

ผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเขื่อนคอนกรีตรูปโค้ง
ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและระดับน้ำ

THE INFLUENCE OF ALKALI-SILICA REACTION (ASR) ON
THE CONCRETE ARCH DAM UNDER THE CHANGES OF
TEMPERATURES AND WATER LEVELS

ชัยโรจน์ บุญลาภ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2566
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเชื่อมคอนกรีตรูปโค้ง
ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและระดับน้ำ

ชัยโรจน์ บุญลาภ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2566
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัย ขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็น
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้า
ขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

This thesis consists of research materials conducted at the Faculty of
Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi and hence the copyright
owner. I hereby certify that the thesis does not contain any forms of plagiarism.

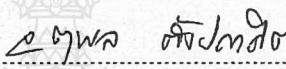


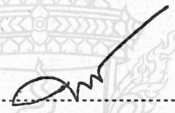
(ว่าที่ร้อยตรีชัยโรจน์ บุญลาภ)

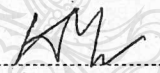


หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเชื่อมคอนกรีตรูปโค้งภายใต้
การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและระดับน้ำ
The Influence of Alkali-Silica Reaction (ASR) on the Concrete Arch
Dam under the Changes of Temperatures and Water Levels
ชื่อ - นามสกุล ว่าที่ร้อยตรีชัยโรจน์ บุญลาภ
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์วงศา วรารักษ์สัจจะ, ประ.ด.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ธนเดช ศรีประสงค์, D.Eng.
ปีการศึกษา 2566

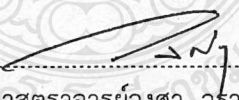
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ประ.ด.)


กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทศพร ประเสริฐศรี, ประ.ด.)


กรรมการ
(รองศาสตราจารย์กำธรเกียรติ มุสิเกต, Ph.D.)


กรรมการ
(อาจารย์ธนเดช ศรีประสงค์, D.Eng.)


กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วงศา วรารักษ์สัจจะ, ประ.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีดิ์, Ph.D.)
วันที่ 20 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2567

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเขื่อนคอนกรีตรูปโค้งภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและระดับน้ำ
ชื่อ - นามสกุล	ว่าที่ร้อยตรีชัยโรจน์ บุญลาภ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วงศา วรารักษ์สัจจะ, ประ.ด.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ธนเดช ศรีประสงค์, D.Eng.
ปีการศึกษา	2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา (ASR) ที่มีต่อเขื่อนคอนกรีตรูปโค้งภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและระดับน้ำที่สูงสุดและต่ำสุด โดยใช้แบบจำลอง Finite Element Method ในการวิเคราะห์ผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเขื่อนคอนกรีตรูปโค้ง โดยการปรับค่าคุณสมบัติวัสดุของคอนกรีตที่ส่งผลต่อการขยายตัวจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา คือ อุณหภูมิเขื่อนตั้งแต่ปี ค.ศ. 2013 ถึง ค.ศ. 2023 ความเค้นในแนวรัศมี ความเค้นในแนวแกน โมดูลัสความยืดหยุ่น ความหนาแน่น และอัตราส่วนปัวซอง

การพิจารณาผลกระทบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน 1) ทำการศึกษาค่าความเค้น ความเครียด และการเสียรูป โดยพิจารณาอุณหภูมิภายในเขื่อนที่เปลี่ยนแปลงไป โดยกำหนดให้ระดับน้ำเป็นค่าเฉลี่ยตลอด 10 ปีดังกล่าว อุณหภูมิส่งถ่ายความร้อนและแรงดันน้ำที่ฝั่งเหนือน้ำของเขื่อน และทำการศึกษาผลกระทบที่มีต่อฝั่งท้ายน้ำของเขื่อนโดยแบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ a) กรณีอุณหภูมิสูงสุดฝั่งเหนือน้ำ เทียบกับอุณหภูมิสูงสุดฝั่งท้ายน้ำ b) กรณีอุณหภูมิสูงสุดฝั่งเหนือน้ำ เทียบกับอุณหภูมิต่ำสุดฝั่งท้ายน้ำ c) กรณีอุณหภูมิสูงสุดฝั่งเหนือน้ำ เทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยฝั่งท้ายน้ำ และ d) กรณีอุณหภูมิเฉลี่ยฝั่งเหนือน้ำ เทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยฝั่งท้ายน้ำ 2) ทำการศึกษาค่าความเค้น ความเครียด และการเสียรูป โดยพิจารณาระดับน้ำที่จุดสูงสุดและจุดต่ำสุด และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดปี ค.ศ. 2020 และปี ค.ศ. 2022

จากผลการวิจัยพบว่า ปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาส่งผลทำให้ค่าความเครียดของเขื่อนมีแนวโน้มสูงมากขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น และระยะเวลาส่งผลกระทบต่อความร้อนสะสมมากขึ้น การขยายตัวสะสมของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นกัน

คำสำคัญ: ปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ
เขื่อนคอนกรีตทรงโค้ง

Thesis Title	The Influence of Alkali-Silica Reaction (ASR) on the Concrete Arch Dam under the Changes of Temperatures and Water levels
Name - Surname	Acting Sub Lt. Chairaj Bunlap
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Assist. Prof. Wongsu Wararuksajja, Ph.D.
Thesis Co-Advisor	Mr.Thanadet Sriprasong, D.Eng.
Academic Year	2023

ABSTRACT

This research aimed to investigate the influences of Alkali-Silica Reaction (ASR) on the concrete arch dam under the changing temperatures and water levels. The finite element method modeling was used to analyze the effects of ASR on the concrete arch dam. The concrete material properties which related to the Alkali-Silica Reaction expansion including dam temperatures from 2013 to 2023, radial stresses, axial stresses, modulus of elasticity, density, and Poisson's ratio were defined.

The investigation of the effects consisted of two parts. 1) The study of stresses, strains and deformations considering the changing temperatures inside the dam were specified with the average water level from 2013 to 2023, heat transfer temperatures and upstream pressures. The investigation of the results in regard to the downstream of the dam comprised four conditions: a) the highest upstream temperature comparing the highest downstream temperature, b) the highest upstream temperature comparing the lowest downstream temperature, c) the highest upstream temperature comparing the average downstream temperature, and d) the average upstream temperature comparing the average downstream temperature. 2) The stresses, strains and deformations considering the highest and the lowest water levels and the changing water temperatures throughout the year in 2020 and 2022

The research results pointed out that ASR had an impact on the dam strain. As the temperatures increased, the dam strains tended to become greater. Furthermore, in accord with the time period, the higher heat summation resulted in the continuous rises of the accumulated expansions of ASR.

Keywords: alkali-silica reaction, temperature change, changing water level, concrete arch dam

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของ ผศ.ดร.วงศา วรารักษ์สัจจะ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ ดร.ธนเดช ศรีประสงค์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ บ่มเพาะ ชัดเจนและให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุง แก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำการศึกษาวิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ผศ.ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ประธานกรรมการสอบ ผศ.ดร.กำธรเกียรติ มุสิกเกต และ ผศ.ดร.ทศพร ประเสริฐศรี กรรมการสอบทุกท่านที่ได้ให้ความกรุณา ในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัย รวมทั้งเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สรพงษ์ ภาวสุปรีย์ คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ได้สนับสนุน การศึกษา รวมถึงเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับดำเนินการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ และมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ พี่น้อง เพื่อนที่แสนดีและ คณะครู-อาจารย์ ที่ให้การสนับสนุนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ และเพื่อน ๆ ทุกคนที่เป็น กำลังใจ

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ หากมี ส่วนหนึ่งส่วนใดขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ว่าที่ร้อยตรีชัยโรจน์ บุญลาภ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(7)
สารบัญรูป.....	(8)
บทที่ 1 บทนำ	10
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	10
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	13
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	13
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	13
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
2.1 ปฏิกริยาอัลคาไล-ซิลิกา.....	14
2.2 เชื้อน	21
2.3 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	34
3.1 พารามิเตอร์ของเชื้อนภูมิพล.....	35
3.2 การสอบเทียบแบบจำลอง.....	36
3.3 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและระดับน้ำของเชื้อน.....	39
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล.....	45
4.1 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปฏิกริยาอัลคาไล-ซิลิกา บล็อกที่ 12 ของเชื้อน คอนกรีตรูปโค้ง	46
4.2 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปฏิกริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเชื้อนคอนกรีตรูปโค้ง ปีที่ระดับกักเก็บน้ำในเชื้อนต่ำสุด	49
4.3 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปฏิกริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเชื้อนคอนกรีตรูปโค้ง ปีที่ระดับกักเก็บน้ำในเชื้อนสูงสุด	52
4.4 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบการขยายตัวสะสมของปฏิกริยาอัลคาไล-ซิลิกา	54
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	55
5.1 สรุปผลการวิจัย	55
5.2 ข้อเสนอแนะ	55
บรรณานุกรม	56
ประวัติผู้เขียน	59

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของสารรวมมวลในปริมาณที่ระบุไว้ถือว่ามีโอกาสเกิดปฏิกิริยาได้.....	18
ตารางที่ 2.2 หินที่เกิดปฏิกิริยาที่เป็นอันตราย แร่ธาตุ และสารสังเคราะห์	19
ตารางที่ 2.3 DOF ของลักษณะการวิเคราะห์แต่ละชนิด.....	29
ตารางที่ 3.1 ลักษณะสำคัญของเงื่อนไข.....	35
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติวัสดุของคอนกรีตใช้ในการวิเคราะห์ของ Pourbehi (2018).....	36
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติวัสดุของคอนกรีตใช้ในการวิเคราะห์ของ Kiet (2018)	37
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเงื่อนไขคอนกรีตรูปโค้ง บล็อกที่ 12	48
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเงื่อนไขคอนกรีตรูปโค้ง ปี 2020.....	51
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเงื่อนไขคอนกรีตรูปโค้ง ปี 2022.....	53



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 ปฏิบัติการอัลคาไล-ซิลิกา ก) กลไกการเกิดอัลคาไล-ซิลิกา และ ข) การตรวจจับ ASR ของตัวอย่างคอนกรีต (Sriprasong 2020)	11
รูปที่ 1.2 ระดับอุณหภูมิและระดับน้ำของเขื่อนภูมิพลย้อนหลัง 10 ปี (Electricity Generating Authority of Thailand, 2023)	12
รูปที่ 1.3 ระดับอุณหภูมิสูงสุดแต่ละเดือนของเขื่อนภูมิพลในปี 2020 (Electricity Generating Authority of Thailand, 2023)	12
รูปที่ 2.1 กลไกการละลายซิลิกาด้วยไฮดรอกซิล เส้นประคือจุดเชื่อมต่อระหว่างซิลิกากับน้ำ (Sriprasong, 2020).....	15
รูปที่ 2.2 กลไกของปฏิกริยาอัลคาไล-ซิลิกา (Sriprasong, 2020).....	15
รูปที่ 2.3 ลักษณะเขื่อนฐานแผ่ (Gravity Dam)	21
รูปที่ 2.4 ลักษณะเขื่อนโค้ง (Arch Dam)	22
รูปที่ 2.5 ลักษณะเขื่อนหินถม (Rock Fill Dam)	23
รูปที่ 2.6 ลักษณะเขื่อนดินถม (Earth Dam).....	23
รูปที่ 2.7 เส้นชั้นการกระจายระดับอุณหภูมิที่หน้าตัดเขื่อน (ส่วนความปลอดภัยเขื่อน สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา, 2566).....	26
รูปที่ 2.8 โหนดในเอลิเมนต์แต่ละมิติ (ปราโมทย์, 2555).....	28
รูปที่ 2.9 การกระจัดและการกระจายความเค้นของเขื่อน ก) การกระจัด (ม.) ทิศทางในแนวรัศมี (ข) การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Pa) (Kiet, 2018)	30
รูปที่ 2.10 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดคุณสมบัติคอนกรีตทั้ง 6 กรณี (Kiet, 2018)	31
รูปที่ 2.11 พารามิเตอร์แสดงคุณสมบัติของคอนกรีตอันเนื่องมาจากการขยายตัวของปฏิกริยาอัลคาไล-ซิลิกา (Pourbehi, 2018).....	33
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษา.....	34
รูปที่ 3.2 รูปถ่ายดาวเทียมของเขื่อนภูมิพล (Google Earth, 2023).....	35
รูปที่ 3.3 การสอบเทียบแบบจำลอง ก) แบบจำลอง 3 มิติ และ ข) ผลความเครียดตามแนวแกนแบบจำลองและการทดลอง (Pourbehi, 2018)	37
รูปที่ 3.4 การสอบเทียบแบบจำลอง ก) ผลการกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Pa) ของ Kiet (2018) และ ข) ผลการกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Pa) (Computed)	38
รูปที่ 3.5 กราฟแสดงผลของการเพิ่มจำนวน Element ต่อค่า Von Mises Stress	39
รูปที่ 3.6 Finite element Meshing ก) รูปทรง Mesh ของโมเดลเขื่อน ข) พื้นผิว Mesh.....	40
รูปที่ 3.7 ประวัติอุณหภูมิอากาศราย 3 ชั่วโมงที่สถานีตาก ค.ศ. 2013 – 2015 (Electricity Generating Authority of Thailand, 2023)	40

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

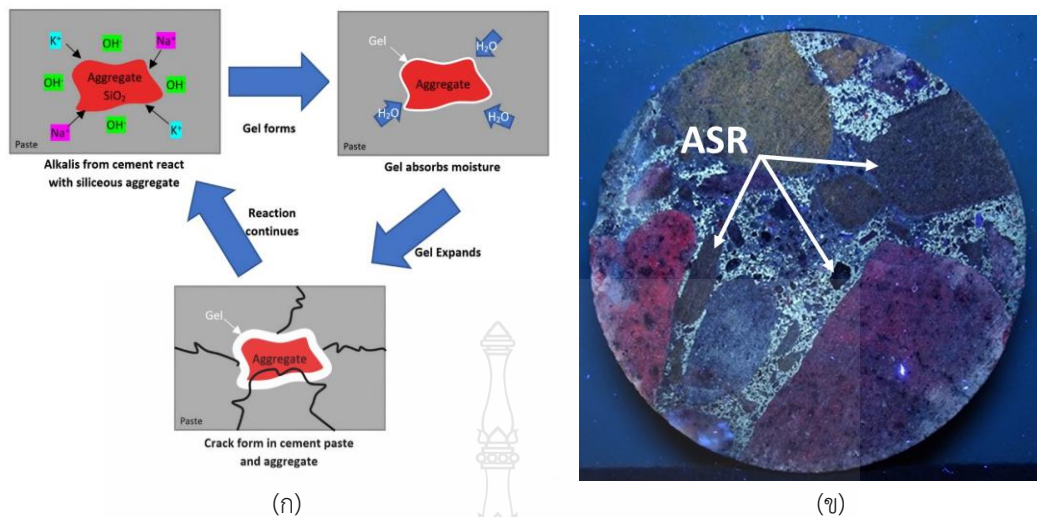
รูปที่ 3.8 การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำระหว่างปี ค.ศ. 2013 – 2015 (Electricity Generating Authority of Thailand, 2023)	41
รูปที่ 3.9 อุณหภูมิสูงสุดย้อนหลัง 10 ปี (ค.ศ. 2013 – 2023) ก) บริเวณเหนือน้ำ (Upstream Maximum Temperature) และ ข) บริเวณท้ายน้ำ (Downstream Maximum Temperature) (Electricity Generating Authority of Thailand, 2023)	42
รูปที่ 3.10 ระดับกักเก็บน้ำในเขื่อนบริเวณเหนือน้ำ (Upstream) ย้อนหลัง 10 ปี (ค.ศ. 2013 – 2023) (Electricity Generating Authority of Thailand, 2023)	42
รูปที่ 3.11 สถานการณ์น้ำในอ่างเก็บน้ำตัวอย่าง 1 มิถุนายน 2566 (Electricity Generating Authority of Thailand, 2023)	43
รูปที่ 3.12 อุณหภูมิและระดับน้ำที่กระทำต่อเขื่อน ก) บริเวณฝั่งเหนือน้ำ ข) บริเวณฝั่งท้ายน้ำ ค) จุด Fix support ของเขื่อน	44
รูปที่ 4.1 แบบจำลองเขื่อนบล็อกที่ 12 จาก 25 บล็อก	45
รูปที่ 4.2 ผลวิเคราะห์ความเค้นจากการขยายตัวอัลคาไล-ซิลิกา ของแบบจำลองบล็อกที่ 12 ทั้ง 4 กรณี ก) เหนือน้ำอุณหภูมิสูงสุดเทียบกับท้ายน้ำอุณหภูมิต่ำสุด ข) เหนือน้ำอุณหภูมิสูงสุดเทียบกับท้ายน้ำอุณหภูมิสูงสุด ค) เหนือน้ำอุณหภูมิสูงสุดเทียบกับท้ายน้ำอุณหภูมิเฉลี่ย และ ง) เหนือน้ำอุณหภูมิเฉลี่ยเทียบกับท้ายน้ำอุณหภูมิเฉลี่ย	46
รูปที่ 4.3 ผลวิเคราะห์ความเครียดจากการขยายตัวอัลคาไล-ซิลิกา ของแบบจำลองบล็อกที่ 12 ทั้ง 4 กรณี ก) เหนือน้ำอุณหภูมิสูงสุดเทียบกับท้ายน้ำอุณหภูมิต่ำสุด ข) เหนือน้ำอุณหภูมิสูงสุดเทียบกับท้ายน้ำอุณหภูมิสูงสุด ค) เหนือน้ำอุณหภูมิสูงสุดเทียบกับท้ายน้ำอุณหภูมิเฉลี่ย และ ง) เหนือน้ำอุณหภูมิเฉลี่ยเทียบกับท้ายน้ำอุณหภูมิเฉลี่ย	47
รูปที่ 4.4 การกระจายอุณหภูมิเหนือน้ำและท้ายน้ำในเขื่อนของปี ค.ศ. 2020	49
รูปที่ 4.5 แบบจำลองโมเดลแสดงผลการวิเคราะห์เขื่อนคอนกรีตรูปโค้งของปี 2020 ก) ความเค้นฝั่งเหนือน้ำ ข) ความเค้นฝั่งท้ายน้ำ และ ค) การเสียรูปของเขื่อน	51
รูปที่ 4.6 แบบจำลองโมเดลแสดงผลการวิเคราะห์เขื่อนคอนกรีตรูปโค้งของปี 2022 ก) ความเค้นฝั่งเหนือน้ำ ข) ความเค้นฝั่งท้ายน้ำ และ ค) การเสียรูปของเขื่อน	53
รูปที่ 4.7 การขยายตัวสะสมของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา	54

บทที่ 1

บทนำ

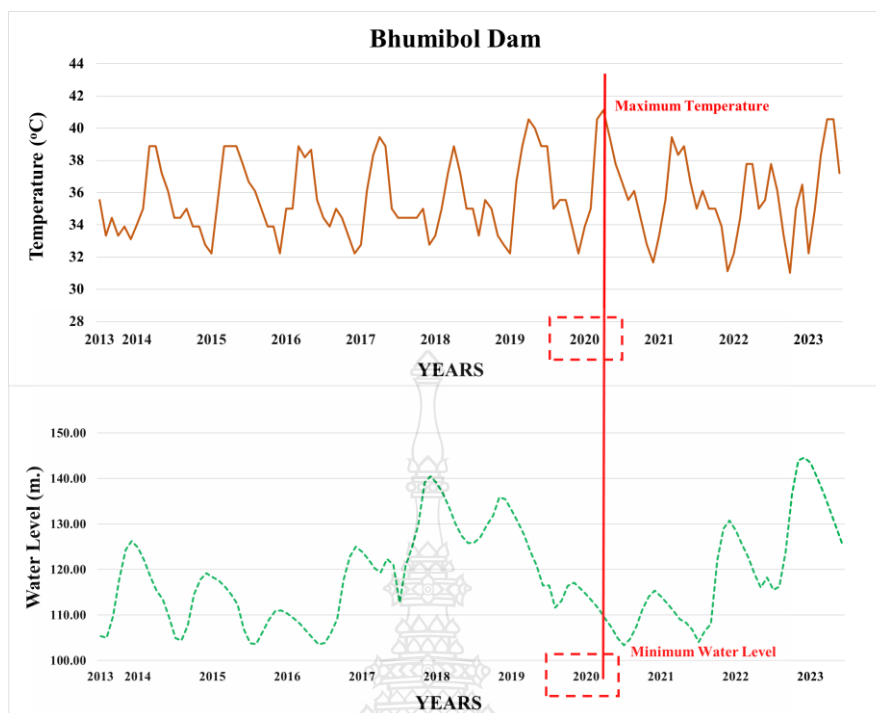
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เป็นที่ทราบกันดีว่าเขื่อนเป็นโครงสร้างที่สำคัญในการบริหารจัดการน้ำสำหรับการเพาะปลูก และป้องกันอุทกภัย นอกจากนี้อ่างเก็บน้ำและเขื่อน ยังช่วยเรื่องการคมนาคมทางน้ำ การผลิตไฟฟ้าและแหล่งน้ำอุปโภคบริโภคอีกด้วย สำหรับการพังทลายของเขื่อนเกิดได้จากสาเหตุหลัก 3 ปัจจัย คือ ปัจจัยที่มีปริมาณน้ำมากเกินกำหนดส่งผลให้เขื่อนระบายน้ำไม่ทัน ทำให้เกิดการล้นสันเขื่อน ปัจจัยการรั่วที่ตัวเขื่อน หรือรั่วบริเวณฐานรากของเขื่อน และปัจจัยจากการก่อสร้างที่ไม่ดีพอ บริเวณฐานรากอาจมีปัญหา ส่งผลให้เกิดการยุบตัวของชั้นดิน เขื่อนหลายแห่งประสบปัญหาด้านความทนทาน โดยมีการเคลื่อนตัวและการแตกร้าว ความปลอดภัยของเขื่อนจึงเป็นข้อควรคำนึงอย่างมาก ดังนั้นเขื่อนจึงควรได้รับการตรวจสอบถึงความปลอดภัยของโครงสร้างของเขื่อน การศึกษาในปัจจุบันส่วนใหญ่ในด้านความปลอดภัยของเขื่อนมุ่งเน้นไปที่ความเสี่ยงจากแผ่นดินไหว เขื่อนขนาดใหญ่จึงมีการออกแบบให้ทนต่อแรงแผ่นดินไหวได้สูง แต่ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา (ASR) ซึ่งพบวัสดุจำพวกคอนกรีตที่มีการสัมผัสกับน้ำ เขื่อนที่ต้องมีการสัมผัสกับน้ำและความชื้นสัมพัทธ์สูง อุณหภูมิสูง ส่งผลให้เกิดปริมาณอัลคาไล-ซิลิกาสูง การเสื่อมสภาพของโครงสร้างเนื่องจากการขยายตัวอัลคาไล-ซิลิกาเป็นการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ โดยใช้เวลาหลายสิบปีกว่าตรวจพบ โดยปัจจัยที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยานี้ได้แก่ลักษณะของหิน ความชื้น และปริมาณอัลคาไลในซีเมนต์ โดยการเกิดปริมาณอัลคาไล-ซิลิกา ถือเป็นข้อกังวลอย่างมากสำหรับอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต Blanco et al. (2019) และ Dolen et al. (2003) ได้เสนอวิธีการตรวจสอบความทนทานในเขื่อนโดยการการจำลองเชิงตัวเลข วิเคราะห์ผลกระทบภายในคอนกรีตอันเนื่องมาจากซัลเฟต และปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา นำไปสู่ปัญหาในโครงสร้างอย่างมาก ที่อาจทำให้เกิดความเสียหายจนกระทั่งต้องรื้อถอนเขื่อนในที่สุด ตัวอย่างผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว คอนกรีตเกิดการขยายตัวเร็วกว่าที่ควร และการเสื่อมสภาพของคอนกรีต อีกทั้งปัจจัยเรื่องขนาดของมวลรวมก็เป็นตัวแปรที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา โดย Sriprasong (2020) ได้ศึกษาพบว่าขนาดของมวลรวมบางชนิด เช่น หินปูน หินแกรนิต หินบะซอลต์ หินควอร์ตไซต์ หินยออตตาวา เป็นต้น เมื่อทำปฏิกิริยาจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อพฤติกรรมของการขยายตัวของคอนกรีตที่ได้รับผลกระทบจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาในระยะยาว แสดงในรูปที่ 1.1 เป็นตัวอย่างคอนกรีตที่เกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา โดยเกิดขึ้นรอบ ๆ มวลรวม

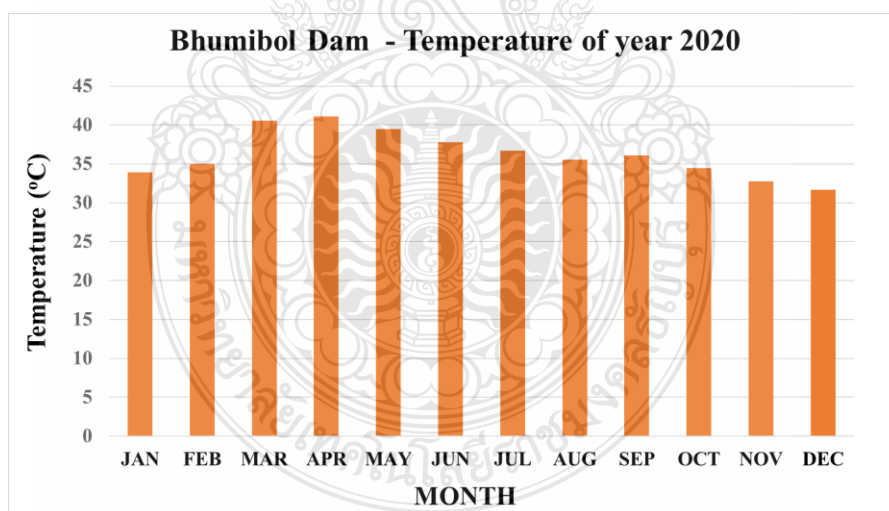


รูปที่ 1.1 ปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา ก) กลไกการเกิดอัลคาไล-ซิลิกา และ ข) การตรวจจับ ASR ของตัวอย่างคอนกรีต (Sriprasong 2020)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเขื่อนคอนกรีตรูปโค้งภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและระดับน้ำ โดยพิจารณาความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่กระทบบริเวณหน้าเขื่อนส่งผลต่อการกระจายความร้อนในตัวเขื่อนคอนกรีต เนื่องจากอุณหภูมิเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่จะก่อให้เกิดการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา เมื่อพิจารณาอุณหภูมิภายในเขื่อนย้อนหลัง 10 ปี ตั้งแต่ 2013 ถึง 2023 พบว่าปี 2020 ระดับอุณหภูมิภายในเขื่อนสูงที่สุด แสดงในรูปที่ 1.2 และอุณหภูมิสูงสุดในแต่ละเดือนของปี 2020 วัดอุณหภูมิจากตำแหน่งกึ่งกลางเขื่อนบริเวณทางเดินบนเขื่อน จากข้อมูลการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย แสดงในรูปที่ 1.3 (Electricity Generating Authority of Thailand, 2023) โดยใช้การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 1.2 ระดับอุณหภูมิและระดับน้ำของเขื่อนภูมิพลย้อนหลัง 10 ปี (Electricity Generating Authority of Thailand, 2023)



รูปที่ 1.3 ระดับอุณหภูมิสูงสุดแต่ละเดือนของเขื่อนภูมิพลในปี 2020 (Electricity Generating Authority of Thailand, 2023)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้นของเขื่อนรูปโค้ง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของเขื่อนเนื่องจากการขยายตัวของอัลคาไล-ซิลิกา
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบของเขื่อนเนื่องจากระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเขื่อนคอนกรีตรูปโค้ง ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและระดับน้ำ โดยพิจารณาเขื่อนภูมิพล จังหวัดตาก ประเทศไทย

1.3.2 ศึกษาผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเขื่อนคอนกรีตรูปโค้ง โดยพิจารณาอุณหภูมิภายในเขื่อนที่เปลี่ยนแปลงไป และกำหนดระดับน้ำเป็นระดับน้ำเฉลี่ย

1.3.3 ศึกษาผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเขื่อนคอนกรีตรูปโค้ง โดยพิจารณาปีที่ระดับน้ำที่สูงสุดและปีที่ระดับน้ำต่ำสุด โดยกำหนดอุณหภูมิน้ำเปลี่ยนแปลงไปตลอดระยะเวลาสองปีของการเก็บข้อมูล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบแนวทางการป้องกันผลกระทบการเกิดปัญหาจากการขยายตัวของอัลคาไล-ซิลิกาเนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

1.4.2 ทราบแนวทางการป้องกันผลกระทบการเกิดปัญหาจากการขยายตัวของอัลคาไล-ซิลิกาเนื่องจากแรงดันน้ำที่ระดับน้ำแตกต่างกัน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

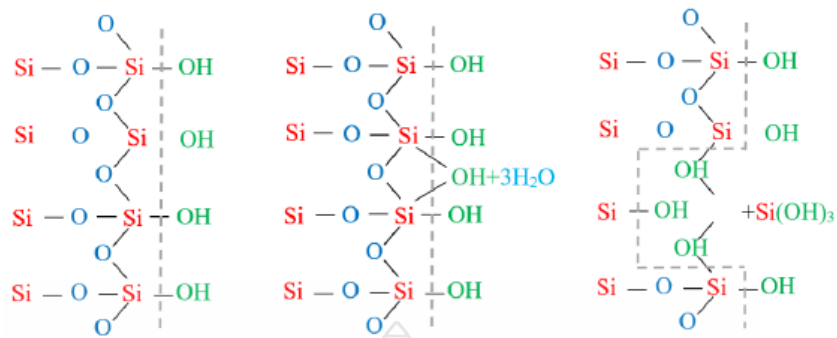
ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับพื้นฐาน ซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการศึกษาผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเชื่อมคอนกรีตรูปโค้งภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและระดับน้ำ

2.1 ปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา

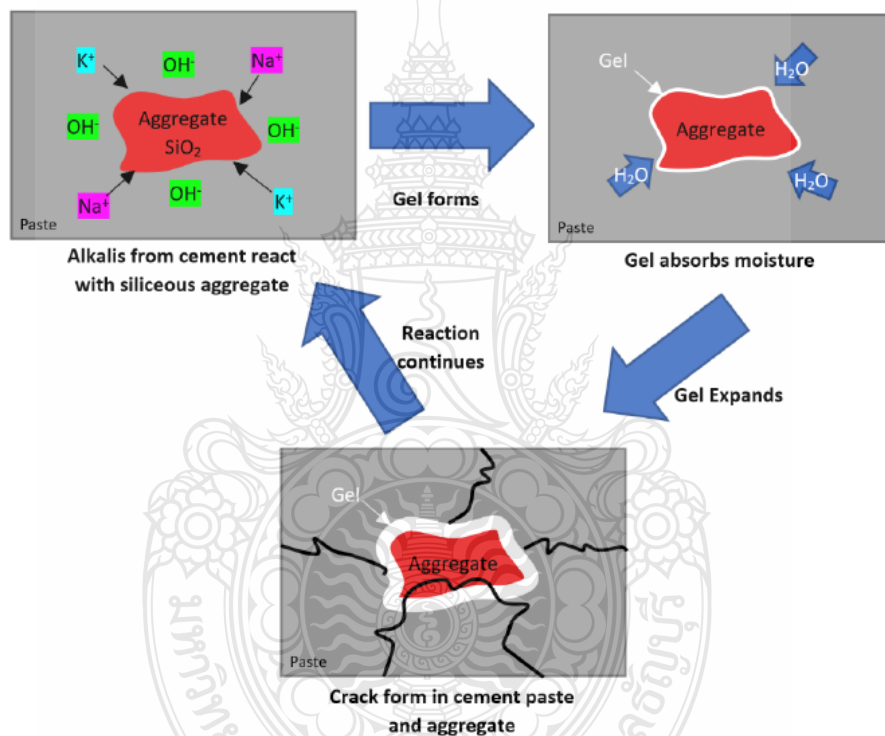
ปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา (Alkali Silica Reaction) คือ การเสื่อมสภาพภายในคอนกรีต ซึ่งปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา เป็นหนึ่งในชุดย่อยของปฏิกิริยารวมอัลคาไลน์ เกิดจากปฏิกิริยาในคอนกรีตระหว่างอัลคาไลน์ในสารละลายรูพรุนกับแร่ธาตุที่เกิดปฏิกิริยาสูงบางชนิด ซึ่งพบในมวลรวมทั่วไปจำนวนมาก ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างอัลคาไลน์ในซีเมนต์เพสต์และซิลิกาที่เกิดปฏิกิริยา ที่พบในมวลรวมจะส่งผลต่อการขยายตัวของคอนกรีตกลไกปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา กระบวนการทางเคมีในซีเมนต์ที่มีความเป็นด่างสูงไอออนซิลิเกต อลูมิเนต หรือซัลเฟตบางส่วนจะมีความสมดุลด้วยโลหะอัลคาไลน์สูง (Na^+ หรือ K^+) แทนที่จะเป็นโลหะอัลคาไลน์เอิร์ธ (Ca^{2+}) ส่งผลให้ของเหลวมีค่า pH สูงผิดปกติ ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของกรดแอมโมเนียมอ่อนและการก่อตัวของเกลือแคลเซียมที่ไม่ละลายน้ำแทนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ถูกระบุว่ามีส่วนทำให้เกิดผลกระทบนี้ไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ซึ่ง pH เท่ากับ 7 หรือสูงกว่าเป็นผลคูณของปฏิกิริยาทั้งสอง จากนั้น OH^- จะแทรกซึมด้วย Na หรือ K ไอออนโดยการแพร่กระจายเข้าไปในมวลรวมของซิลิกาที่มีการตกผลึกไม่ดี ทำให้เกิดการแตกตัวของหมู่ซิลอกเซน (Si-O-Si) ด้วยเหตุนี้ ซิลิกาจะละลายเมื่อมี OH^- ที่จุดเริ่มต้นด้วยการวางตัวเป็นกลางบนหมู่ซิลานอล (Si-OH) ซึ่งปรากฏบนพื้นผิว และจากนั้นโดยการแตกของหมู่ซิลอกเซนแสดงดังรูปที่ 2.1 กระบวนการเหล่านี้สามารถแสดงปริมาณสารสัมพันธ์ได้ดังสมการ 2.1 ถึง สมการ 2.2 (Dent Glasser และ Kataoka, 1981)



อัลคาไลน์ในสารละลายรูพรุนคอนกรีต (Na_2O และ K_2O) ทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุซิลิเกตที่ทำให้ปฏิกิริยาจากมวลรวม ส่งผลให้เกิดเจลอัลคาไล-ซิลิกา (ASR เจล) โดยเจลอัลคาไล-ซิลิกาจะดูดซับน้ำภายในคอนกรีต ส่งผลให้เกิดแรงดันรอบๆ เกิดการขยายตัวออก และเกิดรอยแตกร้าวขึ้น กลไกของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 กลไกการละลายซิลิกาด้วยไฮดรอกซิล เส้นประคือจุดเชื่อมต่อระหว่างซิลิกากับน้ำ (Sriprasong, 2020)

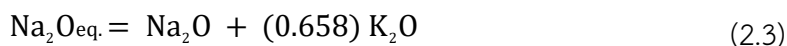


รูปที่ 2.2 กลไกของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา (Sriprasong, 2020)

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา รวมถึงกลไกของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา ในบทนี้จะเกี่ยวข้องกับกรณีศึกษาการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาของโครงสร้างเขื่อนคอนกรีตขนาดใหญ่ในบทที่ 4

2.1.1 อัลคาไลน์ในปูนเม็ด

อัลคาไลน์ในคอนกรีตโดยส่วนใหญ่มาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และวัสดุอื่นๆ เช่น มวลรวม สารเคมีผสม การเสริมซีเมนต์ก็อาจทำให้มีปริมาณอัลคาไลน์สูงขึ้น โดยปริมาณอัลคาไลน์สามารถแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์มวลที่คำนวณได้โดยใช้โซเดียมออกไซด์ที่เทียบเท่า (Na_2O) เป็นค่าเฉลี่ยของโพแทสเซียมและโซเดียมไอออนแสดงตามสมการ 2.3



ข้อกำหนดได้ใน ASTM C 150 ซีเมนต์อัลคาไลน์ต่ำ ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) ต่ำกว่าร้อยละ 0.6 คอนกรีตที่ทำด้วยซีเมนต์อัลคาไลน์ต่ำนี้อาจยังคงมีการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา หากมวลรวมที่ใช้มีปฏิกิริยาสูง หรือสารผสมเพิ่มให้สารอัลคาไลน์ เช่น การใช้ซีเมนต์ที่มีฤทธิ์เป็นด่างสูงศักยภาพของการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH ของสารละลายรูพรุนเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นของอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น อัลคาไลไฮดรอกไซด์จะทำลายพันธะซิลิกาที่พบในมวลรวมที่มีปฏิกิริยาน้อยก่อให้เกิดปฏิกิริยาเจล โดยทั่วไปปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยโซเดียมและโพแทสเซียม ดังนั้น C-S-H อาจเป็นส่วนผสมของแคลเซียม-โซเดียม / โพแทสเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($\text{Ca-Na} / \text{K-S-H}$) ความคงตัวของเจล C-S-H นั้นดีกว่าซิลิกาเจลอัลคาไลน์ ซึ่งหมายความว่าเมื่อแคลเซียมสูงกว่ามาก จะทำให้เจลมีความเสถียรมากขึ้น ในทางกลับกัน ยิ่งอัลคาไลจากโซเดียมหรือโพแทสเซียมมากเท่าไร เจลก็จะมี ความคงตัวน้อยลงเท่านั้น ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการขยายตัวที่เป็นอันตรายได้ C-S-H สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากซิลิกาที่ทำปฏิกิริยาในปอซโซลานเมื่อมีความชื้นและแคลเซียมหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีอยู่ในส่วนผสมเป็นผลพลอยได้จากการให้ความชุ่มชื้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในขณะที่ปอซโซลานสามารถทำหน้าที่เป็นซิลิกาเพื่อทำปฏิกิริยากับต่างในสารละลายรูพรุนของคอนกรีตที่อยู่ใกล้กับซิลิกาในมวลรวมจะทำปฏิกิริยาได้ โดยเจลจากปฏิกิริยาของปอซโซลานมีความคงตัวเนื่องจากมีแคลเซียมในปริมาณที่สูงกว่าและจะมีการกระจายตัวมากขึ้น ดังนั้นจึงมีโอกาสน้อยที่เกิดความเครียดจากการขยายตัวที่ก่อให้เกิดอันตรายที่รุนแรง สำหรับมวลรวมในคอนกรีตของซีเมนต์เพสต์ จะมีรูพรุนขนาดเล็กที่เชื่อมต่อกันซึ่งไอออนในสารละลายหรือน้ำสามารถทะลุผ่านได้ในซีเมนต์เพสต์ที่ให้ความชุ่มชื้น ความเข้มข้นของสารละลายรูพรุนจะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ความเข้มข้นของไอออนมีความสำคัญด้วยเหตุผลหลายประการ ตัวอย่างเช่น ความเข้มข้นของไฮดรอกซิลและ pH ที่เกี่ยวข้องเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่กำหนดปฏิกิริยาของสารเติมแต่งซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไฮเดรตเป็นวัสดุอัลคาไลน์ที่มีค่า pH ของสารละลายรูพรุนซึ่งโดยทั่วไปจะสูงกว่า 12 สภาพแวดล้อมในอุดมคตินี้มีอิทธิพลต่อซิลิกาโดยรวมในการทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์อัลคาไลน์ในสารละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อปฏิกิริยารวมเพิ่มขึ้นของเจลอัลคาไล-ซิลิกา อาจเกิดขึ้นได้แม้จะมีความเข้มข้นของอัลคาไลน์ต่ำลงก็ตาม งานวิจัย Bishnu และคณะ (2017) ได้ศึกษาผลกระทบการเลือกใช้ขนาดมวลรวมแบบหยาบต่อการขยายตัวและความเสียหายของคอนกรีตอันเนื่องมาจาก ASR โดยการหล่อและการปรับปรุงงานทดสอบปริซึมคอนกรีตตามทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1293 การหล่อชิ้นงานปริซึมจำนวน 18 ชิ้น และชิ้นงานทรงกระบอก 3 ชิ้น ชิ้นงานปริซึมมีขนาด 285 มม. x 75 มม. x 75 มม. และกระบอกมีขนาด 100 มม. x 200 มม. เก็บไว้ที่ถังพลาสติกปิดผนึกอย่างแน่นหนาและปรับสภาพภายใต้ค่าคงที่อุณหภูมิ $38 \pm 2^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 95% ปริซึมคอนกรีตได้รับการทดสอบการขยายตัวตามยาว ค่าโมดูลัสของการแตกร้าว ดัชนีพิกัดความเสียหาย (DRI) และความต้านทานพื้นผิว ที่อ่านค่าการขยายตัวตามยาวของปริซึมเบื้องต้นเมื่ออายุได้หนึ่งวัน สำหรับการขยายตัวตามยาวเมื่ออายุ 7, 28, 56, 91, 182, 273 และ 365 วัน พบว่าส่วนผสมแบบหยาบแสดงให้เห็นว่าโมดูลัสของการแตกร้าวน้อยลงซึ่งถึงการประสานกันที่เพิ่มขึ้น โดยมวลรวมหยาบโมดูลัสความยืดหยุ่นคงที่ได้รับผลกระทบตั้งแต่เริ่มมีการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา จึงกำหนดโมดูลัสความยืดหยุ่นของส่วนผสมแบบละเอียด แบบมาตรฐาน และแบบหยาบ คือ 36%, 31% และ 34%

ตามลำดับ พบว่าสัดส่วนที่เท่ากัน ขนาดมวลรวมช่วยในการผลิตโครงสร้างจุลภาคคอนกรีตที่มีความทนทานต่อการย่อยสลายการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาได้ดี กำลังรับแรงอัดสำหรับส่วนผสมที่มีความหยابที่มีค่ามากที่สุดจากส่วนผสมทั้ง 3 กรณี บ่งชี้ว่ามวลรวมที่ใหญ่ขึ้นช่วยเพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีต การคัดแยกมวลรวมยังคงเป็นตัวแปรสำคัญในการศึกษาปฏิกิริยาของมวลรวมและประสิทธิภาพการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาของคอนกรีต ในทำนองเดียวกันกับ Yuichiro และคณะ (2018) ได้ศึกษาผลของสารละลายประเภทแช่ต่อการปล่อยอัลคาไลน์จากมวลรวมภูเขาไฟการปล่อยอัลคาไลไม่ทำให้เร่งการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา จริงหรือไม่ โดยการตรวจสอบผลกระทบของชนิดและความเข้มข้นของสารละลายต่อการปล่อยอัลคาไลจากมวลรวม ขณะเดียวกันก็ตรวจสอบพฤติกรรมของไอออน เช่น ซิลิเกตและไฮดรอกไซด์ไอออน จากนั้นพิจารณาความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นจากการปล่อยอัลคาไลในแง่ของการเพิ่มความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน โดยการวิจัยมีการรวบรวมตัวอย่างมวลรวมจากภูเขาไฟในญี่ปุ่นรวม 16 ชนิด จำแนกเป็น 3 ประเภท ประเภท A มวลรวมที่ไม่มีดินเหนียวแร่ธาตุหรือแก้ว ประเภท B มวลรวมกับแก้ว และประเภท C มวลรวมที่มีแร่ธาตุจากดินเหนียว ทำการทดสอบนำตัวอย่างแช่อยู่ในสารละลาย NaOH mol/L เพื่อวัดปริมาณโปแตสเซียม (K) และแช่อยู่ใน 1 mol/L KOH เพื่อวัดปริมาณโซเดียม (Na) ตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายอัลคาไลน์ พบว่าการปล่อยอัลคาไลน์และความสัมพันธ์กับไอออน ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนไม่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สรุปได้ว่าปริมาณของอัลคาไลที่ปล่อยออกมาจากมวลรวมจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายอัลคาไลน์ หากมวลรวมบางชนิดมีความเข้มข้นของสารละลายอัลคาไลน์สูง ปริมาณอัลคาไลที่ปล่อยออกมาจะสูงขึ้นตาม และพบปริมาณของซิลิเกตแอนไอออนที่บ่งชี้ถึงการตกตะกอนของผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยา ได้แก่ ซิลิเกตแอนไอออนและแคลเซียมไอออน สำหรับมวลรวมภูเขาไฟพบสารละลายซิลิกา อัลคาไลที่ปล่อยออกมาทั้งหมดนั้นมีส่วนทำให้เกิดการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา

2.1.2 ซิลิกาในมวลรวม

ปฏิกิริยาของซิลิกา (SiO_2) ได้รับอิทธิพลจากประเภทของมวลรวมที่เกิดปฏิกิริยา ซึ่งบางชนิดมีปฏิกิริยาเร็ว ในขณะที่บางชนิดมีปฏิกิริยาช้ากว่า มีหินอีกมากมายที่มีซิลิกาเป็นส่วนประกอบ แต่ไม่ใช่มวลรวมของซิลิกาทั้งหมดที่สามารถเกิดจากการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาได้ ตัวอย่างเช่น โอปอล เป็นแร่ในตระกูลควอตซ์เช่นเดียวกับแอมethyst แร่ชนิดนี้จะมีปฏิกิริยาในขณะที่ควอตซ์มีความเสถียร เว้นแต่จะเป็นผลึกระดับไมโครหรือมีความเครียดสูง ความแตกต่างนี้เกิดจากโครงสร้างจุลภาคของมวลรวม ซึ่งแร่โอปอลมีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบสูง ส่งผลต่อความเป็นต่างในสภาพแวดล้อมที่มี pH สูง ซิลิกาอสัณฐานมีรูพรุนและมีปฏิกิริยา มวลรวมที่มีผลึกไม่ดี ไม่มีสัณฐาน จะมีลักษณะคล้ายแก้ว และมีรูพรุนขนาดเล็ก โดยจะส่งผลต่อปฏิกิริยาซึ่งปรากฏบนพื้นที่ผิวขนาดใหญ่และสามารถระบุดูได้จากไฮดรอกไซด์ของอัลคาไลน์ อีกทั้งซิลิกาควอตซ์ไม่สามารถซึมผ่านได้และทำปฏิกิริยาเฉพาะบนพื้นผิวของคริสตัลเท่านั้น ซึ่งพันธะของซิลิคอนและออกซิเจนจะถูกทำลาย พื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรของควอตซ์ต่ำ ดังนั้นปฏิกิริยาจึงต่ำเช่นกัน ในทางกลับกัน ซิลิกาของมวลรวมภูเขาไฟละลายและเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยไม่เกิดการตกผลึกซ้ำ ดังนั้นจึงมีสถานะการตกผลึกต่ำและจะมีปฏิกิริยาสูงในสารละลายที่เป็นต่าง ความเป็นไปได้ที่พลังงานความเครียดจำนวนมากจะถูกเก็บไว้ในโครงตาข่ายผลึกของซิลิกาผลึกที่ถูกเปลี่ยนรูปเนื่องจากความร้อนและความดัน การมีอยู่ของพลังงานที่สูงขึ้นนี้จะทำให้ซิลิกามีแนวโน้มที่จะทำปฏิกิริยามากขึ้น แม้ว่าจะมีแร่ซิลิกาที่เสถียร เช่น ควอตซ์ ก็ตาม

เมื่อซิลิกาอยู่ในสถานะตึงเครียด อาจเกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่เป็นอันตรายได้ อย่างไรก็ตาม อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้ากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมที่ประกอบด้วยซิลิกาละลายแก้วหรืออสัณฐาน ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ของมวลรวมคือฟังก์ชันของทั้งระดับการแตกหักของซิลิกา พื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรของซิลิกาที่เกิดปฏิกิริยาจะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา พื้นที่ซิลิกาที่เกิดปฏิกิริยาขนาดใหญ่จะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยามากขึ้น แสดงในตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของสารรวมมวลในปริมาณที่ระบุไว้ถือว่ามีโอกาสเกิดปฏิกิริยาได้

Aggregates	% by mass
Opal	≥ 0.5
Chert or chalcedony	≥ 3.0
Tridymite or cristobalite	≥ 1.0
Optically strained or microcrystalline quartz	≥ 5.0
Natural volcanic glasses [Farny and Kosmatka, 1997]	≥ 3.0

ที่มา : Sriprasong (2020)

ตารางที่ 2.2 หินที่เกิดปฏิกิริยาที่เป็นอันตราย แร่ธาตุ และสารสังเคราะห์

Reactive Mineral	Chemical Composition	Physical Character
Opal	SiO ₂ ·nH ₂ O	Amorphous
Chalcedony	SiO ₂	Microcrystalline to cryptocrystalline; commonly fibrous
Certain forms of quartz	SiO ₂	Microcrystalline to cryptocrystalline, crystalline but intensely fractures, strained and/or inclusion-filled
Cristobalite	SiO ₂	Crystalline
Tridymite	SiO ₂	Crystalline

ที่มา : ดัดแปลงจากคณะกรรมการ ACI 201 (1992)

ตารางที่ 2.2 หินที่เกิดปฏิกิริยาที่เป็นอันตราย แร่ธาตุ และสารสังเคราะห์ (ต่อ)

Reactive Mineral	Chemical Composition	Physical Character
Rhyolitic, dacitic, latitic, andesite glass or cryptocrystalline devitrification products	Siliceous with lesser proportions of Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , alkaline earths and alkalis	Glass or cryptocrystalline material as the matrix of volcanic rocks or fragments in tuffs
Synthetic siliceous glass	Siliceous with lesser proportions of Al ₂ O ₃ , and/or other substances	Glass

ที่มา : ดัดแปลงจากคณะกรรมการ ACI 201 (1992)

Grymin และคณะ (2018) ได้ศึกษาปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา ในคอนกรีตโดยวิธีมหภาค (Macroscopic) และวิธีเมโสโคปิก (Mesoscopic Approach) โดยการเปรียบเทียบสองโมเดล อย่างแรกทดสอบวิธีมหภาค (จากสภาพแวดล้อมสู่วัสดุ) เป็นการวิเคราะห์ด้วยตาเปล่า เพื่อศึกษาอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ในวัสดุต่อการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกสูง 16 ซม. มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ซม. กำหนดความชื้นสัมพัทธ์ในห้องซึ่งเก็บตัวอย่างไว้มีค่าคงที่ เปรียบเทียบผลลัพธ์ของการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา และกำหนดพารามิเตอร์อื่นๆ เช่น เวลาแฝงที่ใช้อ้างอิงอุณหภูมิ พลังงานกระตุ้นของคาบแฝงและแรงปฏิกิริยา จากการจำลองโมเดลพบว่าความชื้นสัมพัทธ์คงที่ จะไม่ส่งผลต่อการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา ส่วนวิธีที่สองเมโสโคปิก (จากซีเมนต์เพสต์ให้เป็นมวลรวม) ในการทดลองนำแท่งปูนขนาด 40x40x160 มม. ปรับสภาพเบื้องต้นตามวิธี Rilem AAR-2 จากนั้นนำไปเก็บไว้ในน้ำที่อุณหภูมิ 80°C แช่ในสารละลายน้ำ NaOH 1M พบว่าแท่งปูนที่แช่ไว้มีปริมาณอัลคาไลที่เพิ่มขึ้นมีการขยายตัวอย่างมีนัยสำคัญ จะแตกต่างกับตัวอย่างที่แช่ไว้ในน้ำซึ่งเกิดการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาเพียงเล็กน้อย ซึ่งการพิจารณาแบบจำลองในระดับเมโสโคปิก ยังช่วยให้สามารถจำลองส่วนผสมปูนต่างๆ ที่เตรียมด้วยมวลรวมเดียวกันแต่มีขนาดเกรดต่างกัน นอกจากนี้ยังช่วยให้คาดการณ์การเกิดปฏิกิริยาโดยสมมติฐานแหล่งที่มาของอัลคาไลต่างๆ ได้

2.1.3 อุณหภูมิ

เป็นปัจจัยสำคัญในการเสื่อมสภาพของคอนกรีตที่ได้รับผลกระทบจาก ASR เนื่องจากเจลอัลคาไล-ซิลิกา จะพองตัวโดยการดูดซึมน้ำ ซึ่งปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่เป็นอันตราย เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลต่อความชื้นที่ช่วยให้ไอออนของอัลคาไลเคลื่อนตัวไปทำปฏิกิริยากับซิลิกาจากมวลรวม จากนั้นเจลของผลิตภัณฑ์ที่ทำปฏิกิริยาจะดูดซับความชื้นซึ่งนำไปสู่การขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา อาจเกิดขึ้นได้ในคอนกรีตที่มีความชื้นสัมพัทธ์เกิน 80 เปอร์เซ็นต์ การใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำหรือวัสดุซีเมนต์เสริมสามารถนำไปสู่การลดการซึมผ่านโดยการลดการเคลื่อนที่ของความชื้นเข้าไปในคอนกรีตและอัลคาไลภายในคอนกรีต ในทำนองเดียวกัน Alaud และ Zijl (2016) ได้ศึกษา

คุณสมบัติของคอนกรีตจากผลกระทบการเสื่อมสภาพโดย การขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา ภายใต้เงื่อนไขความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน โดยการนำชุดตัวอย่างทดสอบ 2 ชุด ชุดแรกใช้การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1260 ใช้ส่วนผสม 4 รายการ Gw, Gn, Gw-co และ Gn-co หล่อตัวอย่างทรงกระบอกจำนวน 9 ชิ้น การผสมแต่ละครั้งจึงมีทั้งหมด 36 ตัวอย่าง จุ่มลงใน NaOH 1M ในสารละลายที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 14, 28 และ 56 วัน ในขณะที่ชุดตัวอย่างที่สองใช้การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1292 มีการผสม 4 แบบโดยแบ่งออกเป็น 2 แบบภายใต้เงื่อนไขแรก การแช่อยู่ในน้ำ Gw/w, Gn/w, Gw-co/w และ Gn-co/w และเงื่อนไขที่สองสัมผัสกับ RH > 90% ที่ 38°C ได้แก่ Gw/H, Gn/H, Gw-co/H และ Gn-co/H โซเดียมออกไซด์ที่เท่ากัน $\text{Na}_2\text{O}_{eq} (\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{ K}_2\text{O})$ ปูนซีเมนต์ที่ใช้คือ 0.60% โซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกละลายในน้ำผสมเพื่อเพิ่มปริมาณ Na_2O_{eq} 1.25% ของมวลซีเมนต์ ทั้งหมด 96 ตัวอย่างหล่อส่วนผสมละ 24 รายการ พบว่ามวลรวมที่แตกต่างกันและองค์ประกอบของสารยึดเกาะในสภาวะต่าง ๆ นั้นพบการเสื่อมสภาพของกำลังอัดคอนกรีตเนื่องจาก ASR ใน NaOH 1M ที่อุณหภูมิสูง (80°C) ของชุดการทดลองแรกพบการเสื่อมสลายของความแข็งแรงของคอนกรีตลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

2.1.4 การถ่ายเทความร้อน

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนแบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ การนำความร้อน (Conduction heat transfer) การพาความร้อน (Convection heat transfer) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer) โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1) การนำความร้อน

หมายถึงการส่งถ่ายพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวกลาง อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลาง จากด้านที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การนำความร้อนสามารถเกิดขึ้นในตัวกลางที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางแบบการนำความร้อนโดยกฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) กล่าวว่า การนำความร้อนผ่านตัวกลางในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง อัตราการถ่ายเทความร้อน ผ่านตัวกลางในทิศทางนั้น เป็นปริมาณโดยตรงกับพื้นที่ถ่ายเทความร้อนที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหลของความร้อน และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวกลางในทิศทางดังกล่าว

(2) การพาความร้อน

หมายถึงการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของแข็งกับของไหล ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัม ซึ่งมีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวของแข็งนั้น พลังงานความร้อนถูกถ่ายโอนเป็นผลมาจากการแพร่ของโมเลกุล และผลจากการเคลื่อนไหวย้อนไปทั้งปริมาตรของของไหล ซึ่งสามารถแบ่งการถ่ายเทความร้อนโดยการพาเป็น 2 ชนิด คือ การพาความร้อนตามธรรมชาติ (Free Convection) คือ การไหลของของไหลซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหลเอง โดยเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป และการพาความร้อนโดยบังคับ (Force Convection) คือ การไหลของของไหลที่เกิดจากแรงภายนอกกระทำ

(3) การแผ่รังสีความร้อน

การถ่ายเทความร้อนชนิดนี้จะเป็นลักษณะการเคลื่อนที่ทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยส่งออกมาจากวัตถุในรูปของคลื่นของโมเลกุล อนุภาคพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเปลี่ยนรูปเป็นการแผ่รังสี ตัวกลางที่มีการแผ่รังสีความร้อนผ่านไปสามารถเป็นไปสามารถเป็นไปได้อย่างสูญญากาศ

ก๊าซ ของไหล และของแข็ง ซึ่งวัตถุทุกชนิดมีพลังงานการแผ่รังสีไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและลักษณะผิวหน้าของวัตถุ

หากพิจารณาโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เช่น โครงสร้างสะพาน โครงสร้างเขื่อน นอกเหนือจากภัยพิบัติธรรมชาติ เช่น น้ำท่วม แผ่นดินไหว การขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาจึงเป็นอีกข้อควรคำนึงที่ควรจะศึกษา โครงสร้างเขื่อนจึงเป็นตัวอย่างสำคัญ เนื่องจากหากเขื่อนได้รับผลกระทบจากการขยายตัวแล้ว จะส่งเสียหายต่อทรัพยากร ประชากร เศรษฐกิจ และอื่นๆอีกมากมาย

2.2 เขื่อน

เขื่อนเป็นโครงสร้างทางวิศวกรรมเป็นสิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่สำหรับกั้นทางน้ำ เพื่อใช้ในการเก็บกักน้ำและป้องกันอุทกภัยรวมถึงผลิตกระแสไฟฟ้า ส่วนบนของเขื่อนจะประกอบไปด้วยส่วนที่เรียกว่าทางน้ำล้น สำหรับให้น้ำที่สูงกว่าระดับที่ต้องการไหลผ่านมาที่ฝั้งปลายน้ำ มากกว่าครึ่งหนึ่งของแม่น้ำสายหลักทั่วโลกจะมีเขื่อนกันไว้เพื่อให้ประโยชน์ในทางใดทางหนึ่ง

2.2.1 ประเภทของเขื่อนซึ่งจำแนกตามการออกแบบโดยใช้วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างแบ่งออกเป็นดังนี้

(1) เขื่อนฐานแผ่ (Gravity Dam)

เขื่อนคอนกรีตแบบถ่วงน้ำหนักบางครั้งจะเรียกว่าแบบฐานแผ่ เขื่อนประเภทนี้จะอาศัยน้ำหนักของตัวเขื่อนถ่วงน้ำหนักลงชั้นฐานราก ฐานรากของเขื่อนประเภทนี้จะต้องเป็นชั้นหินที่สามารถรับน้ำหนักได้ดี เนื่องจากตัวเขื่อนจะมีขนาดใหญ่มาก จะมีลักษณะรูปหน้าตัดเป็นสามเหลี่ยม มีความลาดชันด้านหน้าเขื่อน 0.25 - 0.30 การลาดชันด้านหลังเขื่อน 0.75 - 0.85 เขื่อนลักษณะนี้อาศัยน้ำหนักคอนกรีตของตัวเขื่อนรองรับแรงต่าง ๆ ที่กระทำบนเขื่อน ตัวเขื่อนจะต้องหนาใหญ่ ต้องใช้คอนกรีตมาก ข้อเสียคือ จำเป็นต้องใช้หินที่คุณภาพดีในการทำรากฐานเขื่อน โดยใช้ปริมาณจำนวนมาก ค่าขนส่งสูง ส่งผลให้มีค่าก่อสร้างสูง สำหรับข้อดีการออกแบบง่าย การติดตั้งเครื่องมือเครื่องจักรสะดวก ทำให้มีความปลอดภัยสูง ตัวอย่างของเขื่อนประเภทนี้ในประเทศไทย คือ เขื่อนแม่มัว เขื่อนกัวลม เขื่อนขุนด่านปราการชล เป็นต้น



รูปที่ 2.3 ลักษณะเขื่อนฐานแผ่ (Gravity Dam)

(ที่มา : <https://www.komchadluek.net/kom-lifestyle/283438>)

(2) เชื้อนโค้ง (Arch Dam)

มีลักษณะเป็นรูปโค้ง อาจเป็นแบบโค้งทางเดียวหรือโค้งสองทาง ตัวเชื้อนจะมีลักษณะบาง เนื่องจากพฤติกรรมการรับแรงของโค้งจะสามารถรับแรงได้ดี น้ำหนักจากตัวเชื้อนและแรงกระทำจากน้ำจะถูกถ่ายไปยังจุดรองรับทั้ง 2 ข้างของเชื้อนแล้วถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นหินฐานราก ส่วนมากจะก่อสร้างตรงจุดที่มีพื้นที่หน้าตัดแคบและมีหินรากฐานที่แข็งแรง ข้อเสียของเชื้อนชนิดนี้คือการออกแบบและการดำเนินงานก่อสร้างยุ่งยาก การก่อสร้างทางน้ำล้นในตัวเชื้อนทำได้ยากกว่าแบบอื่น ในประเทศไทย ส่วนข้อดีของเชื้อนชนิดนี้คือ ตัวเชื้อนใช้คอนกรีตน้อยและบางกว่า จึงทำให้ราคาค่าก่อสร้างถูกกว่าเชื้อนฐานแผ่ ตัวอย่างของเชื้อนประเภทนี้ในประเทศไทย คือ เชื้อนภูมิพล



รูปที่ 2.4 ลักษณะเชื้อนโค้ง (Arch Dam)

(ที่มา : <https://www.parepadmaeping.com/news/N0000001.html>)

(3) เชื้อนหินถม (Rock Fill Dam)

เป็นเชื้อนชนิดวัสดุถม (Embankment Dam) ประเภทหนึ่ง หรือเรียกว่า เชื้อนหินถม หรือเชื้อนหินทิ้ง มีแกนเป็นวัสดุที่บดน้ำ คือดินเหนียวจะประกอบด้วยหินเป็นส่วนใหญ่ โดยจะมีผนังกันน้ำซึมทั้งด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำ ซึ่งจะเป็นผนังคอนกรีตหรือดินก็ได้ แต่เนื่องจากหินที่นำไปถมเชื้อน จะจมอัดลงไปกับผนังกันน้ำซึมนี้ จึงนิยมใช้เป็นแบบดินเหนียวมากกว่า สำหรับการออกแบบเชื้อนหินนี้ จะต้องคำนึงความมั่นคงของความลาดของเชื้อน ความปลอดภัยในด้านการเลื่อน การอัดและการถมของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง ข้อดีของเชื้อนเหมาะสำหรับพื้นที่ซึ่งมีสภาพฐานรากไม่ดี ตัวอย่างของเชื้อนประเภทนี้ในประเทศไทย คือ เชื้อนวชิราลงกรณ์ เชื้อนศรีนครินทร์ เป็นต้น



รูปที่ 2.5 ลักษณะเขื่อนหินถม (Rock Fill Dam)

(ที่มา : https://www.matichon.co.th/news-monitor/news_1681233

)

(4) เขื่อนดินถม (Earth Dam)

เป็นเขื่อนเขื่อนที่ก่อสร้างด้วยการถมดินบดอัดแน่น มีวัสดุหลักเป็นดินประเภทที่บ น้ำ มีแกนกลางของเขื่อนเป็นดินเหนียวมีคุณสมบัติและลักษณะการออกแบบคล้ายกับเขื่อนหินถม เขื่อนดินมี 2 ประเภท คือ เขื่อนดินประเภทเนื้อเดียว (Homogeneous Earth Dam) และเขื่อนดินประเภทแบ่งโซน (Zoned-Earth Dam) เขื่อนดินประเภทเนื้อเดียวในประเทศไทย นิยมที่จะก่อสร้างเขื่อนประเภทนี้มากที่สุด อันเนื่องมาจากค่าก่อสร้างที่ค่อนข้างถูก และวัสดุที่ใช้ก่อสร้างสามารถหาซื้อได้ง่าย ตัวอย่างของเขื่อนประเภทนี้ในประเทศไทย คือ เขื่อนกระเสียว เขื่อนลำปาว เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ เป็นต้น



รูปที่ 2.6 ลักษณะเขื่อนดินถม (Earth Dam)

(ที่มา : <https://www.nationtv.tv/news/378847323>)

Thongthamchart และคณะ (2016) ได้ศึกษาสมรรถนะเขื่อนโค้งคอนกรีตภูมิพล หลังอายุผ่านไป 50 ปี เพื่อทำนายพฤติกรรมของเขื่อนภูมิพลภายใต้บริบทด้านความปลอดภัยของเขื่อน โดยพิจารณาเงื่อนไขการรับน้ำหนัก 3 ประการ ได้แก่ ไฟฟ้าสถิต แผ่นดินไหว และน้ำท่วม จากข้อมูล กพผ.

กำหนดเกณฑ์ที่สะท้อนถึงความปลอดภัยของเขื่อน โดยลักษณะเขื่อนความสูงของเขื่อนส่วนที่ลึกที่สุด 154 เมตร สันเขื่อนยาว 486 เมตร กว้าง 6 เมตร ฐานเขื่อนกว้าง 52 เมตร ทำการเจาะตัวอย่างแท่งคอนกรีตนำมาใช้ในการทดสอบตรวจสอบคุณสมบัติของชิ้นงานคอนกรีต เช่น กำลังรับแรงอัด Young's Modulus และ Poisson's ratio พบว่าค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดมีค่ามากกว่าข้อกำหนด ในทำนองเดียวกัน ค่าเฉลี่ยของ Young's Modulus และ Poisson's ratio ก็ดีกว่าค่าที่คาดหวังในการออกแบบเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตของเขื่อนยังอยู่ในสถานการณ์ที่ดี นอกจากนี้ยังมีการประเมินการเสื่อมสภาพของคอนกรีตในการทดสอบ เช่น ความลึกของคาร์บอนेट ปริมาณคลอไรด์ ปฏิกริยาอัลคาไล-ซิลิกา พบว่าโครงสร้างปริมาณคลอไรด์น้อยกว่า 0.05% ซึ่งไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ ไม่พบความชัดเจนของการขยายตัวอัลคาไล-ซิลิกา และการเกิดเอททริงไครต์ บ่งชี้ว่าคอนกรีตของเขื่อนภูมิพลและฐานรากอยู่ในสภาพที่ดีแม้จะมีอายุเกิน 50 ปี

2.2.2 การออกแบบตัวเขื่อนเบื้องต้นของเขื่อนคอนกรีตแบบโค้ง

จำเป็นต้องมีการผสมผสานความรู้หลายสาขามาผนวกรวมกัน โดยเฉพาะด้านกลศาสตร์ของดิน ธรณีวิทยา และชลศาสตร์ สำหรับการรวบรวมข้อมูลเพื่อการออกแบบ จะประกอบด้วย 4 ส่วนสำคัญ คือ ข้อมูลทางคานธรณีฐานรากเขื่อน ข้อมูลทางด้านวัสดุก่อสร้างตัวเขื่อน ข้อมูลจากแรงและน้ำหนักที่เกี่ยวข้อง และข้อมูลระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ แบ่งย่อยออกเป็นดังนี้

(1) ด้านการเลือกใช้วัสดุก่อสร้าง

เขื่อนเป็นสิ่งก่อสร้างที่จะต้องใช้วัสดุเป็นปริมาณมากดังนั้นการเลือกใช้วัสดุธรรมชาติที่มีอยู่ในพื้นที่และมีปริมาณมากพอจึงเป็นแนวทางเลือกที่ดี จะต้องออกแบบโดยการสำรวจบ่อขุดดินและบริเวณที่จะทำเหมืองหินอย่างละเอียด แล้วประมวลปริมาณและคุณสมบัติวัสดุเป็นหน้าตัดเขื่อนและคุณสมบัติทางวิศวกรรมเพื่อการออกแบบ มีการวิเคราะห์ออกแบบได้เรียบร้อยแล้วจึงเขียนข้อกำหนดทางวิศวกรรมให้สอดคล้องวัสดุที่มี จะไม่มีการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุก่อสร้างไว้ก่อนล่วงหน้าดังเช่นการออกแบบอาคารคอนกรีต หรือสะพาน ซึ่งผู้รับจ้างจะต้องไปหาวัสดุมาให้ตรงตามแบบที่กำหนด

(2) ด้านการเลือกตำแหน่งเขื่อน

ภูมิประเทศที่เหมาะสมเป็นช่องเขาแคบเพื่อให้เขื่อนสั้นและมีพื้นที่อ่างด้านเหนือน้ำเปิดกว้างเพื่อให้จุน้ำได้มาก มีลักษณะทางธรณีวิทยาที่ดี ไม่อยู่บนรอยเลื่อนของชั้นหินที่เป็นอันตราย หินฐานรากสามารถปรับปรุงให้ทึบน้ำและกันการรั่วซึมผ่านได้ ไม่อยู่ในสถานที่หวงห้าม เช่น เขตอุทยาน หรือพื้นที่ต้นน้ำชนิด 1A เขตหวงห้ามทางศาสนา เป็นต้น มีผลกระทบต่อชุมชนน้อย เช่น ต้องอพยพหรือเวนคืนที่ราษฎรน้อย สามารถวางตำแหน่งอาคารประกอบเขื่อนได้สอดคล้องกับตัวเขื่อนและลำน้ำสามารถมีความสูงของน้ำที่กักเก็บเพียงพอที่จะส่งน้ำ หรือผลิตกระแสไฟฟ้าได้

(3) ด้านการออกแบบการปิดกั้นน้ำ

การปิดกั้นน้ำที่ไหลซึมผ่านเขื่อนหรือฐานรากไม่สามารถทำให้ทึบน้ำได้โดยสมบูรณ์ แต่จะยอมให้มีการให้มีการไหลในอัตราที่ยอมรับได้และควบคุมได้และจะต้องไม่เกิดอันตรายจากการกัดเซาะและพัดพาวัสดุตัวเขื่อน ฐานรากเขื่อน หรือ ฐานยันทำให้เกิดการรั่วซึมที่เพิ่มขึ้นต่อเนื่อง

(4) ด้านการออกแบบความมั่นคงของลาดเขื่อนและลาดดิน

ลาดเขื่อนทั้งสองด้าน ลาดดินที่ฐานยัน ลาดดินที่ตัดเหนือทางน้ำล้น ลาดดินธรรมชาติบริเวณขอบอ่างเก็บน้ำ จะต้องมีการตรวจสอบโดยการวิเคราะห์ความมั่นคง และออกแบบให้มี

อัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสมที่จะไม่เกิดการเคลื่อนพิบัติทั้งในระหว่างการก่อสร้างและการใช้งานของเขื่อน

(5) ด้านการตรวจสอบการทรุดตัว

เขื่อนจะยอมให้มีการทรุดตัวได้ระดับหนึ่งที่จะไม่ให้เกิดอันตรายจากน้ำล้นสันเขื่อน และการแตกร้าวในตัวเขื่อน การทรุดตัวอาจเกี่ยวข้องไปถึงอาคารประกอบเขื่อนเช่น ทางน้ำล้น ท่อส่งน้ำฯ ที่จะต้องไม่ให้เกิดการทรุดตัวที่ต่างกันจนเกิดรอยแตกแยกที่เป็นอันตรายได้

(6) ด้านการออกแบบอาคารประกอบเขื่อน

อาคารประกอบเขื่อนนอกจากจะต้องออกแบบให้มีประโยชน์ใช้สอยได้ตามวัตถุประสงค์ เช่นสามารถ ระบายน้ำได้ตามกำหนด ควบคุมระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ ผลิตกระแสไฟฟ้าแล้วยังต้องออกแบบให้สอดคล้องกับตัวเขื่อนโดยการวางตำแหน่งและกำหนดระดับให้เข้ากับการออกแบบเขื่อน ขณะเดียวกันก็ต้องควบคุมใช้งานได้สะดวก และไม่เกิดอันตรายจากกระแสน้ำที่ระบายเกิดการปั่นป่วนวกเข้ามากัดเซาะตัวเขื่อนจนเป็นอันตรายได้

(7) ด้านการป้องกันการกัดเซาะจากน้ำในอ่างเก็บน้ำ

อ่างเก็บน้ำของเขื่อนมีพื้นที่ผิวน้ำมากทำให้เกิดคลื่น หากพัดเข้าสู่ลาดเขื่อนหรือลาดดินที่ต่อเชื่อมกับเขื่อนจะเกิดการกัดเซาะได้ จึงต้องมีการออกแบบชั้นหินกันคลื่นที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการกัดเซาะ

(8) ด้านการป้องกันสภาวะแวดล้อมในระหว่างการก่อสร้างและการใช้งาน

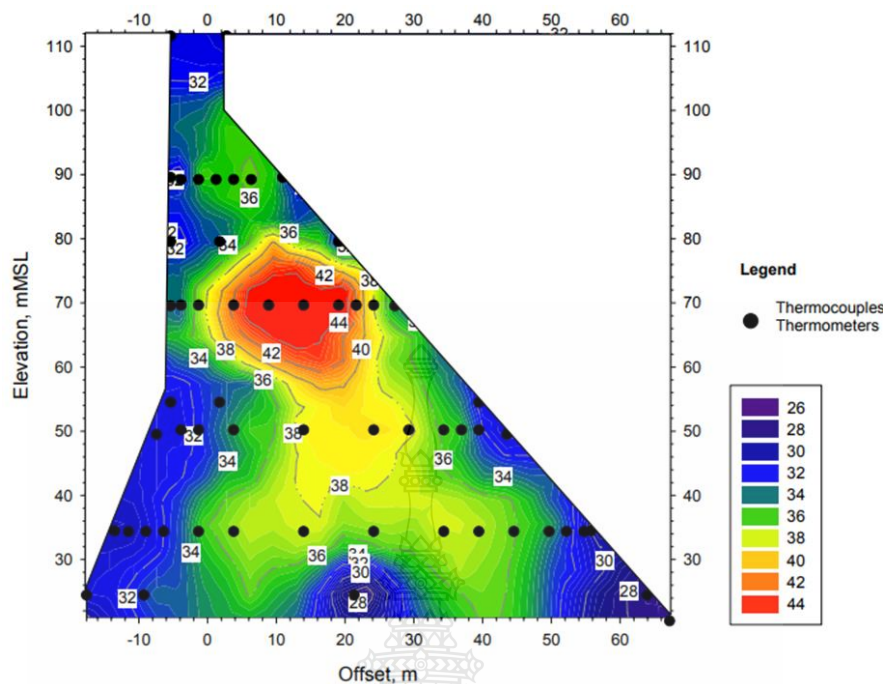
การก่อสร้างหรือใช้งานเขื่อนมักจะมีผลกระทบเกิดขึ้นเสมอ เช่น ฝุ่นจากการระเบิดหรือม่หิน น้ำเสียจากโรงผสมคอนกรีต การขนส่งวัสดุโรงซ่อมเครื่องจักรก่อสร้างหรือบ้านพักคนงาน เป็นต้น ผู้ที่เกี่ยวข้องต้องพยายามลดผลกระทบดังกล่าวให้น้อยที่สุดและอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้

(9) ด้านการตรวจสอบพฤติกรรมเขื่อน

เขื่อนขนาดกลางหรือขนาดใหญ่จะต้องคำนึงถึงการตรวจวัดพฤติกรรมเพื่อให้ทราบพฤติกรรมที่แท้จริงของเขื่อนและเป็นมาตรการความปลอดภัยของเขื่อนทั้งในระหว่างการก่อสร้างและการใช้งานของเขื่อน

(10) อุณหภูมิภายในเขื่อน

ความร้อนหรืออุณหภูมิเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดหน่วยแรงค้ำในตัวเขื่อนดังนั้นการวัดความร้อนหรืออุณหภูมิจึงต้องการสำหรับเขื่อนคอนกรีตอย่างยิ่งในระหว่างการก่อสร้างเครื่องมือที่นิยมใช้วัดอุณหภูมิได้แก่ เซ็นเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิ เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) และเทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) เครื่องมือเหล่านี้อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิ (Thermoelectric effect) นอกจากนี้ในประเทศยุโรปใช้ สายไฟเบอร์ออปติก สำหรับเขื่อนดินถมใช้เครื่องมือเหล่านี้อวัดอุณหภูมิเพื่อบ่งบอกถึงจุดที่มีการรั่วซึมผ่านตัวเขื่อนได้ โดยอุณหภูมิในตัวเขื่อนคอนกรีตในระหว่างการก่อสร้างถึงการเก็บกักน้ำใช้งาน ใช้ประเมินหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการกระจายของอุณหภูมิในตัวเขื่อนวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมที่แสดงเป็นรูปร่างของหน้าตัดเขื่อน ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เส้นชั้นการกระจายระดับอุณหภูมิตั้งที่หน้าตัดเขื่อน (ส่วนความปลอดภัยเขื่อน สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา, 2566)

Sari และคณะ (2018) ได้ศึกษาผลเกี่ยวกับอิทธิพลของแรงดันน้ำในเขื่อนต่อการไหลของน้ำและเสถียรภาพของเขื่อนดินถม โดยใช้ข้อมูลที่ได้ในสนามจากเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน โดยจะเก็บค่าแรงดันน้ำในเขื่อน และค่าการไหลของน้ำผ่านตัวเขื่อนที่วัดได้ จำลองโมเดลด้วยโปรแกรม Plaxis วิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าเมื่อระดับน้ำในเขื่อนสูงขึ้นทำให้ค่าแรงดันน้ำในเขื่อนสูงขึ้นและค่าอัตราการไหลของน้ำสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อมีการไหลของน้ำที่สูงขึ้นทำให้ดินในเขื่อนบริเวณนั้นเกิดการอิ่มตัว นอกจากจะส่งผลให้เกิดทรุดตัวแล้วยังคงส่งผลต่อเนื่องต่อเสถียรภาพเขื่อนด้วย เช่นเดียวกับ Joshi และคณะ (2021) ได้ศึกษาการเสถียรภาพตามเวลาของเขื่อนโค้งคอนกรีตในประเทศไทย-การศึกษาเชิงตัวเลขเกี่ยวกับผลของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา ต่อการโก่งตัวของเขื่อนรูปโค้ง โดยการนำตัวอย่างแท่งคอนกรีตจากเขื่อนทำนายการขยายตัวในอนาคต โดยใช้การทดสอบการแรงอุณหภูมิในห้องปฏิบัติการ ประเมินประสิทธิภาพของเขื่อนโดยการจำลองโมเดลวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และปริมาณแร่ธาตุและความสัมพันธ์ของเนื้อสัมผัสภายในหินโดยละเอียด (Petrographic) พิจารณาความเค้นอันเนื่องมาจากการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา และสถานะสมดุลอุทกสถิต ทำนายความเครียดและการโก่งตัวโดยใช้วิธีความน่าจะเป็น พบว่าตัวอย่างที่นำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการจากผลกระทบจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา ปรากฏขึ้นประมาณ 50% ของความเครียดที่ขยายตัวในสนาม แต่หากพิจารณาอุณหภูมิทั่วไปแล้ว การขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวของเขื่อนเล็กน้อย โดยยังไม่พบความเสี่ยงสูงที่กระทำต่อเขื่อนภายในสถานะการรับน้ำหนักปกติ

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยากในการสร้างโมเดลขนาดจริงหรือเทียบเท่าเพื่อทดสอบงานวิจัยที่ศึกษา เครื่องมือที่ช่วยในการวิเคราะห์โดยการจำลองโมเดล และเป็นที่ยอมรับทั่วโลก คือ การใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.3 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

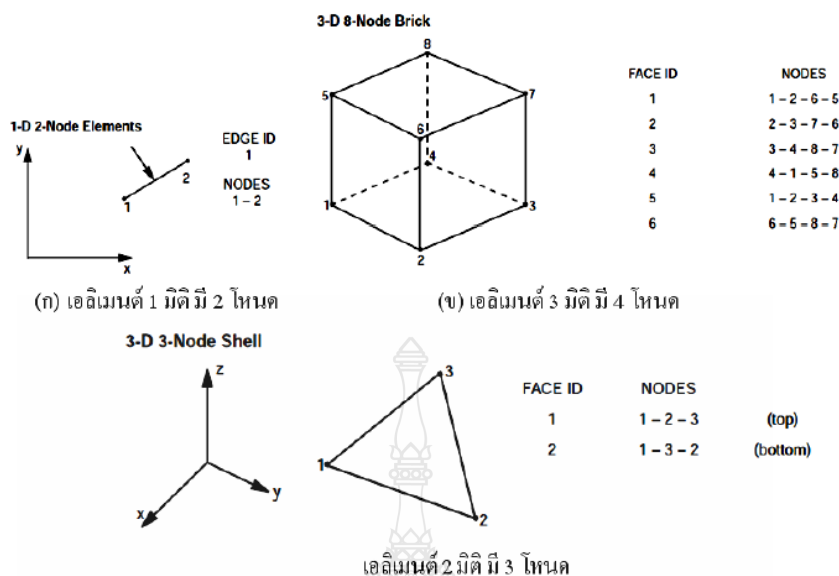
ระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis : FEA) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขซึ่งประกอบด้วยสมการควบคุมระบบ และใช้เงื่อนไขขอบเขตเพื่อแก้สมการ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์โดยประมาณของปัญหาที่หลากหลายในทางวิศวกรรม ในระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์จะแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นส่วนย่อยๆ เรียกว่า เอลิเมนต์ (Element) ซึ่งแต่ละเอลิเมนต์จะเชื่อมกันด้วยจุด โหนด (Node) จากนั้นจึงทำการแก้ปัญหาดังกล่าวซึ่งจะได้ผลเฉลยของปัญหาที่จุดต่อบนโดเมน แม้การพัฒนาระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์แรกเริ่มเดิมทีจะเน้นไปที่ การศึกษาความเค้นในโครงสร้างที่ซับซ้อน ตั้งแต่นั้นระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในสายงานที่เกี่ยวข้องทางกลศาสตร์ เพราะระเบียบการนี้มีความหลากหลาย อีกทั้งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีความยืดหยุ่นได้ ซึ่งทำให้ได้รับความสนใจในสถานศึกษา ทางด้านวิศวกรรม และในอุตสาหกรรม ที่กล่าวข้างต้นระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานวิเคราะห์ได้ดังนี้ความแข็งแรงของโครงสร้าง (Structural Analysis) ระบบของความ ร้อน (Thermal System Analysis) การไหล และการไหลที่มีการนำพาความร้อน (Flow Analysis and Flow Convection Heat Transfer) กระบวนการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน (Thermo Mechanical Process Analysis) โดยวิธีการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนย่อย ๆ ได้ดังต่อไปนี้

2.3.1 การแบ่งชิ้นส่วน (Element Discretization)

การแบ่งขอบเขตหรือรูปร่างของปัญหาที่ต้องการหาคำตอบออกเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ เรียกว่า Element โดยแต่ละ Element ถูกกำหนดขอบเขตด้วยจุดต่อที่เรียกว่า Node ในบางกรณี Node ก็สามารถเข้าไปอยู่ใน Element นั้นได้ เพื่อเพิ่มความละเอียดในการคำนวณคำตอบ สำหรับการแก้ปัญหาในสองมิติ รูปแบบของชิ้นส่วนที่ใช้นั้นมักจะเป็น ชิ้นส่วนแบบสามเหลี่ยม (Triangle Element) และชิ้นส่วนแบบสี่เหลี่ยมที่เป็นหรือไม่เป็นมุมฉาก (Quadrilateral Element) ซึ่งจุดต่อ (Node) นั้นจะควบคุมลักษณะรูปร่างของชิ้นส่วน ในกรณีของจุดต่ออยู่เฉพาะมุมของรูปเหลี่ยม (Conner nodes) ด้านของรูปจะเป็นเส้นตรง แต่ในกรณีที่เพิ่มจุดต่อบริเวณกึ่งกลางด้าน (Mid-side node) นั้น รูปเหลี่ยมจะสามารถแสดงลักษณะเส้นโค้งได้ และแต่ละชิ้นส่วนจะต่อเนื่องกันด้วยด้านและจุดที่ต่อที่ร่วมกัน

(1) โหนด (Node)

เป็นตัวช่วยเชื่อมต่อโครงสร้างชิ้นเล็กๆ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) แต่ละเอลิเมนต์ให้ติดกันด้วยจุดของโหนดดังรูปที่ 2.8 นอกจากนี้โหนดยังช่วยในการกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ที่มีองศาอิสระ โดยปกติแล้วโหนดจะอยู่ที่มุมของเอลิเมนต์ หรือ จุดของเอลิเมนต์ แล้วกลุ่มของเอลิเมนต์และโหนดจะอยู่ติดกันเป็นกลุ่มที่เรียกว่า แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) จะเป็นตัวแทนของชิ้นงานเพื่อนำไปจำลองเป็นสมการเมทริกซ์เพื่อนำไปคำนวณที่ซับซ้อนต่อไป



รูปที่ 2.8 โหนดในเอลิเมนต์แต่ละมิติ (ปราโมทย์, 2555)

(2) เอลิเมนต์ (Element)

เอลิเมนต์จะมีมิติอยู่ 1 ถึง 3 มิติ นอกจากนี้ยังมีเอลิเมนต์ชนิดพิเศษที่มีลักษณะดังเช่น กลุ่มของจุด (Lumped Springs) เอลิเมนต์ที่ลักษณะ 1 มิติ จะเป็น เส้นตรง เส้นโค้ง (Beam Element) มักใช้ในการวิเคราะห์งานลักษณะที่เป็นโครง เอลิเมนต์ 2 มิติ (Shell Element) จะเป็นรูปร่างรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมที่มีความเหมาะสมกับการวิเคราะห์งานที่เป็นพื้นผิว (Surface) ผนังบาง สดุดท้ายแบบ 3 มิติ (Solid Element) โดยปกติส่วนมากรูปทรงเป็นแบบ Tetrahedral, Pentahedral, Hexahedral (Bricks) หรือ เป็นแบบปริซึม (Prisms)

2.3.2 การใช้ฟังก์ชันของตัวแปรหลัก (Primary Variable Function Selection)

เป็นการเลือกค่าตัวแปรฟังก์ชันเป็นตัวแปรหลัก ที่น่าสนใจคือ ฟังก์ชันการเคลื่อนที่ (Displacement, u) ส่วนฟังก์ชันความเค้น กับความเครียดนั้นเป็นตัวแปรรองซึ่งสามารถคำนวณได้หลังจากทราบค่าการเคลื่อนที่ และฟังก์ชันเหล่านี้จะต้องสามารถเชื่อมโยงกันระหว่างจุดต่อจุดได้

2.3.3 การสร้างสมการชิ้นส่วน (Element Equation)

(1) การสร้างสมการของแต่ละชิ้นส่วน (Element Equation)

คือขั้นตอนการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ของแต่ละชิ้นส่วนนั้นดังสมการ 2.4

$$f^e = K^e \cdot u^e \quad (2.4)$$

หลังจากได้สมการชิ้นส่วนแล้ว (Element Equation) ขั้นตอนต่อไปคือการนำสมการของแต่ละชิ้นส่วนมาประกอบเป็นสมการหลัก (Global Equation) ดังสมการ 2.5

$$K u = F \quad (2.5)$$

เมื่อ K คือ Global Stiffness Matrix
 u คือ Nodal Displacement Matrix (Unknown)
 F คือ Nodal Forces Matrix

(2) เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions)

ขั้นตอนสุดท้ายสำหรับการกำหนดระบบปัญหา คือการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตเข้ากับปัญหาจริง โดยเงื่อนไขขอบเขตนี้อาจจะเป็นไปได้ทั้ง เงื่อนไขการเคลื่อนที่ (Displacement Constraints) หรือเงื่อนไขทางด้านแรงกระทำภายนอก (Loading Conditions) ซึ่งจะต้องถูกกำหนดในสอดคล้องกันกับปัญหาจริงก่อนที่จะแก้ระบบสมการทั้งหมด สำหรับเงื่อนไขทางด้านแรงกระทำภายนอก (Loading Conditions) เช่น แรงกระทำแบบเส้น (Line Load) แรงกดทับที่ผิว (Surcharge Load) เป็นต้น

(3) การแก้สมการหลัก (Solve the Global Equation)

จากสมการ 2.5 ซึ่งเป็นสมการหลักนั้นได้ถูกกำหนดขึ้นพร้อมกับเงื่อนไขของขอบเขตแล้ว การแก้สมการหลักซึ่งประกอบไปด้วยระบบสมการขนาดใหญ่ นั้นมีความจำเป็นจะต้องพึ่งพาเทคนิคและกระบวนการทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้คำตอบที่แม่นยำและรวดเร็ว เทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่มักจะถูกอ้างอิงในการแก้ระบบสมการขนาดใหญ่สำหรับวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เช่น วิธีการดำเนินการเชิงเส้นของเกาส์ (Gaussian Elimination) และวิธีการสามเหลี่ยม (Triangle Method)

(4) ดีกรีความอิสระการเคลื่อนที่ (Degrees of Freedom : DOF)

เป็นตัวกำหนดสถานะของเอลิเมนต์ ทำหน้าที่เชื่อมต่อของเอลิเมนต์ โดยดีกรีความอิสระการเคลื่อนที่จะมีหลายค่า สำหรับความอิสระของการเคลื่อนที่จะขึ้นอยู่กับลักษณะชนิดของการวิเคราะห์ ซึ่งความอิสระของการเคลื่อนที่แต่ละชนิดสรุปดังตารางที่ 2.3

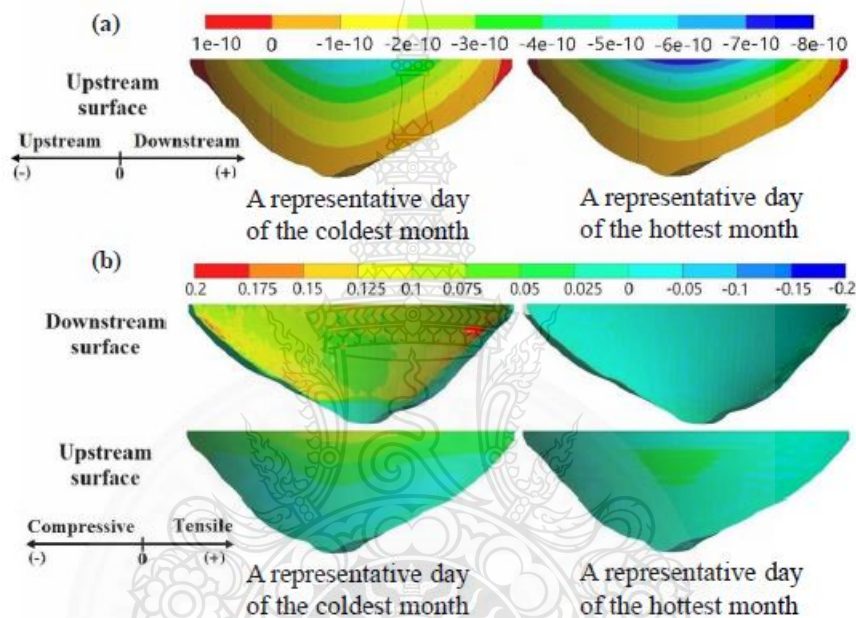
ตารางที่ 2.3 DOF ของลักษณะการวิเคราะห์แต่ละชนิด

ขอบข่าย (Discipline)	ดีกรีความอิสระการเคลื่อนที่ (DOF)
โครงสร้าง (Structural)	การเคลื่อนที่ (Displacement)
ความร้อน (Thermal)	อุณหภูมิ (Temperature)
ไฟฟ้า (Electrical)	โวลต์ (Voltage)
ของไหล (Fluid)	ความดัน (Pressure)
แม่เหล็ก (Magnetic)	สภาพแม่เหล็ก (Magnetic Potential)

ที่มา : เพิ่มศักดิ์ เกตุนวม (2550)

งานวิจัยของ Kiet (2018) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการโก่งตัวของเขื่อนภูมิพล เขื่อนตั้งอยู่ในพื้นที่จังหวัดตาก ประเทศไทย โดยการสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม SOLID90 ขนาดตาข่ายที่กำหนด 3.5 ม. สำหรับการวิเคราะห์เค้นเชิงความร้อนของเขื่อนและผลกระทบของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมโครงสร้าง การกระจายตัวของอุณหภูมิในตัวเขื่อนซึ่งได้รับความ

ร้อนจากดวงอาทิตย์ ถูกใช้เป็นภาระความร้อนบนเขื่อน โดยพิจารณาอุณหภูมิ 2 กรณี คือ หนึ่งวันในเดือนที่ร้อนที่สุด (เมษายน 2555) และหนึ่งวันในเดือนที่หนาวที่สุด (ธันวาคม 2554) ซึ่งการเสียรูปของเขื่อนในทิศทางต้นน้ำและการกระจายความเค้นในตัวเขื่อนที่เกิดจากตัวแปรอุณหภูมิเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 2.9 พบว่าโหลดอุณหภูมิอย่างเดียวยังส่งผลกระทบต่อการเสียรูปของเขื่อนไม่มากนัก โดยค่าความเค้นทิศทางในแนวรัศมีอยู่ในช่วง -7.9×10^{-10} ถึง 5.0×10^{-11} ม. นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ยังบ่งชี้ว่าพบแรงดึงเล็กน้อยเกิดขึ้นบนผิวเขื่อนโดยมีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดใกล้ 0.2 Pa ตำแหน่งฐานเขื่อนบริเวณท้ายน้ำ ไม่นับสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับความต้านทานแรงดึงของคอนกรีต ซึ่งสอดคล้องกับข้อสังเกตที่ตรวจสอบเขื่อนโดยวิศวกรซ่อมบำรุงเขื่อนของกองซ่อมบำรุงโยธา (กฟผ.)



รูปที่ 2.9 การกระจายอุณหภูมิและการกระจายความเค้นของเขื่อน (ก) การกระจายอุณหภูมิ (ม.) ทิศทางในแนวรัศมี (ข) การกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Pa) (Kiet, 2018)

นอกเหนือจากตัวแปรอุณหภูมิ ผลกระทบของคุณสมบัติของวัสดุของคอนกรีตเขื่อนและฐานรากหินต่อพฤติกรรมของเขื่อน ดังเช่นการก่อสร้างเขื่อนครั้งนั้นสร้างเสร็จเมื่อ 50 กว่าปีที่แล้ว ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุยังไม่เพียงพอคุณสมบัติเหล่านี้ที่ใช้ในการประเมินความปลอดภัยของเขื่อน การจำแนกประเภทโมดูลัสการเสียรูปของฐานรากถูกกำหนดโดยอาศัยการจำแนกประเภทมวลรวม เช่น ดัชนีความแข็งแกร่งทางธรณีวิทยา (GSI) และจะพิจารณาจากโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตจากตัวอย่างการทดสอบคอนกรีตของเขื่อน และผลการทดสอบของกำลังรับแรงอัดจากชิ้นตัวอย่างคอนกรีตอายุ 1 ปี ที่รวบรวมระหว่างการก่อสร้างโดยการประยุกต์สมการของ ACI ในการประเมินโครงสร้างและพิจารณาปัจจัยที่จำเป็นทั้งหมดที่ส่งผลต่อเขื่อนพฤติกรรม เช่น อัตราส่วนของโมดูลัสการเปลี่ยนรูปของฐานรากต่อโมดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีต การแปรผันของระดับน้ำ การวิเคราะห์เชิงความร้อน น้ำหนักตัวเขื่อน ขนาดฐานรากที่เหมาะสม และหินฐานรากก็มีบทบาทสำคัญในเขื่อน ในการศึกษาการก่อตัวและความเครียดอันส่งผลต่อพฤติกรรมของเขื่อน พารามิเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดคุณสมบัติของคอนกรีต คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ความหนาแน่น (Density) อัตราส่วนปัวซอง

(Poisson's ratio) กำลังอัดของคอนกรีต (Compressive strength) และความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ซึ่งจำลองทั้งหมด 6 กรณี พารามิเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดคุณสมบัติคอนกรีตกรณี 1 ถึง 3 โมดูลัสคอนกรีต 33.3 GPa ในขณะอัตราส่วนปัวซอง 0.26 ในทำนองเดียวกันสำหรับกรณี 4 ถึง 6 โมดูลัสคอนกรีต 44.18 GPa ในขณะอัตราส่วนปัวซอง 0.23 แสดงดังรูปที่ 2.10

Parameter	Unit	Case					
		1	2	3	4	5	6
CONCRETE							
Modulus of elasticity (E_c)	GPa	33.3	33.3	33.3	44.18	44.18	44.18
Density (ρ_c)	kg/m ³	2480	2480	2480	2480	2480	2480
Poisson's ratio	---	0.26	0.26	0.26	0.23	0.23	0.23
Compressive strength f'_c	MPa	39.34	39.34	39.34	51.29	51.29	51.29
Tensile strength f_t	MPa	3.93	3.93	3.93	5.13	5.13	5.13
FOUNDATION							
Deformation modulus (E_f)	GPa	10	20	34.5	10	20	34.5
Density (ρ_f) ^(c)	kg/m ³	2860	2860	2860	2860	2860	2860
Poisson's ratio ^(c)	---	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16

Parameter	Symbol	Unit	Value
Thermal conductivity	k	W/m°C	2.72
Specific heat	C	J/kg°C	983
Density	ρ	kg/m ³	2480
Static modulus of elasticity	E	GPa	44.18
Poisson's ratio	ν	-	0.228
Static compressive strength	f'_c	MPa	51.29
Static tensile strength	f_t	MPa	5.129 ^(c)
Dam-air convection coefficient	h_{c-a}	W/m ² °C	14 ^(a)
Dam-water convection coefficient	h_{c-r}	W/m ² °C	Variable (340) ^(b)
Emissivity coefficient	e	-	0.65–0.90 (0.88) ^(b)
Solar absorptivity coefficient	δ	-	0.50–0.70 (0.60) ^(b)

^(a) For an assumed average annual wind speed of 2.2 m/s.

^(b) In the parentheses are the coefficient values of dam-water convection, emissivity, and solar absorptivity that were used in the analysis.

^(c) The tensile strength with a value of 10% of the compressive strength is used (ACI_318-11 2011).

รูปที่ 2.10 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดคุณสมบัติคอนกรีตทั้ง 6 กรณี (Kiet, 2018)

ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า การวิเคราะห์โครงสร้างของโมดูลัสของคอนกรีตเชื่อมและฐานรากการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่วิเคราะห์ทั้ง 6 กรณี จะเห็นได้ชัดเจนว่าโมดูลัสของคอนกรีตและฐานรากเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการวิเคราะห์การโก่งตัวและความเครียดของเขื่อน ความไวของการโก่งตัวในแนวรัศมีของเขื่อนการเปลี่ยนแปลงโมดูลัสของคอนกรีตเชื่อมและฐานรากจะลดลงเมื่อโมดูลัส

ทั้งสองเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันเมื่อระดับน้ำสูง (260 m amsl) หากฐานรากสม่ำเสมอโมดูลัสเพิ่มขึ้นจาก 10 GPa เป็น 34.5 GPa การโก่งตัวในแนวนอนของเขื่อนที่ยอดลดลงจาก 4.83 ซม. เป็น 3.78 ซม. และจาก 3.93 ซม. เป็น 3.00 ซม. เมื่อโมดูลัสคอนกรีต 33.3 GPa เป็น 44.2 GPa และเมื่อระดับน้ำต่ำ (220 ม. amsl) การโก่งตัวในแนวนอนของเขื่อนจะเกิดขึ้นค่อนข้างน้อย การโก่งตัวของเขื่อนที่ระดับความสูงตั้งแต่ 170 ม. ถึง 210 ม. amsl มีความไวมากกว่า (แตกต่างกันระหว่าง 0.03 – 0.35 ซม.) กว่ายอดเขื่อน (ต่างกันระหว่าง 0.2 – 0.32 ซม.) สำหรับโมดูลัสของฐานรากส่งผลกระทบอย่างเด่นชัดต่อการโก่งตัวในแนวนอนมากกว่าโมดูลัสของคอนกรีต เนื่องจากผลของโมดูลัสการเปลี่ยนรูปของฐานราก ความไม่สมดุลของรูปทรงเขื่อนและการแปรผันของความหนาของเขื่อนตามแนวโค้งที่ระดับความสูงต่างก็ทำให้เกิดความแตกต่างเช่นกัน การโก่งตัวของเขื่อนด้านต่างๆ ตัวเขื่อนส่วนใหญ่อยู่ในภาวะอัด ยกเว้นแรงดึงเล็กน้อยเกิดขึ้นตามฐานเขื่อนบริเวณเหนือน้ำ และโมดูลัสคอนกรีตและฐานรากในกรณีนี้ 5 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 44.2 GPa และ 20 GPa ตามลำดับ ให้ความเหมาะสมที่สุดกับข้อมูลที่ตรวจสอบซึ่งวัดโดยอุปกรณ์ลูกดึงสาย อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ ไม่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของเขื่อน ในทำนองเดียวกันงานวิจัยของ Pourbehi (2018) ศึกษาการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของปฏิกิริยาอัลคา-ไลซิลิกาของเขื่อนคอนกรีตขนาดเล็กในแม่น้ำของเกอร์ชุกใกล้กับเมืองสเตเลนบอสช์ประเทศแอฟริกาใต้ ทำการตรวจสอบพฤติกรรมการขยายตัวของเขื่อน ซึ่งพบรอยแตกกว้างที่ผนังฝั่งท้ายน้ำ พบอาการบวมบริเวณของยอดเขื่อน พบการซึมของน้ำจากผนังฝั่งเหนือน้ำภายในเขื่อน และการเคลื่อนตัวของรอยต่อเขื่อน โดยมีการสังเกตรอยแตกกว้างขนาดเล็กโดยรอบๆเป็นจุด ๆ เมื่อพิจารณาวัสดุที่ทำปฏิกิริยาและรอยต่อที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนผนังเขื่อน รอยแตกขนาดเล็กเหล่านี้อาจมีสาเหตุมาจากความเครียดจากปฏิกิริยาอัลคา-ไลซิลิกา ในระหว่างการตรวจสอบ พบว่าบล็อก 9 ของเขื่อนมีอาการบวมและเสียหายมากที่สุด เพื่อทำนายพฤติกรรมการบวม ในการวิเคราะห์ทางความร้อนเบื้องต้น เนื่องจากคุณสมบัติทางความร้อนของคอนกรีต ดิน และหิน จึงใช้องค์ประกอบการถ่ายเทความร้อนแบบ 2 มิติ ในการวิเคราะห์เชิงความร้อนของเขื่อน ความแปรผันของอุณหภูมิตามฤดูกาลสำหรับพื้นผิวเหนือน้ำและท้ายน้ำของเขื่อน โดยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าบริเวณเหนือน้ำระดับความร้อนจะสูงกว่าในบริเวณด้านท้ายน้ำของเขื่อน สาเหตุหลักมาจากการได้รับแสงจากดวงอาทิตย์โดยตรง สำหรับปฏิกิริยาอัลคา-ไลซิลิกา ซึ่งใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กำหนดให้รูปทรงของเมชเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนแบบ ประเภท CPE4R ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่กระทำต่อเขื่อนคือ แรงโน้มถ่วง ความแปรผันของอุณหภูมิตามฤดูกาล และความดันอุทกสถิต โดยพารามิเตอร์ที่กำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตที่เกิดปฏิกิริยาอัลคา-ไลซิลิกา แสดงดังรูปที่ 2.11

	Young's modulus E_0 (GPa)	Poisson's ratio ν -	Tensile strength f_t MPa	Fracture energy G_F (N/m)	Thermal conductivity κ (W/(m K))	Specific heat c (KJ/ (kg K))	Thermal expansion coefficient α (10^{-5})
Concrete	22.0	0.17	2.1	200.0	1.75	0.75	1.0
Rock	20.0	0.25	-	-	0.75	0.85	0.5
Soil fill	0.15	0.2	-	-	0.55	1.00	0.5

Parameter	value
τ_l (days)	120
τ_c (days)	70
β (%)	0.28

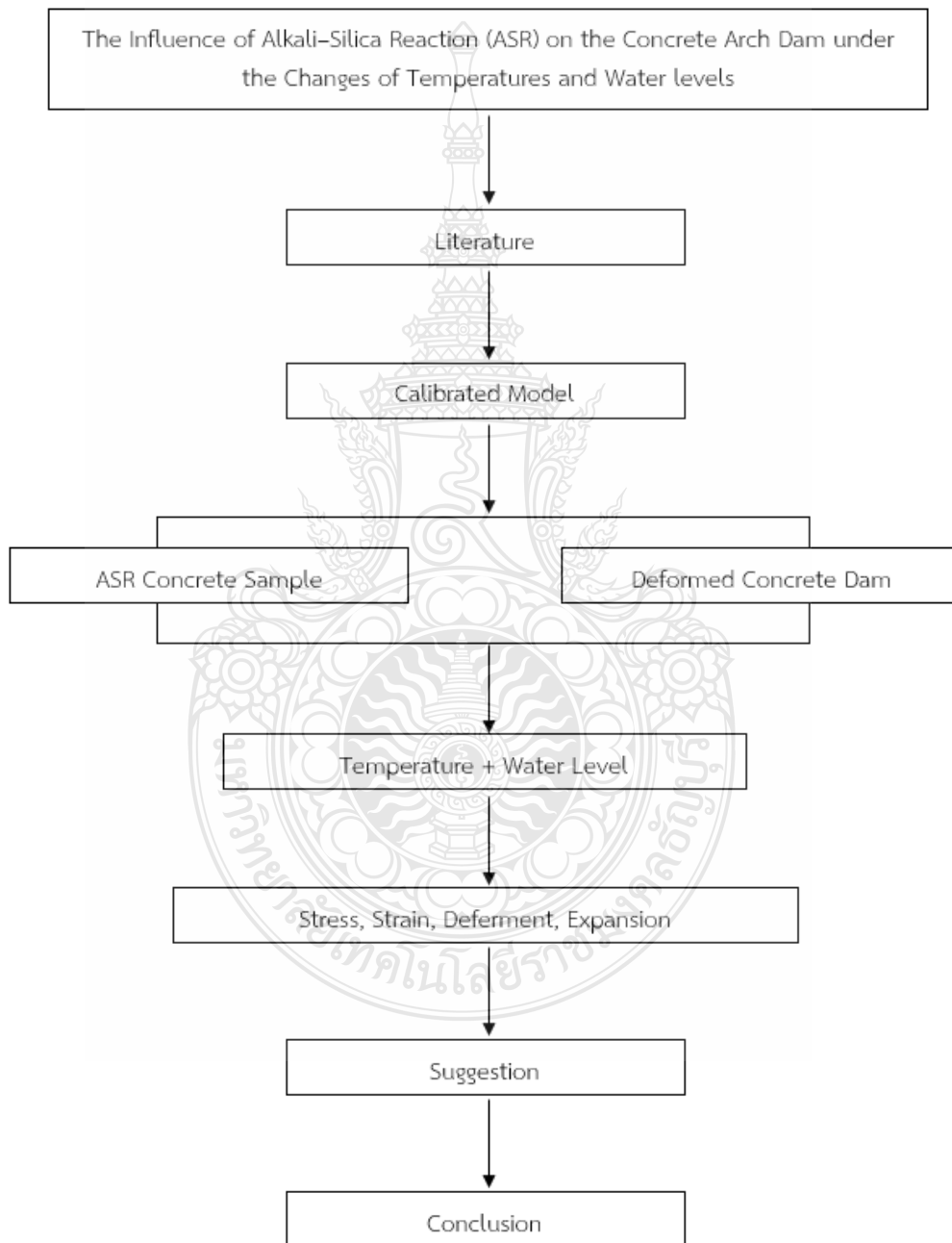
รูปที่ 2.11 พารามิเตอร์แสดงคุณสมบัติของคอนกรีตอันเนื่องมาจากการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคา-ไลซิลิกา (Pourbehi, 2018)

เมื่อพิจารณาจากพารามิเตอร์และตัวแปรต่างๆ รวมถึงประวัติความร้อน จลนศาสตร์ของปฏิกิริยา ความเค้น และการเสื่อมสภาพของวัสดุตามเวลา ผลลัพธ์ของการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเขื่อนพบว่าพฤติกรรมการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคา-ไลซิลิกา เป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นควบคู่กับสภาพแวดล้อม อุณหภูมิและความชื้น ผลกระทบของการดูดซับเจลโดยรอยแตกขนาดเล็กต่อกลไกการหน่วงเวลาปฏิกิริยาอัลคา-ไลซิลิกา และการเสื่อมสภาพของวัสดุอันเนื่องมาจากผลกระทบจากการบวมตัวของคอนกรีต ผลความเค้นและผลความเครียดเนื่องจากผลกระทบเป็นเวลานาน สอดคล้องกันกับการนำตัวอย่างคอนกรีตในเขื่อนมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่ามากกว่า 24 เปอร์เซ็นต์ของความเสียหายที่เกิดขึ้น เกิดจากการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคา-ไลซิลิกา โดยพบลักษณะบวมเป็นจุดเล็ก ๆ เกิดขึ้นที่บริเวณหน้าตัดของเขื่อน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

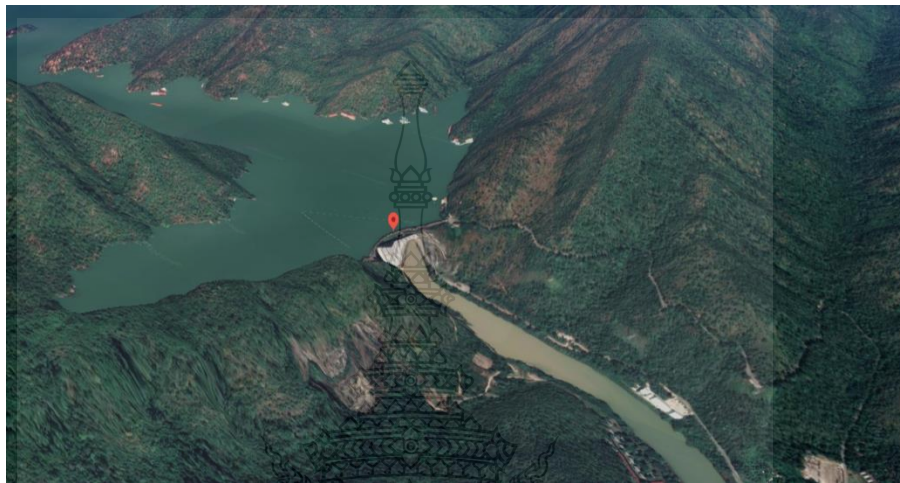
สำหรับการศึกษาผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเชื่อมคอนกรีตรูปโค้งภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและระดับน้ำ โดย จะดำเนินการตามขั้นตอนการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษา

3.1 พารามิเตอร์ของเขื่อนภูมิพล

เขื่อนภูมิพลตั้งอยู่ที่ละติจูด 17014.55' และลองจิจูด 98058.33' บนแม่น้ำปิง จังหวัดตาก ประเทศไทย สร้างขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2501-2507 เขื่อนนี้ถือเป็นเขื่อนทรงโค้ง วัตถุประสงค์ของเขื่อนนี้มีไว้ผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ ควบคุมน้ำท่วม ปรับปรุงการเดินเรือ และเก็บน้ำเพื่อการชลประทาน รูปที่ 3.2 แสดงภาพถ่ายดาวเทียมของเขื่อน และลักษณะของเขื่อนแสดงไว้ในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายดาวเทียมของเขื่อนภูมิพล (Google Earth, 2023)

ตารางที่ 3.1 ลักษณะสำคัญของเขื่อนภูมิพล

Characteristic	Unit	Value
Maximum dam height	m	150
Crest elevation above mean sea level (amsl)	m	261
Crest thickness	m	6
Base thickness at the central block	m	44
Number of blocks of dam divided by contraction joints	-	25
Normal water level (NWL) amsl	m	260
Minimum water level amsl	m	213
Arch length at crest elevation	m	486
Arch radius	m	250
Reservoir capacity at NWL	m ³	13.5 x 10 ⁹

ที่มา : Electricity Generating Authority of Thailand (2023)

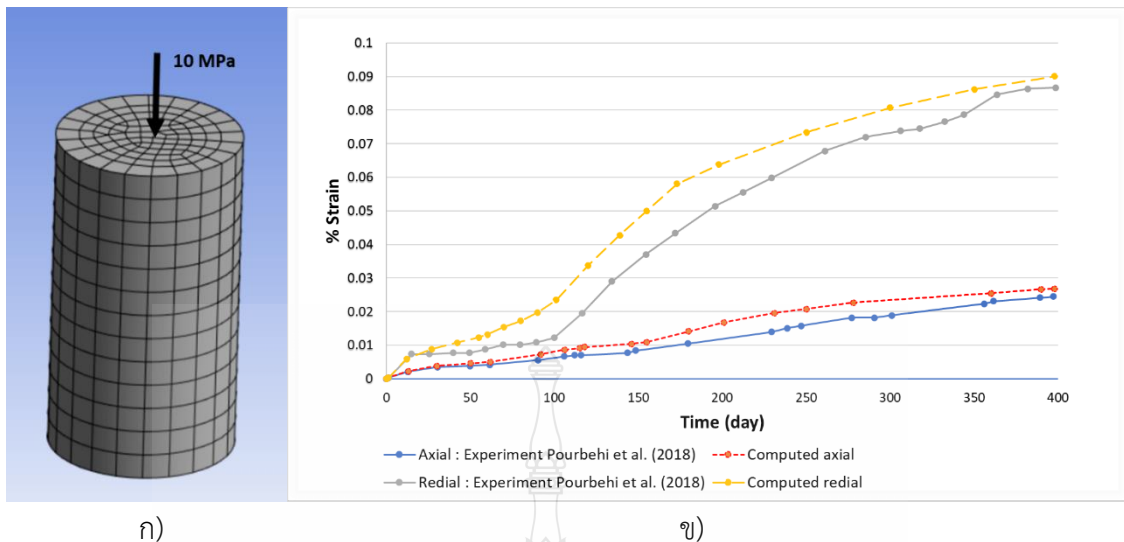
3.2 การสอบเทียบแบบจำลอง

3.2.1 การสอบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ อ้างอิงผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ Pourbehi (2018) ทดสอบโดยการเก็บตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 130 มม. และสูง 240 มม. ของเขื่อนคอนกรีตขนาดเล็กในแม่น้ำยองเกอร์ชุกใกล้กับเมืองสเตเลนบอสช์ ประเทศแอฟริกาใต้ โดยให้แรงกระทำตามแนวแกน 10 MPa เปรียบเทียบค่าความเค้นผลการทดสอบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการกำหนดพารามิเตอร์ โมดูลัสความยืดหยุ่น 37.30 GPa อัตราส่วนปัวซอง 0.220 ความเครียดตามแนวรัศมี 120 วัน ความเครียดตามแนวแกน 70 วัน และอุณหภูมิ 38 °C พารามิเตอร์ ระยะเวลาการทดสอบ 400 วัน โดยการกำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 3.2 พบว่าผลของสภาวะความเค้นในทิศทางตามแนวแกนเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบความเค้นอิสระ สำหรับการสร้างแบบจำลองการทดสอบที่ใช้พารามิเตอร์ดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีสอบเทียบโดยการจำลองโมเดลคอนกรีตรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 130 มม. และสูง 240 มม. กำหนดพารามิเตอร์แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 และให้แรงกระทำตามแนวแกน 10 MPa พบว่าผลการสอบเทียบแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตในห้องปฏิบัติการของ Pourbehi (2018) โดยค่าความเค้นตามแนวรัศมีมีความแตกต่างโดยรวมเพียง 12% แสดงในรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติวัสดุของคอนกรีตใช้ในการวิเคราะห์ของ Pourbehi (2018) และ Multon (2006)

Parameter	Symbol	Unit	Value
Static modulus of elasticity	E	GPa	37.30 ^(a)
Poisson's ratio	ν	-	0.220 ^(a)
The radial strains (latency time)	τ_l	-	120 ^(b)
The axial strains (Characteristic time)	t_c	-	70 ^(b)
Temperature	θ_0	°C	38 ^(b)

ที่มา : ^(a)Multon (2006) และ ^(b)Pourbehi (2018)



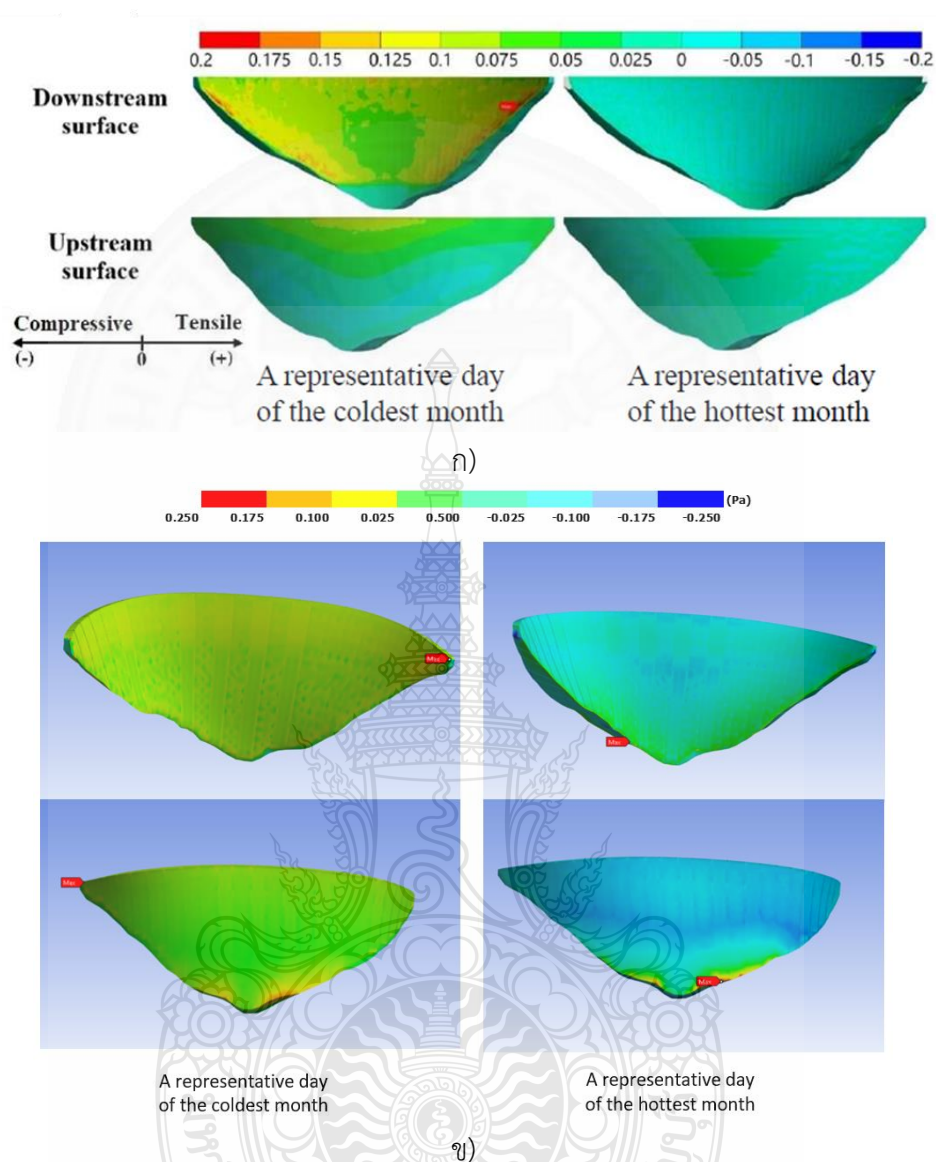
รูปที่ 3.3 การสอบเทียบแบบจำลอง ก) แบบจำลอง 3 มิติ และ ข) ผลความเครียดตามแนวแกนแบบจำลองและการทดลอง (Pourbehi, 2018)

3.2.2 การสอบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ อ้างอิงผลการทดสอบการโก่งตัวของเขื่อนภูมิพลของงานวิจัย Kiet (2018) ทดสอบโดยการเทียบผลวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ กับค่าการโก่งตัวที่วัดจากตัวเขื่อน โดยกำหนดพารามิเตอร์ การนำความร้อน $2.72 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ความร้อนจำเพาะ $983 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ ความหนาแน่น 2480 kg/m^3 โมดูลัสความยืดหยุ่น 44.18 GPa อัตราส่วนปัวซอง 0.228 กำลังรับแรงอัดคอนกรีต 51.29 MPa และความต้านทานแรงดึงคอนกรีต 5.129 MPa โดยการกำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 3.3 พิจารณาเพียงอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปและไม่พิจารณาระดับน้ำ พบว่าผลการสอบเทียบแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของงานวิจัย Kiet (2018) โดยค่าความเค้นหลักสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงในรูปที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติวัสดุของคอนกรีตใช้ในการวิเคราะห์ของ Kiet (2018)

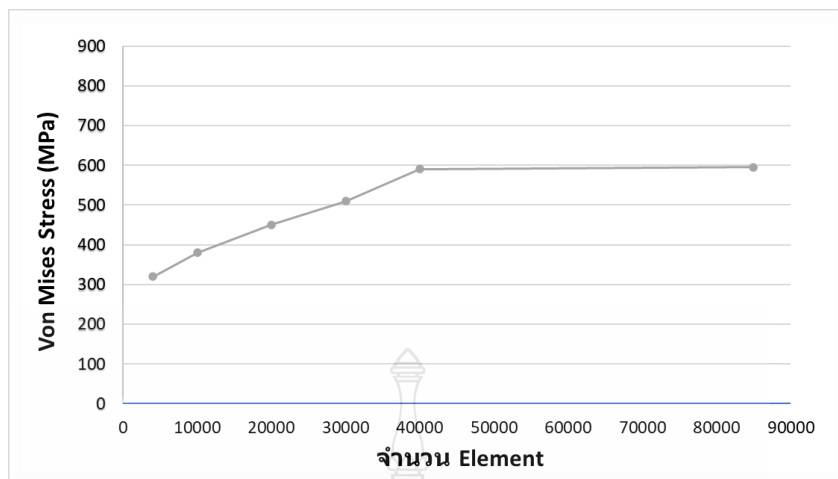
Parameter	Symbol	Unit	Value
Thermal conductivity	k	$\text{W/m}^\circ\text{C}$	2.72
Specific heat	C	$\text{J/kg}^\circ\text{C}$	983
Density	ρ	kg/m^3	2480
Static modulus of elasticity	E	GPa	44.18
Poisson's ratio	ν	-	0.228
Static compressive strength	F'_c	MPa	51.29
Static tensile strength	f_t	MPa	5.129

ที่มา : Kiet (2018)



รูปที่ 3.4 การสอบเทียบแบบจำลอง ก) ผลการกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Pa) ของ Kiet (2018) และ ข) ผลการกระจายความเค้นหลักสูงสุด (Pa) (Computed)

3.2.3 การทดสอบลู่เข้า (Convergence) โดยการเพิ่มจำนวน Element ต่อค่า Von Mises Stress ซึ่งใช้แบบจำลองเชื่อมบล็อกที่ 12 วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Ansys Workbench แสดงดังรูปที่ 3.5 ระบุว่ารอยแตกร้าวรอยแรกจะเกิดในบริเวณมุม ณ ตำแหน่งฐานรากของเขื่อน เกิด Stress สูงที่สุด ซึ่งพิจารณาจาก Von Mises Stress

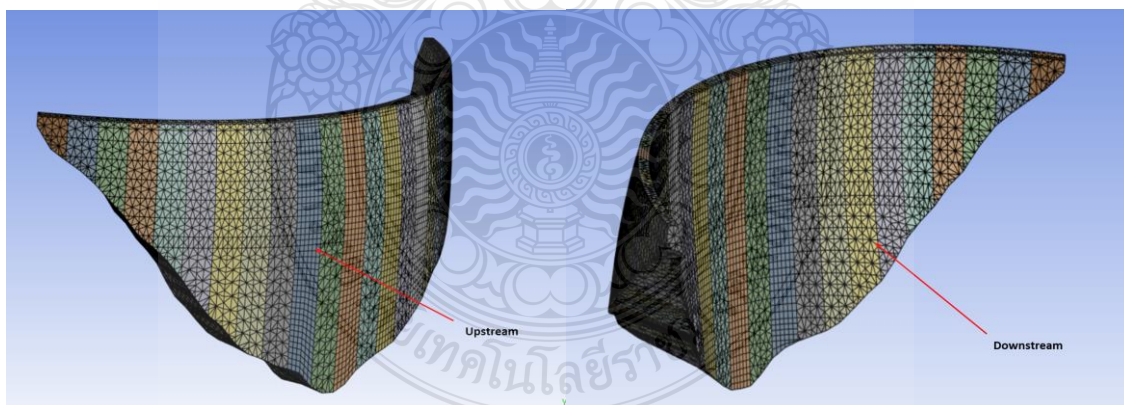


รูปที่ 3.5 กราฟแสดงผลของการเพิ่มจำนวน Element ต่อค่า Von Mises Stress

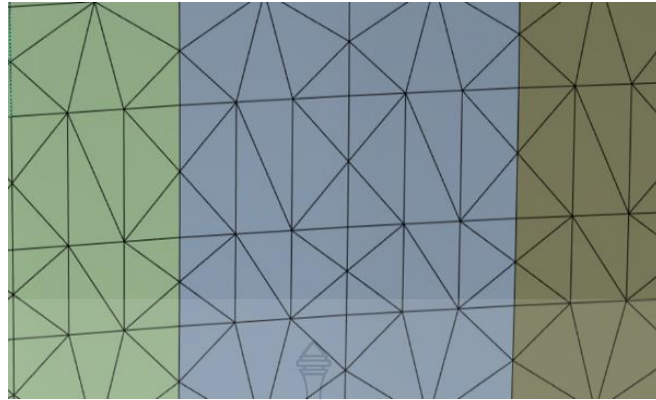
3.3 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและระดับน้ำของเขื่อน

3.3.1 แบบจำลองเชิงตัวเลขของเขื่อน

การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติของเขื่อนคอนกรีตรูปโค้งด้วยโปรแกรม Ansys Workbench โดยกำหนดขนาด Mesh แบ่งชิ้นงานออกเป็นส่วนเล็ก ๆ ซึ่ง Mesh มีลักษณะเป็น Automatics ในงานวิจัยนี้กำหนด Body sizing ขนาด 10 เมตร แสดงดังรูปที่ 3.6 เนื่องจากลิขสิทธิ์ของใบอนุญาตซอฟต์แวร์ใช้สำหรับการศึกษา ด้วยจำนวนเอลิเมนต์ที่จำกัดอีกทั้งโมเดลมีขนาดใหญ่ จึงไม่สามารถกำหนดขนาด Mesh ให้มีความละเอียดมากไปกว่านี้ได้ และการแบ่ง Mesh



ก)



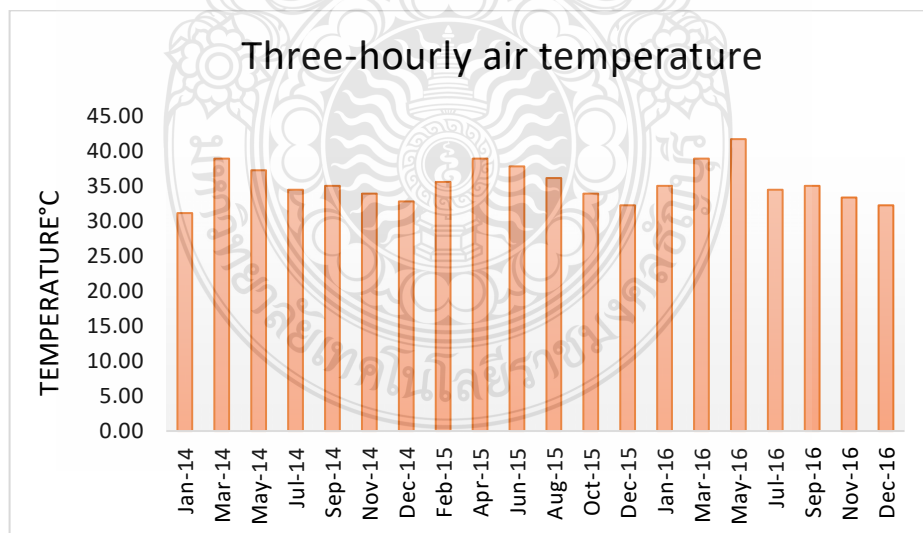
ข)

รูปที่ 3.6 Finite element Meshing ก) รูปทรง Mesh ของโมเดลเขื่อน ข) พื้นผิว Mesh

3.3.2 การป้อนข้อมูลสำหรับแบบจำลอง

เช่น อุณหภูมิของน้ำกับเวลาที่ต่างกัน ความลึก อุณหภูมิอากาศเทียบกับเวลา และการแผ่ความร้อนจากดวงอาทิตย์เทียบกับเวลาถูกนำมาใช้เป็นเงื่อนไขขอบเขตในการวิเคราะห์ภาวะชั่วคราวทางความร้อนดังนี้

(1) อุณหภูมิแวดล้อม ประวัติอุณหภูมิอากาศรายชั่วโมงที่วัดได้ระหว่างปี ค.ศ. 2014 - 2016 ตามสภาพอากาศสถานีใกล้เคียงบริเวณเขื่อน ซึ่งจัดทำโดยกรมอุตุนิยมวิทยา ใช้ในแบบอย่างอุณหภูมิโดยรอบคือ $31.1^{\circ}\text{C} - 41.6^{\circ}\text{C}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.7

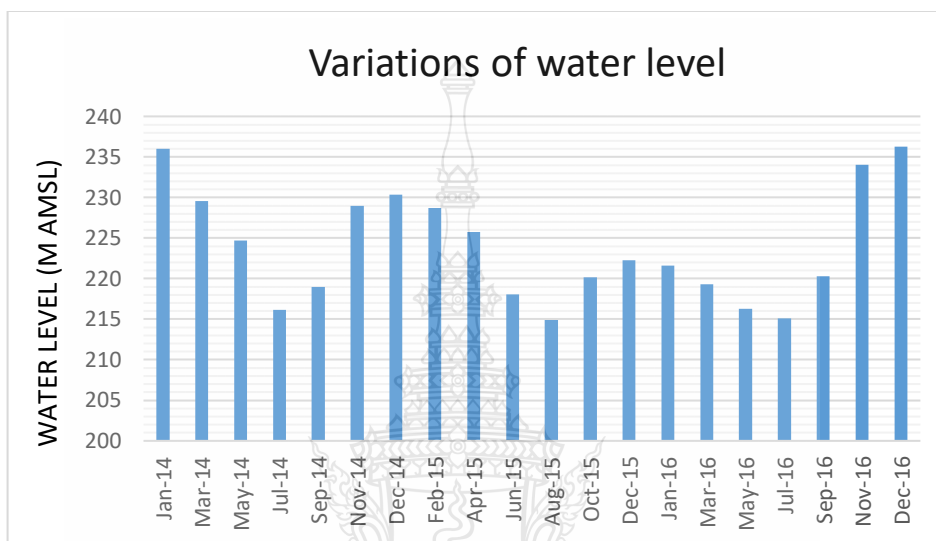


รูปที่ 3.7 ประวัติอุณหภูมิอากาศราย 3 ชั่วโมงที่สถานีตาก ค.ศ. 2013 - 2015 (Electricity Generating Authority of Thailand, 2023)

(2) การแผ่ความร้อนจากดวงอาทิตย์ ตามทิศทางของเขื่อนซึ่งอยู่ในทิศเหนือ-ใต้ ผลกระทบของแสงจากดวงอาทิตย์ที่มีต่อหน้าเขื่อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ หน้าเขื่อนเหนือ

อ่างเก็บน้ำระดับน้ำ บนเขื่อน และท้ายเขื่อนเหนืออ่างเก็บน้ำระดับน้ำ ตั้งแต่เวลา 06.00-14.00 น., 06.00-19.00 น. และ 13.00-19.00 น. ตามลำดับ

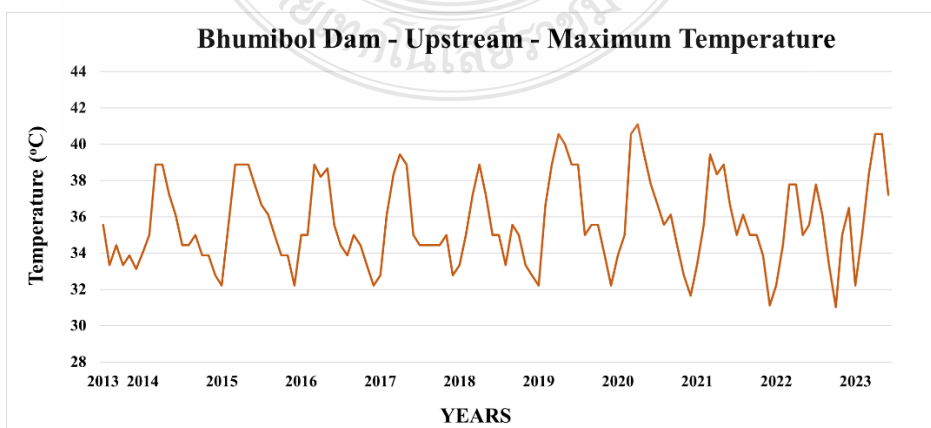
(3) ระดับน้ำใน บันทึกการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในเขื่อนระหว่างปี ค.ศ. 2013 - 2015 โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เป็นตัวอย่าง จะเห็นได้ว่าระดับน้ำจะไม่คงที่ แต่จะแปรผันตามดังแสดงในรูปที่ 3.8



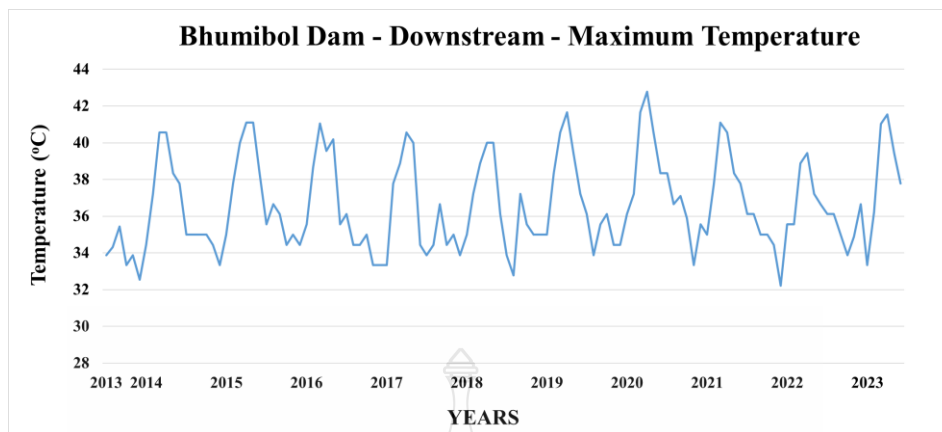
รูปที่ 3.8 การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำระหว่างปี ค.ศ. 2013 – 2015 (Electricity Generating Authority of Thailand, 2023)

3.3.3 การวิเคราะห์อุณหภูมิย้อนหลัง 10 ปี

ข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดบริเวณเหนือน้ำ (Upstream Maximum Temperature) และข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดบริเวณท้ายน้ำ (Downstream Maximum Temperature) ย้อนหลัง 10 ปี ของเขื่อนรูปโค้ง ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2013 ถึง 2023 แสดงดังรูปที่ 3.9 ในแต่ละช่วงเดือนแต่ละปีมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน แต่จะเห็นได้ว่าปี ค.ศ. 2020 มีระดับอุณหภูมิสูงที่สุด อันเนื่องมาจากในปี ค.ศ. 2020 มีรายงานยืนยันอุณหภูมิโลกร้อนที่สุดเท่าที่เคยบันทึกไว้ (Global Warming, 2023)



ก)

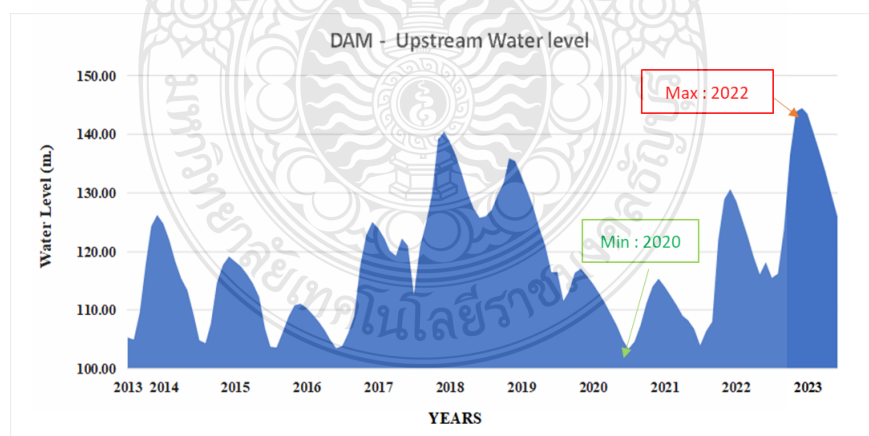


ข)

รูปที่ 3.9 อุณหภูมิสูงสุดย้อนหลัง 10 ปี (ค.ศ. 2013 – 2023) ก) บริเวณเหนือน้ำ (Upstream Maximum Temperature) และ ข) บริเวณท้ายน้ำ (Downstream Maximum Temperature) (Electricity Generating Authority of Thailand, 2023)

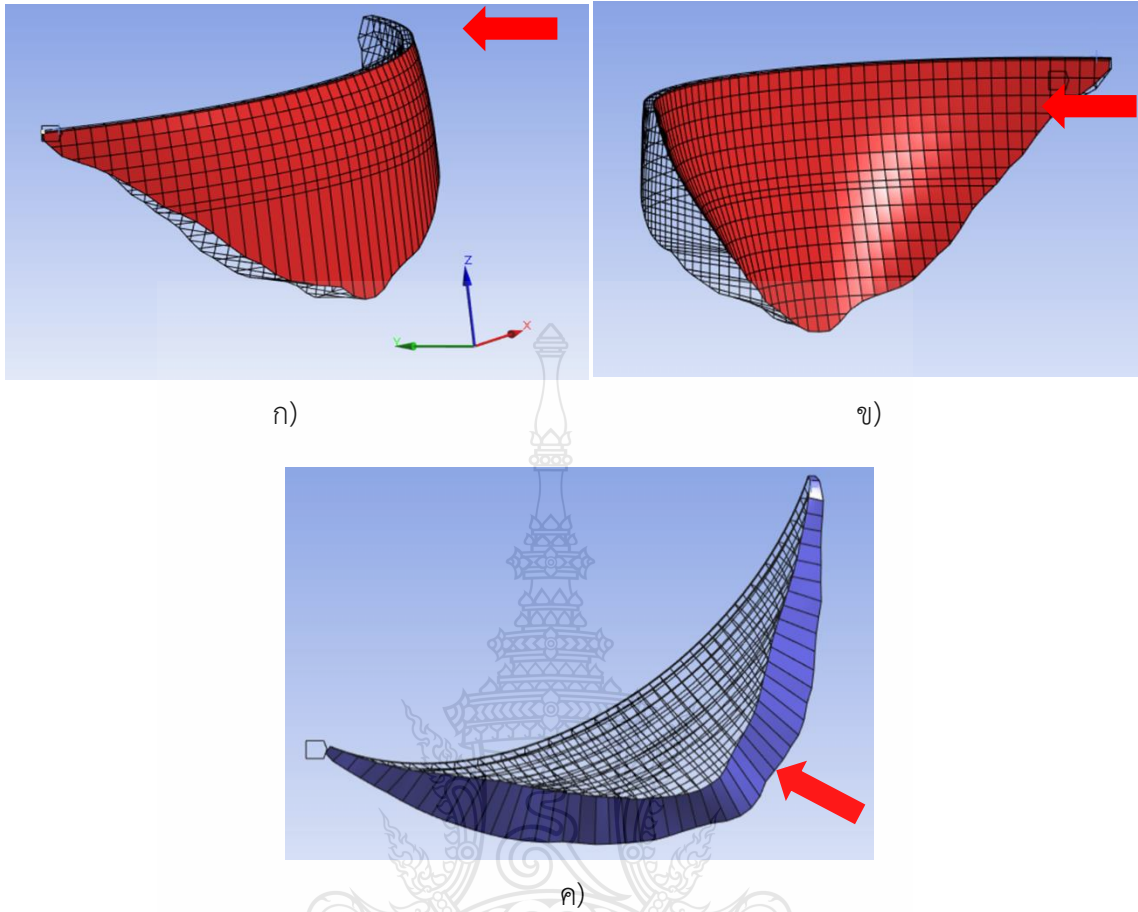
3.3.4 การวิเคราะห์ระดับกักเก็บน้ำในเขื่อนย้อนหลัง 10 ปี

ข้อมูลระดับกักเก็บน้ำในเขื่อนบริเวณเหนือน้ำ (Upstream Water level) ย้อนหลัง 10 ปี ของเขื่อนรูปโค้ง ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2013 ถึง 2023 แสดงดังรูปที่ 3.10 จะเห็นได้ปลายปี ค.ศ. 2022 มีระดับกักเก็บน้ำที่สูงที่สุด จึงเลือกใช้ปี ค.ศ. 2022 สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมเขื่อนจากระดับกักเก็บน้ำสูงสุด และในปี ค.ศ. 2020 มีระดับกักเก็บน้ำที่ต่ำที่สุดจึงเลือกใช้ปี ค.ศ. 2020 สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมเขื่อนจากระดับกักเก็บน้ำต่ำสุด



รูปที่ 3.10 ระดับกักเก็บน้ำในเขื่อนบริเวณเหนือน้ำ (Upstream) ย้อนหลัง 10 ปี (ค.ศ. 2013 – 2023) (Electricity Generating Authority of Thailand, 2023)

เนื่องจากข้อมูลที่สืบค้นได้หน่วยของระดับน้ำจะมีหน่วยเป็น ม.รทก. (MSL) เรียกว่าหน่วยระดับน้ำทะเลปานกลาง เป็นหน่วยที่อ้างอิงถึงความสูงของพื้นที่ต่าง ๆ โดยใช้ระดับน้ำทะเลเป็นเกณฑ์

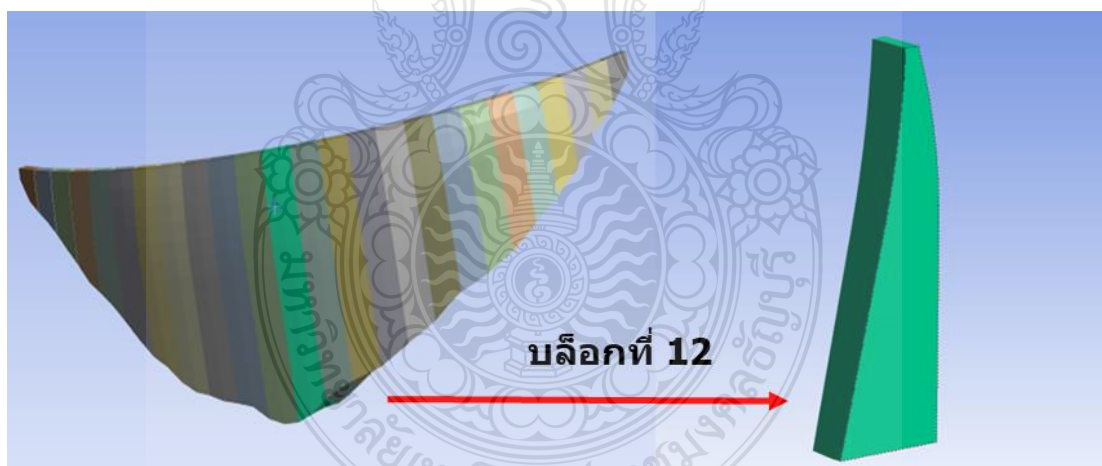


รูปที่ 3.12 อุณหภูมิและระดับน้ำที่กระทำต่อเขื่อน ก) บริเวณฝั่งเหนือน้ำ ข) บริเวณฝั่งท้ายน้ำ
ค) จุด Fix support ของเขื่อน

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

ในการศึกษาการขยายตัวของอัลคาไล-ซิลิกา สำหรับความร้อนสะสมเป็นตัวแปรสำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของเชื่อมถือเป็นเรื่องที่น่าสนใจในด้านความปลอดภัยเป็นอย่างยิ่ง ภาระความร้อนการนำไปใช้กับเชื่อมโค้งเก่านั้นได้รับอิทธิพลจากปัจจัย 2 ประการ ได้แก่ ฤดูกาลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและการแพร่ความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่ส่งผลกระทบต่อหน้าเชื่อม โดยจะพิจารณาดังต่อไปนี้ โดยงานวิจัยนี้การศึกษาผลกระทบของระดับอุณหภูมิสูงสุดต่อเชื่อมคอนกรีต เนื่องจากการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา เป็นกระบวนการระยะยาวและมักจะดำเนินต่อไปหลายปี ด้วยเหตุนี้จึงต้องเลือกขนาดขั้นตอนเวลาที่เหมาะสมเพื่อรับประกันความแม่นยำที่เพียงพอของผลลัพธ์และเวลาในการคำนวณที่เหมาะสมที่สุด จุดเริ่มต้นของการวิเคราะห์ปัญหาต่อเนื่องตามลำดับของแบบจำลองการแพร่ความร้อนคือการแก้ปัญหากล่าววิเคราะห์เชิงความร้อนก่อน จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์โครงสร้างซึ่งต้องใช้พารามิเตอร์หลายตัวแสดงในตารางที่ 3.2 และ ตารางที่ 3.3 วิเคราะห์แบบจำลองไฟในเอลิเมนต์โดยเปรียบเทียบผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเชื่อมคอนกรีตรูปโค้ง แบ่งเป็น 2 ส่วน 1) ภายใต้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ พิจารณาจากข้อมูลอุณหภูมิเหนือน้ำและอุณหภูมิท้ายน้ำของเชื่อมย้อนหลัง 10 ปี ซึ่งใช้แบบจำลองเชื่อมบล็อกที่ 12 จาก 25 บล็อก แสดงดังรูปที่ 4.1

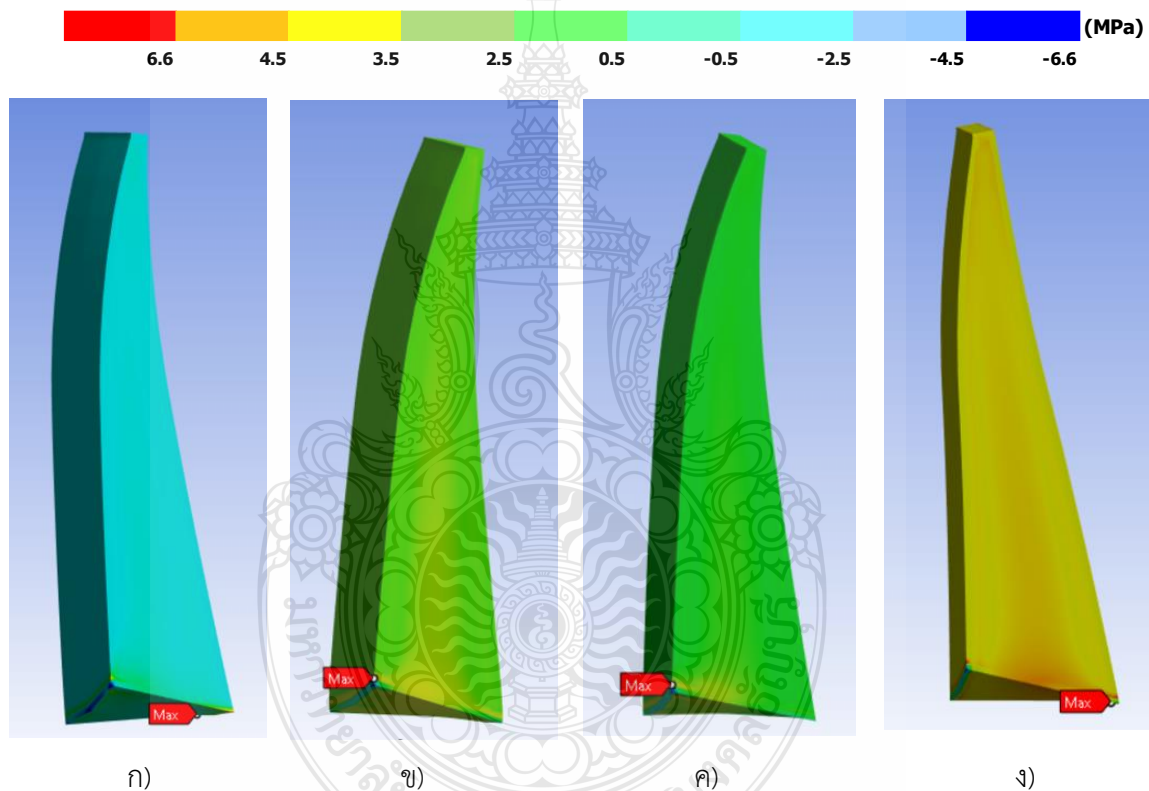


รูปที่ 4.1 แบบจำลองเชื่อมบล็อกที่ 12 จาก 25 บล็อก

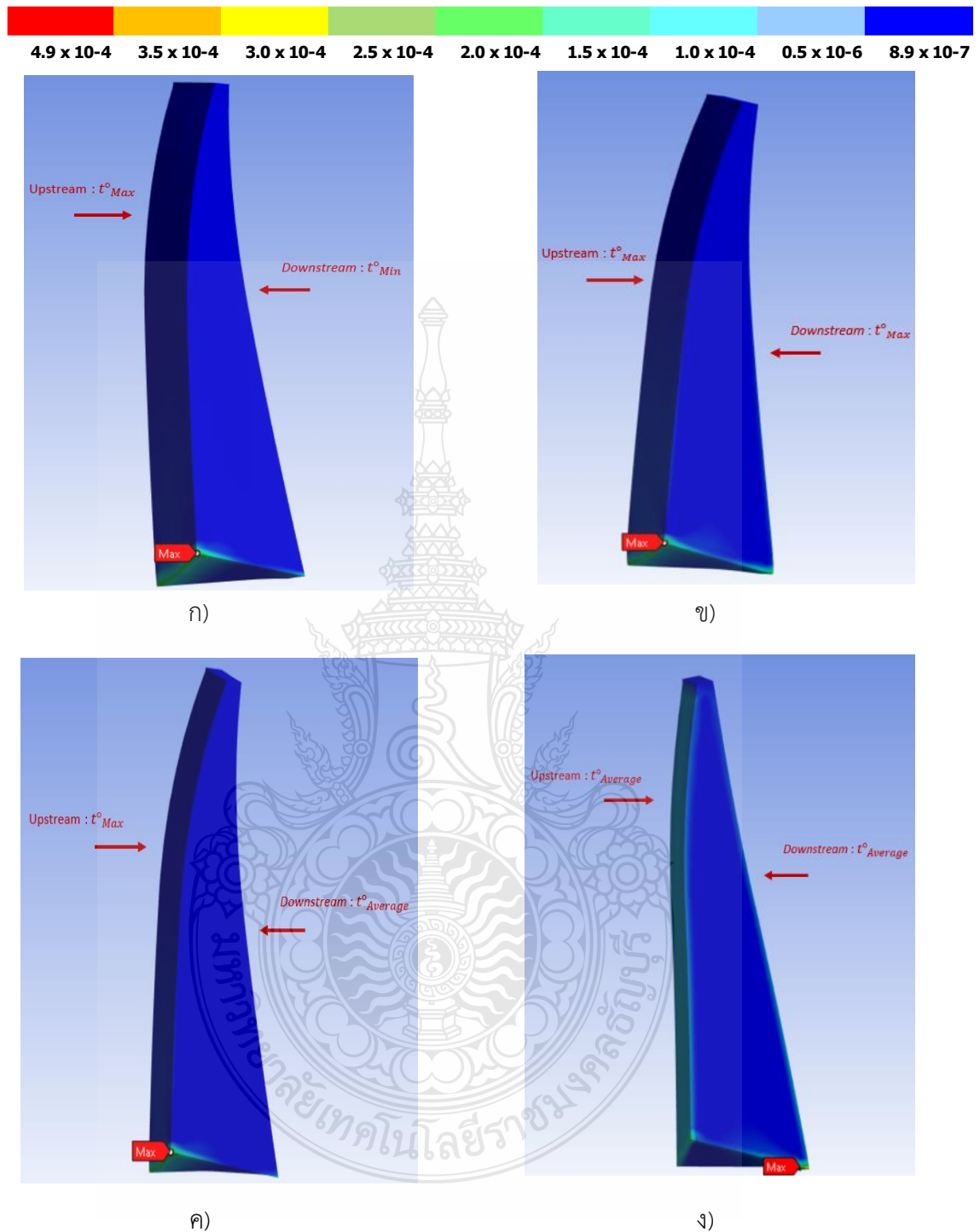
เนื่องจากบล็อกที่ 12 เป็นบล็อกที่มีขนาดความลึกที่ลึกสุดเมื่อเทียบกับขนาดบล็อกอื่น ๆ อีกทั้งในเรื่องการวิเคราะห์ ชัดจำกัดของซอฟต์แวร์ลิซลิธิ์ และปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับระดับน้ำลึกที่ต่ำสุด แรงดันที่ต่ำสุด จะส่งผลทำให้งานวิจัยมีความละเอียดที่มากยิ่งขึ้น โดยจะวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ 1.กรณีอุณหภูมิสูงสุดเหนือน้ำเทียบกับอุณหภูมิสูงสุดท้ายน้ำ 2.กรณีอุณหภูมิสูงสุดเหนือน้ำเทียบกับอุณหภูมิต่ำสุดท้ายน้ำ 3.กรณีอุณหภูมิสูงสุดเหนือน้ำเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยท้ายน้ำ และ 4.กรณีอุณหภูมิเฉลี่ยเหนือน้ำเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยท้ายน้ำ 2) พิจารณาเปรียบเทียบผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเชื่อมคอนกรีตรูปโค้ง ภายใต้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำ โดยพิจารณา 2 กรณี คือ ปีที่ระดับกักเก็บน้ำในเชื่อมสูงสุด และปีที่ระดับกักเก็บน้ำในเชื่อมต่ำสุด

4.1 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา บล็อกที่ 12 ของเขื่อนคอนกรีตรูปโค้ง

การวิเคราะห์แบบจำลองเขื่อนบล็อกที่ 12 ซึ่งพิจารณาผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา อันเนื่องมาจากอุณหภูมิย้อนหลัง 10 ปี จะแบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ 1.กรณีอุณหภูมิสูงสุดเหนือน้ำเทียบกับอุณหภูมิสูงสุดท้ายน้ำ 2.กรณีอุณหภูมิสูงสุดเหนือน้ำเทียบกับอุณหภูมิต่ำสุดท้ายน้ำ 3.กรณีอุณหภูมิสูงสุดเหนือน้ำเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยท้ายน้ำ และ 4.กรณีอุณหภูมิเฉลี่ยเหนือน้ำเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยท้ายน้ำ การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลลัพธ์ความเค้น ความเครียดในตัวเขื่อนที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.2 รูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.2 ผลวิเคราะห์ความเค้นจากการขยายตัวอัลคาไล-ซิลิกา ของแบบจำลองบล็อกที่ 12 ทั้ง 4 กรณี
ก) เหนือน้ำอุณหภูมิสูงสุดเทียบกับท้ายน้ำอุณหภูมิต่ำสุด ข) เหนือน้ำอุณหภูมิสูงสุดเทียบกับ
ท้ายน้ำอุณหภูมิสูงสุด ค) เหนือน้ำอุณหภูมิสูงสุดเทียบกับท้ายน้ำอุณหภูมิเฉลี่ย และ ง) เหนือ
น้ำอุณหภูมิเฉลี่ยเทียบกับท้ายน้ำอุณหภูมิเฉลี่ย



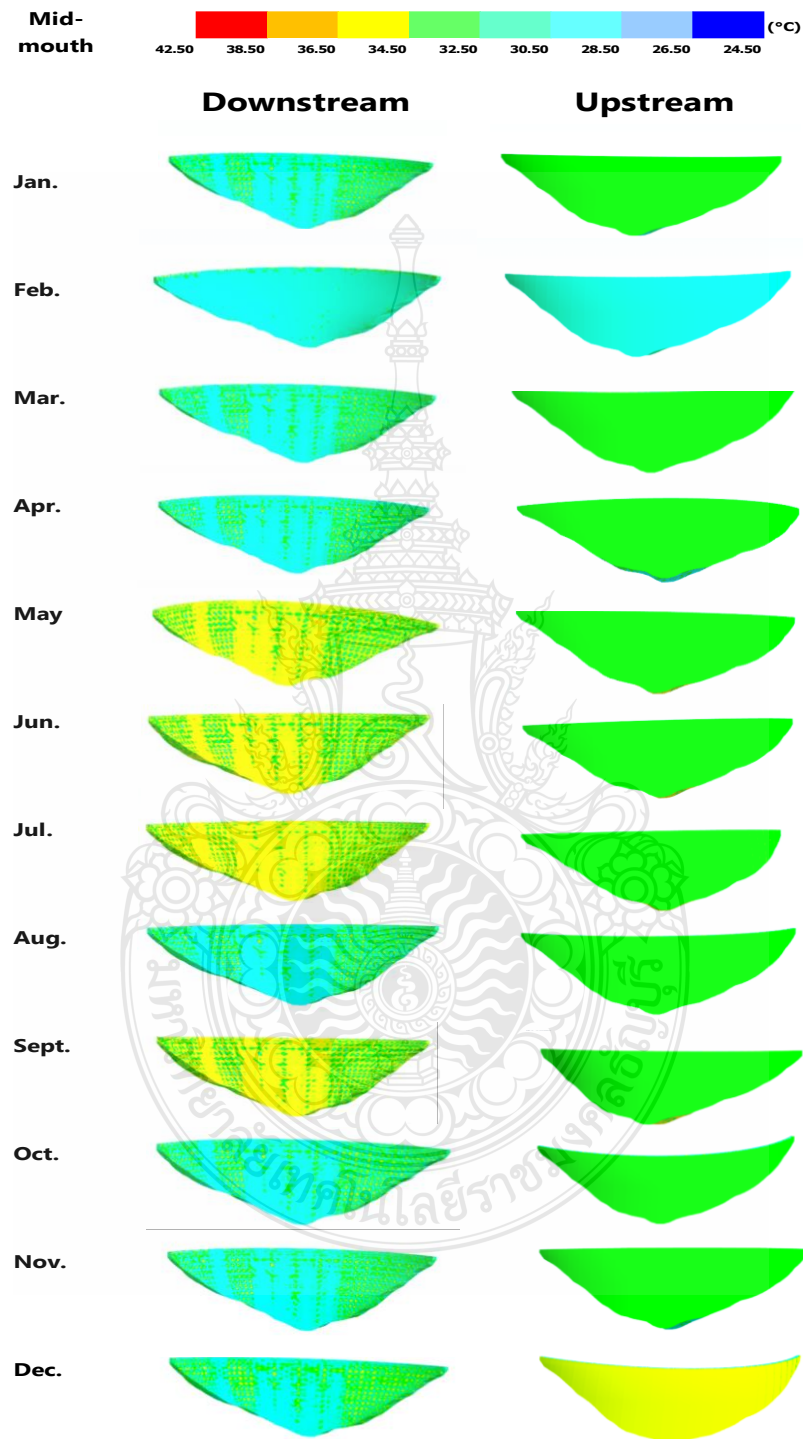
รูปที่ 4.3 ผลวิเคราะห์ความเครียดจากการขยายตัวอัลคาไล-ซิลิกา ของแบบจำลองบล็อกที่ 12 ทั้ง 4 กรณี ก) เหนือน้ำอุณหภูมิสูงสุดเทียบกับท้ายน้ำอุณหภูมิต่ำสุด ข) เหนือน้ำอุณหภูมิสูงสุดเทียบกับท้ายน้ำอุณหภูมิสูงสุด ค) เหนือน้ำอุณหภูมิสูงสุดเทียบกับท้ายน้ำอุณหภูมิเฉลี่ย และ ง) เหนือน้ำอุณหภูมิเฉลี่ยเทียบกับท้ายน้ำอุณหภูมิเฉลี่ย

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเชื่อมคอนกรีตรูปโค้ง
บล็อกที่ 12

กรณี	ผลการวิเคราะห์					
	อุณหภูมิสะสม (°C)		ความเครียด		ค่าความเค้น (MPa)	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
อุณหภูมิสูงสุดเหนือ น้ำเปรียบเทียบกับ อุณหภูมิสูงสุดท้ายน้ำ	37.78	29.06	4.617×10^{-4}	5.263×10^{-7}	6.625	-2.517
อุณหภูมิสูงสุดเหนือ น้ำเปรียบเทียบกับ อุณหภูมิต่ำสุดท้ายน้ำ	37.22	24.31	5.323×10^{-4}	1.537×10^{-6}	5.013	-6.240
อุณหภูมิสูงสุดเหนือ น้ำเปรียบเทียบกับ อุณหภูมิเฉลี่ยท้ายน้ำ	37.22	28.14	4.900×10^{-4}	8.789×10^{-7}	4.647	-4.359
อุณหภูมิเฉลี่ยเหนือ น้ำเปรียบเทียบกับ อุณหภูมิเฉลี่ยท้ายน้ำ	30.17	27.31	7.264×10^{-5}	2.190×10^{-7}	0.512	-1.258

จากผลวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดเนื่องจากการขยายตัวอัลคาไล-ซิลิกา ของแบบจำลองบล็อกที่ 12 โดยทั้ง 4 กรณี แสดงดังในรูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3 นำมาสรุปแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 พบว่าทั้ง 4 กรณีเกิดความเค้นและความเครียดไม่แตกต่างกันมากนัก โดยความเค้นที่เกิดขึ้นจะมากที่สุด ณ ตำแหน่งมุมซ้ายสุดของแบบจำลองบล็อกที่ 12 ซึ่งมีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดใกล้เคียง 6.7 MPa ส่วนความเครียดโดยรวมที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วง 4.6×10^{-4} ถึง 8.8×10^{-7} สำหรับกรณีอุณหภูมิเฉลี่ยเหนือน้ำเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยท้ายน้ำ จะเกิดความเค้นน้อยที่สุดเพียง 0.5 MPa

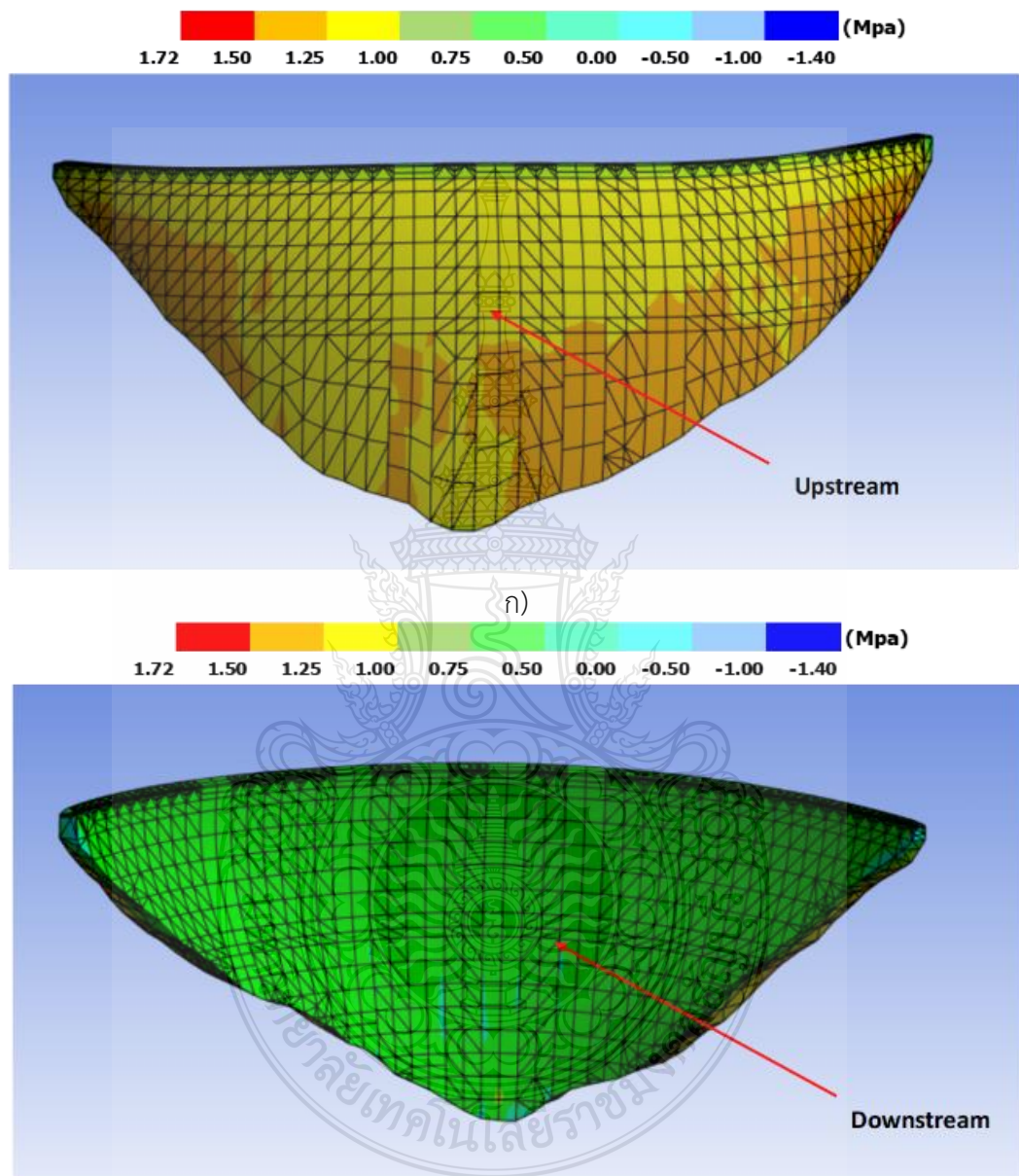
4.2 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเขื่อนคอนกรีตรูปโค้งปีที่ระดับกักเก็บน้ำในเขื่อนต่ำสุด



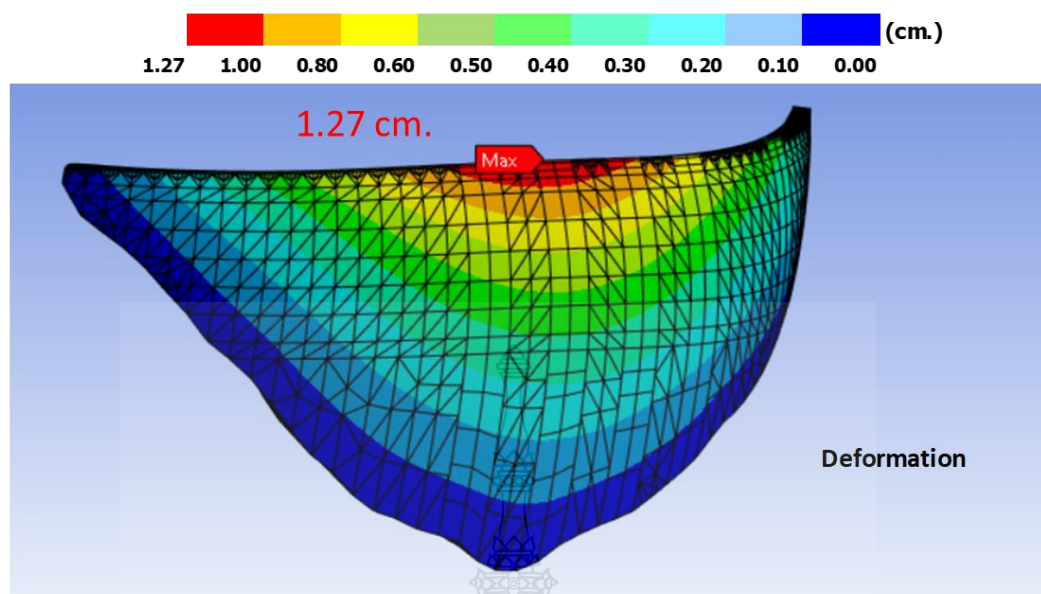
รูปที่ 4.4 การกระจายอุณหภูมิเหนือน้ำและท้ายน้ำในเขื่อนของปี ค.ศ. 2020

การกระจายตัวจากความร้อนบนเขื่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 อุณหภูมิในตัวเขื่อนมีอิทธิพลมากเพื่อประเมินผลกระทบอันเนื่องมาจากการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา เมื่อพิจารณาอุณหภูมิ

ภายในปี ค.ศ. 2020 ระดับอุณหภูมิภายในเขื่อนสูงที่สุดสอดคล้องกับกรณีระดับน้ำภายในเขื่อนที่ต่ำที่สุด ผลลัพธ์การเสียรูปของเขื่อนในทิศทางกระแสน้ำกระทำต่อเขื่อนฝั้งเหนือน้ำ (Upstream) และความเค้นในตัวเขื่อนที่เกิดขึ้นแสดงดังในรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.2



ข)



ค)

รูปที่ 4.5 แบบจำลองโมเดลแสดงผลการวิเคราะห์เขื่อนคอนกรีตรูปโค้งของปี 2020 ก) ความเค้นฝั่งเหนือน้ำ ข) ความเค้นฝั่งท้ายน้ำ และ ค) การเสียรูปของเขื่อน

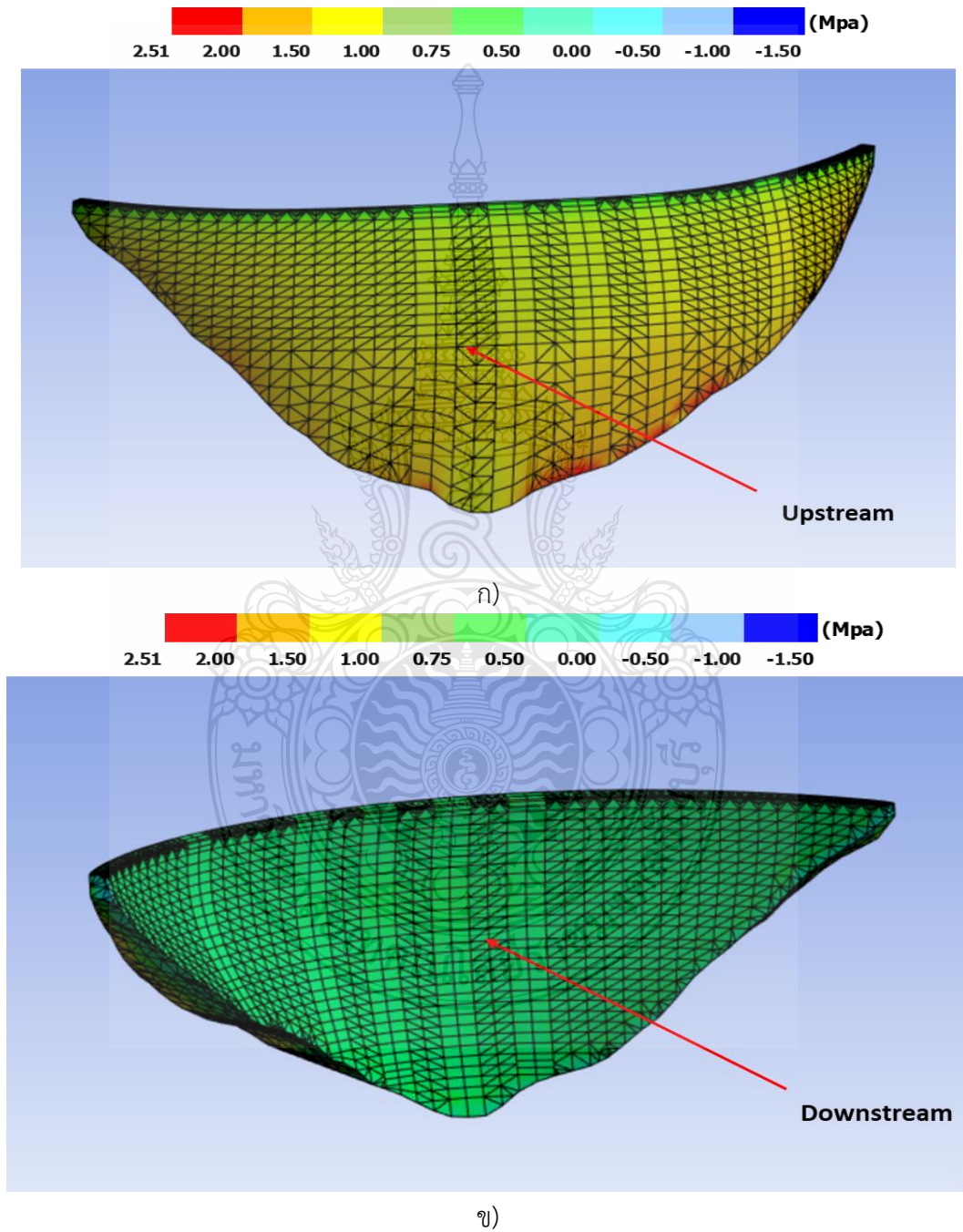
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเขื่อนคอนกรีตรูปโค้งปี 2020

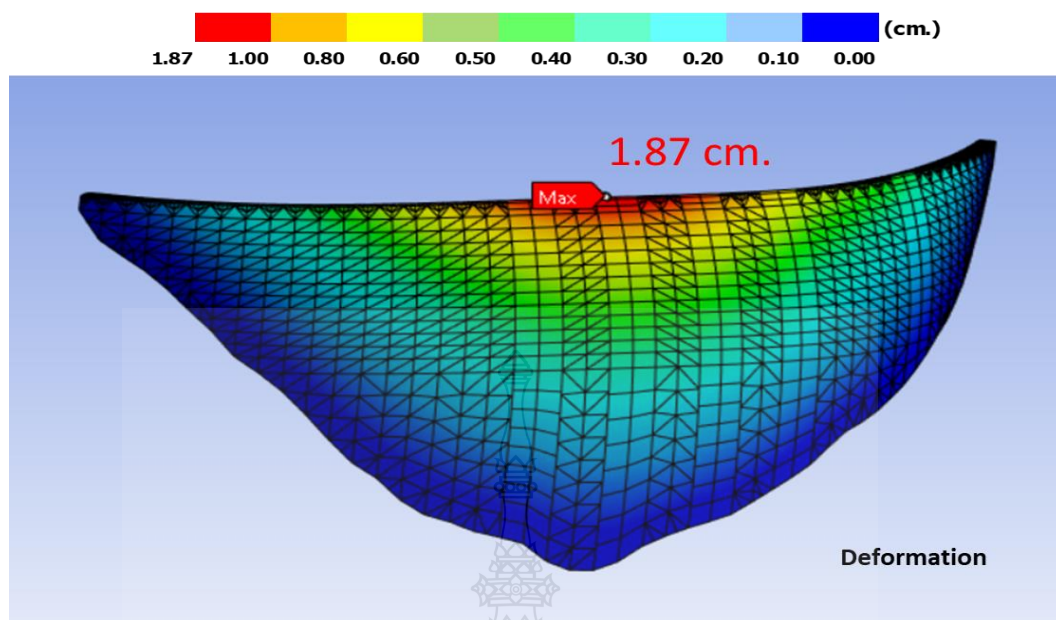
รายละเอียด	หน่วย	ผลการวิเคราะห์	
		เดือนที่ 1	เดือนที่ 12
ความร้อนสะสม	°C	32.52	33.49
ความเค้น	MPa	0.20	1.72
ความเครียด	-	21.5×10^{-6}	74.2×10^{-6}
การเสียรูป	cm.	0.90	1.27

พิจารณาจากระดับอุณหภูมิของปี ค.ศ. 2020 แสดงในรูปที่ 4.5 ช่วงของอุณหภูมิจะอยู่ที่ 32 – 41 °C นำมาวิเคราะห์ผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเขื่อนคอนกรีตรูปโค้ง ผลลัพธ์แสดงดังในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา โดยค่าความเครียดโดยรวมที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วง 21.5×10^{-6} ถึง 74.2×10^{-6} นอกจากนี้ความเค้นแรงดึงเดือนที่ 1 มีค่าเล็กน้อย และในเดือนที่ 12 มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด 1.72 MPa อีกทั้งเกิดการเสียรูปสูงสุดในบริเวณกึ่งกลางเขื่อนซึ่งมีค่า 1.27 cm.

4.3 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเขื่อนคอนกรีตรูปโค้งปีทีระดับกักเก็บน้ำในเขื่อนสูงสุด

สำหรับอุณหภูมิภายในปี ค.ศ. 2022 ระดับน้ำภายในเขื่อนที่สูงที่สุด ผลลัพธ์การเสียรูปของเขื่อนในทิศทางกระแสน้ำกระทำต่อเขื่อนฝั่งเหนือน้ำ (Upstream) และความเค้นในตัวเขื่อนที่เกิดขึ้นแสดงดังในรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.3





ค)

รูปที่ 4.6 แบบจำลองโมเดลแสดงผลการวิเคราะห์เขื่อนคอนกรีตรูปโค้งของปี 2022 ก) ความเค้นดึง
เหนือน้ำ ข) ความเค้นดึงท้ายน้ำ และ ค) การเสียรูปของเขื่อน

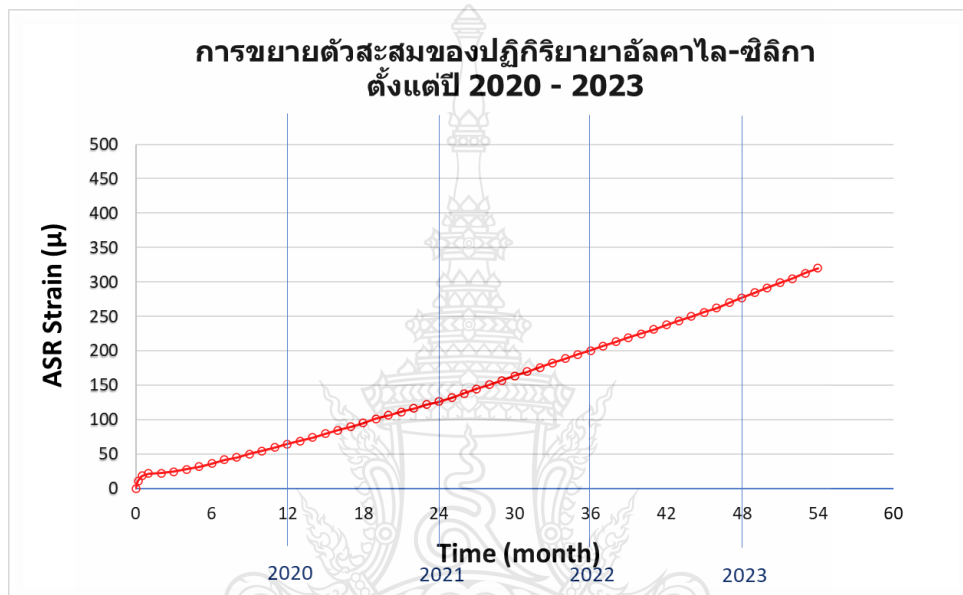
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเขื่อนคอนกรีตรูปโค้งปี 2022

รายละเอียด	หน่วย	ผลการวิเคราะห์	
		เดือนที่ 1	เดือนที่ 12
ความร้อนสะสม	°C	30.29	32.40
ความเค้น	MPa	0.92	2.51
ความเครียด	-	19.3×10^{-6}	59.8×10^{-6}
การเสียรูป	cm.	1.42	1.87

พิจารณาจากระดับอุณหภูมิของปี ค.ศ. 2022 แสดงในรูปที่ 4.6 ช่วงของอุณหภูมิจะอยู่ที่ 32 – 38 °C นำมาวิเคราะห์ผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเขื่อนคอนกรีตรูปโค้ง ผลลัพธ์แสดงดังในตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา โดยค่าความเครียดโดยรวมที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วง 19.3×10^{-6} ถึง 59.8×10^{-6} นอกจากนี้ความเค้นแรงดึงเดือนที่ 1 มีค่าเล็กน้อย และในเดือนที่ 12 มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด 2.51 MPa อีกทั้งเกิดการเสียรูปสูงสุดในบริเวณกึ่งกลางเขื่อนซึ่งมีค่า 1.87 cm.

4.4 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา

เมื่อพิจารณาการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2020 - 2023 จะเห็นได้ว่ายิ่งระยะเวลาเพิ่มขึ้น การขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งเกิดการขยายตัวของมวลโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นปีละ 70 μ และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นทุก ๆ ปี แสดงดังรูปที่ 4.7 ถึงแม้กระบวนการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา ต้องใช้เวลานาน แต่ปฏิกิริยาถึงผลกระทบที่อันตรายต่อโครงสร้างอย่างมาก



รูปที่ 4.7 การขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการจำลองผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเขื่อนคอนกรีตรูปโค้งภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและระดับน้ำ ในปี ค.ศ. 2020 เป็นปีที่ระดับน้ำในเขื่อนที่ต่ำที่สุด การวิเคราะห์คำนึงถึงการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา พบว่าเดือนที่ 1 อุณหภูมิสะสมในเขื่อน 32.52°C เกิดการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา 21.5×10^{-6} ความเค้น 0.20 MPa เขื่อนเกิดการเสียรูป 0.90 cm . ในขณะที่เดือนที่ 12 อุณหภูมิสะสมในเขื่อน 33.49°C เกิดการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา 74.2×10^{-6} ความเค้น 1.72 MPa เขื่อนเกิดการเสียรูป 1.27 cm . และในปี ค.ศ. 2022 เป็นปีที่ระดับน้ำในเขื่อนที่สูงที่สุด ในการวิเคราะห์คำนึงถึงการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา พบว่าเดือนที่ 1 อุณหภูมิสะสมในเขื่อน 30.29°C เกิดการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา 19.3×10^{-6} ความเค้น 0.92 MPa เขื่อนเกิดการเสียรูป 1.42 cm . ในขณะที่เดือนที่ 12 อุณหภูมิสะสมในเขื่อน 32.40°C เกิดการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา 59.8×10^{-6} ความเค้น 2.51 MPa เขื่อนเกิดการเสียรูป 1.87 cm . จึงสรุปได้ว่าค่าปัจจุบันผลกระทบของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาที่มีต่อเขื่อนคอนกรีตรูปโค้งเกิดขึ้นที่เล็กน้อย แต่หากพิจารณาการขยายตัวสะสมของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาในระยะยาว แสดงดังภาพที่ 4.7 การขยายตัวสะสมโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นปีละ $70\text{ }\mu\text{m}$ ปงชี้ถึงผลกระทบที่อันตรายต่อโครงสร้างอย่างมาก การบริหารจัดการระบบติดตาม ตรวจสอบพฤติกรรมความเสียหายของโครงสร้างอย่างใกล้ชิด เพื่อให้สามารถบำรุงรักษา (Maintain) ความสมบูรณ์ของโครงสร้างให้ได้ยาวนานที่สุด และเพื่อป้องกันปัญหาการขยายตัวของความเสียหายที่จะนำไปสู่การเพิ่มระดับความรุนแรง อันจะส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานที่อาจลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) การเสื่อมสภาพของโครงสร้างเนื่องจากการขยายตัวอัลคาไล-ซิลิกา เป็นการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ โดยใช้เวลาหลายสิบปีกว่าจะตรวจพบ อย่างไรก็ตามผลวิเคราะห์อายุการใช้นั้นอยู่ภายใต้สมมติฐานของทฤษฎีที่ใช้วิเคราะห์ สะท้อนพฤติกรรมจากแบบจำลองเท่านั้น ในขณะที่ความเสียหายสถานะการณ์จริงนั้นสามารถเกิดขึ้นจากปัจจัยอื่นร่วมด้วย เช่น ความแปรผันของระดับน้ำใต้ดิน ความรุนแรงของสภาพอากาศ ความเสื่อมของวัสดุอุดรอยต่อ เป็นต้น

2) ลิขสิทธิ์ของโปรแกรมที่จำกัดจำนวนเอลิเมนต์ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เพียงเป็นกรณีศึกษานั้น โดยการจำลองกรณีที่ต้องการความละเอียดมากกว่านี้ จึงไม่สามารถทำได้ โดยโปรแกรมสำเร็จรูปนั้นมีประโยชน์อย่างยิ่งในการทำงานวิจัยและพัฒนา

บรรณานุกรม

- [1] Blanco, A., Pardo-Bosch, F., Cavalaro, S., and Aguado, A. (2019). Lessons learned about the diagnosis of pathologies in concrete dams: 30 years of research and practice. *Construction and Building Materials*, 197, 356-368.
- [2] Dolen, T. P., Scott, G. A., von Fay, K. F., and Hamilton, B. (2003). Effects of concrete deterioration on safety of dams (Report No. DSO-03-05). US Department of Interior, Dam Safety Office, Bureau of Reclamation.
- [3] Sriprasong, T. (2020). Expansion Mechanism Associated with ASR and DEF and Numerical Analysis of Concrete Dam Time-dependent Deformation by ASR Expansion. [Doctor of Philosophy (Graduate School of Science & Engineering), Saitama University].
- [4] Electricity Generating Authority of Thailand. (2023). Water situation in the reservoir EGAT. https://water.egat.co.th/water_crisis.php
- [5] Wikipedia, Mueang Tak Thailand Weather Conditions (online), 2023, Available: <https://www.wunderground.com/weather/th/mueang-tak> (14 January 2023).
- [6] Wikipedia, Global Warming (online), 2023, Available: <https://workpointtoday.com/global-warming-2020/> (26 January 2023).
- [7] Dent Glasser, L. S., and Kataoka, N (1981), The chemistry of alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Research*, 11(1), pp. 1-9.
- [8] Bishnu P. G., Daman K. P., Shamim A. S. and Frank J. V. (2017). Effect of coarse aggregate grading on the ASR expansion and damage of concrete. *Cement and Concrete Research* 95, pp. 75–83. Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada.
- [9] Grymin W., Koniorczyk M., Pesavento F. and Gawin D. (2018). Macroscopic and mesoscopic approach to the alkali-silica reaction in concrete. Published by the American Institute of Physics.
- [10] Alaud S. and Zijl G. V. (2016). Effects on Concrete Properties by ASR Deterioration under Different Exposure Conditions. Department of Civil Engineering, Stellenbosch, South Africa.
- [11] คมชัดลึก. (2566). รูปภาพลักษณะเขื่อนฐานแผ่. สืบค้นจาก <https://www.komchadluek.net/kom-lifestyle/283438>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [12] แพเพเซอร์แมปิง. (2566). รูปภาพลักษณะเขื่อนโค้ง. สืบค้นจาก <https://www.parepeadmaeping.com/news/N0000001.html>
- [13] มติชนออนไลน์.(2566). รูปภาพลักษณะเขื่อนหินถม. สืบค้นจาก https://www.matichon.co.th/news-monitor/news_1681233
- [14] เนชั่น สตอรี่. (2566). รูปภาพลักษณะเขื่อนดินถม. สืบค้นจาก <https://www.nationtv.tv/news/378847323>
- [15] Thongthamchart C., Raphitphan N., Kontoengern J. and Chaowalittrakul N. (2016). Performance of Bhumibol concrete arch dam after 50 years of operation. Conference: ASIA2016 Hydropower and Dam. Geotechnical Engineering Research and Development Center, Kasetsart University, Thailand.
- [16] ส่วนความปลอดภัยเขื่อน สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา. (2566). รูปภาพเส้นชั้นการกระจายระดับอุณหภูมิตั้งแต่หน้าตัดเขื่อน. สืบค้นจากhttps://water.rid.go.th/hydhome/hydrology/option=com_content&view=category&layout=activity&id=2&Itemid=1.php
- [17] Sari U. C., Prabandiyani S., Wardani R., and Partono W. (2018). Influence of pore water pressure to seepage and stability of embankment dam (case study of Sermo Dam Yogyakarta, Indonesia). MATEC Web Conferences. 2018;Vol.101, Article Number.05007.
- [18] Joshi N. R., Sriprasong T., Asamoto S. and Sancharoen P. (2021). Time-Dependent Deformation of a Concrete Arch Dam in Thailand - Numerical Study on Effect of Alkali Silica Reaction on Deflection of Arch. Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 19, pp. 181-195.
- [19] ปราโมทย์ เดชะอา ไพ. (2555). ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: บริษัท วี.พริ้นท์ (1991)
- [20] จำกัฒเพิ่มศักดิ์ เกตุนาม. (2550). การออกแบบโหลดเซลล์โดยใช้วิธีวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม บัณฑิตมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- [21] Kiet, B. A. (2018). Finite element simulation of static structural behavior of a concrete arch dam. [Doctor of Philosophy (Engineering and Technology), Thammasat University]. https://digital.library.tu.ac.th/tu_dc/frontend/Info/item/dc:169585

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [22] Pourbehi M. S. (2018). Numerical Modelling of Alkali Silica Reaction in Concrete Dams. [Doctor of Philosophy (Engineering Civil Engineering), Stellenbosch University].
<https://scholar.sun.ac.za/server/api/core/bitstreams/d088a0a6-061d-44d7-b9cc-d4ca4723fcfa/content>
- [23] ACI_318-11, (2011). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI_318-11). American Concrete Institute
- [24] Google Earth. (2566). ภาพถ่ายดาวเทียมของเขื่อนภูมิพล. สืบค้นจาก
<https://earth.google.com/web/search/%e0%b9%80%e0%b8%82%e0%b8%b7%e0%b9%88%e0%b8%ad%e0%b8%99%e0%b8%a0%e0%b8%b9%e0%b8%a1%e0%b8%b4%e0%b8%9e%e0%b8%a5/@17.24301995,99.020052,146.92554559a,22202.20121053d,35y,0h,0t,0r/data=CigijgokCdkMZNipkzFAESOkIjKFOjFAGe45ZD3mvlhAIZmFIJ8JqVhAOgMKATA>



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ว่าที่ร้อยตรีชัยโรจน์ บุญลาภ
วัน เดือน ปีเกิด	7 เมษายน 2539
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2561 : วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผลงานทางวิชาการ	-
ประสบการณ์ทำงาน	2561 - 2564 วิศวกรโยธา (วิศวกรสนาม) บริษัท ไทยนิคมิตส์ ก่อสร้าง จำกัด 2565 วิศวกรโยธา (ผู้ช่วยวิศวกรออกแบบ) ศูนย์ความเป็นเลิศด้านโครงสร้างพื้นฐานและ เทคโนโลยีท่าอากาศยาน (CEIA) 2566 - ปัจจุบัน วิศวกรโยธา (วิศวกรสนาม) บริษัท ศุภาลัย จำกัด (มหาชน)
เบอร์โทรศัพท์	0953639997
อีเมล	Chairoj_Civil@hotmail.com

