การวิเคราะห์และเปรียบเทียบวิธีการออกแบบโครงสร้างด้วยเทคนิค Topology Optimization โดยวิธี BESO และ SERA เพื่อประยุกต์ใช้กับแบริเออร์

Analysis and Comparison of Structural Design Using Topology Optimization Techniques: BESO and SERA Methods for Barrier Applications

กฤษฎ์ ธิติชยาพงษ์[1] ภูมิ ไกรสัย[2] และ ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์[3]

[1,2,3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการออกแบบโครงสร้างด้วยเทคนิค Topology Optimization โดยใช้สองวิธี ได้แก่ BESO (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization) และ SERA (Sequential Element Rejection and Admission) ที่นำมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างแบริเออร์ซึ่งต้องรับแรงกระแทกจากการชนของยานพาหนะ การจำลองโครงสร้างดำเนินการผ่านโปรแกรม Strand7 ร่วมกับการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Python เพื่อควบคุมกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ทั้งสองวิธีสามารถลดการใช้วัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยยังคงความแข็งแรงของโครงสร้างไว้ได้ อย่างไรก็ตาม SERA ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าชัดเจน โดยเฉพาะในกรณีของแบบจำลองแบริเออร์ที่ซับซ้อน และผลลัพธ์ยังสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความเครียดจาก Strand7 ซึ่งช่วยยืนยันความถูกต้องของอัลกอริทึม ดังนั้น SERA จึงมีความได้เปรียบด้านประสิทธิภาพในการคำนวณ แม้การออกแบบแบริเออร์ในสภาพจริงจะต้องพิจารณาปัจจัยด้านความปลอดภัยและทัศนวิสัยร่วมด้วย

คำสำคัญ: Topology Optimization, BESO, SERA, แบริเออร์, Strand7

Abstract

This study analyzes and compares the efficiency of structural design using two Topology Optimization methods: BESO (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization) and SERA (Sequential Element Rejection and Admission), applied to barrier structures subjected to vehicle collisions. Simulations were performed using Strand7 software, with custom Python scripts to manage the optimization process. Both methods successfully reduced material usage while preserving structural integrity. However, SERA achieved notably faster computation, particularly for complex barrier models. The results aligned with stress analysis from Strand7, validating the algorithm. SERA is therefore more efficient in terms of computational performance, though actual barrier designs must also account for safety and visibility considerations.

Keywords: Topology Optimization, BESO, SERA, Barrier, Strand7

1 บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ในยุคปัจจุบันที่การพัฒนาอย่างยั่งยืนกลายเป็นเป้าหมายหลักของทุกภาคส่วน อุตสาหกรรมการก่อสร้างต้องเผชิญกับความท้าทายในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พร้อมทั้งใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ หนึ่งในแนวทางที่ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายคือการปรับปรุงรูปแบบโครงสร้างให้เหมาะสมผ่านการวิเคราะห์เชิงคำนวณ หรือที่เรียกว่า Topology Optimization (TO) ซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญในการกำหนดการกระจายวัสดุในโครงสร้างให้เหมาะสมกับภาระที่ต้องรับ โดยมีเป้าหมายเพื่อให้โครงสร้างมีน้ำหนักเบา แข็งแรง และใช้วัสดุน้อยที่สุด

เทคนิคที่โดดเด่นในกลุ่ม TO ได้แก่ BESO (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization) ซึ่งใช้แนวคิดการลบและเพิ่มวัสดุในพื้นที่ออกแบบตามค่าความไวขององค์ประกอบแต่ละจุด เพื่อให้ได้รูปทรงที่มีประสิทธิภาพสูงสุด รองรับทั้งกรณีโครงสร้างเชิงเส้นและโครงสร้างไม่เป็นเชิงเส้น ในขณะที่ SERA (Sequential Element Rejection and Admission) ซึ่งเป็นเทคนิคที่พัฒนาต่อยอดจาก BESO ได้เพิ่มกระบวนการแยกวัสดุจริงและวัสดุเสมือนออกจากกัน ทำให้สามารถคัดเลือกองค์ประกอบที่จะลบหรือเพิ่มได้แม่นยำยิ่งขึ้น ลดความไม่เสถียรของผลลัพธ์ และกระจายวัสดุได้เหมาะสมยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิค Topology Optimization (TO) ทั้งแบบ BESO และ SERA ในการออกแบบโครงสร้าง โดยมีเป้าหมายเพื่อกำหนดรูปทรงที่เหมาะสม แข็งแรง และสามารถใช้วัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดในกระบวนการก่อสร้างผลจากการศึกษาไม่เพียงแต่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีการแต่ละแบบในเชิงโครงสร้างเท่านั้น แต่ยังชี้ให้เห็นความเหมาะสมของแต่ละวิธีภายใต้ข้อจำกัดและเป้าหมายที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถนำไปใช้พัฒนาแบบแบริเออร์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในอนาคต

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ศึกษารูปแบบและลักษณะการรับแรงของแบริเออร์

มีดังนี้ 1. ศึกษาประเภทของแบริเออร์ของกรมทางหลวง 2.ศึกษาขนาดของแรงที่กระทำกับแบริเออร์ 3.ศึกษาการเสียรูปของแบริเออร์

1.3.2 ศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิค Topology Optimization (TO) ในการออกแบบโครงสร้าง

มีดังนี้ 1. ศึกษาและวิเคราะห์หลักการทำงานของกระบวนการ Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO) 2. ศึกษาและวิเคราะห์หลักการทำงานของกระบวนการ Sequential Element Rejection and Admission (SERA)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เข้าใจประเภทแรงที่กระทำและการเสียรูปของแบริเออร์ และเข้าใจหลักการทำงานของเทคนิค Topology Optimization (TO) ทั้งวิธีการ BESO และ SERA โดยสามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบรูปทรงของโครงสร้างได้อย่างเหมาะสม

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดการออกแบบแบริเออร์และพฤติกรรมภายใต้แรงกระแทก

2.1.1 แนวทางการทดสอบและประเมินความปลอดภัยของแบริเออร์ตาม MASH 2016

MASH (Manual for Assessing Safety Hardware) 2016 ซึ่งจัดทำโดยสมาคม AASHTO เป็นมาตรฐานกลางสำหรับการทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของอุปกรณ์ความปลอดภัยข้างทาง เช่น แบริเออร์ ราวกันตก และระบบลดแรงกระแทก โดยเฉพาะในกลุ่มของ Longitudinal Barrier ซึ่งติดตั้งขนานกับแนวถนน มาตรฐานฉบับนี้ได้กำหนดเงื่อนไขการทดสอบด้วยการจำลองสถานการณ์การชนของยานพาหนะหลายประเภท ตั้งแต่รถยนต์ขนาดเล็ก (1100C) รถกระบะขนาดกลาง (2270P) ไปจนถึงรถบรรทุกขนาดใหญ่ (10000S)

ในการศึกษานี้ ได้เลือกใช้รถประเภท 2270P เป็นกรณีตัวอย่าง เนื่องจากเป็นประเภทที่พบได้บ่อยในสภาพการจราจรจริง และมีสัดส่วนสูงในสถิติการใช้รถยนต์ส่วนบุคคล

2.1.2 แนวทางการออกแบบ Longitudinal Barrier ตาม WSDOT Design Manual Chapter 1610

WSDOT Design Manual Chapter 1610 เป็นคู่มือที่ใช้ในการออกแบบแบริเออร์ในรัฐวอชิงตัน โดยเน้นการออกแบบให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานและข้อจำกัดของพื้นที่ติดตั้ง โดยจำแนกประเภทของแบริเออร์ตามลักษณะการโก่งตัว (Deflection) ออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ Rigid Barriers (0–100 mm), Semi-Rigid Barriers (500–1000 mm) และ Flexible Barriers (1500–3000 mm) โดยระบุว่าแบริเออร์ประเภท Rigid เช่น Concrete Barrier มีลักษณะไม่ยืดหยุ่นและไม่โก่งตัว เหมาะสำหรับพื้นที่จำกัดที่ต้องการลดการเบี่ยงเบนของรถให้น้อยที่สุด

ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้แบริเออร์ประเภท Rigid เป็นกรณีศึกษา เนื่องจากมีวัสดุหลักเป็นคอนกรีตซึ่งมีคุณสมบัติแข็งแรงทนทาน และสามารถขึ้นรูปได้ง่ายในการวิเคราะห์เชิงโครงสร้าง อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่ใช้อย่างแพร่หลายในระบบแบริเออร์จริงบนทางหลวงของประเทศไทย นอกจากนี้ ลักษณะของ Rigid Barrier ยังเหมาะสมกับการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงตัวเลขที่ต้องการความชัดเจนในการกำหนดค่าการโก่งตัวเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณแรงสถิตสมมูล (Equivalent Static Load) อย่างแม่นยำ

2.2 เทคนิคการปรับโครงสร้างด้วย Topology Optimization

2.2.1 แนวคิดการเพิ่มประสิทธิภาพโครงสร้างด้วย BESO

BESO (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization) เป็นเทคนิค Topology Optimization ที่มุ่งเน้นการลบและเพิ่มวัสดุในพื้นที่โครงสร้างอย่างเป็นระบบตามค่าความไวขององค์ประกอบ โดยอาศัยการวิเคราะห์ Finite Element ในการประเมินค่าความเครียดและความเค้น จุดเด่นของ BESO คือสามารถกำหนดรูปทรงที่มีประสิทธิภาพสูงสุดภายใต้ข้อจำกัดทางกล โดยให้ความสำคัญกับสมรรถนะเชิงโครงสร้างมากกว่ารูปลักษณ์ทางเรขาคณิต

BESO ได้รับการนำไปใช้ในโครงสร้างหลายประเภท รวมถึงการออกแบบองค์ประกอบในระบบที่ซับซ้อน เช่น อุปกรณ์ทางการแพทย์หรือองค์ประกอบที่ต้องการความเบาและแข็งแรงสูง

2.2.2 การปรับปรุงแบบจำลองด้วย SERA เพื่อเสถียรภาพและความแม่นยำ

SERA (Sequential Element Rejection and Admission) เป็นเทคนิคที่พัฒนาต่อยอดจาก BESO โดยเพิ่มความสามารถในการคัดกรององค์ประกอบที่ควรลบหรือเก็บไว้ได้แม่นยำยิ่งขึ้นผ่านการแยกระหว่างวัสดุจริงและวัสดุเสมือน ซึ่งช่วยลดปัญหาค่าความไวลวง (False Positive Sensitivities)

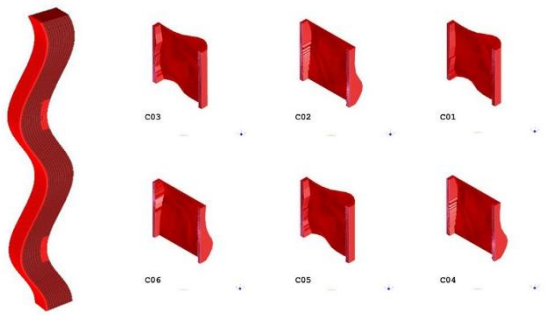
ผลที่ได้คือโครงสร้างที่ได้มีความเสถียรมากกว่าในการแปรผันแต่ละรอบของการคำนวณ อีกทั้งยังใช้เวลาน้อยลง เนื่องจากกระบวนการตัดสินใจมีความชัดเจนและลดความไม่แน่นอนในการประมวลผลได้ดีกว่า BESO ในบางกรณี SERA ยังเหมาะกับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นหรือระบบที่ซับซ้อนทางกลศาสตร์

2.2.3 Topology Optimization of 3D-Printed Concrete Structures

BESO Method (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างโดยมุ่งลดวัสดุในส่วนที่ไม่จำเป็นต่อการรับแรง ขณะเดียวกันก็ยังคงสมรรถนะทางโครงสร้างไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลักการทำงานของ BESO อ้างอิงจากผลการวิเคราะห์ทางกลด้วย Finite Element Methods (FEM) เพื่อเพิ่มหรือลดวัสดุโดยอิงจากค่าความเค้นและความเครียดในองค์ประกอบต่าง ๆ

จากผลการศึกษาหลายกรณี BESO สามารถลดปริมาณวัสดุได้อย่างมีนัยสำคัญโดยไม่ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของโครงสร้าง การประยุกต์ BESO กับการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ (3D Concrete Printing) ยังช่วยให้สามารถออกแบบโครงสร้างรูปทรงซับซ้อนและน้ำหนักเบาได้อย่างเหมาะสม

ตัวอย่างจากงานวิจัยร่วมระหว่างจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและบริษัท SCG พบว่า BESO สามารถปรับปรุงการออกแบบแผ่น Façade โดย Prototype I ลดน้ำหนักได้ถึง 74.5% และ Prototype II ลดได้ 74% ขณะยังคงสมรรถนะด้านการรับแรงไว้ในระดับใกล้เคียงเดิม



รูปที่ 1 โครงสร้างแผ่น Façade ก่อนและหลังการลดวัสดุ

3 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 การศึกษาสถานการณ์การชนของยานพาหนะกับแบริเออร์ตามแนวทาง MASH 2016

เพื่อให้การออกแบบโครงสร้างแบริเออร์มีความสอดคล้องกับสถานการณ์จริง งานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการศึกษามาตรฐาน Manual for Assessing Safety Hardware (MASH 2016) ซึ่งจัดทำโดยสมาคม AASHTO และใช้เป็นแนวทางกลางในการทดสอบอุปกรณ์ด้านความปลอดภัยริมทาง เช่น แบริเออร์ ราวกันตก และระบบลดแรงกระแทก โดยเฉพาะในกรณีของ Longitudinal Barrier ซึ่งติดตั้งขนานกับแนวถนน

การชนของยานพาหนะกับแบริเออร์ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดใน MASH นั้น ก่อให้เกิดพลังงานกระแทกที่สามารถคำนวณได้จากสมการพลังงานจลน์:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \qquad (1)$$

m หมายถึงมวลของยานพาหนะ และ v หมายถึงความเร็วขณะชน

TABLE 2-2B. Recommended Test Matrices for Longitudinal Barriers

Test Desig. No.	Veh. Type	Impact Conditions		V-Ditch Width (ft)	Barrier Posi-tion	Barrier Loca-tion[a]	Critical Impact Point	Accept-able IS Range,[b] kip-ft (kJ)	Eval. Criteria[c]
		Speed, mph (km/h)	Angle (deg)						
3-10	1100C	62 (100)	25	NA[d]	Level Terrain	NA[d]	Midspan Location	≥51 (69.7)	A,D,F,H,I
3-11	2270P	62 (100)	25	NA[d]	Level Terrain	NA[d]	1 ft Upstream from Post	≥106 (144)	A,D,F,H,I
3-13	2270P	62 (100)	25	46	Front Slope	12 ft from Front SBP[e]	1 ft Upstream from Post	≥106 (144)	A,D,F,H,I
3-14	1100C	62 (100)	25	46	Front Slope	12 ft from Front SBP[e]	Midspan Location	≥51 (69.7)	A,D,F,H,I
3-15	1100C	62 (100)	25	46	Back Slope	4 ft from Ditch Bottom	Midspan Location	≥51 (69.7)	A,D,F,H,I
3-16	1100C	62 (100)	25	46	Back Slope	4 ft from Back SBP[e]	Midspan Location	≥51 (69.7)	A,D,F,H,I
3-17	1500A	62 (100)	25	46	Front Slope	Variable[f]	Midspan Location	≥70 (95.1)	A,D,F,H,I
3-18	2270P	62 (100)	25	46	Back Slope	8 ft from Back SBP[e]	1 ft Upstream from Post	≥106 (144)	A,D,F,H,I

a See Figure 2-2A for barrier placement.
b See Section 2.1.2 for tolerances on impact conditions.
c See Table 5-1.
d Not applicable.
e Slope break point.
f Testing laboratory should determine critical barrier position on front slope of ditch in order to maximize propensity for front end of 1500A vehicle to penetrate between vertically adjacent cables. Critical factors may include vertical cable spacing, position of cables relative to front bumper, location and type of cable release mechanisms, trajectory of vehicle's front bumper, etc.

รูปที่ 2 แสดงชนิดของรถความเร็วและมุมในการเข้าชน

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากพลังงานที่คำนวณได้จาก (1) ไม่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ทางโครงสร้างได้โดยตรง จึงต้องมีการแปลงให้อยู่ในรูปของแรงภายนอก ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3.2 การใช้ข้อมูลการเสียรูปเพื่อแปลงพลังงานจากการชนเป็นแรงสถิต

เพื่อแปลงพลังงานจากการชนให้อยู่ในรูปของแรงที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างได้ งานวิจัยนี้ได้อ้างอิงข้อมูลพฤติกรรมการเสียรูปของแบริเออร์จาก Impact on car park structures [2] ซึ่งสามารถใช้แทนค่าการเสียรูปในระบบโครงสร้างภายใต้แรงกระทำโดยใช้แนวคิดจาก:

Impact force according to Annex B of BS EN 1991-1-1

The characteristic impact force F is given by:

$F = 0.5mv^2/(\delta_c + \delta_b)$

where:

m is the mass of the vehicle in kg, taken as 1500 kg for vehicles with a gross mass not exceeding 2500 kg

v is the velocity of the vehicle in m/s, taken to be 4.5 m/s

δ_c is the deformation of the vehicle, taken to be 100 mm

δ_b is the deformation of the barrier (or in this case, the column)

รูปที่ 3 แสดงสมการที่ใช้ในการคำนวณแปลงพลังงานจากการชนเป็นแรงสถิต

คำนวณแรงสถิตจากพลังงานกระแทกจากสมการที่ได้

$$F = E / (\delta_c + \delta_b) \quad (2)$$

เมื่อ E คือพลังงานจลน์จากการชน (ที่ได้จาก MASH), F คือแรงสถิตที่ต้องการหา, δ_c คือค่าการเสียรูปของยานพาหนะ, δ_bคือค่าการเสียรูปของแบริเออร์

เมื่อไม่มีการเสียรูปของแบบแบริเออร์คอนกรีตสามารถจัดรูปสมการใหม่เพื่อคำนวณหา F ได้ดังนี้:

$$F = \frac{U}{\delta c} \quad (3)$$

แรงที่คำนวณได้นี้จะถือเป็น แรงสถิตสมมูล (Equivalent Static Load) ซึ่งสามารถใช้เป็นภาระในการออกแบบหรือจำลองด้วยวิธีวิเคราะห์โครงสร้างได้

จากข้อมูลที่ได้ศึกษามานั้นจะใช้ในการคำนวณหาแรงที่จะนำไปใช้ในโครงงานนี้สามารถคำนวณได้จากสมการพลังงานกลโดยเลือกใช้ข้อมูลดังนี้ รถกระบะบรรทุกมาตรฐาน โดยมีขนาด 2270 กิโลกรัม และมีความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง การเสียรูปของยานพาหนะประมาณ 100 มม. มุมในการชน 25 องศา จึงสามารถคำนวณหาแรงที่แบริเออร์ต้องรับได้จากสมการ (3)

3.3 การศึกษาวิธีการทำงานของวิธีการ BESO และ SERA

3.3.1 วิธีการวิเคราะห์ Finite Element Methods (FEM)

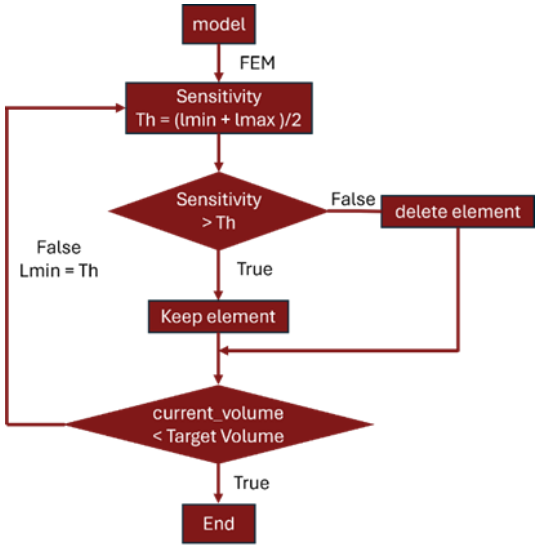
ศึกษากลไกการทำงานของวิธี BESO และเปรียบเทียบกับวิธี SERA โดยศึกษาจากเอกสารอ้างอิง [3], [4] ซึ่งใช้ MATLAB ในการประมวลผล Finite Element Analysis (FEM) อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม Strand7 แทนเพื่อประมวลผล FEM จึงไม่ได้ลงรายละเอียดในส่วนการเขียนคำสั่ง MATLAB มากนัก

3.3.2 วิธีการเลือกนำเอาชิ้นส่วนที่สนใจเก็บไว้ด้วยวิธีการ BESO และ SERA

สำหรับวิธีการ BESO กระบวนการเลือกชิ้นส่วนที่คงไว้หรือลบทิ้งจะอิงตามค่าความสำคัญขององค์ประกอบ ซึ่งได้จากผลการวิเคราะห์ FEM โดยคำนวณเกณฑ์การตัดสินใจ (Threshold) จากสมการ:

$$Th = \frac{Lmin+Lmax}{2} \quad (4)$$

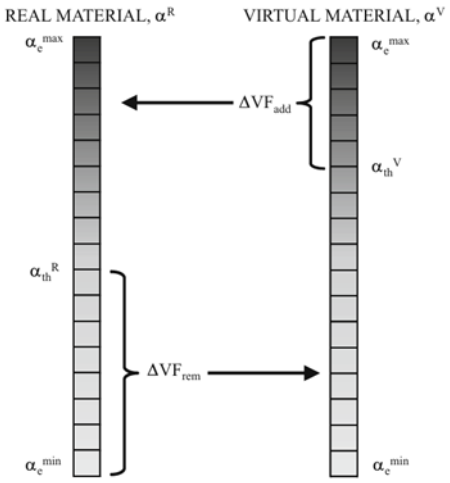
L_{min} หมายถึงค่าความสำคัญต่ำสุด และ L_{max} หมายถึงค่าความสำคัญสูงสุด



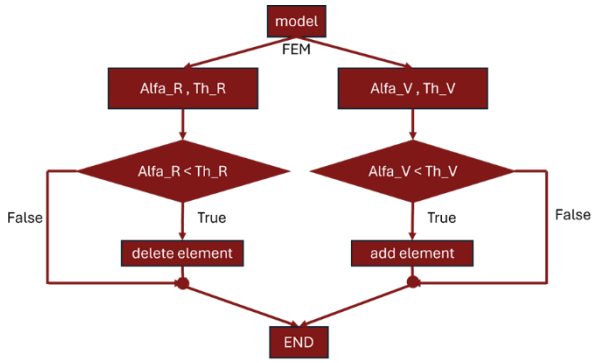
รูปที่ 4 รูปแสดงการทำงานของวิธีการ BESO

หากค่าความสำคัญขององค์ประกอบใดสูงกว่า Th จะคงองค์ประกอบนั้นไว้ หากต่ำกว่าจะถูกลบออก กระบวนการนี้จะดำเนินไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะถึงปริมาณวัสดุที่กำหนด หรือถึงเกณฑ์ความสามารถในการรับแรงที่ต้องการ

SERA (Sequential Element Rejection and Admission) เป็นเทคนิคที่พัฒนาต่อจาก BESO โดยเพิ่มกระบวนการแยกค่าความสำคัญขององค์ประกอบออกเป็นสองชุด ได้แก่ α_R สำหรับการลบ และ α_V สำหรับการเพิ่มวัสดุ



รูปที่ 5 รูปแสดงการคำนวณค่า Th ของวิธีการ SERA



รูปที่ 6 รูปแสดงการทำงานของวิธีการ SERA

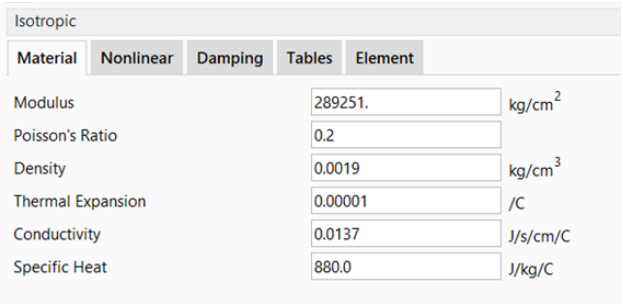
จากนั้นคำนวณค่าเกณฑ์ และ แยกกันเพื่อใช้ในการตัดสินใจลบหรือเพิ่มองค์ประกอบในแต่ละ iteration หากค่าความสำคัญขององค์ประกอบในชุด Th_R น้อยกว่า จะทำการลบชิ้นส่วนนั้น และหากค่าความสำคัญขององค์ประกอบในชุด Th_V น้อยกว่า จะทำการเพิ่มชิ้นส่วนนั้น หลังจากกระบวนการทั้งสองชุดเสร็จสิ้นแล้ว ระบบจะทำการตรวจสอบว่าสามารถรับแรงได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดหรือไม่ ก่อนเข้าสู่รอบถัดไป

3.4 การเขียนโปรแกรม Python สำหรับวิธีการ BESO และ SERA

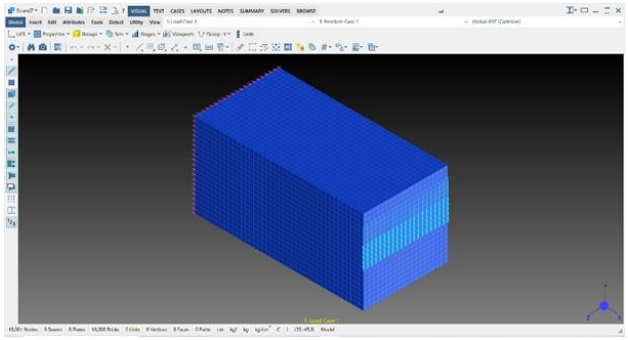
3.4.1 การใช้โปรแกรม strand7 ในการคำนวณ Finite Element Methods (FEM)

จากที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนหน้า โปรแกรม Strand7 ถูกเลือกใช้ในการวิเคราะห์ Finite Element Analysis (FEM) เนื่องจากสามารถประมวลผลได้รวดเร็ว และใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์น้อยเมื่อเทียบกับโปรแกรมประเภทเดียวกัน

ในงานวิจัยนี้ ได้สร้างแบบจำลองโครงสร้างภายในโปรแกรม Strand7 โดยกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ และเงื่อนไขภาระต่าง ๆ ให้สอดคล้องกับสถานการณ์จริงของโครงสร้างแบริเออร์ ตัวอย่างการตั้งค่าคุณสมบัติของวัสดุและแบบจำลองที่ใช้ปรากฏดังในรูปภาพด้านล่าง



รูปที่ 7 การตั้งค่าวัสดุใน Strand7 สำหรับการวิเคราะห์ FEM

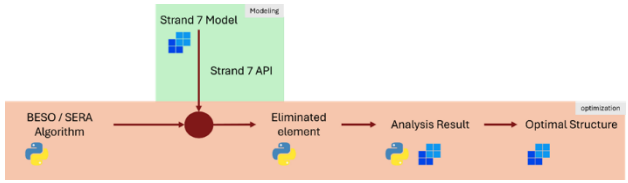


รูปที่ 8 โมเดลใน Strand7 สำหรับการวิเคราะห์ FEM

3.4.2 การเขียนโปรแกรม python สำหรับวิธีการ BESO และ SERA โดยใช้ผลจากโปรแกรม strand7

หลังจากได้แบบจำลองและผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม Strand7 แล้ว ข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพโครงสร้างด้วยวิธี BESO และ SERA โดยการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Python ซึ่งจะทำหน้าที่ในการควบคุมการลบหรือเพิ่มองค์ประกอบในโครงสร้างตามเงื่อนไขของแต่ละวิธี

กระบวนการเชื่อมโยงระหว่าง Python และ Strand7 ดำเนินการผ่านคำสั่ง API ที่ Strand7 รองรับ โดยลำดับขั้นตอนการทำงานสามารถสรุปได้เป็น 2 ส่วนหลัก คือ การขึ้นโมเดลและวิเคราะห์ FEM ด้วยโปรแกรม Strand7 และการประมวลผลการเพิ่มประสิทธิภาพด้วย Python โดยใช้ข้อมูลที่ได้จาก Strand7 ผ่าน API



รูปที่ 9 รูปแสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรม

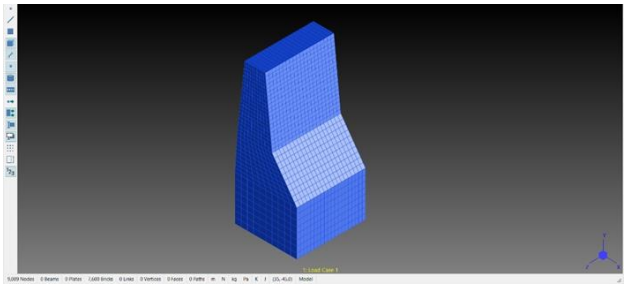
จากแผนผังดังกล่าวจะเห็นว่าระบบการทำงานแบ่งออกเป็นส่วนของการจำลองโครงสร้างในโปรแกรม Strand7 และส่วนของการวิเคราะห์เชิงคำนวณด้วย Python โดยเมื่อกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพเสร็จสิ้น ระบบจะส่งโมเดลที่ปรับปรุงแล้วกลับเข้าสู่ Strand7 เพื่อวิเคราะห์ซ้ำและตรวจสอบสมรรถนะของโครงสร้าง

3.5 การปรับใช้โปรแกรมกับโครงสร้างประเภทแบริเออร์

สำหรับการจำลองโครงสร้างในงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้แบบมาตรฐานของกรมทางหลวงในการสร้างโมเดลแบริเออร์ในโปรแกรม Strand7 โดยรูปทรงและขนาดของแบริเออร์ถูกนำเข้าเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ Finite Element โมเดลที่สร้างขึ้นประกอบด้วยองค์ประกอบย่อย (elements) จำนวน 7,600 ชิ้น ซึ่งสามารถปรับเพิ่มหรือลดจำนวนองค์ประกอบได้ตามระดับความละเอียดที่ต้องการ

ทั้งนี้ การเพิ่มจำนวนชิ้นส่วนแม้จะช่วยให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำมากขึ้น แต่ก็ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณทรัพยากรที่ต้องใช้ในการคำนวณ ไม่ว่าจะเป็นหน่วยความจำ เวลาในการวิเคราะห์ หรือความสามารถในการจัดการข้อมูลของคอมพิวเตอร์ ดังนั้น การ

กำหนดความละเอียดของโมเดลจึงต้องคำนึงถึงความสมดุลระหว่างความแม่นยำและประสิทธิภาพของระบบ



รูปที่ 10 โมเดลของแบริเออร์ในโปรแกรม Strand7 ที่ใช้ในการวิเคราะห์

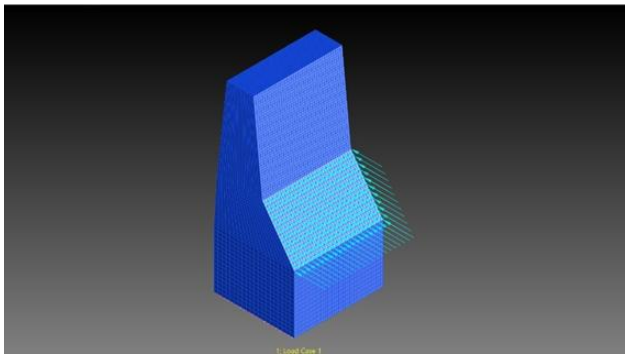
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 หลักการโดยรวม

หลังจากตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมแล้ว งานวิจัยได้นำโครงสร้างคานยื่น 3 มิติมาใช้เป็นกรณีศึกษาสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยวิธี BESO และ SERA เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแต่ละวิธี ก่อนนำไปวิเคราะห์กับโครงสร้างประเภทแบริเออร์ในขั้นตอนถัดไป

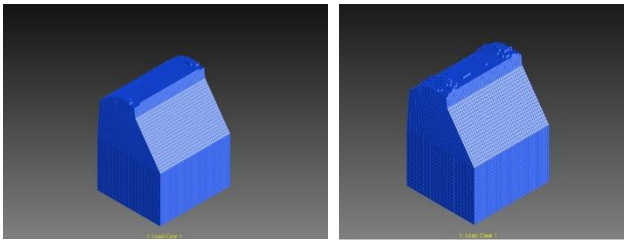
4.2 โครงสร้างประเภทแบริเออร์

ในการศึกษานี้ ได้เลือกใช้โครงสร้างแบริเออร์ที่มีสัดส่วนตรงตามแบบมาตรฐานของกรมทางหลวง โดยแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งโมเดลดังกล่าวมีจำนวนองค์ประกอบรวม 60,800 ชิ้น และใช้ตำแหน่งแรงกระทำที่จำลองจากจุดชนตามรูปที่ 10 และรูปที่ 11



รูปที่ 11 โมเดล 3 มิติของแบริเออร์ในโปรแกรม strand7

หลังจากสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Strand7 เสร็จสิ้น จึงนำแบบจำลองไปประมวลผลด้วยโปรแกรมที่พัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างด้วยวิธี BESO และ SERA โดยตั้งค่าปริมาตรเป้าหมาย (Target Volume Fraction) ไว้ที่ 0.5 ผลลัพธ์แสดงในรูปที่ 12 และรูปที่ 13 และสรุปไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 12 และรูปที่ 13 แสดงผลที่ได้ของโครงสร้างแบริเออร์หลังการเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างด้วยวิธีการ BESO และ SERA ตามลำดับ

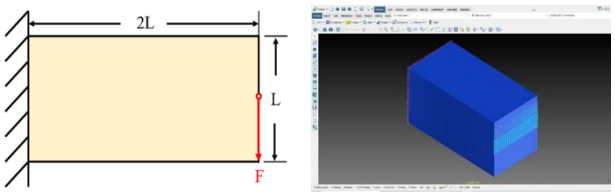
ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบผลการเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างแบริเออร์ด้วยวิธีการ BESO และ SERA

Cantilever beam case	Avg. time (second)	Number of elements	Volume Fraction	
BESO	11,683	31,914	0.5249	
SERA	7,880	31,961	0.5257	
	33%	47	0.0008	Diff%

จากตารางที่ 1 พบว่าค่าความแตกต่างของจำนวนชิ้นส่วนที่เหลือระหว่างวิธี BESO และ SERA อยู่ที่เพียง 47 ชิ้น หรือคิดเป็น 0.08% ซึ่งถือว่าไม่มีนัยสำคัญ โดยองค์ประกอบที่ถูกลบออกในทั้งสองวิธีมีลักษณะคล้ายคลึงกัน อย่างไรก็ตาม SERA ใช้เวลาคำนวณน้อยกว่าถึง 33% และเมื่อตรวจสอบตำแหน่งของชิ้นส่วนที่ถูกลบ พบว่าอยู่บริเวณด้านบนของโครงสร้าง ซึ่งมีบทบาทต่ำในแง่การรับแรงจากการชน แม้อาจมีความสำคัญในเรื่องทัศนวิสัย จึงอาจสรุปได้ว่า แม้ BESO และ SERA จะมีประสิทธิภาพในการลดวัสดุ แต่ยังไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับการใช้งานในโครงสร้างประเภทแบริเออร์ที่มีข้อจำกัดเฉพาะด้านอื่นร่วมด้วย

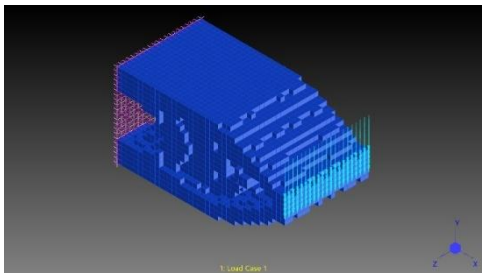
4.3 ตัวอย่างเพิ่มเติมของการเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างด้วยวิธีการ BESO และ SERA ในโปรแกรม strand7 ของคานยื่น 3 มิติ

ตัวอย่างนี้ ได้เลือกโครงสร้างคานยื่น 3 มิติที่มีสัดส่วน 1:1:2 สำหรับการทดลองเพิ่มตามที่แสดงดังรูปที่ 14 โดยใช้แรง 1 หน่วยกดลงไปที่บริเวณตรงกลางของความสูงตามแนวแกน Y ตามที่แสดงดังรูปที่ 15 โดยมีชิ้นส่วนจำนวน 16,000 ชิ้น

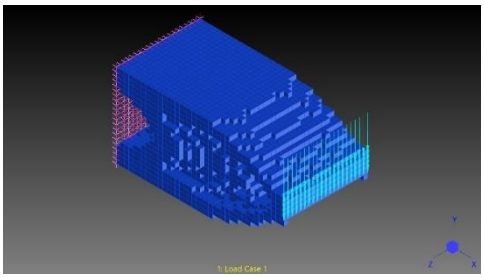


รูปที่ 14 และรูปที่ 15 ภาพ 2 มิติ และ 3 มิติ ของโมเดลคานยื่นใน Strand7 ตามลำดับ

หลังจากทำการขึ้นโมเดลใน strand7 เรียบร้อยก็จะนำโมเดลที่มีไปใช้กับโปรแกรมที่พัฒนาไว้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างทั้งแบบ BESO และ SERA โดยได้ตั้งปริมาตรเป้าหมาย(Target Volume Fraction) ไว้ที่ 0.5 ผลลัพธ์ที่ได้ดังรูปที่ 16 และรูปที่ 17 และผลลัพธ์การเปรียบเทียบของผลการเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างเป็นดังตารางที่ 2



รูปที่ 16 ผลลัพธ์ของ BESO

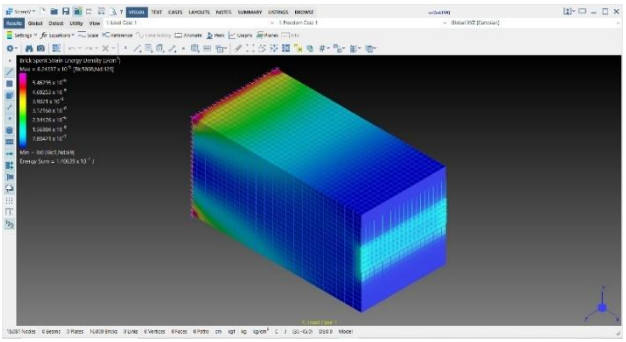


รูปที่ 17 ผลลัพธ์ของ SERA

ตารางที่ 2 ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลการเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างด้วยวิธีการ BESO และ SERA

Cantilever beam case	Avg. time (second)	Number of elements	Volume Fraction	
BESO	840	8,628	0.5393	
SERA	730	8,408	0.5255	
	15%	220	0.0138	Diff%

จากผลการทดลอง พบว่าวิธีการ BESO และ SERA จะได้ค่าความแตกต่างของจำนวนชิ้นส่วนเพียง 220 ชิ้นหรือคิดเป็น 1.38% ซึ่งสรุปได้ว่ามีผลความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ หากมองจากรูปแบบของชิ้นส่วนที่โดนลบไปก็มีความคล้ายคลึงกันแต่ถ้าหากคำนึงถึงเวลาที่ใช้ในการทำงานนั้นจะพบว่าวิธี SERA ใช้เวลาน้อยกว่าวิธี BESO ถึง 15% ทำให้สรุปได้ว่าทั้งสองวิธีนั้นไม่มีความต่างในด้านประสิทธิภาพการเพิ่มหรือลบชิ้นส่วนในด้านการใช้ทรัพยากรในการคำนวณนั้นวิธี SERA สามารถทำได้ดีกว่าวิธี BESO ถึง 15% ซึ่งนอกจากการวัดประสิทธิภาพของแต่ละวิธีการแล้วนั้นก็จะตรวจสอบความถูกต้องของการทำงานโดยเปรียบเทียบจากการทำ Finite Element Methods ของโปรแกรม strand 7 ตามที่แสดงดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 แผนที่ความเครียดจาก FEA

จากรูปที่ 18 แสดงค่าความเครียดของโครงสร้างแบริเออร์ พบว่าบริเวณที่แสดงเป็นสีฟ้าเข้มเป็นพื้นที่ที่มีค่าความเครียดต่ำ แสดงถึงบทบาทเชิงโครงสร้างที่ต่ำหรือไม่มีความสำคัญในการรับแรงของโครงสร้างโดยรวม จึงสามารถพิจารณาตัดออกได้อย่างเหมาะสม

เมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งดังกล่าวกับผลลัพธ์จากการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยวิธี BESO และ SERA ที่ปรากฏในรูปที่ 16 และ 17 ตามลำดับ พบว่าบริเวณที่ถูกลบออกโดยอัลกอริทึมทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกับบริเวณที่ค่าความเครียดต่ำอย่างชัดเจน ซึ่งสะท้อนถึงความแม่นยำของการประมวลผลภายในโปรแกรมที่พัฒนา และยืนยันถึงประสิทธิภาพในการคัดเลือกองค์ประกอบที่ไม่จำเป็นออกจากโครงสร้างได้อย่างถูกต้องและมีเหตุผลทางวิศวกรรมรองรับ

5 บทสรุป

การศึกษานี้มุ่งเน้นวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพโครงสร้างสองแนวทาง คือ BESO (bi-directional evolutionary structural optimization method) และ SERA (sequential element rejection and admission) โดยนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการวิเคราะห์องค์ประกอบจำกัด (Finite Element Analysis: FEM) ผ่านโปรแกรม Strand7 และการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Python เพื่อควบคุมและประมวลผลการเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างอย่างเป็นระบบ การใช้งาน Strand7 ช่วยให้สามารถตั้งค่าคุณสมบัติของวัสดุและสร้างแบบจำลองเชิงโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพและประหยัดทรัพยากรคอมพิวเตอร์

ผลการศึกษาในกรณีของคานยื่น 3 มิติ ซึ่งเป็นกรณีตัวอย่างเบื้องต้น พบว่าทั้ง BESO และ SERA สามารถลดปริมาตรของโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยคงไว้ซึ่งความสามารถในการรับแรงและความมั่นคงของโครงสร้างตามเป้าหมายในส่วนของความแตกต่างของจำนวนชิ้นส่วนที่เหลืออยู่หลังการเพิ่มประสิทธิภาพของแต่ละวิธีนั้นใกล้เคียงกันมากโดยอยู่ที่ระดับ 1.38% ขณะที่ SERA ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าถึง 15% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบในด้านประสิทธิภาพเชิงเวลาและการจัดการทรัพยากร

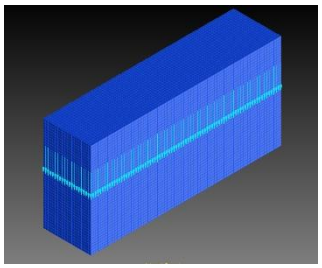
ในกรณีศึกษาที่สองซึ่งเป็นโครงสร้างแบริเออร์จำลองตามแบบของกรมทางหลวง ผลการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยทั้งสองวิธียังคงได้ผลใกล้เคียงกัน โดยความแตกต่างของจำนวนชิ้นส่วนที่ได้อยู่ที่เพียง 47 ชิ้น หรือคิดเป็น 0.08% ซึ่งถือว่าไม่มีนัยสำคัญเชิงโครงสร้าง อย่างไรก็ตาม วิธี SERA ยังคงมีความได้เปรียบชัดเจนในด้านระยะเวลาใน

การคำนวณ โดยใช้เวลาน้อยกว่าวิธี BESO ถึง 33% เมื่อวิเคราะห์ตำแหน่งของชิ้นส่วนที่ถูกลดทอนในโครงสร้างแบริเออร์ พบว่าส่วนใหญ่เป็นบริเวณด้านบนของโครงสร้างซึ่งมีระดับความสำคัญต่ำ ในแง่ของการรับแรงกระแทกจากการเข้าชน แต่ยังคงมีความสำคัญต่อฟังก์ชันการมองเห็นและความปลอดภัยในทางหลวง

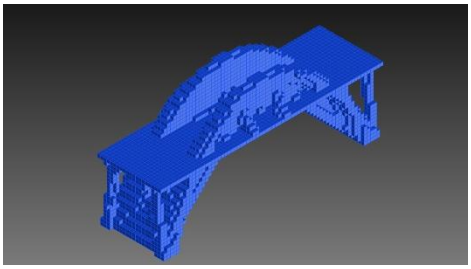
เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดที่ได้จากโปรแกรม Strand7 กับตำแหน่งของชิ้นส่วนที่ถูกลบโดยอัลกอริทึม พบว่ามีความสอดคล้องกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ส่วนที่ถูกลบเป็นบริเวณที่มีค่าความสำคัญต่ำ ซึ่งสนับสนุนว่าการประมวลผลของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าทั้ง BESO และ SERA จะให้ผลการเพิ่มประสิทธิภาพในเชิงโครงสร้างได้ดีในเชิงตัวเลข แต่สำหรับโครงสร้างที่มีข้อจำกัดเฉพาะด้านการใช้งานจริง เช่น แบริเออร์ถนน ซึ่งต้องคำนึงถึงมาตรฐานความปลอดภัยและทัศนวิสัยของผู้ขับขี่ การใช้วิธีเพิ่มประสิทธิภาพโครงสร้างเชิงกลศาสตร์เพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ จำเป็นต้องพิจารณาร่วมกับข้อกำหนดด้านอื่นอย่างรอบด้านเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่สมบูรณ์ทั้งในเชิงเทคนิคและการใช้งานจริง

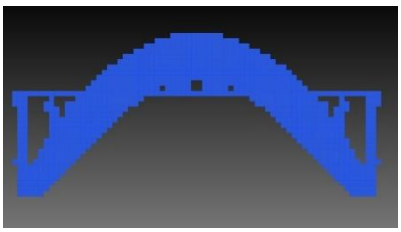
โดยสรุป การศึกษาแสดงให้เห็นว่า SERA เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในเชิงเวลาเหนือกว่า BESO อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ทั้งสองวิธีสามารถบรรลุเป้าหมายด้านโครงสร้างได้ในระดับใกล้เคียงกัน เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในโครงสร้างทั่วไปที่มีเป้าหมายด้านประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์เป็นหลักตามที่แสดงดังรูปที่ 19, 20 และ 21 แต่จำเป็นต้องมีการพิจารณาความเหมาะสมของแต่ละวิธีในบริบทของการใช้งานจริงที่หลากหลายและซับซ้อนมากขึ้น



รูปที่ 19 แสดงโมเดลจำลอง ก่อนใช้เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพโครงสร้างในการออกแบบสะพาน



รูปที่ 20 แสดงโมเดล 3มิติ จากการใช้เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพโครงสร้างในการออกแบบสะพาน



รูปที่ 21 แสดงโมเดล 3มิติ จากการใช้เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพโครงสร้างในการออกแบบสะพาน (มุมข้าง)

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์และการสนับสนุนจากบุคคลและหน่วยงานหลายฝ่าย ซึ่งผู้จัดทำขอน้อมรำลึกและแสดงความขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ แนวทางการดำเนินงานวิจัย รวมถึงข้อเสนอแนะอันทรงคุณค่า ตลอดระยะเวลาของการศึกษาและจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

นอกจากนี้ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการสนับสนุนทรัพยากร อุปกรณ์การวิจัย และข้อมูลที่เกี่ยวข้องอย่างต่อเนื่อง ขอขอบคุณเพื่อนร่วมรุ่น และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ให้ความร่วมมือ อภิปราย แลกเปลี่ยนความคิดเห็น และให้กำลังใจ ซึ่งล้วนมีส่วนสำคัญในการผลักดันให้โครงการนี้สำเร็จตามเป้าหมาย

ท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำขอแสดงความขอบพระคุณอย่างสุดซึ้งต่อครอบครัว และ บุคคลอันเป็นที่รัก โดยเฉพาะพี่เอ็มถ้าไม่มีพี่พวกเราคงแย่ สำหรับการสนับสนุน ทั้งในด้านจิตใจและกำลังใจ อันเป็นพลังสำคัญตลอดระยะเวลาของการศึกษา

เอกสารอ้างอิง

[1] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Manual for Assessing Safety Hardware (MASH), 2 nd ed. Washington, D.C.: AASHTO, 2016.

[2] Washington State Department of Transportation (WSDOT), Design Manual Chapter 1610: Traffic Barriers, M 22-01.23. Olympia, WA: Washington State Department of Transportation, 2024.

[3] Y. Han, B. Xu, and Y. Liu, “An efficient 137-line MATLAB code for geometrically nonlinear topology optimization using bi-directional evolutionary structural optimization method,” Structural and Multidisciplinary Optimization, vol. 63, pp. 2571–2588, 2021.

[4] R. A. Loyola, O. M. Querin, A. G. Jiménez, and C. A. Gordoa, “A sequential element rejection and admission (SERA) topology optimization code written in Matlab,” Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018.

[5] S. Tangaramvong, N. Chantab, P. Amornsittipipat, and S. Rungsawang, Topology Optimization of 3 D-Printed Concrete Structures, 2024.