# คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของประตูระบายน้ำล้น
# Dynamic Properties of a Spillway Radial Gate

**ราชันย์ ขันทกสิกรรม[1,*] พุทธรักษ์ จรัสพันธุ์กุล[2] และ ชยานนท์ หรรษภิญโญ[3]**

*[1] นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่*
*[2, 3] ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการภัยพิบัติทางธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่*
**Corresponding author; E-mail address: Rachan_ka@cmu.ac.th*

## บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของประตูระบายน้ำจากแผ่นดินไหว ปัจจุบันนอกเหนือจากการประเมินความปลอดภัยของเขื่อนแล้วยังจำเป็นต้องพิจารณาความปลอดภัยของอาคารประกอบเขื่อนและอุปกรณ์ต่างๆ ร่วมด้วย เนื่องจากความผิดปกติของอาคารประกอบเขื่อนหรืออุปกรณ์ต่างๆ อาจส่งผลทำให้เกิดการพิบัติของเขื่อนหรือก่อให้เกิดความสูญเสียอย่างใหญ่หลวงต่อพื้นที่ท้ายน้ำ สำหรับการศึกษานี้มุ่งเป้าไปที่ประตูระบายน้ำ เนื่องจากเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างยิ่งในอาคารระบายน้ำ หากมีความเสียหายเกิดขึ้นจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวอาจจะส่งผลทำให้ไม่สามารถกักเก็บหรือควบคุมน้ำในอ่างกักเก็บได้และก่อให้เกิดน้ำท่วมแบบฉับพลันในบริเวณพื้นที่ท้ายน้ำ ในการศึกษาครั้งนี้ประตูระบายน้ำตัวแทนที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้ทำการคัดเลือกมาจากพื้นที่ในเขตภาคเหนือตอนบน โดยนำมาสร้างแบบจำลองจากนั้นทำการวิเคราะห์การตอบสนองไม่เชิงเส้นแบบประวัติเวลา (Nonlinear Response Time-History Analysis) ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวที่สอดคล้องกับแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา (Maximum Considered Earthquake, MCE) ตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1302-61) สำหรับผลการวิเคราะห์จากการศึกษานี้ได้นำเสนอคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของประตูระบายน้ำรวมถึงข้อสังเกตในด้านความปลอดภัยของเขื่อนจากแผ่นดินไหวร่วมด้วย

คำสำคัญ: การวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์, ความปลอดภัยจากแผ่นดินไหว, ประตูระบายน้ำ, แผ่นดินไหว

## Abstract

This paper presents the dynamic properties of a spillway radial gate. Recently, the seismic safety evaluation of the dam itself seems to be insufficient because the damage or failure of dam relevant structures and their equipment could bring about the dam failure and cause disastrous losses to the cities located downstream. Hence, the seismic safety of the dam relevant structures and their relate equipment must be taken into account. This study focuses on a spillway radial gate since it plays an important role to a dam spillway. Besides, any damage of a spillway radial gate may cause severe losses owing to flash flood caused by the uncontrollable release of the reservoir water. In this study, the representative spillway radial gate is selected from the dam located in Northern Thailand. The nonlinear response history analysis of the spillway radial gate is performed using finite element analysis. For the input motions, the maximum considered Earthquake (MCE) were considered. The earthquake records were then selected following Thailand, Seismic design criteria in National Standard DPT1302-6. Therefore, the dynamic properties of a spillway radial gate is then presented along with the note on the seismic safety of a spillway radial gate.

Keywords: Dynamic, Seismic safety, Spillway radial gate, Earthquake

## 1. บทนำ

ความเสียหายและการสูญเสียที่เกิดจากการพังทลายของเขื่อนนั้นมีความสำคัญอย่างมากเพราะการพังทลายของเขื่อนส่งผลกระทบต่อความอยู่รอดของชุมชนท้ายน้ำ นอกจากนี้เขื่อนยังเป็นแหล่งทรัพยากรน้ำและแหล่งพลังงานที่สำคัญ ทุกวันนี้ความปลอดภัยของเขื่อนจากแผ่นดินไหวได้รับความสนใจและได้รับการประเมินตรวจสอบเป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามการศึกษาความปลอดภัยจากแผ่นดินไหวของอาคารประกอบเขื่อนเช่น ศูนย์ควบคุม ประตูระบายน้ำ และอาคารระบายน้ำล้นจึงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็น

ในบางครั้งการทำงานของเขื่อนอาจไม่สามารถดำเนินการต่อไปได้หลังเกิดแผ่นดินไหว เนื่องจากอาคารประกอบเขื่อนได้รับความเสียหาย นอกจากนี้ความเสียหายของอาคารประกอบเขื่อนอาจนำไปสู่การพังทลายของเขื่อนและความเสียหายต่อชุมชนท้ายน้ำ ตัวอย่างเช่นความเสียหายของ

ประตูระบายน้ำและศูนย์ควบคุมอาจทำให้เขื่อนปิดทำการ เนื่องจากปัญหาด้านความปลอดภัยและทำให้ไม่สามารถควบคุมการปล่อยน้ำได้

นักวิจัยหลายคนได้เสนอมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวสำหรับโครงสร้างดังกล่าว ตัวอย่างเช่น Wieland(2012)และ ICOLD(2002) [1-2] กล่าวว่าการออกแบบโครงสร้างดังกล่าวภายใต้แรงแผ่นดินไหวต้องทำให้มั่นใจว่าส่วนประกอบและอุปกรณ์ของโครงสร้างดังกล่าวต้องสามารถใช้งานได้ในระหว่างเกิดและหลังเกิดแผ่นดินไหว

ในปี ค.ศ.1996 องค์กรวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบจากภัยแผ่นดินไหวของประเทศสหรัฐอเมริกา (Applied Technology Council) ได้ตีพิมพ์คู่มือการออกแบบโครงสร้างอาคารภายใต้แรงแผ่นดินไหว (seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, ATC-40) [3] ซึ่งมีการให้คำแนะนำการออกแบบอาคารภายใต้แรงแผ่นดินไหวและรายละเอียดเกี่ยวกับการวิเคราะห์และการประเมินความปลอดภัยของอาคารจากแผ่นดินไหว วิธีการออกแบบตามประสิทธิภาพ ให้ข้อมูลเกี่ยวกับพฤติกรรมของโครงสร้างอาคารภายใต้ระดับการสั่นไหวที่สอดคล้องกับค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารเป้าหมาย

โดยทั่วไปข้อกำหนดและมาตรฐานการประเมินโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่อาคารทั่วไป แม้ว่าบางข้อกำหนดอาจให้แนวคิดการออกแบบเพิ่มเติมเพื่อประเมินความปลอดภัยจากแผ่นดินไหวของโครงสร้างที่สำคัญอื่น ๆ แต่สำหรับอาคารประกอบเขื่อนยังไม่ได้รับความสนใจในการใช้ข้อกำหนดดังกล่าว ในปี ค.ศ.2000 งานวิจัยของ Wendy และ Colin [4] ได้นำเสนอการประเมินความปลอดภัยของประตูโค้งบนสันฝาย (spillway radial gate)โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ในรูปแบบ 3 มิติ จากแรงแผ่นดินไหวที่เขื่อน Kilmorack เพื่อศึกษาเกี่ยวกับความอ่อนแอของประตูเมื่อเกิดแผ่นดินไหวและเพื่อกำหนดวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์คลื่นไหวสะเทือนของประตู และสามารถนำผลการวิเคราะห์ไปใช้กับประตูระบายน้ำล้นที่อื่นที่คล้ายคลึงกัน ส่วนในประเทศไทย เจนคณิต [5-6] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์และประเมินความปลอดภัยของโครงสร้างอาคารระบายน้ำล้นเขื่อนกิ่วคอหมาจากแผ่นดินไหว โดยทำการวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างไม่เชิงเส้นแบบประวัติเวลา (Nonlinear Response History Procedure) ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อประเมินความปลอดภัยของโครงสร้างอาคารระบายน้ำล้นจากแรงแผ่นดินไหว อย่างไรก็ตามการศึกษาดังกล่าวยังไม่ได้ประเมินความเสียหายของประตูระบายน้ำล้นในเขื่อนเดียวกัน

ในประเทศไทยเกณฑ์การออกแบบอาคารภายใต้แรงแผ่นดินไหวได้ถูกกำหนดไว้ใน มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1302) [7-8] ได้กำหนดระดับแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา (Maximum Considered Earthquake, MCE) ที่มีโอกาสเกิดขึ้นน้อยที่รอบการเกิดซ้ำ 2475 ปี และ ระดับแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ (Design Basis Earthquake, DBE) ที่รอบการเกิดซ้ำ 475 ปี โดย DBE คือ 2/3 ของ MCE

อย่างไรก็ตามระดับป้องกันการพังทลายอาจป้องกันไม่ให้สิ่งปลูกสร้างพังทลายเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงระดับสมรรถนะของอาคารประกอบเขื่อนจะต้องอยู่ในระดับปฏิบัติงานได้

มีรายงานแผ่นดินไหวในระดับปานกลางถึงใหญ่ในภาคเหนือของประเทศไทย เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม ปี ค.ศ. 2014 แผ่นดินไหวขนาด 6.1 ที่แม่ลาวและบริเวณทางตอนเหนือของประเทศไทยและพม่า แผ่นดินไหวทำให้เกิดผู้เสียชีวิตและความเสียหายต่ออาคารถนนและวัด เหตุการณ์ครั้งนี้เป็นแผ่นดินไหวที่รุนแรงที่สุดที่เคยบันทึกไว้ในประเทศไทย [9-10]

ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้คือเพื่อเสนอแนวทางในการประเมินความปลอดภัยของแผ่นดินไหวต่อโครงสร้างประตูระบายน้ำล้นซึ่งส่วนประกอบที่สำคัญอย่างยิ่งในอาคารระบายน้ำ เนื่องจากหากมีความเสียหายเกิดขึ้นจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวอาจจะส่งผลทำให้ไม่สามารถกักเก็บหรือควบคุมน้ำในอ่างกักเก็บได้และก่อให้เกิดน้ำท่วมแบบฉับพลันในบริเวณพื้นที่ท้ายน้ำ เพื่อให้แน่ใจว่าประตูระบายน้ำสามารถทำงานได้ตามปกติหลังจากเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ในอนาคต

## 2. ประตูระบายน้ำล้นเขื่อนกิ่วคอหมาและคลื่นแผ่นดินไหว

เขื่อนที่ถูกเลือกในการศึกษาครั้งนี้คือเขื่อนกิ่วคอหมา ซึ่งเป็นเขื่อนดินที่ตั้งอยู่ใน อำเภอแจ้ห่ม จังหวัดลำปาง (ละติจูด 18–48 '- 24” N, ลองจิจูด 99-38-48” E) โดยเขื่อนแห่งนี้ใช้กักเก็บน้ำจากแม่น้ำวังซึ่งเป็นสายหนึ่งของแม่น้ำเจ้าพระยาซึ่งอยู่ห่างจากลำปาง 61 กิโลเมตรไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ เขื่อนแห่งนี้ตั้งอยู่ ห่างจากต้นกำเนิดแผ่นดินไหวแม่ลาวปี พ.ศ. 2557เป็นระยะ 90 กิโลเมตร การก่อสร้างเขื่อนเริ่มต้นขึ้นในปี พ.ศ. 2548 และเสร็จสมบูรณ์ในปี พ.ศ. 2553 เขื่อนนี้ไม่เพียงแต่สร้างขึ้นเพื่อป้องกันน้ำท่วมแต่ยังให้น้ำเพื่อการชลประทานการบริโภคของมนุษย์และการใช้ในอุตสาหกรรมในจังหวัดลำปาง ตัวเขื่อนมีความจุ 170 ล้านลูกบาศก์เมตร เขื่อนกิ่วคอหมามีอาคารประกอบเขื่อน 3 ส่วนได้แก่ อาคารระบายน้ำล้น อาคารระบายน้ำลงลำน้ำเดิม และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [11] ในการศึกษานี้จากข้อมูลที่มีอยู่และความสำคัญของเขื่อนเขื่อนแห่งนี้ได้คัดเลือกประตูระบายน้ำล้นเพื่อทำการประเมินความปลอดภัยภายใต้แรงแผ่นดินไหว

### *2.1 ประตูระบายน้ำล้น*

อาคารระบายน้ำล้นตั้งอยู่ทางด้านขวาของเขื่อนหลัก (มองจากทางต้นน้ำ)ดังแสดงในรูปที่ 1 อาคารดังกล่าวเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ความยาวโดยรวมของอาคารระบายน้ำล้นคือ 800 เมตร และความกว้างของช่องระบายน้ำคือ 42.5 ม. ความจุสูงสุดของการกักเก็บน้ำคือ 352.90 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง (MSL) อาคารสามารถระบายน้ำได้สูงสุด 1,209 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เพื่อรองรับอัตราการระบายน้ำรอบการเกิดซ้ำ 1,000 ปี [11] อาคารดังกล่าวติดตั้งประตูระบายน้ำล้นเป็นแบบประตูโค้งบนสันฝาย (spillway radial gate) มีขนาดของแผ่นเหล็กกั้นน้ำคือ 12.5 x 7.00 เมตรและรัศมีของแขนนับจากจุดหมุดถึงแผ่นเหล็กกั้นน้ำคือ 10 เมตร ติดตั้งจำนวน 3 บาน ดังแสดงในรูปที่ 2




**รูปที่ 1** เขื่อนกิ่วคอหมาและอาคารระบายน้ำ(cite https://www.google.co.th/maps/ place/hl=th)



**รูปที่ 2** อาคารระบายน้ำล้นเขื่อนกิ่วคอหมา

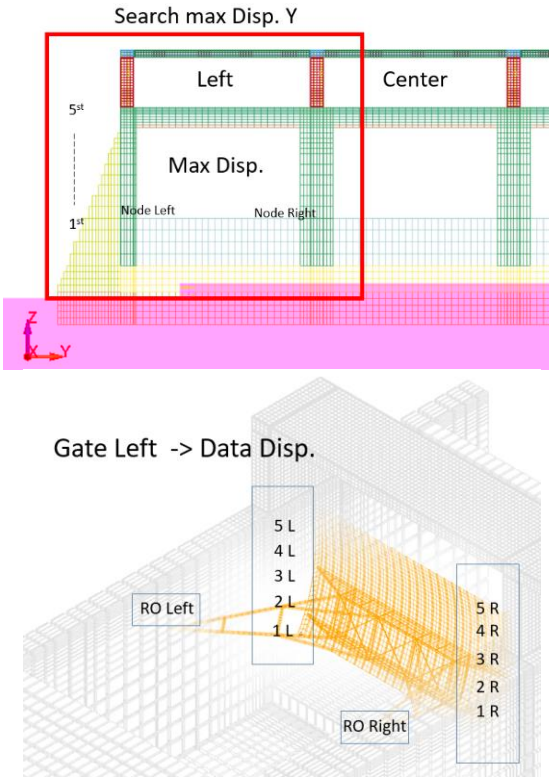


**รูปที่ 3** ประตูระบายน้ำล้น(spillway radial gate)

*2.2 การเคลื่อนที่ที่กระทำกับประตูระบายน้ำล้นจากแผ่นดินไหว*

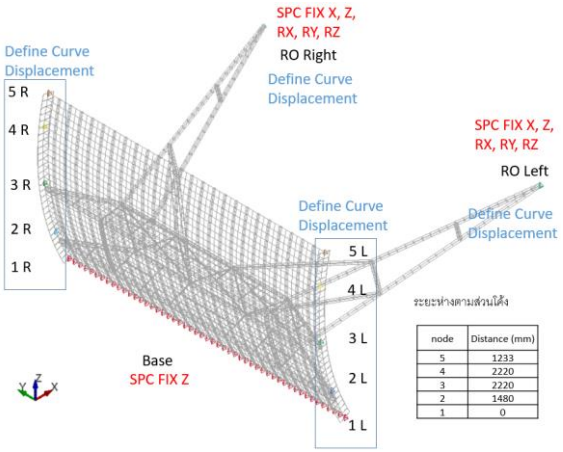
แผ่นดินไหวที่นำมาพิจารณาในการศึกษานี้มีรอบการเกิดซ้ำที่ 2475 ปี (MCE) สำหรับพื้นที่ที่ศึกษามีรอยเลื่อนมีพลังหลายแห่งที่ตั้งอยู่ใกล้กับเขื่อนกิ่วคอหมา รอยเลื่อนที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือรอยเลื่อนพะเยาซึ่งเป็นรอยเลื่อนแบบรอยเลื่อนปกติ(normal fault)ซึ่งอยู่ใกล้เขื่อนมากที่สุด รอยเลื่อนดังกล่าวอยู่ห่างจากเขื่อนกิ่วคอหมาคือ 20 กิโลเมตร ในขณะที่รอยเลื่อนที่ถูกนำมาใช้งานโดยทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 100 กิโลเมตร จากเขื่อน [8] สำหรับระดับสมรรถนะของอาคารระบายน้ำล้นที่เกิดขึ้นภายใต้แผ่นดินไหว MCE ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขต่อไปนี้ ส่วนประกอบโครงสร้างของอาคารระบายน้ำล้นทั้งหมดจะต้องอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์และสามารถควบคุมการปล่อยน้ำในอ่างเก็บน้ำได้

เนื่องจากการขาดการบันทึกข้อมูลของคลื่นแผ่นดินไหวในประเทศไทย งานวิจัยนี้จึงได้ทำการใช้ข้อมูลจากงานวิจัยการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ของอาคารระบายน้ำล้นเขื่อนกิ่วคอหมาของ เจนคณิต [5-6] ที่ได้ทำการเลือกคลื่นแผ่นดินไหวที่นำมาวิเคราะห์พิจารณาจากแผ่นดินไหวที่คาดว่าจะเกิดขึ้นได้ในพื้นที่อาคารระบายน้ำล้นเขื่อนกิ่วคอมหมา โดยการดัดแปลงคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นทั่วโลก ที่มีขนาด ลักษณะการเกิดและลักษณะอื่นๆ ที่มีลักษณะของค่าสเปกตรัมใกล้เคียงกับพื้นที่วิเคราะห์ นำมาปรับค่าตามสเปกตรัมตอบสนองตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ. 1302) [7] โดยพิจารณาเลือกคลื่นแผ่นดินไหวมา 3 คลื่น จากลักษณะของรอยเลื่อน, ระยะทาง, ขนาดแผ่นดินไหว และค่าอัตราเร่ง งานวิจัยนี้ได้ใช้ผลการเคลื่อนที่จากการวิเคราะห์โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวที่ให้ผลรุนแรงที่สุดมาพิจารณา

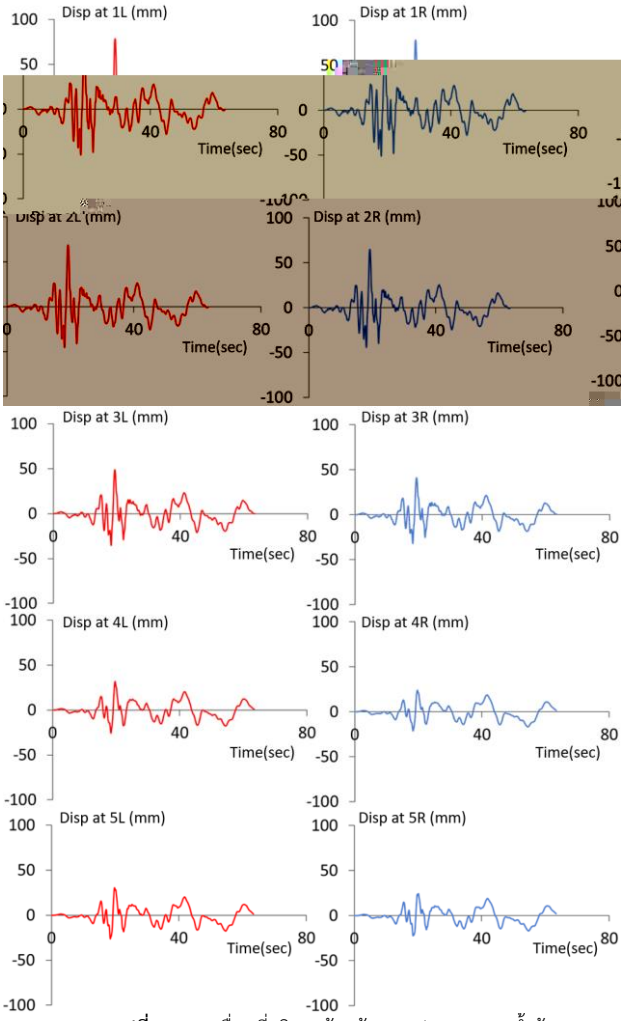



**รูปที่ 4** บริเวณที่ประตูระบายน้ำล้นสัมผัสอาคารระบายน้ำล้น

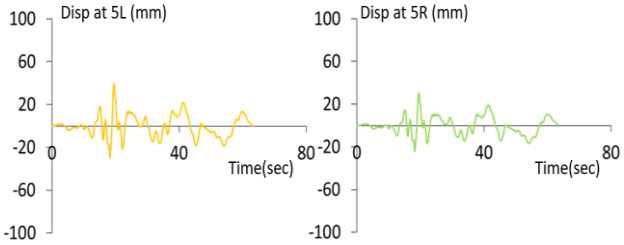
สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองประตูระบายน้ำล้นเขื่อนกิ่วคอหมาผ่านโปรแกรม LS-DYNA ได้นำการเคลื่อนที่ที่ผนังบริเวณที่ติดกับประตูระบายน้ำล้น และจุดรองรับแขนประตู งานวิจัยนี้จึงนำข้อมูลการเคลื่อนที่ที่บริเวณดังกล่าวมาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายของประตูระบายน้ำล้นโดยเลือกประตู 1 บานจาก 3 บานที่เกิดค่าการเคลื่อนที่สูงสุด(แสดงในรูปที่ 4) จากนั้นใส่ค่าการเคลื่อนที่บริเวณด้านข้างของประตูระบายน้ำล้น 2 ข้าง ข้างละ 5 ตำแหน่ง และ บริเวณจุดรองรับแขนประตูทั้ง 2 ข้าง ดังแสดงในรูปที่ 5 รายละเอียดค่าการเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งต่างๆบนประตูระบายน้ำล้นดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7




**รูปที่ 5** บริเวณที่ใส่ค่าการเคลื่อนที่บนประตูระบายน้ำล้น




**รูปที่ 6** การเคลื่อนที่บริเวณด้านข้างของประตูระบายน้ำล้น

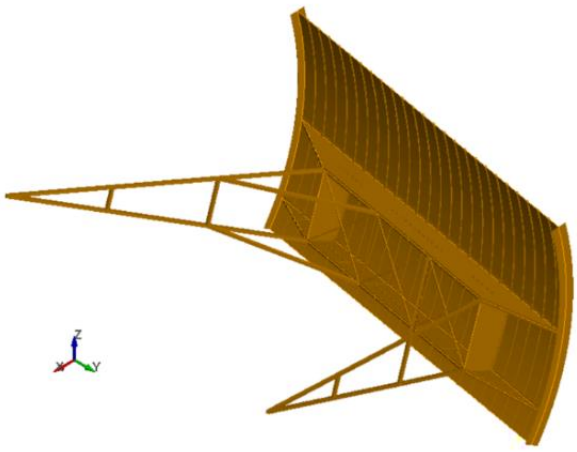



**รูปที่ 7** การเคลื่อนที่บริเวณจุดจุดรองรับแขนประตูทั้ง 2 ข้าง

## 3. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

*3.1 แบบจำลองประตูระบายน้ำล้น*

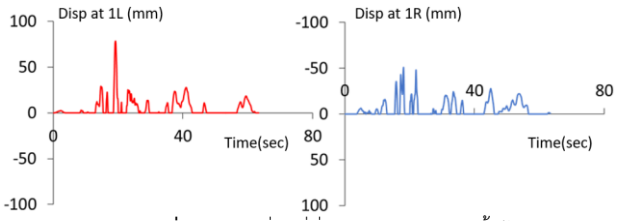
การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ถูกใช้ผ่านโปรแกรม LS-DYNA [12] โดยเป็นแบบจำลอง 3 มิติของประตูระบายน้ำล้นที่ใช้องค์ประกอบของบานประตูกั้นน้ำซึ่งเป็นแผ่นเหล็กโค้งใช้เป็น ELEMENT_SHELL สำหรับองค์ประกอบของแขนประตูและโครงถักที่เชื่อมกับบานประตูซึ่งเป็นเหล็กรูปพรรณใช้เป็น ELEMENT_BEAM โดยพิจารณาถึงการยึดเกาะที่สมบูรณ์แบบระหว่าง ELEMENT_SHELLกับ ELEMENT_BEAM สำหรับคุณสมบัติของวัสดุซึ่งเป็นเหล็กทั้งหมดจะทำการสันนิษฐานว่ามีพฤติกรรมแบบเชิงเส้น (MAT_ELASTIC) แบบจำลองประกอบด้วยองค์ประกอบของ ELEMENT_SHELL และELEMENT_BEAM จำนวน 1875 และ 1458 ชิ้นส่วน ตามลำดับ มีจุดต่อ (Node) ทั้งหมด 3645 จุดต่อ และกำหนดเงื่อนไขการเคลื่อนที่ดังต่อไปนี้ คือ ที่บริเวณสันฝายจำกัดการเคลื่อนที่ในทิศทางแกน Z, บริเวณด้านข้างของประตูทั้ง 2 ฝั่ง จำกัดการเคลื่อนที่ในทิศทางแกน X และ บริเวณจุดหมุดตรงปลายสุดของแขนประตูทั้ง 2 ข้าง จำกัดการเคลื่อนที่ในทุกทิศทาง โดยแบบจำลองสามมิติของประตูระบายน้ำล้นนั้นแสดงในรูปที่ 8



**รูปที่ 8** แบบจำลองสามมิติประตูระบายน้ำล้น

**รูปที่ 9** ส่วนประกอบของประตูระบายน้ำล้น

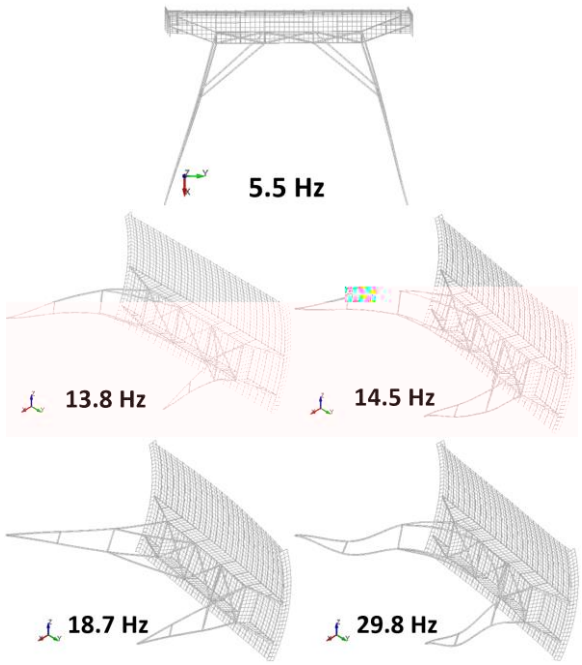
สำหรับรายละเอียดของเหล็กโครงสร้างของประตูระบายน้ำล้นมีองค์ประกอบขององค์อาคารเหล็กรูปพรรณ ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยส่วนของแขนประตูใช้วัสดุเป็นเหล็กรูปพรรณแบบ




**รูปที่ 10** การเคลื่อนที่ที่มีผลกับประตูระบายน้ำล้น

## 4. ความถี่ธรรมชาติและลักษณะการสั่นไหว

จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรม LS-DYNA พบว่าลักษณะการสั่นสะเทือน(Mode Shape)ในรูปแบบที่ 1 เกิดความอ่อนไหวมากที่สุดเกิดขึ้นในทิศทางแกน y หรือตามแนวการเคลื่อนที่สูงสุดของประตูระบายน้ำล้นซึ่งมีค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 5.50 Hz ส่วนค่าความถี่ธรรมชาติของลักษณะการสั่นสะเทือนในรูปแบบที่ 2 มีค่าเท่ากับ 13.8 Hz มันเป็นลักษณะการดัดรอบแกน y มีความอ่อนไหวสูงสุดอยู่ที่แขนของประตูทั้ง 2 ข้าง ส่วนค่าความถี่ธรรมชาติของลักษณะการสั่นสะเทือนในรูปแบบที่ 3 มีค่าเท่ากับ 14.5 Hz มันเป็นลักษณะการดัดรอบแกน x มีความอ่อนไหวสูงสุดอยู่ที่แขนของประตูทั้ง 2 ข้าง จากนั้นค่าความถี่ธรรมชาติของลักษณะการสั่นสะเทือนในรูปแบบที่ 4 มีค่าเท่ากับ 18.7 Hz มันเป็นลักษณะการดัดรอบแกน y มีความอ่อนไหวสูงสุดอยู่ที่บริเวณส่วนบนของแผ่นเหล็กประตู และค่าความถี่ธรรมชาติของลักษณะการสั่นสะเทือนในรูปแบบที่ 5 มีค่าเท่ากับ 29.8 Hz มันเป็นลักษณะการดัดรอบแกน y มีความอ่อนไหวสูงสุดอยู่ที่แขนของประตูทั้ง 2 ข้าง โดยที่แขนของประตูทั้ง 2 ข้าง เกิดจุดดัดกลับ 2 ตำแหน่ง ลักษณะการสั่นสะเทือนของประตูระบายน้ำล้นในรูปแบบต่างๆถูกแสดงดังรูปที่ 11

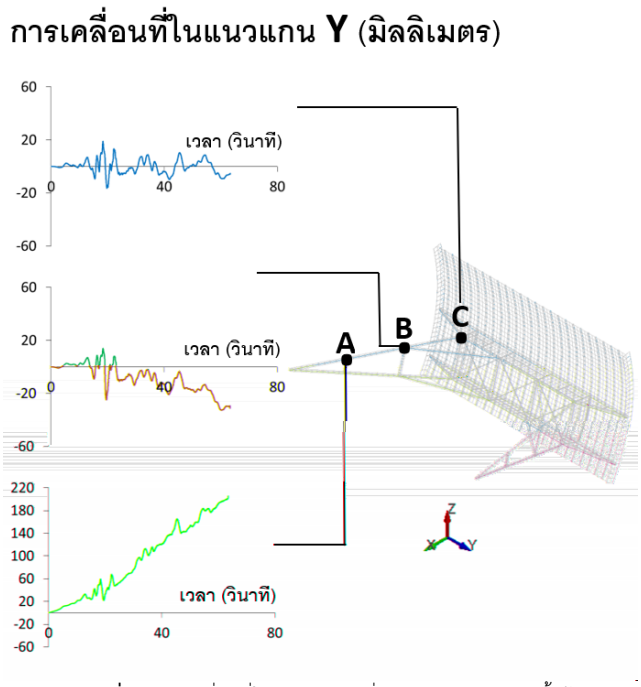



**รูปที่ 11** ความถี่ธรรมชาติและการสั่นไหว

## 5. ผลการวิเคราะห์

*5.1 พฤติกรรมของประตูระบายน้ำล้นภายใต้แรงแผ่นดินไหว*

จากการวิเคราะห์พบว่าการตอบสนองของโครงสร้างประตูระบายน้ำล้นเขื่อนกิ่วคอหมามีการสั่นไหวของโครงสร้างมากที่สุดที่บริเวณแขนทั้ง 2 ข้าง โดยแสดงการเสียรูปจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์เทียบกับจุดรองรับแขนประตู ดังแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งแสดงการพล็อตเวลากับการเคลื่อนที่สำหรับจุด A,B และ C เมื่ออยู่ภายใต้การเคลื่อนที่จากแบบจำลองอาคารระบายน้ำล้นของเจนคณิต [5-6] จากกรณีการวิเคราะห์ทั้งหมดพบว่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงสุดเฉลี่ย Uy คือ 20.6 เซนติเมตร ซึ่งสามารถพบได้ที่บริเวณปลายแขนใกล้จุดรองรับแขนประตู (จุด A)



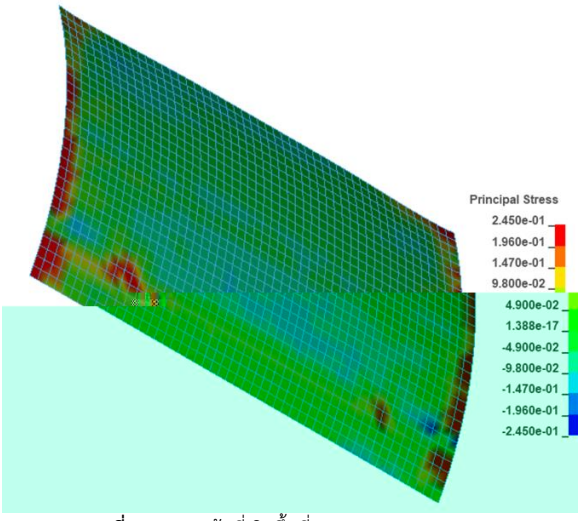

**รูปที่ 12** การเคลื่อนที่ในแนวแกน Y ที่แขนของประตูระบายน้ำล้น

*5.2 ความเสียหายของประตูระบายน้ำล้น*

ความเสียหายของโครงสร้างประตูระบายน้ำล้นนั้นที่ส่วนของบานโค้งประตูถูกจำลองมาจาก ELEMENT_SHELL สามารถเปรียบเทียบค่าอ้างอิงจากกำลังคราก (Yield Stress) ที่รับได้กับค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นกับบานประตู ดังแสดงในตารางที่ 4 และ รูปที่ 13

**ตารางที่ 4** เปรียบเทียบกำลังของบานประตู

| ส่วนประกอบ | กำลังคราก(GPa) | ความเค้นสูงสุด(GPa) |
|---|---|---|
| บานประตู | 0.245 | 0.879 |

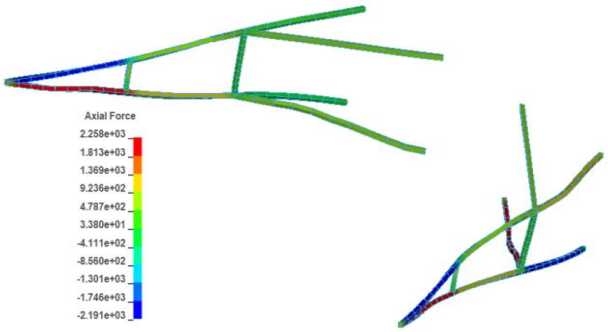



**รูปที่ 13** ความเค้นที่เกิดขึ้นที่บานประตู (Principal Stress)

ความเสียหายในส่วนขององค์ประกอบขององค์อาคารเหล็กรูปพรรณนั้นจะพิจารนาในส่วนของแขนประตูทั้ง 2 ข้าง (H250x250x14 mm) ซึ่งเป็นส่วนที่มีการสั่นไหวสูงสุดโดยถูกจำลองมาจาก ELEMENT_BEAM สามารถเทียบค่าอ้างอิงจากแรงดึง (Tensile Force) และแรงอัด (Compression Force) สูงสุดตามแนวแกน (Axial Force) ที่แต่ละหน้าตัดสามารถรับได้โดยคำนวณมาจากคุณสมบัติของเหล็กรูปพรรณตามมาตรฐาน มอก. 1227-2539 ชั้นคุณภาพ SS400 กับค่าแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ (Axial Force Resultant) สูงสุดที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นส่วนของเหล็กรูปพรรณ ดังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 14

**ตารางที่ 5** เปรียบเทียบแรงตามแนวแกนของแขนประตู

| ส่วนประกอบ | กำลังรับแรงดึง(kN) | แรงดึงสูงสุด (kN) | กำลังรับแรงอัด(kN) | แรงอัดสูงสุด (kN) |
|---|---|---|---|---|
| แขนประตู | 2258.4 | 5383.5 | 2901.8 | 3516.3 |




**รูปที่ 14** แรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นที่แขนประตู (Axial Force)

## 6. บทสรุป

สำหรับผลการวิเคราะห์จากงานวิจัยนี้ได้นำเสนอคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของประตูระบายน้ำล้นโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ความถี่ธรรมชาติของประตูระบายน้ำล้น(spillway radial gate)ในรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานมีรูปแบบการเคลื่อนที่ในแนวแกน y มีค่าเท่ากับ 5.5 Hz เมื่อนำค่าความถี่ธรรมชาติไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Wendy และ Colin [4] ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับค่าความถี่ธรรมชาติของประตูระบายน้ำล้นแบบโค้งบนสันฝาย (spillway radial gate)ที่เชื่อน Kilmorack โดยประตูระบายน้ำล้นดังกล่าวมีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกับประตูระบายน้ำล้นที่เขื่อนกิ่วคอหมา พบว่าค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นไหวในรูปแบบต่างๆ 5 รูปแบบแรกมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 6

**ตารางที่ 6** ค่าเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติ

| No.Mode Shape | Frequencies (Hz) | | |
|---|---|---|---|
| | Kilmorack Dam | | Kiew Kho Ma Dam |
| | Tests | Model | model |
| 1 | 7.4 | 6.3 | 5.5 |
| 2 | 14.6 | 13.6 | 13.8 |
| 3 | 14.0 | 13.9 | 14.5 |
| 4 | 19.8 | 18.9 | 18.7 |
| 5 | 25.5 | 22.8 | 29.8 |

การที่ค่าความถี่ธรรมชาติของประตูระบายน้ำล้นที่เขื่อนกิ่วคอหมามีค่าใกล้เคียงกับประตูระบายน้ำล้นที่เขื่อน Kilmorack นั้นแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของประตูระบายน้ำล้นที่เขื่อนกิ่วคอหมามีความน่าเชื่อถือและใช้เป็นตัวแทนของประตูระบายน้ำล้นจริงได้

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมของประตูระบายน้ำล้นภายใต้แรงแผ่นดินไหวนั้นพบว่าบริเวณปลายแขนใกล้จุดรองรับแขนประตู (จุด A) เกิดการเคลื่อนที่มากที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าส่วนแขนของประตูใกล้จุดรองรับเป็นจุดอ่อนแอที่สุดของประตูระบายน้ำล้น

ความเสียหายของประตูระบายน้ำล้นหลังจากการวิเคราะห์พบว่าทั้งส่วนของบานโค้งประตูและส่วนขององค์ประกอบขององค์อาคารเหล็กรูปพรรณนั้นมีหลายชิ้นส่วนที่เกินกำลังของวัสดุที่จะรับได้ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีความไม่สมบูรณ์จึงต้องทำการการวิจัยต่อ โดยอาจมีการเปลี่ยนเงื่อนไขที่บริเวณสันฝายและจุดรองรับแขนประตูทั้ง 2 ข้าง และมีการเปลี่ยนแบบจำลองคุณสมบัติของวัสดุที่ปัจจุบันสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการคืนรูปแบบอิลาสติก (elastic behavior) ได้เพียงอย่างเดียว ไม่สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุเมื่อเกิดหน่วยแรงเค้นที่เกินกำลังคราก (Yield Stress) ไปแล้วได้ และอาจมีการเปลี่ยนจากการใส่ค่าการเคลื่อนที่ลงบนแบบจำลองประตูระบายน้ำล้นมาเป็นการใส่ค่าแรงลงบนแบบจำลองประตูระบายน้ำล้นแทน เนื่องจากแรงจะทำให้เกิดแรงปฏิกิริยา

(Reaction) จากประตูระบายน้ำล้นกระทำกับผนังกำแพงของอาคารระบายน้ำล้น ทำให้พฤติกรรมของแบบจำลองประตูระบายน้ำล้นใกล้เคียงกับความเป็นจริงยิ่งขึ้น

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยงานนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยแห่งประเทศไทย (MRG6080109)

ขอแสดงความขอบคุณต่อ รองศาสตราจารย์ ดร. สุทธิศักดิ์ ศรลัมพ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและข้อแนะนำในหัวข้องานวิจัยนี้

## เอกสารอ้างอิง

[1] ICOLD (2002). Seismic design and evaluation of structures appurtenant to dams. *Commission Internationale des Grands Barrages. Bulletin 123.*

[2] Wieland (2012). Seismic Hazard and Seismic Design and Safety Aspects of Large Dam Projects. *Geological and Earthquake Engineering 34.*

[3] Applied Technology Council (1996). Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings (ATC 40). *Seismic safety commission state of California. Inc.*

[4] Wendy, E. and Colin, T. (2000). Seismic analysis and dynamic testing of a spillway radial gate, *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zeland, Sunday 30 January - Friday 4 February 2000.

[5] Bhuddarak, C., Chayanon, H. and Junji, K. (2020). seismic analysis of dam–relevant structures in Northern Thailand, *International Journal of GEOMATE*, Jan., 2020, Vol.18, Issue 65, pp. 94-101, ISSN: 2186-2982 (P), 2186-2990 (O), Japan, DOI: https://doi.org/10.21660/2020.65.56966.

[6] เจนคณิต ขัดทองคำ, พุทธรักษ์ จรัสพันธุ์กุล, ชยานนท์ หรรษภิญโญ, ปิยะพงษ์ วงค์เมธา และ ชินพัฒน์ บัวชาติ, การวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ของอาคารระบายน้ำล้นเขื่อนกิ่วคอหมา, *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 24*, จ. อุดรธานี, 9-10 ก.ค. 2019, หน้า 219 -227, 2019.

[7] Department of Public Works and Town & Country Planning, Ministry of Interior, Thailand (2009). Seismic design criteria in National Standard DPT 1302. *Seismic Resistant Design of Buildings and Structures*.

[8] Ornthammarath, T., Warnitchai, P., Worakanchana, K., Zaman S., Sigbjornsson R. and Lai C., (2010). Probabilistic seismic hazard assessment for Thailand. *Bull Earthquake Eng*, 9(2), 367-394.

[9] U.S. Geological Survey USGS (2014). M 6.1 – 13 km NNW of Phan, Thailand, accessed August 2, 2019, at URL https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usb000qack/executive.

[10] Earthquake-Report.com (2014). Very strong deadly earthquake close to Chiang Rai, Thailand - At least 1 dead and 32 injuries + huge number of aftershocks, accessed August 23, 2017, at URLhttps://earthquakereport.com/2014/05/05/strong-earthquakethailand-on-may-5-2014/.

[11] Electricity Generating Authority of Thailand EGAT (2018). Kiew Kho Ma Dam, accessed August 23, 2017, at URL https://www.egat.co.th/en/information/power-plants-and-dams?view=article&id=481.

[12] Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) ground motion database., accessed August 23, 2017, at URL https://peer.berkeley.edu/peer-strong-groundmotion-databases.

[13] Hallquist JO (2010). LS-DYNA keyword user's manual, Livermore Software Technology Corporation (LSTC). version 971, Vol. 1.