อัลกอริทึมการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสมด้วยเทคนิคการจำลองการอบเหนียว

นายอลงกรณ์ ละม่อม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OPTIMIZED MATERIAL SIZE SELECTION ALGORITHM USING SIMULATED ANNEALING TECHNIQUE

Mr. Alongkorn Lamom

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Computer Engineering

Department of Computer Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

500887

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อัลกอริทึมการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสมด้วยเทคนิคการจำลองการอบเหนียว
โดย	นาย อลงกรณ์ ละม่อม
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ริ้วไพบูลย์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ วัฒนาวุฒิ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ริ้วไพบูลย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาตรี)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถสิทธิ์ สุรฤกษ์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชโยทัย มหัทธนาภิวัฒน์)

อลงกรณ์ ละม่อม : อัลกอริทึมการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสมด้วยเทคนิคการจำลองการอบเหนียว. (OPTIMIZED MATERIAL SIZE SELECTION ALGORITHM USING SIMULATED ANNEALING TECHNIQUE) อาจารย์ที่ปรึกษา: รศ.ดร. วันชัย ริ้วไพบูลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม: ศ.ดร. ทักษิณ เทพชาตรี, 167 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับการสร้างรหัสตัวเลข สำหรับสนับสนุนการสร้างสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้จำลองพฤติกรรมของโครงสร้างที่มีจุดต่อแบบผสมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และนำไปประยุกต์กับอัลกอริทึมสำหรับการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสมเพื่อลดปริมาณการใช้เหล็กในโครงสร้าง โดยมุ่งเน้นเฉพาะโครงสร้างใน 2 มิติ ซึ่งในปัจจุบันซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างแบบ 2 มิติ จะต้องใช้เอลิเมนต์ 2 ชนิด ซึ่งประกอบด้วยเอลิเมนต์โครงข้อแข็งและเอลิเมนต์โครงข้อหมุน เพื่อให้มีความสามารถในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างทั้งสองชนิด ซึ่งเป็นการเปลืองทรัพยากรความจำ อีกทั้งไม่สามารถทำการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างในกรณีที่จุดต่อมีคุณลักษณะแตกต่างไปจากกรณีของจุดต่อหมุนและจุดต่อแข็งได้โดยวิธีปกติธรรมดา

ด้วยเทคนิคการสร้างรหัสตัวเลขที่นำเสนอใหม่นี้ ซอฟต์แวร์วิเคราะห์โครงสร้างจะสามารถจำลองพฤติกรรมโครงสร้างได้มากรูปแบบขึ้น โดยที่ยังคงมีความสามารถในการจำลองพฤติกรรมเช่นเดียวกับการใช้เอลิเมนต์ 2 ชนิด และเมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวเพื่อใช้ในการเลือกขนาดวัสดุจะสามารถช่วยลดปริมาตรเหล็กที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามการเลือกขนาดวัสดุโดยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวก็ต้องใช้จำนวนรอบในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างเป็นจำนวนมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เสนอฮิวริสติกอัลกอริทึมสำหรับการเลือกขนาดวัสดุเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการเลือกขนาดวัสดุ การศึกษาพบว่าการเลือกขนาดวัสดุโดยฮิวริสติกอัลกอริทึมจะให้ผลได้ดีเช่นเดียวกับอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว แต่ใช้จำนวนรอบในการจำลองพฤติกรรมที่น้อยกว่าอย่างชัดเจน

ภาควิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์	ลายมือชื่อนิสิต	อลงกรณ์ ละม่อม
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา	2550	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

467 18373 21 : MAJOR COMPUTER ENGINEERING

KEYWORD : MATERIAL SIZE SELECTION ALGORITHM / CODE NUMBER / HYBRID CONNECTION SIMULATION / STRUCTURAL SIMULATION ALGORITHM

ALONGKORN LAMOM : OPTIMIZED MATERIAL SIZE SELECTION ALGORITHM USING SIMULATED ANNEALING TECHNIQUE. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.WANCHAI RIVEPIBOON, PH.D., THESIS COADVISOR : PROF.THAKSIN THEPCHATRI, PH.D., 167 pp.

This thesis proposes a new algorithm for generating code numbers used in formulating mathematical equation to idealize structural behaviors having hybrid connections in finite element method. The method is then incorporated with an optimization algorithm to obtain optimum member sizes of planar structures. In the traditional technique, the algorithm supports simulation of only two types of connection, i.e. hinged and rigid connections. Although some cases of hybrid connection can be handled by using a release hinged technique, the technique does not cover all types of hybrid connection simulation. Moreover, for a planar problem, the traditional technique uses many element types to simulate each type of connection and hence requires more computer resources. The proposed algorithm, on the other hand, requires only one frame element type to simulate hinged, rigid and various hybrid connection types. Hence, the method does not only improve the ability of connection simulation, but reduces the cost, time and effort in developing the computer software. In addition, the new simulation technique is applied with the simulated annealing algorithm to optimize the material sizes selection of planar structures. With this optimization technique, the steel volume of the structure can be reduced significantly. However, from the study, it has been found that the simulated annealing algorithm requires many structural simulation cycles to obtain the final result. To solve this problem, a proposed heuristic algorithm is used instead. The steel volume of the structure obtained by the simulated annealing algorithm and the heuristic algorithm for material size selection are equal, but the heuristic algorithm spends less structural simulation cycles than the simulated annealing algorithm.

Department	Computer Engineering	Student's signature	
Field of study	Computer Engineering	Advisor's signature	
Academic year	2007	Co-advisor's signature	

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยได้รับคำแนะนำ และคำปรึกษาต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างมากจาก รศ.ดร.วันชัย ริ้วไพบูลย์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ และ ศ.ดร.ทักษิณ เทพชาตรี อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านทั้งสอง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้เขียนยังอยากแสดงความขอบพระคุณไปถึง อ.ดร.ทนงศักดิ์ พิศาลสิน อาจารย์ประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเคยช่วยให้คำแนะนำต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท นอกจากนี้แล้วยังมี ผศ.ดร.อรรถสิทธิ์ สุรฤกษ์ อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งช่วยให้คำแนะนำต่างๆ ในการเขียนบทความลงในวารสารวิชาการซึ่งเป็นประโยชน์มาจนถึงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วย รวมถึง ศ.ดร.ประภาส จงสถิตวัฒนา ที่คอยให้คำแนะนำและช่วยเหลือเสมอมา

นอกจากนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณและเอ่ยนามถึงบุคคลต่างๆที่ได้มีส่วนร่วมช่วยในการสร้างงานวิจัยชิ้นนี้ขึ้นมาจนสำเร็จ

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.วิวัฒน์ วัฒนาวุฒิ และ ผศ.ดร.พิชโยทัย มหัทธนาภิวัฒน์เป็นอย่างสูงที่เสียสละเวลาอันมีค่ามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ทุกท่านที่ให้ข้อคิดและแนวทางในการวิจัย จนทำให้สามารถแก้ไขปัญหาต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาฯทุกท่าน ซึ่งให้ความอนุเคราะห์ในการอำนวยความสะดวกต่างๆ ในการทำงานตั้งแต่ต้น รวมถึงเพื่อนๆ และพี่น้องนิสิตทุกคน โดยเฉพาะนิสิตในห้องวิจัยวิศวกรรมซอฟต์แวร์ (Software Engineering Laboratory) ที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่างๆ พร้อมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขทฤษฎีและอื่นๆ ที่ผิดพลาดจนสำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และยังให้กำลังใจต่อผู้เขียนอย่างใกล้ชิดตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านตลอดจนนักวิจัยท่านอื่นๆ ที่เห็นคุณค่าของงานวิจัยนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฎ

สารบัญภาพ..... ฐ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 6

1.3 ขอบเขตการวิจัย..... 6

1.3.1 ขอบเขตการวิจัยของการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างโดยใช้อัลกอริทึมใหม่ในการสร้างรหัสตัวเลข..... 6

1.3.2 ขอบเขตการวิจัยของการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสมโดยเทคนิคการจำลองการอบเหนียว..... 7

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย..... 7

1.5 แนวทางการวิจัย..... 8

1.6 ขั้นตอนการวิจัย..... 8

1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์..... 9

1.8 รายชื่อบทความที่ได้รับการตอบรับให้ตีพิมพ์..... 10

บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 11

2.1 สมการสำหรับการจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง..... 11

2.2 ขั้นตอนการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์..... 12

2.2.1 ขั้นตอนการสร้างสมการคณิตศาสตร์ของโครงสร้าง..... 12

2.2.2 ขั้นตอนการแก้สมการของโครงสร้าง..... 12

2.3 แบบจำลองสำหรับการพัฒนาซอฟต์แวร์วิเคราะห์โครงสร้าง 2 มิติในปัจจุบัน.. 13

2.4 อัลกอริทึมการสร้างรหัสตัวเลขในปัจจุบันสำหรับจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง. 15

2.5 ตัวอย่างการใช้รหัสตัวเลขในการสร้างสมการของทั้งโครงสร้าง..... 16

2.6 หลักการของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว..... 19

หน้า

2.7 การเลือกขนาดวัสดุในการออกแบบโครงสร้าง 22
2.8 การตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกโดยวิธีแรงที่ยอมให้ 23
2.8.1 องค์อาคารรับแรงดึง 24
2.8.2 องค์อาคารรับแรงอัด 25
2.8.3 องค์อาคารรับแรงดัด 26
2.8.4 องค์อาคารรับแรงเฉือน 27
2.8.5 องค์อาคารรับแรงอัดและแรงดัดพร้อมกัน 27
2.9 การประมาณค่าหน้าตัดต่ำสุดสำหรับเลือกหน้าตัดกรณีใช้อัลกอริทึมปกติ 28
2.10 งานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง 30
2.10.1 อัลกอริทึมในการสร้างรหัสตัวเลขที่ใช้ทั่วไปในปัจจุบัน 30
2.10.2 การลดขนาดการจัดเก็บข้อมูลในเมตริกซ์ 31
2.10.3 เทคนิคการปลดปล่อยจุดต่อองค์อาคาร 31

บทที่ 3 อัลกอริทึมการจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง 32
3.1 แบบจำลองใหม่สำหรับการพัฒนาไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ 32
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างรหัสตัวเลขกับพฤติกรรมของข้อต่อ 33
3.3 อัลกอริทึมใหม่สำหรับการสร้างรหัสตัวเลข 38
3.4 สาธิตการสร้างรหัสตัวเลขด้วยอัลกอริทึมใหม่เพื่อสร้างความสัมพันธ์ในจุดต่อแบบยึดแน่น 41
3.5 สาธิตการสร้างรหัสตัวเลขด้วยอัลกอริทึมใหม่เพื่อสร้างความสัมพันธ์ในจุดต่อแบบหมุนอิสระ 42
3.6 สาธิตการสร้างรหัสตัวเลขด้วยอัลกอริทึมใหม่เพื่อสร้างความสัมพันธ์ในจุดต่อแบบผสม 43
3.7 วิเคราะห์เปรียบเทียบอัลกอริทึมการจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง 44
3.8 ตัวอย่างการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างที่มีจุดต่อผสม 53

บทที่ 4 อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวสำหรับการเลือกขนาดวัสดุ 56
4.1 อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว 56
4.2 การประยุกต์อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวสำหรับการเลือกขนาดวัสดุ 59
4.2.1 การดัดแปลงอัลกอริทึมมาใช้กับงานเลือกขนาดวัสด 60

หน้า

4.2.2 การสร้างคำตอบใหม่ 62
4.2.3 คำตอบที่เป็นไปได้ 62
4.2.4 ฟังก์ชั่นต้นทุนสำหรับประเมินความเหมาะสมของคำตอบ 63
4.2.5 กำหนดการอบเหนียว 64
4.2.6 การประยุกต์อัลกอริทึมการอบเหนียวกับการเลือกขนาดวัสดุสำหรับโครงสร้างที่มีจุดต่อแบบผสม 65
4.3 ผลการทดสอบการเลือกขนาดวัสดุสำหรับตัวอย่างที่ 1 โดยใช้อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว 65
4.4 ผลการทดสอบการเลือกขนาดวัสดุสำหรับตัวอย่างที่ 2 โดยใช้อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว 69
4.5 ผลการทดสอบการเลือกขนาดวัสดุสำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว 72
4.6 ผลการทดสอบการเลือกขนาดวัสดุสำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว 76

บทที่ 5 ฮิวริสติกอัลกอริทึมสำหรับการเลือกขนาดวัสดุ 80
5.1 ฮิลริสติกอัลกอริทึม 80
5.2 ฮิลริสติกอัลกอริทึมสำหรับการเลือกขนาดวัสดุ 81
5.3 ผลการทดสอบเลือกขนาดขนาดวัสดุสำหรับตัวอย่างที่ 1 โดยใช้ฮิลริสติกอัลกอริทึมสำหรับการเลือกขนาดวัสดุ 84
5.4 ผลการทดสอบเลือกขนาดขนาดวัสดุสำหรับตัวอย่างที่ 2 โดยใช้ฮิลริสติกอัลกอริทึมสำหรับการเลือกขนาดวัสดุ 88
5.5 ผลการทดสอบเลือกขนาดขนาดวัสดุสำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้ฮิลริสติกอัลกอริทึมสำหรับการเลือกขนาดวัสดุ 91
5.6 ผลการทดสอบเลือกขนาดขนาดวัสดุสำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้ฮิลริสติกอัลกอริทึมสำหรับการเลือกขนาดวัสดุ 94
5.7 สรุปผลการเลือกขนาดวัสดุโดยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวและฮิวริสติกอัลกอริทึม 97

หน้า

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 99
6.1 สรุปผลการวิจัย..... 99
6.2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสีย..... 100
6.3 ปัญหาที่พบ..... 102
6.4 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม..... 102

รายการอ้างอิง..... 104
ภาคผนวก.....
ภาคผนวก ก. ตารางเหล็กที่ใช้ในการทดลอง..... 107
ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสม..... 108
ภาคผนวก ค. การทดสอบทางสถิติในการวิจัย..... 116
ภาคผนวก ง. การทดสอบตัวอย่างเพิ่มเติม..... 128
ภาคผนวก จ. บทความและผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์..... 145
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 167

ตาราง		หน้า
2.1	อัลกอริทึมปัจจุบันสำหรับสร้างรหัสตัวเลข	15
2.2	คำสั่งเทียมของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว	20
2.3	อัลกอริทึมปกติสำหรับการเลือกขนาดวัสดุ	22
3.1	อัลกอริทึมใหม่สำหรับการสร้างรหัสตัวเลข	38
3.2	จำนวนดีกรีอิสระในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง	46
4.1	อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว	55
4.2	ข้อมูลการแบ่งชุดหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 1	61
4.3	ผลการเลือกขนาดหน้าตัดด้วยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว	61
4.4	ผลการเลือกหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 1	63
4.5	ข้อมูลการแบ่งชุดหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 2	64
4.6	ผลการเลือกขนาดหน้าตัดด้วยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว	65
4.7	ผลการเลือกหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 2	67
4.8	ข้อมูลการแบ่งชุดหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 3	68
4.9	ผลการเลือกขนาดหน้าตัดด้วยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว	68
4.10	ผลการเลือกหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 3	70
4.11	ข้อมูลการแบ่งชุดหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 4	71
4.12	ผลการเลือกขนาดหน้าตัดด้วยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว	72
4.13	ผลการเลือกหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 4	74
5.1	ฮิวริสติกอัลกอริทึมสำหรับการเลือกขนาดวัสดุ	79
5.2	ข้อมูลการแบ่งชุดหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 1	80
5.3	ผลการเลือกขนาดหน้าตัดด้วยฮิวริสติกอัลกอริทึมสำหรับการเลือกหน้าตัด	81
5.4	ผลการเลือกหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 1	82
5.5	ข้อมูลการแบ่งชุดหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 2	83
5.6	ผลการเลือกขนาดหน้าตัดด้วยฮิวริสติกอัลกอริทึมสำหรับการเลือกหน้าตัด	84
5.7	ผลการเลือกหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 2	86
5.8	ข้อมูลการแบ่งชุดหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่3	87
5.9	ผลการเลือกขนาดหน้าตัดด้วยฮิวริสติกอัลกอริทึมสำหรับการเลือกหน้าตัด	87
5.10	ผลการเลือกหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 3	89

ตาราง หน้า

5.11 ข้อมูลการแบ่งชุดหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 4 90

5.13 ผลการเลือกหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 4 92

5.14 ปริมาตรเหล็กที่ได้จากการเลือกขนาดวัสดุของแต่ละอัลกอริทึม 93

6.1 ปริมาตรเหล็กที่ได้จากการเลือกขนาดวัสดุของแต่ละอัลกอริทึม 96

ก.1 ตารางคุณสมบัติท่อเหล็กกลมกลวงที่ใช้ในการทดลอง 107

ข.1 ข้อมูลการแบ่งชุดหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 2 108

ข.2 ผลการเลือกหน้าตัด 109

ข.3 รายละเอียดแรงภายในที่เกิดในแต่ละองค์อาคาร 110

ค.1 ปริมาตรเหล็กและจำนวนรอบในการหาคำตอบโดยวิธีการจำลองอบเหนียว 118

ค.2 ปริมาตรเหล็กและจำนวนรอบในการหาคำตอบโดยวิธีฮิวริสติก 119

ค.3 ปริมาตรเหล็กและจำนวนรอบโดยวิธีที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน 120

ค.4 ตารางการคำนวนค่าทางสถิติด้วยวิธี T-test 125

ค.5 ผลการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ระดับความเชื่อมั่น 99 % 126

ง.1 ข้อมูลการแบ่งชุดหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 1 128

ง.2 ข้อมูลการแบ่งชุดหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 2 130

ง.3 ข้อมูลการแบ่งชุดหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 3 131

ง.4 ข้อมูลการแบ่งชุดหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 4 133

ง.5 ข้อมูลการแบ่งชุดหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 5 134

ง.6 ข้อมูลการแบ่งชุดหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 6 136

ง.7 ข้อมูลการแบ่งชุดหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 7 137

ง.8 ข้อมูลการแบ่งชุดหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 8 139

ง.9 ข้อมูลการแบ่งชุดหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 9 140

ง.10 ข้อมูลการแบ่งชุดหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 10 142

ง.11 ผลการเลือกหน้าตัดโดยพิจารณาค่าที่ดีที่สุด 143

ง.12 ผลการเลือกหน้าตัดโดยพิจารณาค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 25 ครั้ง 144

ภาพประกอบ		หน้า
1.1	การแปลงงานใน 3 มิติเป็น 2 มิติก่อนการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์	2
1.2	ตัวอย่างโครงสร้างที่ประกอบด้วยข้อต่อแบบผสม	3
2.1	การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของทั้งระบบ	11
2.2	ขั้นตอนการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	13
2.3	แบบจำลองในการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์โครงสร้าง	14
2.4	อัลกอริทึมสำหรับการสร้างรหัสตัวเลขในปัจจุบัน	15
2.5	ตัวอย่างรหัสตัวเลขที่ถูกสร้างโดยอัลกอริทึมปัจจุบัน	15
2.6	สติฟเนสเมตริกของแต่ละองค์อาคาร	17
2.7	การสร้างสติฟเนสเมตริกของทั้งโครงสร้าง	17
2.8	รหัสตัวเลขที่ถูกสร้างเพื่อใช้สำหรับประกอบสติฟเนสของโครงสร้าง	18
2.9	การประกอบสติฟเนสเมตริกของทั้งโครงสร้าง	19
2.10	การเรียงตัวของโครงสร้างผลึก	20
2.11	การทำงานของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว	20
3.1	แบบจำลองใหม่ของการพัฒนาซอฟต์แวร์วิเคราะห์โครงสร้างใน 2 มิติ	32
3.2	โครงสร้างตัวอย่าง	33
3.3	แรงภายในและการเปลี่ยนตำแหน่งภายในองค์อาคาร	34
3.4	แรงภายในและการเปลี่ยนตำแหน่งของโครงสร้าง	35
3.5	แผนภาพวัตถุอิสระของโครงสร้าง	36
3.6	ภาพประกอบคำอธิบายอัลกอริทึมใหม่สำหรับสร้างรหัสตัวเลข	39
3.7	รหัสตัวเลขที่ถูกสร้างสำหรับการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างโครงข้อแข็ง	41
3.8	รหัสตัวเลขที่ถูกสร้างสำหรับการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างโครงข้อหมุน	42
3.9	ตัวอย่างโครงสร้างผสม	43
3.10	รหัสตัวเลขที่ถูกสร้างสำหรับการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างที่มีข้อต่อผสม	43
3.11	ดีกรีอิสระในโครงสร้างโครงข้อหมุน	45
3.12	ดีกรีอิสระในโครงสร้างโครงข้อแข็ง	45
3.13	ดีกรีอิสระในโครงข้อหมุน	46
3.14	โครงสร้างผสม	47
3.15	ตัวอย่างการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างผสมโดยเอลิเมนต์ 3 มิติ	47
3.16	ดีกรีอิสระในโครงสร้างโครงข้อหมุน	48
3.17	ตัวอย่างการหาการแอ่นตัวด้วยวิธีดับเบิลอินทีเกรชั่น	48

ภาพประกอบ หน้า

3.18 ตัวอย่างการคำนวณการแอ่นตัวของโครงสร้างด้วยเทคนิคที่นำเสนอ..... 50
3.19 ตัวอย่างโครงสร้างที่มีจุดต่อแตกต่างกัน..... 50
3.20 แผนภาพแรงเฉือน..... 51
3.21 แผนภาพแรงดัด..... 51
3.22 แผนภาพแรงตามแนวแกน..... 52
4.1 ตัวอย่างปัญหาการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม..... 53
4.2 รูปแบบการเลือกขนาดวัสดุในโครงสร้าง..... 57
4.3 ขั้นตอนการตรวจสอบคำตอบที่เป็นไปได้..... 58
4.4 ตัวอย่างที่ 1 สำหรับทดสอบอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว..... 61
4.5 ผลการเลือกขนาดวัสดุโดยอัลกอริทึมจำลองการอบเหนียว..... 62
4.6 กราฟแสดงผลระหว่างการคำนวณการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสม..... 63
4.7 ตัวอย่างที่ 2 สำหรับทดสอบอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว..... 64
4.8 ผลการเลือกขนาดวัสดุโดยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว..... 66
4.9 กราฟแสดงผลระหว่างการคำนวณการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสม..... 66
4.10 ตัวอย่างที่ 3 สำหรับทดสอบอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว..... 67
4.11 ผลการเลือกขนาดวัสดุโดยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว..... 69
4.12 กราฟแสดงผลระหว่างการคำนวณการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสม..... 70
4.13 ตัวอย่างที่ 4 สำหรับทดสอบอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว..... 71
4.14 ผลการเลือกขนาดวัสดุโดยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว..... 73
4.15 กราฟแสดงผลระหว่างการคำนวณการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสม..... 73
5.1 ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย..... 75
5.2 ตัวอย่างปัญหาการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม..... 76
5.3 ตัวอย่างปัญหาการเลือกขนาดวัสดุ..... 77
5.4 ตัวอย่างปัญหาการเลือกขนาดวัสดุ..... 77
5.5 ตัวอย่างปัญหาการเลือกขนาดวัสดุ..... 78
5.6 ตัวอย่างปัญหาการเลือกขนาดวัสดุ..... 78
5.7 ตัวอย่างที่ 1 สำหรับทดสอบฮิวริสติกอัลกอริทึมสำหรับการเลือกขนาดวัสดุ..... 80
5.8 ผลการเลือกขนาดวัสดุโดยฮิลริสติกอัลกอริทึมสำหรับการเลือกขนาดวัสดุ..... 81
5.9 กราฟแสดงผลระหว่างการคำนวณการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสม..... 82
5.10 ตัวอย่างที่ 2 สำหรับทดสอบฮิวริสติกอัลกอริทึมสำหรับการเลือกขนาดวัสดุ..... 83

ภาพประกอบ หน้า

5.11 ผลการเลือกขนาดวัสดุโดยฮิลริสติกอัลกอริทึมสำหรับการเลือกขนาดวัสดุ..... 85
5.12 กราฟแสดงผลระหว่างการคำนวณการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสม..... 85
5.13 ตัวอย่างที่ 3 สำหรับทดสอบฮิวริสติกอัลกอริทึมสำหรับการเลือกขนาดวัสดุ..... 86
5.14 ผลการเลือกขนาดวัสดุโดยฮิลริสติกอัลกอริทึมสำหรับการเลือกขนาดวัสดุ..... 88
5.15 กราฟแสดงผลระหว่างการคำนวณการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสม..... 88
5.16 ตัวอย่างที่ 4 สำหรับทดสอบฮิวริสติกอัลกอริทึมสำหรับการเลือกขนาดวัสดุ..... 89
5.17 ผลการเลือกขนาดวัสดุโดยฮิลริสติกอัลกอริทึมสำหรับการเลือกขนาดวัสดุ..... 91
5.18 กราฟแสดงผลระหว่างการคำนวณการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสม..... 91
ข.1 รูปแบบการเลือกขนาดวัสดุในโครงสร้าง..... 108
ข.2 แผนผังแรงที่เกิดกับโครงสร้างที่ได้จากการจำลองพฤติกรรม..... 109
ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเหล็กจากแบบจำลองการอบเหนียวในชุดตัวอย่าง..... 118
ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเหล็กจากแบบจำลองฮิวริสติกในชุดตัวอย่าง..... 119
ค.3 การเปรียบเทียบปริมาตรเหล็กที่ได้จาก 3 วิธี..... 120
ค.4 การเปรียบเทียบจำนวนรอบในการหาคำตอบที่เหมาะสม..... 122
ง.1 โครงสร้างข้อหมุนตัวอย่างที่ 1..... 128
ง.2 ผลการทำงานของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวกับตัวอย่างที่ 1..... 129
ง.3 ผลการทำงานของฮิวริสติกอัลกอริทึมกับตัวอย่างที่ 1..... 129
ง.4 โครงสร้างข้อหมุนตัวอย่างที่ 2..... 130
ง.5 ผลการทำงานของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวกับตัวอย่างที่ 2..... 130
ง.6 ผลการทำงานของฮิวริสติกอัลกอริทึมกับตัวอย่างที่ 2..... 131
ง.7 โครงสร้างข้อหมุนตัวอย่างที่ 3..... 131
ง.8 ผลการทำงานของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวกับตัวอย่างที่ 3..... 132
ง.9 ผลการทำงานของฮิวริสติกอัลกอริทึมกับตัวอย่างที่ 3..... 132
ง.10 โครงสร้างข้อหมุนตัวอย่างที่ 4..... 133
ง.11 ผลการทำงานของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวกับตัวอย่างที่ 4..... 133
ง.12 ผลการทำงานของฮิวริสติกอัลกอริทึมกับตัวอย่างที่ 4..... 134
ง.13 โครงสร้างข้อหมุนตัวอย่างที่ 5..... 134
ง.14 ผลการทำงานของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวกับตัวอย่างที่ 5..... 135
ง.15 ผลการทำงานของฮิวริสติกอัลกอริทึมกับตัวอย่างที่ 5..... 135
ง.16 โครงสร้างข้อหมุนตัวอย่างที่ 6..... 136

ภาพประกอบ หน้า

ง.17 ผลการทำงานของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวกับตัวอย่างที่ 6..... 136
ง.18 ผลการทำงานของฮิวริสติกอัลกอริทึมกับตัวอย่างที่ 6..... 137
ง.19 โครงสร้างข้อหมุนตัวอย่างที่ 7..... 137
ง.20 ผลการทำงานของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวกับตัวอย่างที่ 7..... 138
ง.21 ผลการทำงานของฮิวริสติกอัลกอริทึมกับตัวอย่างที่ 7..... 138
ง.22 โครงสร้างข้อหมุนตัวอย่างที่ 8..... 139
ง.23 ผลการทำงานของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวกับตัวอย่างที่ 8..... 139
ง.24 ผลการทำงานของฮิวริสติกอัลกอริทึมกับตัวอย่างที่ 8..... 140
ง.25 โครงสร้างข้อหมุนตัวอย่างที่ 9..... 140
ง.26 ผลการทำงานของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวกับตัวอย่างที่ 9..... 141
ง.27 ผลการทำงานของฮิวริสติกอัลกอริทึมกับตัวอย่างที่ 9..... 141
ง.28 โครงสร้างข้อหมุนตัวอย่างที่ 10..... 142
ง.29 ผลการทำงานของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวกับตัวอย่างที่ 10..... 142
ง.30 ผลการทำงานของฮิวริสติกอัลกอริทึมกับตัวอย่างที่ 10..... 143