

## อิทธิพลของการลดระดับน้ำต่อเสถียรภาพความลาดของเขื่อนดินแบบแบ่งส่วน Influence of water level reduction on stability of zoned earth dam

มนชล ศรีชัยกุล<sup>1\*</sup> และ วีรยา ฉิมอ้อย<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี

\*E-mail address: ridyee66@gmail.com

### บทคัดย่อ

เขื่อนดินแบบแบ่งส่วนเป็นเขื่อนประเภทหนึ่งที่ถูกสร้างมากในประเทศไทย เนื่องจากสามารถใช้เขื่อนได้ตามวัตถุประสงค์ โดยมีการติดตั้งเครื่องมือเพื่อตรวจวัดพฤติกรรมของเขื่อนในระหว่างการใช้งาน อย่างไรก็ตามการจำลองสถานการณ์ของระดับน้ำในเขื่อนซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อเสถียรภาพของเขื่อนเป็นสิ่งจำเป็น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาสภาวะการลดระดับน้ำในเขื่อน โดยกำหนดอัตราการลดลงของระดับน้ำที่ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 ม./วัน และกำหนดการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในเขื่อนเทียบกับระดับกักเก็บปกติของเขื่อนที่ 1/2, 1/4, 1/8 และ 1/16 เท่าของความต่างของระดับกักเก็บปกติกับระดับน้ำต่ำสุด โดยใช้ข้อมูลกรณีศึกษา 2 กรณี ได้แก่ เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ จังหวัดลพบุรี และอ่างเก็บน้ำมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี ผลการศึกษาพบว่าการลดลงของระดับน้ำในเขื่อนส่งผลต่อเสถียรภาพความลาดชันของเขื่อน โดยค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเขื่อนมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อการลดลงของระดับน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราการลดลงของระดับน้ำมีผลต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยไม่มากนัก โดยการลดลงของระดับน้ำไม่ควรเกิน 1/4 เท่าของความต่างของระดับกักเก็บปกติกับระดับน้ำต่ำสุด

คำสำคัญ: เขื่อนดินแบบแบ่งส่วน, เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์, อ่างเก็บน้ำมวกเหล็ก, อัตราการลดลงของระดับน้ำในเขื่อน, ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย

### Abstract

The zoned earth dam is the most type of dam that constructed in Thailand since it can be used as its purposes. With the installation of instruments, the behavior of dam can be measured for long term use. However, the simulation of water level reduction in the dam, which is an important factor for the stability of dam, is necessary. Therefore, the aim of this research is to study the rate of water level reduction at 0.25, 0.5, 0.75 and 1.00 m./day and the change of water level at 1/2, 1/4, 1/8 and 1/16 compared with difference of normal water level and minimum water level of dam. There are 2 cases

study, Pasak Chonlasit Dam and Muak Lek Reservoir. From the results, it is found that the change of water level has much effect to the stability of dam. The factor of safety decreased with the increasing of reduction of water level. But for the rate of water level reduction has little effect to the factor of safety. The reduction of water level should not over than 1/4 time of the difference of normal water level and minimum water level of dam.

Keywords: zoned earth dam, Pasak Chonlasit Dam, Muak Lek Reservoir, rate of water level reduction, factor of safety

### 1. บทนำ

เขื่อนดิน (Earth fill Dam) เป็นเขื่อนประเภทหนึ่งที่มีความนิยมในการก่อสร้างในปัจจุบันเนื่องจากเป็นเขื่อนที่สามารถนำวัสดุในท้องถิ่นมาใช้เป็นวัสดุหลักในการก่อสร้าง ทำให้ควบคุมปริมาณการใช้ ต้นทุนการก่อสร้าง (Cost Unit) และความสะดวกในการก่อสร้าง ดังนั้นจึงใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างที่น้อยกว่าเขื่อนประเภทอื่น ๆ โดยทั่วไปเขื่อนดิน (Earth fill Dam) ของประเทศไทยมักออกแบบและก่อสร้างโดยกรมชลประทาน ซึ่งเขื่อนดินนั้นยังถูกแบ่งออกเป็นหลายประเภทเพื่อการใช้งานที่แตกต่างกัน โดยเขื่อนดินที่ทางกรมชลประทานออกแบบและบำรุงรักษา มีอยู่ด้วยกัน 2 ขนาดหลัก ๆ ได้แก่ เขื่อนขนาดกลาง (อ่างเก็บน้ำ) และ เขื่อนขนาดใหญ่ โดยประเภทของเขื่อนทั้ง 2 ประเภทที่กล่าวมานั้น ถูกแบ่งตามปริมาณความจุ (Storage) ความสูงของเขื่อน (Dam High) และพื้นที่รับน้ำ (Water shade Area) และยังมีลักษณะในการออกแบบและใช้วัสดุในการก่อสร้างที่คล้ายคลึงกัน โดยส่วนใหญ่เป็นเขื่อนดินประเภทแบ่งโซน (Zone Type Earth fill Dam) เนื่องจากสามารถออกแบบโดยใช้วัสดุที่ดีสำหรับแต่ละส่วนได้อย่างเต็มที่ ในส่วนของแกนเขื่อน (Core zone) ใช้ดินเหนียวที่มีความตบแน่นเพื่อป้องกันการไหลซึมของน้ำ ในขณะที่ส่วนเปลือก (Shell) ใช้วัสดุที่เป็นกรวดหรือหินที่มีความแข็งแรงเพื่อทำให้เกิดความมั่นคงแก่ตัวเขื่อน เช่น เขื่อนกระเสียว เขื่อนแม่จันทน์สมบูรณ์ชล เขื่อนลำตะคอง เขื่อนลำปาว เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ และเขื่อนประแสร์

สำหรับค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเขื่อนดินมีกำหนดไว้ในหลายสภาวะ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเสี่ยง อัตราการเกิดสภาวะนั้น ๆ (วรการ ไม่เรียง, 2542) โดยสภาวะการลดลงของระดับน้ำเก็บกักในตัวเขื่อนอย่างรวดเร็ว ก็เป็นสภาวะหนึ่งที่ทำให้อัตราส่วนความปลอดภัยของเขื่อนลดลงและเป็นสาเหตุของการพิบัติของเขื่อนดินได้ เช่น ที่เขื่อนอุบลรัตน์ จังหวัดขอนแก่น เกิดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างมากกว่าปริมาณที่ออกแบบไว้ ทำให้ระดับน้ำสูงขึ้นจนเกือบล้นสันเขื่อนทำให้ต้องเร่งระบายน้ำออก จนพื้นที่ด้านท้ายน้ำนั้นท่วมและน้ำนั้นไหลข้ามผ่านชั้นแกนดินเหนียว แต่เขื่อนนั้นไม่เกิดการพิบัติหรือเสียหาย และเมื่อปี พ.ศ.2533 ที่เขื่อนมูลบน จังหวัดนครราชสีมา ได้เกิดพายุพายุดีเปรสชันสองลูก ในเดือนตุลาคม 2533 ทำให้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นสูงกว่า 10.00 เมตร และพบรอยร่วซึม 2 จุดบริเวณด้านเหนือน้ำ และท้ายน้ำ จนทำให้เขื่อนต้องเร่งระบายน้ำออก เพื่อลดปริมาณน้ำลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลทำให้เขื่อนเกิดการพิบัติ อีกทั้งตลอดจนสภาพเขื่อนที่ตั้งอยู่บริเวณพื้นที่ที่ส่วนฐานรากนั้นเป็นดินทราย และยังพบปัญหาดินกระจายตัวบริเวณดังกล่าวอีก จึงเกิดปัญหาการร่วซึม ส่งผลให้น้ำลอดใต้ฐานเขื่อนจนเกิดการพิบัติร่วซึมดังกล่าว (Dam Safety Project : Project preparation, 1996) ซึ่งที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ศึกษาถึงสภาวะการลดลงของระดับน้ำอย่างรวดเร็วอยู่บ้าง (Fattah, et al., 2015, Abbas, et al., 2017 และ Htwe and Naing, 2017) แต่ในงานวิจัยฉบับนี้ต้องการศึกษาจากกรณีศึกษาสำหรับเขื่อนในประเทศไทยโดยศึกษาผลกระทบของระดับการลดลงของระดับน้ำกักเก็บ และอัตราการลดลงของระดับน้ำในเขื่อนต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเขื่อน โดยใช้กรณีศึกษา คือ เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ และอ่างเก็บน้ำมวกเหล็ก เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการบริหารจัดการเขื่อนในประเทศไทยต่อไป

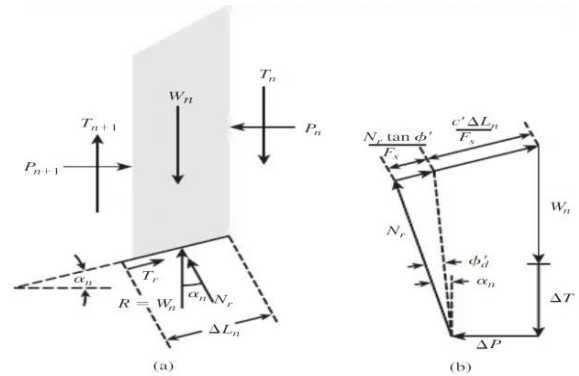
## 2. วิธีการศึกษา

ในงานวิจัยฉบับนี้ใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดชันของเขื่อนบนพื้นฐานของการวิเคราะห์ด้วยวิธีสมดุลขีดจำกัด (Limit Equilibrium Method) โดยใช้โปรแกรม GeoStudio ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมธรณีเทคนิค โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีสมดุลขีดจำกัดผู้วิจัยได้เลือกวิธีการคำนวณ จำนวน 2 วิธี มาใช้ในการวิเคราะห์ได้แก่

### 2.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีสมดุลขีดจำกัด (Limit Equilibrium Method)

#### 2.1.1 วิธีการ Bishop's simplified Method

วิธีการนี้มีหลักการวิเคราะห์โดยสมมุติ พื้นที่ใต้ผิวโค้ง เป็นพื้นที่ที่เกิดการพังทลายของดินโดยพื้นที่เหนือเส้นโค้งจะถูกแบ่งออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ตามแนวตั้ง โดยพิจารณาในความยาวหนึ่งหน่วย และในแต่ละชิ้นส่วนย่อย ๆ นั้นจะมีแรงกระทำดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การวิเคราะห์หน่วยแรงในชิ้นส่วนด้วยวิธี

Bishop's simplified Method of Slice (Braja M. Das, 2002)

โดยที่เมื่อผลรวมของแรง P และ W ที่เกิดขึ้นของทุกชิ้นส่วนนั้นจะไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้นเราจึงกำหนดให้  $P_n - P_{n+1} = \Delta P$  และ  $T_n - T_{n+1} = \Delta T$  ตามรูปที่ 1

สำหรับแรงเฉือนด้านที่เกิดขึ้นนั้น มีค่าตามสมการดังนี้

$$T_r = N_r (\tan \phi'_d) + c_d \Delta L_n \quad (1)$$

และ

$$T_r = N_r \left( \frac{\tan \phi}{FS} \right) + \frac{c \Delta L_n}{FS} \quad (2)$$

ผลรวมของแรงตามแนวตั้ง มีค่า

$$W_n + \Delta T = N_r \cos \alpha_n \left( \frac{N_r \tan \phi}{FS} \right) + \frac{c_d \Delta L_n}{FS} \sin \alpha_n \quad (3)$$

โดยเมื่อสภาวะสมดุลของมวล ABC เมื่อหาโมเมนต์รอบจุด O จะได้ว่า

$$\sum_{n=1}^{n=E} w_n r \sin \alpha_n = \sum_{n=1}^{n=p} T_r r \quad (4)$$

และเมื่อ

$$T_r = \frac{1}{FS} (c + \tan \phi) \Delta L_n = \frac{1}{FS} (c \Delta L_n + N_r \tan \phi) \quad (5)$$

เมื่อแทนสมการ (3) และ (4) ลงในสมการ (5) พร้อมทั้งจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการใหม่ ว่า

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^p (cb_n + W_n \tan \phi + \Delta T \tan \phi) \left( \frac{1}{m a(n)} \right)}{\sum_{n=1}^p w_n \sin \alpha_n} \quad (6)$$

และเมื่อกำหนดให้

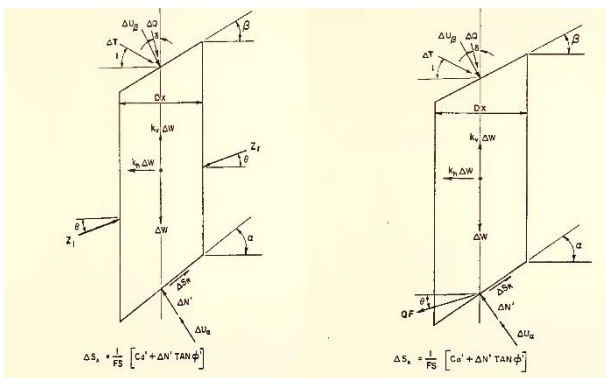
$$M_{a(n)} = \cos \alpha_n + \frac{\tan \phi \sin \alpha_n}{FS} \quad (7)$$

และสมมติให้  $\Delta E = 0$  จะได้สมการใหม่

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^p (cb_n + W_n \tan \phi) \left( \frac{1}{m a(n)} \right)}{\sum_{n=1}^p w_n \sin \alpha_n} \quad (8)$$

### 2.1.2 วิธีการ Spencer Method

สำหรับวิธีการ Spencer Method นั้นจะกำหนดให้แรงกระทำทั้งทางด้านข้างของมวลดินที่ขนานกัน ดังนั้นแรงทางด้านข้างนั้นทุกแรงมีมุมกระทำเป็นมุมเดียวกันหมด โดยวิธียังกำหนดให้แรงกระทำด้านล่างกระทำที่กึ่งกลาง Slice ด้วยสมมติฐานของวิธีนี้ทำให้คำนวณได้ง่ายขึ้นและไม่ส่งผลต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัย ตามรูปที่ 2 โดยวิธีการนี้สามารถหาค่าตอบจากแนวการเคลื่อนที่ทั้ง 2 รูปแบบคือทั้ง Circular Slip และ Noncircular slip Surface โดยใช้วิธีการ Trail & Error จนกว่าที่ FS. ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมมูลแรง และ สมดุลโมเมนต์ จะมีค่าเท่ากัน โดยเริ่มจากการกำหนดค่ามุม  $\theta$  ก่อน



รูปที่ 2 การวิเคราะห์หน่วยแรงในชั้นด้วยวิธี Spencer Method  
(Carpenter, J.R., 1985)

โดยสมการของแรงลัพธ์ระหว่าง Slice จะได้ว่า

$$QF = \frac{\left[ \frac{S_1}{FS + S_2} \right]}{\cos(\alpha - \theta) \left[ 1 + \frac{S_3}{FS} \right]} \quad (9)$$

$$S_1 = C_a + t \tan \phi' \begin{bmatrix} \Delta W((1 - k_v) \cos \alpha - k_h \sin \alpha) \\ -\Delta u_\alpha + \Delta u_\beta \cos(\alpha - \beta) \\ +\Delta Q \cos(\alpha - \delta) + \Delta T \sin(\alpha - i) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$S_2 = \Delta u_\beta \sin(\alpha - \beta) - \begin{bmatrix} \Delta W((1 - k_v) \sin \alpha - k_h \cos \alpha) \\ +\Delta \sin(\alpha - \beta) + \Delta T \cos(\alpha - i) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$S_3 = \tan \phi' \tan(\alpha - \theta) \quad (12)$$

เมื่อ

$$C_a = \text{Cohesion force} = \frac{c'(dx)}{\cos \alpha} \quad (13)$$

และสมการสมดุลโมเมนต์

$$\sum_{i=1}^n [Qf \cos(\alpha - \theta)] = 0 \quad (14)$$

สมการสมดุลแรงระหว่าง Slice เมื่อแรงระหว่าง Slice ขนานกัน คือ

$$\sum_{i=1}^n [QF] = 0 \quad (15)$$

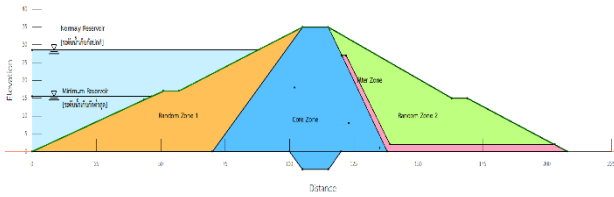
ซึ่ง ค่า FS. ที่ได้จากวิธีนี้จะมีความแม่นยำกว่า วิธี Bishop's simplified Method of Slice กล่าวมา เนื่องจากมีการคำนวณทั้งสมมูลแรงในแนวราบและสมดุลโมเมนต์ นอกจากนี้ก็ยังมีแรงระหว่างชั้น Slice ก็นำมาใช้คำนวณ แต่เนื่องจากวิธีการนี้เป็นวิธีการที่มีการคำนวณที่ค่อนข้างซับซ้อนทั้งสมการ และ Trail & Error เพื่อหาค่า ดังนั้นการคำนวณด้วยมือจึงแทบเป็นไปไม่ได้ จึงมีการใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณแทน

## 2.2 กรณีศึกษา

### 2.2.1 เชื้อนป่าสักชลสิทธิ์

เป็นเขื่อนขนาดใหญ่ ตั้งอยู่ที่ตำบลหนองบัว อำเภอพัฒนานิคม จังหวัดลพบุรี โดยเป็นเขื่อนดินแบบแบ่งส่วน ซึ่งมีความสูงของเขื่อน 35.00 เมตร และมีระดับเก็บกักปกติที่ 28.50 เมตร มีปริมาตรความจุที่ระดับเก็บกักปกติ 960.00 ล้าน ลบ.ม. หน้าที่ของเขื่อนดินที่ใช้ในการศึกษาแสดงในรูป

ที่ 3 ค่าคุณสมบัติของดินในแต่ละส่วนจากข้อมูลในรายงานการก่อสร้างเขื่อน แสดงได้ดังตารางที่ 1



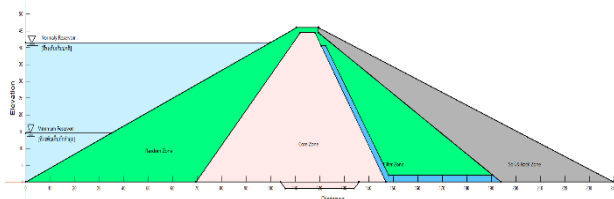
รูปที่ 3 แบบจำลองเขื่อนปากชลสิทธิ์ด้วยโปรแกรม GeoStudio

ตารางที่ 1 รายละเอียดค่าคุณสมบัติของดินแต่ละโซนเขื่อนปากชลสิทธิ์

ที่	ชั้นดิน (Zone Type)	ค่าคุณสมบัติของดิน				
		$\phi$	C	$\gamma$	$\gamma_{sat}$	K
		$^{\circ}$	(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )	m/sec
1	Random Zone 1	11.97	34.25	16.98	18.50	$1.10 \times 10^{-8}$
2	Random Zone 2	10.19	69.23	16.98	18.00	$1.76 \times 10^{-7}$
3	Core Zone	5.36	84.33	14.80	16.00	$3.24 \times 10^{-8}$
4	Filter Zone	10.96	24.51	16.98	18.00	$1.58 \times 10^{-6}$

### 2.2.2 อ่างเก็บน้ำมวกเหล็ก

เป็นเขื่อนขนาดกลาง ตั้งอยู่ที่ตำบลคำพราณ อำเภอวังม่วง จังหวัดสระบุรี โดยเป็นเขื่อนดินแบบแบ่งส่วน มีความสูงของเขื่อนที่ 46.0 เมตร และมีระดับเก็บกักปกติ ที่ 41.50 เมตร มีปริมาตรความจุที่ระดับเก็บกักปกติ 61.00 ล้าน ลบ.ม. หน้าที่ของเขื่อนดินที่ใช้ในการศึกษาแสดงในรูปที่ 4 ค่าคุณสมบัติของดินจากข้อมูลในรายงานการก่อสร้างเขื่อน แสดงได้ดังตารางที่ 2



รูปที่ 4 แบบจำลองอ่างเก็บน้ำมวกเหล็กด้วยโปรแกรม GeoStudio

ตารางที่ 2 รายละเอียดค่าคุณสมบัติของดินแต่ละโซนอ่างเก็บน้ำมวกเหล็ก

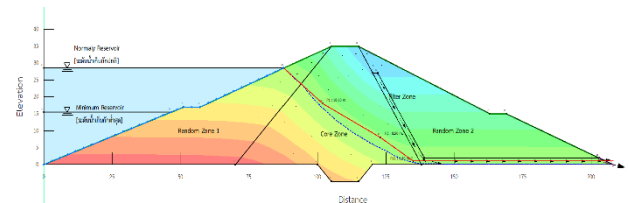
ที่	ชั้นดิน (Zone Type)	ค่าคุณสมบัติของดิน				
		$\phi$	C	$\gamma$	$\gamma_{sat}$	K
		$^{\circ}$	(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )	m/sec
1	Random Zone	31.30	27.45	17.27	18.00	$1.07 \times 10^{-8}$
2	Core Zone	22.34	21.57	15.74	16.00	$2.68 \times 10^{-9}$
3	Filter Zone	18.75	26.48	16.31	18.00	$1.86 \times 10^{-7}$
4	Soil & Rock	30.45	54.91	16.99	17.50	$6.59 \times 10^{-8}$

### 2.3 การจำลองการไหลในสภาวะการลดระดับน้ำอย่างรวดเร็ว

เนื่องจากข้อมูลแรงดันน้ำจากการตรวจวัดในสนามด้วย Piezometer ในสภาวะการลดระดับน้ำอย่างรวดเร็วไม่มี จึงจำเป็นต้องมีการจำลองการไหลของน้ำในสภาวะการลดระดับน้ำอย่างรวดเร็วด้วยโปรแกรม GeoStudio และเพื่อเป็นการตรวจสอบแบบจำลองจึงได้มีการจำลองการไหลของน้ำในสภาวะกักเก็บปกติเพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลแรงดันน้ำจากการตรวจวัดในสนาม ซึ่งพบว่าต้องมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำของชั้น Random zone และชั้น Filter zone ให้มีค่ามากขึ้น โดยสำหรับเขื่อนปากชลสิทธิ์ ค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำที่ปรับแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งเส้นทางการไหลของน้ำจากการจำลองด้วยโปรแกรม GeoStudio เปรียบเทียบกับข้อมูลแรงดันน้ำจากการตรวจวัดในสนาม แสดงในรูปที่ 5

ตารางที่ 3 การปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในดิน (K) เขื่อนปากชลสิทธิ์

ที่	ชั้นดิน (Zone Type)	ค่าคุณสมบัติของดิน	
		K <sub>เดิม</sub>	K <sub>ปรับแก้</sub>
		m/sec	m/sec
1	Random Zone 1	$1.10 \times 10^{-8}$	$1.10 \times 10^{-7}$
2	Filter Zone	$1.58 \times 10^{-6}$	$1.58 \times 10^{-4}$

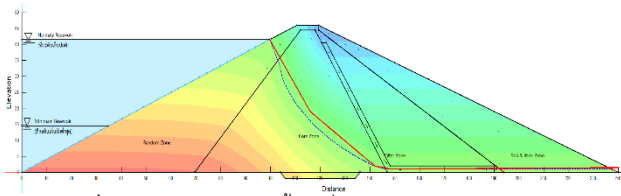


รูปที่ 5 เส้นทางการไหลของน้ำในเขื่อน (flowline) ในสภาวะปกติของเขื่อนปากชลสิทธิ์ ภายหลังจากปรับแก้ค่า K

สำหรับกรณีอ่างเก็บน้ำมวกเหล็กก็เช่นเดียวกัน จำเป็นต้องมีการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในชั้น Filter และชั้น Soil and Rock โดยค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำที่ปรับแก้แสดงในตารางที่ 4 และเส้นทางการไหลของน้ำจากการจำลองด้วยโปรแกรม GeoStudio เปรียบเทียบกับข้อมูลแรงดันน้ำจากการตรวจวัดในสนาม แสดงในรูปที่ 6

ตารางที่ 4 การปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในดิน (K) อ่างเก็บน้ำมวกเหล็ก

ที่	ชั้นดิน (Zone Type)	ค่าคุณสมบัติของดิน	
		K <sub>เดิม</sub>	K <sub>ปรับแก้</sub>
		m/sec	m/sec
3	Filter Zone	$1.86 \times 10^{-7}$	$3.24 \times 10^{-4}$
4	Soil & Rock	$6.59 \times 10^{-8}$	$6.59 \times 10^{-5}$



รูปที่ 6 เส้นทางการไหลของน้ำในเขื่อน (flowline) ในสภาวะปกติของอ่างเก็บน้ำมวกเหล็ก ภายหลังจากปรับแก้ค่า K

เมื่อทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำของทั้งสองกรณีศึกษาเรียบร้อยแล้วจึงจำลองสภาวะการลดลงของระดับน้ำอย่างรวดเร็ว โดยมีขอบเขตการวิเคราะห์ของเขื่อนปัสกชลสิทธิ์แสดงในตารางที่ 5 และขอบเขตการวิเคราะห์ของอ่างเก็บน้ำมวกเหล็กแสดงในตารางที่ 6

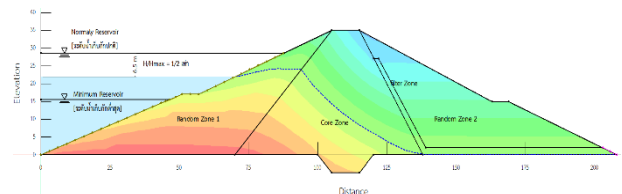
ตารางที่ 5 ขอบเขตการวิเคราะห์โดยจำลองการลดระดับน้ำลงของเขื่อนปัสกชลสิทธิ์

ที่	อัตราการลดลงของระดับน้ำ	ระดับเก็บกักปกติ	ระดับเก็บกักต่ำสุด	ระดับน้ำที่ลดลง	ลดลงเหลือ	วันที่ใช้วิเคราะห์
	ม./วัน					
1	0.25	28.50	15.50	1/2	22.00	26.00
				1/4	18.75	39.00
				1/8	17.13	45.50
				1/16	16.31	13.00
2	0.50	28.50	15.50	1/2	22.00	19.50
				1/4	18.75	22.75
				1/8	17.13	24.38
				1/16	16.31	13.00
3	0.75	28.50	15.50	1/2	22.00	8.67
				1/4	18.75	13.00
				1/8	17.13	15.17
				1/16	16.31	16.25
4	1.00	28.50	15.50	1/2	22.00	6.50
				1/4	18.75	9.75
				1/8	17.13	11.38
				1/16	16.31	12.19

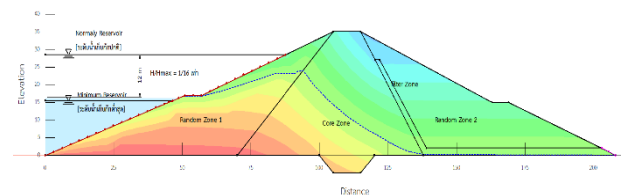
ตารางที่ 6 ขอบเขตการวิเคราะห์โดยจำลองการลดระดับน้ำลงของอ่างเก็บน้ำมวกเหล็ก

ที่	อัตราการลดลงของระดับน้ำ	ระดับเก็บกักปกติ	ระดับเก็บกักต่ำสุด	ระดับน้ำที่ลดลง	ลดลงเหลือ	จำนวนวันที่ใช้วิเคราะห์
	ม./วัน					
1	0.25	41.50	14.00	1/2	27.75	55.00
				1/4	20.88	82.50
				1/8	17.44	96.25
				1/16	15.72	103.13
2	0.50	41.50	14.00	1/2	27.75	27.50
				1/4	20.88	41.25
				1/8	17.44	48.13
				1/16	15.72	51.56
3	0.75	41.50	14.00	1/2	27.75	18.33
				1/4	20.88	27.50
				1/8	17.44	32.08
				1/16	15.72	34.38
4	1.00	41.50	14.00	1/2	27.75	13.75
				1/4	20.88	20.63
				1/8	17.44	24.06
				1/16	15.72	25.78

รูปที่ 7 และ 8 แสดงการไหลของน้ำในเขื่อนปัสกชลสิทธิ์ในสภาวะระดับน้ำลดลงเหลือ 1/2 และ 1/16 เท่าของความต่างระดับน้ำกักเก็บปกติกับระดับน้ำเก็บกักต่ำสุด ( $\Delta H_{max}$ ) ตามลำดับ

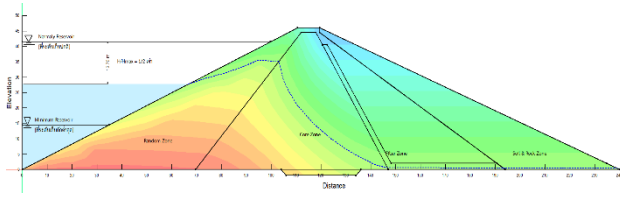


รูปที่ 7 การไหลของน้ำในเขื่อนปัสกชลสิทธิ์เมื่อระดับน้ำลดลงเหลือ 1/2 เท่าของความต่างระดับน้ำเก็บกักปกติกับระดับน้ำเก็บกักต่ำสุด

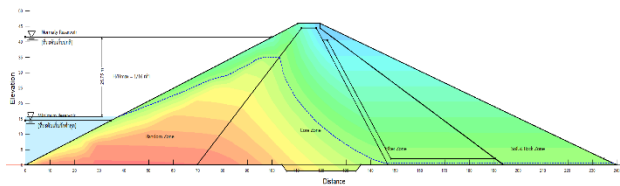


รูปที่ 8 การไหลของน้ำในเขื่อนปัสกชลสิทธิ์เมื่อระดับน้ำลดลงเหลือ 1/16 เท่าของความต่างระดับน้ำเก็บกักปกติกับระดับน้ำเก็บกักต่ำสุด

รูปที่ 9 และ 10 แสดงการไหลของน้ำในอ่างเก็บน้ำมวลเหล็กในสภาวะระดับน้ำลดลงเหลือ 1/2 และ 1/16 เท่าของความต่างระดับน้ำกักเก็บปกติกับระดับน้ำเก็บกักต่ำสุด ( $\Delta H_{max}$ ) ตามลำดับ



รูปที่ 9 การไหลของน้ำในอ่างเก็บน้ำมวลเหล็กเมื่อระดับน้ำลดลงเหลือ 1/2 เท่าของความต่างระดับน้ำเก็บกักปกติกับระดับน้ำเก็บกักต่ำสุด



รูปที่ 10 การไหลของน้ำในอ่างเก็บน้ำมวลเหล็กเมื่อระดับน้ำลดลงเหลือ 1/16 เท่าของความต่างระดับน้ำเก็บกักปกติกับระดับน้ำเก็บกักต่ำสุด

### 3. ผลการวิจัย

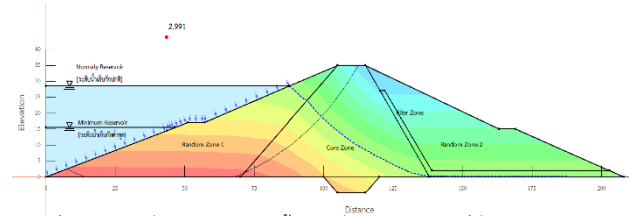
#### 3.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดชันของเขื่อนที่ระดับเก็บกักปกติทั้ง 2 โครงการ

สำหรับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของทั้ง 2 โครงการที่สภาวะเก็บกักปกติ พบว่ากรณีเขื่อนป้าสักชลสิทธิ์มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 2.991 และอ่างเก็บน้ำมวลเหล็กมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 2.712 ซึ่งผ่านเกณฑ์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ยอมรับได้ ดังแสดงในตารางที่ 7 โดยมีวงของการเคลื่อนพังดังแสดงในรูปที่ 11 และ 12 ตามลำดับ

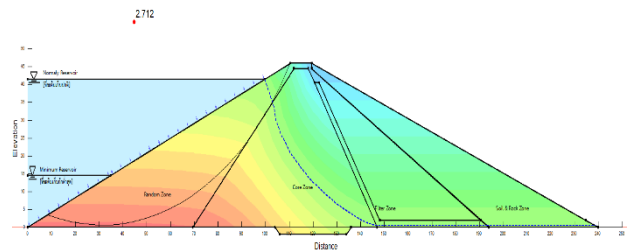
ตารางที่ 7 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ยอมรับได้ในกรณีต่างๆ

ที่	สภาพเขื่อน	อัตราส่วนความปลอดภัยต่ำที่สุดที่ยอมรับได้		เสถียรภาพลาดชันที่นำมาวิเคราะห์
		สภาวะปกติ	แผ่นดินไหว	
1	หลังก่อสร้างแล้วเสร็จ	1.30	1.10	ด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ
2	ที่ระดับน้ำสูงสุด	1.50	1.10	ด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ
3	ที่ระดับเก็บกักปกติ	1.50	1.20	ด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ
4	ที่ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว	1.30	1.10	ด้านเหนือน้ำ
5	ที่ระดับน้ำปานกลาง	1.50	1.20	ด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ

ที่มา : สุทธิศักดิ์ ศรีสัมพันธ์ (ดัดแปลงจาก : วรากร ไหมเรียง (2542))



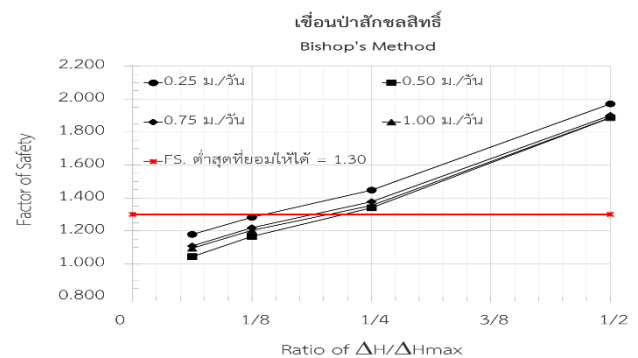
รูปที่ 11 การเคลื่อนพังด้านเหนือน้ำของเขื่อนป้าสักชลสิทธิ์ที่ระดับเก็บกักปกติ



รูปที่ 12 การเคลื่อนพังด้านเหนือน้ำของอ่างเก็บน้ำมวลเหล็กที่ระดับเก็บกักปกติ

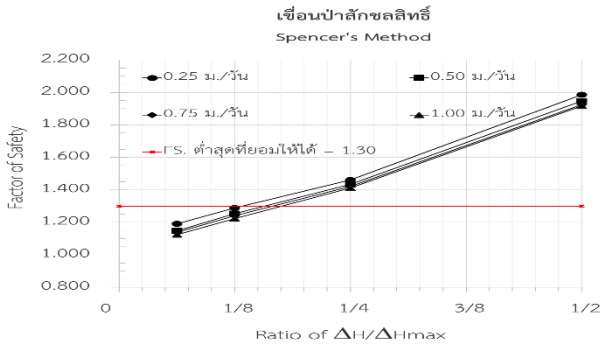
#### 3.2 ผลของการลดระดับน้ำต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัย

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในเขื่อนโดยลดระดับในเขื่อนลงให้เหลือ 1/2, 1/4, 1/8 และ 1/16 เท่าของความต่างของระดับน้ำกักเก็บปกติและระดับน้ำต่ำสุด พบว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าลดลงตามการลดลงของระดับน้ำทั้งสองโครงการ รูปที่ 13 และรูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัยกับการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ (Ratio of  $\Delta H/\Delta H_{max}$ ) ในเขื่อนป้าสักชลสิทธิ์โดยวิธีการของ Bishop และ Spencer จะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากทั้งสองวิธีไม่แตกต่างกันมากนัก โดยค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากวิธีการของ Spencer มีค่ามากกว่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้จากวิธีการของ Bishop เล็กน้อย โดยมีวงของการเคลื่อนพังจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการของ Spencer กรณีระดับน้ำลดลงเหลือ 1/2 และ 1/16 เท่าความต่างของระดับน้ำกักเก็บปกติและระดับน้ำต่ำสุด แสดงในรูปที่ 15 และ 16 ตามลำดับ จากค่าอัตราส่วนความปลอดภัยพบว่ากรณีของเขื่อนป้าสักชลสิทธิ์การลดลงของระดับน้ำไม่ควรน้อยกว่า 1/4 เท่าของความต่างของระดับน้ำกักเก็บปกติและระดับน้ำต่ำสุด จึงจะมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยสูงกว่า 1.30 ที่ยอมรับได้

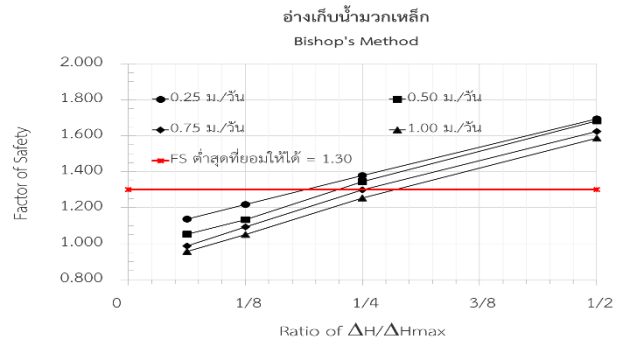


รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัยกับการลดลงของระดับน้ำในเขื่อนป้าสักชลสิทธิ์ด้วยวิธี Bishop

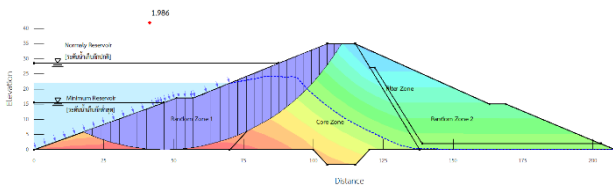




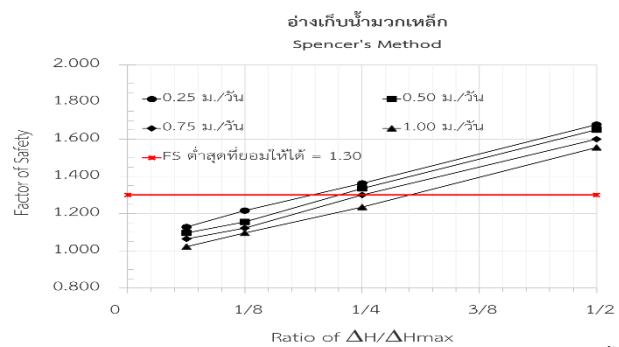
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัยกับการลดลงของระดับน้ำในเขื่อนปาล์มชลสิทธิ์ด้วยวิธี Spencer



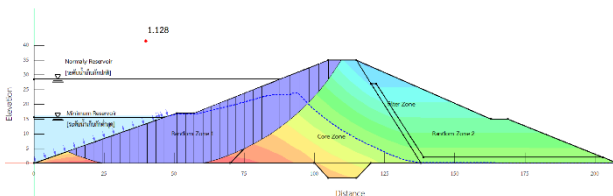
รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัยกับการลดลงของระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำมวกเหล็กด้วยวิธี Bishop



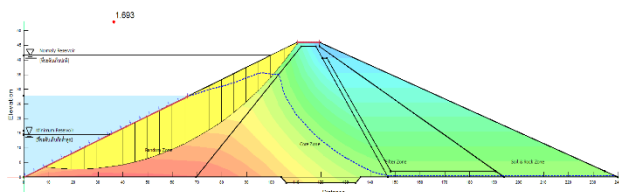
รูปที่ 15 แนวการเคลื่อนพังของการวิเคราะห์ด้วยวิธี Spencer จากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำเหลือ 1/2 เท่าความต่างของระดับกักเก็บปกติและระดับน้ำต่ำสุดของเขื่อนปาล์มชลสิทธิ์



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัยกับการลดลงของระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำมวกเหล็กด้วยวิธี Spencer

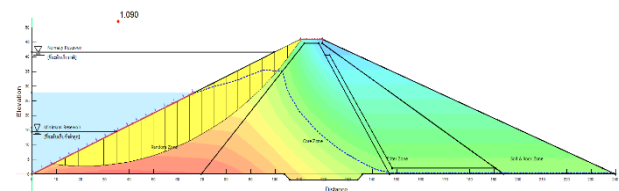


รูปที่ 16 แนวการเคลื่อนพังของการวิเคราะห์ด้วยวิธี Spencer จากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำเหลือ 1/16 เท่าความต่างของระดับกักเก็บปกติและระดับน้ำต่ำสุดของเขื่อนปาล์มชลสิทธิ์



รูปที่ 19 แนวการเคลื่อนพังของการวิเคราะห์ด้วยวิธี Bishop จากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำเหลือ 1/2 เท่าความต่างของระดับกักเก็บปกติและระดับน้ำต่ำสุดของอ่างเก็บน้ำมวกเหล็ก

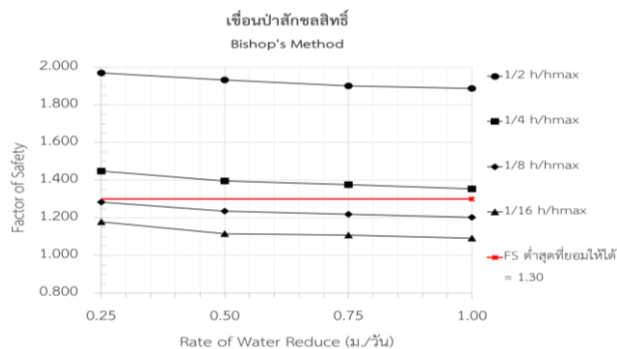
กรณีอ่างเก็บน้ำมวกเหล็กก็พบว่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าลดลงตามการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำเทียบกับความต่างของระดับน้ำกักเก็บปกติและระดับน้ำต่ำสุด ดังแสดงในรูปที่ 17 และ 18 โดยค่าอัตราส่วนความปลอดภัยวิเคราะห์ได้จากวิธีการของ Bishop และ Spencer ตามลำดับ ซึ่งในกรณีของอ่างเก็บน้ำมวกเหล็กพบว่าระดับในเขื่อนไม่ควรลดลงเกินกว่า 1/4 เท่าของความต่างของระดับน้ำกักเก็บปกติและระดับน้ำต่ำสุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการลดลงของระดับน้ำด้วย วงของการเคลื่อนพังจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการของ Spencer กรณีระดับน้ำลดลงเหลือ 1/2 และ 1/16 เท่าความต่างของระดับกักเก็บปกติและระดับน้ำต่ำสุด แสดงในรูปที่ 19 และ 20 ตามลำดับ



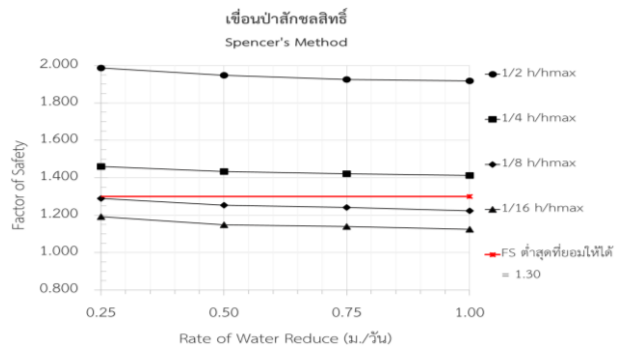
รูปที่ 20 แนวการเคลื่อนพังของการวิเคราะห์ด้วยวิธี Bishop จากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำเหลือ 1/16 เท่าความต่างของระดับกักเก็บปกติและระดับน้ำต่ำสุดของอ่างเก็บน้ำมวกเหล็ก

### 3.3 ผลของอัตราการลดลงของระดับน้ำต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัย

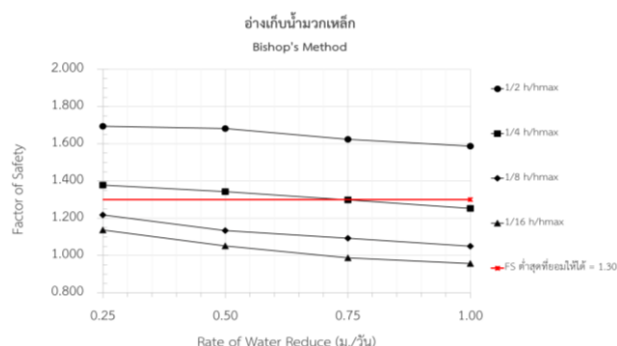
สำหรับอัตราการลดลงของระดับน้ำนั้นก็ส่งผลต่ออัตราส่วนความปลอดภัยไม่มากนัก โดยค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่ออัตราการลดลงเพิ่มขึ้นทั้งสองเขื่อน ดังแสดงในรูปที่ 21 - 24 โดยค่าอัตราส่วนความปลอดภัยได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการของ Bishop และ Spencer ของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์และอ่างเก็บน้ำมวกเหล็กตามลำดับ โดยกรณีของอ่างเก็บน้ำมวกเหล็กพบว่า หากต้องการลดระดับน้ำลงเหลือ 1/4 เท่าของความต่างของระดับกักเก็บปกติและระดับน้ำต่ำสุด อัตราการลดลงของระดับน้ำไม่ควรเกิน 0.75 เมตรต่อวัน



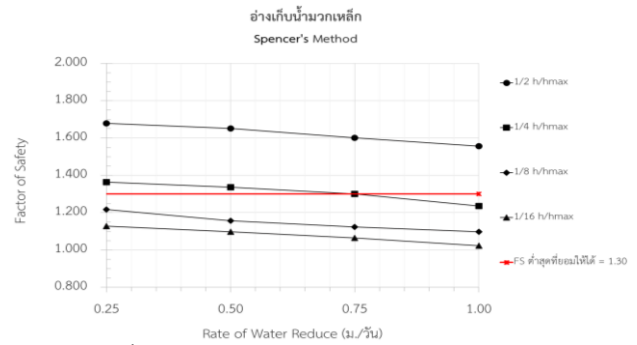
รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัยกับอัตราการลดลงของระดับน้ำของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ด้วยวิธี Bishop



รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัยกับอัตราการลดลงของระดับน้ำของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ด้วยวิธี Spencer



รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัยกับอัตราการลดลงของระดับน้ำของอ่างเก็บน้ำมวกเหล็กด้วยวิธี Bishop



รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัยกับอัตราการลดลงของระดับน้ำของอ่างเก็บน้ำมวกเหล็กด้วยวิธี Spencer

## 4. บทสรุป

1. การลดลงของระดับน้ำในเขื่อนนั้นส่งผลต่อเสถียรภาพความลาดชันของเขื่อนโดยเฉพาะด้านเหนือน้ำ เนื่องจากระดับน้ำที่ลดลงนั้น ทำให้แรงดันน้ำในเขื่อนด้านเหนือน้ำนั้นลดลง ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินบริเวณดังกล่าว ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพของเขื่อน

2. จากผลการวิเคราะห์ทั้ง 2 โครงการ ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในเขื่อน โดยการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำที่มากกว่า 1/4 เท่า เมื่อเทียบกับความต่างของระดับกักเก็บปกติและระดับน้ำต่ำสุดนั้นให้ผลการวิเคราะห์ที่ให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้ในช่วงระหว่าง 1.30 ถึง 1.00 ซึ่งค่าที่ได้ดังกล่าวนี้ต่ำกว่าค่าเกณฑ์ความปลอดภัยที่แนะนำ

3. ผลการวิเคราะห์ทั้ง 2 โครงการ ในส่วนของการลดลงของระดับน้ำมีผลต่อค่าอัตราส่วนความปลอดภัยไม่มากนัก อย่างไรก็ตามหากการลดลงของระดับน้ำมาก อัตราการลดลงของระดับน้ำจะมีส่วนช่วยให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งไม่ควรเกิน 0.75 เมตรต่อวัน

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ฝ่ายวิศวกรรมปฐพี ส่วนปฐพีกลศาสตร์ สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา, โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาป่าสักชลสิทธิ์ และ โครงการชลประทานสระบุรี สำนักงานชลประทานที่ 10 กรมชลประทาน ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านวิชาการและข้อมูลที่จำเป็นสำหรับงานวิจัยฉบับนี้

## เอกสารอ้างอิง

[1] Mohammed Y. Fattah, Hasan A. Omran, Mohammed A. Hassan (2015). Behavior of an Earth Dam During Rapid Drawdown. International Journal of Advance Research, Vol.3, No.03, pp. 110-122.

[2] Jasmin M. Abbas, Qasmin A. Aljinabi, Zainab Ali Mutiny (2017). Slope Stability Analysis of An Earth Dam. Diyala



- Journal of Engineering Sciences, Vol.10, No.01, pp. 110-117.
- [3] Hla Myat Htwe and Tun Naing, (2017). Seepage and Slope Stability Analysis of Myittha Multipurpose Dam Project, Gangaw Township, Magway Region, Myanmar. Regional Conference in Civil Engineering (RCCE) The Third International Conference on Civil Engineering Research (ICCER), Surabaya, Republic of Indonesia, 1-2 August 2017.
- [4] Vannee S. and Pawinee J. (2019). Increase Stability of Soft Clay Embankments for flood Prevention Using Compact and Lining Techniques. *Science and Technology Asia*, Vol.24, No.04, pp. 58-59.
- [5] Braja M. Das (2002). *Principles of Geotechnical Engineering, 7<sup>th</sup> Edition*. Cengage Learning, Inc., pp.548-550.
- [6] Carpenter J.R. (1994). The spencer method of slices. *Joint Highway Research Project*, jhrp-85-17, pp.4-9.
- [7] สุทธิศักดิ์ ศรีลัมภ์ (2555). *วิศวกรรมความปลอดภัยเขื่อนเพื่อการออกแบบและการบำรุงรักษา*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, สำนักพิมพ์, หน้า 3-36 ถึง 3-42.
- [8] ส่วนความปลอดภัยเขื่อน สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา (2559). *คู่มือเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน*. กรมชลประทาน. หน้า 1-1 ถึง 2-1.