงระยะความกว้างตามระยะลาดของเขื่อน จะพิจารณาจากระยะความยาวลาดของเขื่อนที่มากที่สุด และจำนวนผู้ทำการตรวจสอบ แล้วหารระยะที่เหมาะสม (ภาพที่ 47) ตามคู่มือการตรวจสอบเขื่อน, Dam Safety Manual (State of Colorado, 2002), ได้กำหนดระยะในการมองเห็นสภาพด้านข้างที่เหมาะสมสำหรับผู้ตรวจสอบไว้ที่ระยะประมาณ 10 - 30 ฟุต (ประมาณ 3 - 10 เมตร)



ภาพที่ 46 การเดินตรวจสภาพสันเขื่อนและไหล่ทาง



ภาพที่ 47 การเดินตรวจสภาพลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ

การตรวจสภาพพื้นที่ด้านท้ายน้ำจะตรวจบริเวณด้านท้ายเขื่อนไปทางท้ายน้ำระยะประมาณ 2 เท่าของความสูงเขื่อน (2H) หรือหากมีข้อสงสัยอาจเลยไปจนได้คำตอบที่ต้องการ ซึ่งพื้นที่ท้ายน้ำเป็นตัวบ่งชี้ความผิดปกติหากเกิดการไหลซึมผ่านฐานรากอันอาจพบ Sand Boil เป็นต้น

ส่วนการตรวจสภาพทางระบายน้ำจะทำการตรวจสภาพตามพื้นที่ที่องค์ประกอบ ได้แก่ การตรวจสภาพบาน-ระบายเพื่อดูว่าสามารถใช้งานได้ตามปกติและมีสภาพสมบูรณ์ การตรวจการผูกคร่อนของบานระบาย การตรวจสนิมที่เกิดขึ้นบนบานระบาย การตรวจสีทาป้องกันสนิม และการตรวจโครงสร้างเหล็ก เป็นต้น บานระบายที่ดีจะต้องสามารถรับแรงดันน้ำได้รวมถึงทำงานได้ตามปกติ โดยไม่มีการเสียรูปหรือชำรุด สำหรับการตรวจประสิทธิภาพระบบควบคุมบานสามารถปฏิบัติได้โดยทดสอบการยกบานระบายโดยเปิด – ปิด ระบบควบคุมเพื่อทดสอบการยกบานระบาย จุดมุ่งหมายของการทดสอบ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการระบายน้ำ เมื่อถึงเวลาจำเป็น ดังนั้นระบบดังกล่าวจึงเกี่ยวข้องกับทั้งระบบยกทางกล และระบบอิเล็กทรอนิกส์ การตรวจสภาพสันทางระบายน้ำนั้นจะใช้วิธีการเดินตรวจสภาพ (หากสามารถทำได้) แต่หากไม่สามารถเข้าตรวจสภาพระยะไกลได้ อาจใช้การมองสภาพด้วยสายตาในระยะไกล หรือใช้เครื่องมือช่วย เช่น กล้องส่องทางไกล เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อหาร่องรอยการแตกร้าวหรือการกัดกร่อนของคอนกรีต รวมถึงการหลุดตัวไม่เท่ากัน การตรวจ-สภาพผนังกำแพงของทางระบายน้ำล้นบริเวณด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำโดยการเดินเข้าไปตรวจ-สภาพกำแพง กำแพงที่ดีควรสามารถรับแรงดันดินด้านหลังกำแพงได้ดี ตรวจสอบการเอียงตัว รอยแตก น้ำรั่วออกจากกำแพง หรือแนวโน้มจะถล่มลงและปิดกั้นการระบาย การตรวจสภาพ-อาคารสลายพลังงานตรวจสภาพ เช่น สภาพคอนกรีต เป็นต้น การตรวจสภาพอาคารส่งน้ำ สภาพ-ท่อส่งน้ำ (Steel Pipe) หากเป็นท่อส่งน้ำขนาดใหญ่ การตรวจสภาพโดยการเดินเข้าไปตรวจสภาพ-ภายในท่อ แต่ต้องทำการตรวจเช็คปริมาณอากาศว่าเพียงพอต่อการหายใจของคน หรือผู้ทำการ-ตรวจสภาพ และห้ามทำการจุดไฟแช็ค หรือตะเกียง (เพื่อป้องกันชีวิตของผู้เข้าตรวจสภาพ เนื่องจากอาจมีแก๊สที่สามารถทำให้เกิดการระเบิดได้) ให้ใช้แสงไฟจากไฟฉายที่มีแสงสว่างเพียงพอต่อการ-มองเห็นสภาพ สำหรับท่อส่งน้ำขนาดเล็กอาจจะใช้เครื่องมือตรวจสภาพภายในท่อ หรือหากไม่สามารถตรวจสภาพภายในท่อได้ด้วยตนเอง อาจใช้วิธีการสอบถามผู้รู้เกี่ยวกับสภาพท่อ หรือประวัติเกี่ยวกับท่อส่งน้ำว่ามีเหตุการณ์ใดเกิดขึ้นกับท่อบ้าง มีการรั่วหรือไม่มีการซ่อมแซมหรือไม่ การตรวจสภาพบานระบาย ทำโดยการเดินเข้าไปภายในท่อ ณ ตำแหน่งที่บานระบายติดตั้ง แล้วทำการตรวจสภาพ การตรวจสภาพระบบควบคุม ทำโดยการทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมโดยการเปิดระบบควบคุมเพื่อทดลองยกบาน และทำการตรวจสภาพระบบควบคุม หรือตรวจดูประเภทของระบบควบคุมบาน การตรวจสภาพบริเวณทางออกของท่อส่งน้ำทางด้านท้ายน้ำโดยการเดินตรวจสภาพเพื่อดูสภาพผิดปกติ เช่น การรั่วซึมบริเวณทางออกของท่อส่งน้ำ มีน้ำโคลนไหลออกมาบริเวณรอบท่อส่งน้ำ

## 7. การทดสอบการตรวจสอบสภาพเขื่อน

การทดสอบการตรวจสอบสภาพเขื่อนดินเพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธีดัชนีความเสี่ยงได้ทำการทดสอบตรวจสอบสภาพเขื่อนจำนวน 3 เขื่อน ได้แก่ เขื่อนปิดช่องเขาขาดของโครงการเขื่อนขุนด่านปราการชล เป็นเขื่อนดินที่ได้ทำการก่อสร้างใหม่ ทดสอบการตรวจสอบโดยใช้ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมเขื่อนเข้าทำการตรวจสอบเขื่อนดำเนินการตรวจสอบ ณ วันที่ 11 ถึง 12 มีนาคม พ.ศ. 2550 เขื่อนแก่งกระจานซึ่งเป็นเขื่อนที่มีอายุการใช้งานมานาน โดยการตรวจสอบใช้ผู้ที่มีความรู้ด้านวิศวกรรมเขื่อนเข้าทำการตรวจสอบสภาพความเสี่ยง ดำเนินการตรวจสอบ ณ วันที่ 31 พฤษภาคม ถึง 2 มิถุนายน พ.ศ. 2550 และเขื่อนปราณบุรีเป็นเขื่อนที่มีอายุการใช้งานมาก ประกอบกับมีประวัติการรั่วซึมของเขื่อน การตรวจสอบใช้ผู้ตรวจสอบที่ไม่มีประสบการณ์ด้านวิศวกรรมเขื่อน ดำเนินการตรวจสอบ ณ วันที่ 30 มิถุนายน ถึง 2 กรกฎาคม พ.ศ. 2550 ซึ่งมีรายละเอียดโครงการดังนี้

โครงการเขื่อนขุนด่านปราการชล สำนักชลประทานที่ 9 จังหวัดนครนายก  
(ส่วนความปลอดภัยเขื่อน, 2550)

เมื่อวันที่ 4 ธันวาคม พ.ศ. 2536 เนื่องในวโรกาสวันเฉลิมพระชนพรรษาพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวได้พระราชทานพระราชดำริให้กรมชลประทานพิจารณาวางโครงการและก่อสร้างอ่างเก็บน้ำคลองท่าด่าน ที่บ้านท่าด่าน ตำบลหินตั้ง อำเภอเมืองนครนายก จังหวัดนครนายก เพื่อช่วยให้ราษฎรทางตอนล่างมีน้ำใช้ทำการเกษตร การอุปโภค – บริโภค รวมทั้งช่วยบรรเทาอุทกภัยที่มักเกิดขึ้นในเขตจังหวัดนครนายกเป็นประจำทุกปีอีกด้วย

ลักษณะเขื่อนหัวงาน

เขื่อนคอนกรีตบดอัด

ชนิดเขื่อน	คอนกรีตบดอัดแน่น (RCC)
ความสูงเขื่อน	93 ม.
ความยาวสันเขื่อน	2,720 ม.
ปริมาตรเขื่อน	5,470,000 ลบ.ม.
ระดับสันเขื่อน	+ 112 ม.(รทก.)

ระดับเก็บกักน้ำ	+ 110 ม.(รทก.)
ความจุอ่างเก็บน้ำที่ระดับเก็บกักน้ำ	224 ล้านลบ.ม.
พื้นที่อ่างเก็บน้ำที่ระดับเก็บกักน้ำ	3,087 ไร่

#### เขื่อนดินปิดช่องเขาต่ำ

ชนิดเขื่อน	เขื่อนดินถมแบ่งส่วน
ความสูงเขื่อน	26 ม.
ความยาวสันเขื่อน	400 ม.
ลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำ	1:3.0
ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	1:2.5

โครงการฯ ส่งน้ำเพื่อการเกษตรให้แก่พื้นที่ชลประทานรวม 185,000 ไร่ แยกเป็นโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษานครนายก 165,000 ไร่ โครงการทำด้านเดิม 6,000 ไร่ และโครงการทำด้านส่วนขยาย 14,000 มีเกษตรกรได้รับประโยชน์ประมาณ 5,400 ครัวเรือน ช่วยลดความเสียหายจากอุทกภัยลงได้ ร้อยละ 35 ส่งน้ำเพื่อการอุปโภค – บริโภค 16 ล้านลูกบาศก์เมตร / ปี ให้กับพื้นที่ต่าง ๆ ของ 4 อำเภอ ได้แก่ อำเภอเมือง อำเภอปากพลี อำเภองครักษ์ อำเภอบ้านนา จังหวัดนครนายก ส่งน้ำเพื่อการอุตสาหกรรม 7 ล้านลูกบาศก์เมตร / ปี ให้กับอำเภอต่างๆ ในจังหวัดนครนายก นอกจากนี้ยังจัดสรรเพื่อประโยชน์ด้านการรักษาสภาพลำน้ำ และช่วยการผลักดันน้ำเค็มอีก 7 ล้านลูกบาศก์เมตร / ปี รักษาหน้าระดับน้ำใต้ดินจากการมีน้ำชลประทานทำให้สามารถบรรเทาปัญหาดินเปรี้ยวในเขตพื้นที่ชลประทาน ผลพลอยได้จากผลผลิตปลาจากอ่างเก็บน้ำปีละ 58 ตัน

โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาแก่งกระเจาน สำนักชลประทานที่ 14 จังหวัดเพชรบุรี  
(ส่วนความปลอดภัยเขื่อน, 2550)

เขื่อนแก่งกระเจานสร้างปิดกั้นแม่น้ำเพชรบุรีซึ่งเป็นแม่น้ำที่อยู่ในท้องที่จังหวัดเพชรบุรีตลอดทั้งสาย ต้นน้ำเกิดจากทิวเขาตะนาวศรี ซึ่งเป็นทิวเขากั้นเขตแดนไทย – พม่า ไหลลงสู่ทิศใต้แล้ววกขึ้นไปทางทิศเหนือ ผ่านที่ราบไปออกทะเล ที่อำเภอบ้านแหลม รวมความยาวตลอดสาย 227 กิโลเมตร กรมชลประทานได้ดำเนินการตามโครงการพัฒนาลุ่มน้ำเพชรบุรี ระยะที่ 1 ซึ่งเป็นโครงการชลประทานแบบทดและส่งน้ำ สำหรับพื้นที่ตอนบนของทุ่งราบลุ่มน้ำเพชรบุรี ซึ่งความ

ลาดเทเหมาะแก่การส่งน้ำ แต่ขาดแคลนน้ำสำหรับการเกษตร โดยสร้างเขื่อนเพชร ซึ่งเป็นเขื่อนทดน้ำขึ้น และเริ่มเปิดใช้งานใน พ.ศ. 2493 ต่อมาประชาชนได้บุกเบิกพื้นที่เพื่อทำนาและทำไร่เพิ่มขึ้นทุกปี จนมีพื้นที่มากกว่าปริมาณน้ำที่จะจัดส่งให้ได้โดยการท่อน้ำจากเขื่อนเพชรแห่งเดียว และพื้นที่นาทางตอนล่างของทุ่งราบก็ต้องการได้น้ำชลประทานเช่นเดียวกัน กรมชลประทานจึงดำเนินการระยะที่ 2 โดยการสร้างเขื่อนแก่งกระจาน ซึ่งเป็นเขื่อนเก็บกักน้ำ เพื่อเพิ่มเนื้อที่ชลประทานของโครงการพัฒนาลุ่มน้ำเพชรบุรี ที่อำเภอท่ายาง จังหวัดเพชรบุรี เนื้อน้ำของเขื่อนเพชร ตามแนวถนนขึ้นไป 27 กิโลเมตร เขื่อนนี้เปิดใช้งานเมื่อ พ.ศ. 2509 วัตถุประสงค์เพื่อเก็บกักน้ำไว้ช่วยเหลือการเพาะปลูก สถานที่ตั้งเขื่อนอยู่ที่ ตำบลสองพี่น้อง อำเภอท่ายาง จังหวัดเพชรบุรี สหป.14 มาตรา ส่วน 1 : 50,000 ราว 4934 IV พิกัด 47 P NQ 275 – 685 ละติจูด  $12^{\circ} - 54' - 45''$  N. ลองจิจูด  $99^{\circ} - 37' - 58''$  E. ลักษณะโครงการ เป็นเขื่อนดินเก็บกักน้ำ ปิดกั้นแม่น้ำเพชรบุรี

#### ลักษณะเขื่อนหัวงาน

เป็นเขื่อนดินเก็บกักน้ำ ปิดกั้นแม่น้ำเพชรบุรี

สันเขื่อนยาว	760	ม.
สันเขื่อนสูง	58	ม.
ระดับสันเขื่อน	+ 106.00	ม.(รทก.)
ระดับเก็บกัก	+ 99.00	ม.(รทก.)
ระดับเก็บกักสูงสุด	102.65	ม(รทก.)
ปริมาณน้ำที่ระดับเก็บกักสูงสุด	710	ล้านลบ.ม.
พื้นที่รับน้ำ	2,200	ตร.กม.
พื้นที่อ่างฯ	50	ตร.กม.
อาคารท่อน้ำ (River Outlet) ขนาด	๑3.50	ม.
ระบายน้ำได้สูงสุด	75	ลบ.ม./วินาที
อาคารระบายน้ำล้น (Spillway) มีความยาว	100	ม.
ระบายน้ำได้	1,380	ลบ.ม./วินาที
มีเขื่อนดินปิดช่องเขาต่ำ ทางขวามือของเขื่อนอีก 2 แห่ง		
แห่งที่ 1 สูง	36	ม.
ยาว	305	ม.
แห่งที่ 2 สูง	24	ม.
ยาว	255	ม.

ระยะเวลาดำเนินการ พ.ศ. 2505 – พ.ศ. 2509 ราคาก่อสร้างทั้งหมด 160 ล้านบาท ประโยชน์ที่ได้รับ ได้แก่ ส่งน้ำตามลำน้ำเดิมให้พื้นที่ชลประทาน กลุ่มน้ำเพชรบุรีเพิ่มขึ้น 122,000 ไร่ มีน้ำให้การเพาะปลูกพืชฤดูแล้งอีก 174,000 ไร่ ขจัดการขาดแคลนน้ำอุปโภคบริโภค ตั้งแต่ปากอ่าวเพชรบุรีถึงหัวหินให้หมดไป บรรเทาอุทกภัยในทุ่งเพชรบุรีลง ผลิตระแสไฟฟ้าได้ 19,000 กิโลวัตต์ เป็นสถานที่เพาะพันธุ์ปลา ท่องเที่ยว และพักผ่อนหย่อนใจ

โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาปราณบุรี สำนักชลประทานที่ 14 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ (ส่วนความปลอดภัยเขื่อน, 2550)

เขื่อนปราณบุรีสร้างปิดกั้นแม่น้ำปราณบุรี มีต้นน้ำอยู่ในบริเวณเทือกเขาตะนาวศรี โดยมีลำห้วยและแม่น้ำเล็กๆ หลายสายไหลมารวมกันที่บริเวณบ้านกร่าง อำเภอท่ายาง จังหวัดเพชรบุรี ไหลลงสู่อ่าวไทยที่บ้านปากน้ำปราณ ความยาวทั้งสิ้น 180 กิโลเมตร

กรมชลประทานจึงสร้างเขื่อนปราณบุรีขึ้น เพื่อเก็บกักน้ำและบรรเทาอุทกภัย อุปโภค-บริโภค ในท้องที่อำเภอหัวหินและเพื่อการเกษตรในท้องที่อำเภอปราณบุรี อำเภอกุยบุรีลงไปถึงอำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ เริ่มทำการก่อสร้างปี พ.ศ. 2510 จะเสร็จสมบูรณ์ในปี พ.ศ.2525 วัตถุประสงค์ เพื่อเก็บกักน้ำไว้ใช้ในการเกษตร อุปโภค – บริโภค และบรรเทาอุทกภัย ในพื้นที่บริเวณโครงการ สถานที่ตั้งโครงการอยู่ที่ ตำบลเขาน้อย อำเภอปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ สปช.14 มาตรฐาน 1 : 50,000 ระวัง 4933 IV พิกัด 47 P NP 865 – 780 ละติจูด  $12^{\circ} - 27' - 54''$  N. ลองจิจูด  $99^{\circ} - 47' - 45''$  E. ลักษณะโครงการ เป็นเขื่อนดินเก็บกักน้ำ ปิดกั้นแม่น้ำปราณบุรี

ลักษณะเขื่อนหัวงาน

เป็นเขื่อนดินเก็บกักน้ำ ปิดกั้นแม่น้ำปราณบุรี

สันเขื่อนยาว	1,500 ม.
สันเขื่อนสูง	42 ม.
ระดับสันเขื่อน	+ 62.00 ม.(รทก.)
ระดับเก็บกัก	+ 55.00 ม.(รทก.)
ระดับเก็บกักสูงสุด	+ 60.00 ม.(รทก.)

ปริมาณน้ำที่ระดับเก็บกัก		445	ล้านลบ.ม.
ปริมาณน้ำที่ระดับเก็บกักสูงสุด		650	ล้านลบ.ม.
พื้นที่รับน้ำ		2,029	ตร.กม.
พื้นที่อ่าง ฯ		36.70	ตร.กม.
ปริมาณน้ำไหลลงอ่าง ฯ		500	ล้านลบ.ม./ปี
ปริมาณฝนเฉลี่ย		1,041	มม./ปี
Canal Outlet	ขนาด	Ø 3.00	ยาว
	ยาว	161	ม.
ระบายน้ำได้		31.50	ลบ.ม./วินาที
Service Spillway	บานโค้งขนาด	10.00 x 3.00	ม.
ระบายน้ำได้		945	ลบ.ม./วินาที
ทางระบายน้ำฉุกเฉิน	ขนาดกว้าง	135	ม.
ระบายน้ำได้		680	ลบ.ม./วินาที
<b>ระบบส่งน้ำ</b>			
แล้วมี	ปตร. บังคับน้ำให้ไหลลงคลองส่งน้ำสายใหญ่	ยาว	65.17 กม.
ปริมาณน้ำผ่านเต็มที่		31.50	ลบ.ม./วินาที
คลองซอยและคลองแยกซอย	รวม 52 สาย	ยาว	237.03 กม.

ระยะเวลาดำเนินการ พ.ศ.2510 – พ.ศ.2524 ราคาค่าก่อสร้างทั้งหมด 1,205 ล้านบาท ประโยชน์ที่ได้รับ พื้นที่ชลประทาน ( ฝั่งขวา ) 220,000 ไร่สำหรับพืชฤดูฝน และ 144,000 ไร่สำหรับฤดูแล้ง ทำให้พื้นที่เพาะปลูกบริเวณทุ่งสามร้อยยอด ซึ่งเป็นดินเค็ม ให้ทำการเพาะปลูกได้ในระยะต่อไป ช่วยบรรเทาอุทกภัย ในพื้นที่เขตโครงการ ฯ จากแม่น้ำปรางบุรี ถนนบนคันคลอง ช่วยส่งเสริมการคมนาคมทางบก เป็นแหล่งเพาะพันธุ์ปลา ท่องเที่ยว และพักผ่อนหย่อนใจ

## บุคคลากรในการตรวจสอบสภาพความเสี่ยงเขื่อน

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดสอบระดับคะแนนสภาพที่ตรวจว่าจะสามารถเข้าใจได้ โดยบุคคลทั่วไปได้หรือไม่ โดยทำการทดลองกับผู้มีความรู้ด้านวิศวกรรมเขื่อนในระดับต่างๆ กัน และผู้ที่ยังไม่มีความรู้ด้านเขื่อน การทดสอบวิธีการและแบบบันทึกการตรวจสอบเขื่อนในสนามมีวัตถุประสงค์สุดท้ายเพื่อสามารถดำเนินการตรวจสอบได้โดยผู้ตรวจสอบไม่มีความรู้ด้านวิศวกรรมเขื่อนมากนัก หรือไม่มีความรู้เกี่ยวกับเขื่อนมาก่อนเลย

บุคคลากรในการตรวจสอบเขื่อนแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ คือ

- 1) ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมเขื่อน นำโดย รศ.ดร.วรากร ไม้เรียง และผศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ และนิสิตปริญญาเอก ปริญญาโท หมวควิชาวิศวกรรมปฐพีที่ทำวิทยานิพนธ์ที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมเขื่อนเข้าทำการตรวจสอบเขื่อนปิดช่องเขาต่ำ โครงการเขื่อนขุนด่านปราการชล จังหวัดนครนายก
- 2) นิสิตปริญญาโท หมวควิชาวิศวกรรมปฐพี ชั้นปีที่ 2 ขึ้นไปที่เรียนวิชาการออกแบบเขื่อนดินและหินทิ้ง ทำการเข้าตรวจสอบเขื่อนแก่งกระจาน โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี
- 3) นิสิตปริญญาโท หมวควิชาวิศวกรรมปฐพี ชั้นปีที่ 1 ที่ยังไม่มีความรู้ด้านวิศวกรรมเขื่อน เพราะยังไม่ได้เรียนวิชาการออกแบบเขื่อนดินและหินทิ้ง เข้าทำการตรวจสอบเขื่อนปราณบุรี โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

ผลการตรวจเขื่อนโดยวิธีดัชนีความเสี่ยง (Risk Index)

ผลการตรวจสอบเขื่อนนำเสนอในรูปแบบคะแนน ตัวอย่างการตรวจสอบเขื่อนแก่งกระจาน แสดงสภาพทั่วไปดังภาพที่ 48 และภาพที่ 49 และการตรวจสอบเขื่อนแต่ละบริเวณในสนาม เป็นช่วงระหว่างสถานีเขื่อนและระยะตามความลาดของเขื่อนดังแสดงในภาพที่ 50 และสภาพที่ระดับคะแนน 3 และระดับคะแนน 4 ได้แสดงตั้งแต่ภาพที่ 51, 52, 53, 54, 55 และภาพที่ 56 สำหรับการแสดงผลการตรวจสอบหลุมยุบแสดงดังภาพที่ 57 คะแนนสภาพหลุมยุบบริเวณตัวเขื่อนแก่งกระจานซึ่งบันทึกคะแนน ระหว่างคะแนน 1 (เสี่ยงน้อยที่สุด) ถึง คะแนน 4 (เสี่ยงมากที่สุด)



ภาพที่ 48 สภาพลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำเขื่อนแก่งกระจาน



ภาพที่ 49 สภาพลาดเขื่อนท้ายน้ำเขื่อนแก่งกระจาน

		เขื่อนหลัก													
		สถานี	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี
		0+700 -	0+650 -	0+600 -	0+550 -	0+500 -	0+450 -	0+400 -	0+350 -	0+300 -	0+250 -	0+200 -	0+150 -	0+100 -	0+050 -
		0+760	0+700	0+650	0+600	0+550	0+500	0+450	0+400	0+350	0+300	0+250	0+200	0+150	0+100
ลาดเขื่อนด้านเหนือ	ระดับที่ 3														
	ระดับที่ 2														
	ระดับที่ 1														
สันเขื่อนและไหล่ทาง	ระดับที่ 1														
	ระดับที่ 2														
	ระดับที่ 3														
	ระดับที่ 4														
	ระดับที่ 5														

ภาพที่ 50 การแบ่งพื้นที่การตรวจสอบภาพเขื่อนแก่งกระจาน



ภาพที่ 51 สภาพหลุมยุบคะแนนระดับ 4 บริเวณลาดเขื่อนท้ายน้ำ ระดับที่ 1 ช่วงสถานี 350 ถึง 400



ภาพที่ 52 สภาพหลุมยุบคะแนนระดับ 4 บริเวณลาดเขื่อนท้ายน้ำ ระดับที่ 3 ช่วงสถานี 300 ถึง 350



ภาพที่ 53 สภาพหลุมยุบคะแนนระดับ 4 บริเวณลาดเขื่อนท้ายน้ำ ระดับที่ 4 ช่วงสถานี 450 ถึง 500



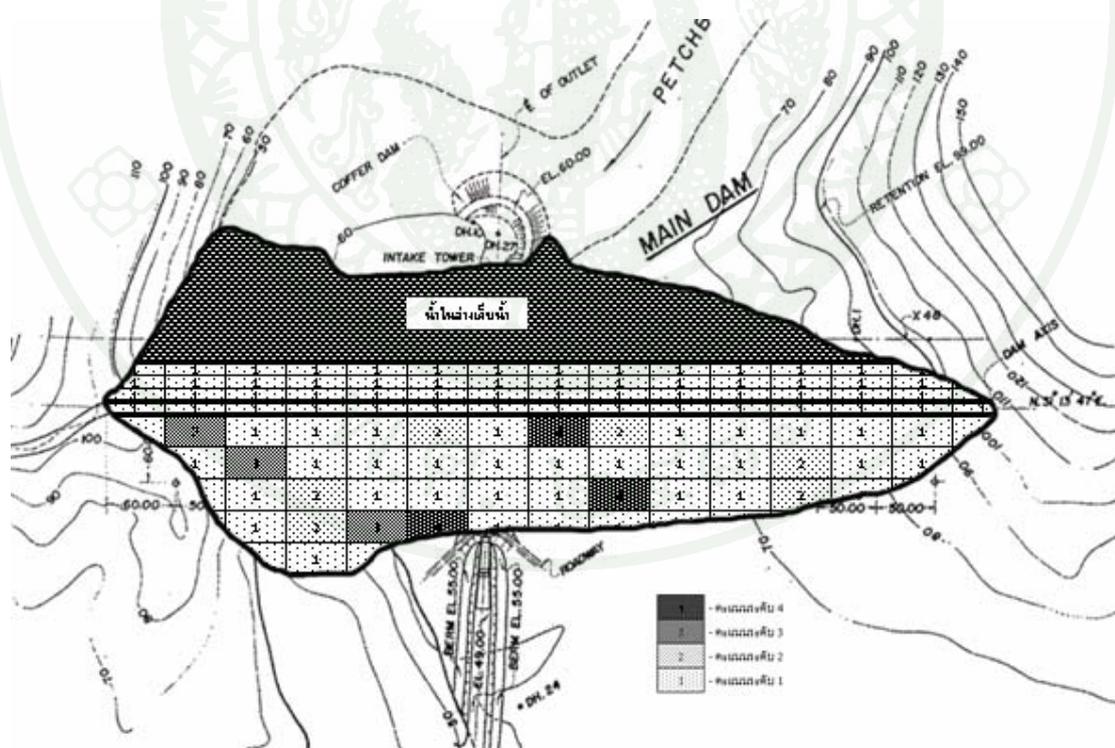
ภาพที่ 54 สภาพหลุมขุดกระแสนระดับ 3 บริเวณลาดเขื่อนท้ายน้ำ ระดับที่ 1 ช่วงสถานี 650 ถึง 700



ภาพที่ 55 สภาพหลุมขุดกระแสนระดับ 3 บริเวณลาดเขื่อนท้ายน้ำ ระดับที่ 2 ช่วงสถานี 600 ถึง 650



ภาพที่ 56 สภาพหลุมขุดคะแนนระดับ 3 บริเวณลาดเขื่อนท้ายน้ำ ระดับที่ 4 ช่วงสถานี 450 ถึง 500



ภาพที่ 57 การแสดงผลค่าคะแนนสภาพจากการตรวจวัด ตัวอย่างกรณีสภาพหลุมขุด บริเวณตัวเขื่อนแก่งกระจาน

สำหรับการนำเสนอผลค่าดัชนีความเสี่ยงหลังจากการคำนวณได้ สามารถแสดงได้โดยใช้เส้นความสัมพันธ์ระหว่างสถานีเขื่อนตามระยะทางสั้นเขื่อน กับค่าดัชนีความเสี่ยง 3 ตามลักษณะการพิบัติโดยเสนอผลค่าดัชนีความเสี่ยงใน 2 ลักษณะ ได้แก่ การเฉลี่ยค่าคะแนนของช่วงสถานีเขื่อน การใช้ค่าคะแนนที่มากที่สุดของช่วงสถานีเขื่อนนั้นๆ เป็นตัวแทนของสภาพ ตัวอย่างการคำนวณค่าดัชนีความเสี่ยง แสดงดังตัวอย่างการคำนวณด้านล่าง

การคำนวณดัชนีความเสี่ยงต่อการกัดเซาะภายใน สถานีเขื่อนหลักกิโลเมตรที่ 0+500 ถึง 0+550 มีผลดังแสดงใน ตารางที่ 27, 28, 29 และตารางที่ 30 และแสดงสภาพคะแนนระดับที่ 3 และ 4 ดังภาพที่ 58, 59, 60, 61 และภาพที่ 62

**ตารางที่ 27** คะแนนการตรวจสภาพสันเขื่อนและไหล่ทางช่วง สถานี 0+500 ถึง 0+550

สภาพความเสี่ยง	น้ำหนักความสำคัญ	คะแนนค่ามากที่สุดในช่วงการตรวจสภาพเขื่อน สถานี 0+500 ถึง 0+550
หลุมยุบ (Sinkhole)	0.0833	1
ต้นไม้, วัชพืช	0.0093	2
รอยแตกตามขวาง	0.0833	1
การขุดหรือย้ายวัสดุถมเขื่อน	0.0093	1
รู, โพรง, ท่อ, ถ้ำ	0.0046	1

**ตารางที่ 28** คะแนนการตรวจสภาพลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำช่วง สถานี 0+500 ถึง 0+550

สภาพความเสี่ยง	น้ำหนักความสำคัญ	คะแนนค่ามากที่สุดในช่วงการตรวจสภาพเขื่อน สถานี 0+500 ถึง 0+550
หลุมยุบ (Sinkhole)	0.0417	1
รู, โพรง, ท่อ, ถ้ำ	0.0417	2
การขุดหรือย้ายวัสดุถมเขื่อน	0.0278	1
การผุสลายของหินกันคลื่น	0.0185	1
การกัดเซาะโดยคลื่น	0.0556	3

ตารางที่ 28 (ต่อ)

สภาพความเสี่ยง	น้ำหนักความสำคัญ	คะแนนค่ามากที่สุดในช่วงการ ตรวจสอบสภาพเขื่อน สถานี 0+500 ถึง 0+550
รอยร้าวที่ผิวคอนกรีตคานหน้า	0.0417	1*
ต้นไม้, วัชพืช	0.0139	4
ชนิดของหิน	0.0139	1

หมายเหตุ 1. \*- เขื่อนแก่งกระจาน ไม่มีคอนกรีตคานหน้า ดังนั้นจึงไม่มีสภาพรอยร้าวที่ผิวคอนกรีตคานหน้า จึงให้คะแนนเท่ากับ 1  
2. คะแนนระดับ 3 ของการกัดเซาะ โดยคลื่น แสดงในภาพที่ 58 และคะแนนระดับ 4 ของต้นไม้, วัชพืช แสดงในภาพที่ 59

ตารางที่ 29 คะแนนการตรวจสอบสภาพลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำและพื้นที่ด้านท้ายน้ำช่วง สถานี 0+500 ถึง 0+550

สภาพความเสี่ยง	น้ำหนักความสำคัญ	คะแนนค่ามากที่สุดในช่วงการ ตรวจสอบสภาพเขื่อน สถานี 0+500 ถึง 0+550
<b>ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ</b>		
น้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก	0.0833	1
หลุมยุบ (Sinkhole)	0.0417	3
รู, โพรง, ท่อ, ถ้ำ	0.0139	3
รอยแตกตามขวาง	0.0833	1
การขุดหรือย้ายวัสดุถมเขื่อน	0.0185	1
ต้นไม้, วัชพืช	0.0139	4
การผุสลายของหิน	0.0093	2

## ตารางที่ 29 (ต่อ)

สภาพความเสี่ยง	น้ำหนักความสำคัญ	คะแนนค่ามากที่สุดในช่วงการ ตรวจสอบภาพเขียน สถานี 0+500 ถึง 0+550
<b>พื้นที่ด้านท้ายน้ำ</b>		
น้ำผุด, พื้นที่เปียก, การไหลซึม	0.0833	1
พื้นที่เปียกเป็นแอ่งกระทะ	0.0833	1

หมายเหตุ 1. คะแนนระดับ 3 ของสภาพหลุมยุบ แสดงในภาพที่ 60 , คะแนนระดับ 3 ของสภาพรู, โพรง, ท่อ, ถ้ำ แสดงในภาพที่ 61 และคะแนนระดับ 4 ของต้นไม้, วัชพืช แสดงในภาพที่ 62

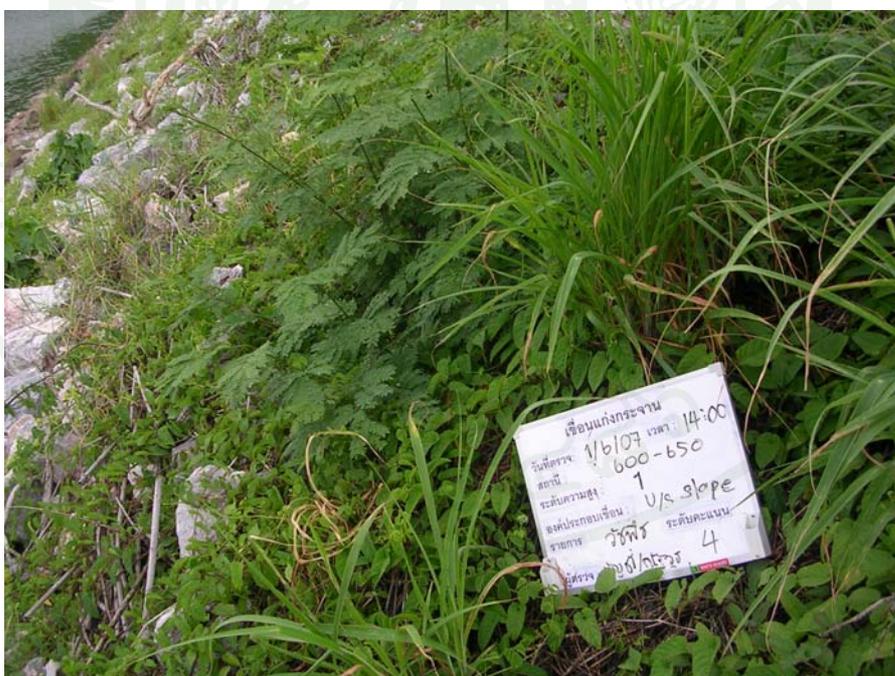
## ตารางที่ 30 คะแนนการตรวจสอบสภาพทางระบายน้ำล้นและอาคารท่อดำน้ำ

สภาพความเสี่ยง	น้ำหนักความสำคัญ	คะแนนค่ามากที่สุดในช่วงการ ตรวจสอบภาพเขียน สถานี 0+500 ถึง 0+550
<b>ทางระบายน้ำล้น</b>		
รอยร้าวบริเวณผนังด้านข้างทาง ระบายน้ำ (Retaining wall)	0.0417	1
<b>อาคารท่อดำน้ำ</b>		
น้ำโคลนไหลออกจากจุดควบคุม		
การระบายน้ำท้ายเขื่อน	0.0417	1
การรั่วซึมของท่อดำน้ำ	0.0417	3**

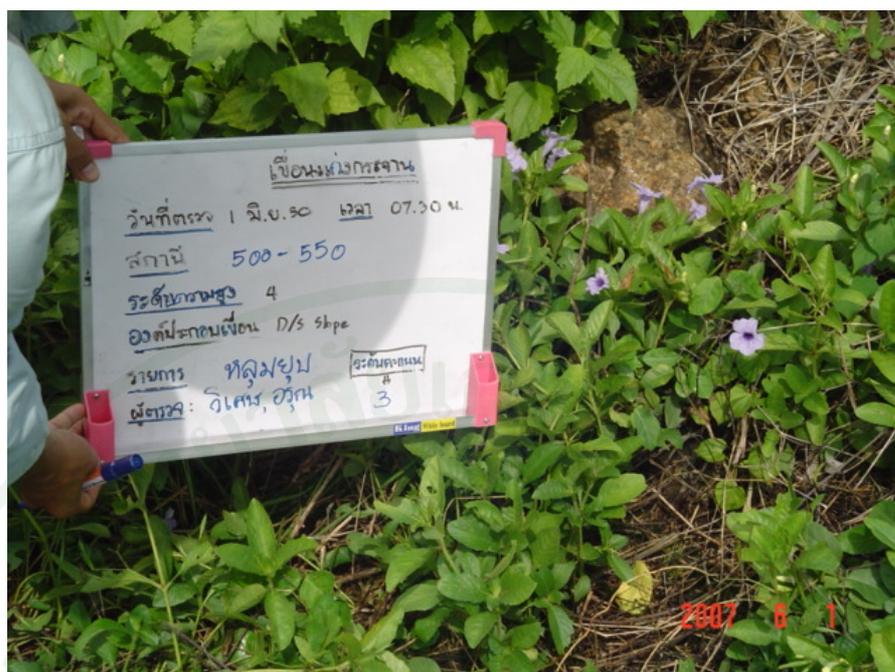
หมายเหตุ \*\* - เนื่องจากไม่สามารถเข้าตรวจสอบการรั่วซึมของท่อดำน้ำได้ จึงพิจารณาจากสภาพภายนอกและอายุการใช้งานของท่อดำน้ำ



ภาพที่ 58 ตัวอย่างแสดงคะแนนระดับ 3 ของการกัดเซาะโดยคลื่น ลาดเขื่อนด้านเหนือ



ภาพที่ 59 ตัวอย่างแสดงคะแนนระดับ 4 ของต้นไม้, วัชพืช ลาดเขื่อนด้านเหนือ



ภาพที่ 60 ตัวอย่างคะแนนระดับ 3 ของสภาพหลุมยุบ ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ



ภาพที่ 61 ตัวอย่างคะแนนระดับ 3 ของสภาพรู, โพรง, ท่อ, ถ้ำ ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ



ภาพที่ 62 คะแนนระดับ 4 ของต้นไม้, วัชพืช ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ

$$\begin{aligned}
 RI_{\text{pipe,max (0+500 - 0+550)}} &= (0.0833*1 + 0.0093*2 + 0.0833*1 + 0.0093*1 + 0.0046*1) + \\
 & (0.0417*1 + 0.0417*2 + 0.0278*1 + 0.0185*1 + 0.0556*3 + \\
 & 0.0417*1 + 0.0139*4 + 0.0139*1) + (0.0833*1 + 0.0417*3 + \\
 & 0.0139*3 + 0.0833*1 + 0.0185*1 + 0.0139*4 + 0.0093*2) + \\
 & (0.0833*1 + 0.0833*1) + (0.0417*1) + (0.0417*1 + 0.0417*3)
 \end{aligned}$$

$$RI_{\text{pipe,max (0+500 - 0+550)}} = 1.45$$

การเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสี่ยงต่อการกัดเซาะภายในภาพที่ 63 แสดงโดยการใช้คะแนนน้อยที่สุด คะแนนเฉลี่ย และคะแนนมากที่สุด เส้นความสัมพันธ์ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงตามระดับคะแนนที่ตรวจสอบสภาพ ค่าดัชนีความเสี่ยงที่มากที่สุด มีค่าดัชนีเท่ากับ 1.57 ที่สถานี 0+400 ถึง 0+450 ของเขื่อนหลัก และภาพที่ 64 แสดงผลระดับคะแนนสภาพต้นไม้, วัชพืช ที่เกิดขึ้นบริเวณลาดเขื่อนที่แสดงถึงความเสี่ยงที่เกิดขึ้นมากที่สุด



ภาพที่ 65 แสดงการเปรียบเทียบดัชนีความเสี่ยงต่อการเคลื่อนตัวของเขื่อน โดยการใช้คะแนนน้อยที่สุด คะแนนเฉลี่ย และคะแนนมากที่สุด ค่าดัชนีที่มีค่ามากที่สุด เท่ากับ 1.68 ที่สถานี 0+400 ถึง 0+450 ของเขื่อนหลัก และแสดงสภาพความเสี่ยงสูงของการเคลื่อนตัวดังภาพที่ 66

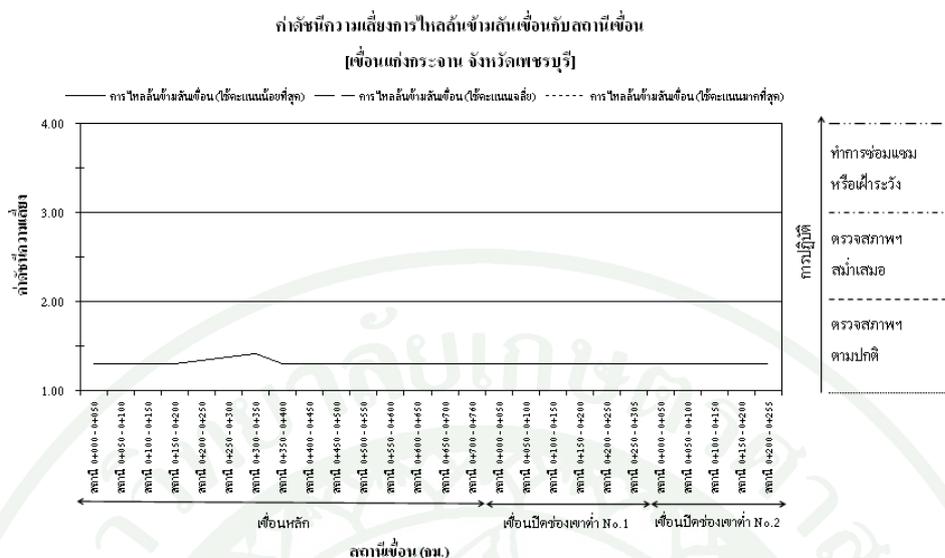


ภาพที่ 65 การเปรียบเทียบดัชนีความเสี่ยงโดยการใช้คะแนนน้อยที่สุด คะแนนเฉลี่ย และคะแนนมากที่สุดของการเคลื่อนตัวของเขื่อน



ภาพที่ 66 ตัวอย่างสภาพการเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ขุดตัว หรือหลุดตัวที่เกิดขึ้นที่มีคะแนน 3 ที่ช่วงสถานี 0+400 ถึง 0+450 ที่มีความเสี่ยงต่อการเลื่อนไถล

ภาพที่ 67 แสดงการเปรียบเทียบดัชนีความเสี่ยงต่อการไหลล้นข้ามสันเขื่อนโดยการใช้คะแนนน้อยที่สุด คะแนนเฉลี่ย และคะแนนมากที่สุด ผลปรากฏว่าค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้มีค่าเท่ากันทั้ง 3 กรณี ทั้งนี้ เพราะน้ำหนักความสำคัญโดยส่วนใหญ่จะมีน้ำหนักที่เกี่ยวกับอาคารประกอบและมีน้ำหนักด้านอาคารประกอบและคะแนนของอาคารประกอบนั้นคงที่ และแสดงสภาพความเสี่ยงในสนามดังภาพที่ 68



ภาพที่ 67 การเปรียบเทียบดัชนีความเสี่ยงโดยการใช้คะแนนน้อยที่สุด คะแนนเฉลี่ย และคะแนนมากที่สุดของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน



ภาพที่ 68 สภาพสันเขื่อนช่วง สถานี 0+300 ถึง 0+350



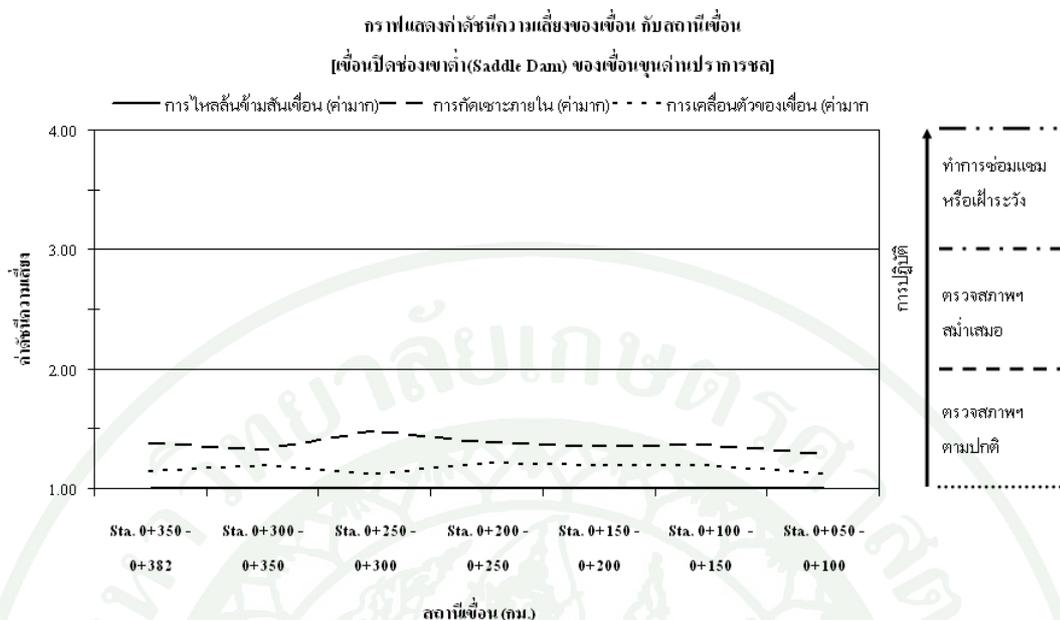




ภาพที่ 71 ลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำของเขื่อนปิดช่องเขาต่ำของโครงการเขื่อนขุนด่านปราการชล



ภาพที่ 72 ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำของเขื่อนปิดช่องเขาต่ำของโครงการเขื่อนขุนด่านปราการชล



**ภาพที่ 73** ค่าดัชนีความเสี่ยง (ใช้ค่ามาก) ของเขื่อนปิดช่องเขาต่ำ (Saddle Dam) เขื่อนขุนด่านปราการชล

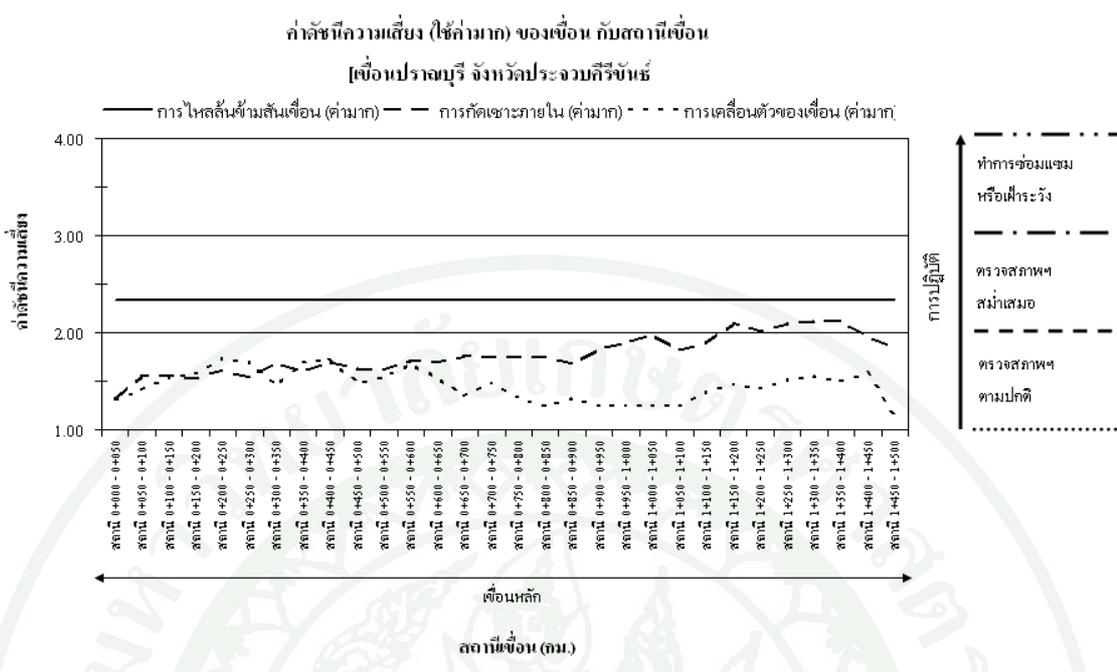
การเข้าตรวจสอบเขื่อนปราณบุรี สภาพโดยทั่วไปของเขื่อนแสดงดังภาพที่ 74 และภาพที่ 75 ภาพที่ 76 แสดงค่าดัชนีความเสี่ยงของเขื่อนปราณบุรี พบว่าค่าดัชนีความเสี่ยงต่อการไหลล้นข้ามสันเขื่อนจะมีค่ามากที่สุด เท่ากับ 2.3 ส่วนการกัดเซาะภายในที่ค่ามากที่สุดที่ช่วง กม. 1+350 - 1+400 มีค่าประมาณ 2.1 สำหรับค่าดัชนีความเสี่ยงต่อการเคลื่อนตัวของเขื่อนจะมีค่าน้อยที่สุดโดยเฉลี่ยค่ามากที่สุดจะอยู่ช่วง กม. 0+200 ถึง 0+250 และ กม. 0+400 ถึง 0+450 มีค่าประมาณ 1.75 และอยู่ในเกณฑ์ตรวจสอบตามปกติ



ภาพที่ 74 ค่าดัชนีความเสี่ยง (ใช้ค่ามาก) ของเขื่อนปราณบุรี



ภาพที่ 75 ค่าดัชนีความเสี่ยง (ใช้ค่ามาก) ของเขื่อนปราณบุรี



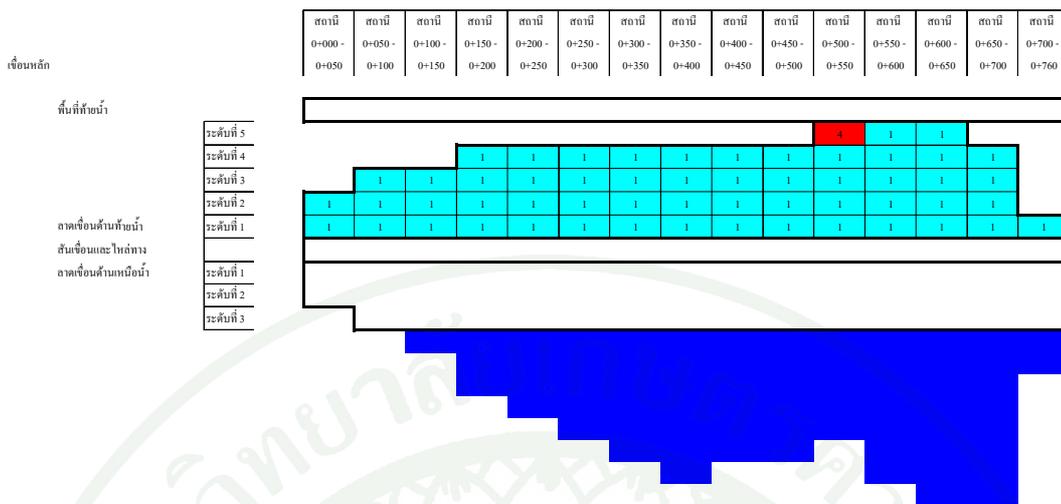
ภาพที่ 76 ค่าดัชนีความเสี่ยง (ใช้ค่ามาก) ของเขื่อนปราณบุรี

**8. การทดสอบประสิทธิภาพวิธีดัชนีความเสี่ยงในกรณีวิกฤติ**

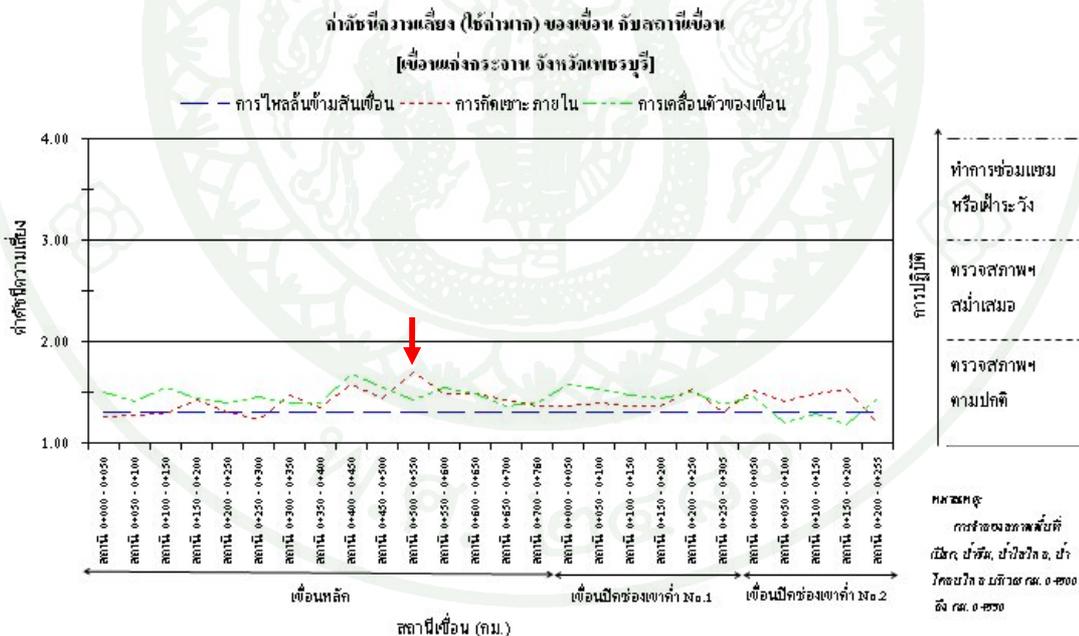
เนื่องจากการตรวจสอบสภาพเขื่อนในสนามไม่สามารถที่จะพบสภาพเขื่อนที่รุนแรงถึงขั้นทำให้เขื่อนเกิดการพิบัติได้ ดังนั้นจึงได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีดัชนีความเสี่ยงโดยการจำลองคะแนนความเสี่ยงระดับสูงสุด หรือกรณีวิกฤติ คือ คะแนนความเสี่ยง 4 ณ สภาพและตำแหน่งต่างๆ เพื่อพิจารณาว่าค่าดัชนีความเสี่ยงมีการตอบสนองอย่างไร

การทดสอบค่าดัชนีความเสี่ยง กรณีวิกฤติต่างๆ

ภาพที่ 77 เป็นการจำลองสภาพพื้นที่เปียก, น้ำซึม, น้ำไหล และน้ำโคลนไหลที่คะแนนระดับ 4 เพื่อทดสอบค่าดัชนีความเสี่ยง ของลักษณะการกัดเซาะภายในเพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของดัชนีความเสี่ยงว่าเหมาะสมกับสภาพความเสี่ยงที่จำลองหรือไม่ จากความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับดัชนีความเสี่ยงในภาพที่ 78 บริเวณสถานีเขื่อน 0+500 ถึง 0+550 จะเห็นว่าได้ค่าดัชนีมีค่าไม่เกิน 2.00 ซึ่งยังจำแนกว่าอยู่ในช่วงปกติ ซึ่งไม่ตรงกับสภาพความเสี่ยงที่สมมุติขึ้น

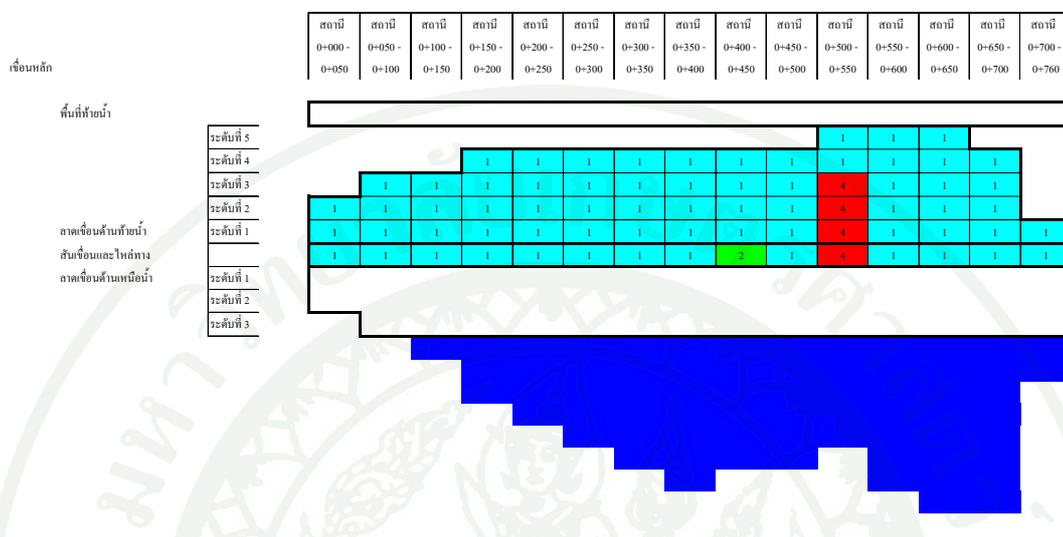


ภาพที่ 77 การจำลองสภาพพื้นที่เปียก, น้ำซึม, น้ำไหล, น้ำโคลนไหลเพื่อทดสอบค่าดัชนีความเสี่ยง บริเวณ กม. 0+500 ถึง 0+550

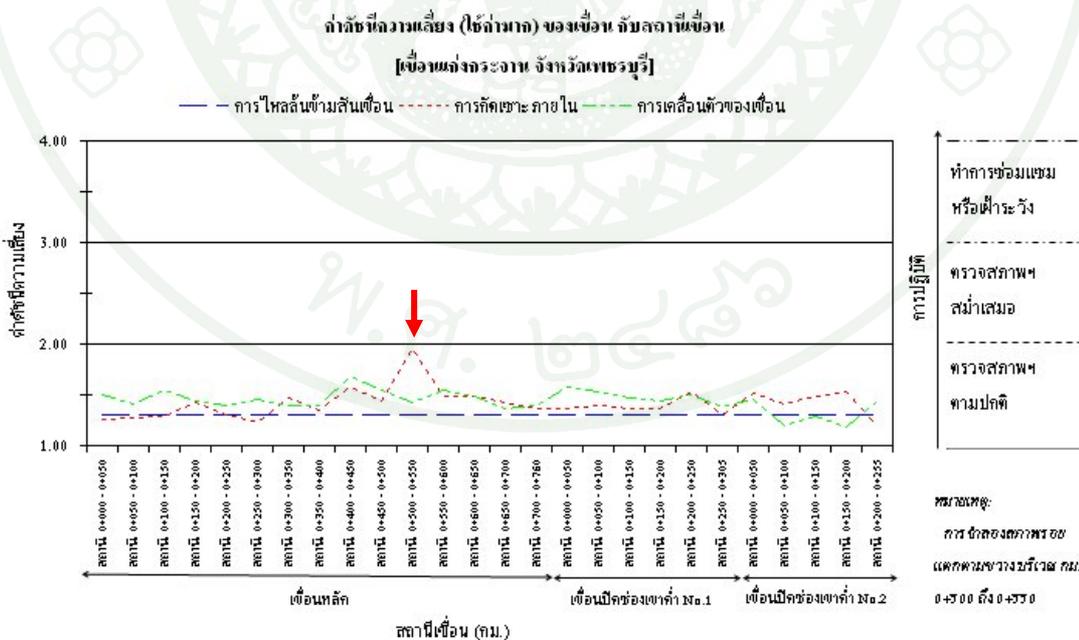


ภาพที่ 78 กราฟแสดงค่าดัชนีความเสี่ยง กรณีจำลองการเกิดพื้นที่เปียก, น้ำซึม, น้ำไหล, น้ำโคลนไหล บริเวณ กม. 0+500 ถึง 0+550

ภาพที่ 79 และภาพที่ 80 เป็นการจำลองสภาพรอยแตกตามขวาง ระดับคะแนน 4 บริเวณ สถานี 0+500 ถึง 0+550 จะได้ผลเหมือนกับสภาพน้ำโคลนไหล คือ ดัชนีความเสี่ยงที่ได้ไม่ตรงกับ สภาพความเสี่ยงที่สมมุติขึ้น

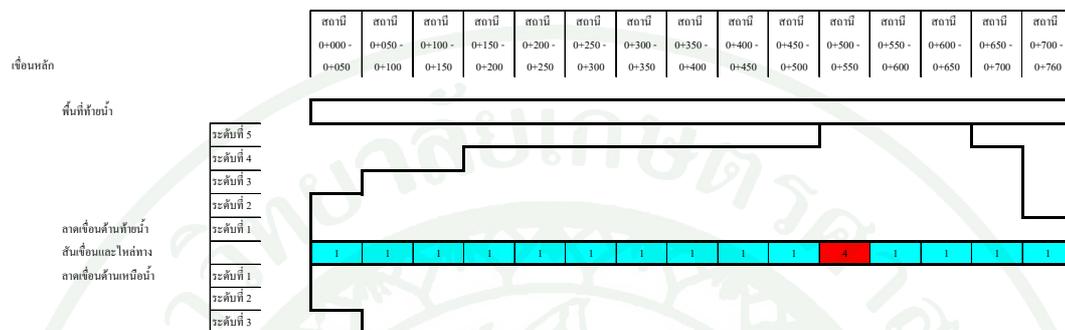


ภาพที่ 79 การจำลองสภาพรอยแตกตามขวางเพื่อทดสอบค่าดัชนีความเสี่ยง บริเวณ กม. 0+500 ถึง 0+550

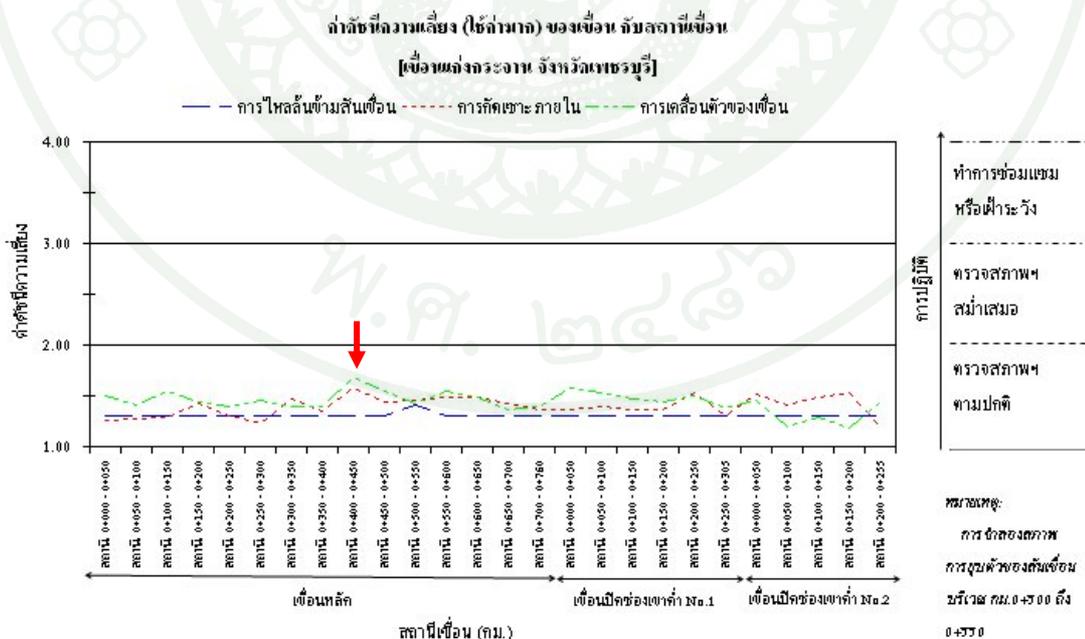


ภาพที่ 80 กราฟแสดงค่าดัชนีความเสี่ยงกรณีจำลองการเกิดรอยแตกตามขวาง บริเวณ กม. 0+500 ถึง 0+550

ภาพที่ 81 และภาพที่ 82 เป็นการจำลองสภาพสันเขื่อนขุดตัว ระดับคะแนน 4 บริเวณสถานี 0+500 ถึง 0+550 จะได้ผลเหมือนกับสภาพน้ำโคลนไหล คือ ดัชนีความเสี่ยงที่ได้ไม่ตรงกับสภาพความเสี่ยงที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 81 การจำลองสภาพการขุดตัวของสันเขื่อนเพื่อทดสอบค่าดัชนีความเสี่ยง บริเวณ กม. 0+500 ถึง 0+550



ภาพที่ 82 กราฟแสดงค่าดัชนีความเสี่ยงกรณีเกิดการขุดตัวสันเขื่อน บริเวณ กม. 0+500 ถึง 0+550

จากกรณีทั้ง 3 ดังกล่าวข้างต้น ทำให้ต้องพิจารณาการให้น้ำหนักความสำคัญของสภาพใหม่ ดังนั้นจึงได้นำเสนอแนวทางการแก้ไขในหัวข้อต่อไป

## 9. การปรับแก้ค่าน้ำหนักสภาพ

การปรับแก้ค่าน้ำหนักของสภาพความเสี่ยงเพื่อให้ตรงกับสภาพความเสี่ยงที่ใกล้เคียงกับสภาพจริงที่เกิดขึ้นมากที่สุด ได้ทดลองนำหลักการของ Fault tree มาพิจารณาลักษณะการพิบัติของเงื่อนไขเพื่อตรวจสอบสาเหตุ และสภาพของสาเหตุ เพื่อจะได้ทำการปรับสภาพและน้ำหนักได้อย่างถูกต้อง

### 9.1 การใช้ Fault Tree ในการวิเคราะห์น้ำหนักความสำคัญ

ในเบื้องต้นของการทำวิจัยการให้น้ำหนักความสำคัญของสภาพ ได้ทำการวิเคราะห์จากปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 3 ปัจจัย ได้แก่ ความรุนแรงของผลกระทบเสียหายที่เกิดขึ้น ความยากง่ายของการแก้ไขซ่อมแซม และจำนวนรูปแบบของการพิบัติที่เกี่ยวข้อง แต่ผลของดัชนีความเสี่ยงที่ได้ยังไม่ตรงกับความเสี่ยงที่เกิดขึ้นจริง ดังนั้นจึงได้เปลี่ยนวิธีการหาค่าน้ำหนักความสำคัญโดยการวิเคราะห์ Fault tree

Fault Tree ของลักษณะการพิบัติ 3 ลักษณะ ได้แก่

#### 1. การกัดเซาะภายใน (ภาพที่ 83)

การกัดเซาะภายในเกิดจากสาเหตุใหญ่ 3 สาเหตุ ได้แก่ น้ำไหลทะลุตัวเขื่อน, น้ำไหลตามรอยต่ออาคารประกอบ หรือน้ำไหลทะลุผ่านฐานรากเขื่อน ซึ่งแต่ละสาเหตุใหญ่จะเกิดจากสาเหตุย่อยได้หลายสาเหตุ ไปจนถึงสาเหตุเริ่มต้นโดยบางสาเหตุการพิบัติสามารถตรวจสอบสภาพความเสี่ยงได้ในขณะที่บางสาเหตุอาจตรวจสอบไม่ได้ น้ำไหลทะลุตัวเขื่อนมีสภาพความเสี่ยงที่ตรวจได้ทั้งหมด 7 สภาพ น้ำไหลตามรอยต่ออาคารประกอบตรวจสอบสภาพความเสี่ยงได้ 2 สภาพ และน้ำไหลทะลุผ่านฐานรากเขื่อน สามารถตรวจสอบสภาพความเสี่ยงได้ 3 สภาพ

## 2. การเลื่อนไถล (ภาพที่ 84)

การเลื่อนไถลจะมี 1 สาเหตุใหญ่ คือ การเปลี่ยนแปลงแรงกระทำหรือกำลังรับน้ำหนักของดิน ซึ่งจะเกิดจาก 4 สาเหตุย่อย ได้แก่ การลดลงของระดับน้ำอย่างรวดเร็ว, แรงดันน้ำในมวลดินเพิ่มขึ้น, ความลาดชันของลาดมากเกินไป หรือการต่อเติมสันเขื่อน มีสภาพที่สามารถตรวจได้ทั้งหมด 12 สภาพ แรงดันน้ำในมวลดินที่เพิ่มขึ้นมีสภาพที่สามารถตรวจได้เท่ากับ 5 สภาพ ความลาดชันของลาดมากเกินไป 5 สภาพ ส่วนการลดลงของระดับน้ำอย่างรวดเร็วและการต่อเติมสันเขื่อน ไม่มีสภาพที่สามารถตรวจได้

## 3. การไหลล้นข้ามสันเขื่อน (ภาพที่ 85)

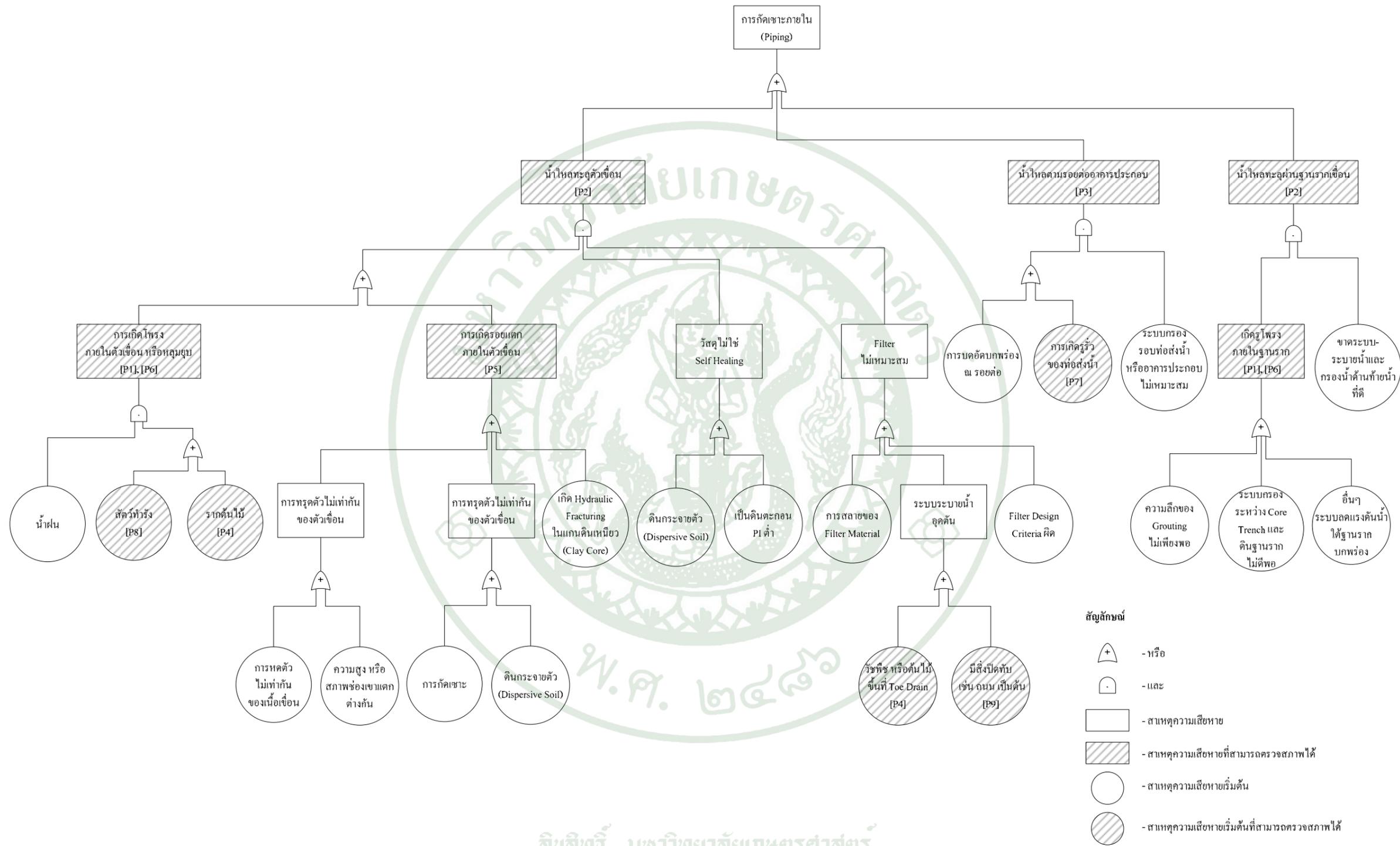
การไหลล้นข้ามสันเขื่อนมีสาเหตุใหญ่ 2 สาเหตุ ได้แก่ ระดับสันเขื่อนต่ำกว่าระดับน้ำหน้าเขื่อนหรือระดับน้ำสูงสุด หรือน้ำปริมาณมากเกินสันเขื่อนหรือระดับน้ำสูงสุดเนื่องจากการระบายผิดพลาด มีสภาพความเสี่ยงที่สามารถตรวจได้ทั้งหมด 15 สภาพ ระดับสันเขื่อนต่ำกว่าระดับน้ำหน้าเขื่อนหรือระดับน้ำสูงสุดมีสภาพความเสี่ยงที่ตรวจได้ 3 สภาพ น้ำปริมาณมากเกินสันเขื่อนหรือระดับน้ำสูงสุดเนื่องจากการระบายผิดพลาดมีสภาพความเสี่ยงที่ตรวจได้ 14 สภาพ

จาก Fault Tree ของ 3 ลักษณะการพิบัติ น่าจะเป็นตัวแทนที่ใกล้เคียงกับการเกิดสภาพความเสี่ยงที่เกิดขึ้น และสามารถนำไปหาค่าน้ำหนักความสำคัญที่เหมาะสมต่อไป

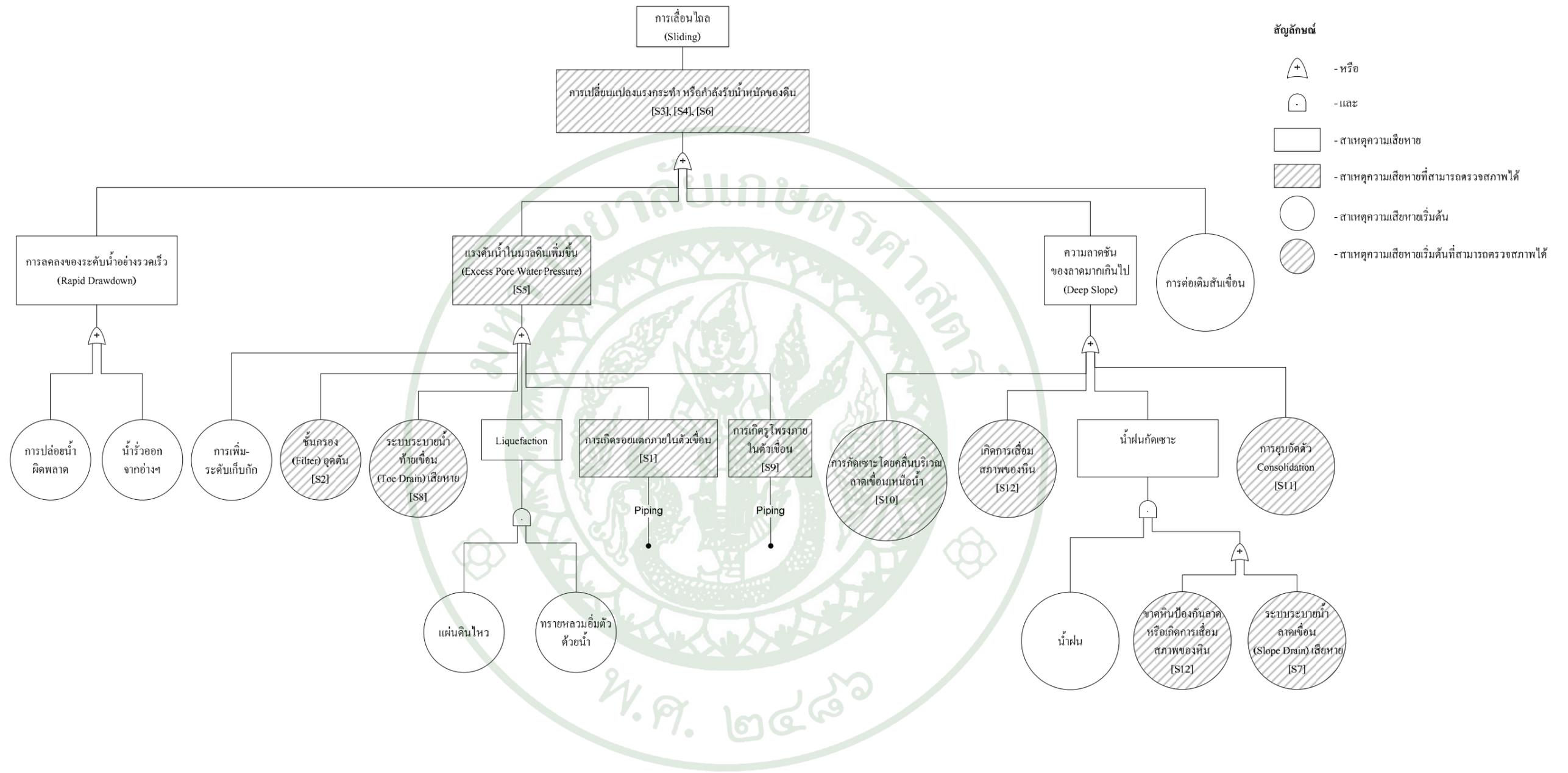
การหาค่าน้ำหนักความสำคัญโดยใช้ Fault tree มีวิธีการดังต่อไปนี้

9.1.1 เขียน Fault tree ของสาเหตุแต่ละลักษณะการพิบัติของเขื่อนดิน คือ การกัดเซาะภายใน, การเลื่อนไถล และการไหลล้นข้ามสันเขื่อน

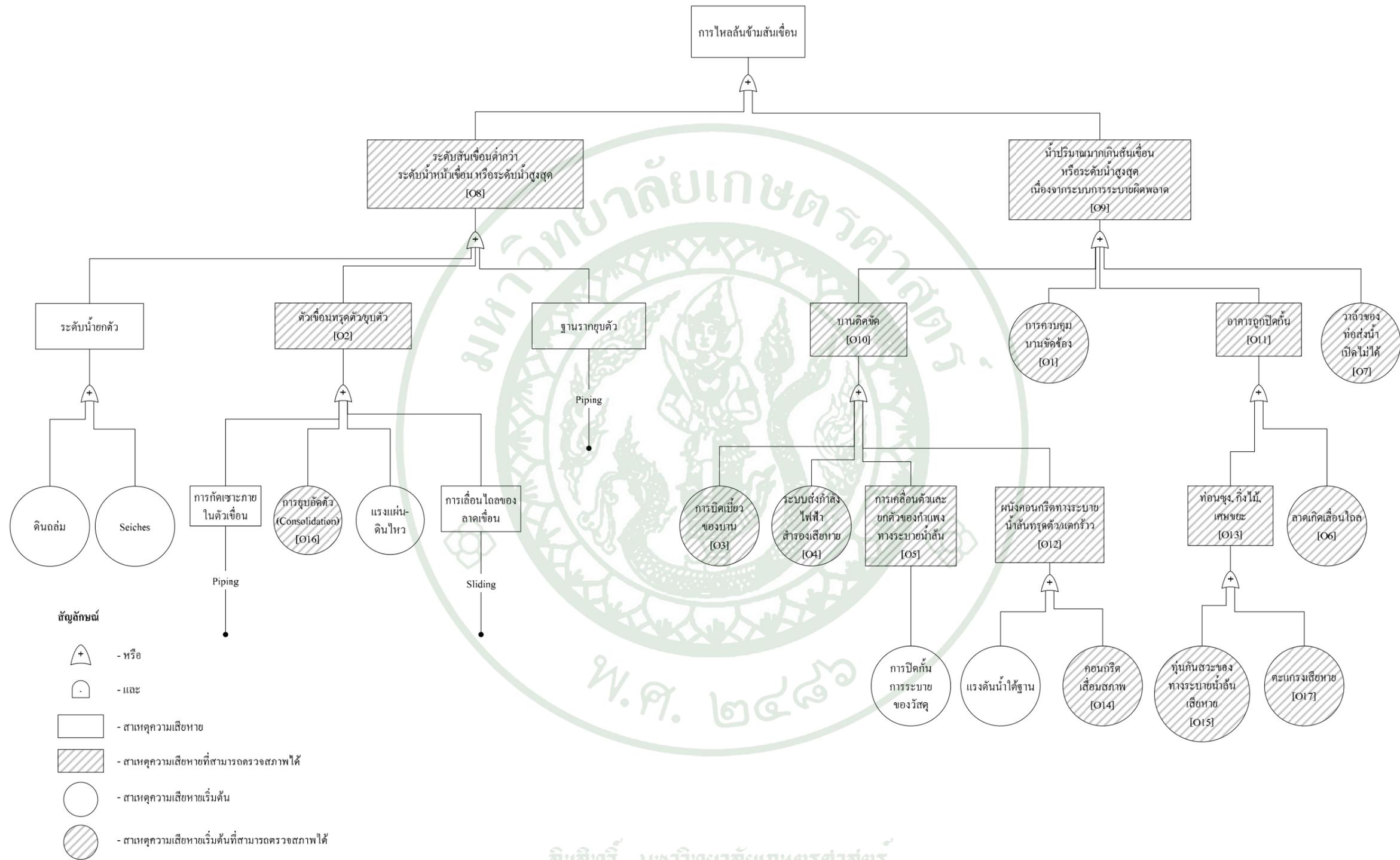
9.1.2 กำหนดสภาพความเสี่ยงที่สามารถตรวจสอบได้โดยใช้สายตาจาก Fault tree ดังตารางที่ 31, 32 และ 33



ภาพที่ 83 Fault Tree ของการกัดเซาะภายใน



ภาพที่ 84 Fault Tree ของการเลื่อนไถล



ภาพที่ 85 Fault Tree ของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน

ตารางที่ 31 สภาพความเสี่ยงจาก Fault tree ที่สามารถตรวจสอบได้ด้วยสายตาของลักษณะการพิบัติ  
แบบการกัดเซาะภายใน

องค์ประกอบเขื่อน	สภาพความเสี่ยงที่ทำการตรวจสอบ	รหัสสภาพ
สันเขื่อนและไหล่ทาง	หลุมยุบ (Sinkhole)	P1
	ต้นไม้, วัชพืช	P4
	รอยแตกตามขวาง	P5
	รู, โพรง, ท่อ หรือถ้ำ	P6
ลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำ	ต้นไม้ทำรัง	P8
	หลุมยุบ (Sinkhole)	P1
	รู, โพรง, ท่อ หรือถ้ำ	P6
	ต้นไม้ หรือวัชพืช	P4
ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	ต้นไม้ทำรัง	P8
	น้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก	P2
	หลุมยุบ (Sinkhole)	P1
	รู, โพรง, ท่อ หรือถ้ำ	P6
ระบบระบายน้ำ	รอยแตกตามขวาง	P5
	ต้นไม้, วัชพืช	P4
	ต้นไม้ทำรัง	P8
	สิ่งปิดทับ	P9
อาคารส่งน้ำ	น้ำโคลนไหลออกจากจุดควบคุมการระบายน้ำ	P3
	ท้ายเขื่อน การรั่วซึมของท่อส่งน้ำ	P7

ตารางที่ 32 สภาพความเสี่ยงจาก Fault tree ที่สามารถตรวจสอบได้ด้วยสายตาของลักษณะการพิบัติแบบการเลื่อนไถล

องค์ประกอบเขื่อน	สภาพความเสี่ยงที่ทำการตรวจสอบ	รหัสสภาพ
สันเขื่อนและไหล่ทาง	รอยแตกตามยาว	S1
	รู, โพรง, ท่อ หรือถ้ำ	S9
ลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำ	การเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ขุดตัว หรืออุดตัว	S6
	รอยแตกตามยาว	S1
	รู, โพรง, ท่อ หรือถ้ำ	S9
	การกัดเซาะโดยคลื่น	S10
ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	การขุดตัว	S11
	การเสื่อมสภาพของหิน	S12
	การเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ขุดตัว, อุดตัว	S6
	รอยแตกตามยาว	S1
ประสิทธิภาพของระบบระบายน้ำลาดเขื่อน (Slope Drain)	ประสิทธิภาพของระบบระบายน้ำลาดเขื่อน	S7
	ประสิทธิภาพของระบบระบายน้ำท้ายเขื่อน (Toe Drain)	S8
	การเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน (Drain Ditch)	S4
	รู, โพรง, ท่อ หรือถ้ำ	S9
พื้นที่ด้านท้ายน้ำ	การขุดตัว	S11
	การเสื่อมสภาพของหิน	S12
	พื้นที่อุดขึ้นบริเวณท้ายน้ำ	S5
ระบบระบายน้ำ	การปิดกั้นการระบายน้ำ	S2
ทางระบายน้ำสัน	การขุดตัวในแนวค้ำ	S3

ตารางที่ 33 สภาพความเสี่ยงจาก Fault tree ที่สามารถตรวจสอบได้ด้วยสายตาของลักษณะการพิบัติ  
แบบการไหลล้นข้ามสันเขื่อน

องค์ประกอบเขื่อน	สภาพความเสี่ยงที่ทำการตรวจสอบ	รหัสสภาพ
สันเขื่อนและไหล่ทาง	การยุบตัวของสันเขื่อน	O2
	ระดับสันเขื่อนต่ำกว่าระดับน้ำหน้าเขื่อน หรือ ระดับน้ำสูงสุด	O8
	ปริมาณน้ำมากเกินสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด	O9
ลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำ	การยุบตัว Consolidation	O16
ลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำ	การยุบตัว Consolidation	O16
ทางระบายน้ำล้น	สภาพของบานระบาย	O3
	ประสิทธิภาพของระบบควบคุมบาน	O1
	ประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังไฟฟ้าสำรอง	O4
	สภาพผนังคอนกรีตของทางระบายน้ำล้น (Wing Wall)	O5
	ความไม่มั่นคงของลาดทางเข้าทางระบายน้ำล้น	O6
	บานติดขัด	O10
	อาคารถูกปิดกั้น	O11
	ผนังคอนกรีตทางระบายน้ำล้นทรุดตัว หรือ แตกร้าว	O12
	ท่อนซุง, กิ่งไม้, เศษขยะ	O13
	คอนกรีตเสื่อมสภาพ	O14
อาคารส่งน้ำ	ท่อนกันสวะ	O15
	สภาพตะแกรง	O17
	ประสิทธิภาพของการเปิดวาล์วของท่อส่งน้ำ	O7
	ประสิทธิภาพของระบบควบคุมบาน	O1
	บานติดขัด	O10
	อาคารถูกปิดกั้น	O11
	ประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังไฟฟ้าสำรอง	O4
ท่อนซุง, กิ่งไม้, เศษขยะ	O13	

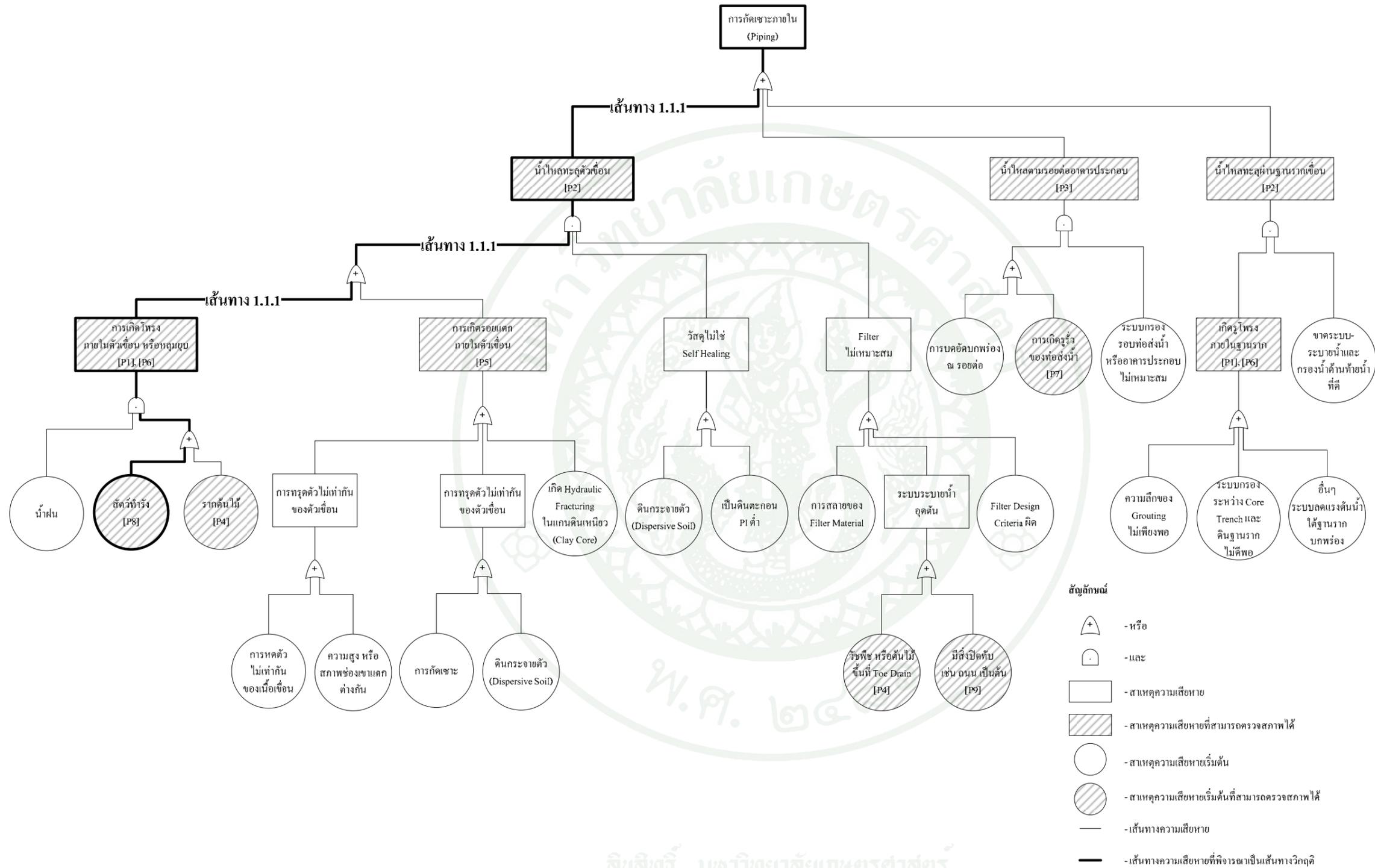


### ระดับความเสี่ยงเชิงปริมาณ

ระดับความเสี่ยงเชิงปริมาณ (ตารางที่ 34) เพื่อให้สามารถคำนวณหาค่าดัชนีความเสี่ยงโดยทำการเพิ่มจำนวนเท่าจากระดับสภาพก่อนหน้า เช่น กรณีที่ 2 ให้จำนวนเท่า เท่ากับ 3 หมายความว่า ระดับสภาพเบื้องต้น หรือต้นกำเนิดความบกพร่อง มีระดับความเสี่ยงเชิงปริมาณ เท่ากับ 1 สภาพบ่งชี้ว่าอาจเกิดความบกพร่องจะเท่ากับ 3 ( $1 \times 3 = 3$ ) และสภาพที่สำคัญก่อนการพิบัติ เท่ากับ 9 ( $3 \times 3 = 9$ ) เป็นต้น จากนั้นพิจารณาสภาพที่อยู่ในเส้นทางการพิบัติจาก Fault tree ของแต่ละลักษณะการพิบัติ เช่น การพิจารณาเส้นทางการพิบัติที่ 1.1.1 ของการกัดเซาะภายในจะเริ่มจากเส้นทางด้านซ้ายมือที่ปรากฏสภาพความเสี่ยงที่สามารถตรวจสอบได้ 3 สภาพจากสภาพเบื้องต้นคือ สัตว์ทำรัง (P8), หลุมยุบ (P1) และน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก (P2) ดังภาพที่ 87 เป็นต้น และเมื่อพิจารณาลักษณะการพิบัติทั้งหมดจะได้เส้นทางการพิบัติดัง ตารางที่ 35, 36 และตารางที่ 37 และภาพผนวก ข หลังจากนั้นทำการทดสอบการให้คะแนนสภาพก่อนเกิดการพิบัติตามเส้นทางการพิบัติ โดยการให้คะแนนสภาพก่อนเกิดการพิบัติมีค่าคะแนน ตั้งแต่คะแนน 1 (ความเสี่ยงต่ำที่สุด) ไปจนถึงคะแนน 4 (ความเสี่ยงสูงที่สุด) และให้คะแนน 4 กับสภาพบ่งชี้ว่าอาจเกิดความบกพร่อง และสภาพเบื้องต้น หรือต้นกำเนิดความบกพร่อง สำหรับการพิจารณาน้ำหนักความสำคัญโดยการนำจำนวนสภาพที่สามารถตรวจสอบได้ในแต่ละบริเวณและจำนวนสภาพที่ตรวจสอบตาม Fault tree มาหาผลคูณ (ตารางที่ 38, 39 และตารางที่ 40) แล้วนำไปหาผลรวมจำนวนสภาพ (ตารางที่ 41, 42 และตารางที่ 43) ไปแบ่งส่วนระดับความเสี่ยงเชิงปริมาณจะได้ระดับความเสี่ยงที่ทำการปรับแก้เพื่อนำไปหาน้ำหนักความสำคัญโดยการพิจารณาแต่ละสภาพความเสี่ยงนำระดับความเสี่ยงเชิงปริมาณที่ทำการปรับแก้คูณจำนวนสภาพที่ตรวจสอบตาม Fault tree นำไปหาน้ำหนักความสำคัญ และจะได้ค่าดัชนีความเสี่ยง (ภาคผนวก ค และ ง) และตัวอย่างแสดงค่าดัชนีความเสี่ยงดังตารางที่ 44 และภาพที่ 88

ตารางที่ 34 ระดับความเสี่ยงเชิงปริมาณเพื่อหาค่าน้ำหนักความสำคัญที่เหมาะสม

กรณีพิจารณา น้ำหนัก ความสำคัญลำดับที่	จำนวนเท่าจาก สภาพก่อนหน้า	ระดับความเสี่ยงเชิงคุณภาพ		
		สภาพที่สำคัญ- ก่อนพิบัติ	สภาพบ่งชี้ว่าอาจ- เกิดความบกพร่อง	สภาพเบื้องต้น หรือต้นกำเนิด ความบกพร่อง
ระดับความเสี่ยงเชิงปริมาณ				
1	2	4	2	1
2	3	9	3	1
3	4	16	4	1
4	5	25	5	1
5	6	36	6	1
6	7	49	7	1
7	8	64	8	1
8	9	81	9	1
9	10	100	10	1
10	25	625	25	1
11	50	2,500	50	1
12	100	10,000	100	1
13	1,000	1,000,000	1,000	1
14	10,000	100,000,000	10,000	1
15	100,000	10,000,000,000	100,000	1



- สัญลักษณ์**
- + - หรือ
  - - และ
  - - สาเหตุความเสียหาย
  - ▨ - สาเหตุความเสียหายที่สามารถตรวจสอบสภาพได้
  - - สาเหตุความเสียหายเริ่มต้น
  - ◐ - สาเหตุความเสียหายเริ่มต้นที่สามารถตรวจสอบสภาพได้
  - - เส้นทางความเสียหาย
  - (thick) - เส้นทางความเสียหายที่พิจารณาเป็นเส้นทางวิกฤติ

ภาพที่ 87 เส้นทางการพิบัติที่ 1.1.1 ของการกัดเซาะภายใน

การพิจารณาสภาพที่อยู่บนเส้นทางการปิดที่สามารถพิจารณาได้จาก Fault tree เพื่อให้สามารถพิจารณาได้อย่างสะดวก ให้ทำการพิจารณาจากเส้นทางการอยู่ด้านซ้ายของ Fault tree ก่อนไปจนถึงเส้นทางการอยู่ด้านขวา ยกตัวอย่างเช่น การกักเซาะภายใน ตารางที่ 35

ตารางที่ 35 เส้นทางการปิดของการกักเซาะภายในที่ตรวจพบจากสาเหตุใน Fault tree ที่นำไปสู่การปิดของการกักเซาะภายในมีทั้งหมด 10 เส้นทางการพิจารณาเส้นทางการอยู่ด้านซ้ายมือไปหาเส้นทางการอยู่ด้านขวามือ แยกออกเป็น 3 เส้นทางการใหญ่ ได้แก่ เส้นทางการที่น้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำที่ออกจากตัวเขื่อน มี 7 เส้นทางการ, น้ำโคลนไหลออกทางอาคารประกอบ หรือจุดควบคุมการระบาย มี 1 เส้นทางการ และเส้นทางการที่น้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำที่มาจากฐานราก มี 2 เส้นทางการ ซึ่งแต่ละเส้นทางการจะมีสภาพความเสี่ยงที่สามารถตรวจพบได้โดยแบ่งเป็น 3 ระดับ คือ สภาพที่สำคัญก่อนเกิดการกักเซาะภายใน (ได้แก่ น้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ (P2) และน้ำโคลนไหลออกทางอาคารประกอบ หรือจุดควบคุมการระบาย (P3)) สภาพที่บ่งชี้ว่าจะเกิดความบกพร่อง และสภาพเบื้องต้น หรือต้นกำเนิดความบกพร่อง จากการพิจารณาสภาพที่เกิดขึ้นใน Fault tree จะมีสาเหตุที่สามารถตรวจสอบจากหลายสภาพความเสี่ยง การพิจารณาจะแยกพิจารณาทีละสภาพและแบ่งน้ำหนักให้เป็นของแต่ละสภาพ เช่น การเกิดโพรงภายในตัวเขื่อน หรือหลุมยุบ จะมีสภาพความเสี่ยงที่ตรวจได้ 2 สภาพ คือ P1 และ P6 สำหรับการพิจารณาจะแยกพิจารณา P1 กับ P6 หรือบางกรณีจะมีสภาพความเสี่ยงปรากฏอยู่ในหลายสาเหตุ เช่น สภาพ P4 จะปรากฏอยู่ในรากต้นไม้อของการเกิดโพรงภายในตัวเขื่อน หรือหลุมยุบ และปรากฏในวัชพืชหรือต้นไม้ขึ้นที่ Toe drain ของ Filter ไม่เหมาะสม ในกรณีนี้จะทำการแยกพิจารณา P4 ออกเป็นสภาพความเสี่ยงในแต่ละสาเหตุ

สำหรับการพิจารณาเส้นทางการปิดของการเลื่อนไถล ในตารางที่ 36 และการไหลล้นข้ามสันเขื่อน ในตารางที่ 37 จะพิจารณาแบบเดียวกันกับการพิจารณาการกักเซาะภายในดังกล่าวข้างต้น

ตารางที่ 35 เส้นทางสภาพของการกัดเซาะภายในที่ตรวจพบจากสาเหตุใน Fault tree  
ที่นำไปสู่การพิบัติ

เส้นทางที่	สภาพที่สำคัญก่อนเกิด- การกัดเซาะภายใน	สภาพบ่งชี้ว่าจะอาจเกิดความ บกพร่อง	สภาพเบื้องต้น หรือต้น กำเนิดความบกพร่อง
1.1.1	น้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำ โคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อน ด้านท้ายน้ำ (P2)	หลุมยุบ (Sinkhole) (P1)	สัตว์ทำรัง (P8)
1.1.2	น้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำ โคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อน ด้านท้ายน้ำ (P2)	หลุมยุบ (Sinkhole) (P1)	ต้นไม้, วัชพืช (P4)
1.1.3	น้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำ โคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อน ด้านท้ายน้ำ (P2)	รู, โพรง, ท่อ หรือ ถ้ำ (P6)	สัตว์ทำรัง (P8)
1.1.4	น้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำ โคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อน ด้านท้ายน้ำ (P2)	รู, โพรง, ท่อ หรือ ถ้ำ (P6)	ต้นไม้, วัชพืช (P4)
1.2	น้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำ โคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อน ด้านท้ายน้ำ (P2)	รอยแตกตามขวาง (P5)	ไม่มี
1.3	น้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำ โคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อน ด้านท้ายน้ำ (P2)	ไม่มี	ต้นไม้, วัชพืช (P4)
1.4	น้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำ โคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อน ด้านท้ายน้ำ (P2)	ไม่มี	สิ่งปิดทับระบบระบายน้ำ (P9)
2	น้ำโคลนไหลออกทางอาคาร ประกอบ หรือจุดควบคุมการ ระบาย (P3)	การรั่วซึมของท่อส่งน้ำ (P7)	ไม่มี
3.1	น้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำ โคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อน ด้านท้ายน้ำ (P2)	หลุมยุบ (Sinkhole) (P1)	ไม่มี

ตารางที่ 35 (ต่อ)

เส้นทางที่	สภาพที่สำคัญก่อนเกิด- การกัดเซาะภายใน	สภาพบ่งชี้ว่าจะเกิดความ บกพร่อง	สภาพเบื้องต้น หรือต้น กำเนิดความบกพร่อง
3.2	น้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำ โคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อน ด้านท้ายน้ำ (P2)	รู, โพรง, ท่อ หรือ ถ้ำ (P6)	ไม่มี

ตารางที่ 36 เส้นทางสภาพของการเลื่อนไถลที่ตรวจพบจากสาเหตุใน Fault tree  
ที่นำไปสู่การพิบัติ

เส้นทางที่	สภาพที่สำคัญก่อนเกิดการ เลื่อนไถล	สภาพบ่งชี้ว่าจะเกิดความ บกพร่อง	สภาพเบื้องต้น หรือต้นกำเนิด ความบกพร่อง
1.1	การยุบตัวในแนวตั้งของทาง ระบายน้ำล้น (S3)	พื้นที่อุดขึ้นบริเวณพื้นที่ท้าย น้ำ (S5)	การปิดกั้นการระบายน้ำของ ระบบระบายน้ำ (S2)
1.2	การยุบตัวในแนวตั้งของทาง ระบายน้ำล้น (S3)	พื้นที่อุดขึ้นบริเวณพื้นที่ท้าย น้ำ (S5)	ประสิทธิภาพของระบบระบาย น้ำท้ายเขื่อน (Toe Drain) (S8)
1.3	การยุบตัวในแนวตั้งของทาง ระบายน้ำล้น (S3)	พื้นที่อุดขึ้นบริเวณพื้นที่ท้าย น้ำ (S5)	รอยแตกตามยาว (S1)
1.4	การยุบตัวในแนวตั้งของทาง ระบายน้ำล้น (S3)	พื้นที่อุดขึ้นบริเวณพื้นที่ท้าย น้ำ (S5)	รู, โพรง, ท่อ หรือ ถ้ำ (S9)
1.5	การยุบตัวในแนวตั้งของทาง ระบายน้ำล้น (S3)	ไม่มี	การกัดเซาะโดยคลื่น (S10)
1.6	การยุบตัวในแนวตั้งของทาง ระบายน้ำล้น (S3)	ไม่มี	การเสื่อมสภาพของหิน (S12)
1.7	การยุบตัวในแนวตั้งของทาง ระบายน้ำล้น (S3)	การยุบตัว Consolidation (S11)	ไม่มี
1.8	การยุบตัวในแนวตั้งของทาง ระบายน้ำล้น (S3)	ไม่มี	การเสื่อมสภาพของหิน (S12)
1.9	การยุบตัวในแนวตั้งของทาง ระบายน้ำล้น (S3)	ไม่มี	ประสิทธิภาพของระบบระบาย น้ำลาดเขื่อน (Slope Drain) (S7)

ตารางที่ 36 (ต่อ)

เส้นทางที่	สภาพที่สำคัญก่อนเกิดการเลื่อนไถล	สภาพบ่งชี้ว่าอาจเกิดความบกพร่อง	สภาพเบื้องต้น หรือต้นกำเนิดความบกพร่อง
2.1	การเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำที่ขี้เหนียว (Drain Ditch) (S4)	พื้นที่อุ้มน้ำบริเวณพื้นที่ท้ายน้ำ (S5)	การปิดกั้นการระบายน้ำของระบบระบายน้ำ (S2)
2.2	การเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำที่ขี้เหนียว (Drain Ditch) (S4)	พื้นที่อุ้มน้ำบริเวณพื้นที่ท้ายน้ำ (S5)	ประสิทธิภาพของระบบระบายน้ำที่ขี้เหนียว (Toe Drain) (S8)
2.3	การเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำที่ขี้เหนียว (Drain Ditch) (S4)	พื้นที่อุ้มน้ำบริเวณพื้นที่ท้ายน้ำ (S5)	รอยแตกตามยาว (S1)
2.4	การเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำที่ขี้เหนียว (Drain Ditch) (S4)	พื้นที่อุ้มน้ำบริเวณพื้นที่ท้ายน้ำ (S5)	รู, โพรง, ท่อ หรือถ้ำ (S9)
2.5	การเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำที่ขี้เหนียว (Drain Ditch) (S4)	ไม่มี	การกัดเซาะโดยคลื่น (S10)
2.6	การเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำที่ขี้เหนียว (Drain Ditch) (S4)	ไม่มี	การเสื่อมสภาพของหิน (S12)
2.7	การเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำที่ขี้เหนียว (Drain Ditch) (S4)	การยุบตัว Consolidation (S11)	ไม่มี
2.8	การเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำที่ขี้เหนียว (Drain Ditch) (S4)	ไม่มี	การเสื่อมสภาพของหิน (S12)
2.9	การเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำที่ขี้เหนียว (Drain Ditch) (S4)	ไม่มี	ประสิทธิภาพของระบบระบายน้ำลาดเอียง (Slope Drain) (S7)
3.1	การเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุ้มน้ำ (S6)	พื้นที่อุ้มน้ำบริเวณพื้นที่ท้ายน้ำ (S5)	การปิดกั้นการระบายน้ำของระบบระบายน้ำ (S2)

ตารางที่ 36 (ต่อ)

เส้นทางที่	สภาพที่สำคัญก่อนเกิดการ เลื่อนไถล	สภาพบ่งชี้ว่าอาจเกิดความ บกพร่อง	สภาพเบื้องต้น หรือต้นกำเนิด ความบกพร่อง
3.2	การเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว (S6)	พื้นที่อุดขึ้นบริเวณพื้นที่ท้าย น้ำ (S5)	ประสิทธิภาพของระบบระบาย น้ำท้ายเขื่อน (Toe Drain) (S8)
3.3	การเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว (S6)	พื้นที่อุดขึ้นบริเวณพื้นที่ท้าย น้ำ (S5)	รอยแตกตามยาว (S1)
3.4	การเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว (S6)	พื้นที่อุดขึ้นบริเวณพื้นที่ท้าย น้ำ (S5)	รู, โปรง, ท่อ หรือถ้ำ (S9)
3.5	การเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว (S6)	ไม่มี	การกัดเซาะโดยคลื่น (S10)
3.6	การเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว (S6)	ไม่มี	การเสื่อมสภาพของหิน (S12)
3.7	การเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว (S6)	การยุบตัวของ Consolidation (S11)	ไม่มี
3.8	การเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว (S6)	ไม่มี	การเสื่อมสภาพของหิน (S12)
3.9	การเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว (S6)	ไม่มี	ประสิทธิภาพของระบบระบาย น้ำลาดเขื่อน (Slope Drain) (S7)

ตารางที่ 37 เส้นทางสภาพของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนที่ตรวจพบจากสาเหตุใน Fault tree  
ที่นำไปสู่การพิบัติ

เส้นทางที่	สภาพที่สำคัญก่อนเกิดการ เลื่อนไถล	สภาพบ่งชี้ว่าอาจเกิดความ บกพร่อง	สภาพเบื้องต้น หรือต้นกำเนิด ความบกพร่อง
1	ระดับสันเขื่อนต่ำกว่าระดับ น้ำหน้าเขื่อน หรือระดับน้ำ สูงสุด (O8)	การยุบตัวของสันเขื่อน (O2)	การยุบตัวของ Consolidation (O16)
2.1	ปริมาณน้ำมากเกินสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด (O9)	บานติดขัด (O10)	สภาพของบานระบาย (O3)

## ตารางที่ 37 (ต่อ)

เส้นทางที่	สภาพที่สำคัญก่อนเกิดการ เลื่อนไถล	สภาพบ่งชี้ว่าจะเกิดความ บกพร่อง	สภาพเบื้องต้น หรือต้นกำเนิด ความบกพร่อง
2.2	ปริมาณน้ำมากเกินไปจน หรือระดับน้ำสูงสุด (O9)	บานติดขัด (O10)	ประสิทธิภาพของระบบ- ส่งกำลังไฟฟ้าสำรอง (O4)
2.3	ปริมาณน้ำมากเกินไปจน หรือระดับน้ำสูงสุด (O9)	บานติดขัด (O10)	สภาพผนังคอนกรีตของ- ทางระบายน้ำล้น (Wing Wall) (O5)
2.4	ปริมาณน้ำมากเกินไปจน หรือระดับน้ำสูงสุด (O9)	บานติดขัด (O10)	ผนังคอนกรีตทางระบายน้ำล้น ทรุดตัวหรือแตกร้าว (O12), คอนกรีตเสื่อมสภาพ (O14)
2.5	ปริมาณน้ำมากเกินไปจน หรือระดับน้ำสูงสุด (O9)	ระบบควบคุมบานเสียหาย (O1)	ไม่มี
2.6	ปริมาณน้ำมากเกินไปจน หรือระดับน้ำสูงสุด (O9)	อาคารถูกปิดกั้น (O11)	ท่อนซุง, กิ่งไม้, เศษขยะ (O13), ท่อน้ำสวะ (O15)
2.7	ปริมาณน้ำมากเกินไปจน หรือระดับน้ำสูงสุด (O9)	อาคารถูกปิดกั้น (O11)	ท่อนซุง, กิ่งไม้, เศษขยะ (O13), สภาพตะแกรง (O17)
2.8	ปริมาณน้ำมากเกินไปจน หรือระดับน้ำสูงสุด (O9)	อาคารถูกปิดกั้น (O11)	ความไม่มั่นคงของลาดทางเข้า ทางระบายน้ำล้น (O6)
2.9	ปริมาณน้ำมากเกินไปจน หรือระดับน้ำสูงสุด (O9)	ประสิทธิภาพของการเปิด วาล์วของท่อส่งน้ำ (O7)	ไม่มี

ตารางที่ 38 จำนวนสภาพความเสี่ยงที่สามารถตรวจได้จากบริเวณตัวเขื่อนและ Fault tree ของการกัดเซาะภายใน สำหรับจำนวนสภาพความเสี่ยงที่สามารถตรวจได้จากบริเวณตัวเขื่อน หรืออาคารประกอบ ยกตัวอย่างสภาพหลุมยุบจะเกิด 3 บริเวณได้แก่ สันเขื่อนและไหล่ทาง, ลาดเขื่อน ด้านเหนือน้ำ และลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ ดังนั้นจำนวนสภาพหลุมยุบที่สามารถตรวจได้จากบริเวณตัวเขื่อนจะเท่ากับ 3 (ลำดับที่ 1) ส่วนจำนวนที่ตรวจได้จาก Fault tree ของหลุมยุบจะปรากฏที่การเกิดโพรงภายในตัวเขื่อนหรือหลุมยุบ และเกิดรูโพรงภายในฐานราก ดังนั้นจำนวนที่ตรวจได้จาก Fault tree ของหลุมยุบจะเท่ากับ 2 หลังจากนั้นจะนำมาคูณกันเนื่องจากหลุมยุบตรวจได้ทั้ง 3

บริเวณ และอาจเกิดจากสาเหตุที่ตัวเขื่อนและฐานราก สำหรับการพิจารณาสภาพอื่นๆ จะพิจารณา เช่นเดียวกัน ดังตารางที่ 39 และตารางที่ 40

ตารางที่ 41 ผลรวมจำนวนสภาพที่ตรวจสอบได้ตามระดับสภาพความเสี่ยงต่อการกัดเซาะ ภายใน การพิจารณาสภาพที่สำคัญก่อนเกิดการกัดเซาะภายใน มี 2 สภาพ คือ น้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ (P2) และน้ำโคลนไหลออกทางอาคารประกอบ หรือจุดควบคุมการระบาย (P3) ผลรวมจำนวนสภาพจากการรวมกันของผลคูณจำนวนในตารางที่ 38 ของ P2 และ P3 การพิจารณาผลรวมสภาพความเสี่ยงอื่นๆ จะพิจารณาเช่นเดียวกัน ในตารางที่ 42 และ ตารางที่ 43

การพิจารณาคัดเลือกน้ำหนักความสำคัญของสภาพ จากตารางที่ 44 ตัวอย่างค่าดัชนี ความเสี่ยงที่ได้จากการทดสอบแต่ละกรณี และภาพที่ 88 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างกรณี ที่พิจารณากับค่าดัชนีความเสี่ยงจะเห็นว่ากรณีที่จำนวนเท่าน้อยๆ จะให้การกระจายน้ำหนัก ความสำคัญจากสภาพที่สำคัญก่อนเกิดการพิบัติ ไปหาสภาพบ่งชี้ว่าอาจเกิดความบกพร่อง และ สภาพเบื้องต้นได้ดี แต่ไม่แสดงความเสี่ยงที่ชัดเจน สำหรับกรณีที่จำนวนเท่ามากๆ การกระจาย น้ำหนักไปสู่สภาพต่างๆ ไม่ดี แต่การแสดงถึงความเสี่ยงชัดเจน จะเห็นได้ว่าแต่ละกรณีจึงมีข้อดีและ ข้อเสียที่แตกต่างกัน แต่วัตถุประสงค์ที่พิจารณาคัดเลือกค่าดัชนีความเสี่ยง คือ ต้องการแสดงถึง ความเสี่ยงที่ชัดเจนและน้ำหนักความสำคัญควรกระจายไปสู่สภาพต่างๆ อย่างเหมาะสม ดังนั้น จึงพิจารณาคัดเลือกกรณีที่ 9 (จำนวน 10 เท่า) เพื่อแสดงค่าดัชนีความเสี่ยงที่ชัดเจนและการกระจาย น้ำหนักความสำคัญไปสู่สภาพต่างๆ ได้ และสามารถจดจำได้ง่าย

ตารางที่ 38 จำนวนสภาพความเสี่ยงที่สามารถตรวจได้จากบริเวณตัวเขื่อนและ Fault tree ของการกัดเซาะภายใน

ลำดับที่	รหัสสภาพความเสี่ยง	คำอธิบาย	จำนวนสภาพที่สามารถตรวจสอบได้ในแต่ละบริเวณ	จำนวนสภาพที่ตรวจสอบตาม Fault tree	ผลคูณจำนวน
1	P1	หลุมยุบ (Sinkhole)	3.00	2.00	6.00
2	P2	น้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	1.00	2.00	2.00
3	P3	น้ำโคลนไหลออกทางอาคารประกอบ หรือจุดควบคุมการระบาย	1.00	1.00	1.00
4	P4	คันไม้, วัชพืช	3.00	2.00	6.00
5	P5	รอยแตกตามขวาง	2.00	1.00	2.00
6	P6	รู, โพรง, ท่อ หรือ ถ้ำ	3.00	2.00	6.00
7	P7	การรั่วซึมของท่อส่งน้ำ	1.00	1.00	1.00
8	P8	สัคว์ทำรัง	3.00	1.00	3.00
9	P9	สิ่งปิดทับระบบระบายน้ำ	1.00	1.00	1.00
		<b>รวม</b>	<b>18.00</b>	<b>13.00</b>	<b>28.00</b>

ตารางที่ 39 จำนวนสภาพความเสี่ยงที่สามารถตรวจได้จากบริเวณตัวเขื่อนและ Fault tree ของการเลื่อนไถล

ลำดับที่	รหัสสภาพความเสี่ยง	คำอธิบาย	จำนวนสภาพที่สามารถตรวจสอบได้ในแต่ละบริเวณ	จำนวนสภาพที่ตรวจสอบตาม Fault tree	ผลคูณจำนวน
1	S1	รอยแตกตามยาว	3.00	1.00	3.00
2	S2	การปิดกั้นการระบายน้ำของระบบระบายน้ำ	1.00	1.00	1.00
3	S3	การขุดตัวในแนวค้ำของทางระบายน้ำล้น	1.00	1.00	1.00
4	S4	การเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน (Drain Ditch)	1.00	1.00	1.00
5	S5	พื้นที่อุ้มน้ำบริเวณพื้นที่ท้ายน้ำ	1.00	1.00	1.00
6	S6	การเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ขุดตัว, อุ้มน้ำ	2.00	1.00	2.00
7	S7	ประสิทธิภาพของระบบระบายน้ำลาดเขื่อน (Slope Drain)	1.00	1.00	1.00
8	S8	ประสิทธิภาพของระบบระบายน้ำท้ายเขื่อน (Toe Drain)	1.00	1.00	1.00
9	S9	รู, โพรง, ท่อ หรือถ้ำ	3.00	1.00	3.00
10	S10	การกัดเซาะโดยคลื่น	1.00	1.00	1.00
11	S11	การขุดตัว Consolidation	2.00	1.00	2.00
12	S12	การเสื่อมสภาพของหิน	2.00	2.00	4.00
		รวม	19.00	13.00	21.00

ตารางที่ 40 จำนวนสภาพความเสี่ยงที่สามารถตรวจได้จากบริเวณตัวเขื่อนและ Fault tree ของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน

ลำดับที่	รหัสสภาพความเสี่ยง	คำอธิบาย	จำนวนสภาพที่สามารถตรวจสอบได้ในแต่ละบริเวณ	จำนวนสภาพที่ตรวจสอบตาม Fault tree	ผลคูณจำนวน
1	O1	ระบบควบคุมบานเสียหาย	2.00	1.00	2.00
2	O2	การยุบตัวของสันเขื่อน	1.00	1.00	1.00
3	O3	สภาพของบานระบาย	1.00	1.00	1.00
4	O4	ประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังไฟฟ้าสำรอง	2.00	1.00	2.00
5	O5	สภาพผนังคอนกรีตของทางระบายน้ำสัน (Wing Wall)	1.00	1.00	1.00
6	O6	ความไม่มั่นคงของลาดทางเข้าทางระบายน้ำสัน	1.00	1.00	1.00
7	O7	ประสิทธิภาพของการเปิดวาล์วของท่อส่งน้ำ	1.00	1.00	1.00
8	O8	ระดับสันเขื่อนต่ำกว่าระดับน้ำหน้าเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด	1.00	1.00	1.00
9	O9	ปริมาณน้ำมากเกินสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด	1.00	1.00	1.00
10	O10	บานติดขัด	2.00	1.00	2.00
11	O11	อาคารถูกปิดกั้น	2.00	1.00	2.00
12	O12	ผนังคอนกรีตทางระบายน้ำสันทรุดตัว หรือแตกร้าว	1.00	1.00	1.00
13	O13	ท่อนซุง, กิ่งไม้, เศษขยะ	2.00	1.00	2.00
14	O14	คอนกรีตเสื่อมสภาพ	2.00	1.00	2.00
15	O15	ทูนกันสวะ	2.00	1.00	2.00
16	O16	การยุบตัว Consolidation	2.00	1.00	2.00
17	O17	สภาพตะแกรง	2.00	1.00	2.00
		รวม	26.00	17.00	26.00

ตารางที่ 41 ผลรวมจำนวนสภาพที่ตรวจสอบได้ตามระดับสภาพความเสี่ยงต่อการกัดเซาะภายใน

ลำดับที่	คำอธิบาย	รหัสสภาพความเสี่ยง	ผลรวมจำนวนสภาพ
1	สภาพที่สำคัญก่อนการกัดเซาะภายใน	P2, P3	3
2	สภาพบ่งชี้ว่าอาจเกิดความบกพร่อง	P1, P5, P6, P7	15
3	สภาพเบื้องต้น หรือต้นกำเนิดความบกพร่อง	P4, P8, P9	10
รวม			28.00

ตารางที่ 42 ผลรวมจำนวนสภาพที่ตรวจสอบได้ตามระดับสภาพความเสี่ยงต่อการเลื่อนไถล

ลำดับที่	คำอธิบาย	รหัสสภาพความเสี่ยง	ผลรวมจำนวนสภาพ
1	สภาพที่สำคัญก่อนการเลื่อนไถล	S3, S4, S6	4
2	สภาพบ่งชี้ว่าอาจเกิดความบกพร่อง	S5	1
3	สภาพเบื้องต้น หรือต้นกำเนิดความบกพร่อง	S1, S2, S7, S8, S9, S10, S11, S12	16
รวม			21.00

ตารางที่ 43 ผลรวมจำนวนสภาพที่ตรวจสอบได้ตามระดับสภาพความเสี่ยงต่อการไหลล้นข้ามสันเขื่อน

ลำดับที่	คำอธิบาย	รหัสสภาพความเสี่ยง	ผลรวมจำนวนสภาพ
1	สภาพที่สำคัญก่อนการไหลล้นข้ามสันเขื่อน	O8, O9	2
2	สภาพบ่งชี้ว่าอาจเกิดความบกพร่อง	O2, O10, O1, O11, O7	8

ตารางที่ 43 (ต่อ)

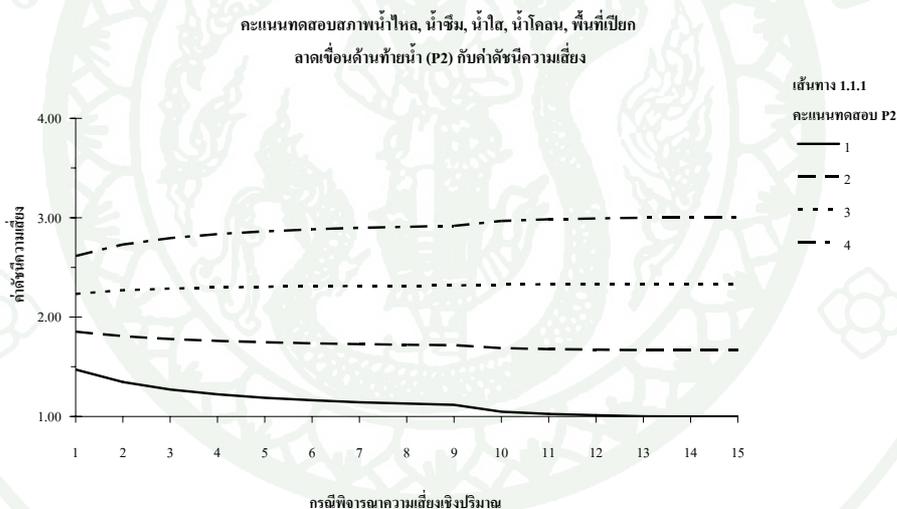
ลำดับที่	คำอธิบาย	รหัสสภาพความเสี่ยง	ผลรวมจำนวนสภาพ
3	สภาพเบื้องต้น หรือต้น กำเนิดความบกพร่อง	O16, O3, O4, O5, O12, O13, O6, O14, O15, O17	16
<b>รวม</b>			<b>26.00</b>

ตารางที่ 44 ตัวอย่างค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้จากการทดสอบแต่ละกรณีของการกัดเซาะภายใน-  
เส้นทางการพิบัติที่ 1.1.1

กรณีพิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการกัดเซาะภายใน เส้นทางการพิบัติ 1.1.1			
	ระดับคะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำไส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียกกลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ (P2)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.471	1.852	2.233	2.614
2	1.346	1.808	2.269	2.731
3	1.271	1.779	2.287	2.795
4	1.223	1.760	2.298	2.835
5	1.188	1.747	2.305	2.863
6	1.163	1.736	2.309	2.882
7	1.144	1.728	2.313	2.897
8	1.129	1.722	2.315	2.909
9	1.116	1.717	2.317	2.918
10	1.047	1.688	2.328	2.968
11	1.024	1.677	2.331	2.984
12	1.012	1.672	2.332	2.992

## ตารางที่ 44 (ต่อ)

กรณีพิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการกัดเซาะภายใน			
	เส้นทางการพิบัติ 1.1.1			
	ระดับคะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียกกลาดเชื่อมด้านท้ายน้ำ (P2)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
13	1.001	1.667	2.333	2.999
14	1.000	1.667	2.333	3.000
15	1.000	1.667	2.333	3.000



ภาพที่ 88 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างกรณีที่พิจารณากับค่าดัชนีความเสี่ยง

### 9.1.4 การนำระดับความเสี่ยงไปหาค่าน้ำหนักความสำคัญของสภาพ

การนำระดับความเสี่ยงไปใช้น้ำหนักความสำคัญจะต้องมีการปรับแก้ระดับความเสี่ยงเพื่อให้เหมาะสมกับความเสี่ยงที่แท้จริงโดยการนำจำนวนของสภาพความเสี่ยงไปแบ่งส่วนระดับความเสี่ยง ในตารางที่ 45, 46 และ 47

ตารางที่ 45 ระดับความเสี่ยงที่ทำการปรับแก้ของการกัดเซาะภายใน พิจารณาจากการนำจำนวนไปแบ่งส่วนจากระดับความเสี่ยงที่ยังไม่ได้ทำการปรับแก้ ยกตัวอย่างเช่น สภาพที่สำคัญก่อนเกิดการกัดเซาะภายในมี 2 สภาพได้แก่ P2(1,2) และ P3(1,1) แต่สภาพ P2 สามารถเกิดได้ 2 จากสาเหตุ คือ เกิดที่บริเวณตัวเขื่อน และบริเวณฐานราก ดังนั้นจำนวนทั้งหมดจะเท่ากับ 3 เมื่อนำ 3 แบ่งส่วนจากระดับความเสี่ยงที่ยังไม่ได้ปรับแก้ คือ 100 จะได้ระดับความเสี่ยงที่ทำการปรับแก้เท่ากับ 33.33 สำหรับสภาพความเสี่ยงอื่นๆ จะพิจารณาเช่นเดียวกัน ส่วนระดับความเสี่ยงที่ทำการปรับแก้ของการเลื่อนไถล และการไหลล้นข้ามสันเขื่อน แสดงในตารางที่ 46 และตารางที่ 47 ตามลำดับ

ตารางที่ 45 ระดับความเสี่ยงที่ทำการปรับแก้ของการกัดเซาะภายใน

ลำดับที่	คำอธิบาย	รหัสสภาพความเสี่ยง	ระดับความเสี่ยง	จำนวน	ระดับความเสี่ยงที่ทำการปรับแก้
1	สภาพที่สำคัญก่อน Piping	P2(1,2), P3(1,1)	100	3	33.33
2	สภาพบ่งชี้ว่าอาจเกิดความบกพร่อง	P1(3,2), P5(2,1), P6(3,2), P7(1,1)	10	15	0.67
3	สภาพเบื้องต้น หรือต้นกำเนิดความบกพร่อง	P4(3,2), P8(3,1), P9(1,1)	1	10	0.10

หมายเหตุ (x,y) – x หมายถึง จำนวนสภาพที่สามารถตรวจสอบได้ในแต่ละบริเวณ,

y หมายถึง จำนวนสภาพที่ตรวจสอบตาม Fault tree

ตารางที่ 46 ระดับความเสี่ยงที่ทำการปรับแก้ของการเลื่อนไถล

ลำดับที่	คำอธิบาย	รหัสสภาพความเสี่ยง	ระดับความเสี่ยง	จำนวน	ระดับความเสี่ยงที่ทำการปรับแก้
1	สภาพที่สำคัญก่อน Sliding	S3(1,1), S4(1,1), S6(2,1)	100	4	25.00
2	สภาพบ่งชี้ว่าอาจเกิด ความบกพร่อง	S5(1,1)	10	1	10.00
3	สภาพเบื้องต้น หรือ ต้นกำเนิดความ บกพร่อง	S1(3,1), S2(1,1), S7(1,1), S8(1,1), S9(3,1), S10(1,1), S11(2,1), S12(2,2)	1	16	0.06

หมายเหตุ (x,y) – x หมายถึง จำนวนสภาพที่สามารถตรวจสอบได้ในแต่ละบริเวณ,  
y หมายถึง จำนวนสภาพที่ตรวจสอบตาม Fault tree

ตารางที่ 47 ระดับความเสี่ยงที่ทำการปรับแก้ของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน

ลำดับที่	คำอธิบาย	รหัสสภาพความเสี่ยง	ระดับความเสี่ยง	จำนวน	ระดับความเสี่ยงที่ทำการปรับแก้
1	สภาพที่สำคัญก่อน Overtopping	O8(1,1), O9(1,1)	100	2	50.00
2	สภาพบ่งชี้ว่าอาจเกิด ความบกพร่อง	O2(1,1), O10(2,1), O1(2,1), O11(2,1), O7(1,1)	10	8	1.25
3	สภาพเบื้องต้น หรือต้น กำเนิดความบกพร่อง	O16(2,1), O3(1,1), O4(2,1), O5(1,1), O12(1,1), O13(2,1), O6(1,1), O14(2,1), O15(2,1), O17(2,1)	1	16	0.06

หมายเหตุ (x,y) – x หมายถึง จำนวนสภาพที่สามารถตรวจสอบได้ในแต่ละบริเวณ,  
y หมายถึง จำนวนสภาพที่ตรวจสอบตาม Fault tree

ตารางที่ 48 นำหนักความสำคัญของการกักเซาะภายใน การพิจารณาระดับความเสี่ยงได้จากการนำระดับความเสี่ยงที่ทำการปรับแก้คูณกับสภาพที่ตรวจสอบตาม Fault tree ยกตัวอย่างเช่น หลุมยุบ จะมีระดับความเสี่ยงที่ทำการปรับแก้เท่ากับ 0.67 (ตารางที่ 45) และมีจำนวนสภาพที่ตรวจสอบตาม Fault tree เท่ากับ 2 (ตารางที่ 38) เมื่อนำมาคูณกันจะได้ระดับความเสี่ยง เท่ากับ 1.33 เป็นต้น สำหรับสภาพความเสี่ยงอื่นๆ จะพิจารณาเช่นเดียวกัน สำหรับน้ำหนักความสำคัญของสภาพความเสี่ยงพิจารณาจากการปรับระดับความเสี่ยงของแต่ละสภาพความเสี่ยงโดยให้ผลรวมของน้ำหนักความสำคัญเท่ากับ 1 สำหรับน้ำหนักความสำคัญของการเลื่อนไถลและการไหลล้นข้ามสันเขื่อนจะพิจารณาเช่นเดียวกับการกักเซาะภายในแสดงในตารางที่ 49 และตารางที่ 50 ตามลำดับ

ตารางที่ 48 นำหนักความสำคัญของการกักเซาะภายใน

ลำดับที่	องค์ประกอบ เขื่อน	สภาพความเสี่ยงที่ทำการ ตรวจสอบ	รหัสสภาพ	ระดับความ เสี่ยง	น้ำหนัก ความสำคัญ
1	สันเขื่อนและ ไหลท่าง	หลุมยุบ (Sinkhole)	P1	1.33	0.012
2		ต้นไม้, วัชพืช	P4	0.20	0.002
3		รอยแตกตามขวาง	P5	0.67	0.006
4		รู, โพรง, ท่อ หรือถ้ำ	P6	1.33	0.012
5		สัตว์ทำรัง	P8	0.10	0.001
6	ลาดเขื่อนด้าน เหนือน้ำ	หลุมยุบ (Sinkhole)	P1	1.33	0.012
7		รู, โพรง, ท่อ หรือถ้ำ	P6	1.33	0.012
8		ต้นไม้ หรือวัชพืช	P4	0.20	0.002
9		สัตว์ทำรัง	P8	0.10	0.001
10	ลาดเขื่อนด้าน ท้ายน้ำ	น้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำ โคลน, พื้นที่เปียก	P2	66.67	0.601
11		หลุมยุบ (Sinkhole)	P1	1.33	0.012
12		รู, โพรง, ท่อ หรือถ้ำ	P6	1.33	0.012
13		รอยแตกตามขวาง	P5	0.67	0.006
14		ต้นไม้, วัชพืช	P4	0.20	0.002
15		สัตว์ทำรัง	P8	0.10	0.001
16	ระบบระบายน้ำ	สิ่งปิดทับ	P9	0.10	0.001

ตารางที่ 48 (ต่อ)

ลำดับที่	องค์ประกอบ เขื่อน	สภาพความเสี่ยงที่ทำการ ตรวจสอบ	รหัสสภาพ	ระดับความ เสี่ยง	น้ำหนัก ความสำคัญ
17	อาคารส่งน้ำ	น้ำโคลนไหลออกจากจุด ควบคุมการระบายน้ำท้าย เขื่อน	P3	33.33	0.300
18		การรั่วซึมของท่อส่งน้ำ	P7	0.67	0.006
		<b>รวม</b>		<b>111.00</b>	<b>1.000</b>

ตารางที่ 49 น้ำหนักความสำคัญของการเลื่อนไถล

ลำดับที่	องค์ประกอบ เขื่อน	สภาพความเสี่ยงที่ทำการ ตรวจสอบ	รหัสสภาพ	ระดับความ เสี่ยง	น้ำหนัก ความสำคัญ
1	สันเขื่อนและ ไหล่ทาง	รอยแตกตามยาว	S1	0.06	0.001
2		รู, โพรง, ท่อ หรือถ้ำ	S9	0.06	0.001
3	ลาดเขื่อนด้าน เหนือน้ำ	การเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว หรืออูดตัว	S6	25.00	0.225
4		รอยแตกตามยาว	S1	0.06	0.001
5		รู, โพรง, ท่อ หรือถ้ำ	S9	0.06	0.001
6		การกัดเซาะโดยคลื่น	S10	0.06	0.001
7		การยุบตัว	S11	0.06	0.001
8		การเสื่อมสภาพของหิน	S12	0.13	0.001
9	ลาดเขื่อนด้าน ท้ายน้ำ	การเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อูดตัว	S6	25.00	0.225
10		รอยแตกตามยาว	S1	0.06	0.001
11		ประสิทธิภาพของระบบ ระบายน้ำลาดเขื่อน (Slope Drain)	S7	0.06	0.001

ตารางที่ 49 (ต่อ)

ลำดับที่	องค์ประกอบ เขื่อน	สภาพความเสี่ยงที่ทำการ ตรวจสอบ	รหัสสภาพ ความเสี่ยง	ระดับความ เสี่ยง	น้ำหนัก ความสำคัญ
12		ประสิทธิภาพของระบบ ระบายน้ำท้ายเขื่อน (Toe Drain)	S8	0.06	0.001
13		การเคลื่อนตัวของรางระบาย น้ำท้ายเขื่อน (Drain Ditch)	S4	25.00	0.225
14		รู, โพรง, ท่อ หรือถ้ำ	S9	0.06	0.001
15		การยุบตัว	S11	0.06	0.001
16		การเสื่อมสภาพของหิน	S12	0.13	0.001
17	พื้นที่ด้านท้าย น้ำ	พื้นที่อุ้มน้ำบริเวณท้ายน้ำ	S5	10.00	0.090
18	ระบบระบายน้ำ	การปิดกั้นการระบายน้ำ	S2	0.06	0.001
19	ทางระบายน้ำ สั้น	การยุบตัวในแนวตั้ง	S3	25.00	0.225
		<b>รวม</b>		<b>111.00</b>	<b>1.000</b>

ตารางที่ 50 น้ำหนักความสำคัญของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน

ลำดับที่	องค์ประกอบ เขื่อน	สภาพความเสี่ยงที่ทำการ ตรวจสอบ	รหัสสภาพ ความเสี่ยง	ระดับความ เสี่ยง	น้ำหนัก ความสำคัญ
1	สันเขื่อนและ ไหล่ทาง	การยุบตัวของสันเขื่อน	O2	1.25	0.011
2		ระดับสันเขื่อนต่ำกว่าระดับ น้ำหน้าเขื่อน หรือระดับน้ำ สูงสุด	O8	50.00	0.450
3		ปริมาณน้ำมากเกินสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด	O9	50.00	0.450
4	ลาดเขื่อนด้าน เหนือน้ำ	การยุบตัว Consolidation	O16	0.06	0.001

ตารางที่ 50 (ต่อ)

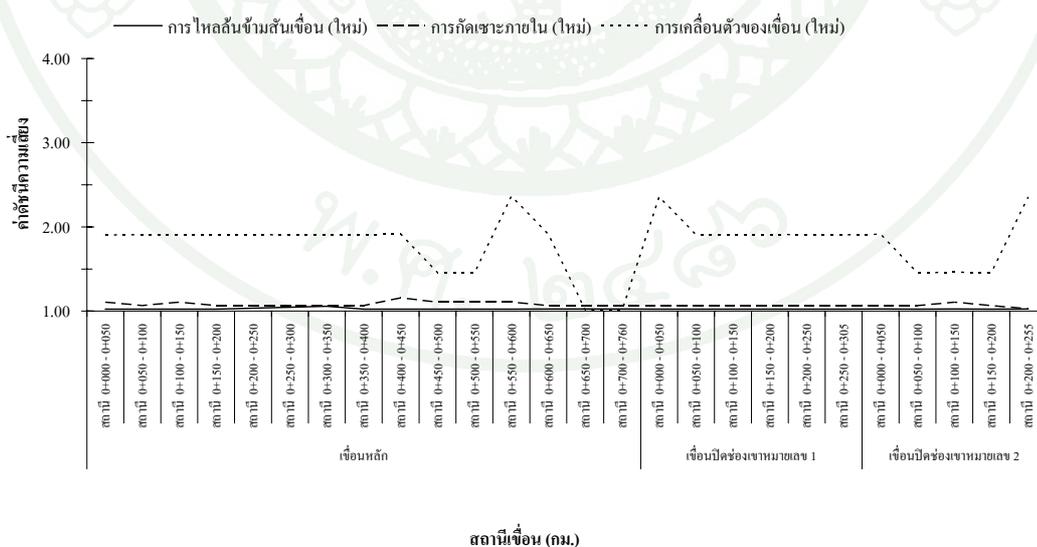
ลำดับที่	องค์ประกอบ เชื่อม	สภาพความเสี่ยงที่ทำการ ตรวจสอบ	รหัสสภาพ ความเสี่ยง	ระดับความ เสี่ยง	น้ำหนัก ความสำคัญ
5	ลาดเชื่อมด้าน เหนือ	การยุบตัว Consolidation	O16	0.06	0.001
6	ทางระบายน้ำ ดิน	สภาพของบานระบาย	O3	0.06	0.001
7		ประสิทธิภาพของระบบ ควบคุมบาน	O1	1.25	0.011
8		ประสิทธิภาพของระบบส่ง กำลังไฟฟ้าสำรอง	O4	0.06	0.001
9		สภาพผนังคอนกรีตของทาง ระบายน้ำล้น (Wing Wall)	O5	0.06	0.001
10		ความไม่มั่นคงของลาด ทางเข้าอาคารระบายน้ำล้น	O6	0.06	0.001
11		บานติดขัด	O10	1.25	0.011
12		อาคารถูกปิดกั้น	O11	1.25	0.011
13		ผนังคอนกรีตทางระบายน้ำ ล้นทรุดตัว หรือแตกร้าว	O12	0.06	0.001
14		ท่อนซุง, กิ่งไม้, เศษขยะ	O13	0.06	0.001
15		คอนกรีตเสื่อมสภาพ	O14	0.06	0.001
16		ทูนกันสวะ	O15	0.06	0.001
17		สภาพตะแกรง	O17	0.06	0.001
18	อาคารส่งน้ำ	ประสิทธิภาพของการเปิด วาล์วของท่อส่งน้ำ	O7	1.25	0.011
19		ประสิทธิภาพของระบบ ควบคุมบาน	O1	1.25	0.011
20		บานติดขัด	O10	1.25	0.011
21		อาคารถูกปิดกั้น	O11	1.25	0.011
22		ประสิทธิภาพของระบบส่ง กำลังไฟฟ้าสำรอง	O4	0.06	0.001

### ตารางที่ 50 (ต่อ)

ลำดับที่	องค์ประกอบ เชื่อม	สภาพความเสี่ยงที่ทำการ ตรวจสอบ	รหัสสภาพ ความเสี่ยง	ระดับความ เสี่ยง	น้ำหนัก ความสำคัญ
23		ท่อนซุง, กิ่งไม้, เศษขยะ	O13	0.06	0.001
24		คอนกรีตเสื่อมสภาพ	O14	0.06	0.001
25		ทูนกันสวะ	O15	0.06	0.001
26		สภาพตะแกรง	O17	0.06	0.001
<b>รวม</b>				<b>111.00</b>	<b>1.000</b>

ภาพที่ 89 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสถานีเชื่อมกับค่าดัชนีความเสี่ยงโดยการใช้น้ำหนักความสำคัญของสภาพความเสี่ยงที่ปรับปรุงโดย Fault tree ทั้งนี้พบว่าดัชนีความเสี่ยงต่อการเลื่อนไถลของเชื่อมมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 2.36 ที่สถานี 0+550 ถึง 0+600 ของเชื่อมหลัก และ 0+000 ถึง 0+050 ของเชื่อมปิดช่องเขาหมายเลข 1 ดัชนีความเสี่ยงต่อการกัดเซาะภายในมีค่าเท่ากับ 1.20 ที่สถานี 0+400 ถึง 0+450 ของเชื่อมหลัก และค่าดัชนีความเสี่ยงของการไหลล้นข้ามสันเชื่อมมีค่าเท่ากับ 1.06 ที่สถานี 0+300 ถึง 0+350 ของเชื่อมหลัก

ค่าดัชนีความเสี่ยง (ใช้ค่ามาก) ของเชื่อม กับสถานีเชื่อม  
[เขื่อนแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี]



ภาพที่ 89 ความสัมพันธ์ระหว่างสถานีเชื่อมกับค่าดัชนีความเสี่ยงโดยการใช้น้ำหนักความสำคัญของสภาพความเสี่ยงจากสาเหตุใน Fault tree เขื่อนแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี

ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงการตรวจสภาพ (สถานีเขื่อน) กับดัชนีความเสี่ยงที่ใช้น้ำหนัก ความสำคัญของสภาพจาก Fault tree เปรียบเทียบกับดัชนีความเสี่ยงเดิมแสดงดัง ภาพที่ 90, 91 และ ภาพที่ 92 ทั้งนี้พบว่าค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้ใช้น้ำหนักจาก Fault tree จะมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีความเสี่ยงมากกว่าเพราะสภาพที่พิจารณาใน Fault tree เป็นสภาพที่พิจารณาจากสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายจนนำไปสู่การพิบัติได้โดยตรง นอกจากนี้สภาพ ในการให้น้ำหนักยังมีจำนวนสภาพน้อยกว่าสภาพที่พิจารณาอยู่เดิม ทำให้ค่าน้ำหนักที่ได้มีความชัดเจนมากขึ้น

ภาพที่ 90 การเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสี่ยงที่ใช้น้ำหนักจาก Fault tree กับน้ำหนักเดิมของการกักเซาะภายใน จากเส้นความสัมพันธ์ของค่าดัชนีความเสี่ยงที่พิจารณาน้ำหนักจาก Fault tree มีค่าดัชนีความเสี่ยงน้อยกว่าค่าดัชนีความเสี่ยงเดิมเพราะสภาพความเสี่ยงที่ตรวจพบในสนาม โดยส่วนใหญ่เป็นสภาพต้นไม้, วัชพืช มีค่าน้ำหนักความสำคัญเดิม เท่ากับ 0.009 แต่เมื่อนำสภาพ ต้นไม้, วัชพืช พิจารณาจาก Fault tree จะได้ค่าน้ำหนัก เท่ากับ 0.002 ซึ่งทำให้ค่าดัชนีความเสี่ยงมีค่าลดลง



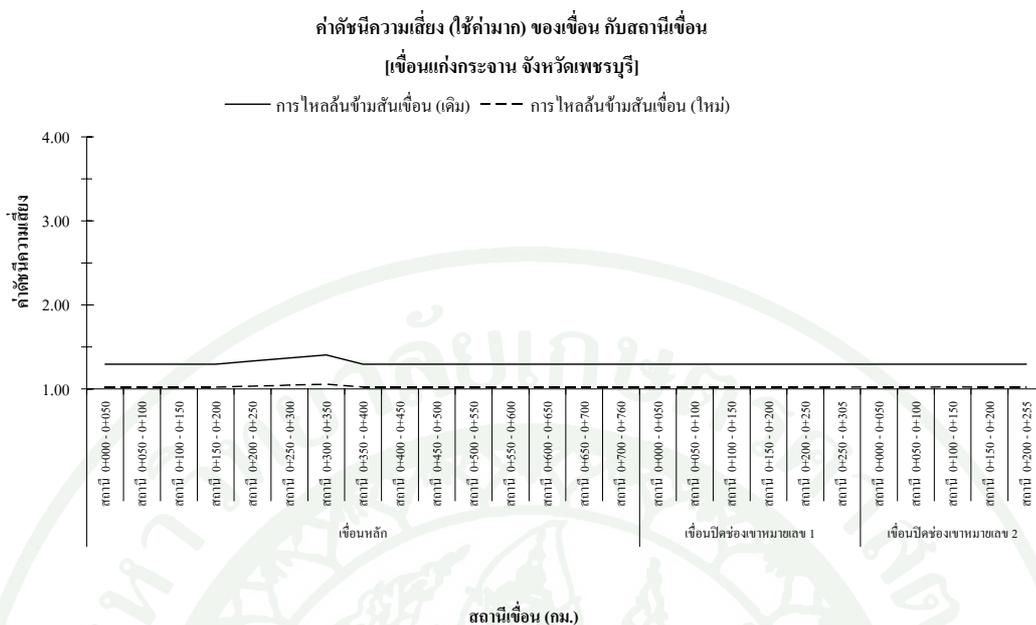
ภาพที่ 90 การเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสี่ยงที่ใช้น้ำหนักจาก Fault tree กับน้ำหนักเดิมของการกักเซาะภายใน

ภาพที่ 91 การเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสี่ยงที่ใช้น้ำหนักจาก Fault tree กับน้ำหนักเดิมของการเลื่อนไถล จากเส้นความสัมพันธ์ของค่าดัชนีความเสี่ยงในแต่ละระยะการตรวจสภาพจะมีค่าดัชนีความเสี่ยงเพิ่มขึ้นที่เห็นได้ชัดเจนที่สถานี 0+550 ถึง 0+600 ของเขื่อนหลักและ 0+000 ถึง 0+050 ของเขื่อนปิดช่องเขาหมายเลข 1 เพราะเกิดการเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว มีระดับคะแนน 4 แต่มีบางระยะมีค่าดัชนีความเสี่ยงลดลงเช่นที่ สถานี 0+650 ถึง 0+760 ของเขื่อนหลัก เพราะว่าไม่เกิดสภาพการเลื่อนไถล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว



ภาพที่ 91 การเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสี่ยงที่ใช้น้ำหนักจาก Fault tree กับน้ำหนักเดิมของการเลื่อนไถล

ภาพที่ 92 การเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสี่ยงที่ใช้น้ำหนักจาก Fault tree กับน้ำหนักเดิมของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน จากเส้นความสัมพันธ์ค่าดัชนีความเสี่ยงมีค่าลดลงเพราะน้ำหนักความสำคัญของสภาพความเสี่ยงที่ตรวจจากสนามมีค่าลดลง



**ภาพที่ 92** การเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสี่ยงที่ใช้น้ำหนักจาก Fault tree กับน้ำหนักเดิมของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน

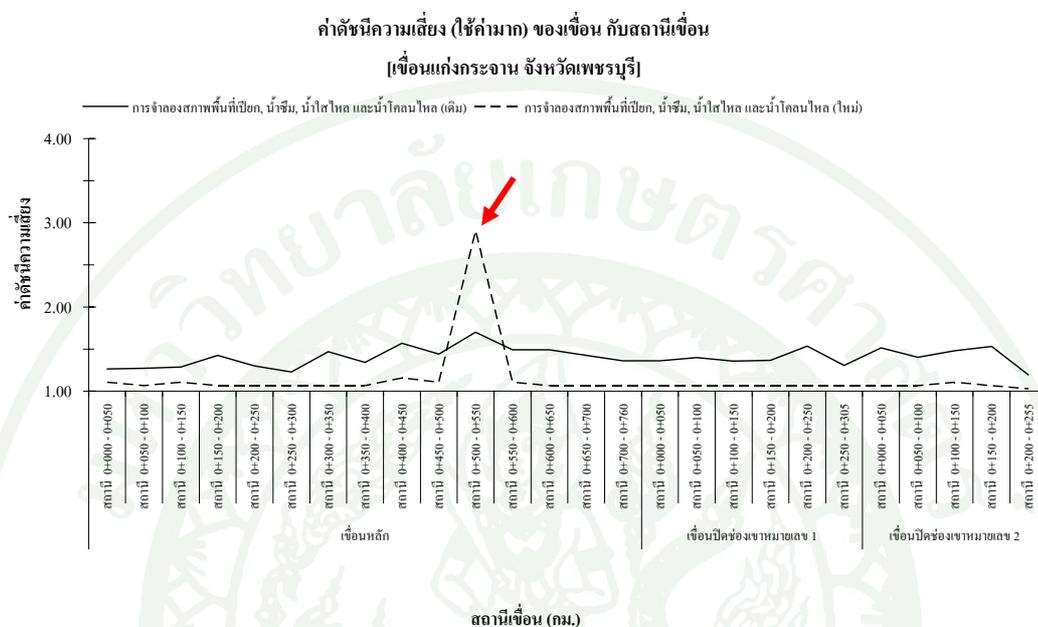
## 9.2 การทดสอบประสิทธิภาพวิธีดัชนีความเสี่ยงในกรณีวิกฤติหลังการปรับปรุงค่าน้ำหนัก

### การทดสอบประสิทธิภาพวิธีดัชนีความเสี่ยง

การทดสอบประสิทธิภาพวิธีดัชนีความเสี่ยงจะทดสอบ 3 กรณี ได้แก่ การจำลองสภาพพื้นที่เปียก, น้ำซึม, น้ำไหล และน้ำโคลนไหล สภาพรอยแตกตามขวาง และสันเขื่อนยุบตัว โดยการให้คะแนนระดับ 4 ที่ช่วงสถานี 0+500 ถึง 0+550 ของเขื่อนหลักของเขื่อนแก่งกระจาน และทำการเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสี่ยง ดังภาพที่ 93, 94 และภาพที่ 95

ภาพที่ 93 แสดงการเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสี่ยงของการจำลองสภาพน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำไหล, น้ำโคลน, พื้นที่เปียกโดยใช้น้ำหนักเดิม (0.083) เปรียบเทียบกับน้ำหนักที่พิจารณาจาก Fault tree (0.601) จะให้เห็นว่าค่าดัชนีความเสี่ยงของการใช้น้ำหนักที่พิจารณาจาก Fault tree มีค่าดัชนี-ความเสี่ยงมากขึ้นแสดงว่าการใช้น้ำหนักที่พิจารณาจาก Fault tree ให้ความสำคัญกับสภาพน้ำไหลฯ มากกว่าค่าน้ำหนักเดิม เมื่อพิจารณา Fault tree สภาพน้ำไหลฯ เป็นสภาพที่สำคัญก่อนเกิด

การปรับรูปแบบการกั้ดเซาะภายใน ดังนั้นการใช้น้ำหนักที่พิจารณาจาก Fault tree น่าจะมีความเหมาะสมมากกว่าการใช้น้ำหนักเดิม



**ภาพที่ 93** การเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสี่ยงของการจำลองสภาพพื้นที่เปียก, น้ำซึม, น้ำโคลนไหล และน้ำโคลนไหลโดยใช้น้ำหนักเดิมกับน้ำหนักที่พิจารณาจาก Fault tree

การจำลองสภาพรอยแตกตามขวาง ภาพที่ 94 พบว่าค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าดัชนีความเสี่ยงเดิม เพราะสภาพรอยแตกตามขวางเป็นสภาพที่บ่งชี้ว่าอาจเกิดความบกพร่อง (ซึ่งมีสภาพที่สำคัญมากกว่าคือสภาพก่อนเกิดการพิบัติ) มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.006 เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักเดิม (0.083) จะมีค่าน้อยกว่า

การจำลองสภาพการยุบตัวของสันเขื่อน ภาพที่ 95 พบว่าค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้มีค่ามากกว่าค่าดัชนีความเสี่ยงเดิม น้ำหนักที่ได้พิจารณาจาก Fault tree เท่ากับ 0.011 น้อยกว่า น้ำหนักเดิม คือ 0.037 เพราะสภาพการยุบตัวของสันเขื่อนเป็นสภาพบ่งชี้ว่าอาจเกิดความบกพร่องแต่ทำให้น้ำหนักที่ได้มีค่ามากขึ้นกว่าเดิม



**ภาพที่ 94** การเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสี่ยงของการจำลองสภารอยแตกตามขวาง โดยใช้น้ำหนักเดิมกับน้ำหนักที่พิจารณาจาก Fault tree



**ภาพที่ 95** การเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสี่ยงของการจำลองสภาการยุบตัวของสันเขื่อน โดยใช้น้ำหนักเดิมกับน้ำหนักที่พิจารณาจาก Fault tree



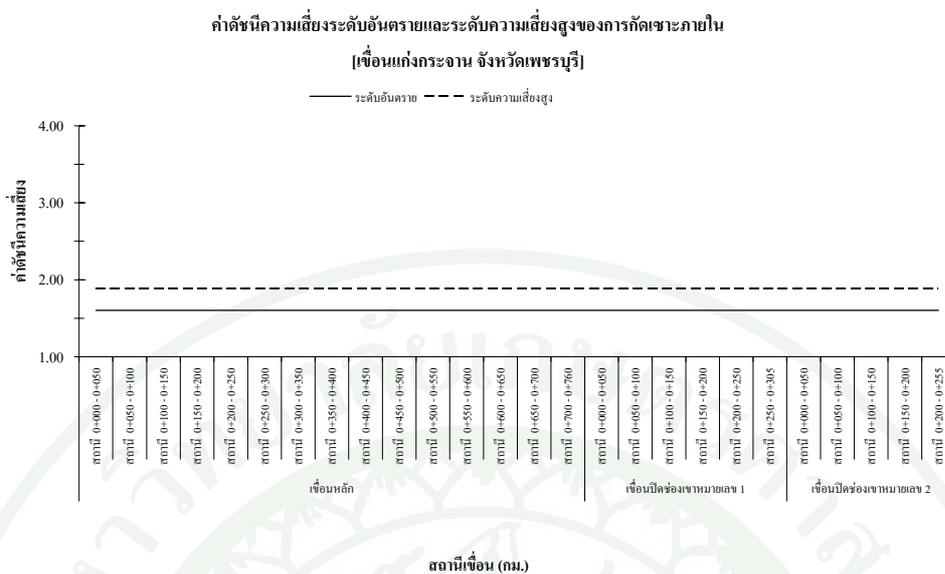
สำหรับการกำหนดค่าดัชนีความเสี่ยงที่ระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูงของการเลื่อนไถล และการไหลล้นข้ามสันเขื่อน จะพิจารณาลักษณะเดียวกันกับการกัดเซาะภายใน ดังแสดงในภาพที่ 100, 101, 102, 103, 104 และภาพที่ 105



ภาพที่ 97 แสดงค่าดัชนีความเสี่ยงตามสถานีเขื่อนกรณีพิจารณาความเสี่ยงตามเส้นทางการพิบัติของการกัดเซาะภายในในระดับอันตราย



ภาพที่ 98 แสดงค่าดัชนีความเสี่ยงตามสถานีเขื่อนกรณีพิจารณาความเสี่ยงตามเส้นทางการพิบัติของการกัดเซาะภายในในระดับความเสี่ยงสูง



ภาพที่ 99 แสดงค่าดัชนีความเสี่ยงระดับอันตรายและระดับความถี่สูงของการกักเซาะภายใน



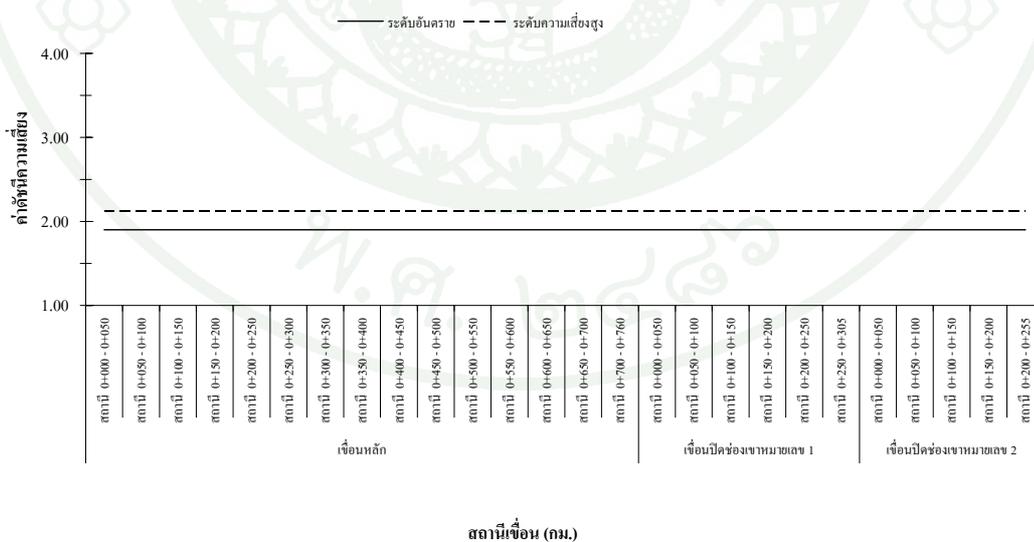
ภาพที่ 100 แสดงค่าดัชนีความเสี่ยงตามสถานีเขื่อนกรณีพิจารณาความเสี่ยงตามเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลในระดับอันตราย

ค่าดัชนีความเสี่ยงที่ระดับความเสี่ยงสูงต่อการเคลื่อนไหวของเขื่อนแก่งกระจาน



ภาพที่ 101 แสดงค่าดัชนีความเสี่ยงตามสถานีเขื่อนกรณีพิจารณาความเสี่ยงตามเส้นทาง-การพิบัติของการเคลื่อนไหวไถลในระดับความเสี่ยงสูง

ค่าดัชนีความเสี่ยงระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูงของการเคลื่อนไหวไถล [เขื่อนแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี]



ภาพที่ 102 แสดงค่าดัชนีความเสี่ยงระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูงของการเคลื่อนไหวไถล

ค่าดัชนีความเสี่ยงที่ระดับอันตรายต่อการไหลล้มข้ามสันเขื่อนของเขื่อนแก่งกระจาน



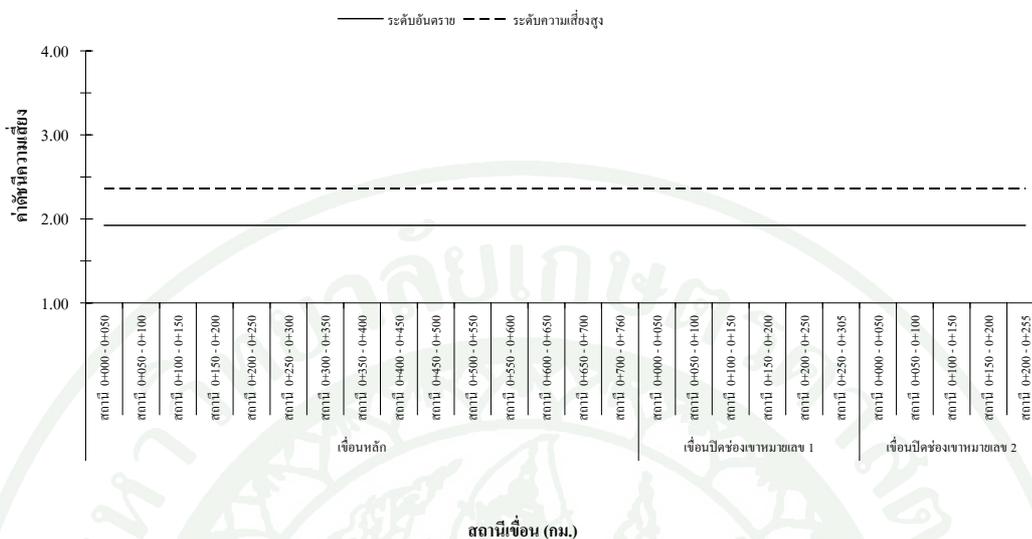
ภาพที่ 103 แสดงค่าดัชนีความเสี่ยงตามสถานีเขื่อนกรณีพิจารณาความเสี่ยงตามเส้นทาง-การพัดติของการเลื่อนไหลในระดับอันตราย

ค่าดัชนีความเสี่ยงที่ระดับความเสี่ยงสูงต่อการไหลล้มข้ามสันเขื่อนของเขื่อนแก่งกระจาน



ภาพที่ 104 แสดงค่าดัชนีความเสี่ยงตามสถานีเขื่อนกรณีพิจารณาความเสี่ยงตามเส้นทาง-การพัดติของการเลื่อนไหลในระดับความเสี่ยงสูง

ค่าดัชนีความเสี่ยงระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูงของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน  
[เขื่อนแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี]



ภาพที่ 105 แสดงค่าดัชนีความเสี่ยงระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูงของการไหลล้นข้ามสันเขื่อน

ตารางที่ 51 สรุปค่าดัชนีความเสี่ยงระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูงของแต่ละลักษณะการพิบัติ การกัดเซาะภายในมีค่าดัชนีความเสี่ยงที่ระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูงเท่ากับ 1.604 และ 1.894 ตามลำดับ การเลื่อนไถลมีค่าดัชนีความเสี่ยงที่ระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูงเท่ากับ 1.903 และ 2.128 ตามลำดับ และการไหลล้นข้ามสันเขื่อนมีค่าดัชนีความเสี่ยงที่ระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูงเท่ากับ 1.924 และ 2.367 ตามลำดับ

ตารางที่ 51 สรุปค่าดัชนีความเสี่ยงระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง

ลักษณะการพิบัติ	ค่าดัชนีความเสี่ยง	
	ระดับอันตราย	ระดับความเสี่ยงสูง
การกัดเซาะภายใน	1.604	1.894
การเลื่อนไถล	1.903	2.128
การไหลล้นข้ามสันเขื่อน	1.924	2.367

จากการได้ค่าดัชนีความเสี่ยงที่ระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูงจึงได้นำมาเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสี่ยงของทั้ง 3 เขื่อน (ตารางที่ 52, 53, 54, 55 และตารางที่ 56) คือ เขื่อนแก่งกระจาน เขื่อนปราณบุรี และเขื่อนปิดช่องเขาต่ำ เพื่อพิจารณาความเสี่ยง ดังภาพที่ 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115 และภาพที่ 116

ตารางที่ 52 ค่าดัชนีความเสี่ยงของเขื่อนหลักของเขื่อนแก่งกระจาน ค่าดัชนีความเสี่ยงที่มากที่สุดของการกัดเซาะภายในเท่ากับ 1.16 ค่าดัชนีความเสี่ยงที่มากที่สุดของการเลื่อนไถลเท่ากับ 2.36 และค่าดัชนีความเสี่ยงที่มากที่สุดของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนเท่ากับ 1.06

ตารางที่ 52 ค่าดัชนีความเสี่ยงของเขื่อนหลักของเขื่อนแก่งกระจาน

ลักษณะการพิบัติ	ค่าดัชนีความเสี่ยงของเขื่อนหลัก							
	สถานี 0+000	สถานี 0+050	สถานี 0+100	สถานี 0+150	สถานี 0+200	สถานี 0+250	สถานี 0+300	สถานี 0+350
	-	-	-	-	-	-	-	-
	0+050	0+100	0+150	0+200	0+250	0+300	0+350	0+400
การกัดเซาะภายใน	1.11	1.07	1.11	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07
การเลื่อนไถล	1.90	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91
การไหลล้นข้ามสันเขื่อน	1.02	1.02	1.02	1.02	1.03	1.05	1.06	1.02
ลักษณะการพิบัติ	สถานี 0+400	สถานี 0+450	สถานี 0+500	สถานี 0+550	สถานี 0+600	สถานี 0+650	สถานี 0+700	
	-	-	-	-	-	-	-	
	0+450	0+500	0+550	0+600	0+650	0+700	0+760	
การกัดเซาะภายใน	1.16	1.11	1.11	1.11	1.07	1.07	1.07	
การเลื่อนไถล	1.92	1.46	1.45	2.36	1.91	1.01	1.01	
การไหลล้นข้ามสันเขื่อน	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	

ตารางที่ 53 ค่าดัชนีความเสี่ยงของเขื่อนปิดช่องเขาหมายเลข 1 ของเขื่อนแก่งกระจาน ค่าดัชนีความเสี่ยงที่มากที่สุดของการกัดเซาะภายในเท่ากับ 1.07 ค่าดัชนีความเสี่ยงที่มากที่สุดของการเลื่อนไถลเท่ากับ 2.36 และค่าดัชนีความเสี่ยงที่มากที่สุดของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนเท่ากับ 1.02

ตารางที่ 53 ค่าดัชนีความเสี่ยงของเขื่อนปิดช่องเขาหมายเลข 1

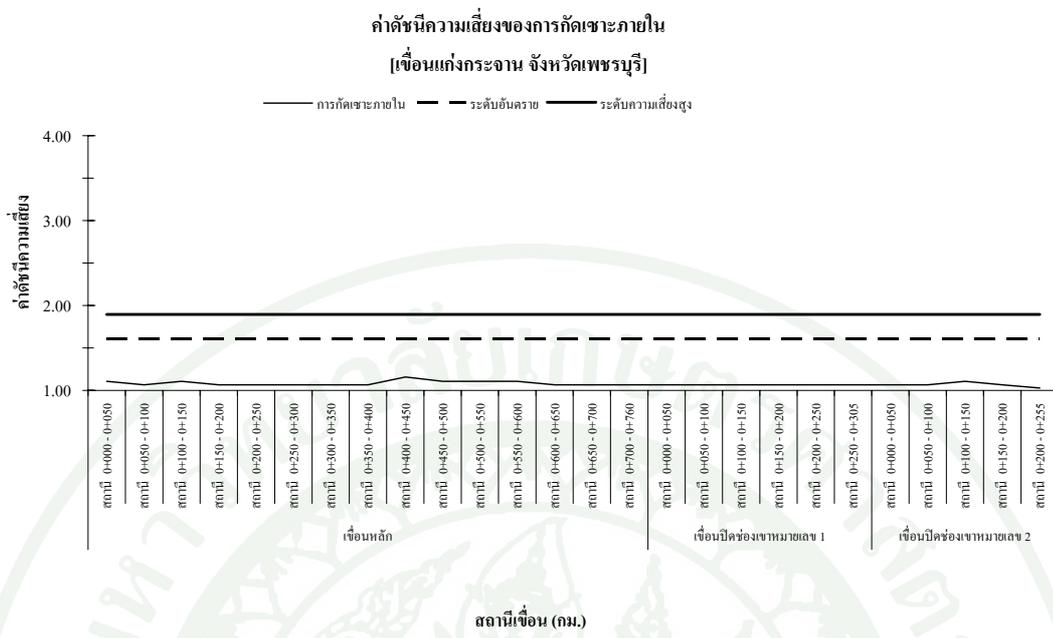
ลักษณะการพิบัติ	ค่าดัชนีความเสี่ยงเขื่อนปิดช่องเขาหมายเลข 1					
	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี
	0+000 - 0+050	0+050 - 0+100	0+100 - 0+150	0+150 - 0+200	0+200 - 0+250	0+250 - 0+305
การกัดเซาะภายใน	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07
การเลื่อนไถล	2.36	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91
การไหลล้นข้ามสันเขื่อน	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02

ตารางที่ 54 ค่าดัชนีความเสี่ยงของเขื่อนปิดช่องเขาหมายเลข 2 ของเขื่อนแก่งกระจาน ค่าดัชนีความเสี่ยงที่มากที่สุดของการกัดเซาะภายในเท่ากับ 1.11 ค่าดัชนีความเสี่ยงที่มากที่สุดของการเลื่อนไถลเท่ากับ 2.36 และค่าดัชนีความเสี่ยงที่มากที่สุดของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนเท่ากับ 1.02

ตารางที่ 54 ค่าดัชนีความเสี่ยงของเขื่อนปิดช่องเขาหมายเลข 2

ลักษณะการพิบัติ	ค่าดัชนีความเสี่ยงเขื่อนปิดช่องเขาหมายเลข 2				
	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี
	0+000 - 0+050	0+050 - 0+100	0+100 - 0+150	0+150 - 0+200	0+200 - 0+255
การกัดเซาะภายใน	1.07	1.07	1.11	1.07	1.03
การเลื่อนไถล	1.91	1.45	1.46	1.46	2.36
การไหลล้นข้ามสันเขื่อน	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02

ภาพที่ 106 ค่าดัชนีความเสี่ยงของการกัดเซาะภายในของเขื่อนแก่งกระจานเทียบกับระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง ค่าดัชนีความเสี่ยงของการกัดเซาะภายในที่ได้มีค่าน้อยมากไม่เกินกว่าระดับอันตราย



**ภาพที่ 106** ค่าดัชนีความเสี่ยงของการกัดเซาะภายในของเขื่อนแก่งกระจานเทียบกับระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง

ภาพที่ 107 ค่าดัชนีความเสี่ยงของการเลื่อนไถลของเขื่อนแก่งกระจานเทียบกับระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง มีค่าดัชนีความเสี่ยงที่สถานีเขื่อน 0+550 ถึง 0+600 ของเขื่อนหลัก และ สถานีเขื่อน 0+000 ถึง 0+050 ที่มีค่าดัชนีความเสี่ยงเกินกว่าค่าดัชนีความเสี่ยงที่ระดับความเสี่ยงสูงต่อการเลื่อนไถล

ภาพที่ 108 ค่าดัชนีความเสี่ยงของการไหลสั้นข้ามสันเขื่อนของเขื่อนแก่งกระจานเทียบกับระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูงมีค่าดัชนีความเสี่ยงน้อยมากไม่เกินระดับอันตราย



**ภาพที่ 107** ค่าดัชนีความเสี่ยงของการเลื่อนไถลของเขื่อนแก่งกระจานเทียบกับระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง



**ภาพที่ 108** ค่าดัชนีความเสี่ยงของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนของเขื่อนแก่งกระจานเทียบกับระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง

ตารางที่ 55 ค่าดัชนีความเสี่ยงของเขื่อนปราณบุรี ค่าดัชนีความเสี่ยงที่มากที่สุดของการกัดเซาะภายในเท่ากับ 1.81 ค่าดัชนีความเสี่ยงที่มากที่สุดของการเลื่อนไถลเท่ากับ 2.46 และค่าดัชนีความเสี่ยงที่มากที่สุดของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนเท่ากับ 1.04

ตารางที่ 55 ค่าดัชนีความเสี่ยงของเขื่อนปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

ลักษณะการพิบัติ	ค่าดัชนีความเสี่ยงของเขื่อนปราณบุรี						
	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี
	0+000 - 0+050	0+050 - 0+100	0+100 - 0+150	0+150 - 0+200	0+200 - 0+250	0+250 - 0+300	0+300 - 0+350
การกัดเซาะภายใน	1.09	1.81	1.21	1.17	1.21	1.09	1.81
การเลื่อนไถล	1.46	1.46	1.01	1.01	1.46	1.91	1.01
การไหลล้นข้ามสันเขื่อน	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.03	1.03
ลักษณะการพิบัติ	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี
	0+350 - 0+400	0+400 - 0+450	0+450 - 0+500	0+500 - 0+550	0+550 - 0+600	0+600 - 0+650	0+650 - 0+700
การกัดเซาะภายใน	1.13	1.17	1.17	1.13	1.17	1.09	1.13
การเลื่อนไถล	1.19	2.46	1.01	1.46	2.00	1.01	1.01
การไหลล้นข้ามสันเขื่อน	1.04	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
ลักษณะการพิบัติ	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี	สถานี
	0+700 - 0+750	0+750 - 0+800	0+800 - 0+850	0+850 - 0+900	0+900 - 0+950	0+950 - 1+000	1+000 - 1+050
การกัดเซาะภายใน	1.13	1.17	1.09	1.02	1.13	1.13	1.13
การเลื่อนไถล	1.46	1.46	1.00	1.00	1.46	1.46	1.46
การไหลล้นข้ามสันเขื่อน	1.03	1.04	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03

ตารางที่ 55 ค่าดัชนีความเสี่ยงของเขื่อนปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ (ต่อ)

ลักษณะการพิบัติ	สถานี						
	1+050 - 1+100	1+100 - 1+150	1+150 - 1+200	1+200 - 1+250	1+250 - 1+300	1+300 - 1+350	1+350 - 1+400
การกัดเซาะภายใน	1.05	1.13	1.17	1.13	1.14	1.17	1.13
การเลื่อนไถล	1.46	1.91	1.92	1.47	1.47	1.92	1.91
การไหลล้นข้ามสันเขื่อน	1.03	1.03	1.03	1.03	1.04	1.04	1.03

ลักษณะการพิบัติ	สถานี	สถานี
	1+400 - 1+450	1+450 - 1+500
การกัดเซาะภายใน	1.09	1.02
การเลื่อนไถล	1.46	1.00
การไหลล้นข้ามสันเขื่อน	1.04	1.03

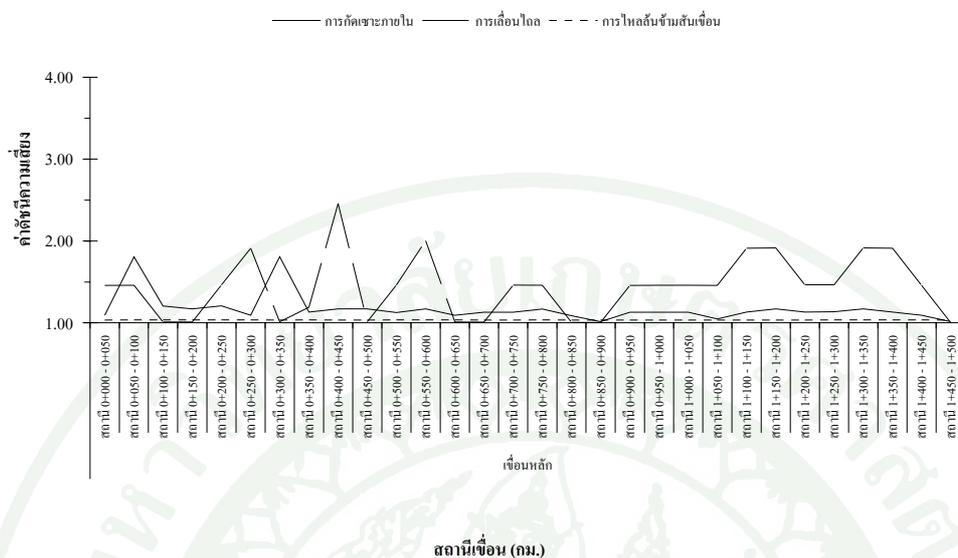
ภาพที่ 109 ความสัมพันธ์ระหว่างสถานีเขื่อนกับดัชนีความเสี่ยงโดยการใช้น้ำหนักความสำคัญของสภาพความเสี่ยงจากสาเหตุใน Fault tree เขื่อนปราณบุรี

ภาพที่ 110 ค่าดัชนีความเสี่ยงของการกัดเซาะภายในของเขื่อนปราณบุรีเทียบกับระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง มีค่าดัชนีความเสี่ยงที่เกินระดับอันตราย แต่ไม่เกินระดับความเสี่ยงสูง ที่สถานี 0+050 ถึง 0+100 และ สถานี 0+300 ถึง 0+350

ภาพที่ 111 ค่าดัชนีความเสี่ยงของการเลื่อนไถลของเขื่อนปราณบุรีเทียบกับระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง มีค่าดัชนีความเสี่ยงเกินระดับอันตรายที่สถานี 0+550 ถึง 0+600 และค่าดัชนีความเสี่ยงที่เกินระดับความเสี่ยงสูงที่สถานี 0+400 ถึง 0+450

ภาพที่ 112 ค่าดัชนีความเสี่ยงของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนของเขื่อนปราณบุรีเทียบกับระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง ค่าดัชนีความเสี่ยงของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนมีค่าน้อยมาก

ค่าดัชนีความเสี่ยงของเขื่อนปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

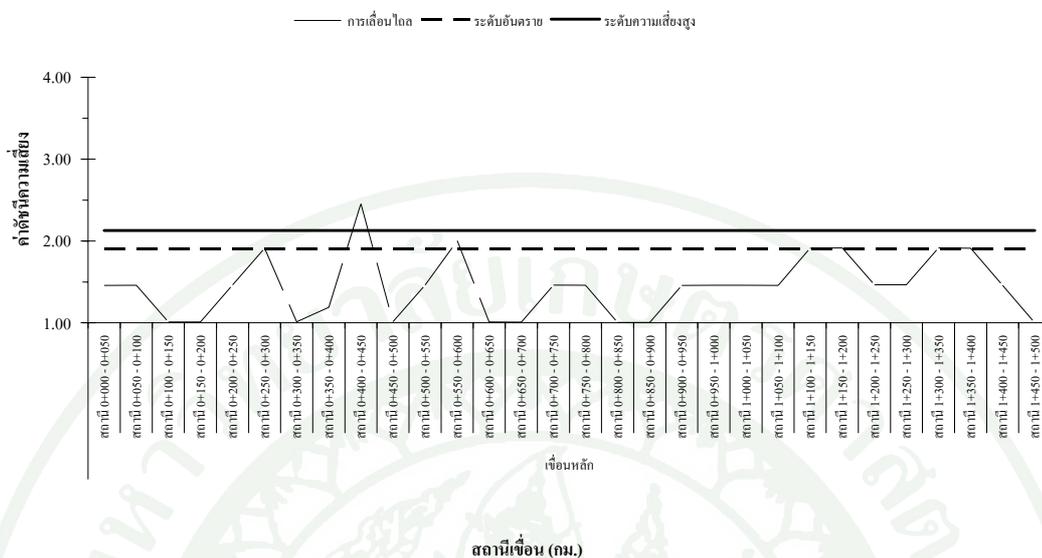


ภาพที่ 109 ความสัมพันธ์ระหว่างสถานีเขื่อนกับดัชนีความเสี่ยงโดยการใช้น้ำหนักความสำคัญของสภาพความเสี่ยงจากสาเหตุใน Fault tree เขื่อนปราณบุรี



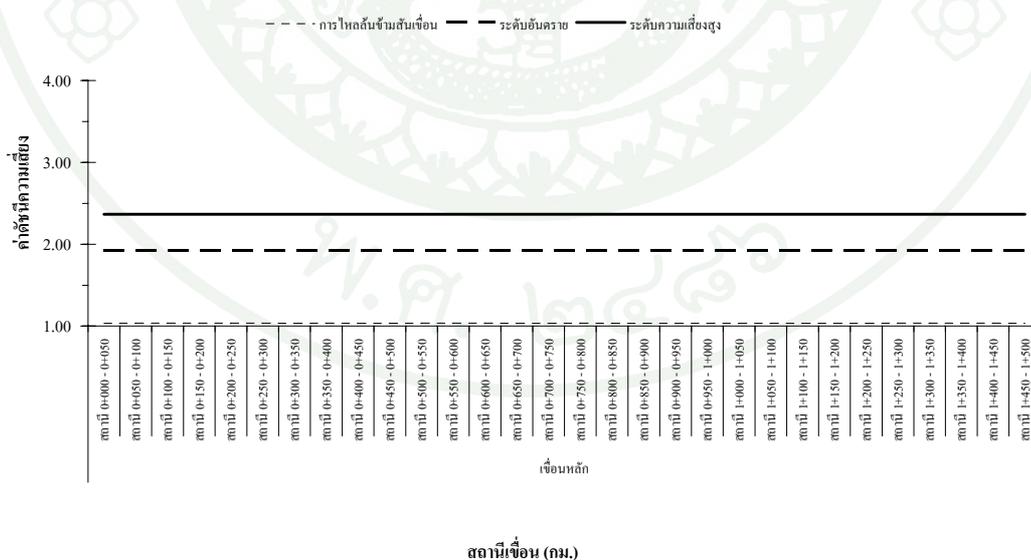
ภาพที่ 110 ค่าดัชนีความเสี่ยงของการกักเซาะภายในของเขื่อนปราณบุรีเทียบกับระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง

ค่าดัชนีความเสี่ยงการเลื่อนไถลของเขื่อนปราณบุรี



ภาพที่ 111 ค่าดัชนีความเสี่ยงของการเลื่อนไถลของเขื่อนปราณบุรีเทียบกับระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง

ค่าดัชนีความเสี่ยงการไหลล้นข้ามสันเขื่อนของเขื่อนปราณบุรี



ภาพที่ 112 ค่าดัชนีความเสี่ยงของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนของเขื่อนปราณบุรีเทียบกับระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง

ตารางที่ 56 ค่าดัชนีความเสี่ยงของเขื่อนปิดช่องเขาต่ำ โครงการเขื่อนขุนด่านปราการชล จังหวัดนครนายก ค่าดัชนีความเสี่ยงที่มากที่สุดของการกัดเซาะภายในเท่ากับ 1.168 ค่าดัชนีความเสี่ยงที่มากที่สุดของการเลื่อนไถลเท่ากับ 1.461 และค่าดัชนีความเสี่ยงที่มากที่สุดของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนเท่ากับ 1.003

ตารางที่ 56 ค่าดัชนีความเสี่ยงของเขื่อนปิดช่องเขาต่ำ โครงการเขื่อนขุนด่านปราการชล จังหวัดนครนายก

ลักษณะการพิบัติ	ค่าดัชนีความเสี่ยงของเขื่อนปิดช่องเขาต่ำ						
	สถานี 0+350 - 0+383	สถานี 0+300 - 0+350	สถานี 0+250 - 0+300	สถานี 0+200 - 0+250	สถานี 0+150 - 0+200	สถานี 0+100 - 0+150	สถานี 0+050 - 0+100
การกัดเซาะภายใน	1.168	1.132	1.132	1.093	1.132	1.093	1.054
การเลื่อนไถล	1.461	1.015	1.014	1.014	1.014	1.012	1.008
การไหลล้นข้ามสันเขื่อน	1.000	1.001	1.001	1.003	1.001	1.001	1.001

ภาพที่ 113 ความสัมพันธ์ระหว่างสถานีเขื่อนกับดัชนีความเสี่ยงโดยการใช้น้ำหนักความสำคัญของสภาพความเสี่ยงจากสาเหตุใน Fault tree เขื่อนปิดช่องเขาต่ำ ค่าดัชนีความเสี่ยงมีค่ามากที่สุดที่สถานี 0+350 ถึง 0+383

ภาพที่ 114 ค่าดัชนีความเสี่ยงของการกัดเซาะภายในของเขื่อนปิดช่องเขาต่ำเทียบกับระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง มีค่าดัชนีความเสี่ยงต่อการกัดเซาะภายในไม่เกินระดับอันตราย

ภาพที่ 115 ค่าดัชนีความเสี่ยงของการเลื่อนไถลของเขื่อนปิดช่องเขาต่ำเทียบกับระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง มีค่าดัชนีความเสี่ยงต่อการเลื่อนไถลไม่เกินระดับอันตราย

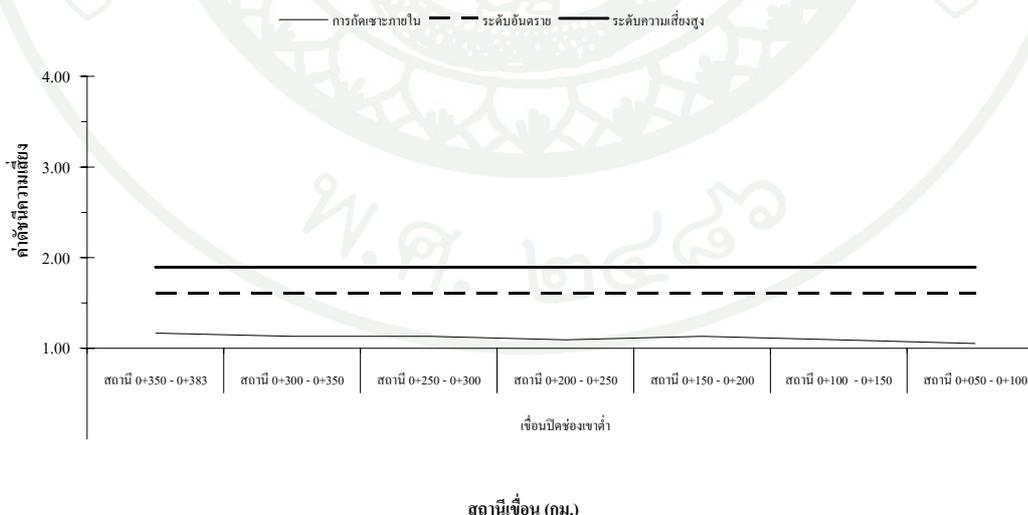
ภาพที่ 116 ค่าดัชนีความเสี่ยงของการการไหลล้นข้ามสันเขื่อนของเขื่อนปิดช่องเขาต่ำเทียบกับระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง มีค่าดัชนีความเสี่ยงต่อการการไหลล้นข้ามสันเขื่อนมีค่าน้อยมากและไม่เกินระดับอันตราย

ค่าดัชนีความเสี่ยงของเขื่อนปิดช่องเขาต้า  
โครงการเขื่อนขุนด่านปราการชล จังหวัดนครนายก



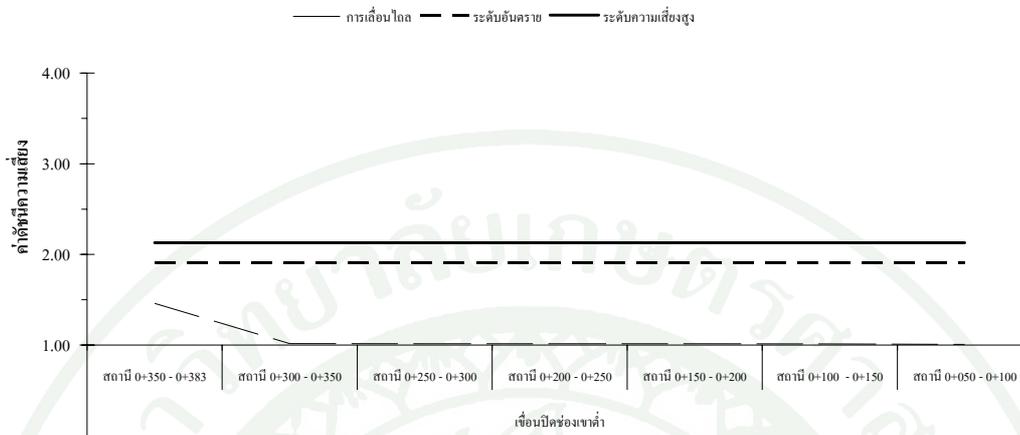
ภาพที่ 113 ความสัมพันธ์ระหว่างสถานีเขื่อนกับดัชนีความเสี่ยงโดยการใช้น้ำหนักความสำคัญของสภาพความเสี่ยงจากสาเหตุใน Fault tree เขื่อนปิดช่องเขาต้า

ค่าดัชนีความเสี่ยงการกัดเซาะภายในของเขื่อนปิดช่องเขาต้า  
โครงการเขื่อนขุนด่านปราการชล จังหวัดนครนายก



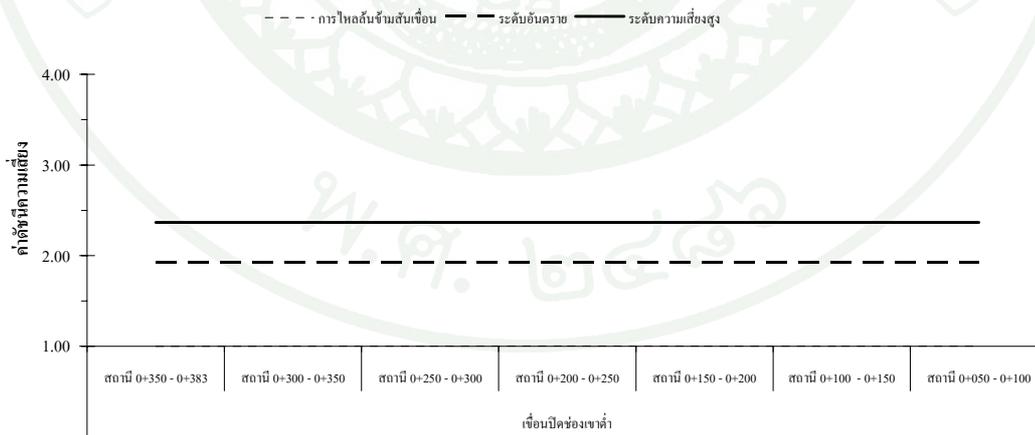
ภาพที่ 114 ค่าดัชนีความเสี่ยงของการกัดเซาะภายในของเขื่อนปิดช่องเขาต้าเทียบกับระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง

ค่าดัชนีความเสี่ยงการเลื้อนไถลของเขื่อนปิดช่องเขาต่ำ  
โครงการเขื่อนขุนด่านปราการชล จังหวัดนครนายก



ภาพที่ 115 ค่าดัชนีความเสี่ยงของการเลื้อน ไถลของเขื่อนปิดช่องเขาต่ำเทียบกับระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง

ค่าดัชนีความเสี่ยงการไหลล้นข้ามสันเขื่อนของเขื่อนปิดช่องเขาต่ำ  
โครงการเขื่อนขุนด่านปราการชล จังหวัดนครนายก



ภาพที่ 116 ค่าดัชนีความเสี่ยงของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนของเขื่อนปิดช่องเขาต่ำเทียบกับระดับอันตรายและระดับความเสี่ยงสูง

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

1. สภาพความเสี่ยงที่สามารถตรวจหาสาเหตุใน Fault tree ได้เป็นสภาพความเสี่ยงที่แท้จริงที่นำไปสู่การพิบัติของเขื่อน
2. ค่าดัชนีความเสี่ยงเดิมที่พิจารณาคำนวณจากความรุนแรงของผลกระทบเสียหายที่เกิดขึ้น, ความยากง่ายของการแก้ไขซ่อมแซม และจำนวนรูปแบบการพิบัติ พบว่าสภาพในการตรวจหลายสภาพไม่มีผลต่อความเสี่ยง ทำให้ส่งผลในการลดน้ำหนักความสำคัญของสภาพที่สำคัญจริงๆ ลงไป
3. การวิเคราะห์ Fault tree สามารถเรียงลำดับสาเหตุที่ครอบคลุมการพิบัติทั้งหมดของเขื่อน จากสาเหตุเริ่มต้น ไปจนกระทั่งถึงสาเหตุก่อนเกิดการพิบัติและสามารถแสดงความเกี่ยวพันของสาเหตุได้
4. น้ำหนักความสำคัญจาก Fault tree มีความเหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ได้ เพราะค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้ใกล้เคียงกับสภาพความเสี่ยงที่เกิดขึ้นจริง มากกว่าค่าดัชนีความเสี่ยงเดิม เพราะสภาพที่นำมาพิจารณาเป็นสภาพจาก Fault tree จะแตกต่างจากน้ำหนักเดิมที่ใช้สภาพที่เสี่ยงและไม่เสี่ยงอย่างแท้จริงรวมกัน
5. ค่าดัชนีความเสี่ยงที่ใช้คะแนนที่มากที่สุดในช่วงของระยะทางการตรวจสภาพจะแสดงถึงความเสี่ยงที่นำไปสู่การพิบัติได้ชัดเจนกว่าการใช้ค่าดัชนีความเสี่ยงที่ใช้คะแนนเฉลี่ย
6. ค่าดัชนีที่แสดงถึงระดับอันตราย และระดับความเสี่ยงสูง กำหนดจากระดับคะแนนสภาพที่เป็นสาเหตุก่อนเกิดการพิบัติของเขื่อน
7. ค่าดัชนีมีข้อจำกัด คือ จะพิจารณาเฉพาะสภาพที่ปรากฏ ดังนั้นสำหรับการพิบัติที่ซับซ้อน และตรวจสอบด้วยสายตาเพียงอย่างเดียวอาจมีความคลาดเคลื่อน

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2540. งานที่ปรึกษา “โครงการซ่อมแซม และปรับปรุงเขื่อนมูลบน” อำเภอครบุรี จังหวัดนครราชสีมา. รายงานฉบับสมบูรณ์ กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- เรืองฤทธิ์ อัมมวรรณ. 2535. การออกแบบและก่อสร้างเขื่อนดิน. การออกแบบและการก่อสร้าง-เขื่อนดิน 2535 (ครั้งที่ 2): น. 2-1 – น. 2-25.
- วารสาร ไม้เรียง. 2542. วิศวกรรมเขื่อนดิน. ไลบรารี นาย. 312 หน้า, กรุงเทพฯ.
- \_\_\_\_\_. 2550. การตรวจวัดพฤติกรรมเขื่อน. ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพี และฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, นายชินโรส ทองธรรมชาติ, น.ส.มนันยา จันทสร, นายวัชชัย ปันสุข, นายวิษณุพงศ์ พอลิละ, น.ส.ศิริลักษณ์ ศิริสิงห์, นายณัฐฐ อินมาลา, น.ส.บัญญัติ คำมา. 2550. รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ การวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงของเขื่อนเพื่อการชลประทานในประเทศไทย – (การศึกษาความเป็นไปได้และกรณีตัวอย่าง). ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ส่วนความปลอดภัยเขื่อน. 2550. รายละเอียดเขื่อนขนาดใหญ่. สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ กรมชลประทาน.
- อนุสรณ์ ทองสร้อย. 2542. การประเมินความปลอดภัยและวางแผนบำรุงรักษาเขื่อนดินโดยวิธีดัชนีสภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Alfredo H-S. Ang. Wilson H. Tang. (1984). **Probability Concepts in Engineering Planning and Design Volume II Decision, Risk, and Reliability**. John Wiley and Sons.

Bill, Owens et al. 2002. Dam Safety Manual, State Engineer's Office State of Colorado.

David, S. Bowles et al. 1993. Risk Assessment: A Tool for Dam Rehabilitation – Decisions. **Geotechnical Practice in Dam Rehabilitation** 1993 (No.35): pp. 116-130.

Glen, R. A. et al. 1999. Ranking Procedure on Maintenance Tacks for Mornitoring of – Embankment Dams. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**: pp. 247 – 259.

Institution of Professional Engineers New Zealand. 1997. **Guidelines on Inspecting Small Dams**. The New Zealand Society on Large Dams.

Interagency Committee on Dam Safety. 2004. **Federal Guidelines For Dam Safety: Glossary of Terms**, U.S. Department of Homeland Security Federal Emergency Management Agency.

Ministry of Environment. Lands and Parks Water Management Branch. 1998. Inspection and Maintenance of Dams (Dam Safety Guidelines)). British Columbia.

Richard, L. We. 2002. **100 Years of Embankment Dam Design and Construction in the U.S. Bureau of Reclamation**. Geotechnical Services Division. Group 1 Technical Service Center Bureau of Reclamation U.S. Department of the Interior Denver, Colorado.

Robert, B. J. 1988. Introduction. **Advanced Dam Engineering for Design, - Construction, and Rehabilitation**. Van Nostrand Reinhold, New York.

State of Oregon. 2007. **Dam Safety in Oregon A General Guide.** Water Resources Department.

United States Department of the Interior Bureau of Reclamation. 1995. **Safety Evaluation of Existing Dams.** A Manual for the Safety Evaluation of Embankment and Concrete Dams. A water resources Technical Publication, Denver, Colorado.

USACE. 1996. REMR Technical Note OM-CI-1.2 (Supersedes OM-CI-I.2 1991), The REMR – Condition Index: Condition Assessment for Maintenance Management of Civil Works – Facilities, p Suppl 7.

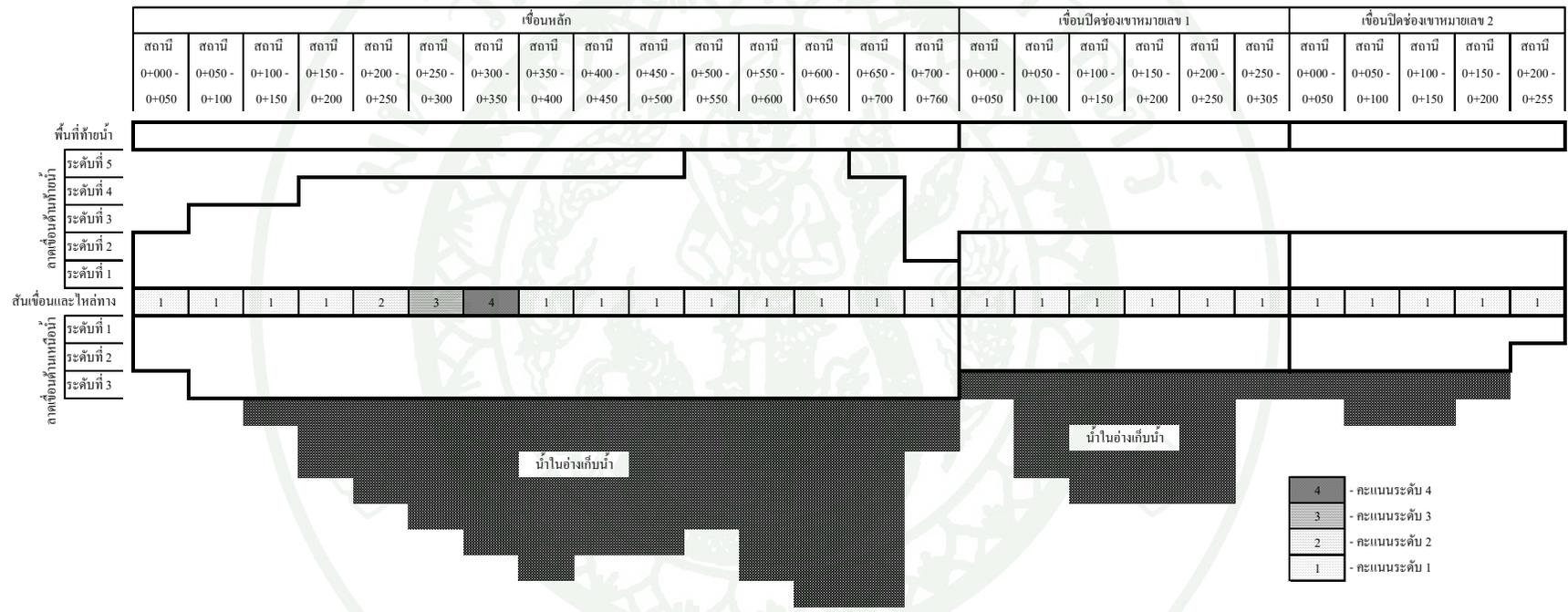
USBR. 1995. Safety Evaluation of Existing Dams. A Water Resources Technical Publication, Denver, Colorado.

U.S. Department of Homeland Security Federal Emergency Management Agency October 1998 **(Reprinted April 2004).** Selecting and Accommodating Inflow Design Floods for Dams. Federal Guidelines for Dam Safety. prepared by the Interagency Committee on Dam Safety.



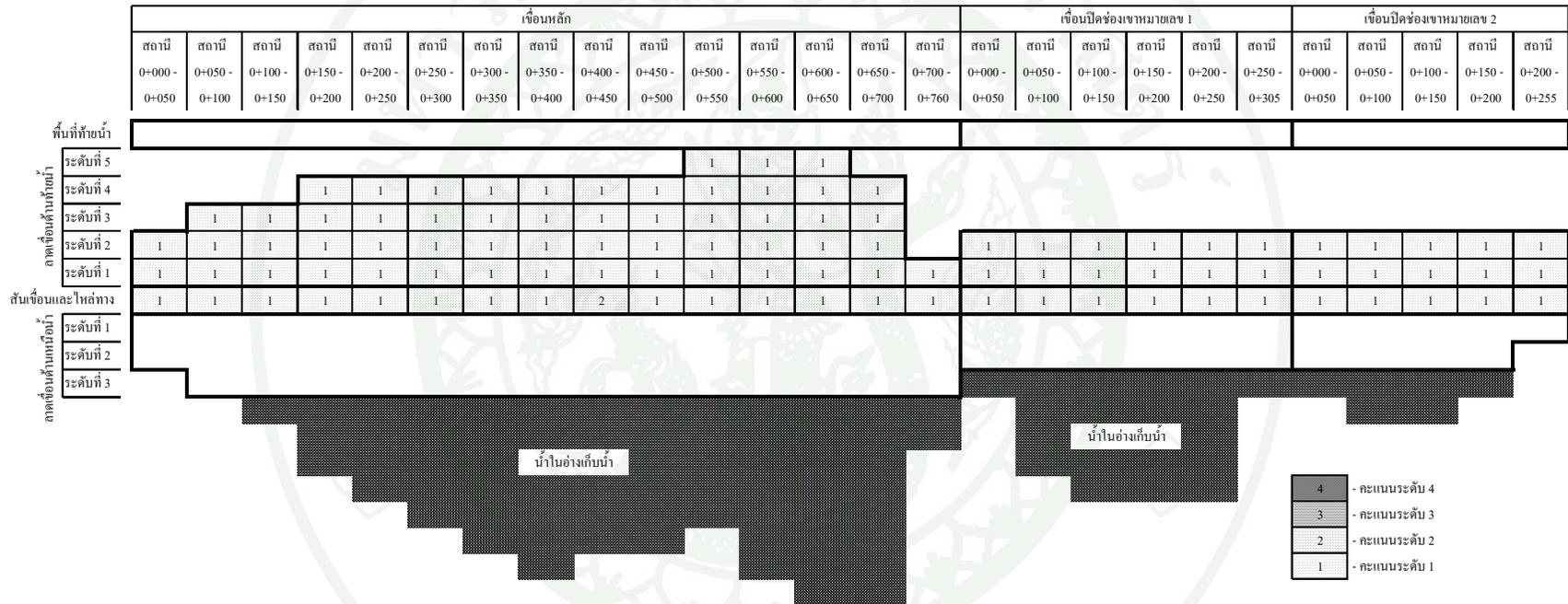
ภาคผนวก





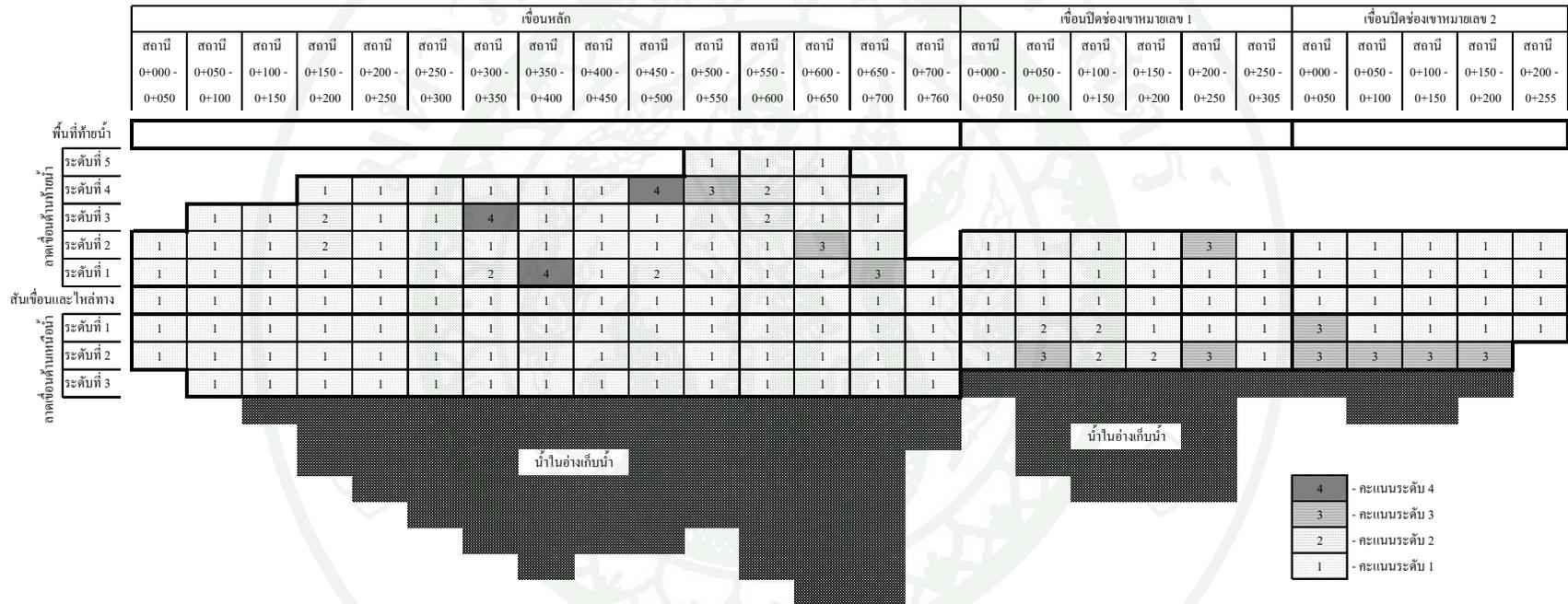
ภาพผนวกที่ ก1 คະແນនສາវພຸບຕົວທີ່ເກີດຂຶ້ນບຣີເວນເຂື່ອນແກ່ງຮະຈານ

ທີມາ: ສຸທິສັກດີ ແລະ ຄະນະ (2550)



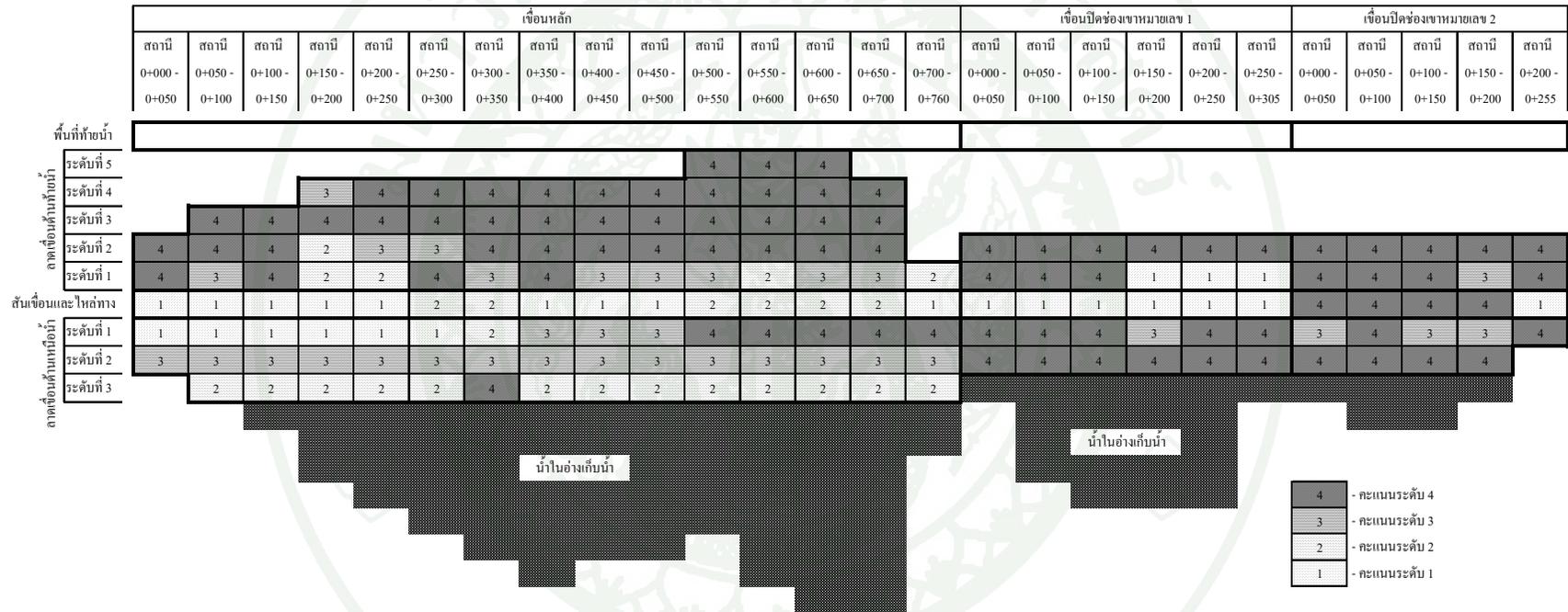
ภาพผนวกที่ ก2 คะแนนสภาพรอยแตกตามขวางที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)



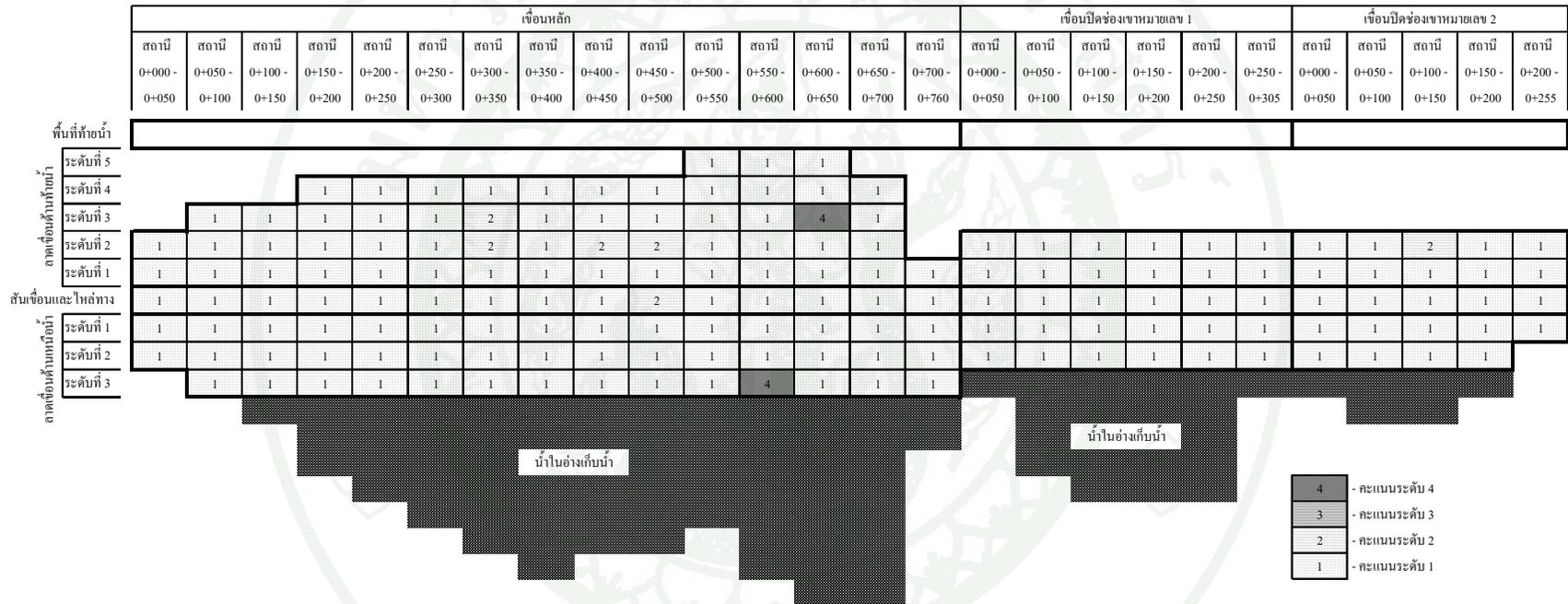
ภาพผนวกที่ ก3 คะแนนสภาพหลุมยุบที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)



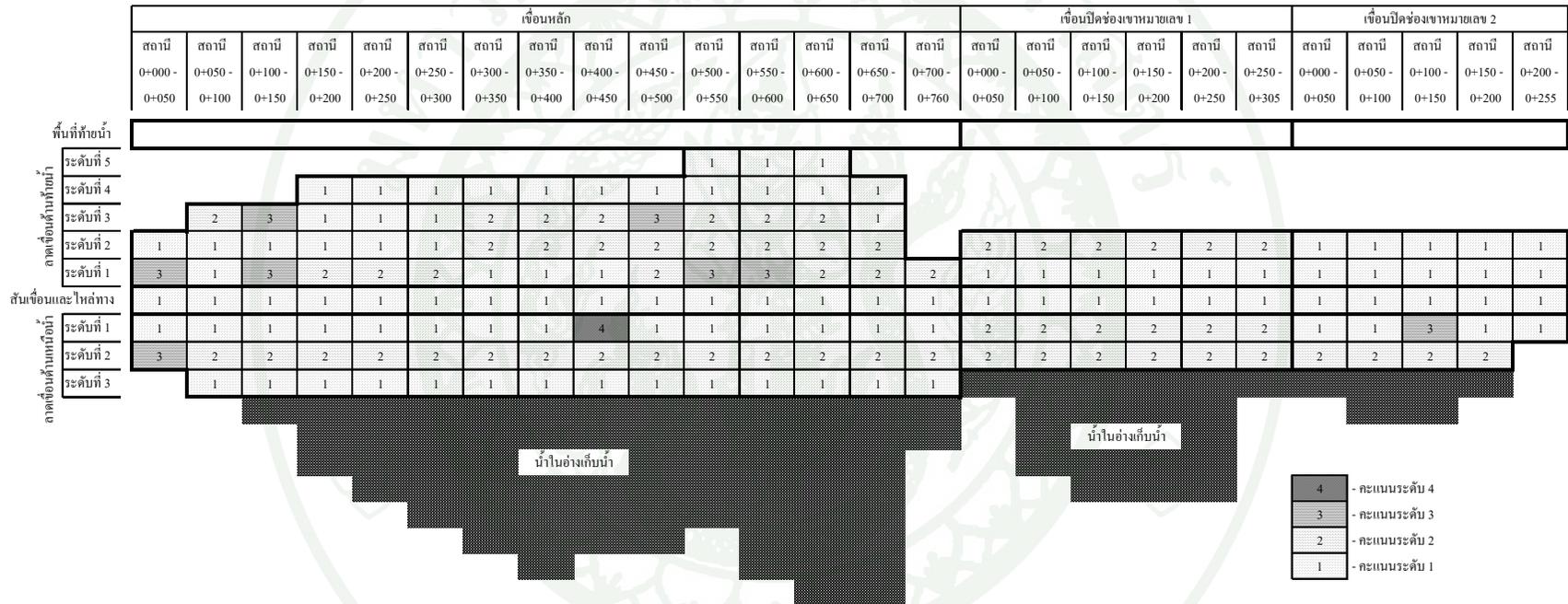
ภาพผนวกที่ ก4 ตะแนนสภาพต้นน้ำ, วัชพืชที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)



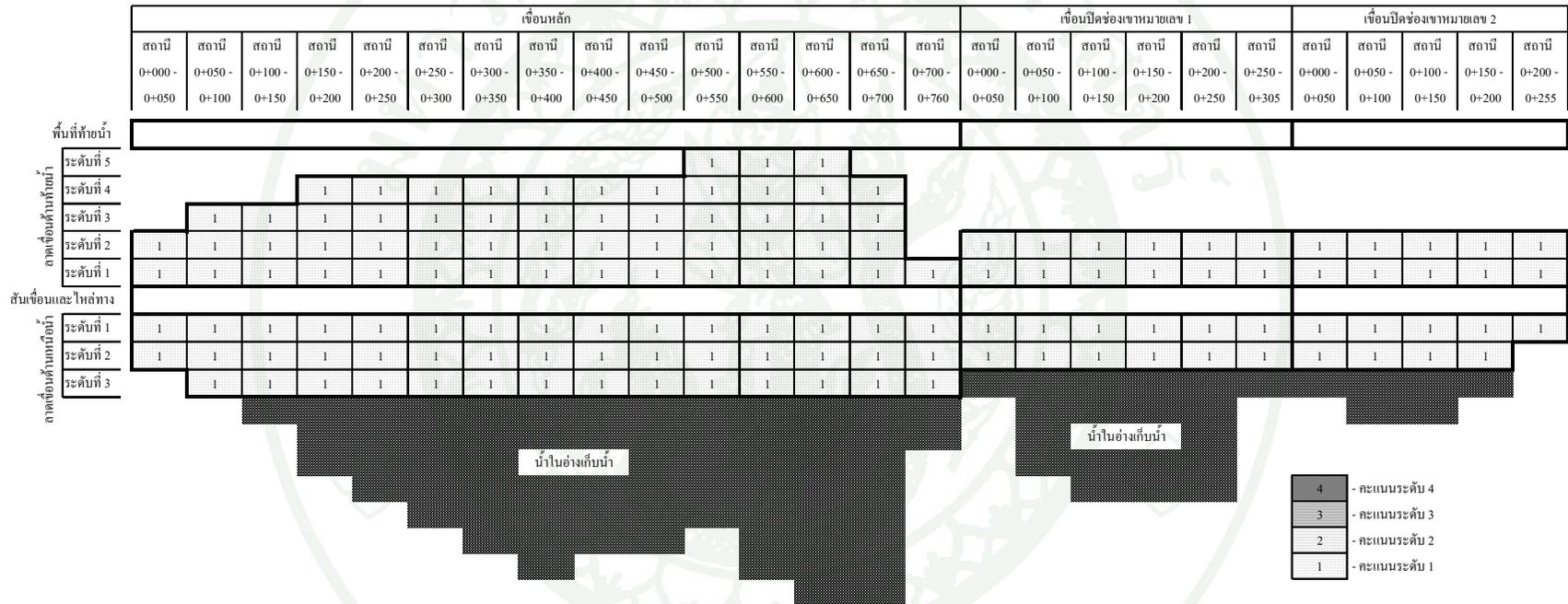
ภาพผนวกที่ ก5 คะแนนสภาพการชำรุดหรือย้ายวัสดุถมเขื่อนที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)



ภาพผนวกที่ 6 คະแนนสภาพรู, โพรง, ท่อ หรือถ้ำที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน

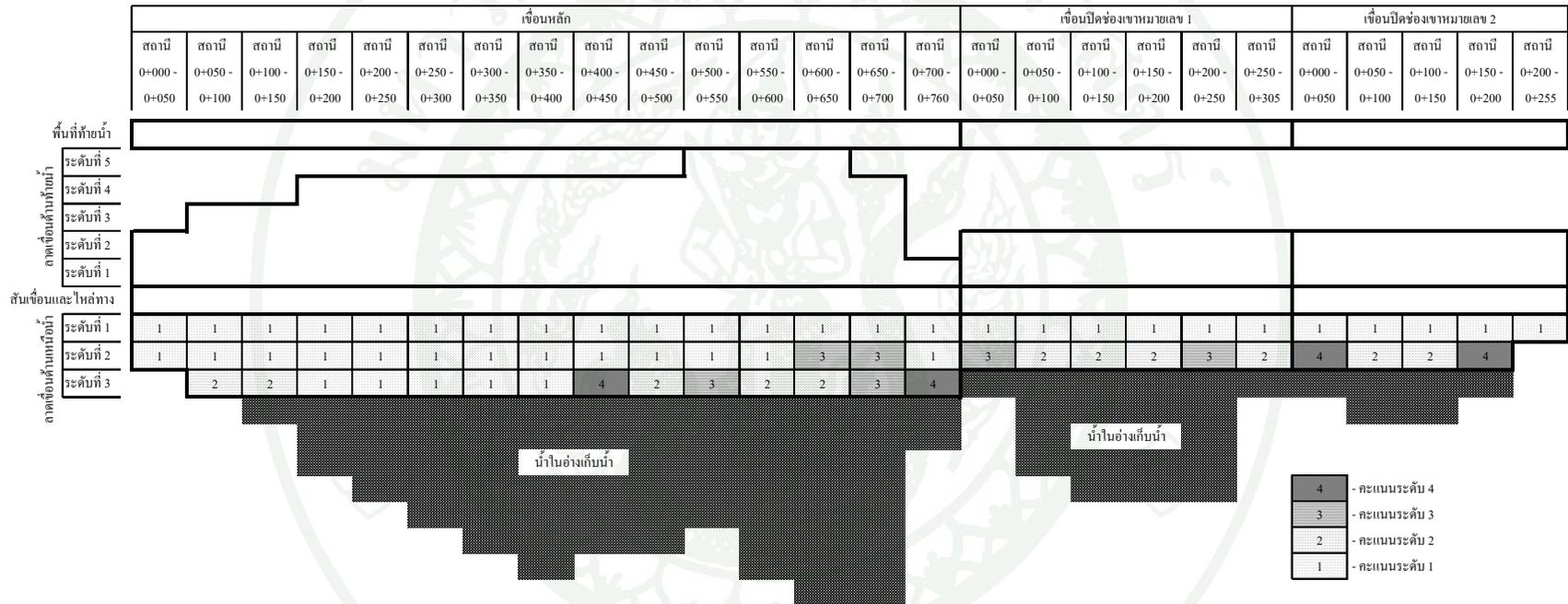
ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)



ภาพผนวกที่ ๗ ๒๕๖๖  
 ๒๕๖๖  
 คະແນນສາພາຜົນຂອງພື້ນທີ່ເຂື່ອນແກ່ງກະຈານ

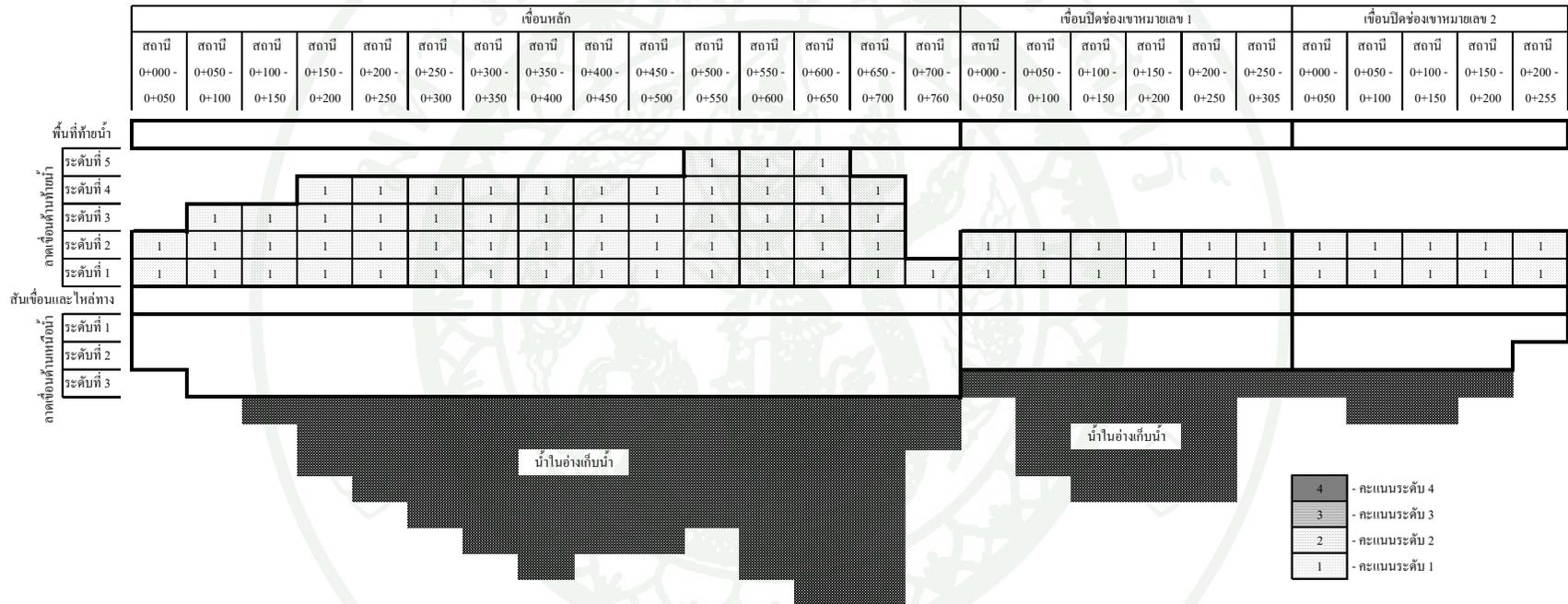
ທີ່ມາ: ສຸທິສັກດີ ແລະ ຄຸນະ (2550)





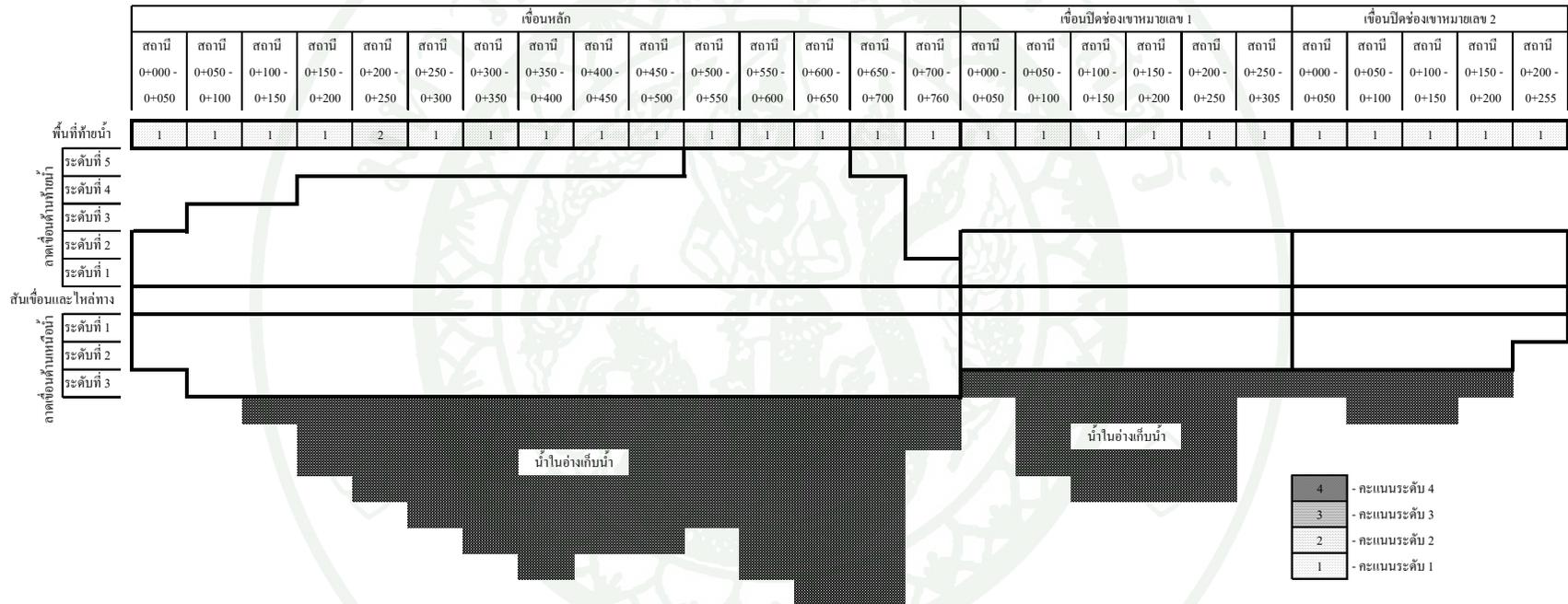
ภาพผนวกที่ ๑๑ คะแนนสภาพการกักเซาะโดยคลื่นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)



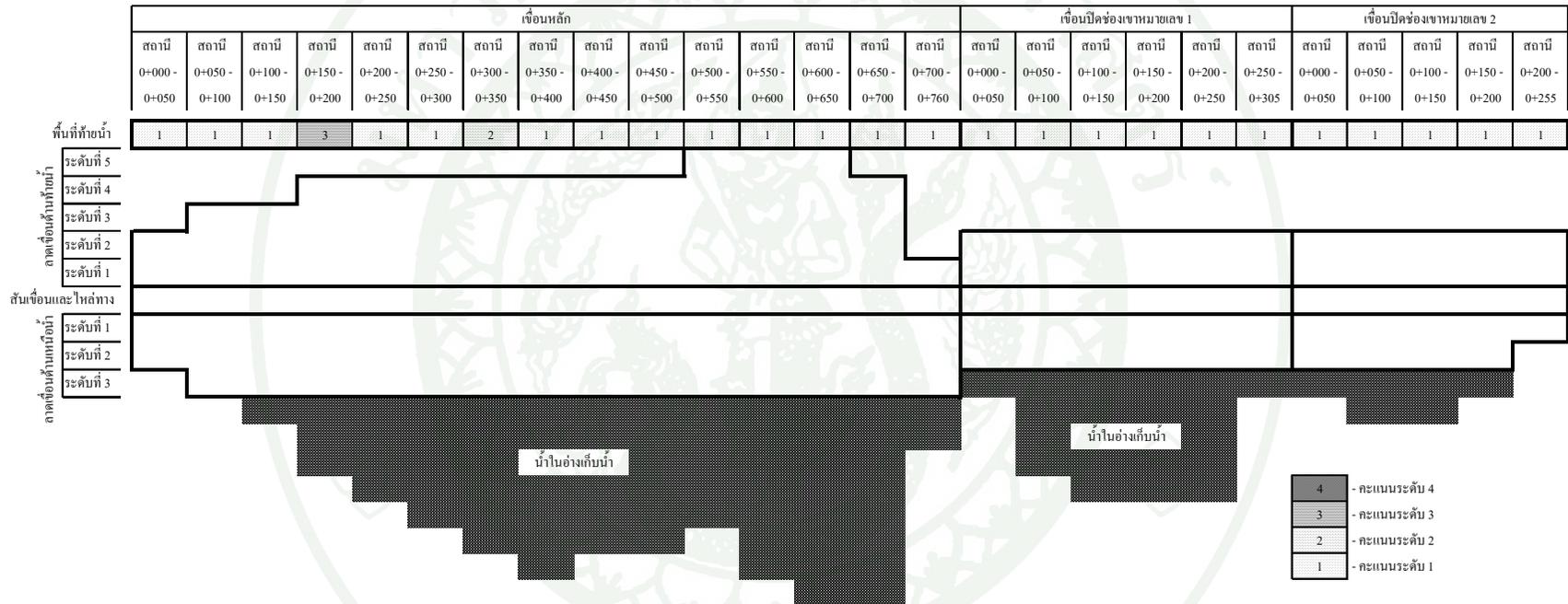
ภาพผนวกที่ 10 คะแนนสภาพบริเวณพื้นที่เปียก, น้ำซึม, น้ำไหล, น้ำโคลนไหล บริเวณเขื่อนแก่งกระจาน

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)



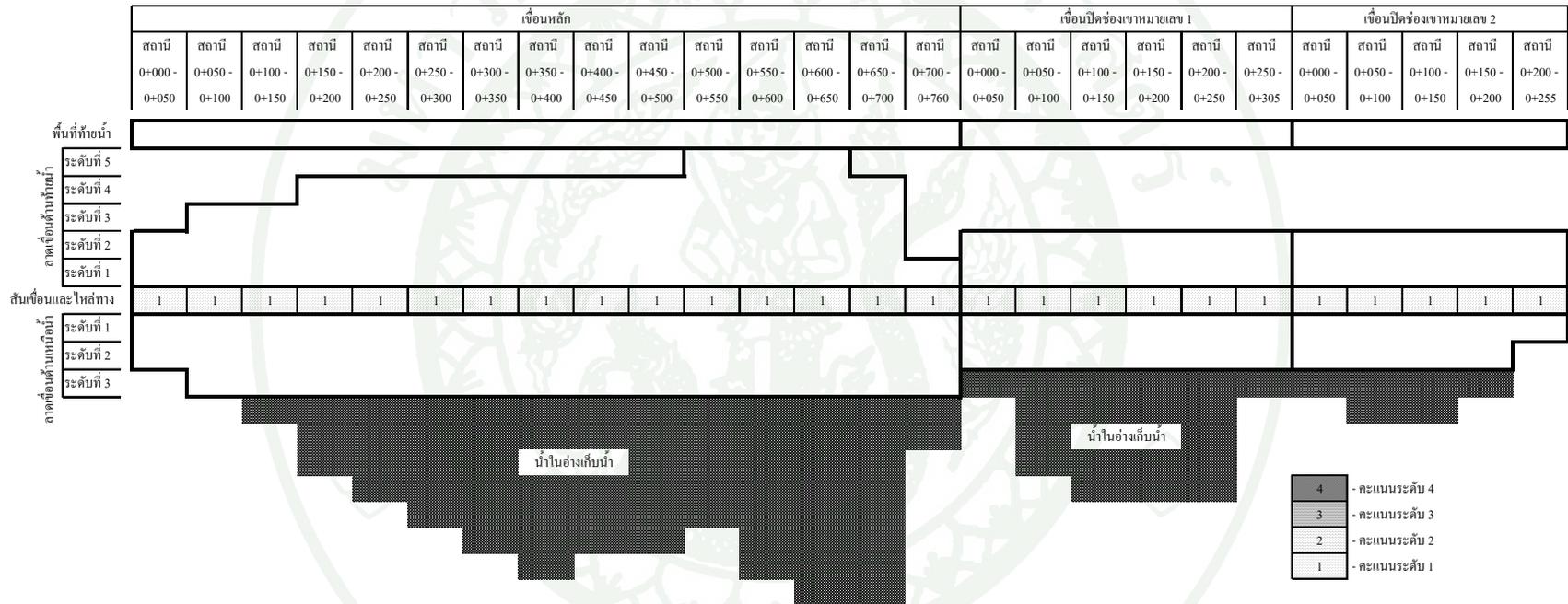
ภาพผนวกที่ ก11 คะแนนสภาพน้ำผุด, พื้นที่เปียก, การไหลซึม ที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)



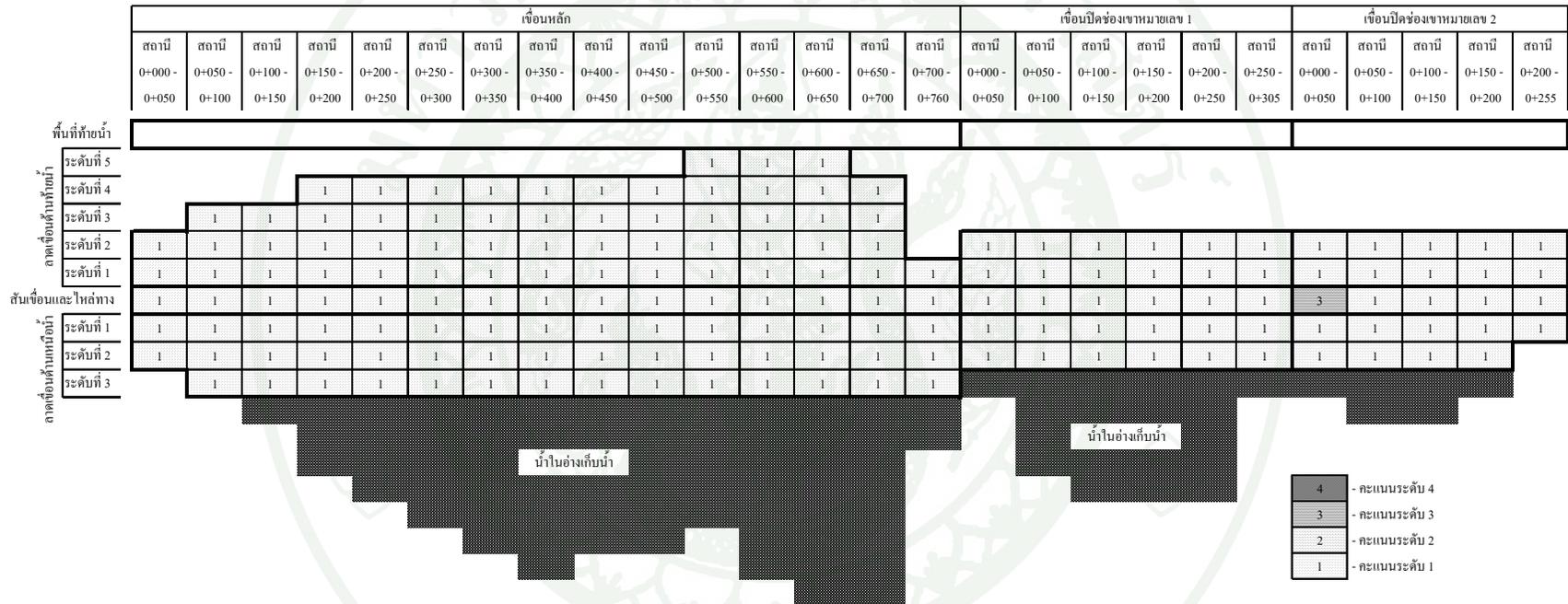
ภาพผนวกที่ ก12 คะแนนสภาพพื้นที่เปียกเป็นแอ่งกระทะที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)



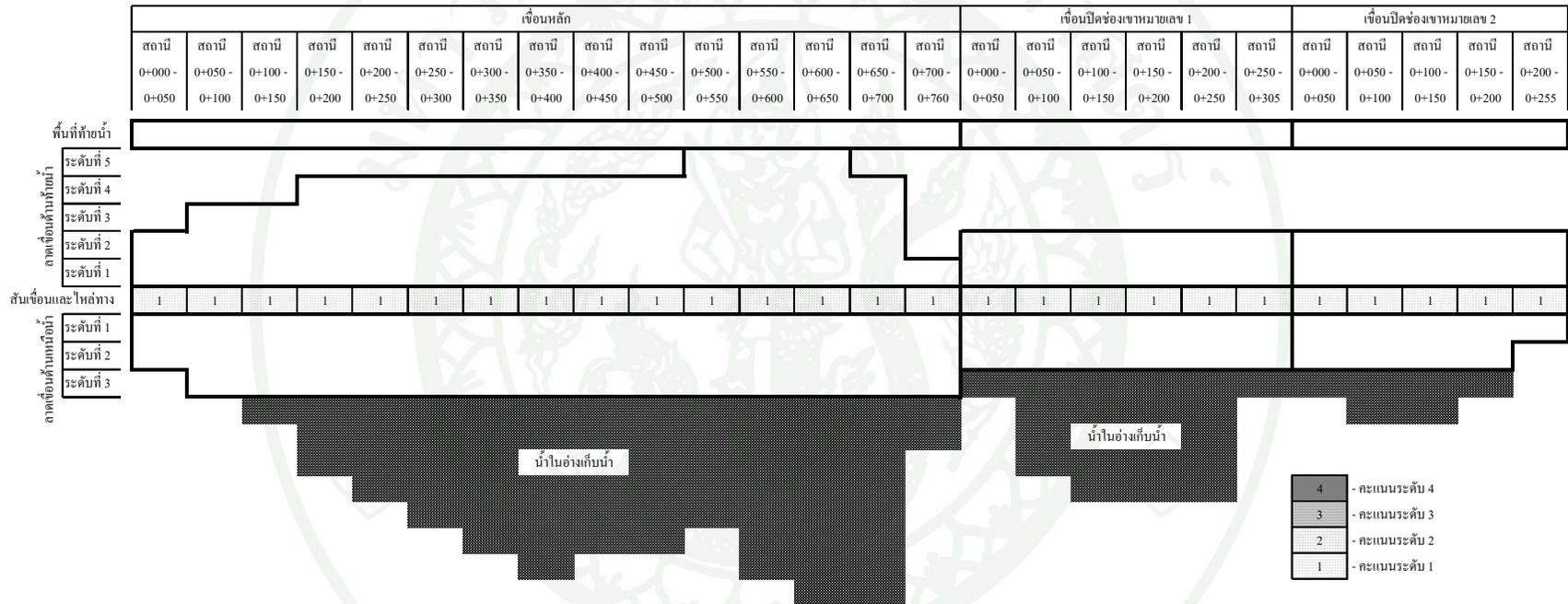
ภาพผนวกที่ ก13 คะแนนสภาพรอยแตกตามขวางและการบิคออกจากแนวที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)



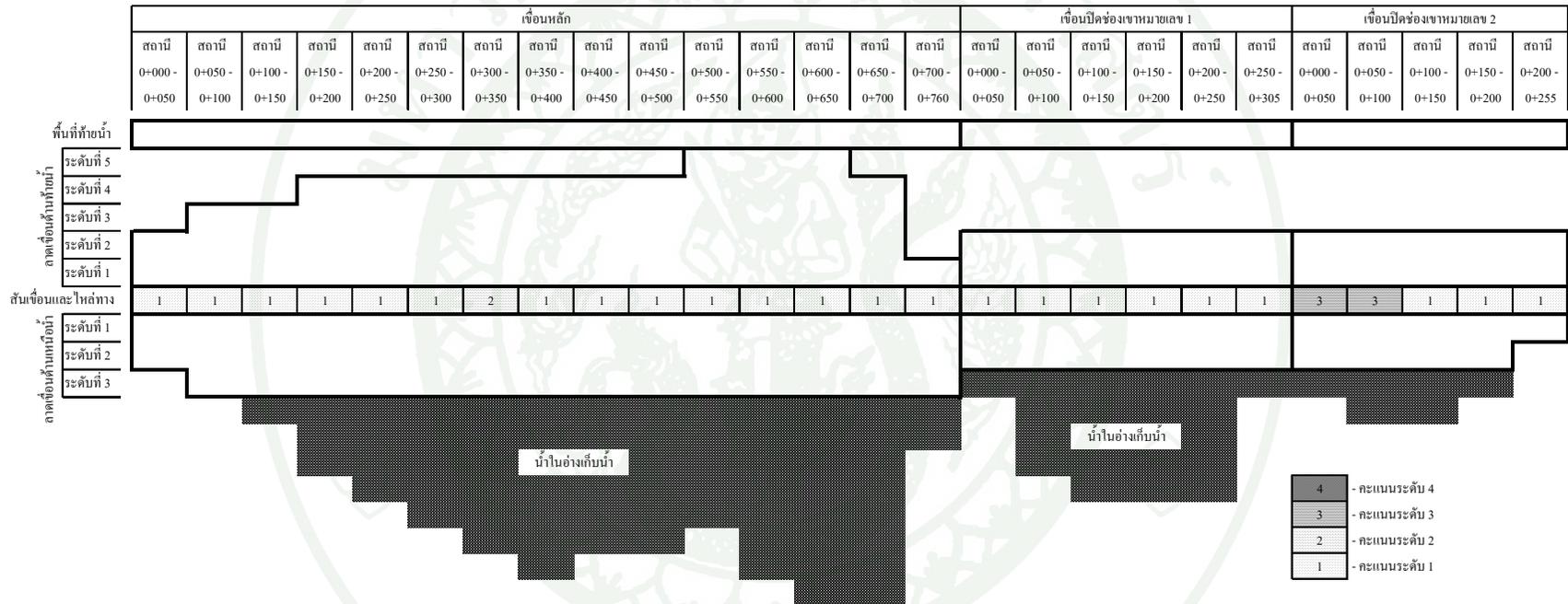
ภาพผนวกที่ ก14 ตะแนนสภาพรอยแตกตามยาวที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)



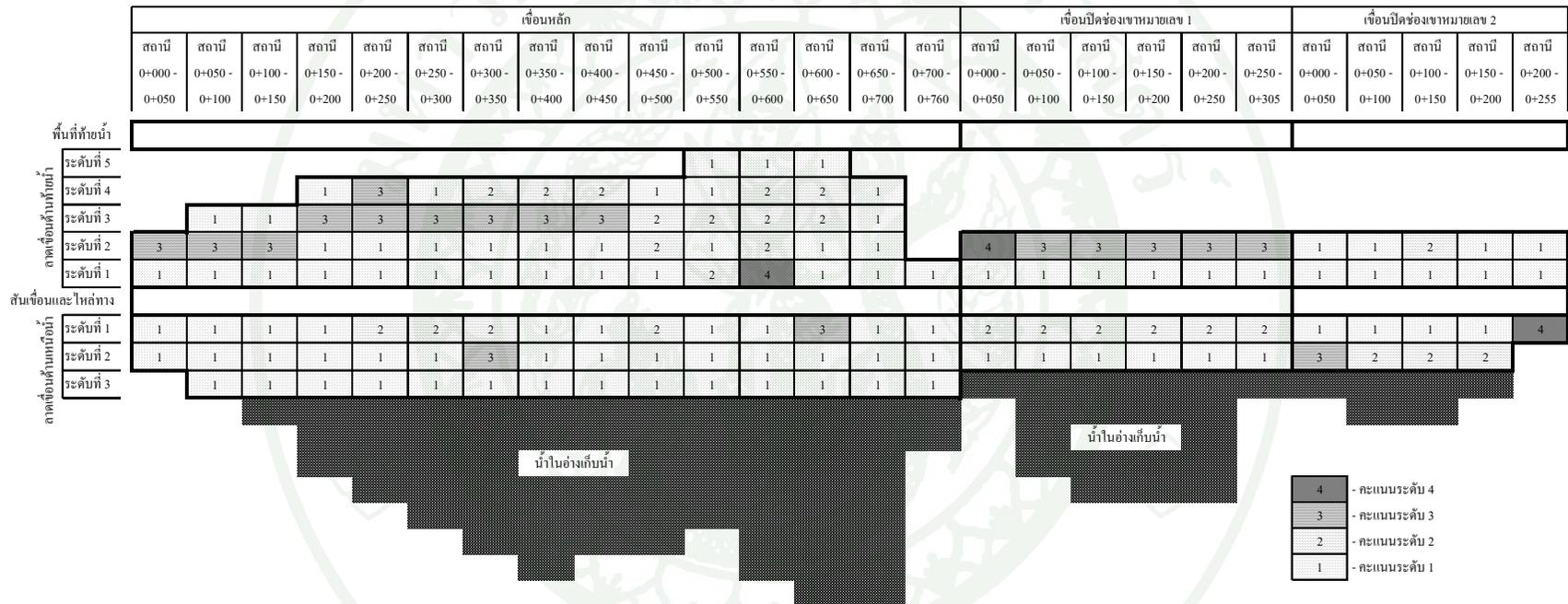
ภาพผนวกที่ 15 คะแนนสภาพสันเขื่อนบิโดออกจากแนวที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระงาน

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)



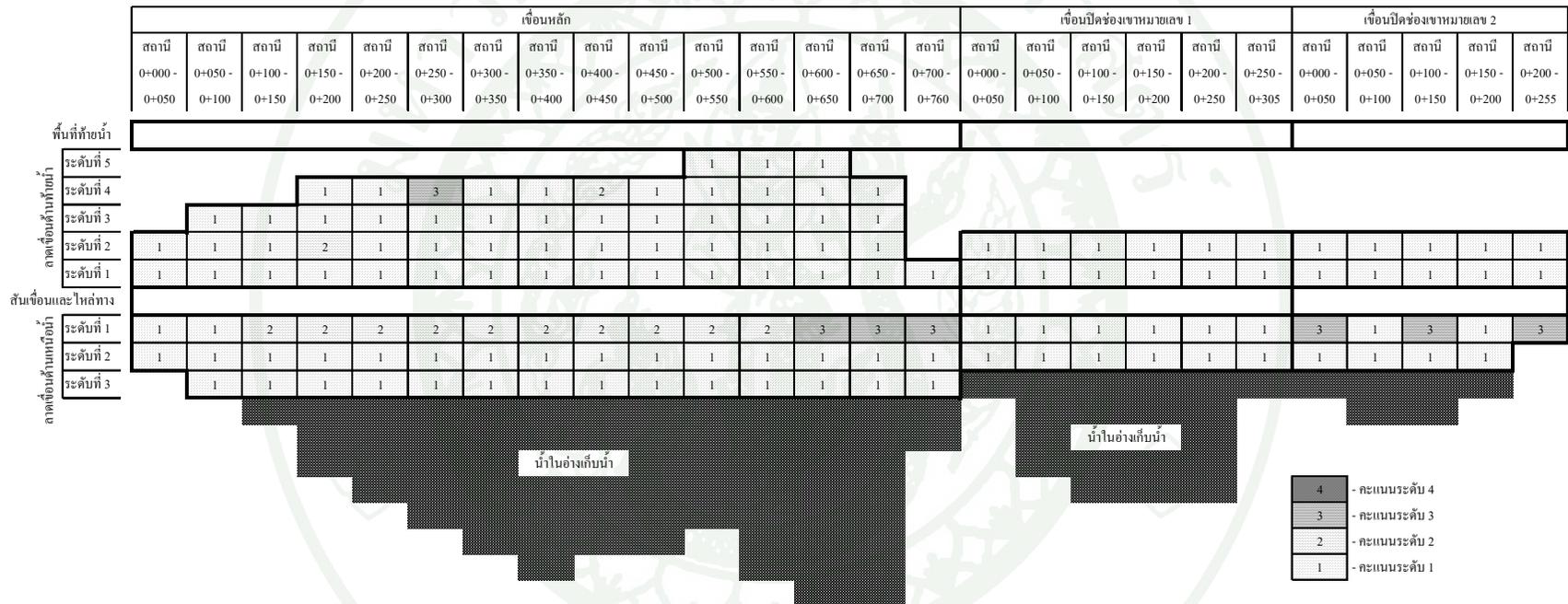
ภาพผนวกที่ 16 ตะแนนสภาพการกัดเซาะบริเวณสันเขื่อนที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)



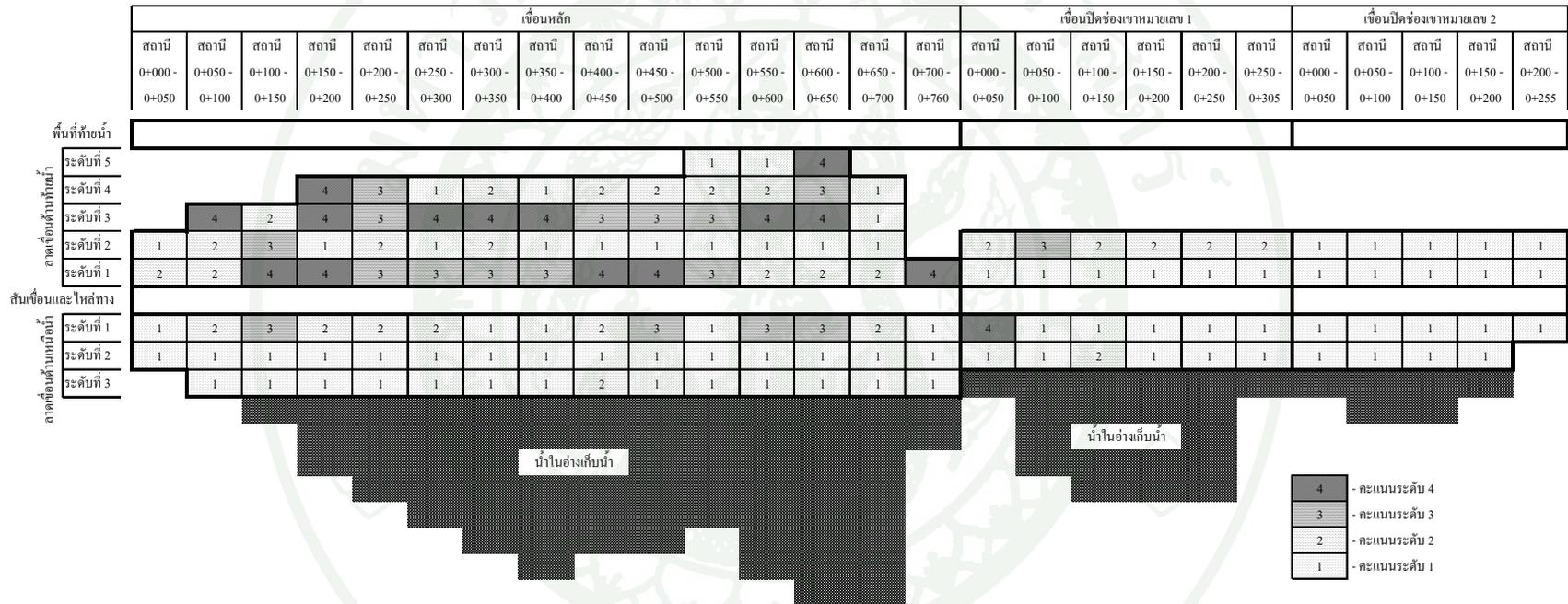
ภาพผนวกที่ 17 คะแนนสภาพการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อดตัวที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)



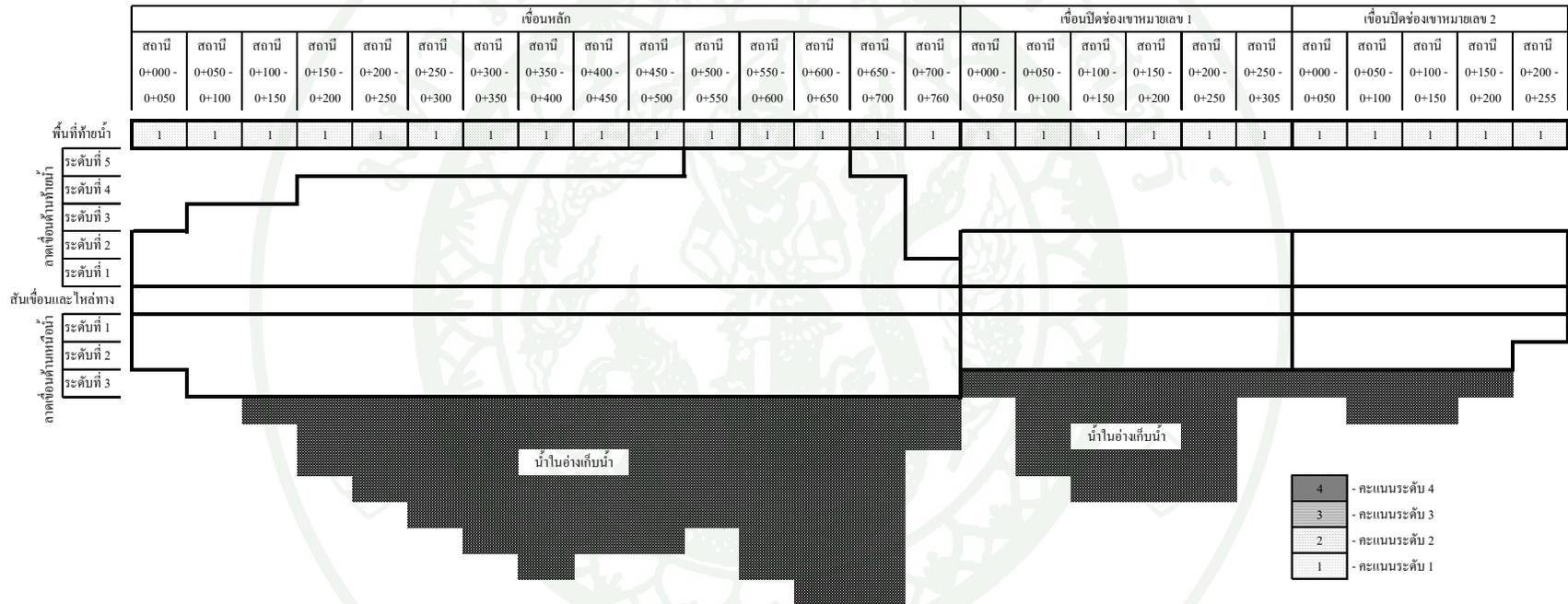
ภาพผนวกที่ 18 ตะแนนสภาพการยุบตัว (Consolidation) ที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)



ภาพผนวกที่ 19 คะแนนสภาพพื้นที่ร่องลึกจากการกัดเซาะฝิวจากน้ำฝนที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)



ภาพผนวกที่ ก20 ตะแนนสภาพพื้นที่อุ้มน้ำบริเวณท้ายน้ำที่เกิดขึ้นบริเวณเขื่อนแก่งกระจาน

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)

ตารางผนวกที่ ก1 คะแนนสภาพทางระบายน้ำล้นของเขื่อนแก่งกระจาน

ลำดับที่	สภาพความเสี่ยง	คะแนน
1	ความไม่มั่นคงของลาดทางเข้า ของอาคารระบายน้ำล้น	1
2	สภาพของท่อกันสวะ	4
3	รอยร้าวบริเวณผิวด้านข้างทาง ระบายน้ำ	1
4	การยุบตัวในแนวตั้ง	1
5	พื้นคอนกรีตของสันอาคาร ระบายน้ำล้นแตกร้าว	2

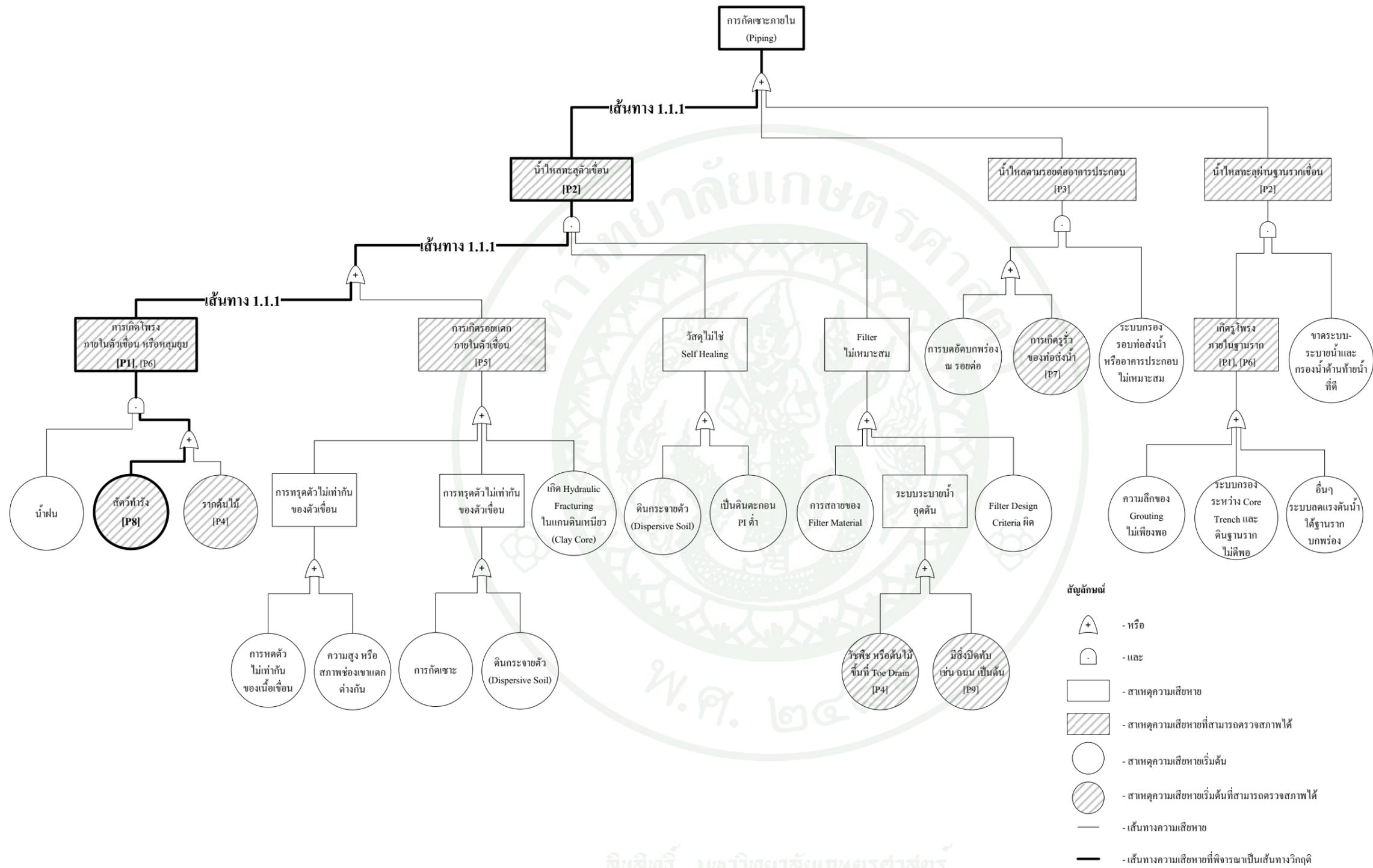
ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)

ตารางผนวกที่ ก2 คะแนนสภาพอาคารท่อส่งน้ำของเขื่อนแก่งกระจาน

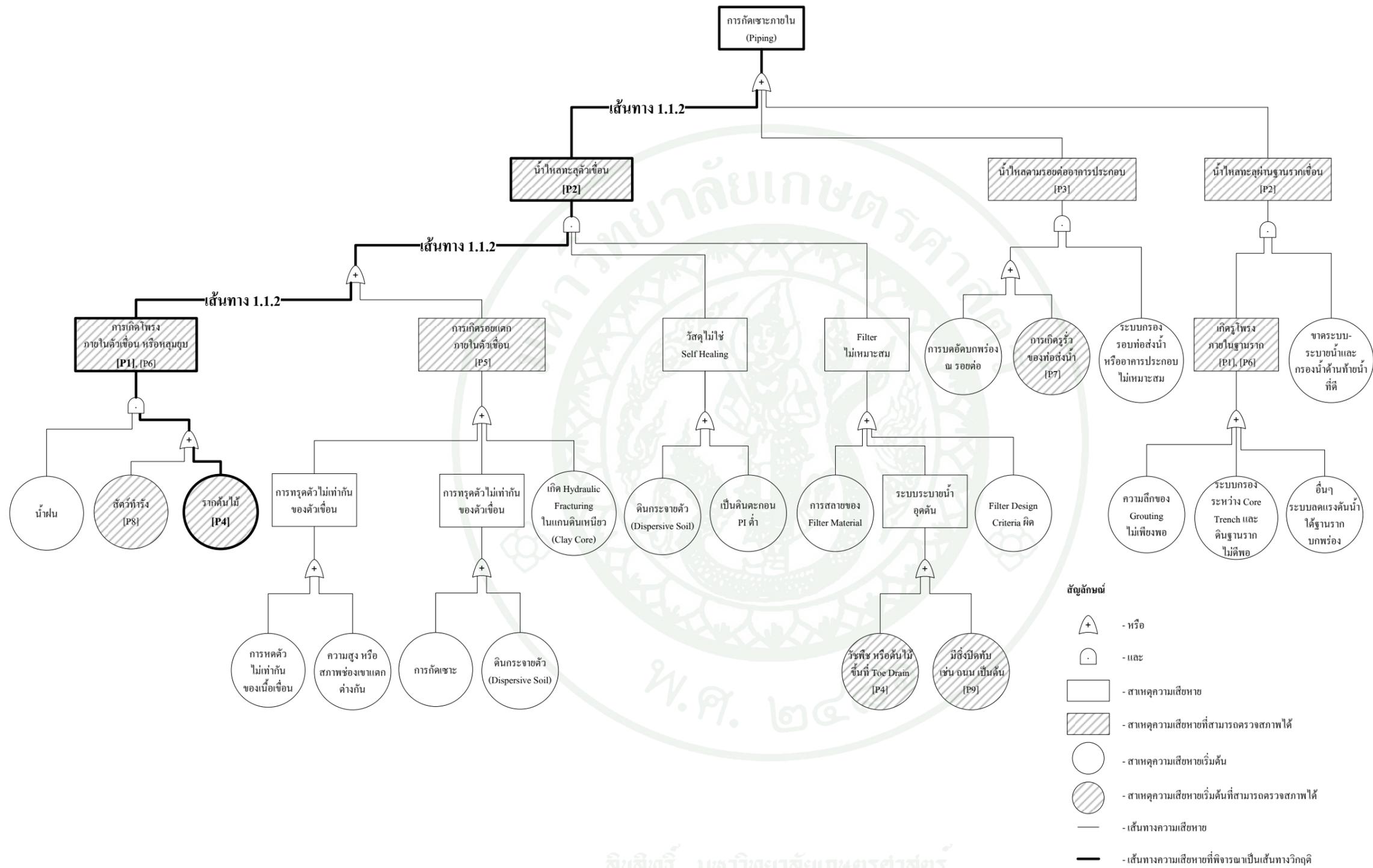
ลำดับที่	สภาพความเสี่ยง	คะแนน
1	สภาพของท่อกันสวะ	4
2	ประสิทธิภาพการเปิดวาล์ว ของท่อส่งน้ำ	3
3	น้ำโคลนไหลออกจากจุด ควบคุมการระบายน้ำท้าย เขื่อน	1
4	การรั่วซึมของท่อส่งน้ำ	3

ที่มา: สุทธิศักดิ์ และคณะ (2550)

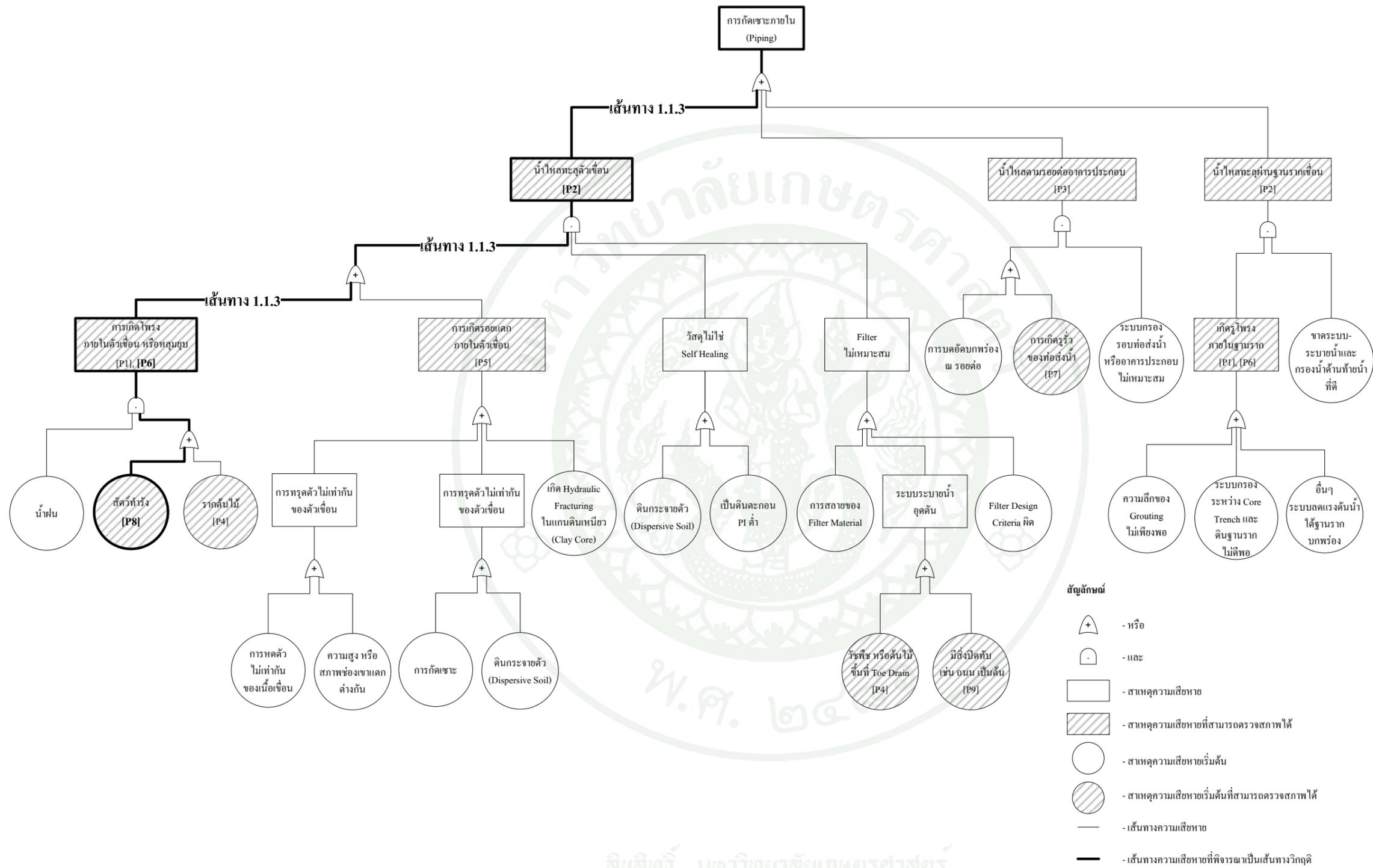




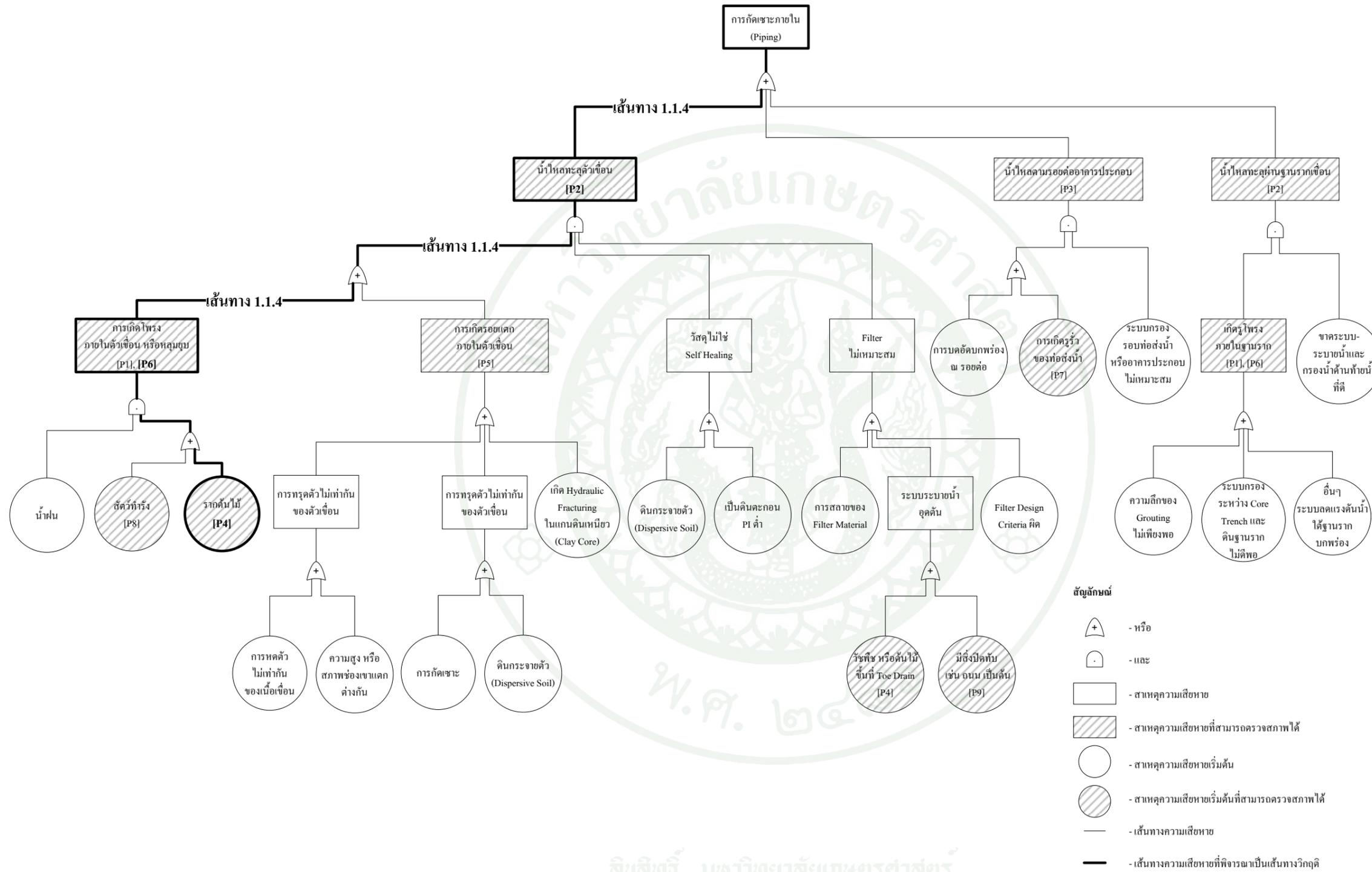
ภาพผนวกที่ ข1 เส้นทางการพินิจของการกัดเซาะภายใน เส้นทางที่ 1.1.1



ภาพผนวกที่ ข2 เส้นทางการพิบัติของการกัดเซาะภายใน เส้นทางที่ 1.1.2

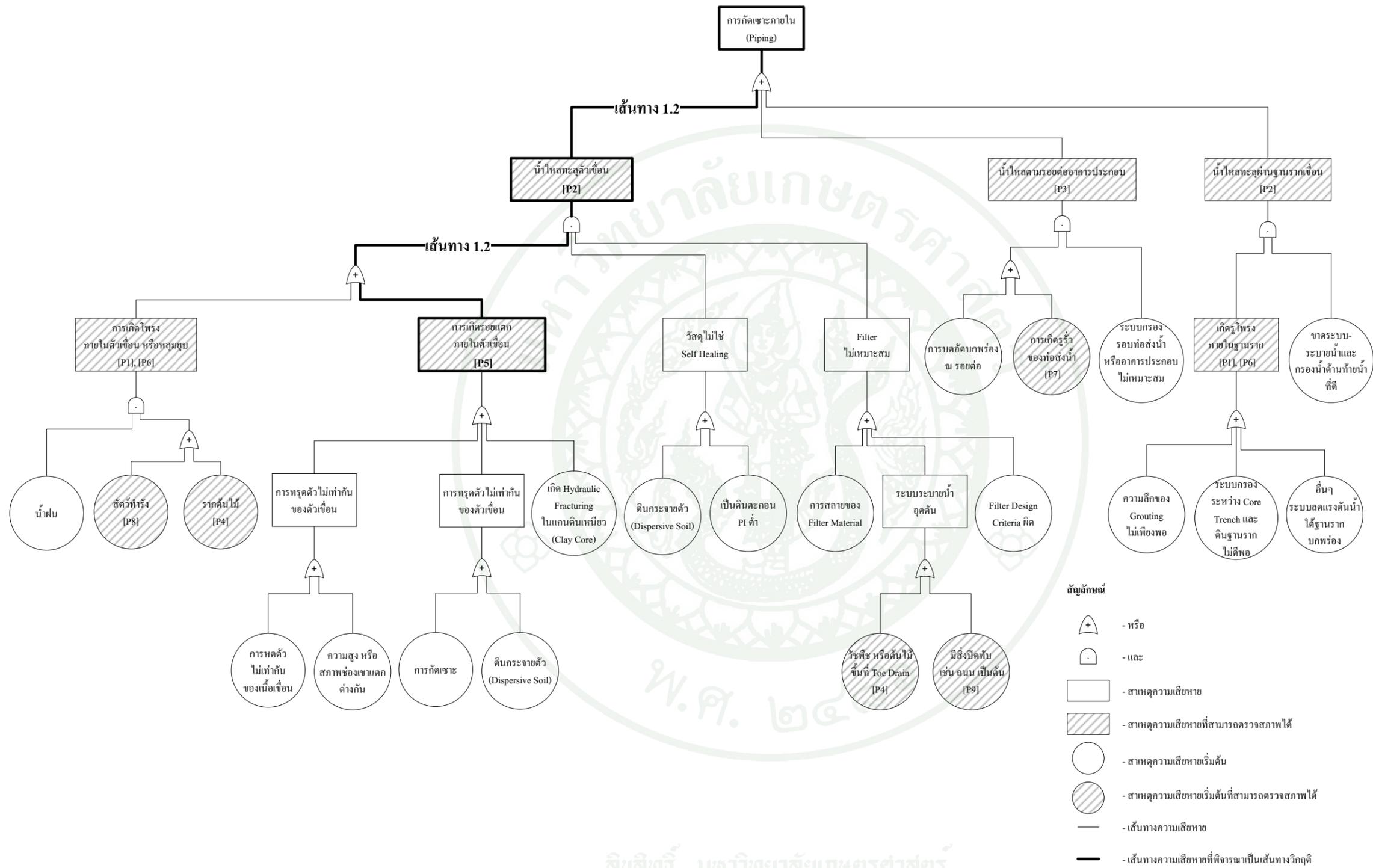


ภาพผนวกที่ ข3 เส้นทางการพิบัติของการกัดเซาะภายใน เส้นทางที่ 1.1.3

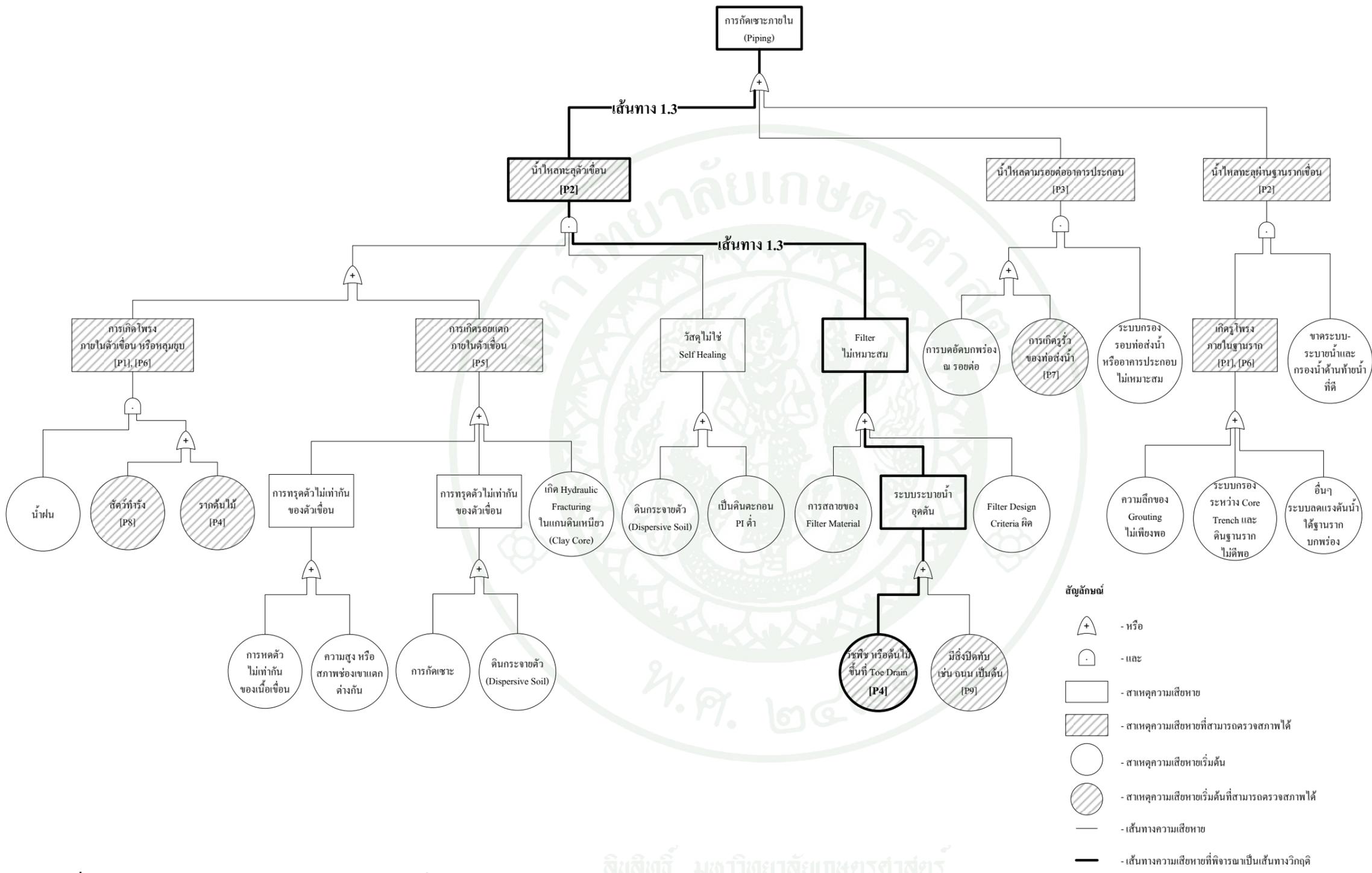


ภาพผนวกที่ ๔ เส้นทางการพิบัติของการกัดเซาะภายใน เส้นทางการ 1.1.4

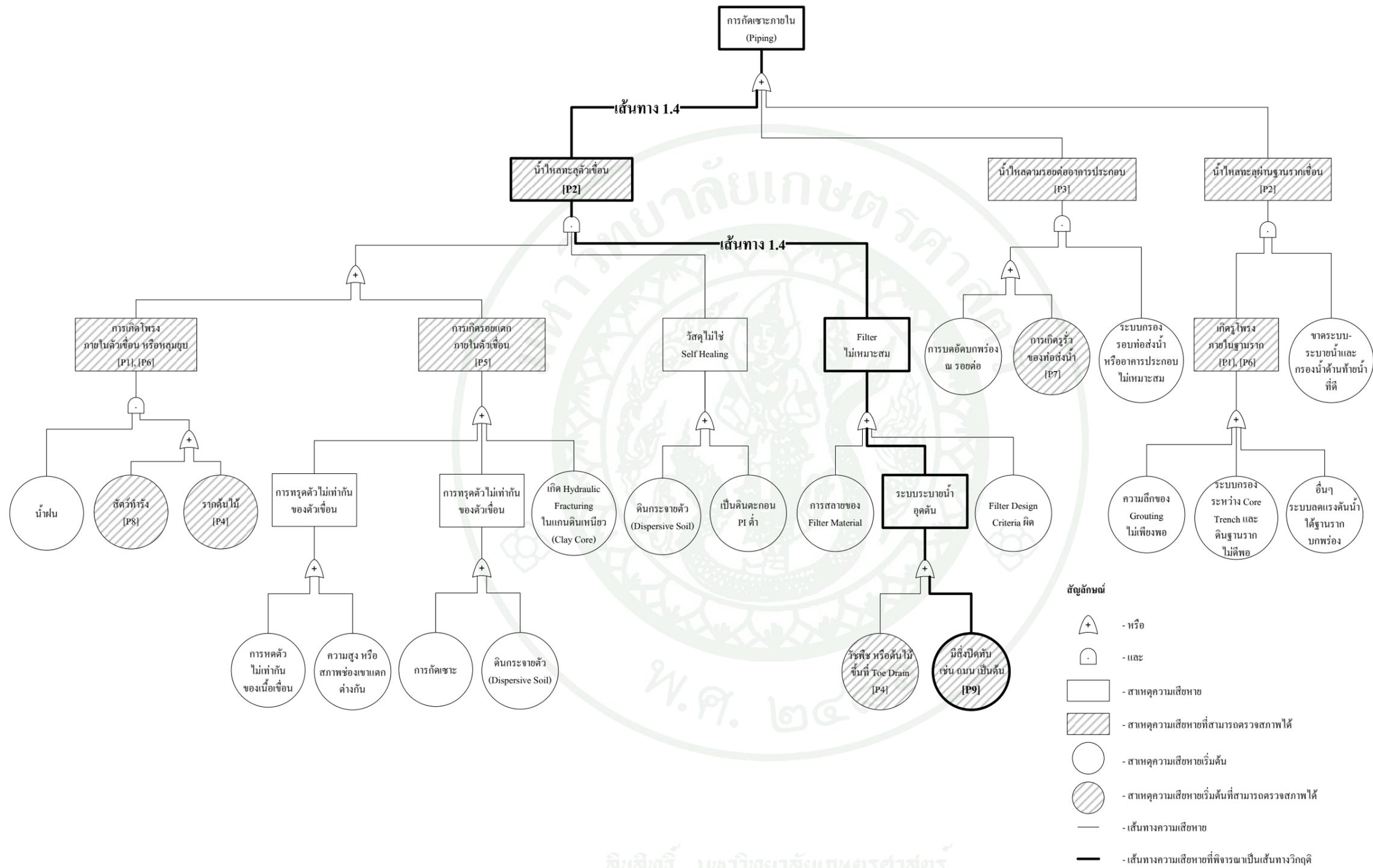
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



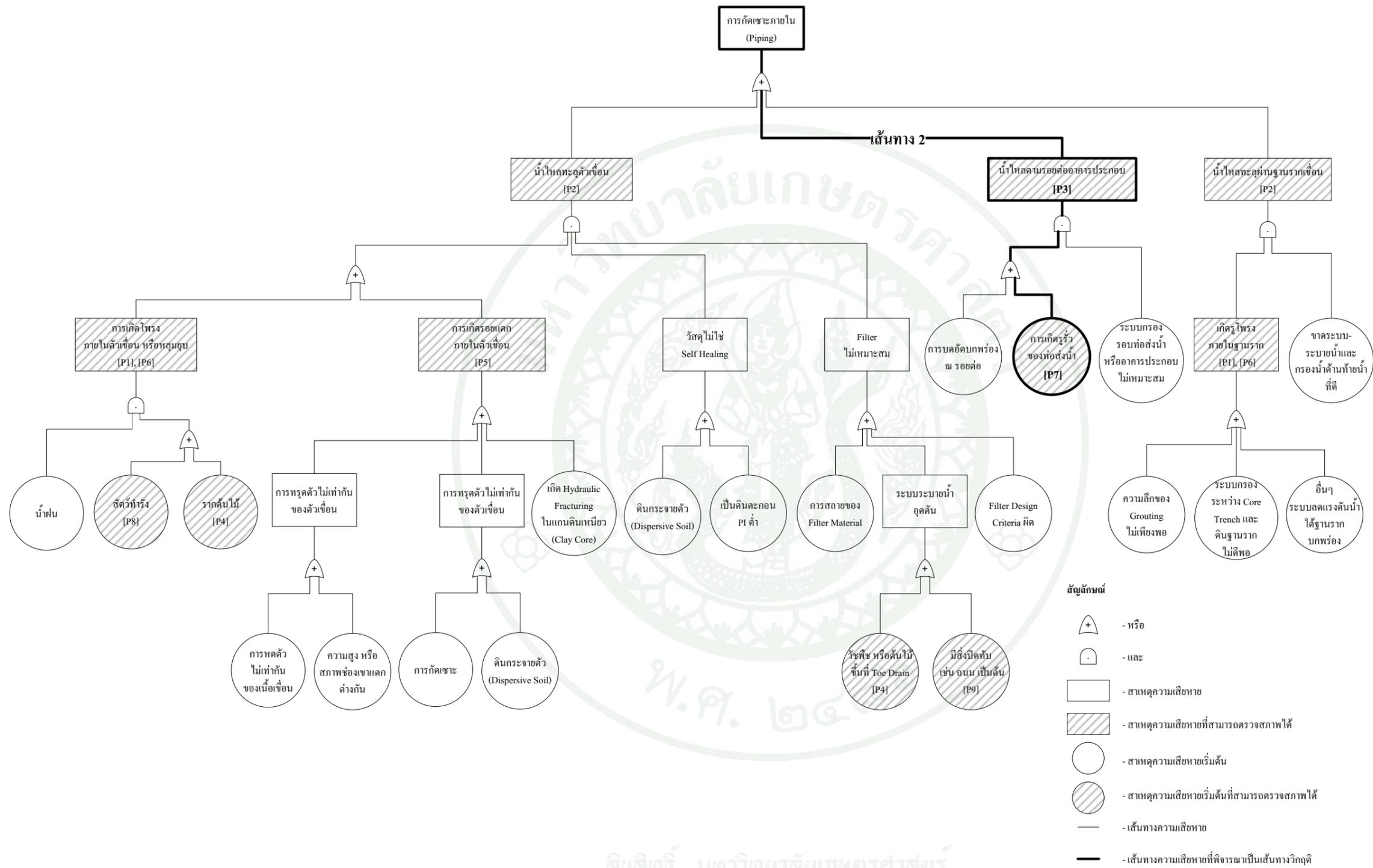
ภาพผนวกที่ ๕ เส้นทางการพิบัติของการกัดเซาะภายใน เส้นทางที่ 1.2



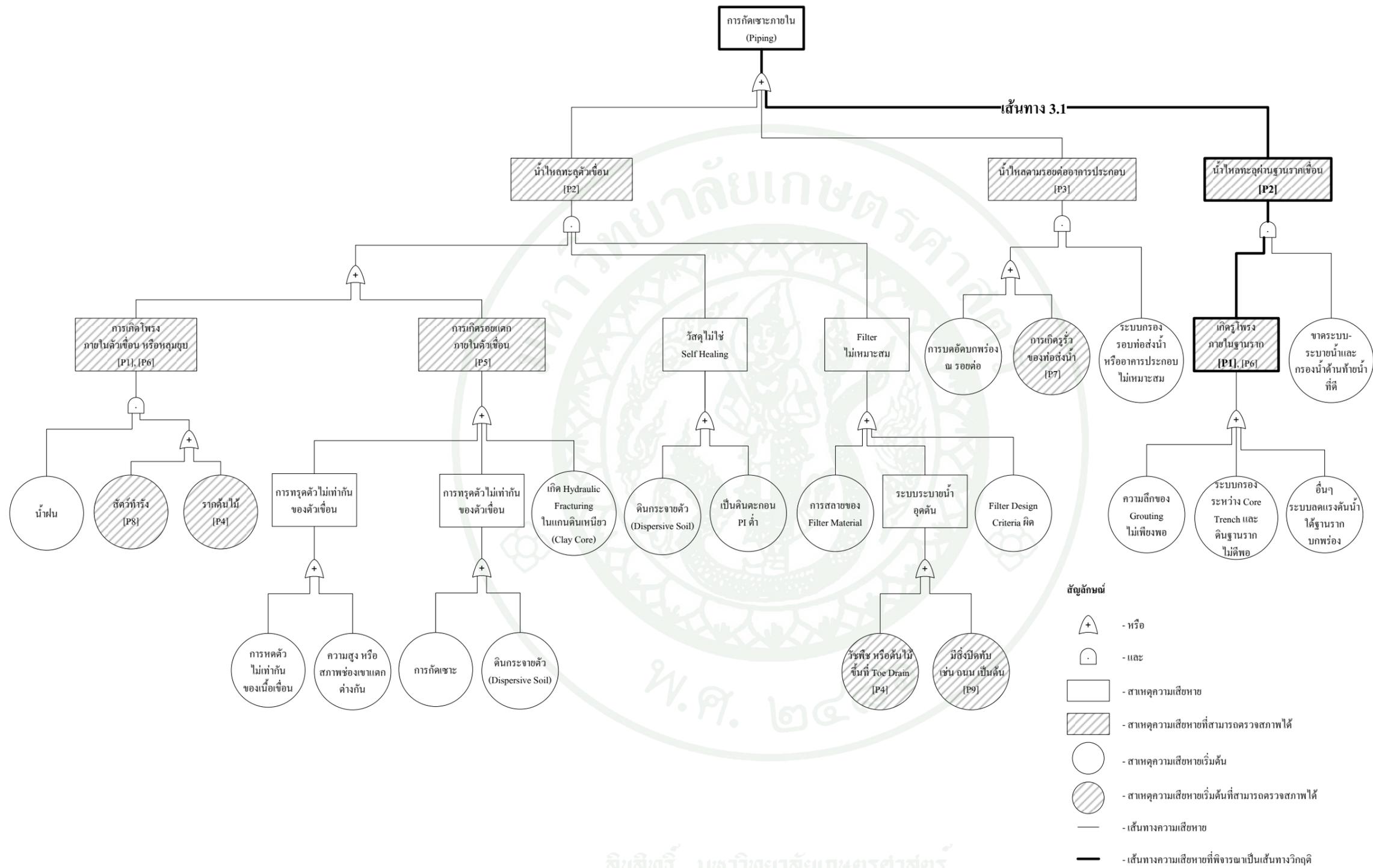
ภาพผนวกที่ ๖6 เส้นทางการพิบัติของการกัดเซาะภายใน เส้นทางการ 1.3



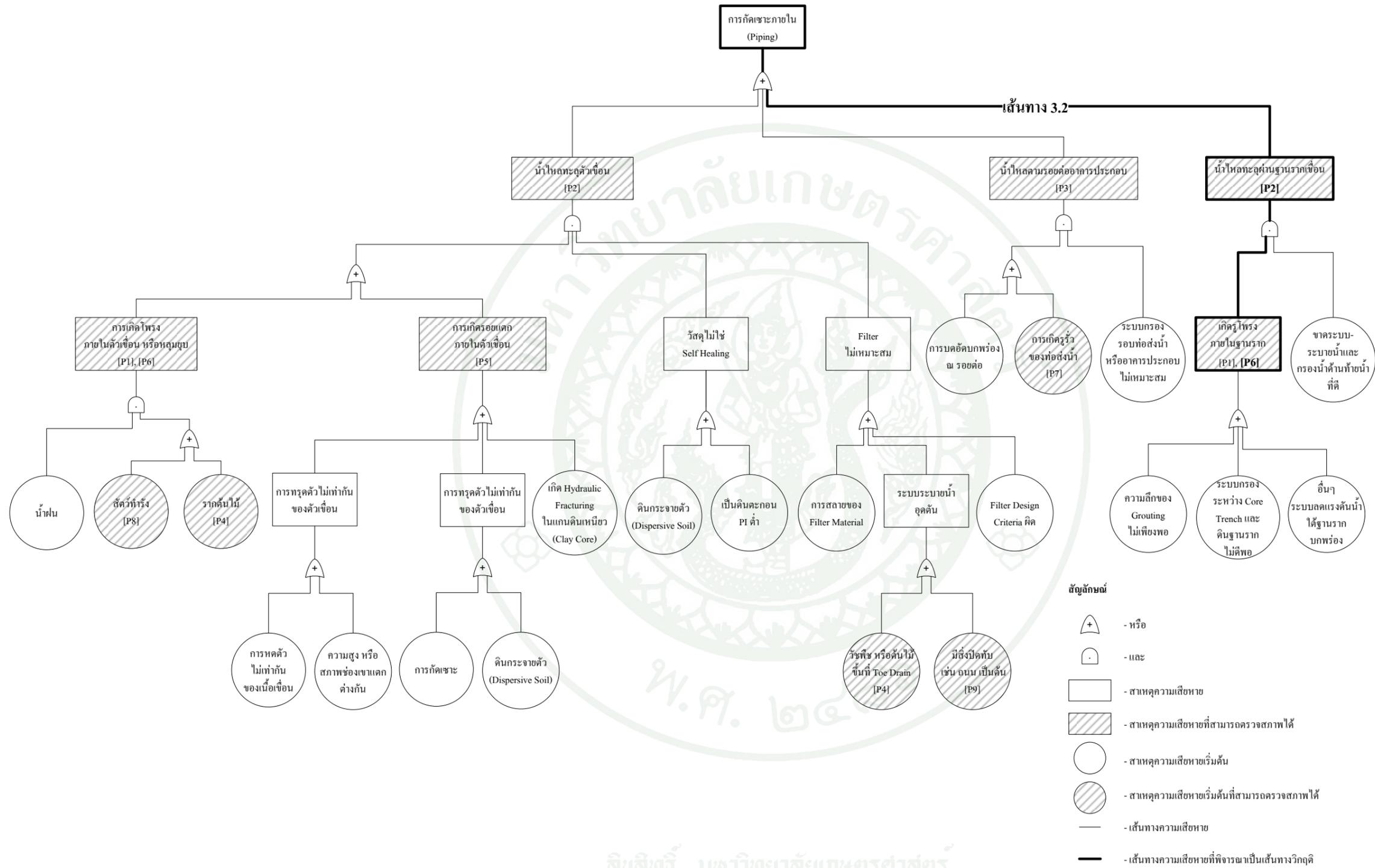
ภาพผนวกที่ ๗7 เส้นทางการพินิจของการกัดเซาะภายใน เส้นทางที่ 1.4



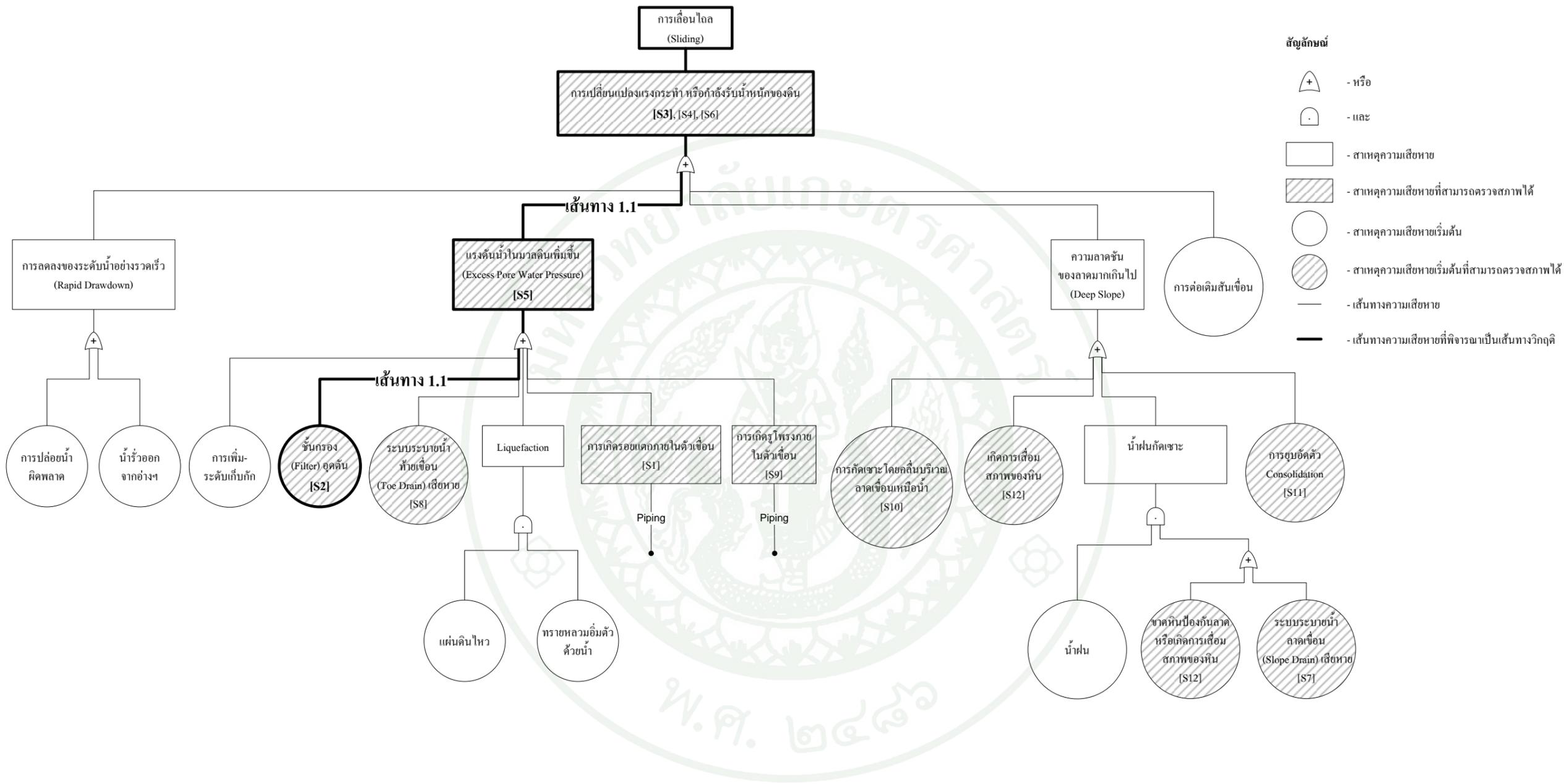
ภาพผนวกที่ ข8 เส้นทางการพิบัติของการกัดเซาะภายใน เส้นทางที่ 2



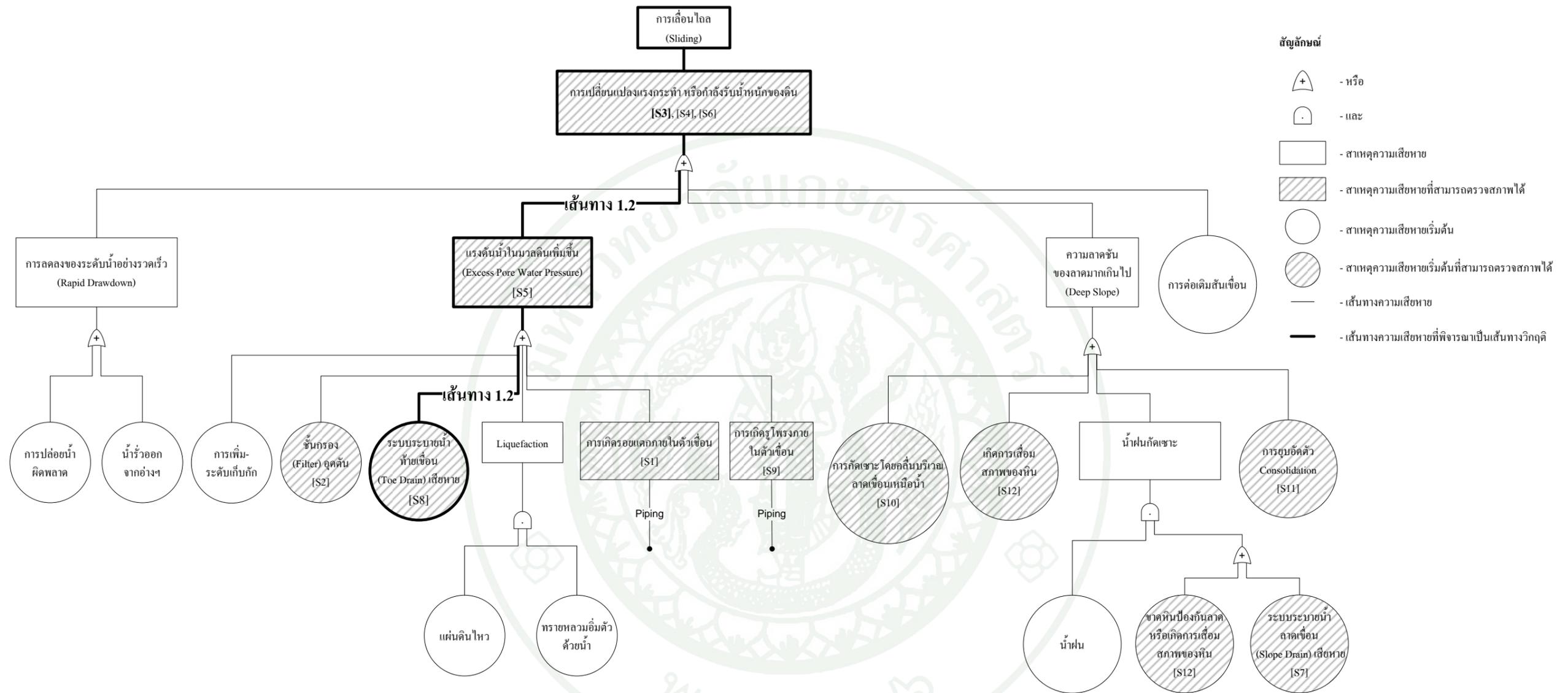
ภาพผนวกที่ ๙ เส้นทางการพิบัติของการกัดเซาะภายใน เส้นทางที่ 3.1



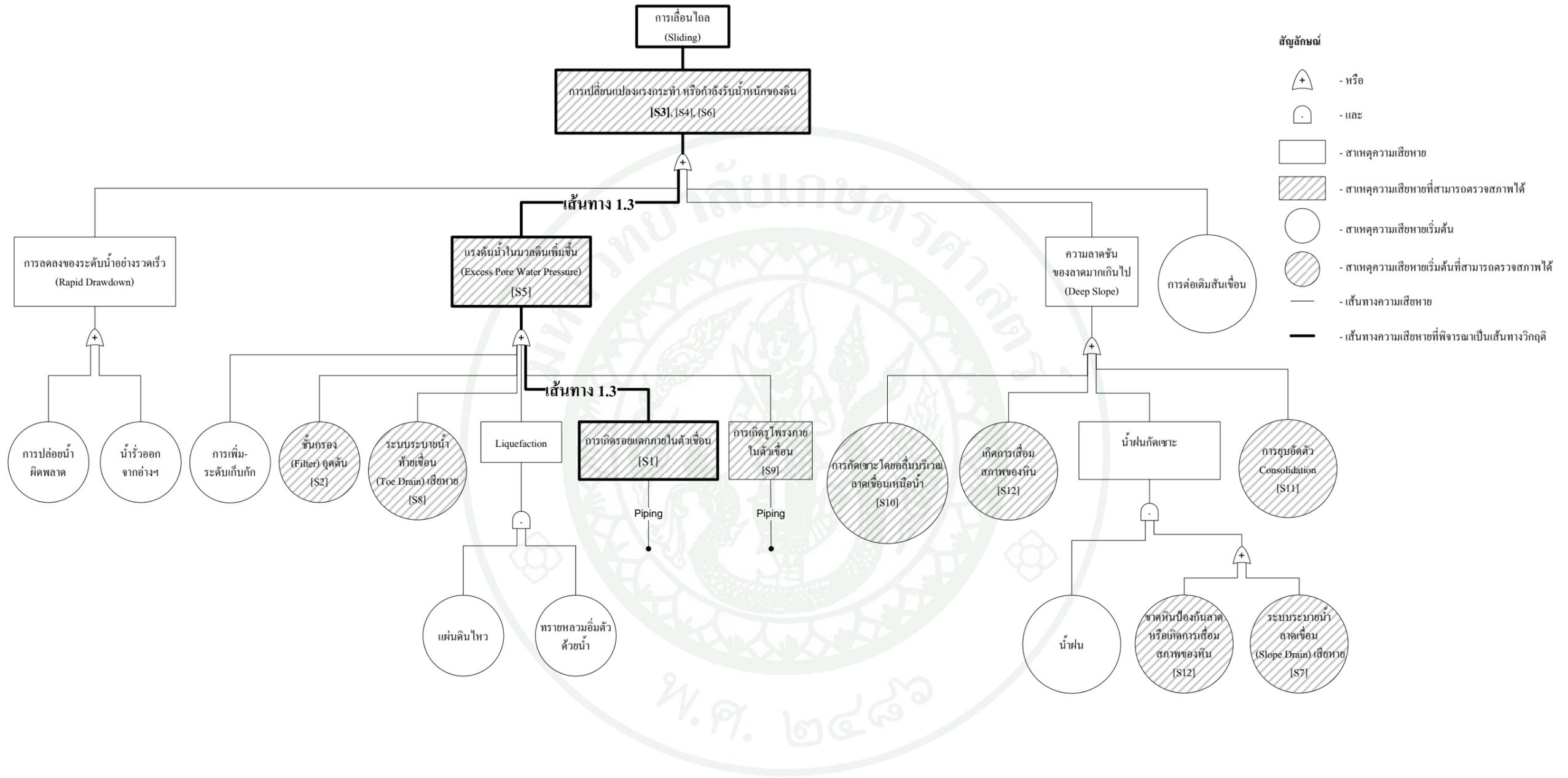
ภาพผนวกที่ ข10 เส้นทางการพิบัติของการกักเซาะภายใน เส้นทางที่ 3.2



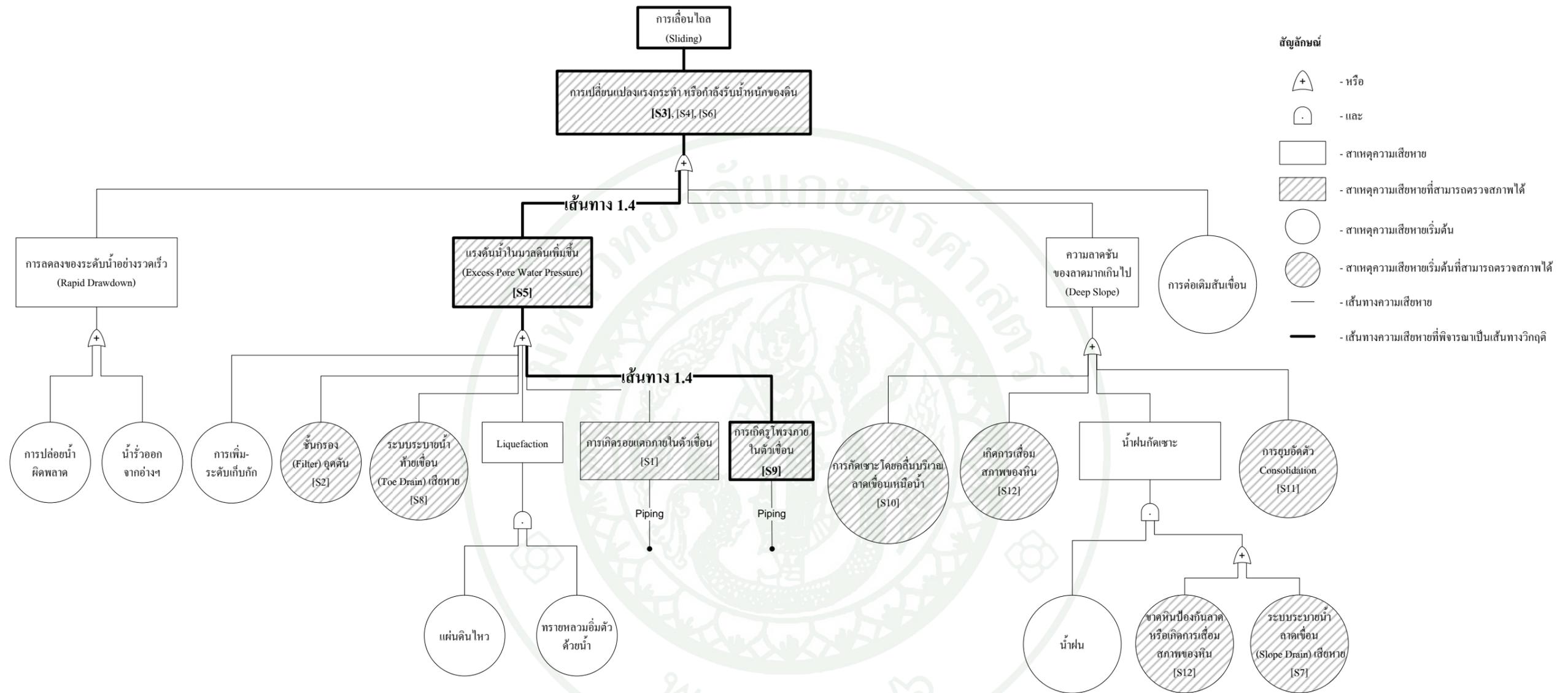
ภาพผนวกที่ ข11 เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางการที่ 1.1



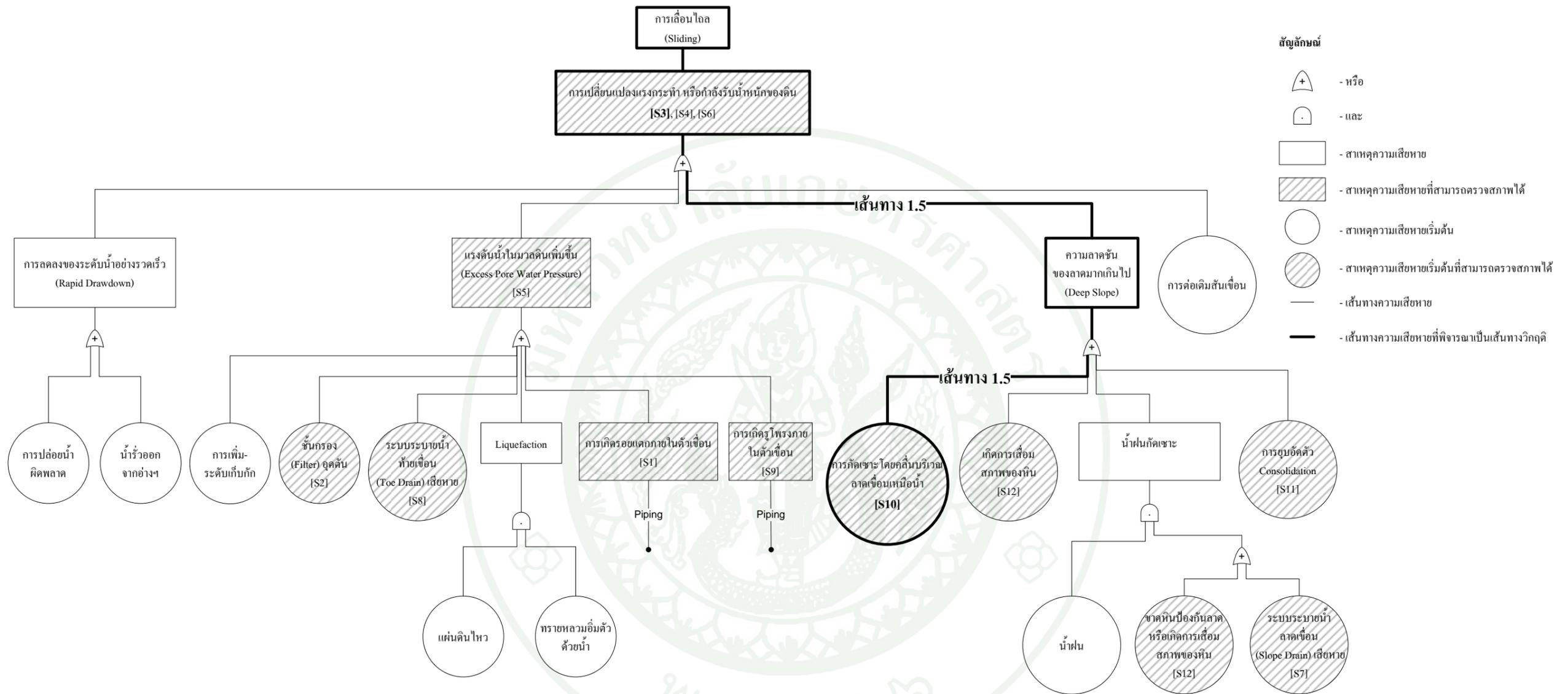
ภาพผนวกที่ ข12 เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางการที่ 1.2



ภาพผนวกที่ ข13 เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 1.3



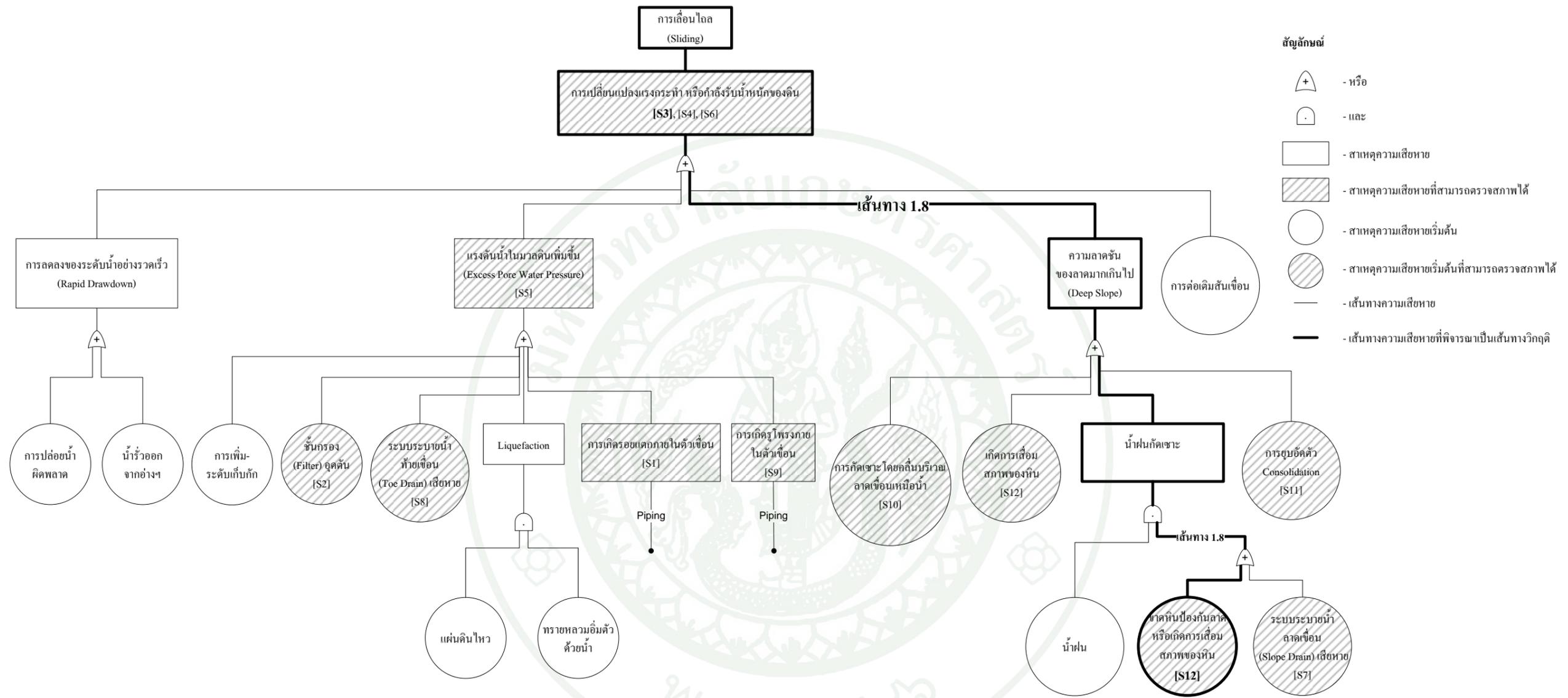
ภาพผนวกที่ ข14 เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 1.4



ภาพผนวกที่ ข15 เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 1.5

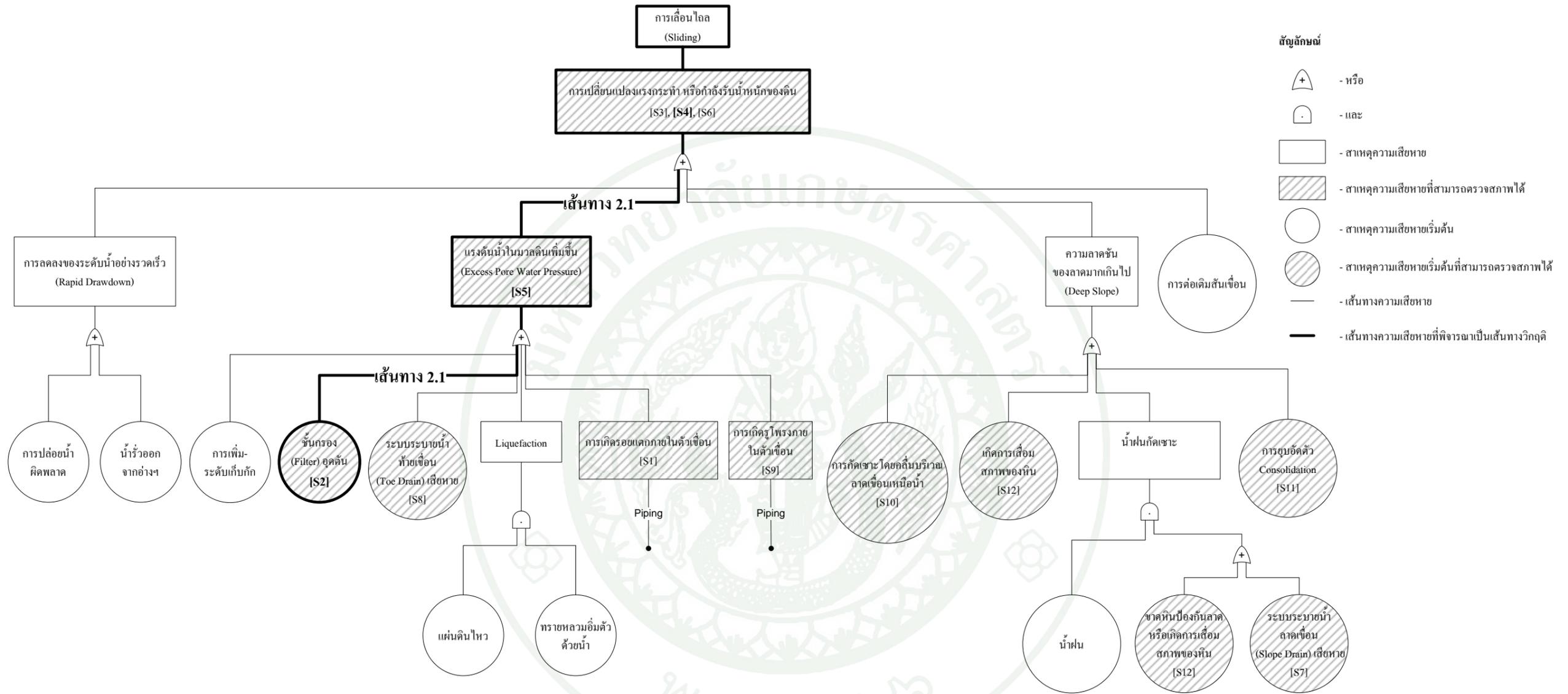




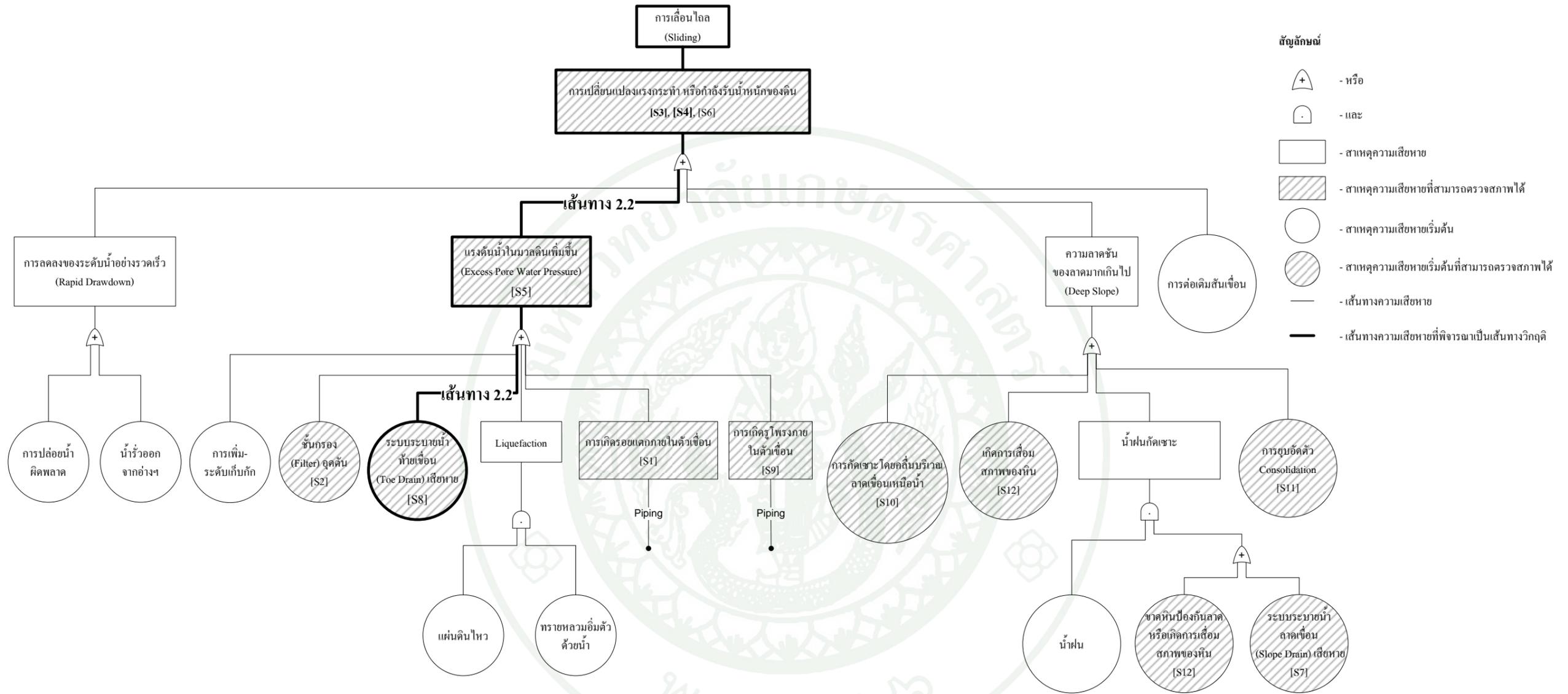


ภาพผนวกที่ 18 เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 1.8

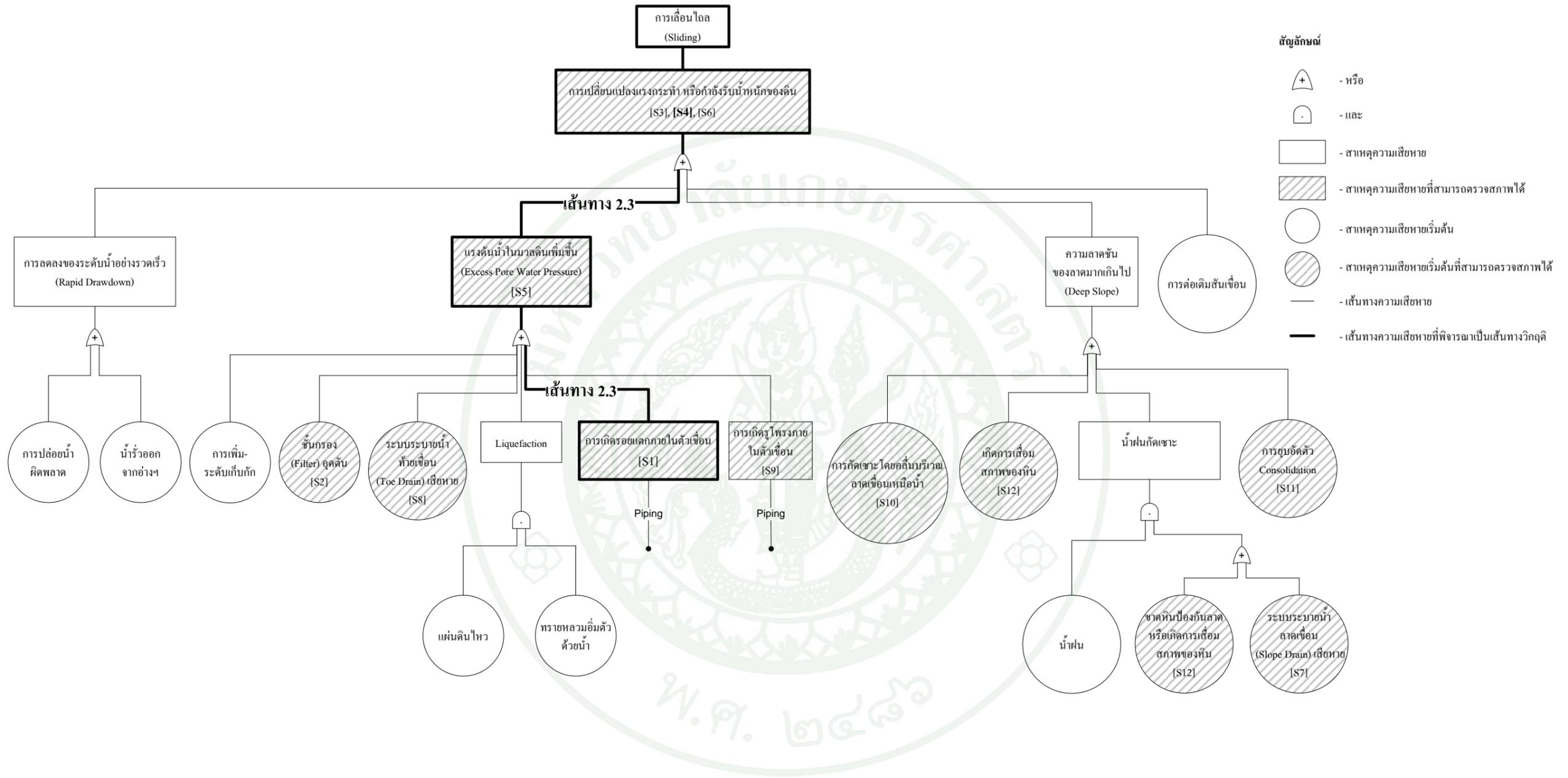




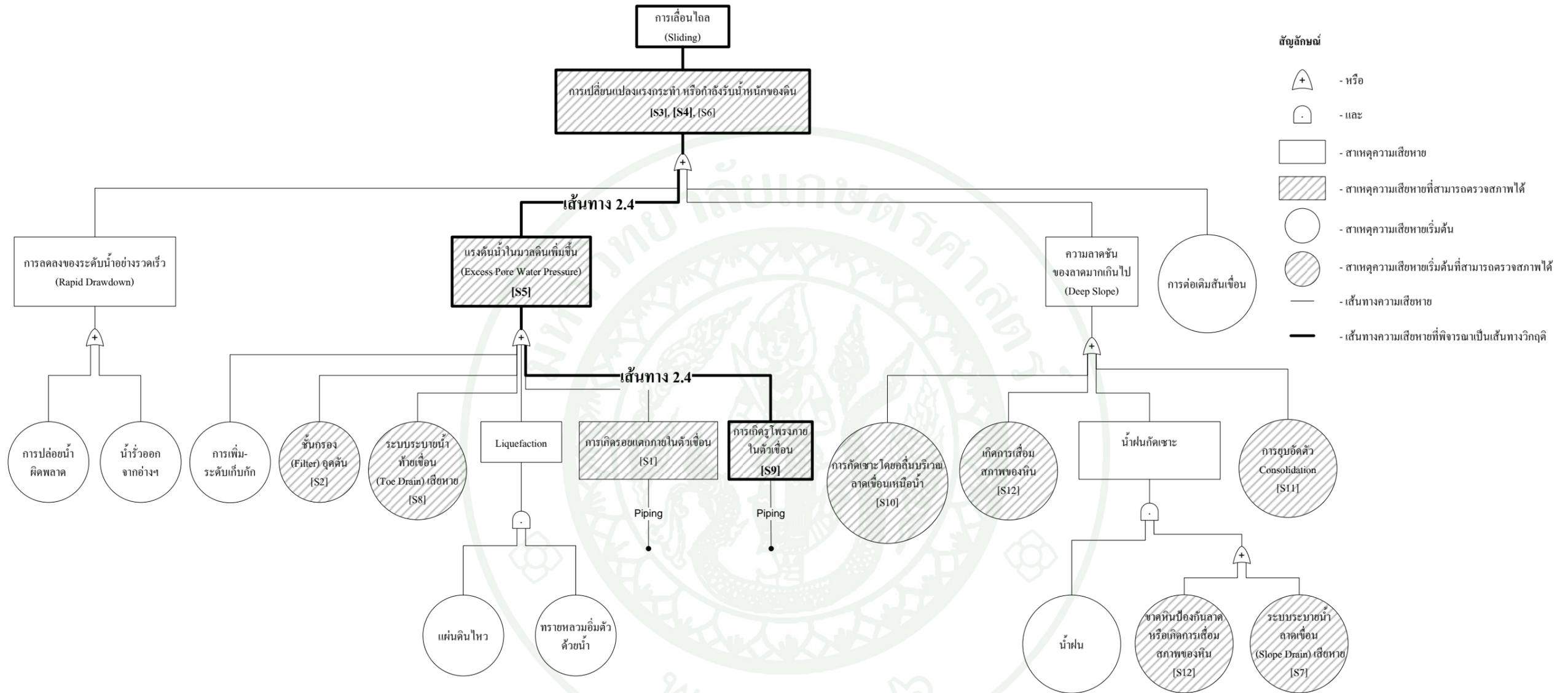
ภาพผนวกที่ ๒๐ เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 2.1



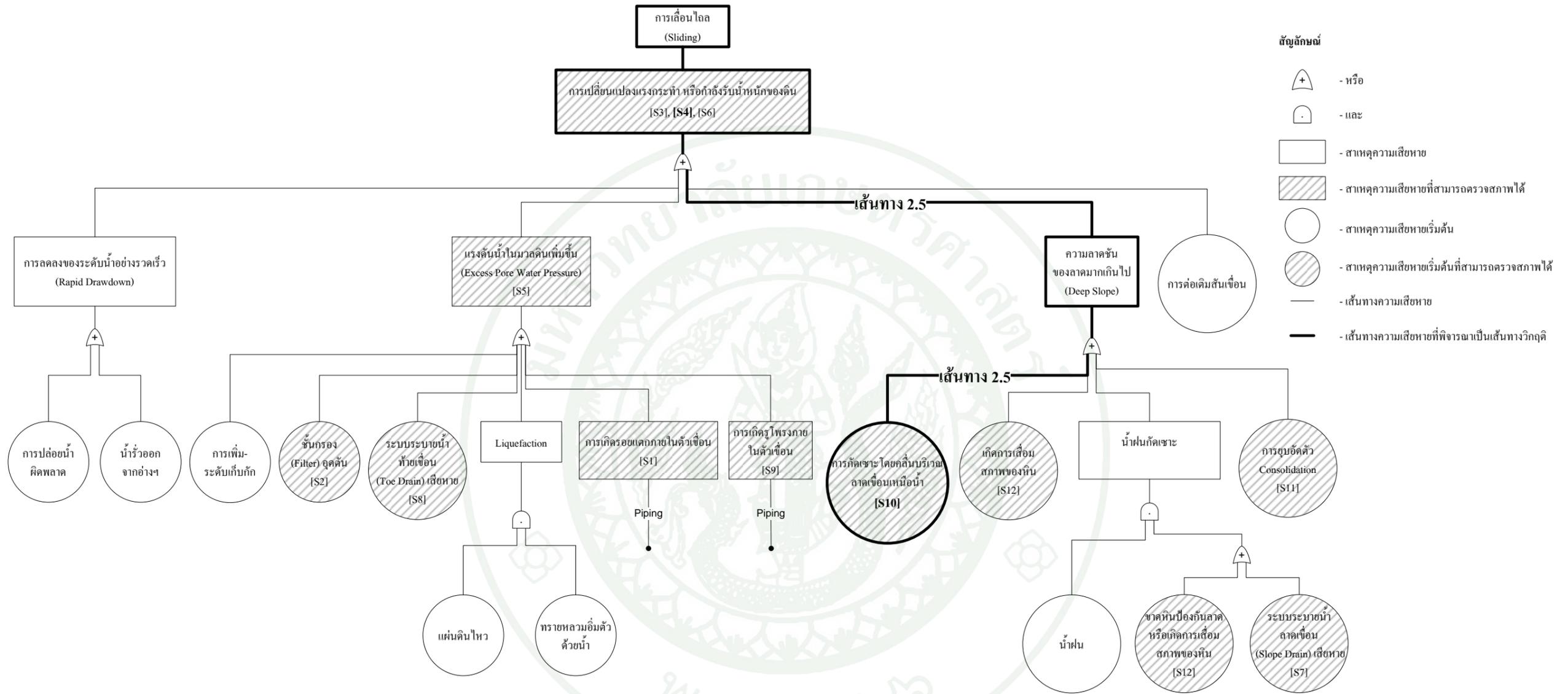
ภาพผนวกที่ ข21 เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางการ 2.2



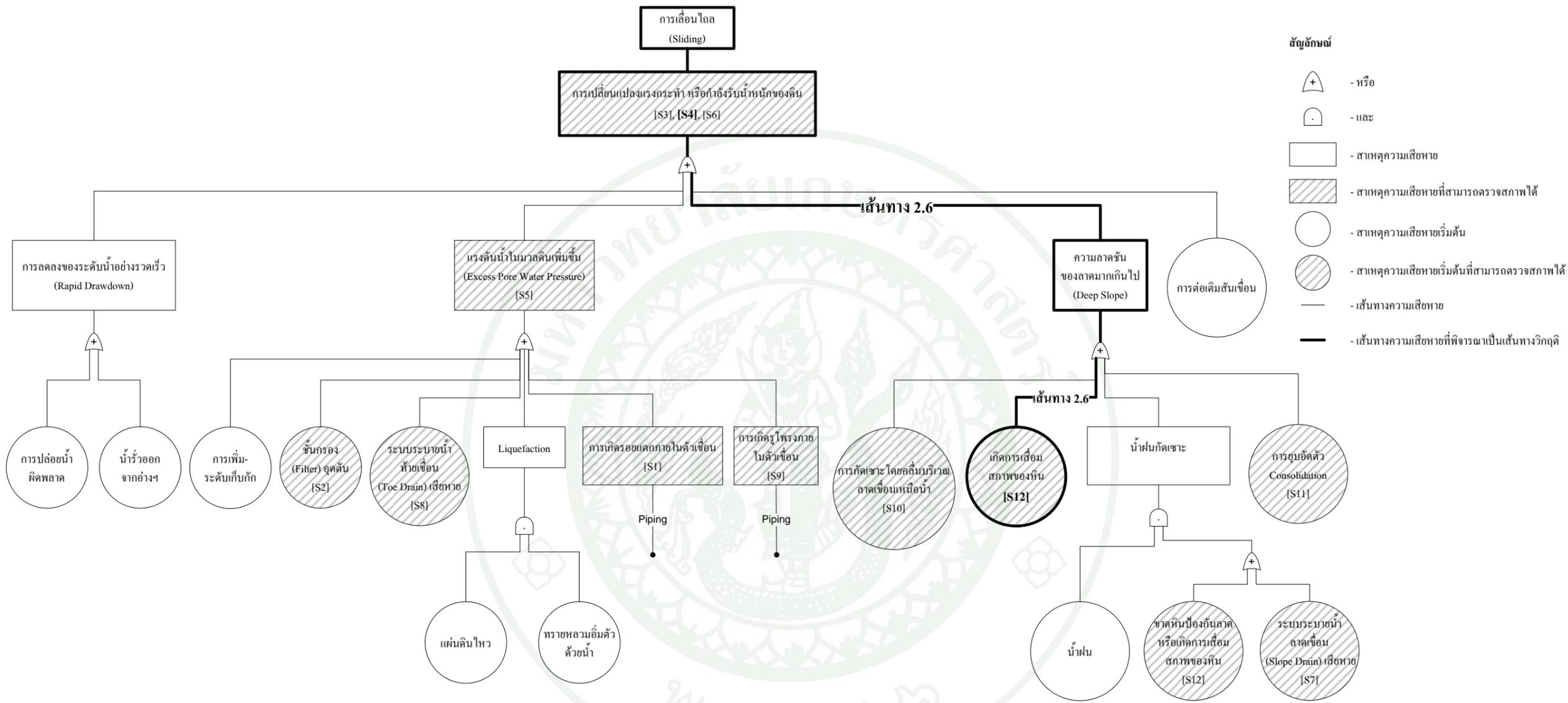
ภาพผนวกที่ ข22 เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 2.3



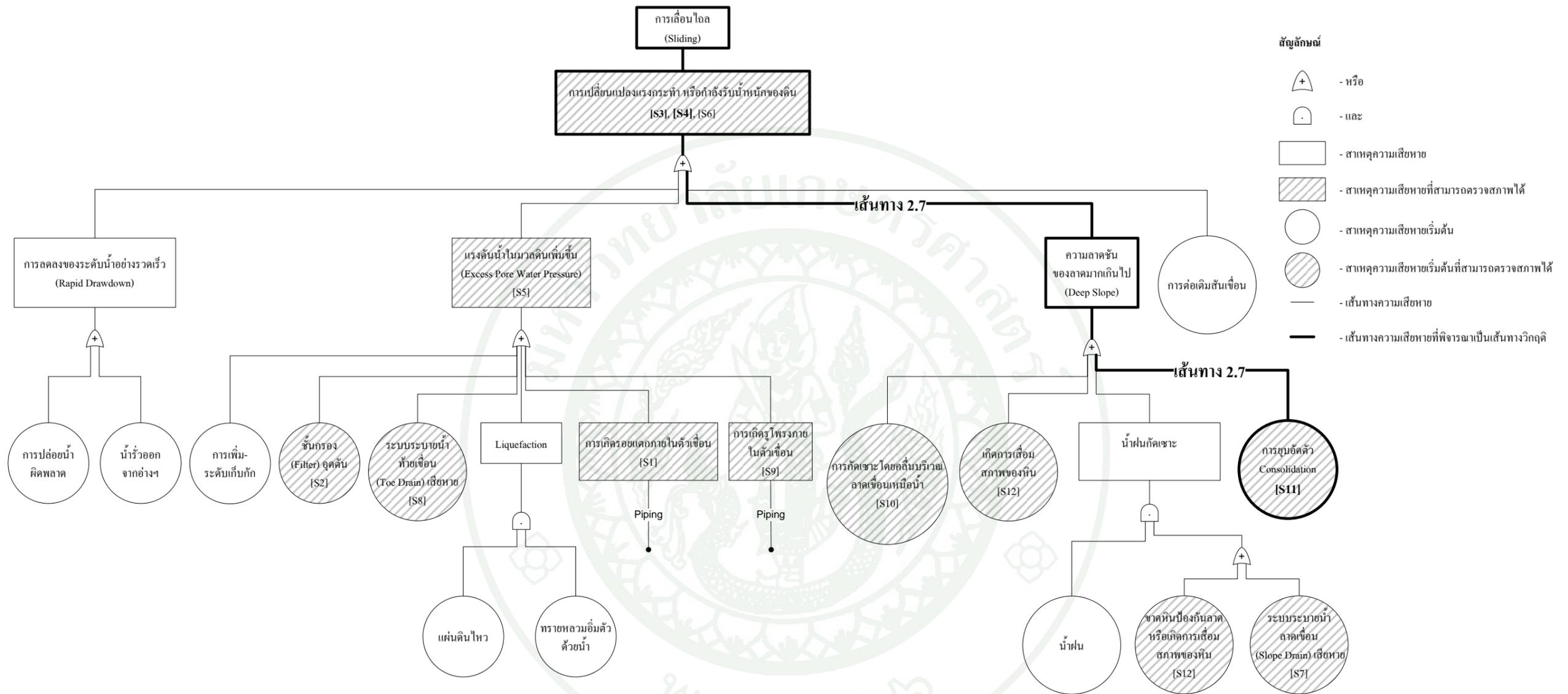
ภาพผนวกที่ ข23 เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 2.4



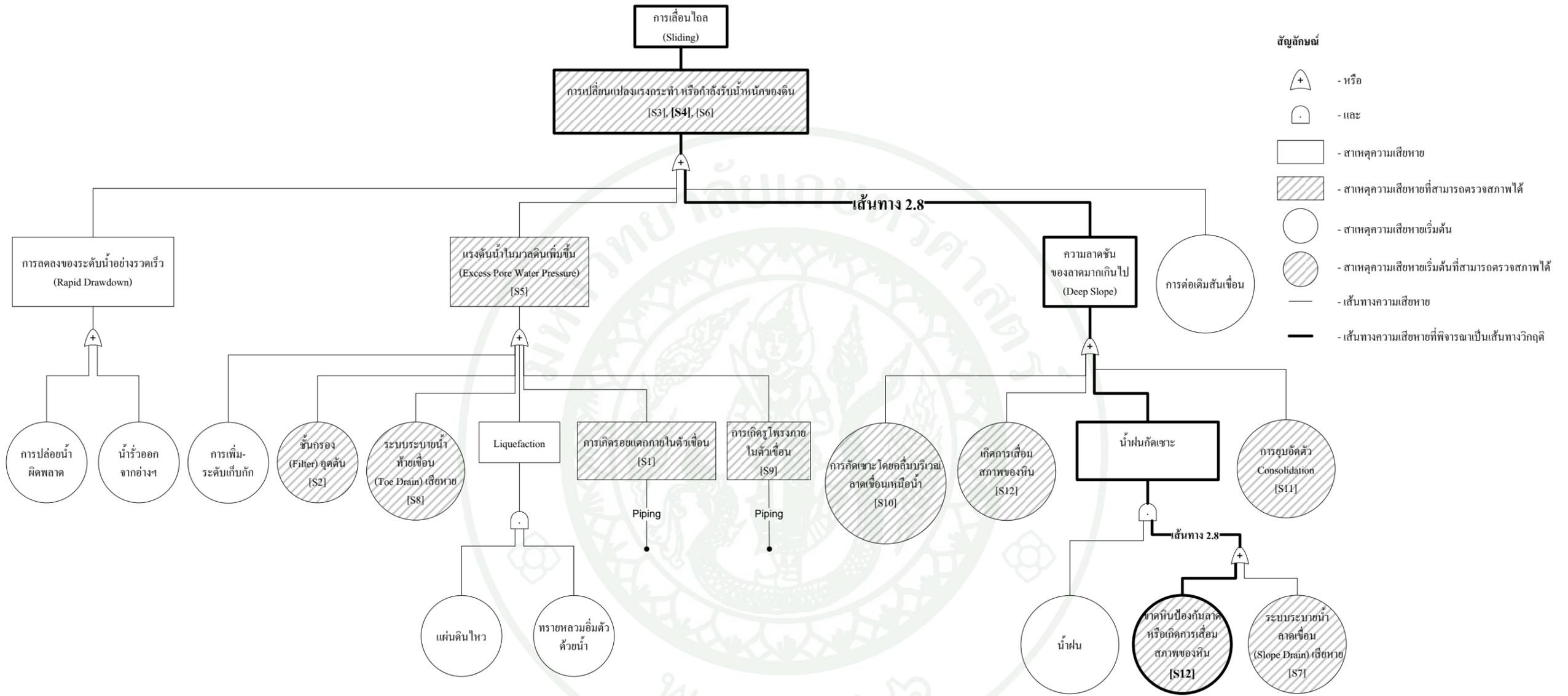
ภาพผนวกที่ ข24 เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 2.5



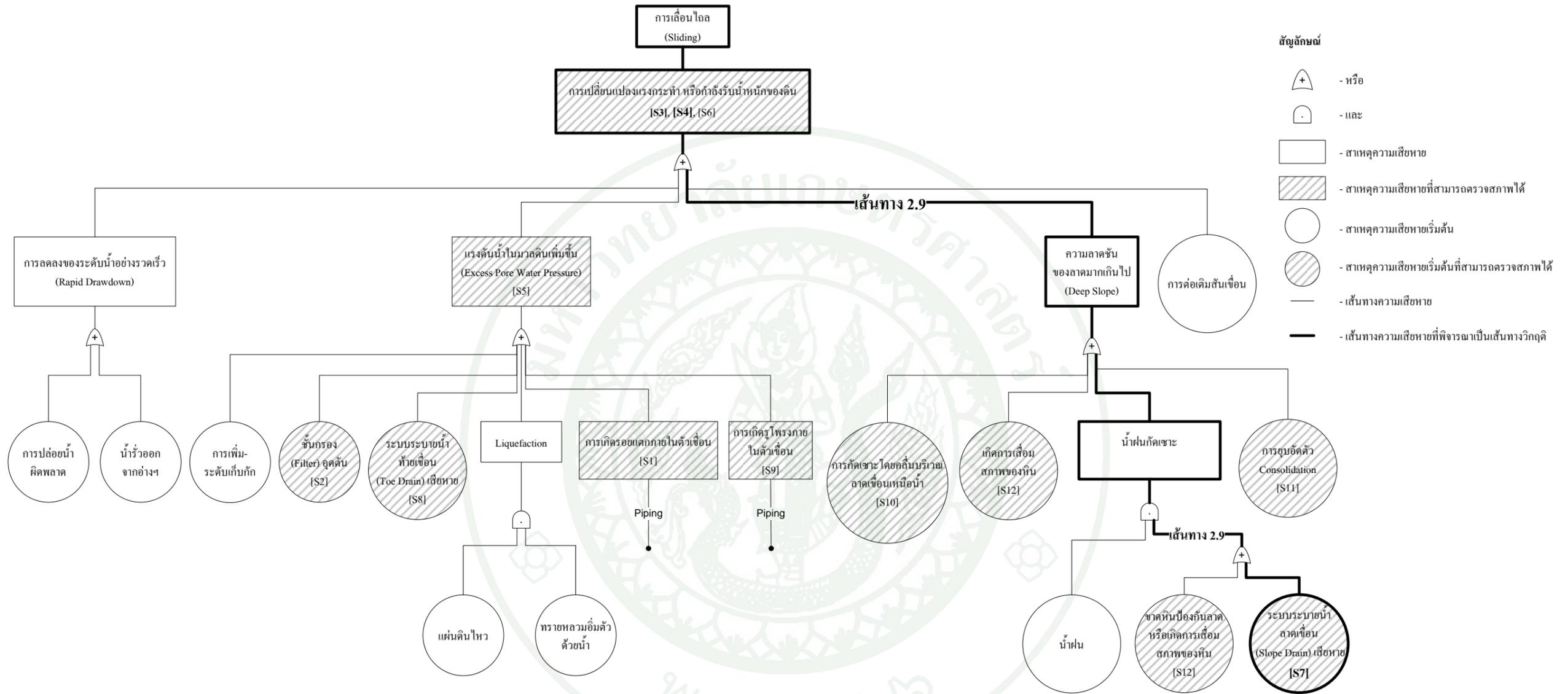
ภาพผนวกที่ ข25 เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 2.6



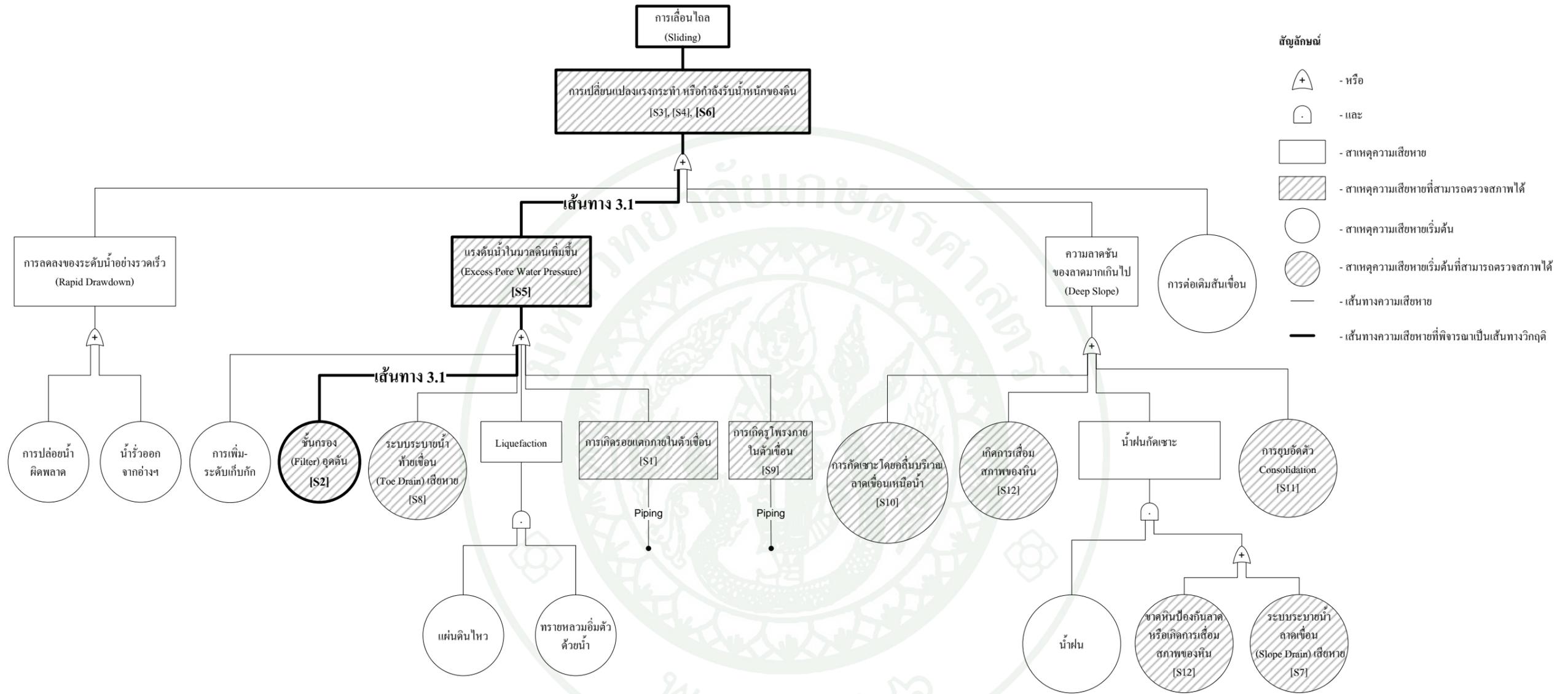
ภาพผนวกที่ ข26 เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 2.7



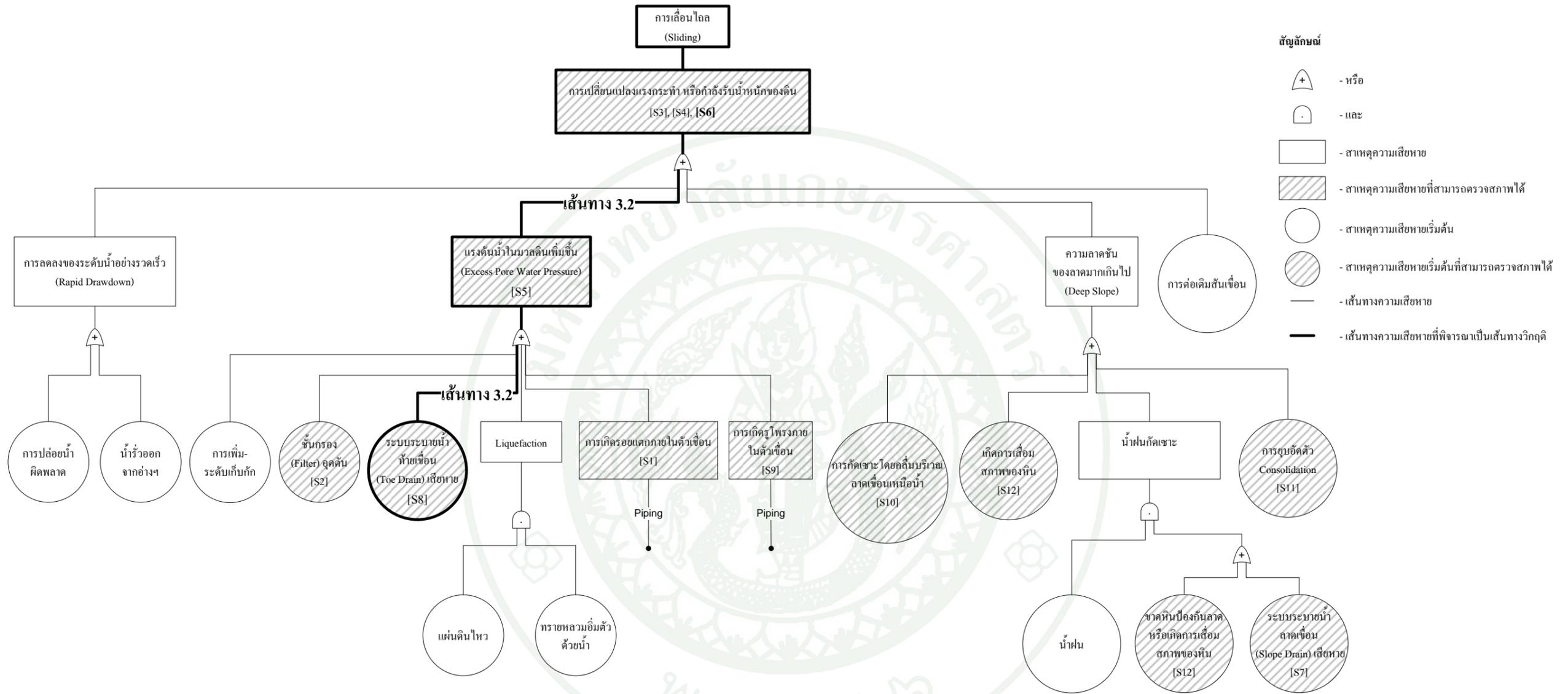
ภาพผนวกที่ ข27 เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 2.8



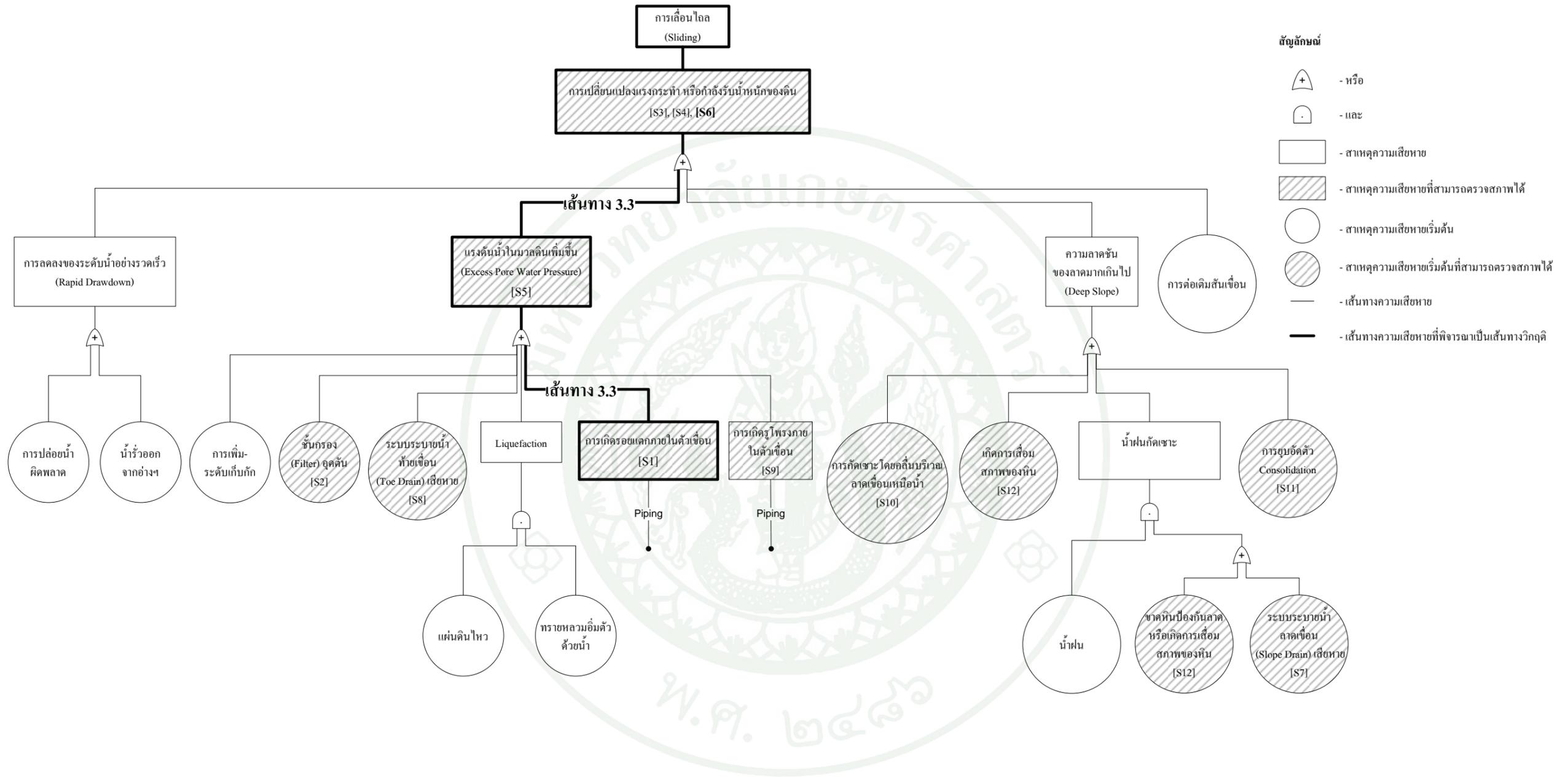
ภาพผนวกที่ ข28 เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 2.9



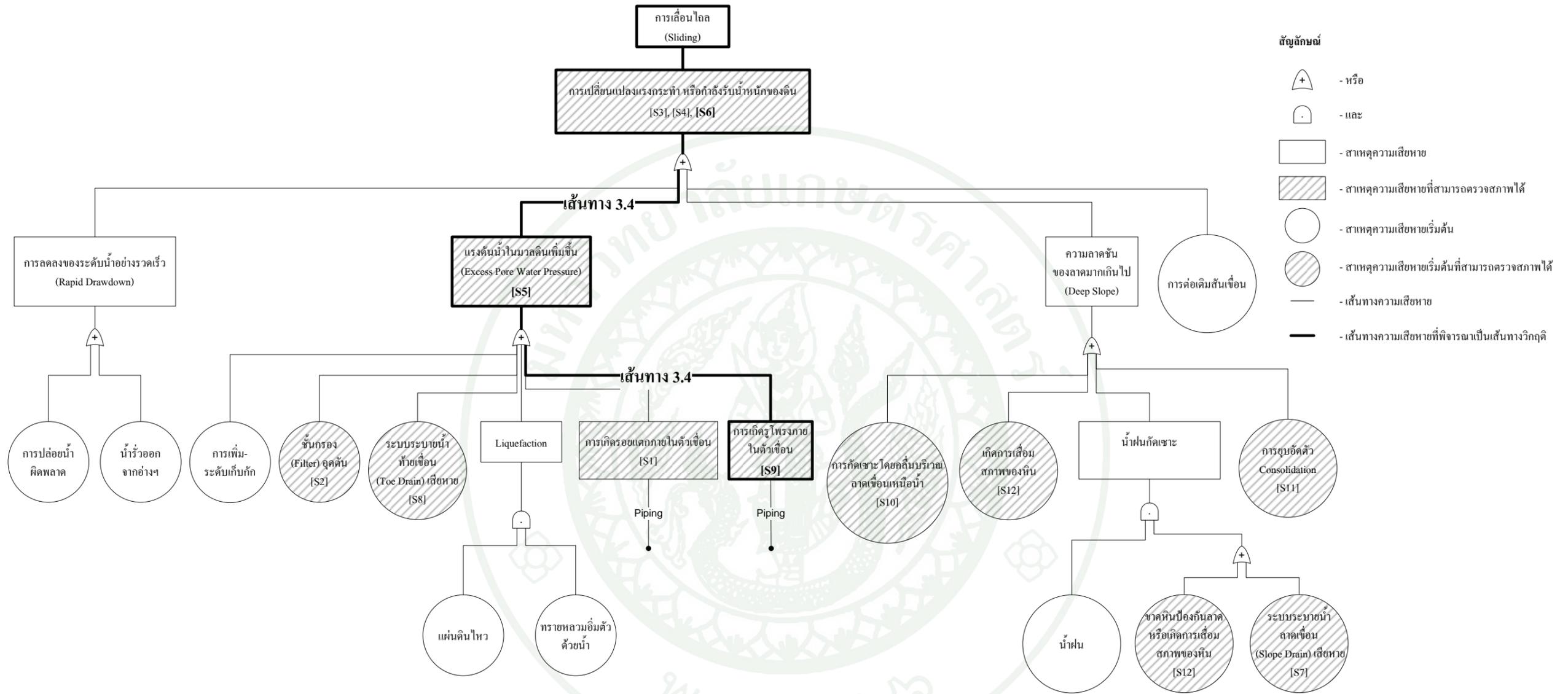
ภาพผนวกที่ ข29 เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางการที่ 3.1



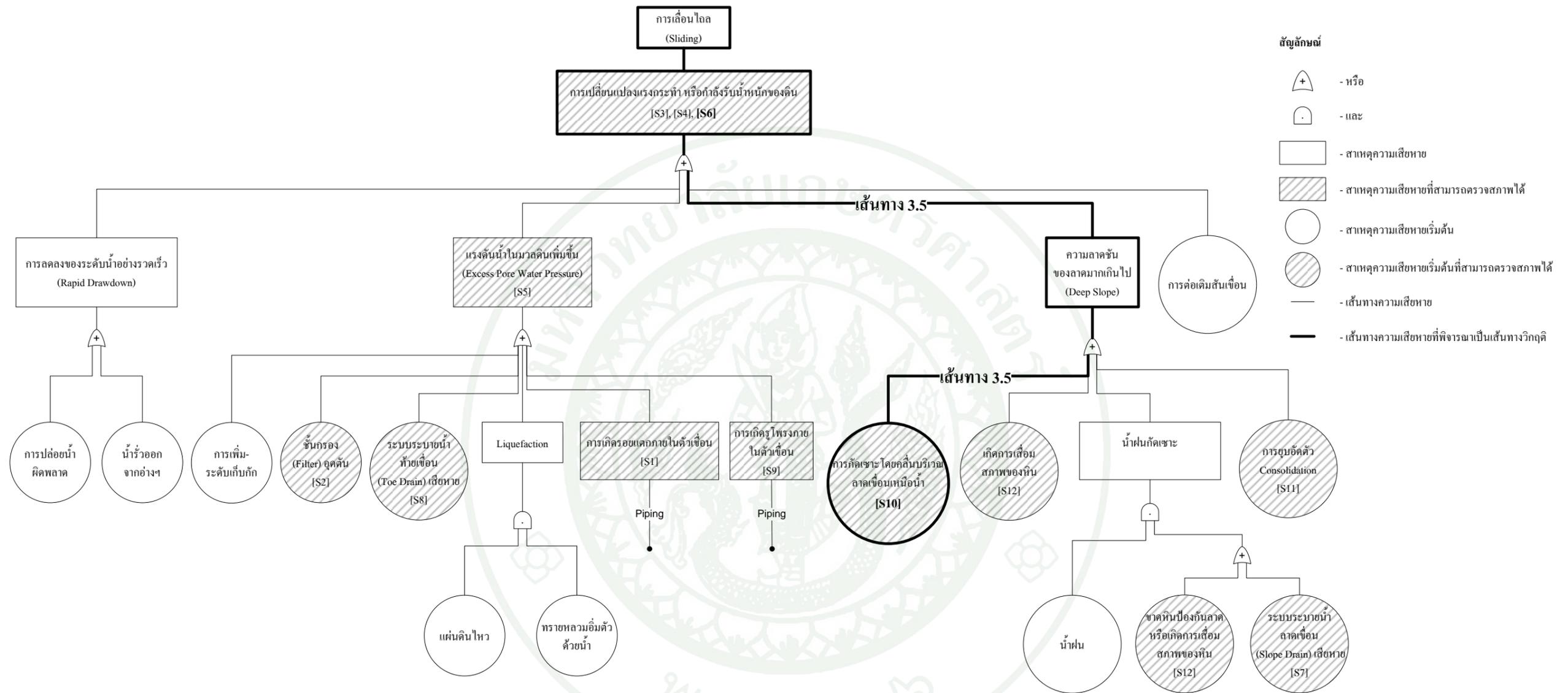
ภาพผนวกที่ 30 เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 3.2



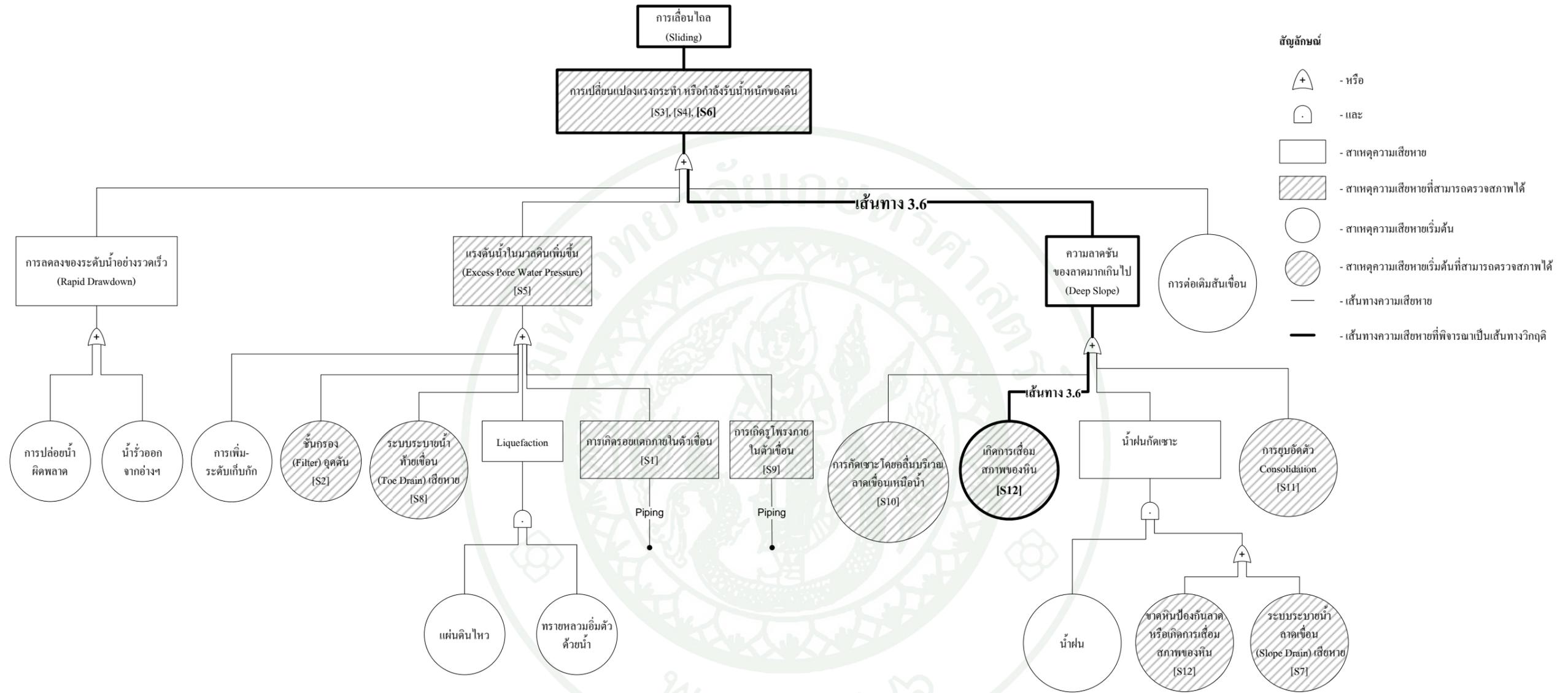
ภาพผนวกที่ ข31 เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางการที่ 3.3



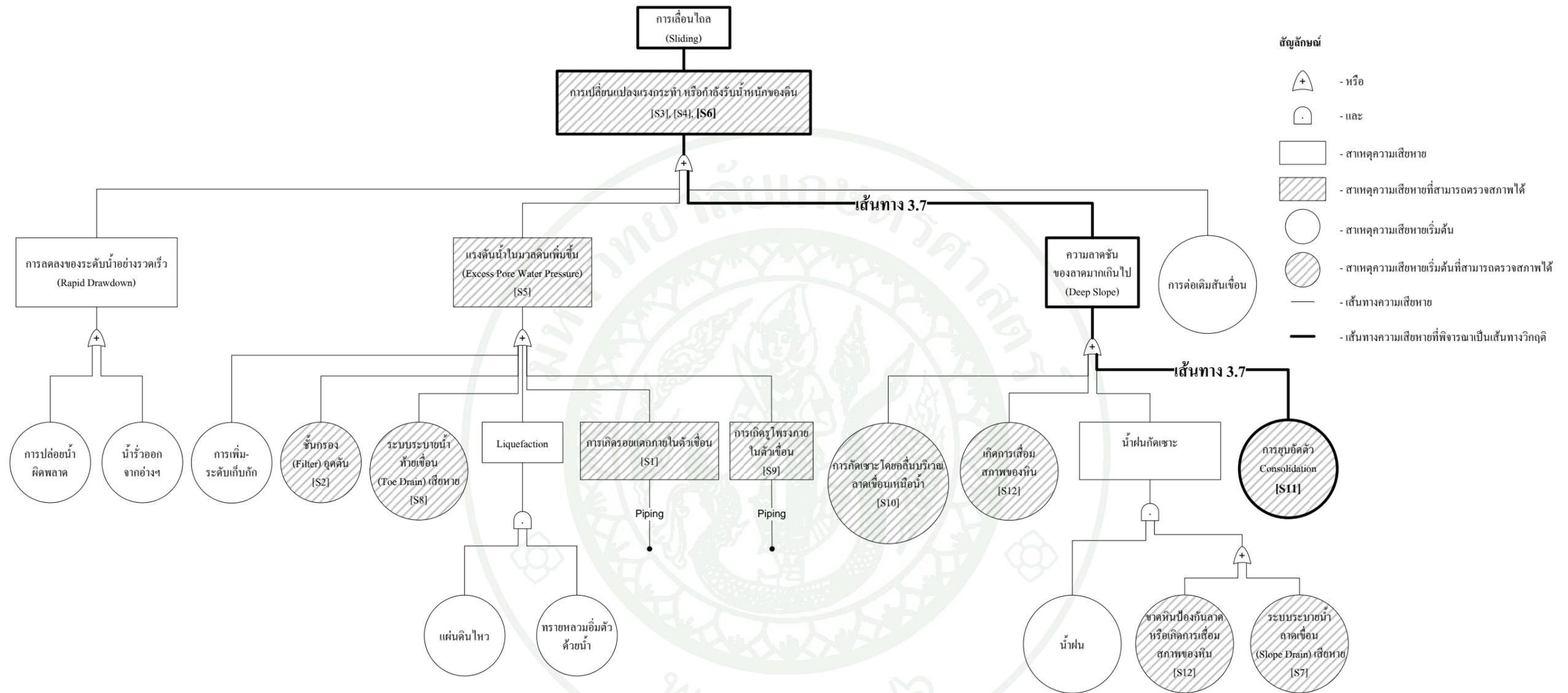
ภาพผนวกที่ ข32 เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางการที่ 3.4



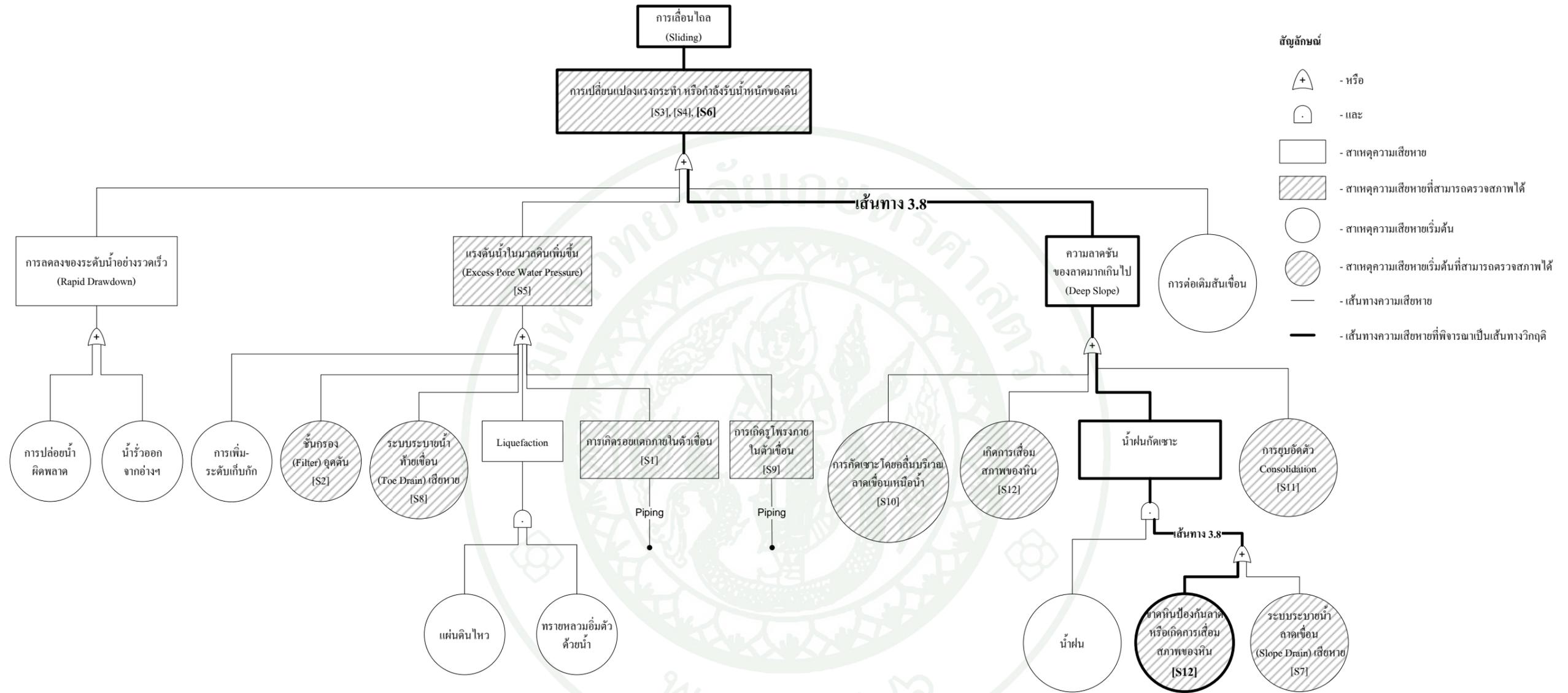
ภาพผนวกที่ ข33 เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 3.5



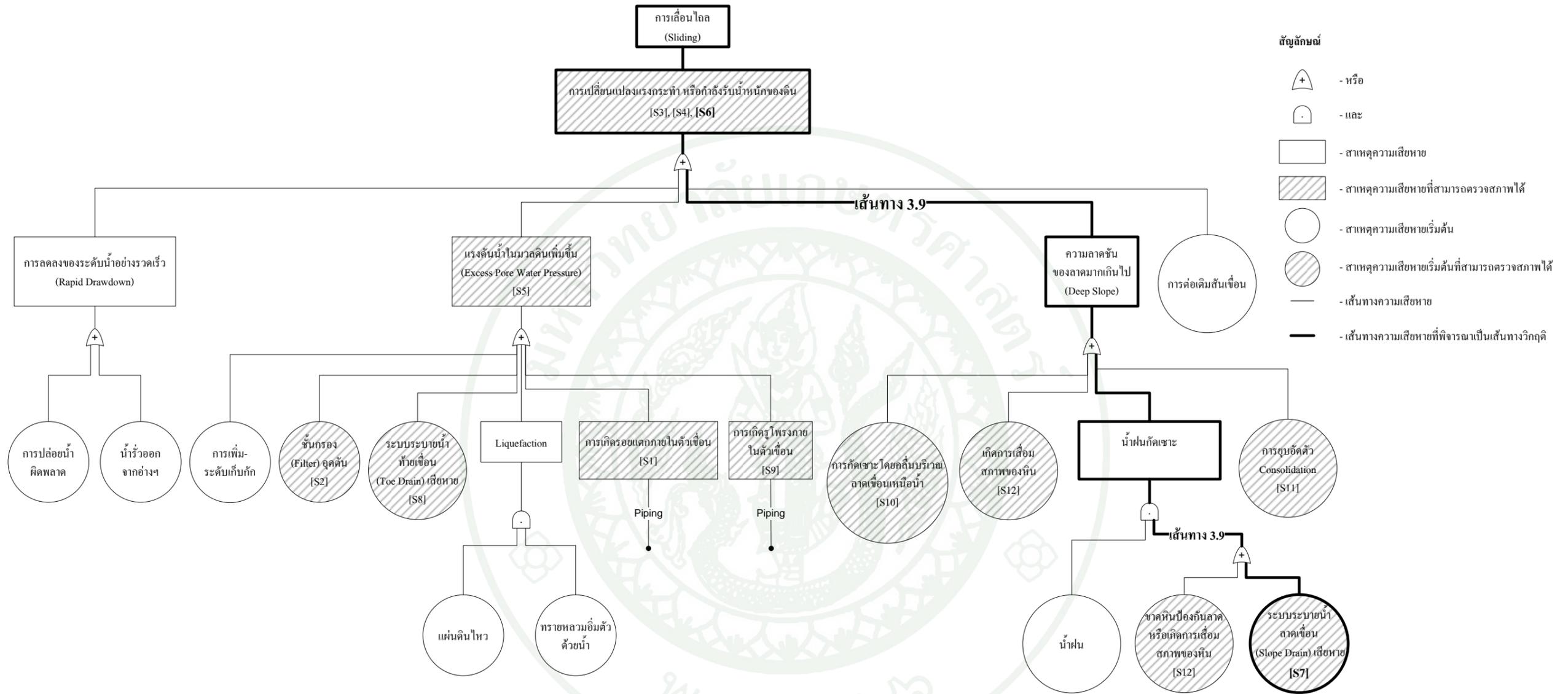
ภาพผนวกที่ ข34 เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 3.6



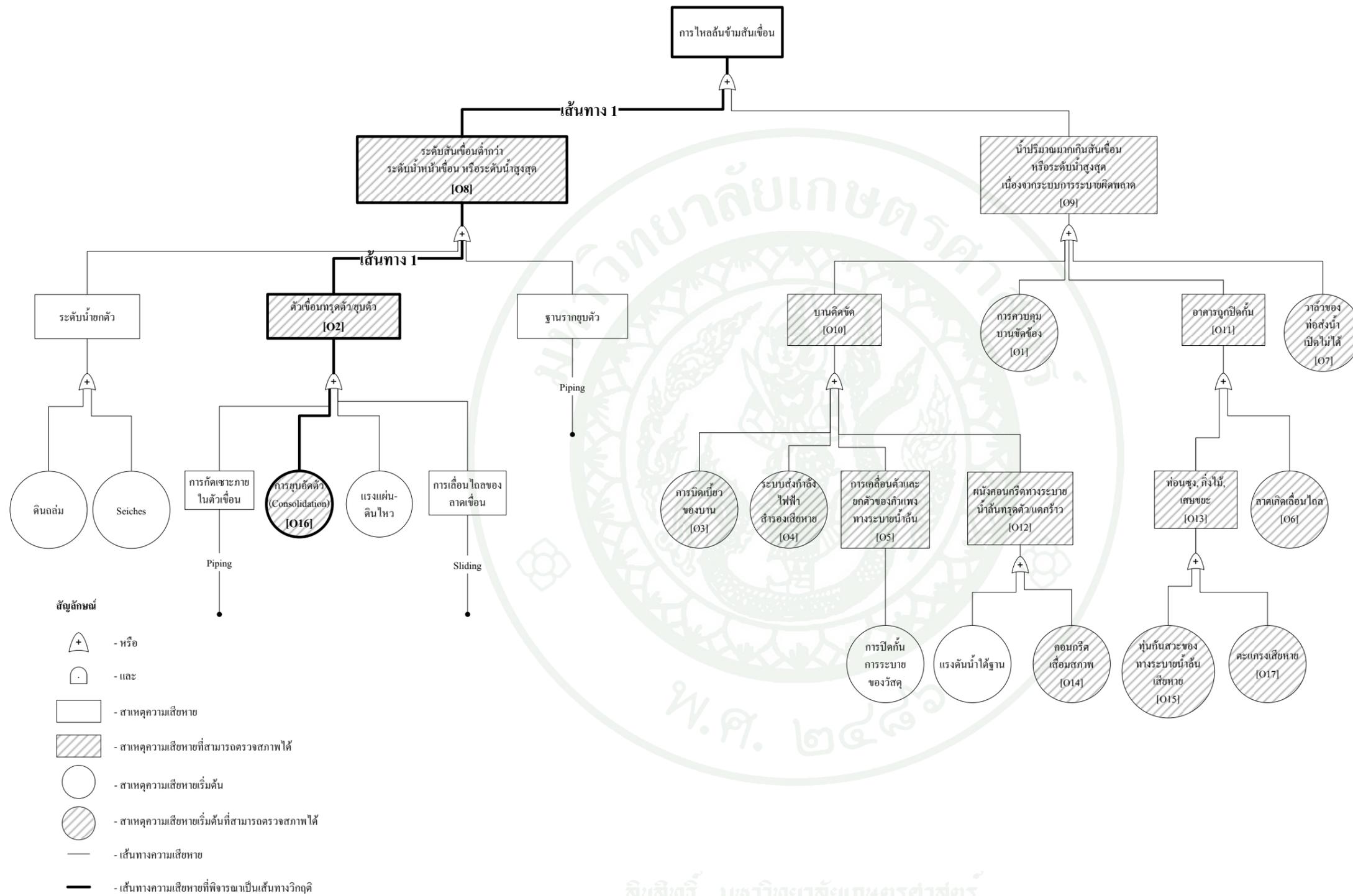
ภาพผนวกที่ ข35 เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 3.7



ภาพผนวกที่ ข36 เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 3.8

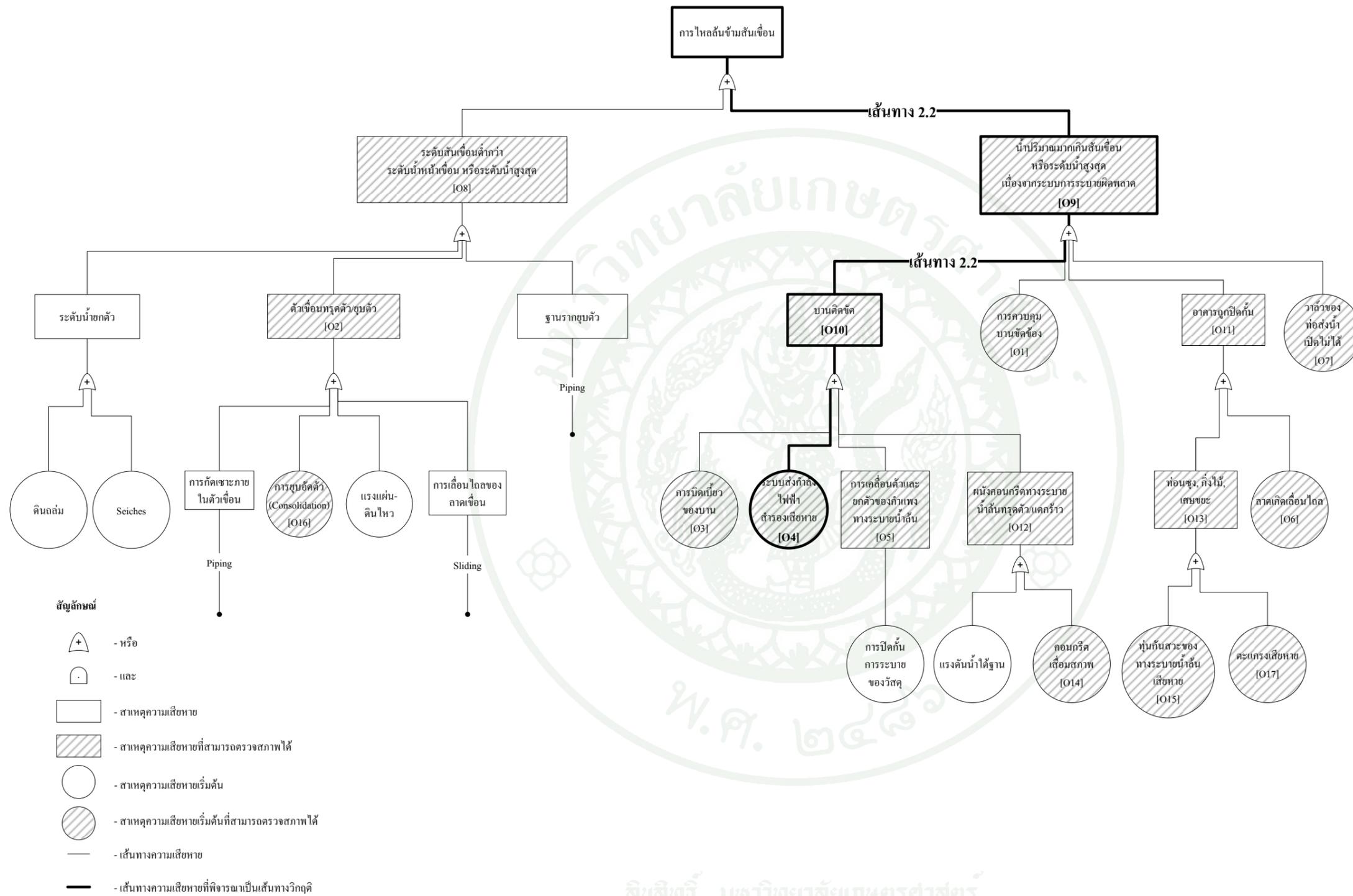


ภาพผนวกที่ ข37 เส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถล เส้นทางที่ 3.9

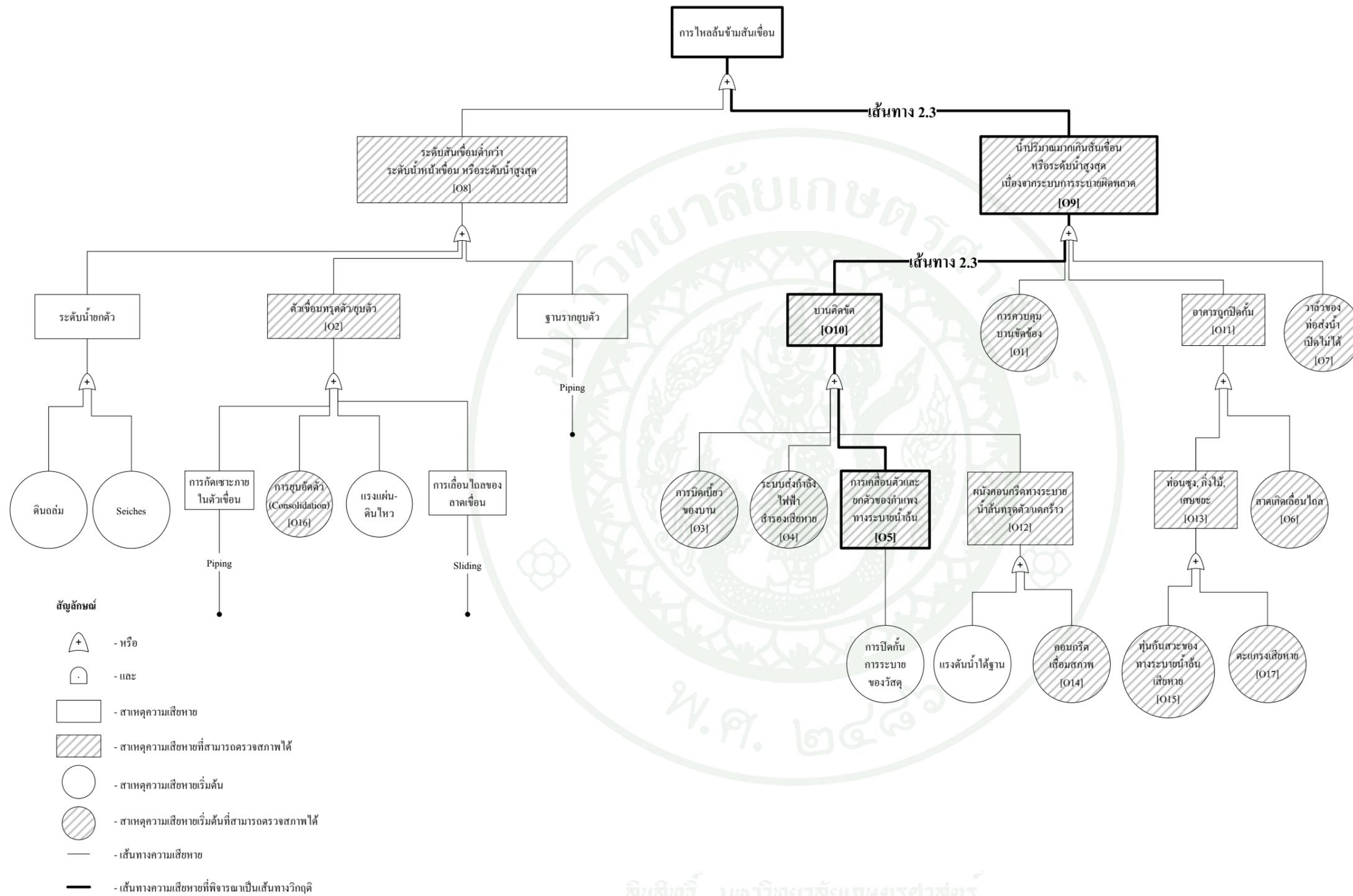


ภาพผนวกที่ ข38 เส้นทางการพิบัติของการไหลสั่นข้ามสันเขื่อน เส้นทางที่ 1

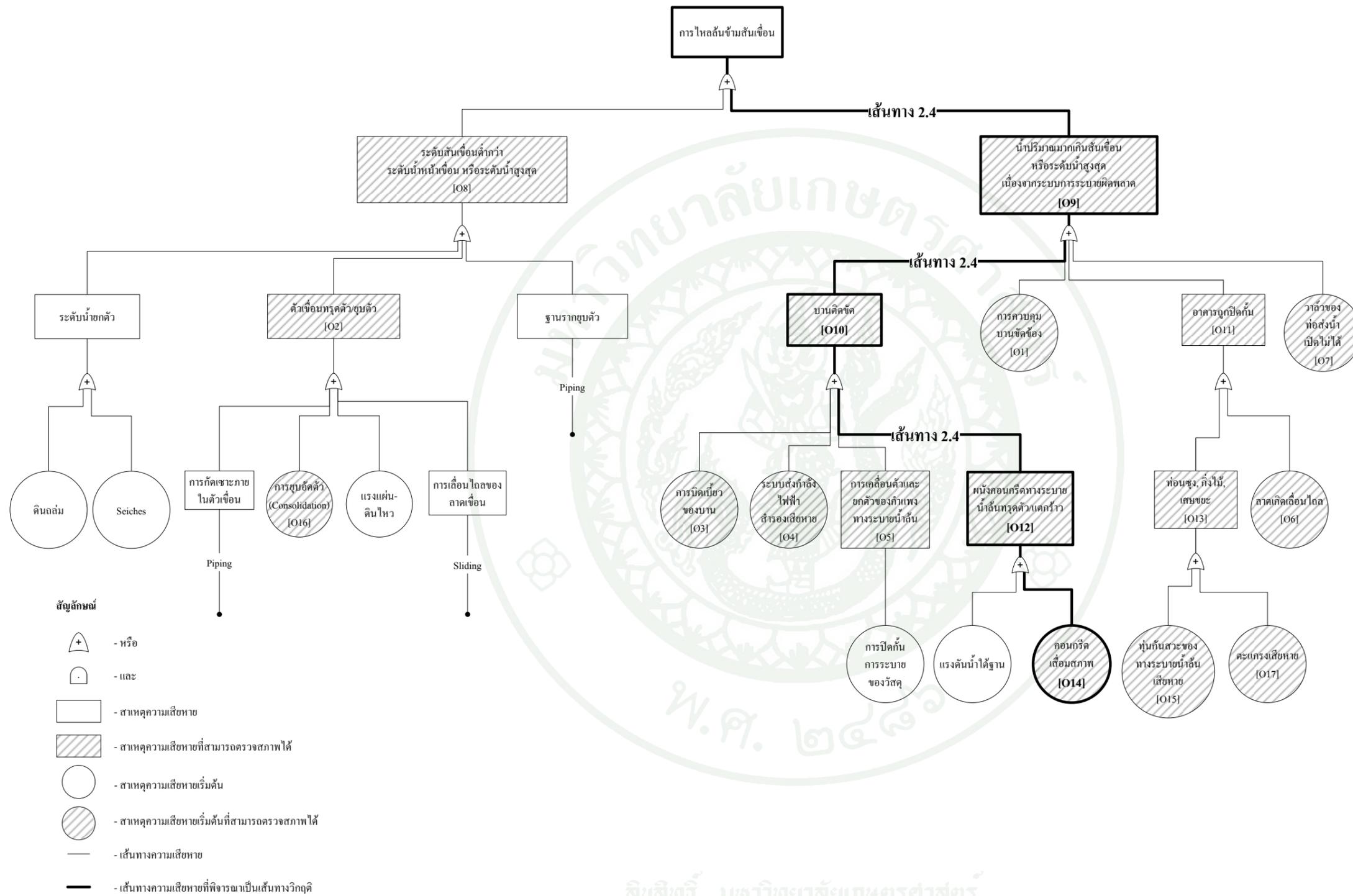




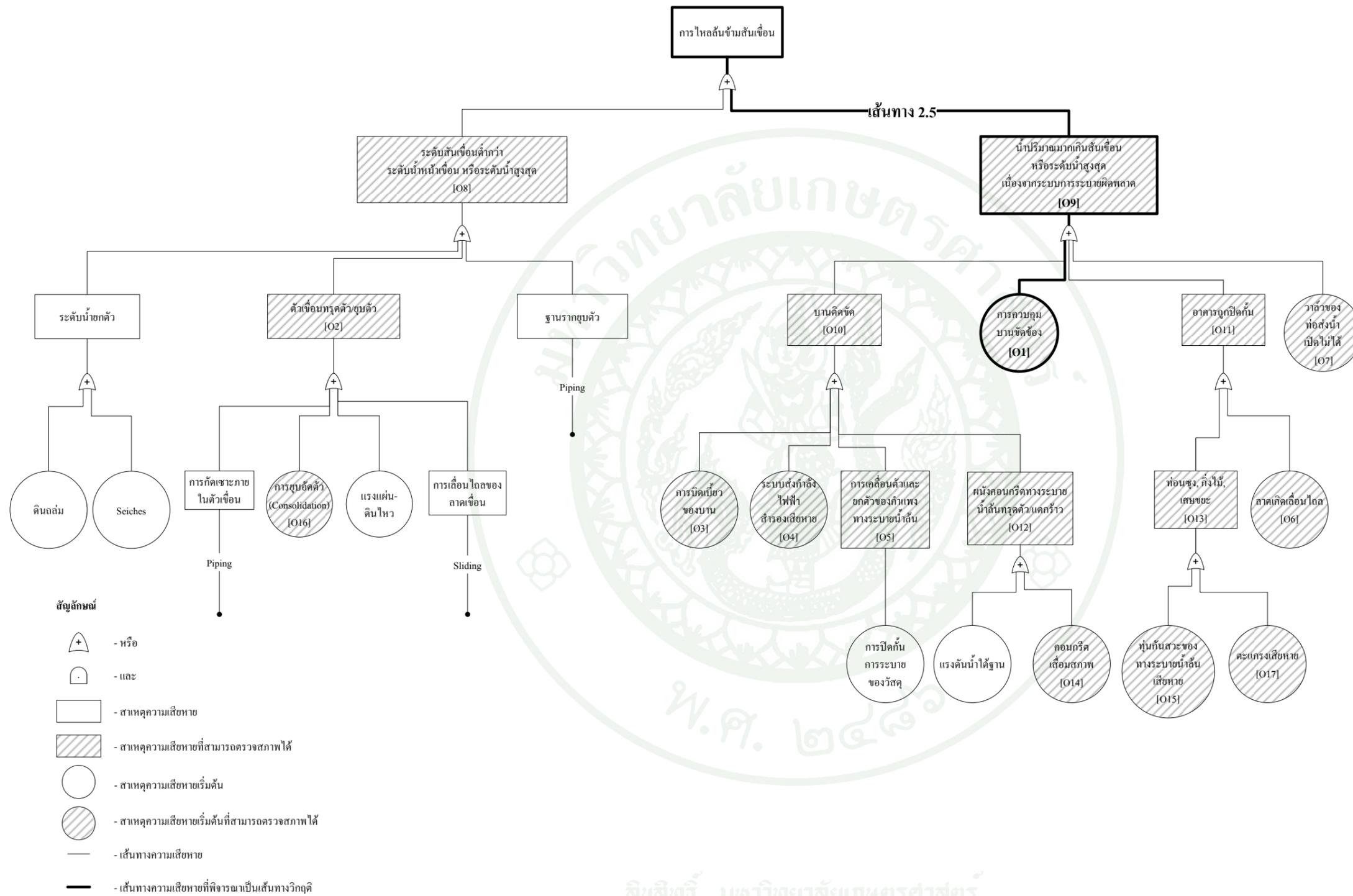
ภาพผนวกที่ ข40 เส้นทางการพิบัติของการไหลสั่นข้ามสันเขื่อน เส้นทางที่ 2.2



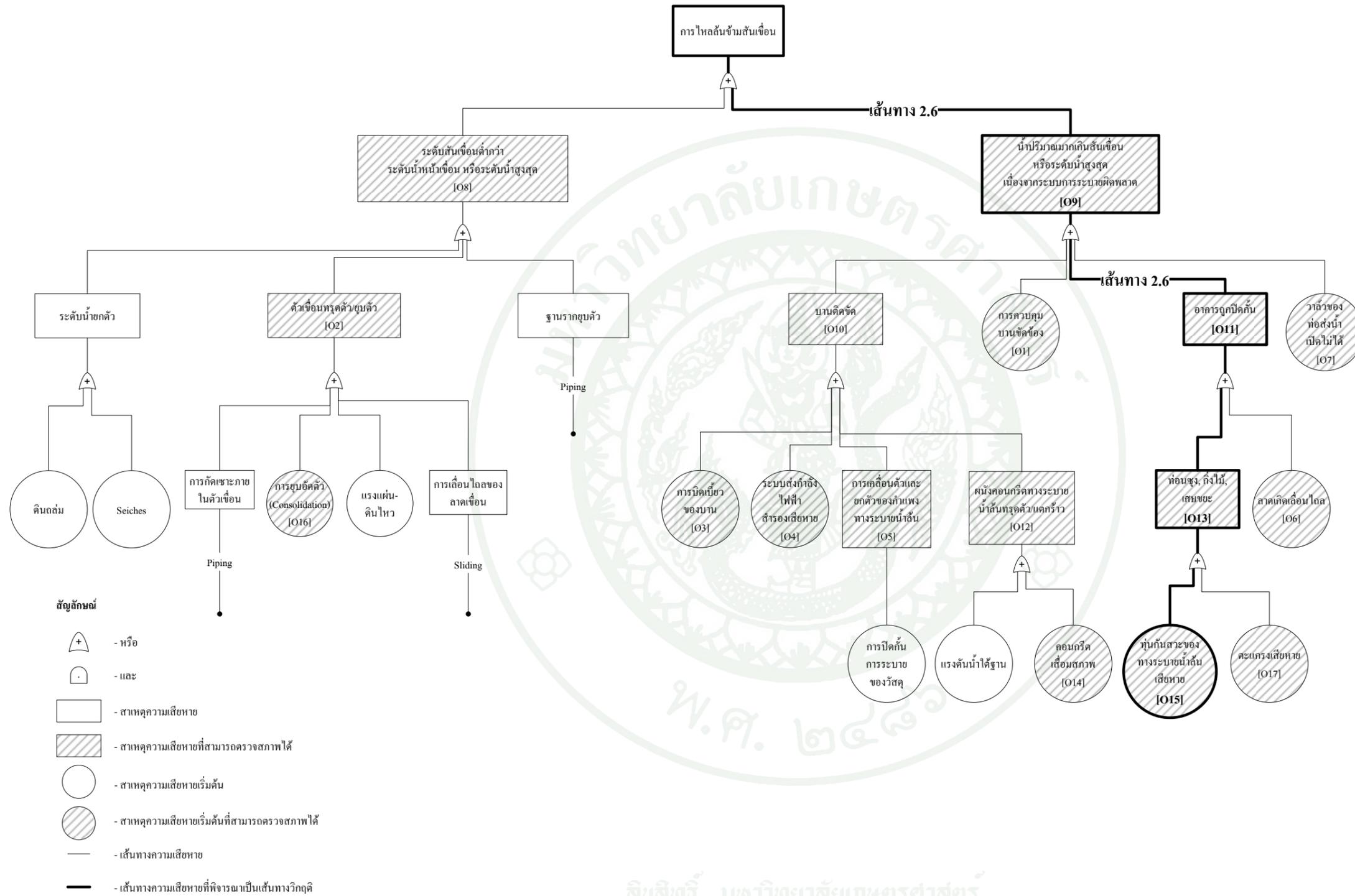
ภาพผนวกที่ ข41 เส้นทางการพิบัติของการไหลสั่นข้ามสันเขื่อน เส้นทางที่ 2.3



ภาพผนวกที่ ข42 เส้นทาง การพิบัติของการไหลสั่นข้ามสันเขื่อน เส้นทางที่ 2.4

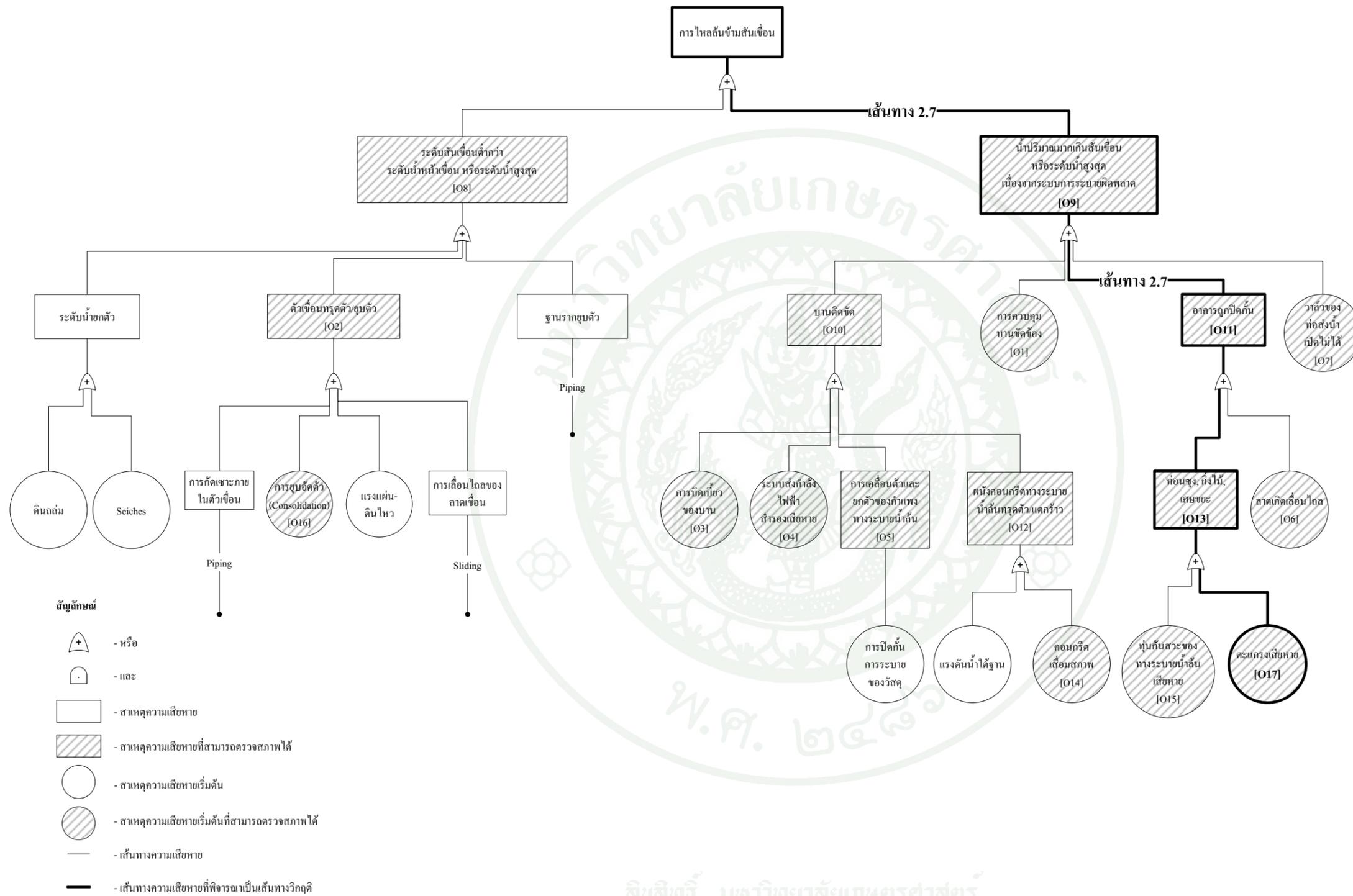


ภาพผนวกที่ ข43 เส้นทาง การพิบัติของการไหลสั่นข้ามสันเขื่อน เส้นทางที่ 2.5

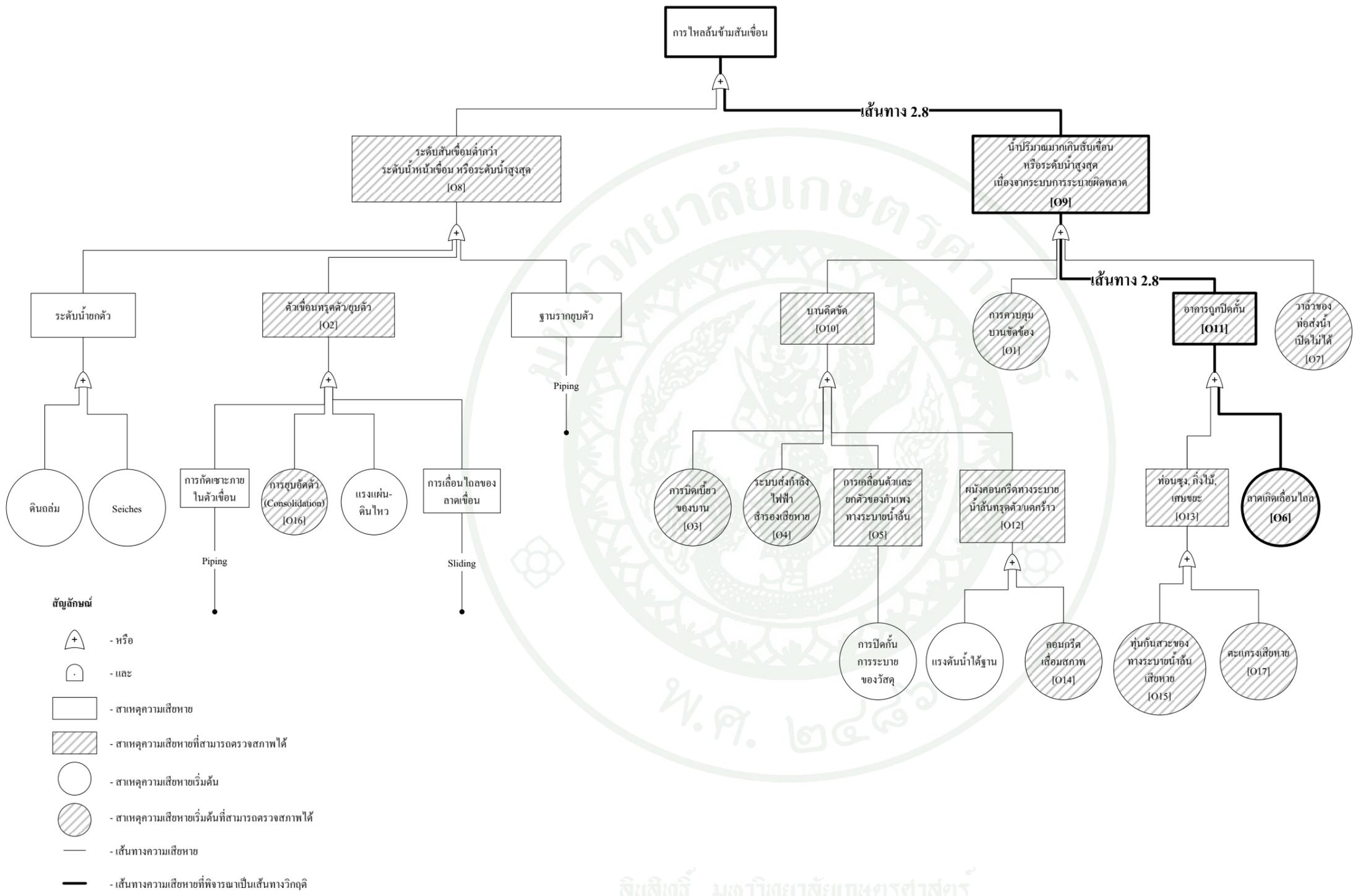


ภาพผนวกที่ ข44 เส้นทางารพิบัติของการไหลสั้นข้ามสันเขื่อน เส้นทางที่ 2.6

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



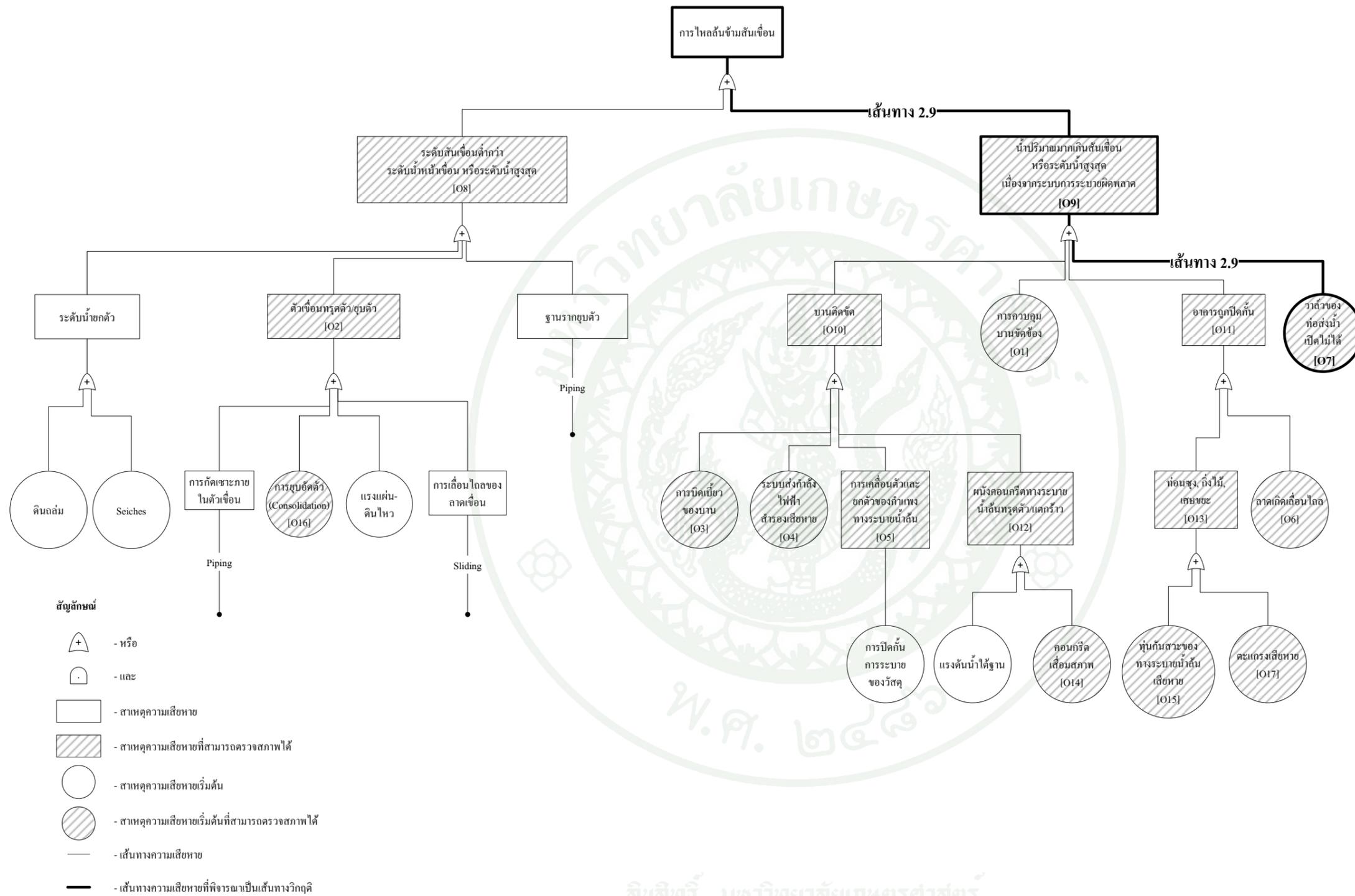
ภาพผนวกที่ ข45 เส้นทาง การพิบัติของการไหลสั้นข้ามสันเขื่อน เส้นทางที่ 2.7



- สัญลักษณ์**
- หรือ
  - และ
  - สาเหตุความเสียหาย
  - สาเหตุความเสียหายที่สามารถตรวจสภาพได้
  - สาเหตุความเสียหายเริ่มต้น
  - สาเหตุความเสียหายเริ่มต้นที่สามารถตรวจสภาพได้
  - เส้นทางการไหล
  - เส้นทางการไหลที่พิจารณาเป็นเส้นทางวิกฤติ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพผนวกที่ 46 เส้นทางการพิบัติของการไหลล้มชันชันเขื่อน เส้นทางการที่ 2.8



ภาพผนวกที่ ข47 เส้นทางการพิบัติของการไหลล้มข้ามสันเขื่อน เส้นทางที่ 2.9



**ภาคผนวก ค**

ตารางผนวกแสดงค่าดัชนีความเสี่ยงของการทดสอบสภาพที่สำคัญก่อนเกิดการพิบัติ,  
สภาพบ่งชี้ว่าอาจเกิดความบกพร่อง และสภาพเบื้องต้นหรือต้นกำเนิดความบกพร่อง

ตารางผนวกที่ ค1 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส,  
 ตารางผนวกที่ ค1 น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ บนเส้นทางการพิบัติของ-  
 การกัดเซาะภายในที่ 1.1.1

กรณี	สภาพก่อนเกิดการกัดเซาะภายใน			
	เส้นทางกรพิบัติ 1.1.1			
	ระดับคะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก			
	ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ (P2)			
	1	2	3	4
พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.471	1.852	2.233	2.614
2	1.346	1.808	2.269	2.731
3	1.271	1.779	2.287	2.795
4	1.223	1.760	2.298	2.835
5	1.188	1.747	2.305	2.863
6	1.163	1.736	2.309	2.882
7	1.144	1.728	2.313	2.897
8	1.129	1.722	2.315	2.909
9	1.116	1.717	2.317	2.918
10	1.047	1.688	2.328	2.968
11	1.024	1.677	2.331	2.984
12	1.012	1.672	2.332	2.992
13	1.001	1.667	2.333	2.999
14	1.000	1.667	2.333	3.000
15	1.000	1.667	2.333	3.000

ตารางผนวกที่ ค2 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ บนเส้นทางการพิบัติของ-การกัดเซาะภายในที่ 1.1.2

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการกัดเซาะภายใน			
	เส้นทางการพิบัติ 1.1.2			
	ระดับคะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ (P2)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.600	1.981	2.362	2.743
2	1.415	1.877	2.338	2.800
3	1.314	1.822	2.330	2.838
4	1.252	1.789	2.327	2.865
5	1.209	1.767	2.326	2.884
6	1.179	1.752	2.325	2.898
7	1.156	1.741	2.325	2.910
8	1.138	1.732	2.325	2.919
9	1.124	1.725	2.326	2.926
10	1.049	1.689	2.329	2.969
11	1.024	1.678	2.331	2.984
12	1.012	1.672	2.332	2.992
13	1.001	1.667	2.333	2.999
14	1.000	1.667	2.333	3.000
15	1.000	1.667	2.333	3.000

ตารางผนวกที่ ค3 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ บนเส้นทางการพิบัติของการกัดเซาะภายในที่ 1.1.3

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการกัดเซาะภายใน			
	เส้นทางการพิบัติ 1.1.3			
	ระดับคะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ (P2)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.471	1.852	2.233	2.614
2	1.346	1.808	2.269	2.731
3	1.271	1.779	2.287	2.795
4	1.223	1.760	2.298	2.835
5	1.188	1.747	2.305	2.863
6	1.163	1.736	2.309	2.882
7	1.144	1.728	2.313	2.897
8	1.129	1.722	2.315	2.909
9	1.116	1.717	2.317	2.918
10	1.047	1.688	2.328	2.968
11	1.024	1.677	2.331	2.984
12	1.012	1.672	2.332	2.992
13	1.001	1.667	2.333	2.999
14	1.000	1.667	2.333	3.000
15	1.000	1.667	2.333	3.000

ตารางผนวกที่ ค4 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ บนเส้นทางการพิบัติของ-การกัดเซาะภายในที่ 1.1.4

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการกัดเซาะภายใน			
	เส้นทางการพิบัติ 1.1.4			
	ระดับคะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ (P2)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.600	1.981	2.362	2.743
2	1.415	1.877	2.338	2.800
3	1.314	1.822	2.330	2.838
4	1.252	1.789	2.327	2.865
5	1.209	1.767	2.326	2.884
6	1.179	1.752	2.325	2.898
7	1.156	1.741	2.325	2.910
8	1.138	1.732	2.325	2.919
9	1.124	1.725	2.326	2.926
10	1.049	1.689	2.329	2.969
11	1.024	1.678	2.331	2.984
12	1.012	1.672	2.332	2.992
13	1.001	1.667	2.333	2.999
14	1.000	1.667	2.333	3.000
15	1.000	1.667	2.333	3.000

ตารางผนวกที่ ค5 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ บนเส้นทางกรปิดของ-การกักเซาะภายในที่ 1.2

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการกักเซาะภายใน			
	เส้นทางกรปิด 1.2			
	ระดับคะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ (P2)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.114	1.495	1.876	2.257
2	1.092	1.554	2.015	2.477
3	1.076	1.584	2.092	2.600
4	1.065	1.602	2.140	2.677
5	1.056	1.614	2.172	2.730
6	1.049	1.622	2.195	2.768
7	1.044	1.628	2.213	2.797
8	1.040	1.633	2.226	2.820
9	1.036	1.637	2.237	2.838
10	1.015	1.655	2.295	2.935
11	1.008	1.661	2.315	2.968
12	1.004	1.664	2.324	2.984
13	1.000	1.666	2.332	2.998
14	1.000	1.667	2.333	3.000
15	1.000	1.667	2.333	3.000

ตารางผนวกที่ ๑๖ ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ บนเส้นทางการพิบัติของ-การกัดเซาะภายในที่ 1.3

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการกัดเซาะภายใน			
	เส้นทางการพิบัติ 1.3			
	ระดับคะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ (P2)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.257	1.638	2.019	2.400
2	1.138	1.600	2.062	2.523
3	1.086	1.594	2.102	2.610
4	1.058	1.596	2.133	2.671
5	1.042	1.600	2.158	2.716
6	1.032	1.605	2.178	2.751
7	1.025	1.609	2.194	2.778
8	1.020	1.613	2.207	2.800
9	1.016	1.617	2.217	2.818
10	1.003	1.643	2.283	2.923
11	1.001	1.654	2.307	2.961
12	1.000	1.660	2.320	2.980
13	1.000	1.666	2.332	2.998
14	1.000	1.667	2.333	3.000
15	1.000	1.667	2.333	3.000

ตารางผนวกที่ ๓7 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ บนเส้นทางกรปิดของ-การกักเซาะภายในที่ 1.4

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการกักเซาะภายใน			
	เส้นทางกรปิด 1.4			
	ระดับคะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ (P2)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.043	1.424	1.805	2.186
2	1.023	1.485	1.946	2.408
3	1.014	1.522	2.030	2.538
4	1.010	1.547	2.085	2.623
5	1.007	1.565	2.123	2.681
6	1.005	1.578	2.151	2.725
7	1.004	1.589	2.173	2.758
8	1.003	1.597	2.190	2.784
9	1.003	1.603	2.204	2.805
10	1.000	1.641	2.281	2.921
11	1.000	1.653	2.307	2.960
12	1.000	1.660	2.320	2.980
13	1.000	1.666	2.332	2.998
14	1.000	1.667	2.333	3.000
15	1.000	1.667	2.333	3.000

ตารางผนวกที่ ค8 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนน้ำโคลนไหลออกทางอาคารประกอบ หรือจุดควบคุมการระบาย บนเส้นทางการพิบัติของการกักเซาะภายในที่ 2

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการกักเซาะภายใน			
	เส้นทางการพิบัติ 2			
	ระดับคะแนนน้ำโคลนไหลออกทางอาคารประกอบ หรือจุดควบคุมการระบาย (P3)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.057	1.248	1.438	1.629
2	1.046	1.277	1.508	1.738
3	1.038	1.292	1.546	1.800
4	1.032	1.301	1.570	1.839
5	1.028	1.307	1.586	1.865
6	1.025	1.311	1.598	1.884
7	1.022	1.314	1.606	1.899
8	1.020	1.316	1.613	1.910
9	1.018	1.318	1.619	1.919
10	1.008	1.328	1.648	1.968
11	1.004	1.331	1.657	1.984
12	1.002	1.332	1.662	1.992
13	1.000	1.333	1.666	1.999
14	1.000	1.333	1.667	2.000
15	1.000	1.333	1.667	2.000

ตารางผนวกที่ ๑๑ ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ บนเส้นทางกรปิดของ-การกักเซาะภายในที่ 3.1

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการกักเซาะภายใน			
	เส้นทางกรปิด 3.1			
	ระดับคะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ (P2)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.343	1.724	2.105	2.486
2	1.277	1.738	2.200	2.662
3	1.229	1.737	2.244	2.752
4	1.194	1.731	2.269	2.806
5	1.167	1.726	2.284	2.842
6	1.147	1.720	2.294	2.867
7	1.132	1.716	2.300	2.885
8	1.119	1.712	2.305	2.899
9	1.108	1.709	2.309	2.910
10	1.046	1.686	2.326	2.966
11	1.024	1.677	2.330	2.984
12	1.012	1.672	2.332	2.992
13	1.001	1.667	2.333	2.999
14	1.000	1.667	2.333	3.000
15	1.000	1.667	2.333	3.000

ตารางผนวกที่ 10 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ บนเส้นทางกรกัณฑ์ของ-การกักเซาะภายในที่ 3.2

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการกักเซาะภายใน			
	เส้นทางกรกัณฑ์ 3.2			
	ระดับคะแนนน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส, น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ (P2)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.343	1.724	2.105	2.486
2	1.277	1.738	2.200	2.662
3	1.229	1.737	2.244	2.752
4	1.194	1.731	2.269	2.806
5	1.167	1.726	2.284	2.842
6	1.147	1.720	2.294	2.867
7	1.132	1.716	2.300	2.885
8	1.119	1.712	2.305	2.899
9	1.108	1.709	2.309	2.910
10	1.046	1.686	2.326	2.966
11	1.024	1.677	2.330	2.984
12	1.012	1.672	2.332	2.992
13	1.001	1.667	2.333	2.999
14	1.000	1.667	2.333	3.000
15	1.000	1.667	2.333	3.000

ตารางผนวกที่ ค11 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของ-  
ทางระบายน้ำล้น บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 1.1

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไถล			
	เส้นทางการพิบัติ 1.1			
	ระดับคะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของทางระบายน้ำล้น (S3)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.884	2.027	2.170	2.313
2	1.707	1.880	2.053	2.226
3	1.580	1.771	1.961	2.152
4	1.490	1.692	1.893	2.095
5	1.423	1.632	1.842	2.051
6	1.372	1.587	1.802	2.016
7	1.331	1.551	1.770	1.989
8	1.299	1.521	1.744	1.966
9	1.272	1.497	1.722	1.948
10	1.115	1.356	1.596	1.836
11	1.059	1.304	1.549	1.794
12	1.030	1.277	1.525	1.772
13	1.003	1.253	1.502	1.752
14	1.000	1.250	1.500	1.750
15	1.000	1.250	1.500	1.750

ตารางผนวกที่ ค12 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของ-  
ทางระบายน้ำล้น บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 1.2

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไถล			
	เส้นทางการพิบัติ 1.2			
	ระดับคะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของทางระบายน้ำล้น (S3)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.884	2.027	2.170	2.313
2	1.707	1.880	2.053	2.226
3	1.580	1.771	1.961	2.152
4	1.490	1.692	1.893	2.095
5	1.423	1.632	1.842	2.051
6	1.372	1.587	1.802	2.016
7	1.331	1.551	1.770	1.989
8	1.299	1.521	1.744	1.966
9	1.272	1.497	1.722	1.948
10	1.115	1.356	1.596	1.836
11	1.059	1.304	1.549	1.794
12	1.030	1.277	1.525	1.772
13	1.003	1.253	1.502	1.752
14	1.000	1.250	1.500	1.750
15	1.000	1.250	1.500	1.750

ตารางผนวกที่ ค13 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของ-  
ทางระบายน้ำล้น บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 1.3

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไถล			
	เส้นทางการพิบัติ 1.3			
	ระดับคะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของทางระบายน้ำล้น (S3)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.938	2.080	2.223	2.366
2	1.736	1.909	2.082	2.255
3	1.598	1.789	1.979	2.170
4	1.502	1.704	1.905	2.107
5	1.432	1.641	1.850	2.060
6	1.378	1.593	1.808	2.023
7	1.336	1.556	1.775	1.994
8	1.303	1.525	1.748	1.970
9	1.275	1.501	1.726	1.951
10	1.116	1.356	1.596	1.836
11	1.059	1.304	1.549	1.794
12	1.030	1.277	1.525	1.772
13	1.003	1.253	1.502	1.752
14	1.000	1.250	1.500	1.750
15	1.000	1.250	1.500	1.750

ตารางผนวกที่ ค14 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของ-  
ทางระบายน้ำล้น บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 1.4

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไถล			
	เส้นทางการพิบัติ 1.4			
	ระดับคะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของทางระบายน้ำล้น (S3)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.938	2.080	2.223	2.366
2	1.736	1.909	2.082	2.255
3	1.598	1.789	1.979	2.170
4	1.502	1.704	1.905	2.107
5	1.432	1.641	1.850	2.060
6	1.378	1.593	1.808	2.023
7	1.336	1.556	1.775	1.994
8	1.303	1.525	1.748	1.970
9	1.275	1.501	1.726	1.951
10	1.116	1.356	1.596	1.836
11	1.059	1.304	1.549	1.794
12	1.030	1.277	1.525	1.772
13	1.003	1.253	1.502	1.752
14	1.000	1.250	1.500	1.750
15	1.000	1.250	1.500	1.750

ตารางผนวกที่ ค15 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของ-  
ทางระบายน้ำล้น บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 1.5

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไถล			
	เส้นทางการพิบัติ 1.5			
	ระดับคะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของทางระบายน้ำล้น (S3)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.027	1.170	1.313	1.455
2	1.014	1.188	1.361	1.534
3	1.009	1.199	1.390	1.580
4	1.006	1.208	1.409	1.611
5	1.004	1.214	1.423	1.632
6	1.003	1.218	1.433	1.648
7	1.003	1.222	1.441	1.660
8	1.002	1.225	1.447	1.670
9	1.002	1.227	1.452	1.677
10	1.000	1.240	1.480	1.720
11	1.000	1.245	1.490	1.735
12	1.000	1.248	1.495	1.743
13	1.000	1.250	1.500	1.749
14	1.000	1.250	1.500	1.750
15	1.000	1.250	1.500	1.750

ตารางผนวกที่ 16 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของ-  
ทางระบายน้ำล้น บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 1.6

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไถล			
	เส้นทางการพิบัติ 1.6			
	ระดับคะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของทางระบายน้ำล้น (S3)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.107	1.250	1.393	1.536
2	1.058	1.231	1.404	1.577
3	1.036	1.226	1.417	1.607
4	1.024	1.226	1.427	1.629
5	1.017	1.227	1.436	1.645
6	1.013	1.228	1.443	1.658
7	1.010	1.229	1.449	1.668
8	1.008	1.231	1.453	1.676
9	1.007	1.232	1.457	1.682
10	1.001	1.241	1.481	1.721
11	1.000	1.245	1.490	1.735
12	1.000	1.248	1.495	1.743
13	1.000	1.250	1.500	1.749
14	1.000	1.250	1.500	1.750
15	1.000	1.250	1.500	1.750

ตารางผนวกที่ ค17 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของ-  
ทางระบายน้ำล้น บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 1.7

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไถล			
	เส้นทางการพิบัติ 1.7			
	ระดับคะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของทางระบายน้ำล้น (S3)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.054	1.196	1.339	1.482
2	1.029	1.202	1.375	1.548
3	1.018	1.208	1.399	1.589
4	1.012	1.214	1.415	1.617
5	1.009	1.218	1.427	1.637
6	1.007	1.221	1.436	1.651
7	1.005	1.224	1.443	1.663
8	1.004	1.227	1.449	1.672
9	1.003	1.229	1.454	1.679
10	1.001	1.241	1.481	1.721
11	1.000	1.245	1.490	1.735
12	1.000	1.248	1.495	1.743
13	1.000	1.250	1.500	1.749
14	1.000	1.250	1.500	1.750
15	1.000	1.250	1.500	1.750

ตารางผนวกที่ ค18 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของ-  
ทางระบายน้ำล้น บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 1.8

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไถล			
	เส้นทางการพิบัติ 1.8			
	ระดับคะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของทางระบายน้ำล้น (S3)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.107	1.250	1.393	1.536
2	1.058	1.231	1.404	1.577
3	1.036	1.226	1.417	1.607
4	1.024	1.226	1.427	1.629
5	1.017	1.227	1.436	1.645
6	1.013	1.228	1.443	1.658
7	1.010	1.229	1.449	1.668
8	1.008	1.231	1.453	1.676
9	1.007	1.232	1.457	1.682
10	1.001	1.241	1.481	1.721
11	1.000	1.245	1.490	1.735
12	1.000	1.248	1.495	1.743
13	1.000	1.250	1.500	1.749
14	1.000	1.250	1.500	1.750
15	1.000	1.250	1.500	1.750

ตารางผนวกที่ ค19 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของ-  
ทางระบายน้ำล้น บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 1.9

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไถล			
	เส้นทางการพิบัติ 1.9			
	ระดับคะแนนการยุบตัวในแนวตั้งของทางระบายน้ำล้น (S3)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.027	1.170	1.313	1.455
2	1.014	1.188	1.361	1.534
3	1.009	1.199	1.390	1.580
4	1.006	1.208	1.409	1.611
5	1.004	1.214	1.423	1.632
6	1.003	1.218	1.433	1.648
7	1.003	1.222	1.441	1.660
8	1.002	1.225	1.447	1.670
9	1.002	1.227	1.452	1.677
10	1.000	1.240	1.480	1.720
11	1.000	1.245	1.490	1.735
12	1.000	1.248	1.495	1.743
13	1.000	1.250	1.500	1.749
14	1.000	1.250	1.500	1.750
15	1.000	1.250	1.500	1.750

ตารางผนวกที่ ค20 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเคลื่อนตัวของ-  
รางระบายน้ำท้ายเขื่อน บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 2.1

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไถล			
	เส้นทางการพิบัติ 2.1			
	ระดับคะแนนการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน (Drain Ditch) (S4)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.884	2.027	2.170	2.313
2	1.707	1.880	2.053	2.226
3	1.580	1.771	1.961	2.152
4	1.490	1.692	1.893	2.095
5	1.423	1.632	1.842	2.051
6	1.372	1.587	1.802	2.016
7	1.331	1.551	1.770	1.989
8	1.299	1.521	1.744	1.966
9	1.272	1.497	1.722	1.948
10	1.115	1.356	1.596	1.836
11	1.059	1.304	1.549	1.794
12	1.030	1.277	1.525	1.772
13	1.003	1.253	1.502	1.752
14	1.000	1.250	1.500	1.750
15	1.000	1.250	1.500	1.750

ตารางผนวกที่ ค21 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเคลื่อนตัวของ-  
รางระบายน้ำท้ายเขื่อน บนเส้นทางกรพิบัติของการเลื่อน ไถลที่ 2.2

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไถล			
	เส้นทางกรพิบัติ 2.2			
	ระดับคะแนนการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน (Drain Ditch) (S4)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.884	2.027	2.170	2.313
2	1.707	1.880	2.053	2.226
3	1.580	1.771	1.961	2.152
4	1.490	1.692	1.893	2.095
5	1.423	1.632	1.842	2.051
6	1.372	1.587	1.802	2.016
7	1.331	1.551	1.770	1.989
8	1.299	1.521	1.744	1.966
9	1.272	1.497	1.722	1.948
10	1.115	1.356	1.596	1.836
11	1.059	1.304	1.549	1.794
12	1.030	1.277	1.525	1.772
13	1.003	1.253	1.502	1.752
14	1.000	1.250	1.500	1.750
15	1.000	1.250	1.500	1.750

ตารางผนวกที่ ค22 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเคลื่อนตัวของ-  
รางระบายน้ำท้ายเขื่อน บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 2.3

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไถล			
	เส้นทางการพิบัติ 2.3			
	ระดับคะแนนการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน (Drain Ditch) (S4)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.938	2.080	2.223	2.366
2	1.736	1.909	2.082	2.255
3	1.598	1.789	1.979	2.170
4	1.502	1.704	1.905	2.107
5	1.432	1.641	1.850	2.060
6	1.378	1.593	1.808	2.023
7	1.336	1.556	1.775	1.994
8	1.303	1.525	1.748	1.970
9	1.275	1.501	1.726	1.951
10	1.116	1.356	1.596	1.836
11	1.059	1.304	1.549	1.794
12	1.030	1.277	1.525	1.772
13	1.003	1.253	1.502	1.752
14	1.000	1.250	1.500	1.750
15	1.000	1.250	1.500	1.750

ตารางผนวกที่ ค23 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเคลื่อนตัวของ-  
รางระบายน้ำท้ายเขื่อน บนเส้นทางกรพบัติของการเลือนไถลที่ 2.4

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลือนไถล			
	เส้นทางกรพบัติ 2.4			
	ระดับคะแนนการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน (Drain Ditch) (S4)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.938	2.080	2.223	2.366
2	1.736	1.909	2.082	2.255
3	1.598	1.789	1.979	2.170
4	1.502	1.704	1.905	2.107
5	1.432	1.641	1.850	2.060
6	1.378	1.593	1.808	2.023
7	1.336	1.556	1.775	1.994
8	1.303	1.525	1.748	1.970
9	1.275	1.501	1.726	1.951
10	1.116	1.356	1.596	1.836
11	1.059	1.304	1.549	1.794
12	1.030	1.277	1.525	1.772
13	1.003	1.253	1.502	1.752
14	1.000	1.250	1.500	1.750
15	1.000	1.250	1.500	1.750

ตารางผนวกที่ ค24 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเคลื่อนตัวของ-  
รางระบายน้ำท้ายเขื่อน บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อน ไถลที่ 2.5

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไถล			
	เส้นทางการพิบัติ 2.5			
	ระดับคะแนนการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน (Drain Ditch) (S4)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.027	1.170	1.313	1.455
2	1.014	1.188	1.361	1.534
3	1.009	1.199	1.390	1.580
4	1.006	1.208	1.409	1.611
5	1.004	1.214	1.423	1.632
6	1.003	1.218	1.433	1.648
7	1.003	1.222	1.441	1.660
8	1.002	1.225	1.447	1.670
9	1.002	1.227	1.452	1.677
10	1.000	1.240	1.480	1.720
11	1.000	1.245	1.490	1.735
12	1.000	1.248	1.495	1.743
13	1.000	1.250	1.500	1.749
14	1.000	1.250	1.500	1.750
15	1.000	1.250	1.500	1.750

ตารางผนวกที่ ค25 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเคลื่อนตัวของ-  
รางระบายน้ำท้ายเขื่อน บนเส้นทางกรพิบัติของการเลื่อน ไถลที่ 2.6

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไถล			
	เส้นทางกรพิบัติ 2.6			
	ระดับคะแนนการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน (Drain Ditch) (S4)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.107	1.250	1.393	1.536
2	1.058	1.231	1.404	1.577
3	1.036	1.226	1.417	1.607
4	1.024	1.226	1.427	1.629
5	1.017	1.227	1.436	1.645
6	1.013	1.228	1.443	1.658
7	1.010	1.229	1.449	1.668
8	1.008	1.231	1.453	1.676
9	1.007	1.232	1.457	1.682
10	1.001	1.241	1.481	1.721
11	1.000	1.245	1.490	1.735
12	1.000	1.248	1.495	1.743
13	1.000	1.250	1.500	1.749
14	1.000	1.250	1.500	1.750
15	1.000	1.250	1.500	1.750

ตารางผนวกที่ ค26 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเคลื่อนตัวของ-  
รางระบายน้ำท้ายเขื่อน บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไถลที่ 2.7

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไถล			
	เส้นทางการพิบัติ 2.7			
	ระดับคะแนนการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน (Drain Ditch) (S4)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.054	1.196	1.339	1.482
2	1.029	1.202	1.375	1.548
3	1.018	1.208	1.399	1.589
4	1.012	1.214	1.415	1.617
5	1.009	1.218	1.427	1.637
6	1.007	1.221	1.436	1.651
7	1.005	1.224	1.443	1.663
8	1.004	1.227	1.449	1.672
9	1.003	1.229	1.454	1.679
10	1.001	1.241	1.481	1.721
11	1.000	1.245	1.490	1.735
12	1.000	1.248	1.495	1.743
13	1.000	1.250	1.500	1.749
14	1.000	1.250	1.500	1.750
15	1.000	1.250	1.500	1.750

ตารางผนวกที่ ค27 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเคลื่อนตัวของ-  
รางระบายน้ำท้ายเขื่อน บนเส้นทางกรพิบัติของการเลื่อน ไถลที่ 2.8

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไถล			
	เส้นทางกรพิบัติ 2.8			
	ระดับคะแนนการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน (Drain Ditch) (S4)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.107	1.250	1.393	1.536
2	1.058	1.231	1.404	1.577
3	1.036	1.226	1.417	1.607
4	1.024	1.226	1.427	1.629
5	1.017	1.227	1.436	1.645
6	1.013	1.228	1.443	1.658
7	1.010	1.229	1.449	1.668
8	1.008	1.231	1.453	1.676
9	1.007	1.232	1.457	1.682
10	1.001	1.241	1.481	1.721
11	1.000	1.245	1.490	1.735
12	1.000	1.248	1.495	1.743
13	1.000	1.250	1.500	1.749
14	1.000	1.250	1.500	1.750
15	1.000	1.250	1.500	1.750

ตารางผนวกที่ ค28 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเคลื่อนตัวของ-  
รางระบายน้ำท้ายเขื่อน บนเส้นทางกรพบัติของการเลือนไถลที่ 2.9

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลือนไถล			
	เส้นทางกรพบัติ 2.9			
	ระดับคะแนนการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน (Drain Ditch) (S4)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.027	1.170	1.313	1.455
2	1.014	1.188	1.361	1.534
3	1.009	1.199	1.390	1.580
4	1.006	1.208	1.409	1.611
5	1.004	1.214	1.423	1.632
6	1.003	1.218	1.433	1.648
7	1.003	1.222	1.441	1.660
8	1.002	1.225	1.447	1.670
9	1.002	1.227	1.452	1.677
10	1.000	1.240	1.480	1.720
11	1.000	1.245	1.490	1.735
12	1.000	1.248	1.495	1.743
13	1.000	1.250	1.500	1.749
14	1.000	1.250	1.500	1.750
15	1.000	1.250	1.500	1.750

ตารางผนวกที่ ค29 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไหลที่ 3.1

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไหล			
	เส้นทางการพิบัติ 3.1			
	ระดับคะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว (S6)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.884	2.170	2.455	2.741
2	1.707	2.053	2.399	2.745
3	1.580	1.961	2.342	2.723
4	1.490	1.893	2.296	2.700
5	1.423	1.842	2.260	2.679
6	1.372	1.802	2.231	2.661
7	1.331	1.770	2.208	2.646
8	1.299	1.744	2.189	2.634
9	1.272	1.722	2.173	2.623
10	1.115	1.596	2.076	2.556
11	1.059	1.549	2.039	2.529
12	1.030	1.525	2.020	2.515
13	1.003	1.502	2.002	2.501
14	1.000	1.500	2.000	2.500
15	1.000	1.500	2.000	2.500

ตารางผนวกที่ ค30 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไหลที่ 3.2

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไหล			
	เส้นทางการพิบัติ 3.2			
	ระดับคะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว (S6)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.884	2.170	2.455	2.741
2	1.707	2.053	2.399	2.745
3	1.580	1.961	2.342	2.723
4	1.490	1.893	2.296	2.700
5	1.423	1.842	2.260	2.679
6	1.372	1.802	2.231	2.661
7	1.331	1.770	2.208	2.646
8	1.299	1.744	2.189	2.634
9	1.272	1.722	2.173	2.623
10	1.115	1.596	2.076	2.556
11	1.059	1.549	2.039	2.529
12	1.030	1.525	2.020	2.515
13	1.003	1.502	2.002	2.501
14	1.000	1.500	2.000	2.500
15	1.000	1.500	2.000	2.500

ตารางผนวกที่ ค31 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไหลที่ 3.3

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไหล			
	เส้นทางการพิบัติ 3.3			
	ระดับคะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยุบตัว, อุดตัว (S6)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.938	2.223	2.509	2.795
2	1.736	2.082	2.428	2.774
3	1.598	1.979	2.360	2.741
4	1.502	1.905	2.308	2.712
5	1.432	1.850	2.269	2.688
6	1.378	1.808	2.238	2.668
7	1.336	1.775	2.213	2.652
8	1.303	1.748	2.193	2.638
9	1.275	1.726	2.176	2.627
10	1.116	1.596	2.076	2.556
11	1.059	1.549	2.039	2.529
12	1.030	1.525	2.020	2.515
13	1.003	1.502	2.002	2.501
14	1.000	1.500	2.000	2.500
15	1.000	1.500	2.000	2.500

ตารางผนวกที่ ค32 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยวบตัว, อุดตัว บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไหลที่ 3.4

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไหล			
	เส้นทางการพิบัติ 3.4			
	ระดับคะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยวบตัว, อุดตัว (S6)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.938	2.223	2.509	2.795
2	1.736	2.082	2.428	2.774
3	1.598	1.979	2.360	2.741
4	1.502	1.905	2.308	2.712
5	1.432	1.850	2.269	2.688
6	1.378	1.808	2.238	2.668
7	1.336	1.775	2.213	2.652
8	1.303	1.748	2.193	2.638
9	1.275	1.726	2.176	2.627
10	1.116	1.596	2.076	2.556
11	1.059	1.549	2.039	2.529
12	1.030	1.525	2.020	2.515
13	1.003	1.502	2.002	2.501
14	1.000	1.500	2.000	2.500
15	1.000	1.500	2.000	2.500

ตารางผนวกที่ ค33 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยวบตัว, อุดตัว บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไหลที่ 3.5

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไหล			
	เส้นทางการพิบัติ 3.5			
	ระดับคะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยวบตัว, อุดตัว (S6)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.027	1.313	1.598	1.884
2	1.014	1.361	1.707	2.053
3	1.009	1.390	1.771	2.152
4	1.006	1.409	1.813	2.216
5	1.004	1.423	1.842	2.260
6	1.003	1.433	1.863	2.293
7	1.003	1.441	1.879	2.318
8	1.002	1.447	1.892	2.337
9	1.002	1.452	1.903	2.353
10	1.000	1.480	1.960	2.440
11	1.000	1.490	1.980	2.470
12	1.000	1.495	1.990	2.485
13	1.000	1.500	1.999	2.499
14	1.000	1.500	2.000	2.500
15	1.000	1.500	2.000	2.500

ตารางผนวกที่ ค34 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยวบตัว, อุดตัว บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไหลที่ 3.6

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไหล			
	เส้นทางการพิบัติ 3.6			
	ระดับคะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยวบตัว, อุดตัว (S6)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.107	1.393	1.679	1.964
2	1.058	1.404	1.750	2.096
3	1.036	1.417	1.798	2.179
4	1.024	1.427	1.831	2.234
5	1.017	1.436	1.855	2.273
6	1.013	1.443	1.873	2.303
7	1.010	1.449	1.887	2.325
8	1.008	1.453	1.898	2.343
9	1.007	1.457	1.908	2.358
10	1.001	1.481	1.961	2.441
11	1.000	1.490	1.980	2.470
12	1.000	1.495	1.990	2.485
13	1.000	1.500	1.999	2.499
14	1.000	1.500	2.000	2.500
15	1.000	1.500	2.000	2.500

ตารางผนวกที่ ค35 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยวบตัว, อุดตัว บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไหลที่ 3.7

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไหล			
	เส้นทางการพิบัติ 3.7			
	ระดับคะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยวบตัว, อุดตัว (S6)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.054	1.339	1.625	1.911
2	1.029	1.375	1.721	2.067
3	1.018	1.399	1.780	2.161
4	1.012	1.415	1.819	2.222
5	1.009	1.427	1.846	2.265
6	1.007	1.436	1.866	2.296
7	1.005	1.443	1.882	2.320
8	1.004	1.449	1.894	2.339
9	1.003	1.454	1.904	2.355
10	1.001	1.481	1.961	2.441
11	1.000	1.490	1.980	2.470
12	1.000	1.495	1.990	2.485
13	1.000	1.500	1.999	2.499
14	1.000	1.500	2.000	2.500
15	1.000	1.500	2.000	2.500

ตารางผนวกที่ ค36 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยวบตัว, อุดตัว บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไหลที่ 3.8

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไหล			
	เส้นทางการพิบัติ 3.8			
	ระดับคะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยวบตัว, อุดตัว (S6)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.107	1.393	1.679	1.964
2	1.058	1.404	1.750	2.096
3	1.036	1.417	1.798	2.179
4	1.024	1.427	1.831	2.234
5	1.017	1.436	1.855	2.273
6	1.013	1.443	1.873	2.303
7	1.010	1.449	1.887	2.325
8	1.008	1.453	1.898	2.343
9	1.007	1.457	1.908	2.358
10	1.001	1.481	1.961	2.441
11	1.000	1.490	1.980	2.470
12	1.000	1.495	1.990	2.485
13	1.000	1.500	1.999	2.499
14	1.000	1.500	2.000	2.500
15	1.000	1.500	2.000	2.500

ตารางผนวกที่ ค37 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยวบตัว, อุดตัว บนเส้นทางการพิบัติของการเลื่อนไหลที่ 3.9

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการเลื่อนไหล			
	เส้นทางการพิบัติ 3.9			
	ระดับคะแนนการเลื่อนไหล, เคลื่อนตัว, ยวบตัว, อุดตัว (S6)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.027	1.313	1.598	1.884
2	1.014	1.361	1.707	2.053
3	1.009	1.390	1.771	2.152
4	1.006	1.409	1.813	2.216
5	1.004	1.423	1.842	2.260
6	1.003	1.433	1.863	2.293
7	1.003	1.441	1.879	2.318
8	1.002	1.447	1.892	2.337
9	1.002	1.452	1.903	2.353
10	1.000	1.480	1.960	2.440
11	1.000	1.490	1.980	2.470
12	1.000	1.495	1.990	2.485
13	1.000	1.500	1.999	2.499
14	1.000	1.500	2.000	2.500
15	1.000	1.500	2.000	2.500

ตารางผนวกที่ ค38 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนระดับสันเขื่อนต่ำกว่าระดับน้ำหน้าเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด บนเส้นทางการพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนที่ 1

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการไหลล้นข้ามสันเขื่อน			
	เส้นทางการพิบัติ 1			
	ระดับคะแนนระดับสันเขื่อนต่ำกว่าระดับน้ำหน้าเขื่อน หรือ			
	ระดับน้ำสูงสุด (O8)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.161	1.446	1.732	2.018
2	1.115	1.462	1.808	2.154
3	1.089	1.470	1.851	2.232
4	1.073	1.476	1.879	2.282
5	1.061	1.480	1.898	2.317
6	1.053	1.482	1.912	2.342
7	1.046	1.485	1.923	2.361
8	1.041	1.486	1.931	2.376
9	1.037	1.488	1.938	2.389
10	1.015	1.495	1.975	2.455
11	1.007	1.498	1.988	2.478
12	1.004	1.499	1.994	2.489
13	1.000	1.500	1.999	2.499
14	1.000	1.500	2.000	2.500
15	1.000	1.500	2.000	2.500

ตารางผนวกที่ ค39 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสันเขื่อน  
หรือระดับน้ำสูงสุด บนเส้นทางกรพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนที่ 2.1

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการไหลล้นข้ามสันเขื่อน			
	เส้นทางกรพิบัติ 2.1			
	ระดับคะแนนปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด (O9)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.241	1.527	1.813	2.098
2	1.188	1.534	1.880	2.226
3	1.152	1.533	1.914	2.295
4	1.127	1.530	1.933	2.337
5	1.109	1.528	1.946	2.365
6	1.095	1.525	1.955	2.385
7	1.085	1.523	1.961	2.400
8	1.076	1.521	1.966	2.411
9	1.069	1.520	1.970	2.421
10	1.029	1.509	1.989	2.469
11	1.015	1.505	1.995	2.485
12	1.007	1.502	1.997	2.492
13	1.001	1.500	2.000	2.499
14	1.000	1.500	2.000	2.500
15	1.000	1.500	2.000	2.500

ตารางผนวกที่ ค40 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด บนเส้นทางกรพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนที่ 2.2

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการไหลล้นข้ามสันเขื่อน			
	เส้นทางกรพิบัติ 2.2			
	ระดับคะแนนปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด (O9)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.268	1.554	1.839	2.125
2	1.202	1.548	1.894	2.240
3	1.161	1.542	1.923	2.304
4	1.133	1.536	1.940	2.343
5	1.113	1.532	1.951	2.369
6	1.099	1.529	1.958	2.388
7	1.087	1.526	1.964	2.402
8	1.078	1.523	1.968	2.413
9	1.071	1.521	1.972	2.422
10	1.029	1.509	1.989	2.469
11	1.015	1.505	1.995	2.485
12	1.007	1.502	1.997	2.492
13	1.001	1.500	2.000	2.499
14	1.000	1.500	2.000	2.500
15	1.000	1.500	2.000	2.500

ตารางผนวกที่ ค41 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสันเขื่อน  
หรือระดับน้ำสูงสุด บนเส้นทางกรพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนที่ 2.3

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการไหลล้นข้ามสันเขื่อน			
	เส้นทางกรพิบัติ 2.3			
	ระดับคะแนนปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด (O9)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.241	1.527	1.813	2.098
2	1.188	1.534	1.880	2.226
3	1.152	1.533	1.914	2.295
4	1.127	1.530	1.933	2.337
5	1.109	1.528	1.946	2.365
6	1.095	1.525	1.955	2.385
7	1.085	1.523	1.961	2.400
8	1.076	1.521	1.966	2.411
9	1.069	1.520	1.970	2.421
10	1.029	1.509	1.989	2.469
11	1.015	1.505	1.995	2.485
12	1.007	1.502	1.997	2.492
13	1.001	1.500	2.000	2.499
14	1.000	1.500	2.000	2.500
15	1.000	1.500	2.000	2.500

ตารางผนวกที่ ค42 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสันเขื่อน  
หรือระดับน้ำสูงสุด บนเส้นทางการพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนที่ 2.4

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการไหลล้นข้ามสันเขื่อน			
	เส้นทางการพิบัติ 2.4			
	ระดับคะแนนปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด (O9)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.295	1.580	1.866	2.152
2	1.216	1.563	1.909	2.255
3	1.170	1.551	1.932	2.313
4	1.139	1.542	1.946	2.349
5	1.118	1.536	1.955	2.374
6	1.102	1.532	1.962	2.391
7	1.090	1.528	1.967	2.405
8	1.080	1.525	1.970	2.416
9	1.073	1.523	1.974	2.424
10	1.030	1.510	1.990	2.470
11	1.015	1.505	1.995	2.485
12	1.007	1.502	1.997	2.492
13	1.001	1.500	2.000	2.499
14	1.000	1.500	2.000	2.500
15	1.000	1.500	2.000	2.500

ตารางผนวกที่ ค43 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสันเขื่อน  
หรือระดับน้ำสูงสุด บนเส้นทางกรพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนที่ 2.5

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการไหลล้นข้ามสันเขื่อน			
	เส้นทางกรพิบัติ 2.5			
	ระดับคะแนนปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด (O9)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.214	1.500	1.786	2.071
2	1.173	1.519	1.865	2.212
3	1.143	1.524	1.905	2.286
4	1.121	1.524	1.927	2.331
5	1.105	1.523	1.942	2.360
6	1.092	1.522	1.952	2.382
7	1.082	1.521	1.959	2.397
8	1.074	1.519	1.964	2.409
9	1.068	1.518	1.968	2.419
10	1.029	1.509	1.989	2.469
11	1.015	1.505	1.995	2.485
12	1.007	1.502	1.997	2.492
13	1.001	1.500	2.000	2.499
14	1.000	1.500	2.000	2.500
15	1.000	1.500	2.000	2.500

ตารางผนวกที่ ค44 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสันเขื่อน  
หรือระดับน้ำสูงสุด บนเส้นทางกรพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนที่ 2.6

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการไหลล้นข้ามสันเขื่อน			
	เส้นทางกรพิบัติ 2.6			
	ระดับคะแนนปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด (O9)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.321	1.607	1.893	2.179
2	1.231	1.577	1.923	2.269
3	1.179	1.560	1.940	2.321
4	1.145	1.548	1.952	2.355
5	1.122	1.541	1.959	2.378
6	1.105	1.535	1.965	2.395
7	1.092	1.531	1.969	2.408
8	1.082	1.527	1.973	2.418
9	1.074	1.525	1.975	2.426
10	1.030	1.510	1.990	2.470
11	1.015	1.505	1.995	2.485
12	1.007	1.502	1.998	2.493
13	1.001	1.500	2.000	2.499
14	1.000	1.500	2.000	2.500
15	1.000	1.500	2.000	2.500

ตารางผนวกที่ ค45 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสันเขื่อน  
หรือระดับน้ำสูงสุด บนเส้นทางกรพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนที่ 2.7

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการไหลล้นข้ามสันเขื่อน			
	เส้นทางกรพิบัติ 2.7			
	ระดับคะแนนปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด (O9)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.321	1.607	1.893	2.179
2	1.231	1.577	1.923	2.269
3	1.179	1.560	1.940	2.321
4	1.145	1.548	1.952	2.355
5	1.122	1.541	1.959	2.378
6	1.105	1.535	1.965	2.395
7	1.092	1.531	1.969	2.408
8	1.082	1.527	1.973	2.418
9	1.074	1.525	1.975	2.426
10	1.030	1.510	1.990	2.470
11	1.015	1.505	1.995	2.485
12	1.007	1.502	1.998	2.493
13	1.001	1.500	2.000	2.499
14	1.000	1.500	2.000	2.500
15	1.000	1.500	2.000	2.500

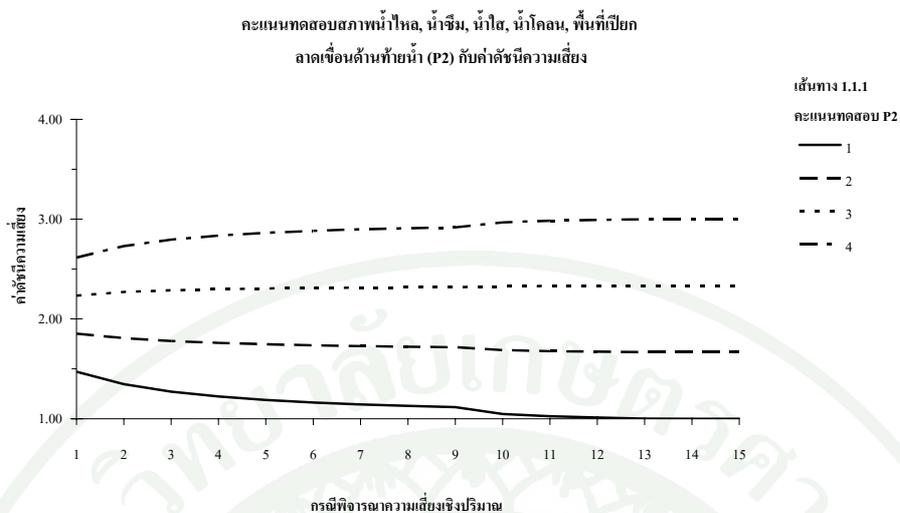
ตารางผนวกที่ ค46 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสันเขื่อน  
หรือระดับน้ำสูงสุด บนเส้นทางกรพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนที่ 2.8

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการไหลล้นข้ามสันเขื่อน			
	เส้นทางกรพิบัติ 2.8			
	ระดับคะแนนปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด (O9)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.241	1.527	1.813	2.098
2	1.188	1.534	1.880	2.226
3	1.152	1.533	1.914	2.295
4	1.127	1.530	1.933	2.337
5	1.109	1.528	1.946	2.365
6	1.095	1.525	1.955	2.385
7	1.085	1.523	1.961	2.400
8	1.076	1.521	1.966	2.411
9	1.069	1.520	1.970	2.421
10	1.029	1.509	1.989	2.469
11	1.015	1.505	1.995	2.485
12	1.007	1.502	1.997	2.492
13	1.001	1.500	2.000	2.499
14	1.000	1.500	2.000	2.500
15	1.000	1.500	2.000	2.500

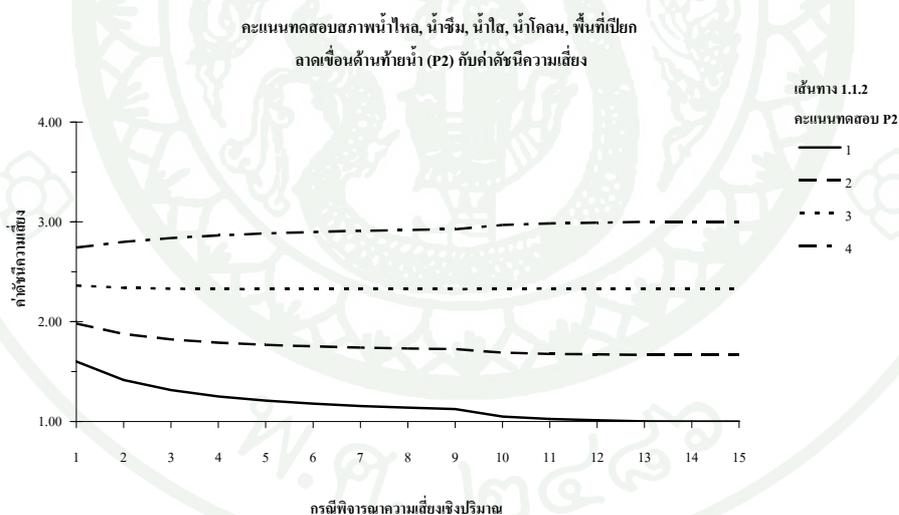
ตารางผนวกที่ ค47 ค่าดัชนีความเสี่ยงจากการทดสอบการให้คะแนนปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสันเขื่อน  
หรือระดับน้ำสูงสุด บนเส้นทางการพิบัติของการไหลล้นข้ามสันเขื่อนที่ 2.9

กรณี พิจารณา- ความเสี่ยง- เชิงปริมาณที่	สภาพก่อนเกิดการไหลล้นข้ามสันเขื่อน			
	เส้นทางการพิบัติ 2.9			
	ระดับคะแนนปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสันเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด (O9)			
	1	2	3	4
	ค่าดัชนีความเสี่ยง			
1	1.107	1.393	1.679	1.964
2	1.087	1.433	1.779	2.125
3	1.071	1.452	1.833	2.214
4	1.060	1.464	1.867	2.270
5	1.052	1.471	1.890	2.308
6	1.046	1.476	1.906	2.336
7	1.041	1.479	1.918	2.356
8	1.037	1.482	1.927	2.372
9	1.034	1.484	1.935	2.385
10	1.014	1.494	1.974	2.454
11	1.007	1.497	1.987	2.477
12	1.004	1.499	1.994	2.489
13	1.000	1.500	1.999	2.499
14	1.000	1.500	2.000	2.500
15	1.000	1.500	2.000	2.500

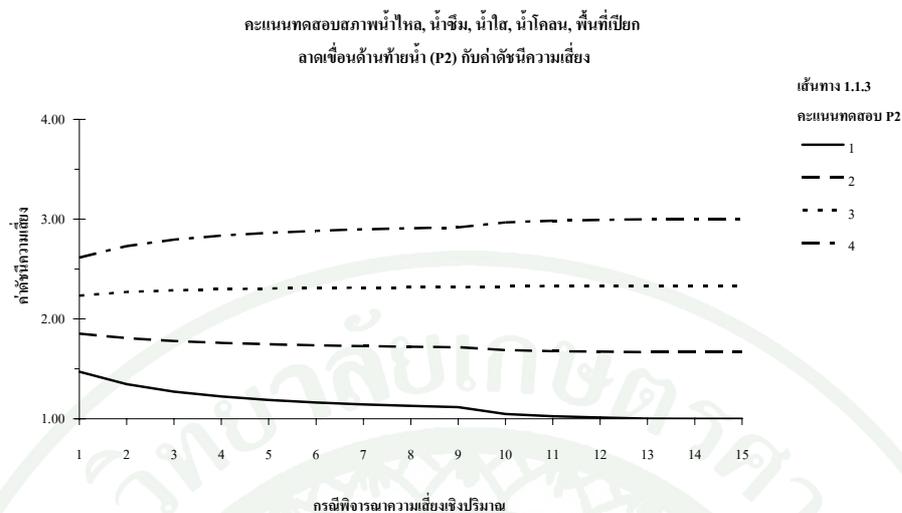




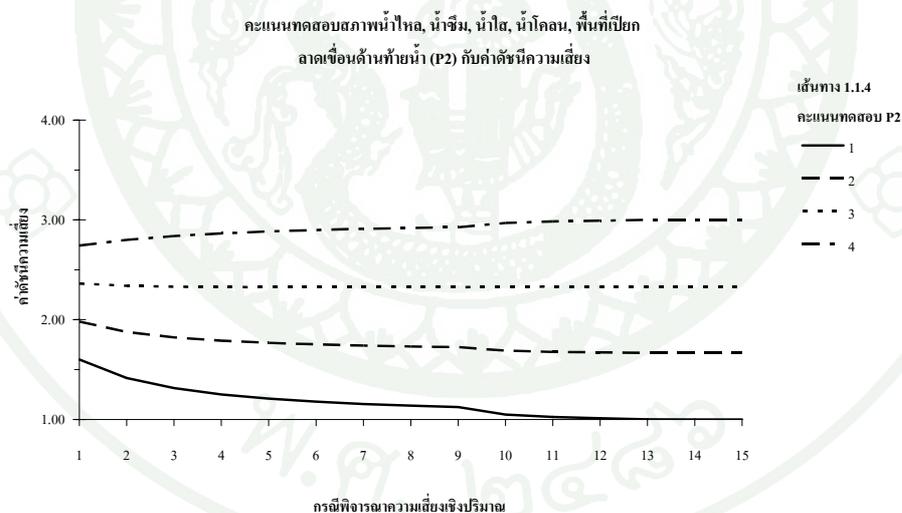
**ภาพผนวกที่ 1** แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาง-  
การพิบัติที่ 1.1.1 ของการทดสอบคะแนนสภาพน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส,  
น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ



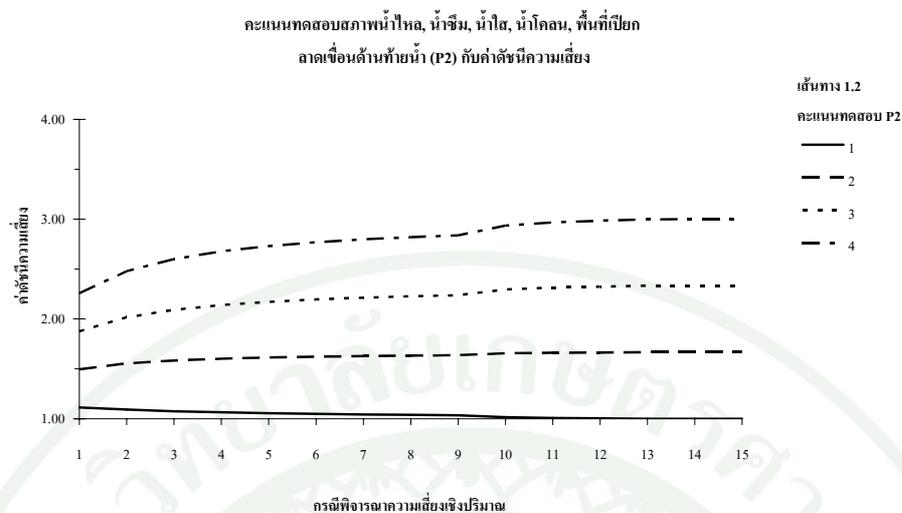
**ภาพผนวกที่ 2** แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาง-  
การพิบัติที่ 1.1.2 ของการทดสอบคะแนนสภาพน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส,  
น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ



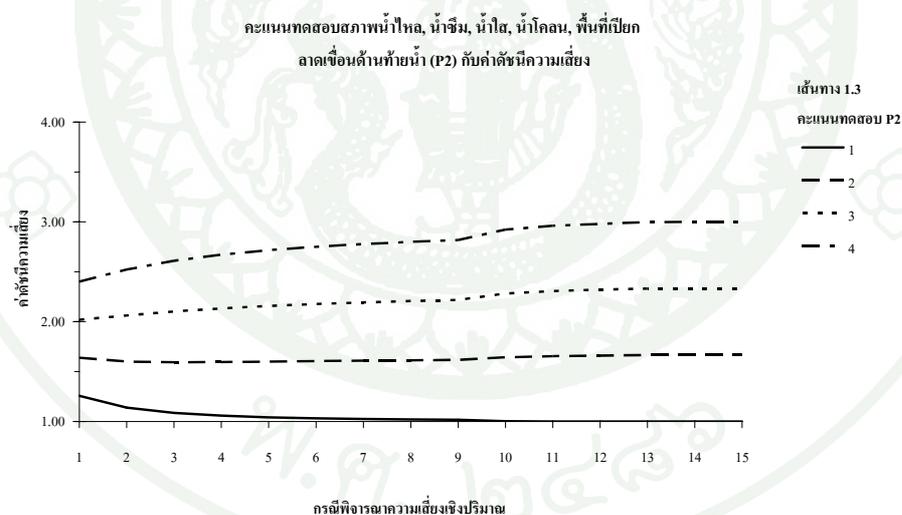
**ภาพผนวกที่ 33** แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาง-  
การพิบัติที่ 1.1.3 ของการทดสอบคะแนนสภาพน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส,  
น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ



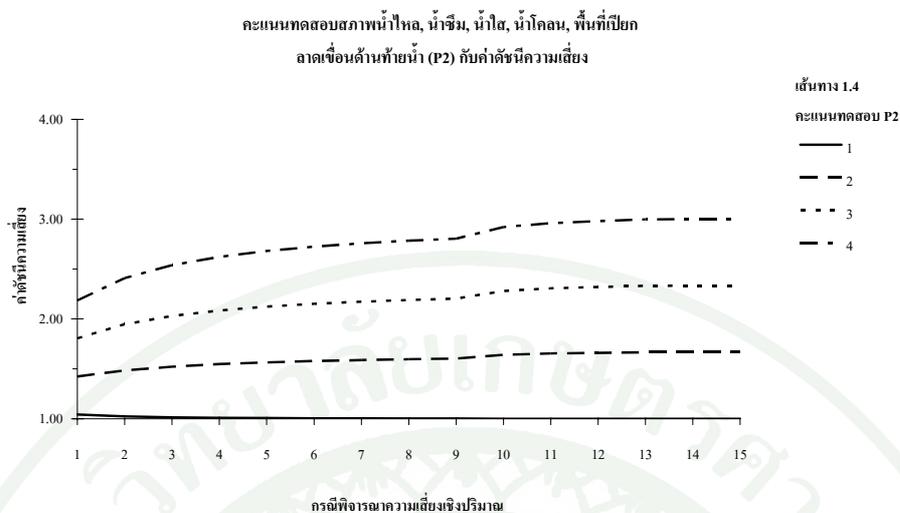
**ภาพผนวกที่ 34** แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาง-  
การพิบัติที่ 1.1.4 ของการทดสอบคะแนนสภาพน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส,  
น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ



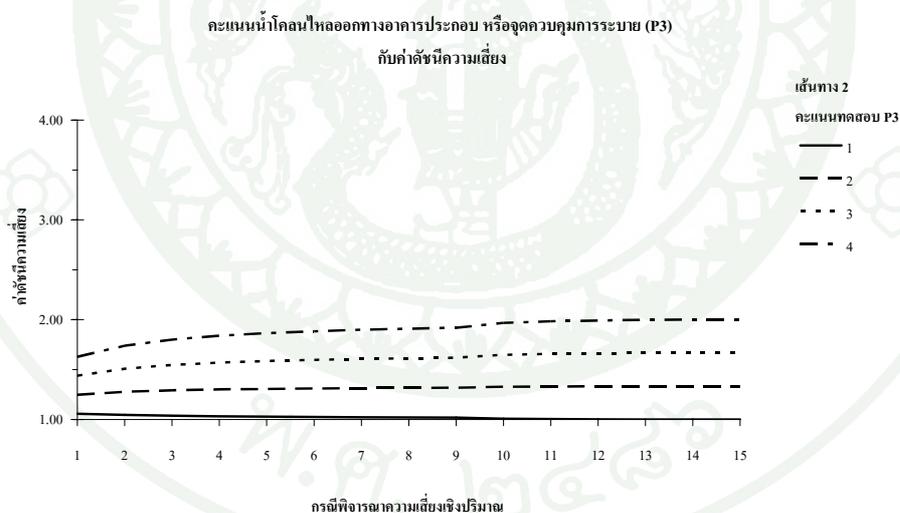
ภาพผนวกที่ 35 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาง-  
การพิบัติที่ 1.2 ของการทดสอบคะแนนสภาพน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส,  
น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ



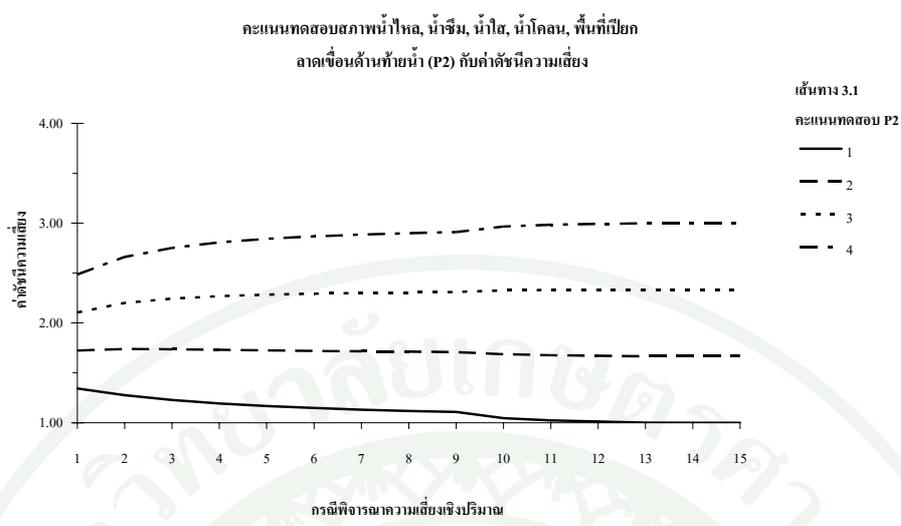
ภาพผนวกที่ 36 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาง-  
การพิบัติที่ 1.3 ของการทดสอบคะแนนสภาพน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส,  
น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ



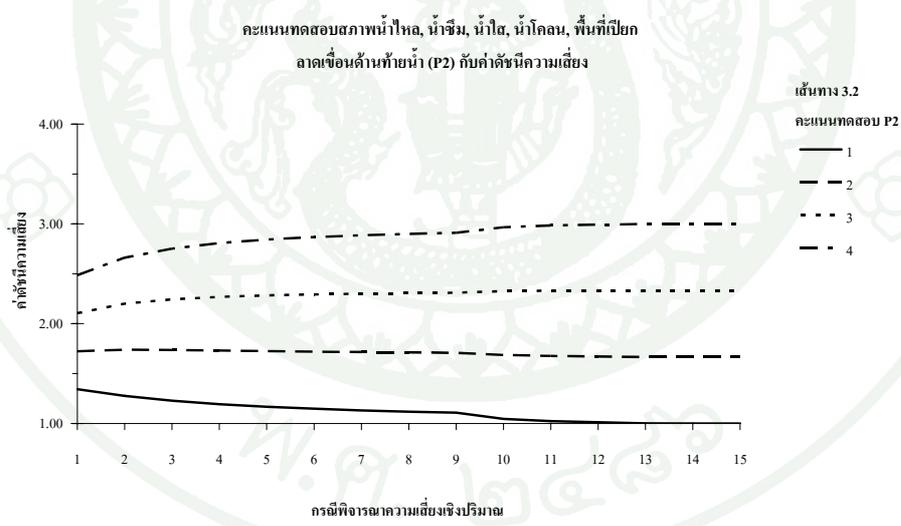
ภาพผนวกที่ ๗ แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาง-  
การพิบัติที่ 1.4 ของการทดสอบคะแนนสภาพน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส,  
น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ



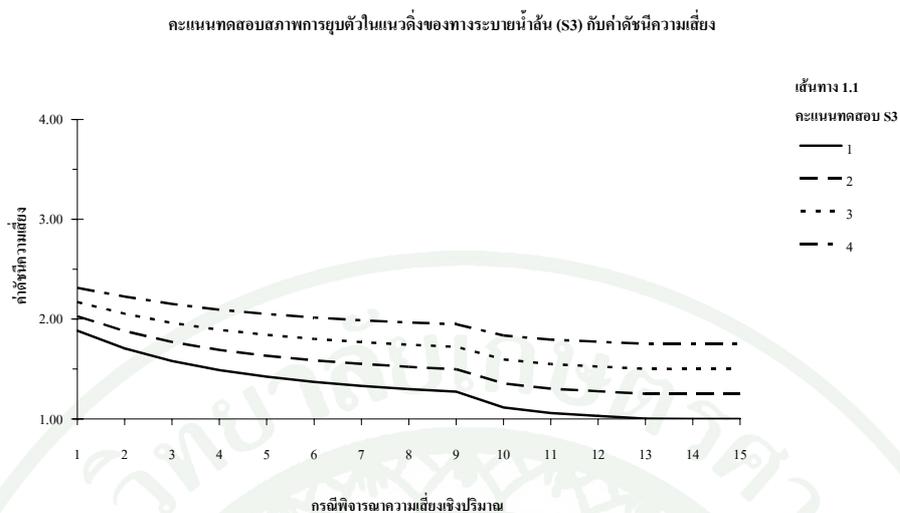
ภาพผนวกที่ ๘ แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาง-  
การพิบัติที่ 2 ของการทดสอบคะแนนน้ำโคลนไหลออกทางอาคารประกอบ  
หรือจุดควบคุมการระบาย



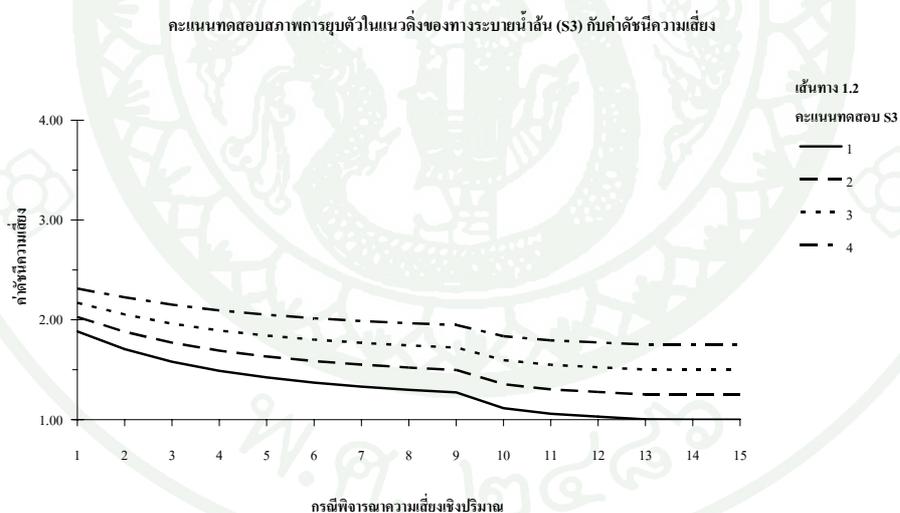
**ภาพผนวกที่ 9** แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาง-  
การพิบัติที่ 3.1 ของการทดสอบคะแนนสภาพน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส,  
น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเชื่อมด้านท้ายน้ำ



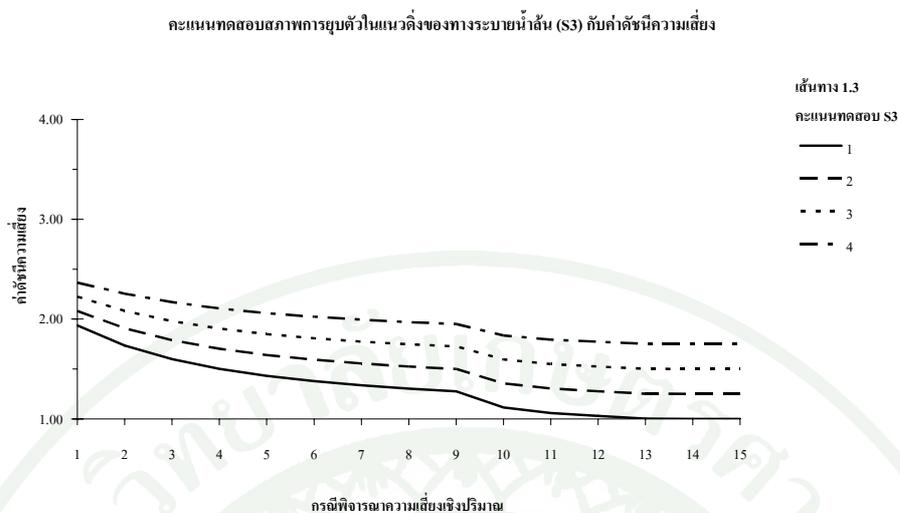
**ภาพผนวกที่ 10** แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาง-  
การพิบัติที่ 3.2 ของการทดสอบคะแนนสภาพน้ำไหล, น้ำซึม, น้ำใส,  
น้ำโคลน, พื้นที่เปียก ลาดเชื่อมด้านท้ายน้ำ



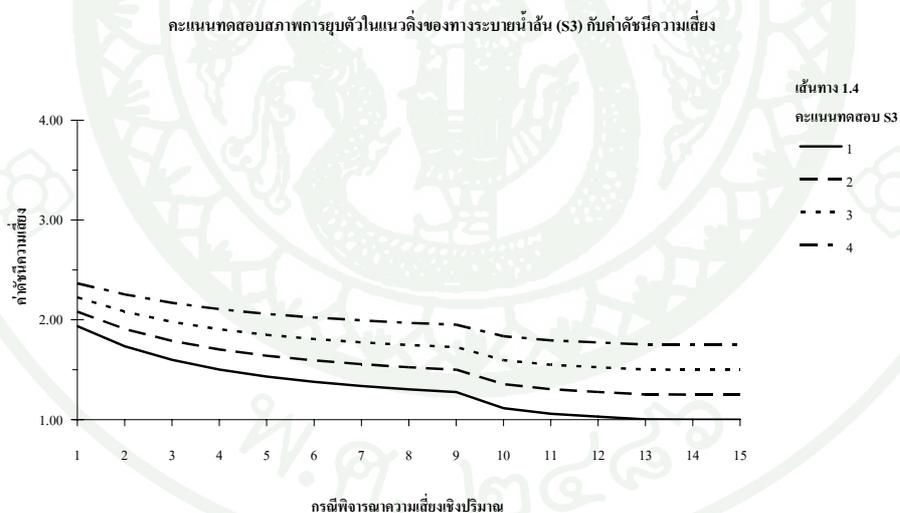
**ภาพผนวกที่ 11** แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาง-  
การพิบัติที่ 1.1 ของการทดสอบคะแนนสภาพการยวบตัวในแนวตั้งของ-  
ทางระบายน้ำสั้น



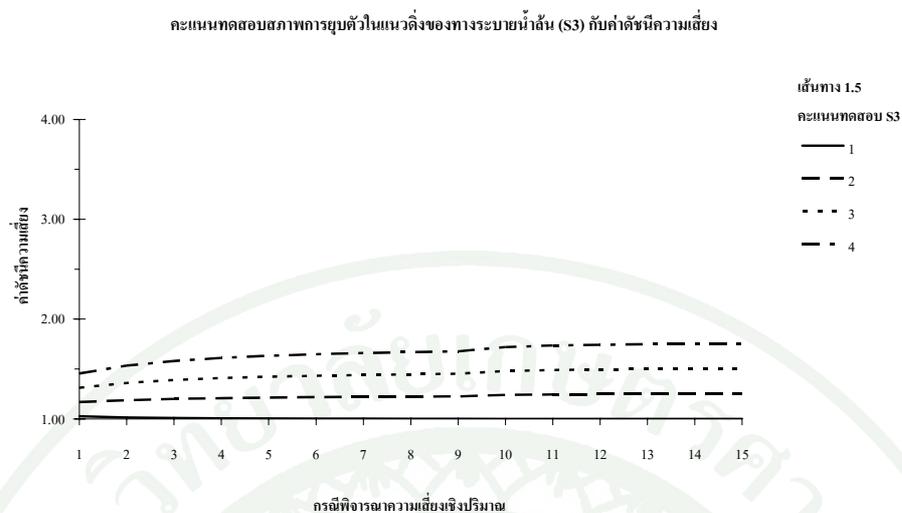
**ภาพผนวกที่ 12** แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาง-  
การพิบัติที่ 1.2 ของการทดสอบคะแนนสภาพการยวบตัวในแนวตั้งของ-  
ทางระบายน้ำสั้น



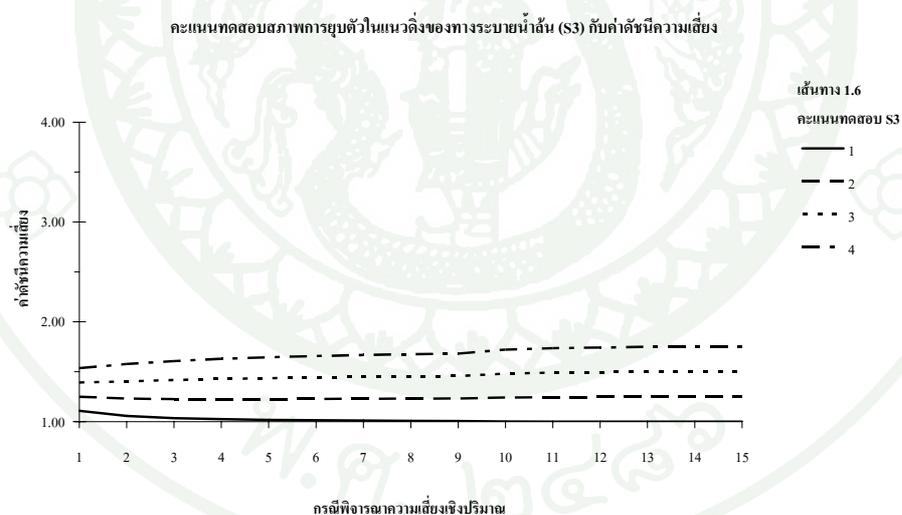
**ภาพผนวกที่ 13** แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1.3 ของการทดสอบคะแนนสภาพการยวบตัวในแนวตั้งของทางระบายน้ำสั้น



**ภาพผนวกที่ 14** แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1.4 ของการทดสอบคะแนนสภาพการยวบตัวในแนวตั้งของทางระบายน้ำสั้น

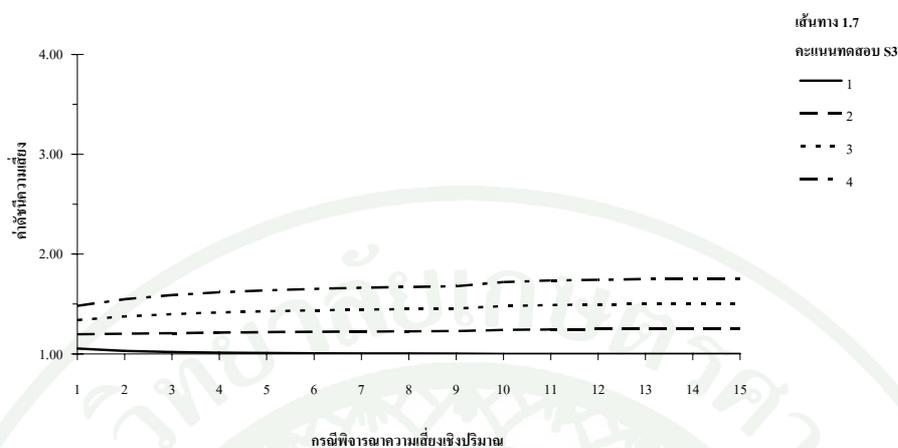


ภาพผนวกที่ 15 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1.5 ของการทดสอบคะแนนสภาพการยวบตัวในแนวตั้งของทางระบายน้ำสั้น



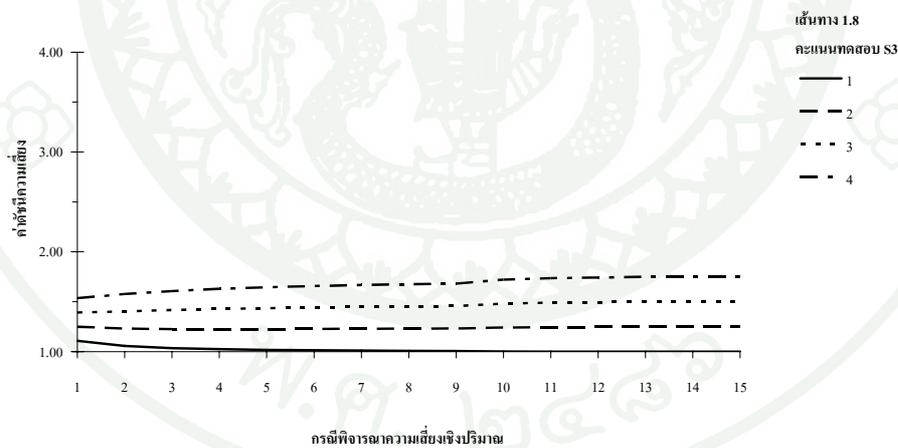
ภาพผนวกที่ 16 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1.6 ของการทดสอบคะแนนสภาพการยวบตัวในแนวตั้งของทางระบายน้ำสั้น

คะแนนทดสอบสภาพการยวบตัวในแนวตั้งของทางระบายน้ำสั้น (S3) กับค่าดัชนีความเสี่ยง



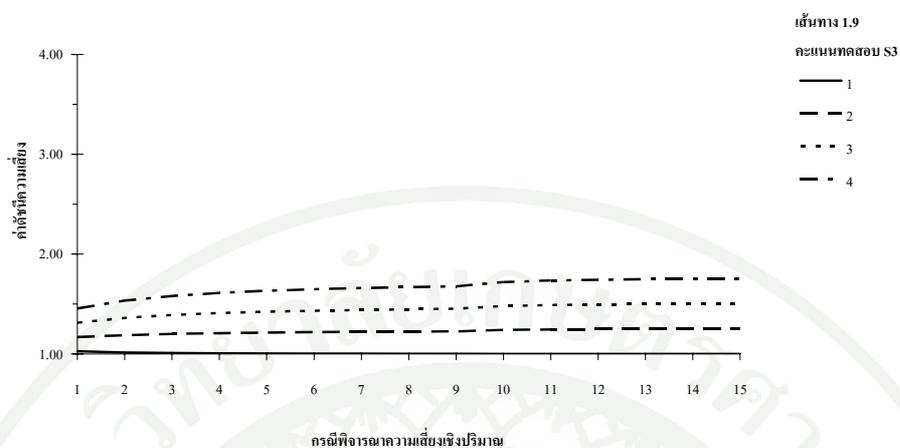
ภาพผนวกที่ 17 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1.7 ของการทดสอบคะแนนสภาพการยวบตัวในแนวตั้งของทางระบายน้ำสั้น

คะแนนทดสอบสภาพการยวบตัวในแนวตั้งของทางระบายน้ำสั้น (S3) กับค่าดัชนีความเสี่ยง



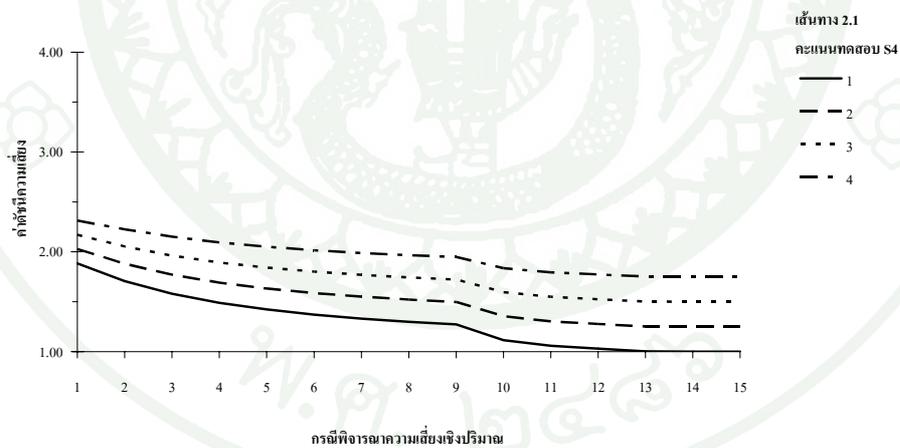
ภาพผนวกที่ 18 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1.8 ของการทดสอบคะแนนสภาพการยวบตัวในแนวตั้งของทางระบายน้ำสั้น

คะแนนทดสอบสภาพการยวบตัวในแนวตั้งของทางระบายน้ำสั้น (S3) กับค่าดัชนีความเสี่ยง

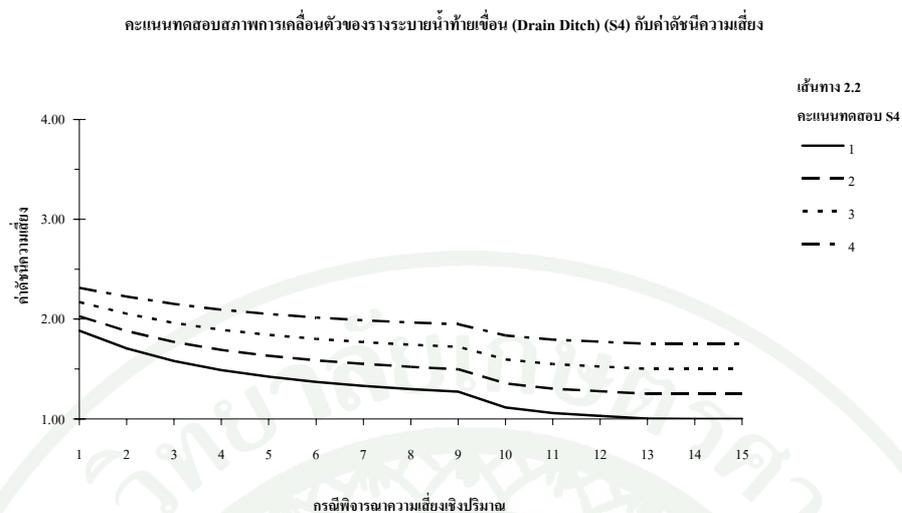


ภาพผนวกที่ 19 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 1.9 ของการทดสอบคะแนนสภาพการยวบตัวในแนวตั้งของทางระบายน้ำสั้น

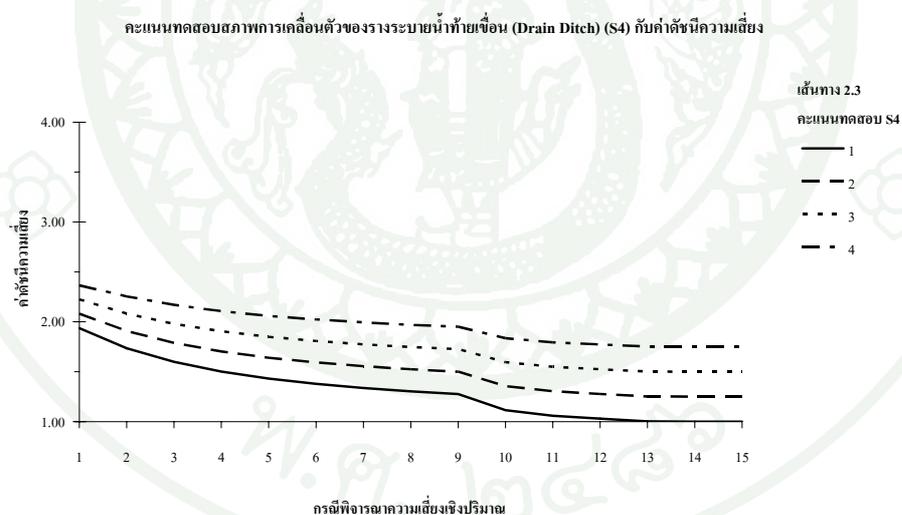
คะแนนทดสอบสภาพการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน (Drain Ditch) (S4) กับค่าดัชนีความเสี่ยง



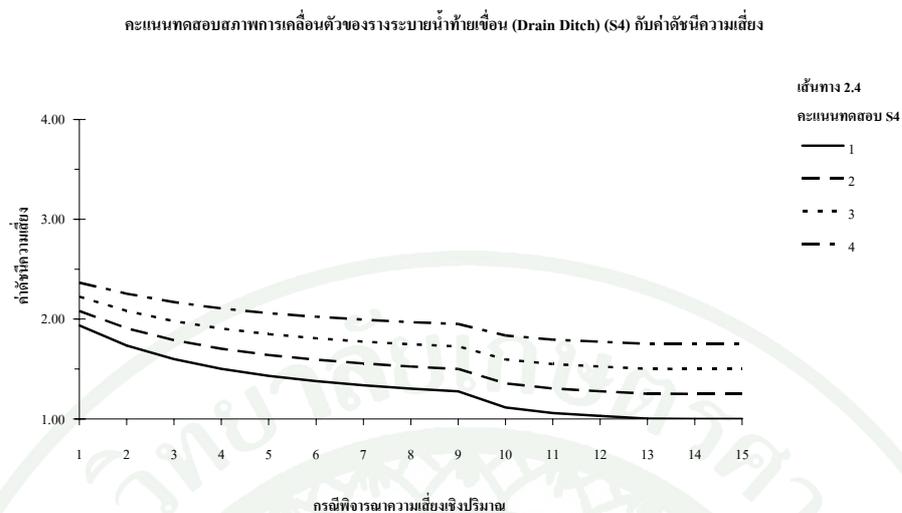
ภาพผนวกที่ 20 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.1 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน



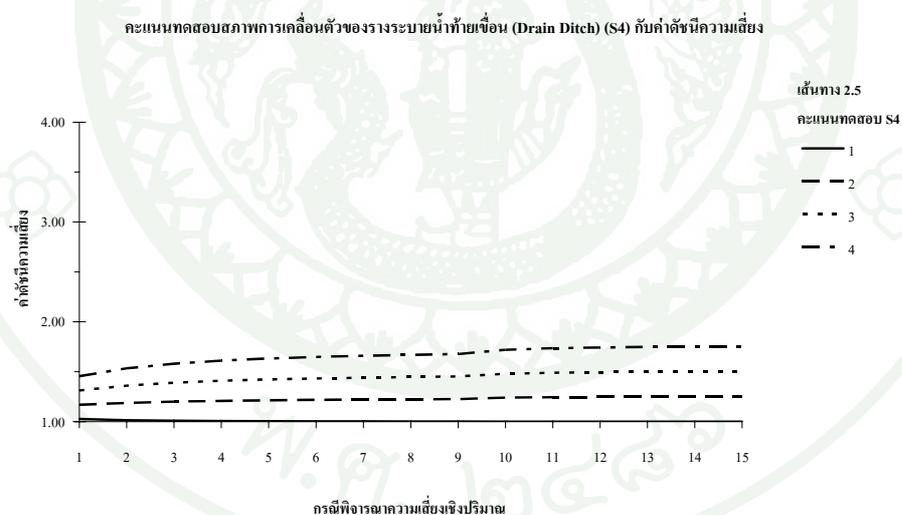
ภาพผนวกที่ 21 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาง-  
การพิบัติที่ 2.2 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเคลื่อนตัวของราระบายน้ำ  
ท้ายเขื่อน



ภาพผนวกที่ 22 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาง-  
การพิบัติที่ 2.3 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเคลื่อนตัวของราระบายน้ำ  
ท้ายเขื่อน

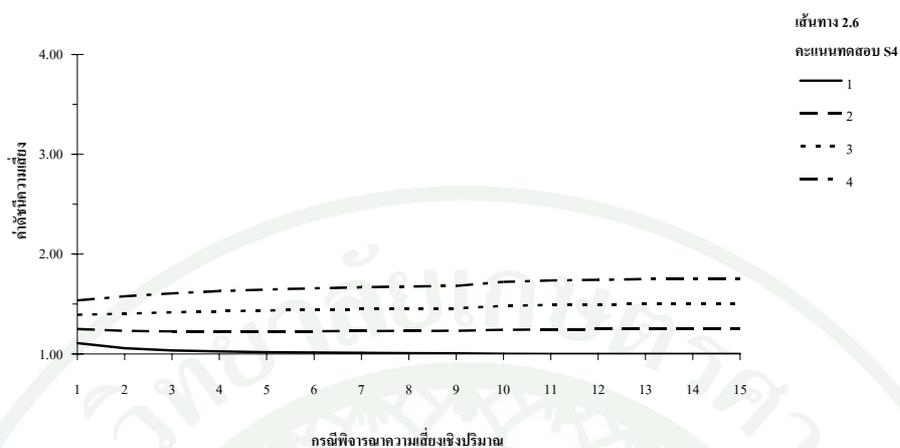


ภาพผนวกที่ 23 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาง-  
การพิบัติที่ 2.4 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำ-  
ท้ายเขื่อน



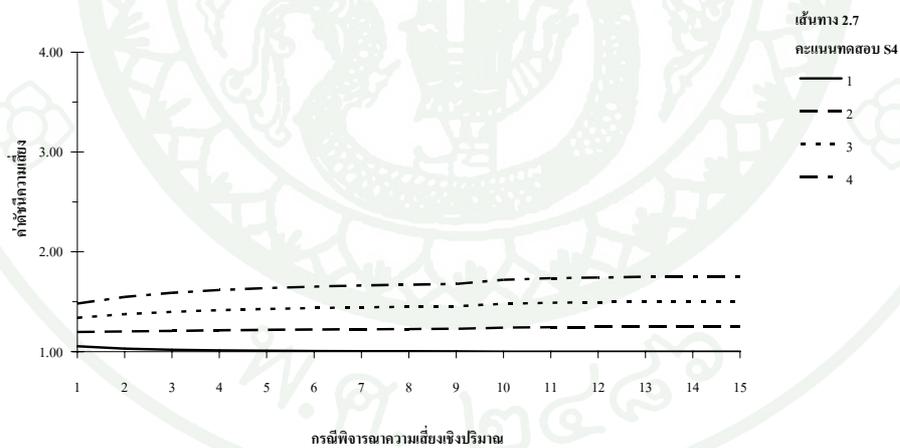
ภาพผนวกที่ 24 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาง-  
การพิบัติที่ 2.5 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำ-  
ท้ายเขื่อน

คะแนนทดสอบสภาพการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน (Drain Ditch) (S4) กับค่าดัชนีความเสี่ยง

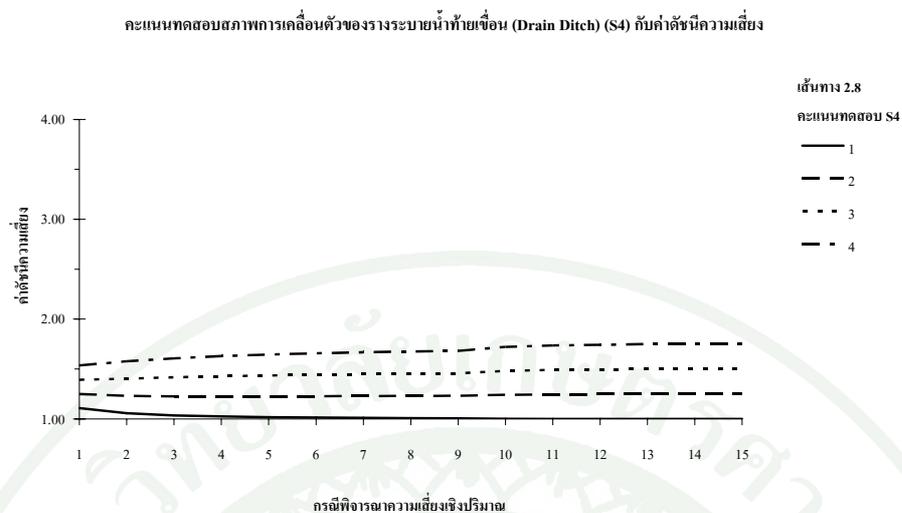


ภาพผนวกที่ 25 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.6 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน

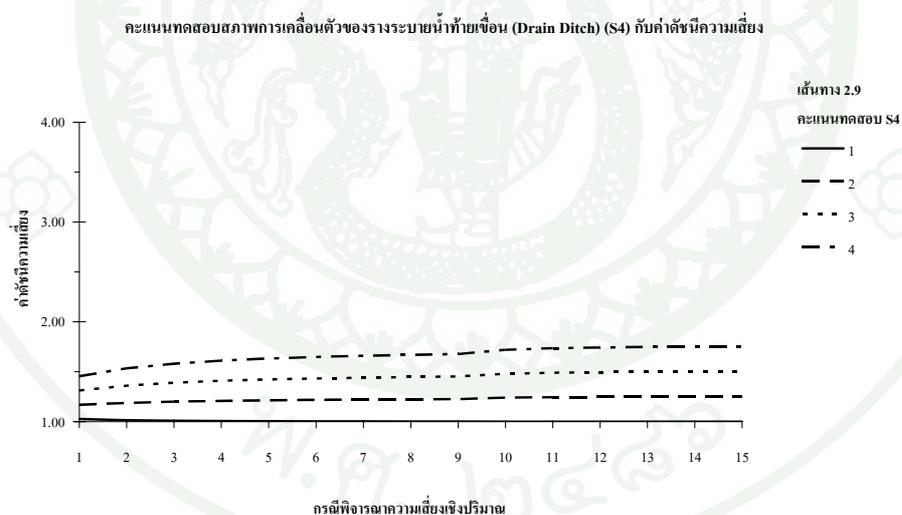
คะแนนทดสอบสภาพการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน (Drain Ditch) (S4) กับค่าดัชนีความเสี่ยง



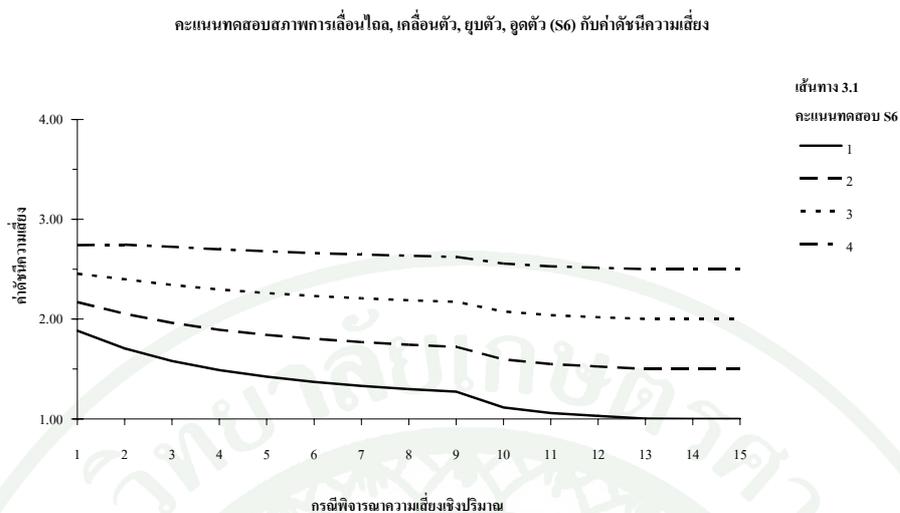
ภาพผนวกที่ 26 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.7 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเคลื่อนตัวของรางระบายน้ำท้ายเขื่อน



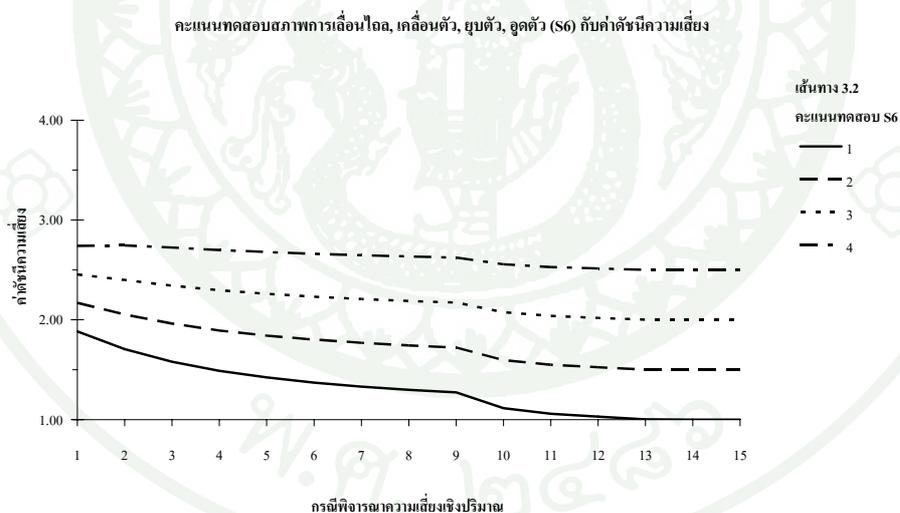
ภาพผนวกที่ 27 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.8 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเคลื่อนตัวของราระบายน้ำท้ายเขื่อน



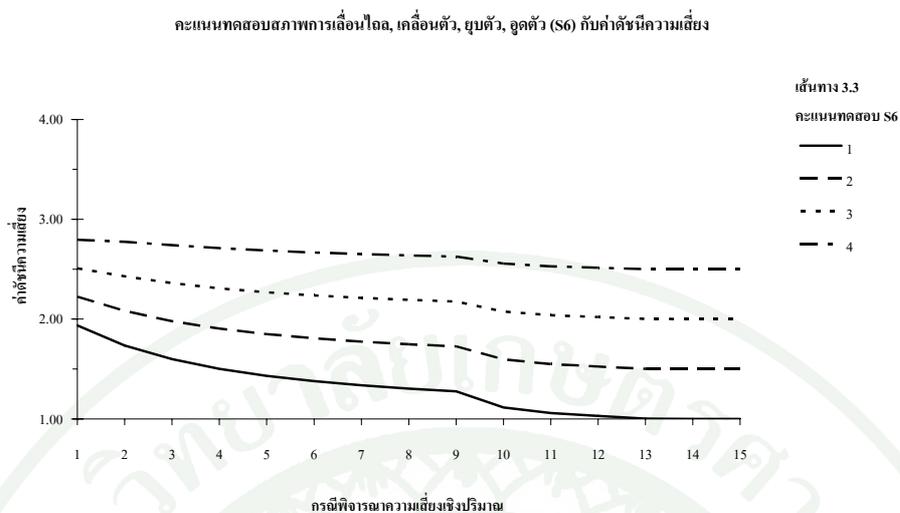
ภาพผนวกที่ 28 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.9 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเคลื่อนตัวของราระบายน้ำท้ายเขื่อน



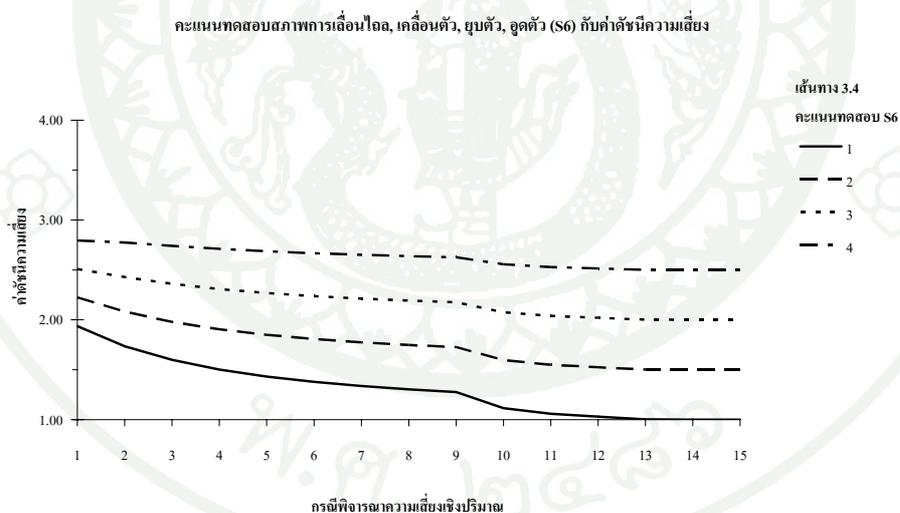
**ภาพผนวกที่ 29** แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 3.1 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเลื้อนไถล, เคลื่อนตัว, ยวบตัว, อุดตัว



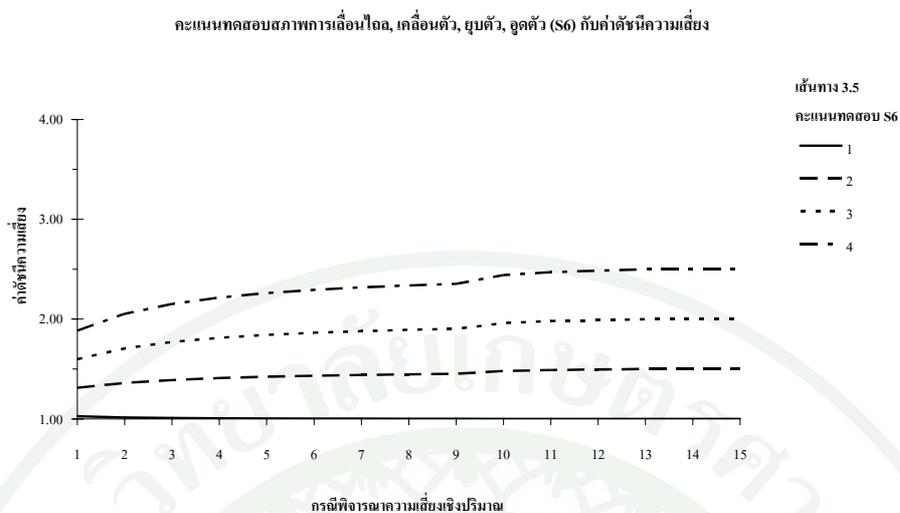
**ภาพผนวกที่ 30** แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 3.2 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเลื้อนไถล, เคลื่อนตัว, ยวบตัว, อุดตัว



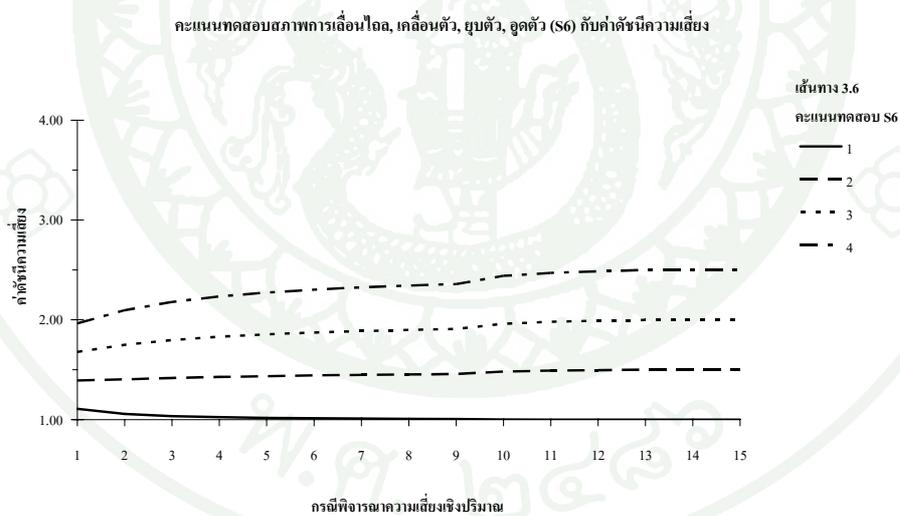
**ภาพผนวกที่ 31** แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 3.3 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเลื้อนไถล, เคลื่อนตัว, ยวบตัว, อุดตัว



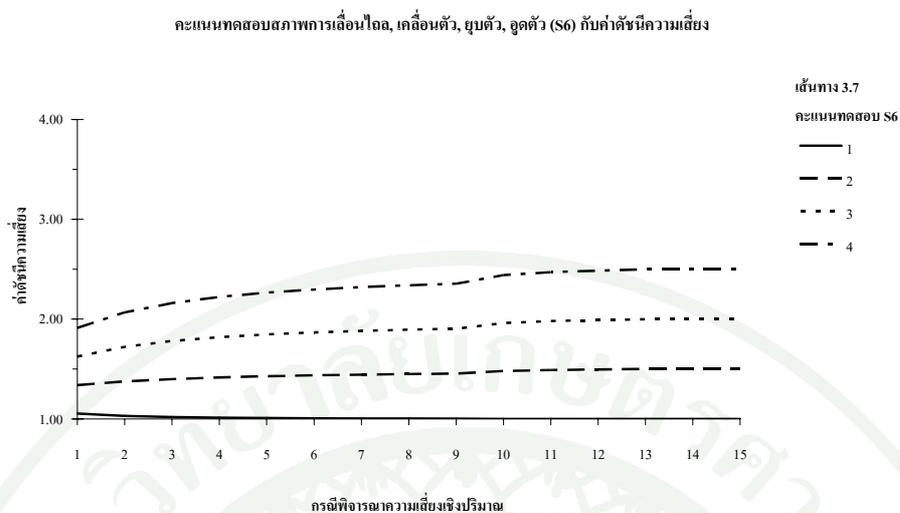
**ภาพผนวกที่ 32** แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 3.4 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเลื้อนไถล, เคลื่อนตัว, ยวบตัว, อุดตัว



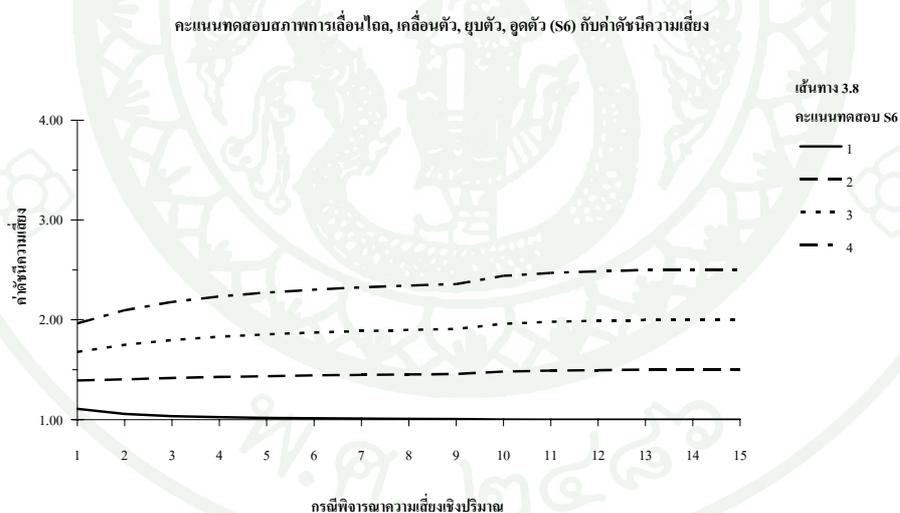
**ภาพผนวกที่ 33** แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 3.5 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเลื้อนไถล, เคลื่อนตัว, ยวบตัว, อุดตัว



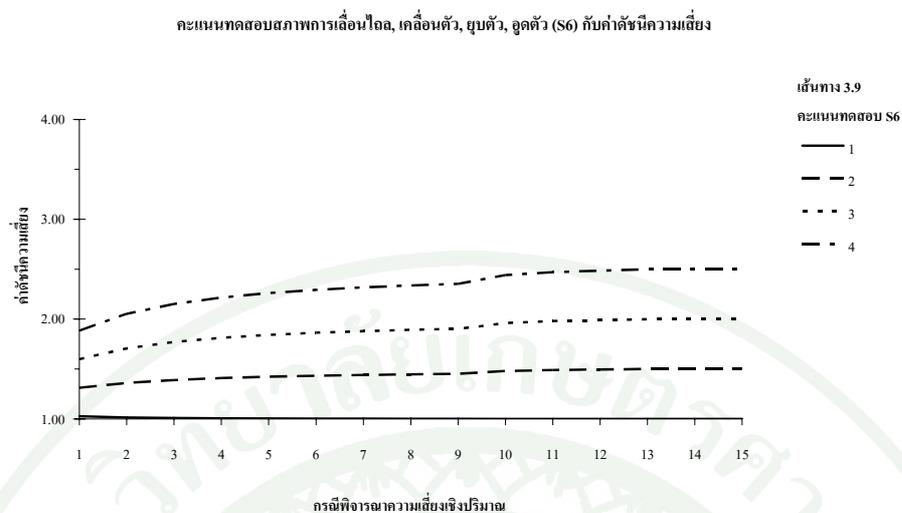
**ภาพผนวกที่ 34** แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 3.6 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเลื้อนไถล, เคลื่อนตัว, ยวบตัว, อุดตัว



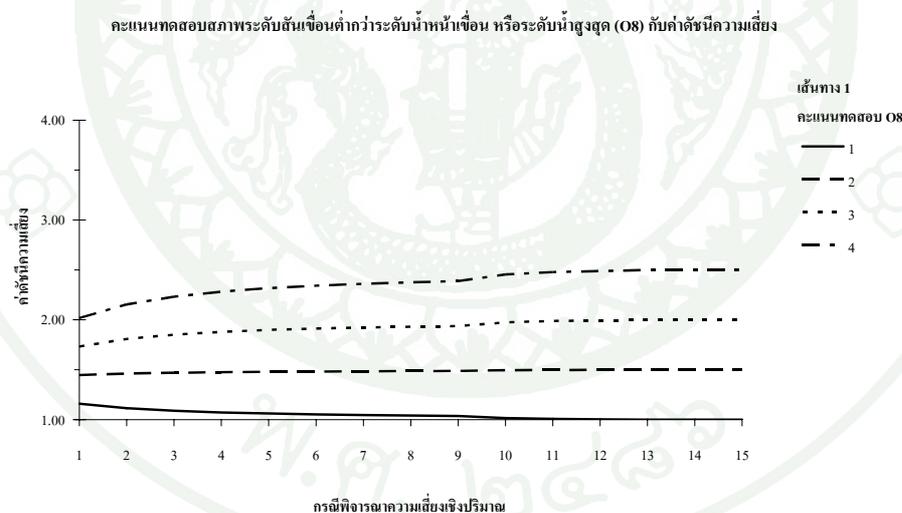
ภาพผนวกที่ 35 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการปีบตีที่ 3.7 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเลื้อนไถล, เคลื่อนตัว, ยวบตัว, อุดตัว



ภาพผนวกที่ 36 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการปีบตีที่ 3.8 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเลื้อนไถล, เคลื่อนตัว, ยวบตัว, อุดตัว

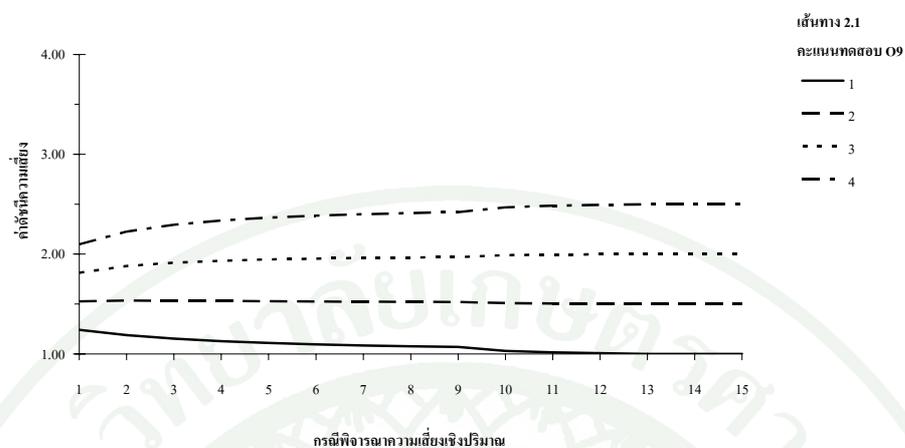


ภาพผนวกที่ 37 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาบ-การพิบัติที่ 3.9 ของการทดสอบคะแนนสภาพการเลื้อนไถล, เคลื่อนตัว, ยวบตัว, อุดตัว



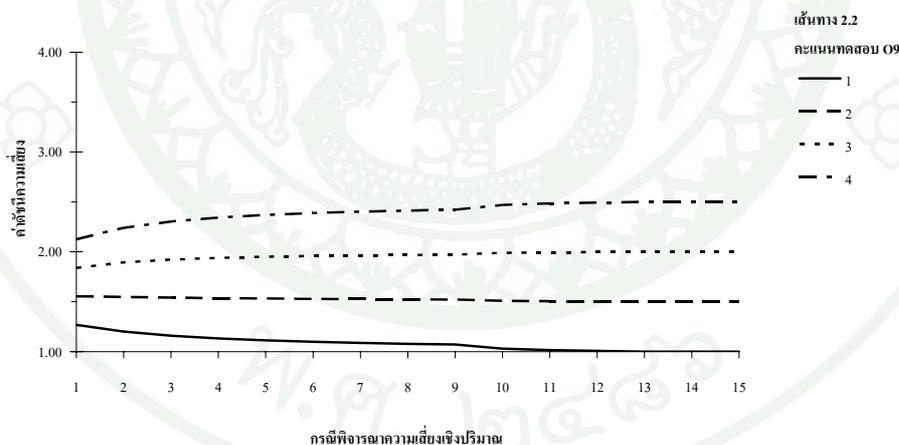
ภาพผนวกที่ 38 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาบ-การพิบัติที่ 1 ของการทดสอบคะแนนสภาพระดับสันเขื่อนต่ำกว่าระดับน้ำหน้าเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด

คะแนนทดสอบสภาพปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสิ้นเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด (O9) กับค่าดัชนีความเสี่ยง

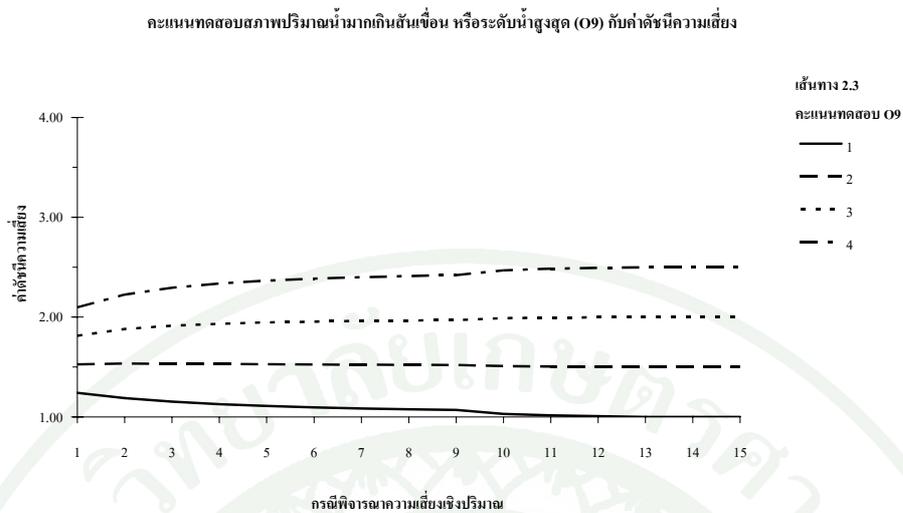


ภาพผนวกที่ 39 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาง-การพิบัติที่ 2.1 ของการทดสอบคะแนนสภาพปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสิ้นเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด

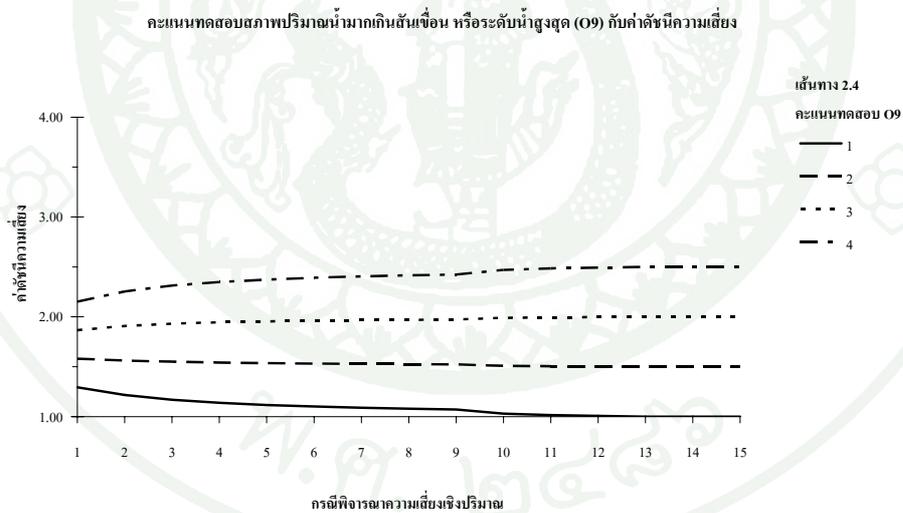
คะแนนทดสอบสภาพปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสิ้นเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด (O9) กับค่าดัชนีความเสี่ยง



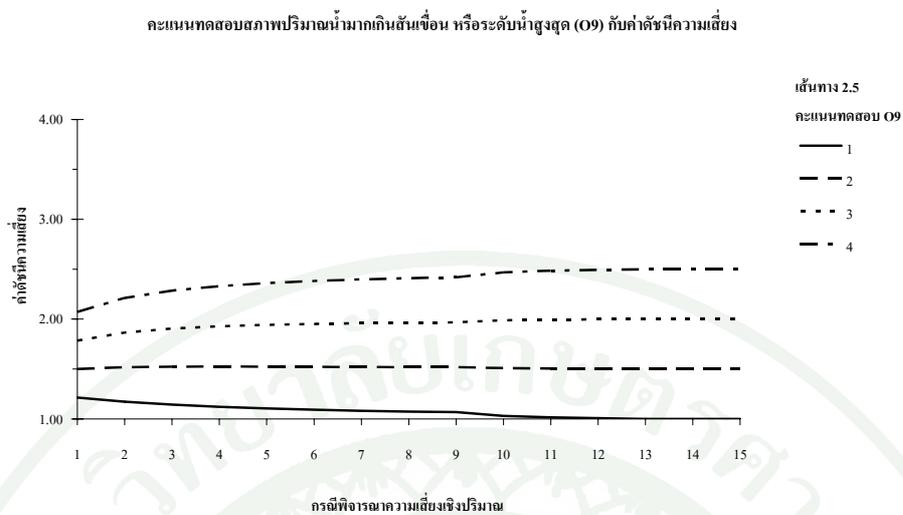
ภาพผนวกที่ 40 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาง-การพิบัติที่ 2.2 ของการทดสอบคะแนนสภาพปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสิ้นเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด



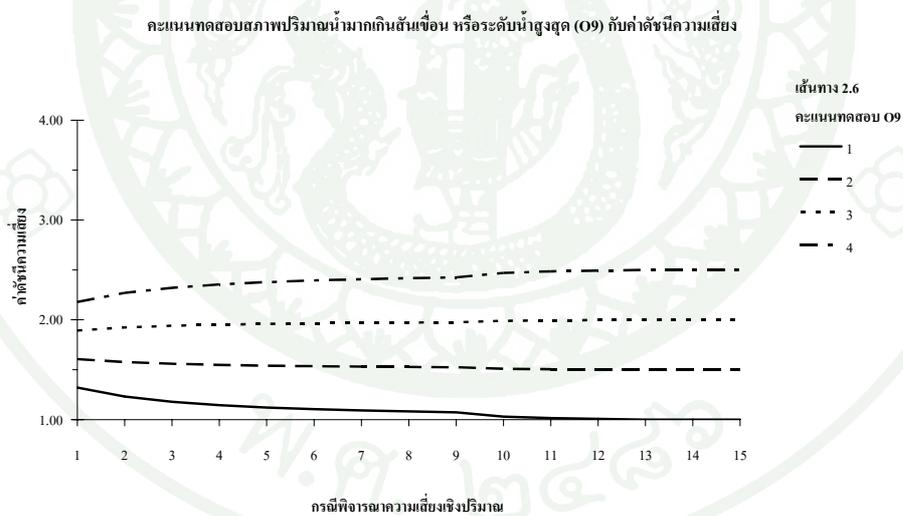
**ภาพผนวกที่ 41** แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.3 ของการทดสอบคะแนนสภาพปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสิ้นเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด



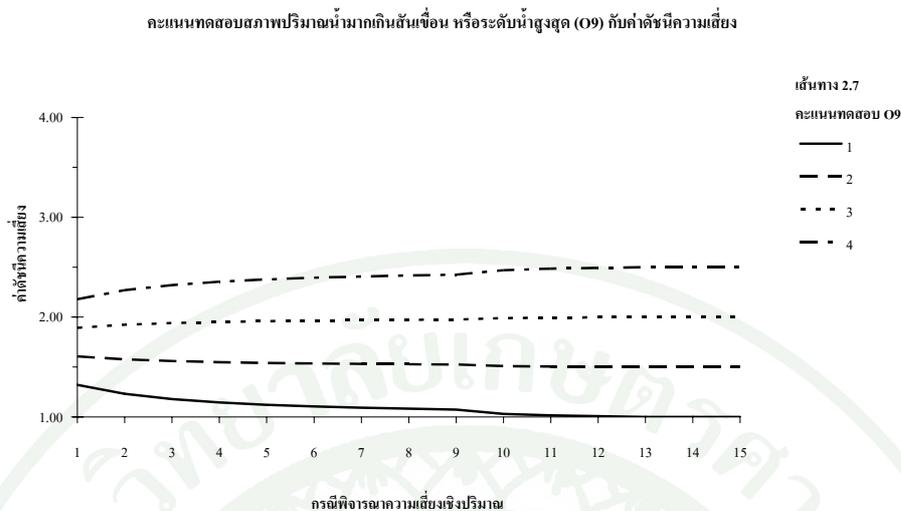
**ภาพผนวกที่ 42** แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.4 ของการทดสอบคะแนนสภาพปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสิ้นเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด



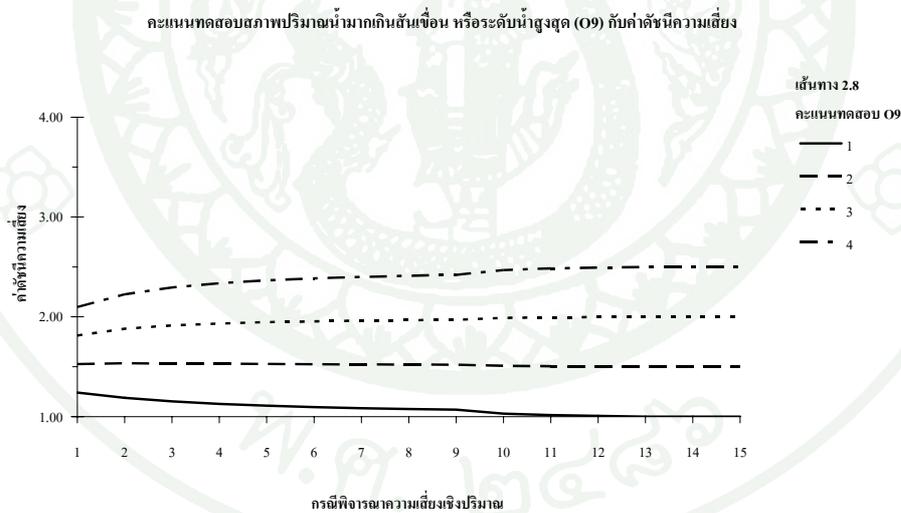
**ภาพผนวกที่ 43** แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.5 ของการทดสอบคะแนนสภาพปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสั้นเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด



**ภาพผนวกที่ 44** แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.6 ของการทดสอบคะแนนสภาพปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสั้นเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด

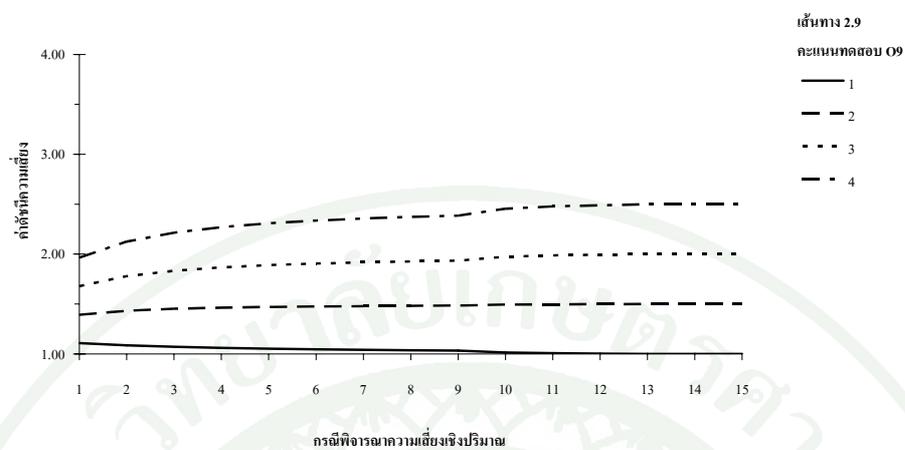


ภาพผนวกที่ 45 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.7 ของการทดสอบคะแนนสภาพปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสั้นเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด



ภาพผนวกที่ 46 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทางการพิบัติที่ 2.8 ของการทดสอบคะแนนสภาพปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสั้นเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด

คะแนนทดสอบสภาพปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสิ้นเขื่อน หรือระดับน้ำสูงสุด (O9) กับค่าดัชนีความเสี่ยง



ภาพผนวกที่ 47 แสดงกรณีพิจารณาความเสี่ยงเชิงปริมาณกับค่าดัชนีความเสี่ยงของเส้นทาง-  
การพิบัติที่ 2.9 ของการทดสอบคะแนนสภาพปริมาณน้ำมากเกินไปเกินสิ้นเขื่อน  
หรือระดับน้ำสูงสุด

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อสกุล	นายรัชชัย ปันสุข
เกิดวันที่	26 ตุลาคม 2519
สถานที่เกิด	จังหวัดลำปาง
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมชลประทาน) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกรโยธา
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ส่วนความปลอดภัยเขื่อน สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ กรมชลประทาน