



บทความวิจัย

การออกแบบบานประตูระบายน้ำโดยวิธีโทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้าง

เหมวิช ชินวงศ์

กรมชลประทาน

ศิริเดช สุริต*

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 2942 8960 อีเมล: siradech.s@ku.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.03.002

รับเมื่อ 11 ตุลาคม 2564 แก้ไขเมื่อ 28 ธันวาคม 2564 ตอรับเมื่อ 11 มกราคม 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 17 มีนาคม 2565

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอกระบวนการประยุกต์ระเบียบวิธีวิเคราะห์โทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้าง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการออกแบบโครงสร้างบานระบายน้ำขนาด 2.60×2.60 เมตร จากแบบมาตรฐานกรมชลประทานภายใต้มาตรฐานการออกแบบ และเงื่อนไขการใช้งานที่มีอยู่เดิม โดยเปรียบเทียบปริมาณวัสดุที่ใช้ในการผลิตระหว่างแบบโครงสร้างบานระบายน้ำจากแบบมาตรฐานกรมชลประทานกับแบบที่ผ่านกระบวนการโทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุด โดยการศึกษาการออกแบบดำเนินการโดยใช้โครงสร้างตั้งต้นที่มีความหนาของบานประตูระบายน้ำ 4 ค่า คือ 0.22, 0.30, 1.00 และ 1.50 เมตร จากนั้นโทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างถูกนำไปใช้ในการออกแบบเชิงรายละเอียดเพื่อศึกษาประสิทธิภาพเชิงเปรียบเทียบแบบมาตรฐาน ผลการวิจัยพบว่า กระบวนการวิเคราะห์โทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างสามารถนำมาปรับใช้เพื่อพัฒนารูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างบานระบายน้ำมาตรฐาน โดยบานที่มีแผ่นเสริมแรงความหนา 0.30 เมตร ผ่านมาตรฐานการออกแบบทั้งในเกณฑ์หน่วยแรงสูงสุดและเกณฑ์การเปลี่ยนรูป โดยมีค่าหน่วยแรง von Mises สูงสุดเท่ากับ 183.40 เมกะปาสคาล โดยค่ายอมให้มีค่าเท่ากับ 198.40 เมกะปาสคาล การเปลี่ยนรูปสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.205 มิลลิเมตร โดยการเปลี่ยนรูปสูงสุดที่ยอมให้มีค่า 4.333 มิลลิเมตร และสามารถลดปริมาณวัสดุลงจากแบบมาตรฐานกรมชลประทานได้ร้อยละ 13.49

คำสำคัญ: การวิเคราะห์โทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้าง การค้นหารูปร่าง บานระบายน้ำแบบตรง



Design of Slide-gate by Using Structural Topology Optimization

Hemmawit Chinwong

Royal Irrigation Department, Bangkok, Thailand

Siradech Surit*

Faculty of Architecture, Kasetsart University, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 2942 8960, E-mail: siradech.s@ku.th

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.03.002

Received 11 October 2021; Revised 28 December 2022; Accepted 11 January 2022; Published online: 17 March 2022

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

In this research, the structural topology optimization processes were applied to design improvement of the 2.60 x 2.60 m slide-gate of water control facility obtained from the Royal Irrigation Department (RID) in consideration of the design standards and working conditions. The material used between the standard design from RID and the improved design from Structural Topology Optimization has been compared. The design investigation is based on 4 differences panel thickness 0.22, 0.30, 1.00, and 1.50 m then the optimal structural topologies were used as a guideline in detail design and for comparative performance investigation to the standard design. The results from the research strongly represent the capability of Topology Optimization for Design improvement. The final design from the initial panel thickness of 0.30 m satisfied with the stress-criteria and deflection-criteria. The maximum von Mises stress is 183.40 MPa while the allowable von Mises stress is 198.40 MPa, the maximum deformation is 2.205 mm while the allowable deformation is 4.333 mm. The material used in the RID Standard design can be reduced by 13.49 percent.

Keywords: Structural Topology Optimization, Form-finding, Slide-gate

1. บทนำ

การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าโทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้าง (Structure Topology optimization) มีการพัฒนามาในช่วง พ.ศ. 2531 [1] โดยเป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ทำให้แผนผัง (Layout) หรือการกระจายความหนาแน่นของวัสดุในระบบโครงสร้างที่มีความเหมาะสมที่สุดผ่านกระบวนการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ร่วมกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) การกำหนดในพื้นที่ออกแบบ กลสมบัติของวัสดุ และเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) จากนั้น จึงใช้การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) เพื่อป้องกันการกระจายความหนาแน่นสัมพันธ์ของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โครงสร้าง ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่างระหว่างการเป็นชิ้นส่วนตัน (Solid Element) ถึงความเป็นช่องว่าง (Void) ให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนรูป หรือแรงกระทำที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง กระบวนการวิเคราะห์โทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดที่มีการใช้งานอยู่มีหลากหลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีการ SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization Method) [2] วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดโดยการวิวัฒนาการ ESO (Evolutionary Structural Optimization) [3] การวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ฐานศักยภาพ (Performance Based Optimization) [4] การวิเคราะห์โทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดแบบสองทิศทาง (Bidirectional Topology Optimization) [5], [6]

กระบวนการวิเคราะห์โทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีกรณีศึกษาการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก [7], [8] การออกแบบอาคาร [9] การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงร่วมกับการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ [10] อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าวิธีทำให้เหมาะสมที่สุดในโทโพโลยีของโครงสร้างเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูง แต่เมื่อประกอบการพิจารณาปัจจัยการผลิตที่เกิดจากการความซับซ้อนของโครงสร้าง อาจทำให้มูลค่าของชิ้นงานสูงขึ้น การประยุกต์ใช้กับการผลิตที่มีจำนวนมากจึงอาจทำให้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

มากกว่า [11], [12]

ในส่วนของกรมชลประทานโดยสำนักงานชลประทานที่ 10 ได้มีการก่อสร้างโครงสร้างของบานระบายน้ำแบบตรงเป็นโครงสร้างควมคุมปริมาณน้ำซึ่งสร้างด้วยเหล็กมีขนาดบาน 2.60 x 2.60 เมตร โดยในปี 2560 ถึง 2562 แบบมาตรฐาน มฐ. 09-05-010 มีจำนวนการใช้งานมากที่สุดและมีการผลิตสูงสุด ในปี 2564 มีจำนวน 75 บาน โดยมีแนวโน้มการผลิตเพิ่มปีละ 2 บาน ทำให้มีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการหาค่าโทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดมาพัฒนาปรับปรุงแบบ เนื่องจากเป็นเงื่อนไขการผลิตชิ้นงานที่สามารถใช้การออกแบบเดียวกันมาทำซ้ำกัน ซึ่งอาจทำให้ลดต้นทุนการผลิตอย่างมีนัยสำคัญ

จากที่มาและความสำคัญดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์วิธี SIMP ในการออกแบบโครงสร้างบานประตูระบายน้ำแบบตรงที่เหมาะสมที่สุดตามข้อกำหนดของกรมชลประทานและนำเสนอกรณีศึกษาเพื่อเปรียบเทียบปริมาณวัสดุที่ใช้ระหว่างแบบมาตรฐานของกรมชลประทานและแบบปรับปรุงในลำดับต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

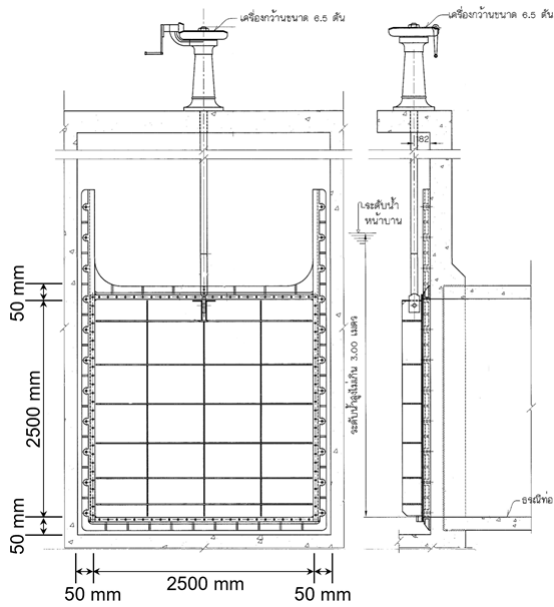
2.1.1 แบบมาตรฐานของบานระบายน้ำ กระบวนการเริ่มจากการศึกษาแบบมาตรฐานโครงสร้างบานระบายน้ำมาตรฐานกรมชลประทาน ขนาด 2.50 x 2.50 เมตร หนา 0.22 เมตร อ้างอิงตามแบบมาตรฐาน มฐ. 09-05-010 โดยมีลักษณะเฉพาะดังต่อไปนี้

1) ประตูน้ำระบายน้ำเป็นชนิดบานระบายตรงมีการเคลื่อนที่ปิด-เปิดโดยการเลื่อน (Slide-gate)

2) บานประตูประกอบด้วยส่วนหน้าบานเป็นแผ่นเหล็กหนา 9 มิลลิเมตร กว้าง 2600 มิลลิเมตร สูง 2600 มิลลิเมตร ทำหน้าที่ปิดกั้นน้ำไหลผ่าน

3) ส่วนโครงสร้างยึดเหล็กแผ่นหน้าบาน เป็นแผ่นเหล็กเชื่อมต่อกันเป็นโครงข้อแข็ง (Frame) เพื่อเสริมการรับแรง (Stiffener Plate) หนา 0.22 เมตร

โดยรูปที่ 1 แสดงแบบมาตรฐาน มฐ. 09-05-010 ของ



รูปที่ 1 บานระบายน้ำมาตรฐาน มฐ. 09-05-010

ประตูระบายน้ำบานตรงที่ใช้ในการวิจัยนี้

2.1.2 โปรแกรม Autodesk Fusion 360 รุ่นเพื่อใช้ในการศึกษา (Education Version)

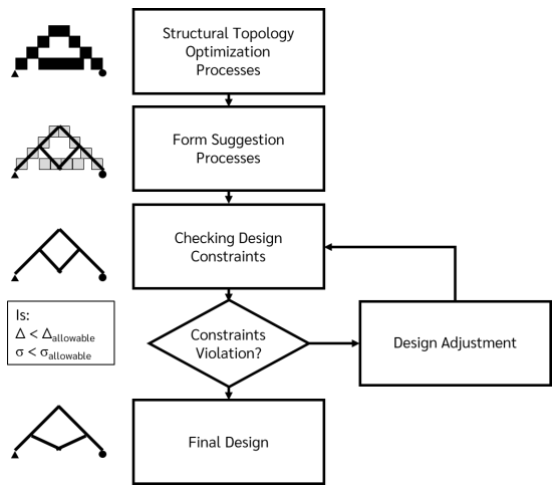
2.2 กระบวนการวิเคราะห์ค่าเหมาะที่สุดของโครงสร้าง

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยกระบวนการวิเคราะห์ค่าเหมาะที่สุดของโครงสร้างร่วมกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยผังลำดับงานของการวิเคราะห์ค่าเหมาะที่สุดของโครงสร้างแสดงตามรูปที่ 2

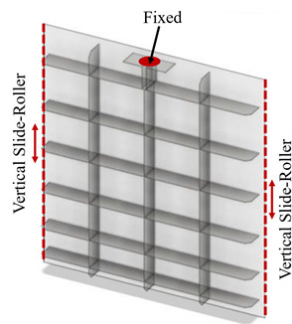
การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์อ้างอิง ในงานวิจัยนี้ใช้งานโปรแกรม Autodesk Fusion 360 เพื่อทำการสร้างเป็นแบบจำลองโครงสร้างแบบ 3 มิติ โดยใช้แบบมาตรฐาน มฐ. 09-05-010 ร่วมกับกลสมบัติของวัสดุดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กลสมบัติของวัสดุที่ใช้

กลสมบัติ	ค่ากลสมบัติ
มอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E)	200 GPa
สัดส่วนปัวซอง (Poisson's ratio, ν)	0.30
หน่วยแรงคราก (Yield stress, Fy)	248 MPa



รูปที่ 2 ผังลำดับงานของกระบวนการวิจัย

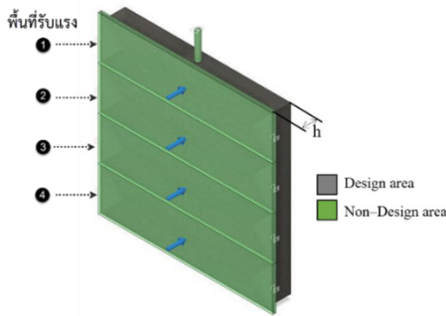


รูปที่ 3 แบบจำลองอ้างอิง

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการศึกษานี้ แสดงในรูปที่ 3 โดยใช้ชิ้นส่วน Iso-parametric โดยมีฟังก์ชันรูปร่างเป็นสมการพหุนามกำลัง 2 และมีขนาดโครงตาข่าย 20 มิลลิเมตร มีพื้นที่ไร้ออกแบบ (Non-design Area) ที่ตัวแผ่นบานด้านติดน้ำ พื้นที่ออกแบบ (Design Area) ที่ส่วนเสริมกำลังด้านหลังแผ่นบาน จุดรองรับโครงสร้างอยู่ในแนวด้านข้างเป็นชนิดล้อหมุนเคลื่อนที่ทางตั้ง (Vertical Slide-roller) และจุดแกนยกเป็นจุดรองรับชนิดยึดแน่น (Fixed)

2.3 การสร้างแบบจำลองเชิงพารามิเตอร์

จากนั้นจึงทำการสร้างแบบจำลองเชิงพารามิเตอร์โดยการแปรผันค่าความหนาของบานระบายน้ำ (h) เพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โทโพโลยีเหมาะที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การกำหนดพื้นที่ออกแบบและความหนาตั้งต้น (h)

2.4 แรงดันน้ำที่กระทำต่อโครงสร้าง

แรงดันน้ำที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองเป็นแรงดันซึ่งแปรผันตามความลึกของระดับน้ำที่กระทำกับหน้าบานประตูซึ่งคำนวณจากระดับน้ำสูงสุด 3.00 เมตร ตามรูปที่ 1 โดยทำการแบ่งส่วนหน้าบานประตูเป็นพื้นที่รับแรง 4 ส่วนตามรูปที่ 4 จากนั้นจึงทำการรวมแรงดันน้ำที่กระทำในแต่ละช่วงพื้นที่เพื่อใช้เป็นแรงกระทำต่อพื้นที่ซึ่งโปรแกรมจะคำนวณเป็นการกระจายแรงเป็นแบบแรงดันต่อพื้นที่แบบสม่ำเสมอ (Uniform Load) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การกระจายแรงดันน้ำ

พื้นที่	ระดับความลึก อ้างอิง (m)	แรงดันรวม (N)	แรงดันต่อพื้นที่ (Pa)
1	1.05	19,417	11,489
2	1.70	59,621	35,279
3	2.35	12,1377	71,820
4	3.00	204,686	121,115

2.5 กระบวนการวิเคราะห์โทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุด

ในงานวิจัยนี้กระบวนการวิเคราะห์โทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างกระทำผ่านโมดูลการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างในโปรแกรม Autodesk Fusion 360 ซึ่งใช้กระบวนการ SIMP กระบวนการเป็นการปรับความแข็งแรงของชิ้นส่วนโครงสร้างโดยใช้สัมประสิทธิ์ปรับความหนาแน่นของชิ้นส่วน $[k_e]$ ส่งผลความแข็งแรงรวมของโครงสร้าง $[K(\rho)_{SIMP}]$ เป็นดังสมการที่ (1)

$$[K(\rho)_{SIMP}] = \sum_{e=1}^N [\rho_{min} + (1 - \rho_{min})\rho_e^p][k_e] \quad (1)$$

โดย ρ_{min} คือ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำสุดของโครงสร้าง ρ_e คือ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นส่วน p คือ สัมประสิทธิ์การปรับค่า (Penalty Factor) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1 ถึง 3 และ N คือ จำนวนชิ้นส่วนในพื้นที่ออกแบบฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ของการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมที่สุดใช้ค่าความหยุ่นตาม (Compliance; C) ซึ่งคือค่าพลังงานความเครียดในสถานะยึดหยุ่นรวมของโครงสร้าง (Elastic Strain Energy) น้อยที่สุดตามสมการที่ (2)

$$min C(\{\rho\}) = \sum_{e=1}^N (\rho_e)^p \{u_e\}^T [k_e] \{u_e\} \quad (2)$$

จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความไวเพื่อกระจายค่าความหนาแน่นของชิ้นส่วน ρ_e ตามสมการที่ (3) เพื่อให้ค่าความหยุ่นตามมีค่าน้อยที่สุดหรืออีกนัยหนึ่งคือเพื่อทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรง (Stiffness) มากที่สุด

$$\frac{dC}{d\rho_e} = -p(\rho_e)^{p-1} \{u_e\}^T [k_e] \{u_e\} \quad (3)$$

กระบวนการอยู่ในรูปแบบการทำให้เข้าโดยชิ้นส่วนที่มีบทบาทต่อความแข็งแรงของโครงสร้างน้อยจะถูกทอนความสำคัญลงโดยการถูกลดค่าความหนาแน่นของชิ้นส่วน ซึ่งมวลของชิ้นส่วนใดๆ คือผลคูณระหว่างปริมาตรของชิ้นส่วน (v_e) กับ ρ_e การดำเนินการทำให้เข้าจะถูกทำให้ไปเรื่อยๆ จนกว่าโครงสร้างรวมจะมีมวลลดลงถึงมวลเป้าหมาย M_{target} ตามสมการที่ (4)

$$\sum_{e=1}^N v_e \rho_e \leq M_{target} \quad (4)$$

ในกระบวนการทำให้เข้าในแต่ละรอบ สมการสมดุลของโครงสร้างจะถูกวิเคราะห์ตามสมการที่ (5)

$$[K(\rho)_{SIMP}] \{u\} = \{F\} \quad (5)$$

โดย $[K(\rho)_{SIMP}]$ คือ เมทริกซ์ความแข็งแกร่งรวมของโครงสร้างซึ่งมีการปรับค่าความแข็งแกร่งโดยการเปลี่ยนความหนาแน่นของชิ้นส่วนแล้วตามสมการที่ (1) $\{u\}$ คือ เวกเตอร์การกระจัด และ $\{F\}$ คือ เวกเตอร์ของแรงภายนอก ขนาดของแรงภายนอกซึ่งขนาดของแรงกระทำที่ใช้ จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบหน่วยแรงสูงสุดที่ยอมให้เป็นตามมาตรฐานบราซิล NBR-8883 [13] เงื่อนไขสภาพบังคับของการวิเคราะห์ค่าเหมาะที่สุดประกอบด้วย 2 เงื่อนไข คือ 1) เงื่อนไขหน่วยแรงสูงสุด ซึ่งกำหนดโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณลดกำลังของวัสดุ 0.80 ตามเงื่อนไขแรงกระทำปกติจากมาตรฐานการออกแบบ NBR-8883 ซึ่งแสดงในตารางที่ 3 นำมาคูณกับหน่วยแรงคราก (F_y) ซึ่งแสดงในตารางที่ 1 จากนั้นจึงนำหน่วยแรงที่ยอมให้มาตรวจสอบเงื่อนไขกับหน่วยแรง von Misses (σ_{vm}) ที่เกิดในโครงสร้างตามสมการที่ (6)

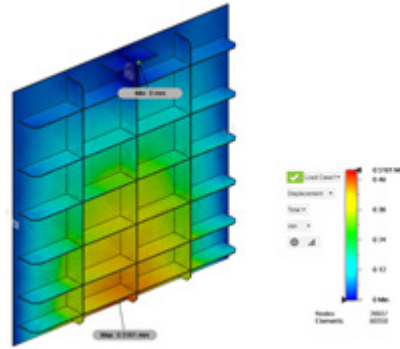
$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (6)$$

โดย σ_1 , σ_2 และ σ_3 คือ ค่าหน่วยแรงมุขสำคัญหลัก (Principal Stress) ของชิ้นส่วนในพิกัด 3 มิติ

ตารางที่ 3 หน่วยแรงที่ยอมให้ตาม NBR-8883 [13]

กรณีแรงกระทำ	สัมประสิทธิ์ตัวคูณลดกำลัง	หน่วยแรงที่ยอมให้ (MPa)
แรงกระทำปกติ	0.80	198.40
แรงกระทำเป็นครั้งคราว	0.90	223.20
แรงกระทำพิเศษ	0.90	223.20

จากนั้นจึงพิจารณาเงื่อนไข 2) สภาพบังคับด้านการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างโดยใช้เงื่อนไขการเปลี่ยนรูปสูงสุดในกรณีของบานท่อนกันน้ำ (Stoplog) และบานระบายตะกอน (Sluice Gate) ซึ่งตามคู่มือเกณฑ์กำหนดการออกแบบโครงการพัฒนาแหล่งน้ำกรมทรัพยากรน้ำ ปี 2550 [14] กำหนดให้ให้มีค่าการโก่งตัวไม่เกิน 1/600 ของความกว้างของตัวบาน 2600 มิลลิเมตร คิดเป็น 4.33 มิลลิเมตร



รูปที่ 5 การเปลี่ยนรูปของโครงสร้างอ้างอิง

2.6 กระบวนการรูปแบบแนะนำ

แบบโทโพโลยีเหมาะที่สุดของโครงสร้าง ถูกนำมาพิจารณาเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบชิ้นงานสำหรับการผลิตจริง โดยพิจารณาถึงข้อจำกัดการออกแบบเพื่อการใช้งาน ได้แก่ 1) ด้วยข้อจำกัดของการเชื่อมแผ่นหน้าบาน ต้องมีความหนาน้อยที่สุด 9 มิลลิเมตร และ 2) ส่วนประกอบเสริมกำลังเพื่อโดยไม่ทำให้แผ่นบานโค้งงอหรือเสียกำลังต้องมีความหนาไม่เกิน 40 มิลลิเมตร

2.7 การเปรียบเทียบปริมาณวัสดุ

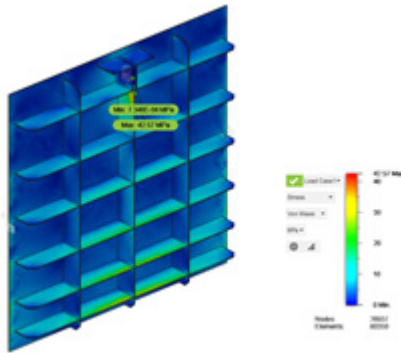
เป็นขั้นตอนเปรียบเทียบปริมาณวัสดุที่ใช้ในการผลิตระหว่างแบบโครงสร้างบานระบายน้ำจากแบบมาตรฐานกรมชลประทาน และแบบที่ผ่านการปรับปรุงการออกแบบ

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลวิเคราะห์แบบจำลองอ้างอิง

จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของบานประตูระบายน้ำ มฐ. 09-05-010 ภายใต้แรงดันน้ำซึ่งแปรผันตามความลึกของน้ำ ในกรณีรับแรงดันน้ำสูงสุดที่ความลึกไม่เกิน 3.00 เมตร ตามตารางที่ 2 โดยรูปที่ 5 และรูปที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปและหน่วยแรง von Mises ของโครงสร้างอ้างอิงตามลำดับ

ในกระบวนการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบการปรับความละเอียดของชิ้นประกอบพบว่า การใช้ชิ้นส่วนขนาด 20 มิลลิเมตร ให้ผล



รูปที่ 6 หน่วยแรง von Mises ของโครงสร้างอ้างอิง

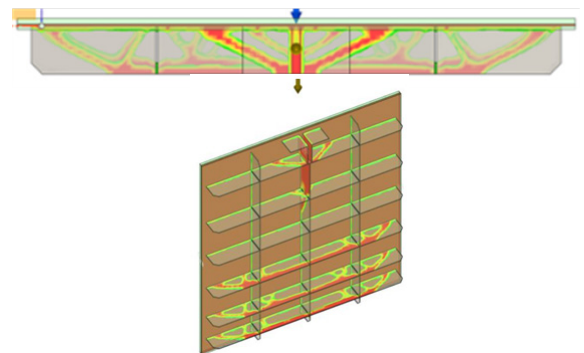
วิเคราะห์ที่เกิดการลู่เข้าโดยแบบจำลองโครงสร้างอ้างอิงมีจำนวนชิ้นประกอบ 80,350 ชิ้นส่วน มีการเปลี่ยนรูปสูงสุดมีค่า 0.518 มิลลิเมตร เกิดที่กึ่งกลางบานด้านล่าง โดยหน่วยแรง von Mises สูงสุดเกิดที่แกนหัวบานมีค่าเท่ากับ 42.57 เมกะปาสคาล โครงสร้างอ้างอิงมีมวล 829.75 กิโลกรัม

3.2 ผลจากการสร้างแบบจำลองพารามิเตอร์

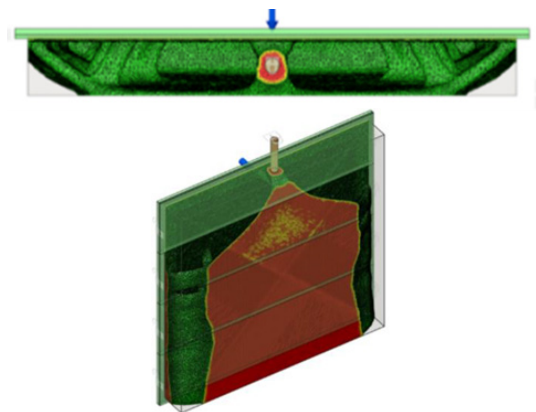
จากการกำหนดโครงสร้างเริ่มต้นเป็นเหล็กตันจากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าโทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุด โดยของความหนาบานประตูตั้งต้น (ค่า h ในรูปที่ 4) ที่ใช้มี 3 ขนาด คือ 0.30, 1.00 และ 1.50 เมตร ร่วมกับแบบจำลองอ้างอิงความหนา 0.22 เมตร (ในรูปที่ 3) มีกรณีของแรงกระทำจากแรงดันน้ำและน้ำหนักโครงสร้าง กำหนดเป็นพื้นที่ไร้การออกแบบที่แผ่นด้านหน้าความหนา 9 มิลลิเมตร และแกนหัวบาน โดยกำหนดพื้นที่เนื้อวัสดุส่วนเสริมกำลังด้านหลังเป็นพื้นที่ออกแบบ และเงื่อนไขสมมาตรที่แนวกึ่งกลางความกว้างของบานประตู

3.3 รูปแบบโทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้าง

ผลการวิเคราะห์โทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างแต่ละกรณี รูปที่ 7 เป็นผลการวิเคราะห์โทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดของบานประตูความหนา 0.22 เมตร ซึ่งได้จากโครงสร้างอ้างอิง ปริมาณวัสดุลดลงจาก 829.75 กิโลกรัม เป็น 719 กิโลกรัม โดยลักษณะของโครงสร้างที่ได้มีลักษณะคล้ายโครงถัก (Truss)



รูปที่ 7 โทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดของบานประตูความหนา 0.22 เมตร

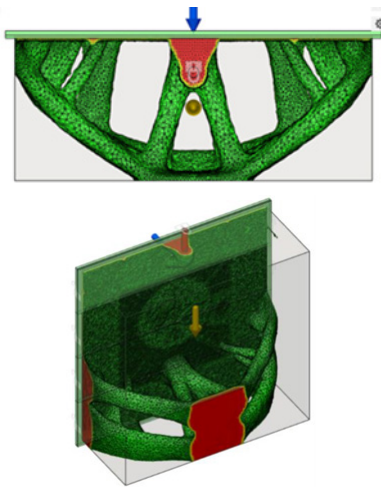


รูปที่ 8 โทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดของบานประตูความหนา 0.30 เมตร

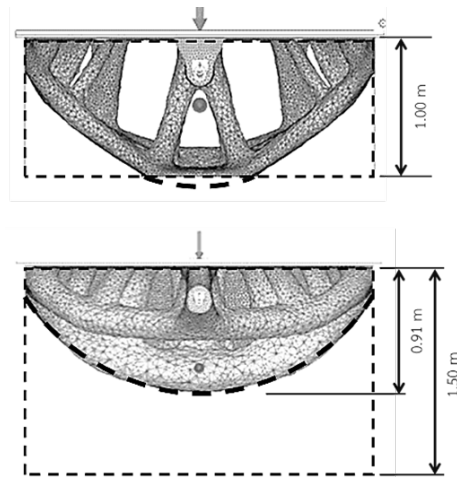
รูปที่ 8 เป็นผลการวิเคราะห์โทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดของบานประตูความหนา $h = 0.30$ เมตร ปริมาณวัสดุลดลงจาก 14,381 กิโลกรัม เป็น 718 กิโลกรัม โดยลักษณะของโครงสร้างที่ได้มีลักษณะคล้ายโครงถัก

รูปที่ 9 เป็นผลการวิเคราะห์โทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดของบานประตูความหนา $h = 1.00$ เมตร ปริมาณวัสดุลดลงจาก 47,901 กิโลกรัม เป็น 4,752 กิโลกรัม โดยลักษณะของโครงสร้างที่ได้มีลักษณะคล้ายโครงถักแบบวีเรนดีล (Vierendeel Truss) ร่วมกับช่องโค้ง (Arch)

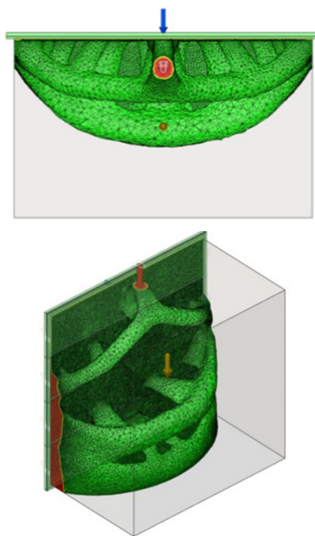
รูปที่ 10 เป็นผลการวิเคราะห์โทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดของบานประตูความหนา $h = 1.50$ เมตร ปริมาณวัสดุลดลงจาก 71,848 กิโลกรัม เป็น 7,056 กิโลกรัม โดยลักษณะของโครงสร้างที่ได้มีลักษณะคล้ายโครงถักแบบวีเรนดีล ร่วมกับช่องโค้ง



รูปที่ 9 โทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดของบานประตูความหนา 1.00 เมตร



รูปที่ 11 ความหนาที่ทำให้โทโพโลยีสมบูรณ์



รูปที่ 10 โทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดของบานประตูความหนา 1.50 เมตร

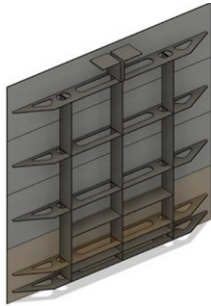
ตารางที่ 4 ผลจากกระบวนการวิเคราะห์โทโพโลยี

ชั้นงาน	มวล	
	ตั้งต้น	สิ้นสุด (kg)
แบบมาตรฐาน	830	830
0.22	829.75	719
0.30	14,381	718
1.00	47,901	4,752
1.50	71,848	7,056

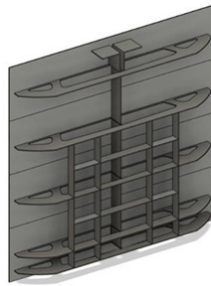
3.4 กระบวนการรูปแบบแนะนำ

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์โทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างที่มีความหนาแตกต่างกันพบว่า ความหนาตั้งต้น (h) 1.00 เมตร ความลึกของโทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดมีค่าประมาณ 1.00 เมตร โดยมีรูปแบบที่โดนบังคับจากพื้นที่ออกแบบมีความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้าง ในกรณีความหนาตั้งต้น 1.50 เมตร ความลึกของโทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดมีค่าประมาณ 0.91 เมตร มีลักษณะโค้งตามพฤติกรรมคาน ดังแสดงในรูปที่ 11 อย่างไรก็ตาม ด้วยความหนาของโครงสร้างที่ค่อนข้างมาก ทั้งสองรูปแบบจึงอาจไม่เหมาะสมกับการผลิตเป็นชิ้นงานจริงในงานวิจัยนี้จึงไม่เลือกใช้เป็นรูปแบบที่นำไปเข้าสู่กระบวนการรูปแบบแนะนำ

ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้โทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดจากการวิเคราะห์แบบอ้างอิงมาตรฐานความหนา 0.22 เมตร โดยตรง (รูปที่ 3) และจากโครงสร้างความหนาตั้งต้น 0.30 เมตร มาเป็นโทโพโลยีอ้างอิงจากนั้นจึงนำมาใช้ในกระบวนการรูปแบบแนะนำโดยมีขั้นตอนดังนี้ 1) ทำการลดความซับซ้อนทางเรขาคณิตผ่านการตัดสินใจของผู้ออกแบบ 2) ทำการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อตรวจสอบข้อกำหนดการออกแบบ และ 3) เข้าสู่กระบวนการออกแบบเชิงรายละเอียด ประกอบด้วย การปรับความต่อเนื่องของโครงสร้าง การปรับความโค้งมุม (Fillet Radius) การลดเหลี่ยมมุมให้เพื่อลด



รูปที่ 12 ความหนา 0.22 เมตร



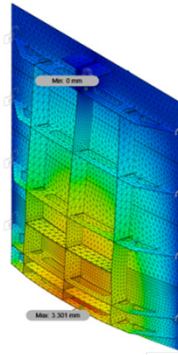
รูปที่ 13 ความหนา 0.30 เมตร

หน่วยแรงเฉพะที่ไม่ให้เกินหน่วยแรงที่ยอมให้ ในชั้นตอนนี้ อาจทำให้ปริมาณวัสดุเพิ่มจากโทโพลีที่เหมาะสมที่สุดอีกเล็กน้อย โดยขึ้นงานที่ผ่านกระบวนการรูปแบบแนะนำจาก โครงสร้างอ้างอิงที่มีความหนาตั้งต้น 0.22 เมตร และ 0.30 เมตร เป็นตามรูปที่ 12 และรูปที่ 13 ตามลำดับ

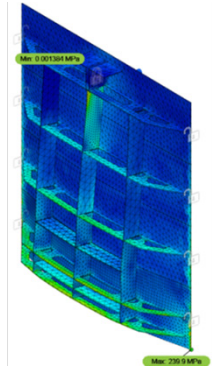
รูปที่ 14 และรูปที่ 15 แสดงหน่วยแรง von Mises และการกระจัดของบานประตูความหนา 0.22 เมตร และ 0.30 เมตร ตามลำดับ โดยต้นแบบโครงสร้างบานประตู ความหนา 0.22 เมตร มีหน่วยแรง von Mises สูงสุดมีค่า 239.9 เมกะปาสคาล ค่าการกระจัดสูงสุด 3.301 มิลลิเมตร ต้นแบบโครงสร้างบานประตูความหนา 0.30 เมตร มีหน่วยแรง von Mises สูงสุดมีค่า 183.40 เมกะปาสคาล และค่าการกระจัด สูงสุดมีค่า 2.205 มิลลิเมตร

3.5 การเปรียบเทียบการออกแบบ

จากผลการวิเคราะห์การออกแบบบานประตูมาตรฐาน ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขการผลิต 3 กรณี ถูกนำมาแสดงใน ตารางที่ 5 ซึ่งแสดงผลเปรียบเทียบของ หน่วยแรงสูงสุดที่เกิด

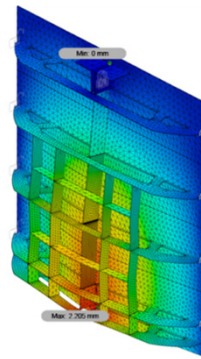


Displacement

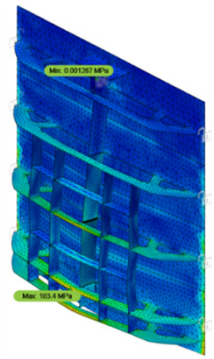


von Mises Stress

รูปที่ 14 โครงสร้างบานประตูความหนา 0.22 เมตร



Displacement



von Mises Stress

รูปที่ 15 โครงสร้างบานประตูความหนา 0.30 เมตร

การเปลี่ยนรูปสูงสุด และมวลจากการออกแบบขั้นสุดท้ายที่ได้ผ่านกระบวนการรูปแบบแนะนำแล้ว

ตารางที่ 5 ผลจากกระบวนการรูปแบบแนะนำ

ชิ้นงาน	การแอ่นตัวสูงสุด (mm)	หน่วยแรง von Mises (MPa)	มวล (kg)	เกณฑ์หน่วยแรง
แบบมาตรฐานความหนา 0.22	0.518	42.57	830	ผ่าน
รูปแบบแนะนำความหนา 0.22	3.301	239.90	719	ไม่ผ่าน
รูปแบบแนะนำความหนา 0.30	2.205	183.40	718	ผ่าน

ในด้านการค่าการโก่งตัวที่ยอมให้ตามมาตรฐานการออกแบบมีค่าเท่ากับ 4.333 มิลลิเมตร รูปแบบมาตรฐานกรมชลประทานมีค่าการโก่งเท่ากับ 0.518 มิลลิเมตร รูปแบบแนะนำชิ้นงานความหนา 0.22 เมตร มีค่าการโก่งเท่ากับ 3.301 มิลลิเมตร แบบจำลองชิ้นงานความหนา 0.30 เมตร มีค่าการโก่งเท่ากับ 2.205 มิลลิเมตร ซึ่งทั้ง 3 กรณี ผ่านเกณฑ์ในการออกแบบในด้านหน่วยแรงสูงสุด รูปแบบมาตรฐานและรูปแบบความหนาตั้งต้น 0.30 เมตร เท่านั้นที่ผ่านเกณฑ์ กล่าวคือหน่วยแรงที่เกิดขึ้นไม่มากกว่าค่าความเค้นที่ยอมให้ มีค่าเท่ากับ 198.40 เมกะปาสคาล ตามตารางที่ 2 ในด้านมวลของแบบจำลอง แบบจำลองของบานประตูมาตรฐานมีมวลเท่ากับ 830 กิโลกรัม แบบจำลองชิ้นงานความหนา 0.22 เมตร มีมวลเท่ากับ 719 กิโลกรัม แบบจำลองชิ้นงานความหนา 0.30 เมตร มีมวลเท่ากับ 718 กิโลกรัม ซึ่งแบบจำลองชิ้นงานความหนา 0.30 เมตร สามารถลดมวลได้ร้อยละ 13.49 เมื่อเทียบกับแบบมาตรฐานโดยผลการวิเคราะห์ค่าเหมาะที่สุดของโครงสร้างมีความแข็งแรง สอดคล้องกับมาตรฐานการออกแบบ

4. อภิปรายผลและสรุป

การวิเคราะห์โทโพโลยีเหมาะที่สุดของโครงสร้างสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการสังเคราะห์รูปแบบแนะนำ (Form-suggestion) ซึ่งเป็นกระบวนการค้นหารูปร่าง (Form-finding) วิธีการหนึ่งโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบรูปร่างของโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพต่อการตอบสนองแรงกระทำโดยยังคงคำนึงถึงความปลอดภัย เงื่อนไขสภาพบังคับการใช้งานและเงื่อนไขข้อจำกัดการผลิต ในงานวิจัยนี้ได้ทำการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีวิเคราะห์โทโพโลยีเหมาะที่สุดกับโครงสร้างบานประตูระบายน้ำ โดยใช้ระเบียบวิธี SIMP โดยทั้งนี้เนื่องจากส่วนของพื้นที่ไร้การออกแบบบริเวณหน้าบานไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกระบวนการวิเคราะห์จึงไม่ได้ใช้ปฏิสัมพันธ์ของพื้นที่และแรงดันน้ำมาเกี่ยวข้อง [15] การแปรผันความหนาของพื้นที่ออกแบบเป็นระยะ 0.30 เมตร ถึง 1.50 เมตร ช่วยให้สามารถวิเคราะห์รูปแบบโทโพโลยีที่มีความสมบูรณ์ได้โดยความหนาของโทโพโลยีที่

สมบูรณ์มีค่าประมาณ 0.91 เมตร อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโครงสร้างที่ได้มีความหนาค่อนข้างมากจึงอาจไม่เหมาะสมกับสภาพการผลิตจริง โทโพโลยีดังกล่าวจึงไม่ถูกนำมาใช้ในขั้นตอนการออกแบบเชิงรายละเอียด โดยกรณีศึกษาซึ่งนำมาใช้ในการออกแบบเชิงรายละเอียดคือ โทโพโลยีเหมาะที่สุดของโครงสร้างอ้างอิงตั้งต้นความหนา 0.22 เมตร ที่สร้างจากแบบมาตรฐาน และโทโพโลยีเหมาะที่สุดของโครงสร้างความหนา 0.30 เมตร

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างพบว่า การปรับความละเอียดของชิ้นประกอบขนาดไม่เกิน 20 มิลลิเมตร ให้ผลวิเคราะห์เพียงพอที่เกิดการลู่เข้าของคำตอบ ซึ่งหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างแบบมาตรฐานอ้างอิงมีหน่วยแรง von Mises สูงสุด 42.57 เมกะปาสคาล ต้นแบบโครงสร้างบานประตูความหนา 0.22 เมตร จากกระบวนการรูปแบบแนะนำ มีหน่วยแรง von Mises สูงสุด 239.9 เมกะปาสคาล ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์หน่วยแรงสูงสุด ซึ่งสำหรับต้นแบบโครงสร้างแบบจำลองบานประตูความหนา 0.30 เมตร ที่ผ่านกระบวนการรูปแบบแนะนำ มีหน่วยแรง von Mises สูงสุด 183.40 เมกะปาสคาล ซึ่งไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้คือ 198.40 เมกะปาสคาล รวมถึงการเปลี่ยนรูปไม่มากกว่าการเปลี่ยนรูปที่ยอมให้เช่นกัน แต่เนื่องจากการออกแบบใหม่มีการใช้งานปริมาณวัสดุที่น้อยกว่าจึงอาจสรุปได้ว่าแบบที่ผ่านปรับปรุงโดยกระบวนการเป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากกว่า

อย่างไรก็ตาม กระบวนการพัฒนาแบบปรับปรุงยังต้องการการตัดสินใจของผู้ออกแบบในขั้นตอนการตีความผลลัพธ์จากกระบวนการโทโพโลยีเหมาะที่สุดของโครงสร้าง การปรับปรุงการออกแบบเพื่อลดหน่วยแรงเฉพาะที่ประกอบกับการพิจารณาและเงื่อนไขในการผลิต ซึ่งอาจทำให้การออกแบบเชิงรายละเอียดอาจเกิดความแตกต่างกัน กระบวนการกำหนดเงื่อนไขบังคับทางเรขาคณิตของการผลิตอาจช่วยให้กระบวนการเป็นมาตรฐานมากขึ้น [16] นอกจากนั้นในการศึกษานี้ต้นทุนการผลิตส่วนใหญ่พิจารณาจากปริมาณวัสดุเท่านั้นยังไม่ได้รวมถึงราคาในการผลิต การดูแลรักษา และปัจจัยความล่าช้าของโครงสร้างในระยะยาว

[17] แต่เมื่อประเมินจากแบบปรับปรุงสุดท้ายราคาการผลิตและการดูแลรักษาซ่อมบำรุงอาจไม่แตกต่างกับการออกแบบมาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนที่เป็นวัสดุโลหะส่วนที่มีการตัดออก หรือลดทอนควรถูกรวบรวมนำไปเข้าสู่กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) ในการประยุกต์กระบวนการวิเคราะห์โทโพโลยีที่เหมาะสมที่สุดการตรวจสอบการโก่งเดาะ (Buckling) เป็นกระบวนการเพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบว่าความหนาของแผ่นเสริมกำลังไม่ใ้บางเกินไป ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์การโก่งเดาะของโครงสร้างโดยมีค่าไม่น้อยกว่าน้ำหนักบรรทุกทุกวิกฤติ อย่างไรก็ตาม เงื่อนไขการโก่งเดาะไม่ได้รวมเป็นข้อพิจารณาในการวิเคราะห์ค่าเหมาะสมที่สุดของโครงสร้างในการศึกษานี้ซึ่งเป็นข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติมในลำดับต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. P. Bendsoe and O. Sigmund, *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [2] O. Sigmund, N. Aage, and E. Andreassen, "On the (non-) optimality of Michell structures," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 54, no. 2, pp. 361–373, 2016.
- [3] X. Huang and M. Xie, *Evolutionary topology optimization of continuum structures: Methods and applications*. John Wiley & Sons, 2010.
- [4] Q. Q. Liang and G. P. Steven, "A performance-based optimization method for topology design of continuum structures with mean compliance constraints," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 191, no. 13–14, pp. 1471–1489, 2002.
- [5] L. Xia, Q. Xia, X. Huang, and Y. M. Xie, "Bi-directional evolutionary structural optimization on advanced structures and materials: A comprehensive review," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 25, no. 2, pp. 437–478, 2018.
- [6] X. Yang, Y. Xie, G. Steven, and O. Querin, "Bidirectional evolutionary method for stiffness optimization," *AIAA Journal*, vol. 37, no. 11, pp. 1483–1488, 1999.
- [7] S. Surit and B. Wethyavivorn, "Topology optimization of reinforced concrete beams by a spread-over reinforcement model with fixed grid mesh," *Sonklanakarinn Journal of Science and Technology*, vol. 33, no. 1, pp. 95, 2011 (in Thai).
- [8] N. Stoiber and B. Kromoser, "Topology optimization in concrete construction: a systematic review on numerical and experimental investigations," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, pp. 1–25, 2021.
- [9] F. Gomez, B. F. Spencer Jr, and J. Carrion, "Topology optimization of buildings subjected to stochastic wind loads," *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol. 64, p. 103127, 2021.
- [10] G. Vantighem, W. De Corte, E. Shakour, and O. Amir, "3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization," *Automation in Construction*, vol. 112, p. 103084, 2020.
- [11] M. R. Serphos, "Incorporating AM-specific manufacturing constraints into topology optimization," M.S. thesis, Faculty of Mechanical, Maritime and Materials Engineering, Delft University of Technology, 2014.
- [12] S. L. Vatanabe, T. N. Lippi, C. R. de Lima, G. H. Paulino, and E. C. Silva, "Topology optimization with manufacturing constraints: A unified projection-based approach," *Advances in*



- Engineering Software*, vol. 100, pp. 97–112, 2016.
- [13] C. E. Paulo, *Design of Hydraulic Gates*. CRC Press/Balkema, 2014.
- [14] *Design Manual for Water Resources Development Project*. Ministry of Natural Resources and Environment, 2007 (in Thai).
- [15] B. Zheng, C.-J. Chang, and H. C. Gea, “Topology optimization with design-dependent pressure loading,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 38, no. 6, 2009, Art. no. 535.
- [16] C. Dapogny, A. Faure, G. Michailidis, G. Allaire, A. Couvelas, and R. Estevez, “Geometric constraints for shape and topology optimization in architectural design,” *Computational Mechanics*, vol. 59, no. 6, pp. 933–965, 2017.
- [17] J. Oest and E. Lund, “Topology optimization with finite-life fatigue constraints,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 56, no. 5, pp. 1045–1059, 2017.