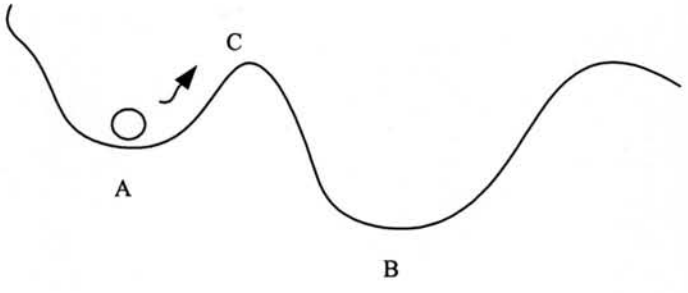
บทที่ 4

อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวสำหรับการเลือกขนาดวัสดุ

4.1 อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว

ในบทที่ผ่านมาอัลกอริทึมใหม่ในการสร้างรหัสตัวเลขสำหรับโครงสร้างแบบต่างๆ ได้ถูกนำเสนอเพื่อนำไปใช้ในการสร้างสมการเพื่อจำลองพฤติกรรมของโครงสร้าง ในหัวข้อนี้จะศึกษาการนำเอาอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวมาประยุกต์เข้ากับการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างเพื่อเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสม ซึ่งขนาดวัสดุที่เหมาะสมจะทำให้โครงสร้างที่ได้มีน้ำหนักน้อยลงในขณะที่ยังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามเดิม

อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว [23-25] ออกแบบมาเพื่อให้สามารถหลุดออกจากการหาคำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะที่ (Local Optimum) โดยใช้แนวคิดของอุณหพลศาสตร์ของกระบวนการการอบเหนียว ซึ่งเป็นขั้นตอนการลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ ระหว่างการหลอมเพื่อให้ได้โลหะที่อยู่ในสภาวะเหมาะสม เป็นโลหะที่เหนียว ไม่เปราะ ซึ่งแนวคิดนี้อธิบายได้จากรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างปัญหาการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม

เป้าหมายของการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมในรูปที่ 4.1 คือ ค่าที่น้อยที่สุด ดังนั้นหากใช้อัลกอริทึมปีนเขา (Hill Climbing) กับปัญหาในรูปที่ 4.1 ก็อาจได้คำตอบที่เหมาะสมเฉพาะที่เนื่องจากเมื่อคำตอบมาตกที่จุด A อัลกอริทึมก็จะหยุดทำงานเพราะเมื่อเปรียบเทียบค่าที่จุด A กับคำตอบรอบข้างจะได้คำตอบที่สูงกว่า วิธีการแก้ปัญหานี้คือต้องยอมให้มีการค้นต่อแม้ว่าคำตอบรอบข้างจะได้ผลที่แย่กว่าในช่วงต้นแรกของการทำงาน

อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวจะยอมให้การค้นหาวิ่งไปในทิศทางที่ไม่ดีได้ในช่วงเริ่มต้นของการกระบวนการค้นหา เพื่อเป็นการสำรวจหาคำตอบแบบหยาบๆ แล้วจึงค้นหาอย่างละเอียดในช่วงหลัง ด้วยแนวคิดเช่นนี้โอกาสที่จะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดจึงเป็นไปได้มากขึ้น

เนื่องจากอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวใช้แนวคิดจากการอบโลหะให้มีความเหนียวทนทาน ดังนั้นเพื่อความเข้าใจได้ดียิ่งขึ้น กระบวนการการอบเหนียวโลหะจะถูกนำมาอธิบายด้วย

การอบเหนียวของโลหะเป็นการหลอมโลหะจนละลาย ซึ่งเป็นการทำให้โลหะอยู่ในสถานะที่มีพลังงานสูง แล้วค่อยๆ ลดอุณหภูมิลงทีละน้อยจนโลหะเปลี่ยนกลับสู่สถานะของแข็ง ซึ่งเป็นสถานะที่มีพลังงานต่ำลงและมีความเสถียร โดยธรรมชาติแล้วสสารเมื่อมีพลังงานสูงจะเปลี่ยนตัวเองจากสถานะที่มีพลังงานสูงไปสู่สถานะที่มีพลังงานต่ำเพื่อให้มีความเสถียร แต่ก็มีความน่าจะเป็นที่สสารจะเปลี่ยนจากสถานะที่มีพลังงานต่ำไปสถานะที่มีพลังงานสูงอยู่บ้าง ซึ่งความน่าจะเป็นนี้สามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 4.1

$$p = e^{-\Delta E / kT} \tag{4.1}$$

โดยที่ ΔE เป็นระดับพลังงานที่เปลี่ยนไป

T เป็นอุณหภูมิ

k เป็นค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann)

p เป็นความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ

การเปลี่ยนแปลงจากระดับพลังงานสูงไปต่ำนั้น มีความน่าจะเป็นในช่วงเริ่มต้นมากกว่ากว่าในช่วงปลายของกระบวนการการอบเหนียว อัตราการลดอุณหภูมิในการอบเหนียวเรียกว่ากำหนดการอบเหนียว (Annealing Schedule) ถ้ากำหนดการอบเหนียวเร็ว การลดอุณหภูมิก็จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจทำให้สถานะสุดท้ายโลหะก็ยังมีพลังงานสูงอยู่ ดังนั้นการพิจารณาหมายกำหนดการการอบเหนียวจะต้องไม่ให้เร็วเกินไป แต่ถ้าช้าไปก็ทำให้เสียเวลาได้

แนวคิดการจำลองการอบเหนียวได้จากการเลียนกระบวนการการอบเหนียวของโลหะ โดยเป็นการค้นหาแบบปีนเขา เพื่อหาค่าต่ำสุดแบบหนึ่ง ซึ่งการค้นหาสามารถค้นหาไปในทิศทางที่ไม่ได้ทำให้ดีขึ้นในเฉพาะช่วงต้นของการค้นหา สำหรับสมการความน่าจะเป็นที่จะยอมให้ไปสู่คำตอบที่ไม่ดีเป็นดังนี้

$$p = e^{-\Delta E / T} \tag{4.2}$$

โดยที่ ΔE เป็นผลต่างของฟังก์ชันของคำตอบเดิมกับคำตอบใหม่

T เป็นอุณหภูมิ

p เป็นความน่าจะเป็นที่จะยอมรับคำตอบที่ไม่ดีขึ้น

เนื่องจาก k ในสมการที่ 4.1 เป็นค่าคงที่จึงรวมเข้ากับ T ได้ สมการนี้เมื่อนำไปใช้ร่วมกับการค้นหาแบบปีนเขา ก็จะช่วยให้กระบวนการค้นหาสามารถหลุดออกจากค่าดีสุดเฉพาะที่ได้ ตัวอย่างเช่น เมื่อสถานะปัจจุบันในรูปที่ 4.1 อยู่ที่ A เมื่อมีการสร้างสถานะอื่นขึ้นที่จุด C ซึ่งแย่ลงการค้นหาอาจไปที่สถานะนี้ได้ โดยคำนวณจากความน่าจะเป็น p ตามสมการที่ 4.2 ได้เป็น $p = e^{-|f(A)-f(C)|/T}$ ค่าที่ได้จะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 จากนั้นจะสุ่มค่าตัวเลขระหว่าง 0 ถึง 1 ขึ้นมา ถ้าค่า p มากกว่าค่าที่สุ่มขึ้นมาก็จะรับคำตอบ C ไว้เป็นสถานะถัดไป ค่า T เป็นพารามิเตอร์ที่เราสามารถปรับแต่งได้ให้เหมาะสมกับปัญหาหนึ่งๆ ที่เราสนใจ โดยช่วงเริ่มต้นกำหนดให้เป็นค่ามากๆ แล้วค่อยๆ ลดลงเมื่อการค้นหาดำเนินไป ซึ่งค่า T ที่มากก็จะให้ค่า p ที่มากในช่วงต้น

เมื่อพิจารณาสมการที่ 4.2 การทำงานของสมการนี้จะเป็นดังนี้ เมื่อ T มากในช่วงต้นๆ จะได้ค่า p มาก ซึ่งหมายถึงมีโอกาสที่จะยอมไปสู่คำตอบที่ไม่ดีได้ง่ายในช่วงต้นของการค้นหา แต่เมื่อ T น้อยลง จะได้ค่า p มีค่าน้อยลงซึ่งโอกาสที่จะไปสู่คำตอบที่ได้ผลแย่ก็จะลดลง ซึ่งก็เป็นผลดี เนื่องจากเมื่อการทำงานเริ่มไประยะเวลาหนึ่งผลของคำตอบที่ได้ก็จะดีขึ้นเรื่อยๆ ก็ไม่ควรที่จะให้กระโดดไปยังคำตอบที่แย่ลง เมื่อพิจารณาที่ ΔE จะพบว่าเมื่อ ΔE มีค่ามากจะได้ค่า p มีค่าน้อย ซึ่งการที่มีค่า ΔE มากก็เปรียบเสมือนเป็นการกระโดดขนาดใหญ่ และหาก ΔE มีค่าน้อยก็เปรียบเสมือนเป็นการกระโดดขนาดเล็ก ซึ่งตรงนี้ก็เป็นจุดดีที่ยอมให้มีการกระโดดขนาดเล็กเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าการกระโดดขนาดใหญ่ เนื่องจากคำตอบที่ดีสุดเฉพาะที่ส่วนใหญ่มักจะเป็นหลุมที่ตื้นและคำตอบที่ดีจริงๆ มักจะเป็นหลุมที่ลึก ซึ่งหากอยู่ในหลุมลึกก็ไม่ควรหลุดออกมาได้ง่ายๆ เพราะคำตอบที่ดีน่าจะอยู่บริเวณนั้น อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวเป็นดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว

1. Evaluate the initial state.
2. IF initial state=goal state THEN
   Return the initial state and quit
   ELSE current state : = initial state.
3. BEST-SO-FAR := current state
4. T := contant
5. UNTIL a goal state is found or there are no new operators left to be applied in the current state DO
   5.1 Select an operator that has not yet been applied to the current state and apply it to produce a new state.
   5.2 Evaluate the new state.
   IF new state=goal state then

Return new state and quit

ELSE IF the new state is better than the current state

THEN { current state := new state

IF the new state is better than BEST-SO-FAR

THEN BEST-SO-FAR : = new state }

ELSE IF the new state is not better than the current state THEN {

ΔE := |(value of the new state)-(value of the current state)|

IF $e^{-\Delta E/T}$ > random(0,1) THEN

Current state := new state }

5.3 Revise T as necessary.

6. Return BEST-SO-FAR as the answer.

อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวที่แสดงในตารางที่ 4.1 จะมีบางส่วนคล้ายอัลกอริทึมปีนเขา แต่สามารถเลือกคำตอบที่แย่กว่าได้ในช่วงแรกโดยใช้การสุ่มความน่าจะเป็น ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดกระบวนการค้นหา คำตอบสุดท้ายที่ได้อาจไม่ใช่คำตอบที่ดี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเก็บคำตอบที่ดีที่สุดไว้ในตัวแปร BEST-SO-FAR และในตอนเริ่มต้นจะมีการกำหนดค่าคงที่ตัวหนึ่งเป็นอุณหภูมิเริ่มต้น และค่อยๆ ลดอุณหภูมิลงเรื่อยๆ ในการค้นหาคำตอบใหม่ถ้าคำตอบใหม่ดีกว่าเดิมก็จะเก็บคำตอบใหม่ไว้ในตัวแปร BEST-SO-FAR แต่ถ้าคำตอบใหม่แย่กว่าเดิมก็จะคำนวณความน่าจะเป็น $e^{-\Delta E/T}$ ที่จะไปยังคำตอบใหม่ อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวเป็นอัลกอริทึมที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานในด้านต่างๆ เพื่อหาจุดที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามก็ต้องมีการปรับองค์ประกอบของอัลกอริทึมเพื่อให้เหมาะกับงานแต่ละอย่างด้วย ในงานการเลือกขนาดวัสดุก็เช่นเดียวกัน ที่จะต้องมีการประยุกต์อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวให้เข้ากับงานด้วย ซึ่งองค์ประกอบต่างๆ ที่ต้องดัดแปลงจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.2 การประยุกต์อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวสำหรับการเลือกขนาดวัสดุ

ในการประยุกต์อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวมาใช้ในการแก้ปัญหาใดๆ จะต้องมีการปรับองค์ประกอบของอัลกอริทึมการจำลองให้เข้ากับปัญหานั้นๆ ในปัญหาการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสมก็เช่นกัน จะต้องมีการปรับองค์ประกอบของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวให้เข้ากับปัญหา ซึ่งส่วนประกอบสำคัญของอัลกอริทึมการจำลองอบเหนียวที่ต้องปรับให้เข้ากับปัญหามีดังนี้

4.2.1 การดัดแปลงอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวมาใช้กับงานเลือกขนาดวัสดุ

จากอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวทั่วไปจะถูกปรับเปลี่ยนในบางจุดเพื่อนำมาใช้ในงานการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวที่ถูกดัดแปลงสำหรับงานเลือกขนาดวัสดุ

```
1 . Start with the system in a known configuration, at known energy E
2. T = temperature = hot; frozen = false;
3. While (! frozen) {
4.      Repeat {
5.              Perturb system slightly  (Call Create_Answer)
6.              Compute Delta E, change in energy due to perturbation
7.              If (Delta E < 0)
8.              Then accept this perturbation, this is the new system configuration
9.              Else accept maybe, with probability = exp (- Delta E /KT)
10.     } until (the system is in thermal equilibrium at this T)
11.     If (Delta E still decreasing over the last few temperatures)
12.             Then T = 0.9 T // Cool the temperature; do more perturbations
13.     Else frozen = true
14. }
15.     Return (final configuration as low-energy solution)
```

ตารางที่ 4.3 โพรซีเยอร์ในการสร้างคำตอบ

```
Procedure Create_Answer
        Repeat{
        1. Random the modified value (Change the material's sizes up or down 3 sizes)
        2. Create the new answer by reducing or increasing steel's size following a random
           value
        3. Validate the answer using function Answer_Validation
        } until Function Answer_Validation return True value
End Function
```

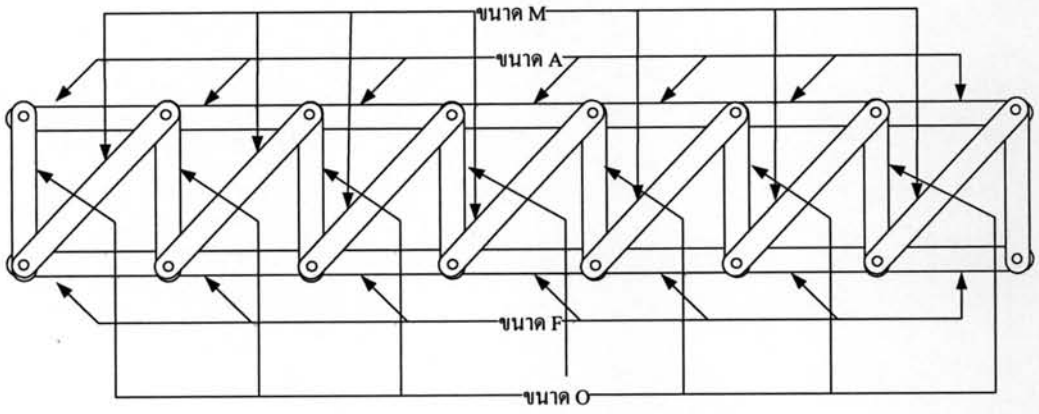
ตารางที่ 4.4 ฟังก์ชันในการตรวจสอบคำตอบ

```
Function Answer_Validation (answer)
    1. Simulate the structure to know forces in each member
        1.1 Form structural equations
            1.1.1 Find equation in each member
            1.2.1 Generate code numbers
            1.2.2 Find structural equations from member equations
        1.2 Solve equations
    2. Check strength ability
        2.1 Tension validation
        2.2 Compression validation
        2.3 Shear validation
        2.4 Moment validation
    Return True value when the answer pass the strength check
End Function
```

จากตารางที่ 4.2 อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวทั่วไปจะถูกปรับในบรรทัดที่ 5 ในส่วนของการสร้างคำตอบเพื่อให้เหมาะกับงานเลือกขนาดวัสดุ ในบรรทัดนี้จะมีการเรียกไปยังโพรซีเยอร์ในการสร้างคำตอบดังแสดงในตารางที่ 4.3 คำตอบหรือรูปแบบขนาดหน้าตัดที่เลือกจะถูกสร้างขึ้นที่โพรซีเยอร์นี้โดยในโพรซีเยอร์นี้จะมีการสร้างคำตอบใหม่โดยการสุ่มค่าเพื่อปรับเปลี่ยนขนาดหน้าตัดจากหน้าตัดเดิมโดยสุ่มเพิ่มขนาดหน้าตัดให้ใหญ่ขึ้นหรือลดลงในช่วง 3 เบอร์ของตารางเหล็กดังแสดงในภาคผนวก ก หลังจากได้ตัวค่าที่สุ่มขึ้นมาว่าจะลดหรือเพิ่มขนาดเหล็ก ค่าที่ได้จะถูกนำไปปรับเปลี่ยนขนาดหน้าตัดเดิมให้เพิ่มหรือลดลงตามค่าที่สุ่มขึ้นมาได้เพื่อเป็นคำตอบใหม่ เมื่อได้คำตอบใหม่เรียบร้อยแล้วคำตอบนี้จะต้องถูกตรวจสอบว่าเป็นคำตอบได้หรือไม่โดยจะถูกส่งเข้าไปตรวจสอบในฟังก์ชันในการตรวจสอบคำตอบดังแสดงในตารางที่ 4.4 หากคำตอบที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ไม่สามารถเป็นคำตอบได้ก็จะมีการสร้างคำตอบขึ้นใหม่อีกและตรวจสอบซ้ำจนกระทั่งคำตอบที่สร้างขึ้นใหม่ผ่านฟังก์ชันในการตรวจสอบคำตอบแล้วคืนค่ากลับมาเป็นจริง ซึ่งการจะคืนค่ากลับมาเป็นจริงได้นั้น คำตอบนั้นจะต้องผ่านการคำนวณหาแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างโดยการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างและตรวจสอบว่าคำตอบนั้นหรือโครงสร้างที่มีรูปแบบหน้าตัดแบบนั้นสามารถที่จะรับแรงอัด แรงดึง แรงเฉือน แรงดัดได้ จากที่นำเสนออัลกอริทึมที่นำเสนอนี้จะมีความซับซ้อนของอัลกอริทึมเท่ากับ $O(n^3)$

4.2.2 การสร้างคำตอบใหม่

สำหรับคำตอบที่ต้องการค้นหาในปัญหาการเลือกขนาดวัสดุ คือ ขนาดของวัสดุในแต่ละกลุ่มว่าควรเป็นเท่าไหร่ถึงจะทำให้น้ำหนักของโครงสร้างน้อยและยังสามารถรับน้ำหนักได้ ในการเลือกขนาดของวัสดุในโครงสร้างจะเป็นไปได้หลายรูปแบบ การปรับเปลี่ยนขนาดของวัสดุจะเป็นการปรับเปลี่ยนทั้งกลุ่มดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 4.2 โดยในตัวอย่างสมมุติว่าขนาดวัสดุที่มีให้เลือกมีตั้งแต่ขนาด A – Z และมีกลุ่มขององค์อาคารที่ใช้วัสดุขนาดเดียวกัน 4 กลุ่ม ดังนั้นการปรับเปลี่ยนขนาดวัสดุก็จะสามารถเป็นไปได้ 24^4 หรือ 331,776 แบบ



รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลือกขนาดวัสดุในโครงสร้าง

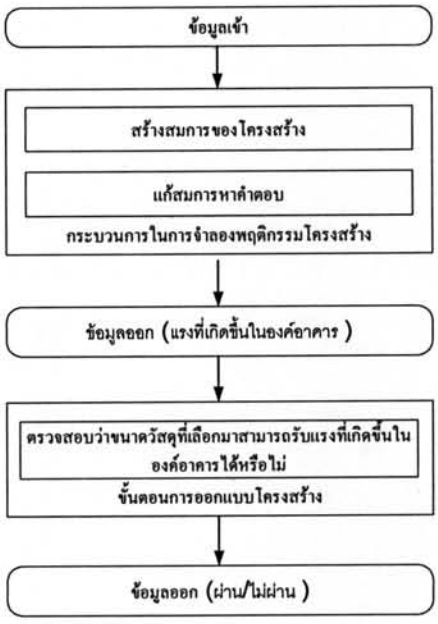
ในการสร้างคำตอบสำหรับงานในการเลือกวัสดุที่เหมาะสม คำตอบใหม่จะถูกสร้างจากคำตอบเดิมโดยการสุ่มปรับขนาดขึ้นลงจากขนาดวัสดุที่มีให้เลือกในตาราง หลังจากนั้นคำตอบจะถูกตรวจสอบเงื่อนไขในการรับแรงที่กระทำกับโครงสร้างว่ารูปแบบของหน้าตัดที่เลือกมาสามารถรับแรงได้หรือไม่ ถ้าไม่ได้คำตอบนั้นจะถูกยกเลิกและสร้างคำตอบใหม่ขึ้นมา ในการปรับขนาดขึ้นลงเช่นนี้บางครั้งอาจทำให้แนวโน้มของคำตอบไปผิดทางทำให้ไม่สามารถที่จะได้คำตอบที่สามารถรับแรงได้ ดังนั้นจึงมีการปรับแก้โดยการกำหนดรอบในการค้นหาคำตอบใหม่ หากมีการปรับเปลี่ยนขนาดไปเกินกว่ารอบที่กำหนดแล้วยังไม่ผ่านเงื่อนไขเรื่องความสามารถในการรับแรงก็ให้กลับมาเริ่มต้นที่จุดเดิมที่เคยผ่านเงื่อนไขในการรับแรง

4.2.3 คำตอบที่เป็นไปได้

ในปัญหาการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสม คำตอบที่สร้างขึ้นมาใหม่อาจเป็นคำตอบที่ใช้ไม่ได้ เนื่องจากในปัญหาการเลือกขนาดวัสดุต้องคำถึงถึงเรื่องของความสามารถในการรับแรงที่เกิดขึ้นด้วย ดังนั้นคำตอบที่ถูกสร้างขึ้นมาจะต้องผ่านฟังก์ชันในการตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกด้วย ซึ่งคำตอบที่ผ่านฟังก์ชันและคืนค่ากลับมาว่าสามารถรับแรงที่เกิดขึ้นได้ก็จะ

เป็นคำตอบที่เป็นไปได้ ขั้นตอนในการตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกหลักๆ เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.3 และสมการต่างๆ ที่อยู่ในฟังก์ชันตรวจสอบความสามารถในการรับแรงแสดงอยู่ในบทที่ 2 ซึ่งเงื่อนไขหลักๆ ในฟังก์ชันที่ต้องพิจารณา ได้แก่ ความสามารถในการรับแรงอัด แรงดึง แรงเฉือน แรงดัด และแรงอัดพร้อมกับแรงดัดที่เกิดขึ้นพร้อมกัน

จากแผนผังในรูปที่ 4.3 แสดงกระบวนการตรวจสอบคำตอบที่เป็นไปได้ ข้อมูลเข้าจะประกอบด้วย ลักษณะของโครงสร้าง ลักษณะข้อต่อทุกจุดในโครงสร้าง แรงที่กระทำกับโครงสร้าง ขนาดวัสดุ และคุณสมบัติของวัสดุ จากนั้นข้อมูลเข้าเหล่านี้จะถูกนำไปคำนวณเพื่อหาแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละองค์อาคารโดยกระบวนการของการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างซึ่งประกอบด้วย 2 กระบวนการใหญ่ คือ การสร้างสมการที่เลียนแบบพฤติกรรมของโครงสร้างและขั้นตอนในการแก้สมการ เมื่อรู้แรงในแต่ละองค์อาคารแล้วข้อมูลเหล่านี้จะถูกส่งต่อไปที่กระบวนการของการออกแบบ (สมการในการตรวจสอบความสามารถในการรับแรงแสดงอยู่ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.8 การตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกโดยวิธีแรงที่ยอมให้) ซึ่งจะตรวจสอบว่าโครงสร้างที่มีขนาดวัสดุตามที่กำหนดสามารถที่จะรับแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างได้หรือไม่ โดยจะคืนค่าออกมาเป็น ผ่านหรือไม่ผ่าน คำตอบที่ผ่านการตรวจสอบความสามารถในการรับแรงก็คือคำตอบที่เป็นไปได้



รูปที่ 4.3 แผนผังขั้นตอนการตรวจสอบคำตอบที่เป็นไปได้

4.2.4 ฟังก์ชันต้นทุนสำหรับประเมินความเหมาะสมของคำตอบ

ฟังก์ชันต้นทุนเป็นฟังก์ชันสำหรับประเมินความดีของคำตอบซึ่งก็คือขนาดวัสดุที่ถูกเลือกให้สำหรับแต่ละกลุ่ม การประเมินว่าคำตอบที่สร้างขึ้นใหม่ดีหรือไม่ดีจะวัดจากปริมาตรของวัสดุที่

ใช้โครงสร้าง ซึ่งคำตอบที่ดีคือปริมาตรของวัสดุของทั้งโครงสร้างต้องมีค่าต่ำ ในขณะที่ยังสามารถรับแรงที่เกิดขึ้นโครงสร้างได้ การหาปริมาตรของโครงสร้างหาได้จากผลรวมพื้นที่หน้าตัดของวัสดุคูณด้วยความยาวขององค์อาคารในทุกองค์อาคารดังสมการที่ 4.3 ซึ่งพื้นที่หน้าตัดจะได้จากคำตอบที่ถูกสร้างขึ้น ส่วนความยาวขององค์อาคารได้จากลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างที่ถูกป้อนเข้ามาโดยผู้ใช้

$$V = \sum_{All} A \cdot L \tag{4.3}$$

โดยที่ V เป็นปริมาตรของโครงสร้างยิ่งน้อยยิ่งดี

A เป็นพื้นที่หน้าตัดขององค์อาคาร

L เป็นความยาวขององค์อาคาร

4.2.5 กำหนดการอบเหนียว

กำหนดการอบเหนียว (Cooling Schedule) เป็นตัวกำหนดการเริ่มและการหยุดการทำงาน ในที่นี้ก็คือตัวแปร T ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ลดลงเรื่อยๆ ใช้สำหรับกำหนดการลดอุณหภูมิเพื่อหยุดการทำงานของอัลกอริทึม การประมาณค่า T จากความน่าจะเป็นจะคำนวณได้จากสมการที่ 4.5 [22] โดยเป็นการจัดรูปใหม่ของสมการ 4.4 ซึ่งเป็นสมการที่ดัดแปลงมาจากสมการที่ 4.2 โดยมีการเพิ่มตัวแปร $\overline{\Delta E}$ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของ ΔE ในกรณีที่ ΔE มากกว่า 0

$$p = e^{-(\Delta E / \overline{\Delta E})/T} \tag{4.4}$$

สมมุติว่าค่า ΔE มีค่าเท่ากับ $\overline{\Delta E}$ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของ ΔE ในกรณีที่ $\Delta E > 0$ และจัดรูปสมการใหม่ จะประมาณค่า T เริ่มต้นได้จากสมการ

$$T = \frac{-1}{\ln p} \tag{4.5}$$

หากกำหนดความน่าจะเป็นในการรับคำตอบที่ไม่ดีในช่วงเริ่มต้นเป็น 0.8 ก็จะสามารถคำนวณค่า T เริ่มต้นได้เป็น 4.48 หรือประมาณ 4.5 ส่วนค่า T สุดท้ายต้องให้มีค่าต่ำเพื่อให้อัลกอริทึมสามารถทำงานได้มากพอ โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้ T สุดท้ายเป็น 0.00001 หรือแปลงเป็นค่าความน่าจะเป็นตามสมการที่ 4.4 ได้เป็น 0 ซึ่งหมายถึงในช่วงท้ายจะยอมรับเฉพาะคำตอบที่ดีกว่าเดิมเท่านั้น ส่วนการลดค่า T จะคำนวณได้จาก $T = 0.9T$

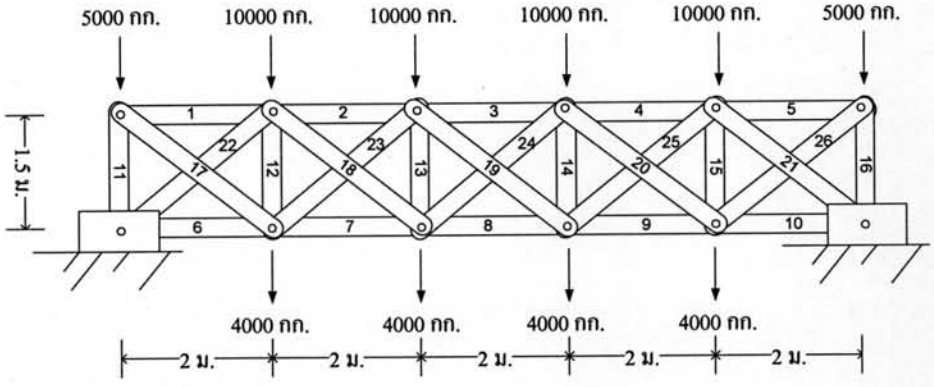
4.2.6 การประยุกต์อัลกอริทึมการอบเหนียวกับการเลือกขนาดวัสดุสำหรับโครงสร้างที่มีจุดต่อแบบผสม

เนื่องจากในการเลือกขนาดวัสดุกับโครงสร้างที่มีจุดต่อแบบผสมจะมีความยุ่งยากเพิ่มขึ้นจากการเลือกขนาดวัสดุให้กับโครงสร้างโครงข้อหมุน เพราะว่ามีการเพิ่มเงื่อนไขในการตรวจสอบความสามารถในการรับแรงมากกว่าการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสมให้กับโครงสร้างที่มีจุดต่อเป็นแบบข้อหมุนทั้งหมดหรือโครงข้อหมุน จากเดิมในการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสมสำหรับโครงข้อหมุนจะมีการตรวจสอบเงื่อนไขความสามารถในการรับแรงเฉพาะแรงอัดและแรงดึงซึ่งมีเพียงสองเงื่อนไข แต่หากเป็นโครงสร้างที่มีจุดต่อแบบผสมจะต้องเพิ่มเงื่อนไขการตรวจสอบความสามารถในการรับแรงขึ้นไปอีก 3 เงื่อนไข คือ เงื่อนไขของแรงเฉือน เงื่อนไขแรงดัดและเงื่อนไขผสมระหว่างแรงอัดและแรงดัด การที่มีเงื่อนไขเพิ่มจากเดิม 2 เงื่อนไขเป็น 5 ทำให้มีปัญหาตามมา คือ หากใช้อักกอริทึมการจำลองการอบเหนียวเพียงอย่างเดียวในการเลือกขนาดวัสดุก็จะทำให้การหาคำตอบมีประสิทธิภาพไม่ดี เพราะขนาดวัสดุที่ถูกเลือกในแต่ละกลุ่มจะต้องถูกตรวจสอบให้ผ่านเงื่อนไขทั้ง 5 เงื่อนไขต่อหนึ่งกลุ่ม สมมุติว่ามี 4 กลุ่มก็จะมีทั้งหมด 20 เงื่อนไขที่จะต้องตรวจสอบต่อการจำลองพฤติกรรม 1 ครั้งและการตรวจสอบต้องผ่านเงื่อนไข ซึ่งในการสร้างคำตอบขึ้นมาจะเป็นการสุ่มสร้างคำตอบขึ้นมา หากขนาดวัสดุของกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งไม่ผ่านเงื่อนไขคำตอบนั้นก็จะถูกยกเลิก ทำให้เสียเวลาในการสร้างคำตอบใหม่ขึ้นมาอีกครั้ง เพื่อแก้ไขปัญหานี้ในกรณีที่โครงสร้างเป็นโครงสร้างที่มีจุดต่อแบบผสมจึงต้องมีการใช้อัลกอริทึมปกติมาช่วยก่อนแล้วจึงต่อด้วยอัลกอริทึมจำลองการอบเหนียว ซึ่งผลที่ได้จากการใช้อัลกอริทึมจำลองการอบเหนียวมาเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสมให้กับโครงข้อหมุน และโครงสร้างผสมจะแสดงให้เห็นในการทดสอบตัวอย่างในหัวข้อถัดไป

4.3 ผลการทดสอบการเลือกขนาดวัสดุสำหรับตัวอย่างที่ 1 โดยใช้อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว

ตัวอย่างที่ 1 เป็นตัวอย่างโครงสร้างพื้นฐานซึ่งลักษณะของโครงสร้างแบบนี้พบได้บ่อยในงานออกแบบโครงหลังคาและนอกจากนี้ยังเป็นโครงข้อหมุนแบบผสม [33, 34] (Compound Truss) แบบอินดิเทอร์มิเนต (Indeterminate Structure) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่สามารถคำนวณด้วยมือได้ง่าย ตัวอย่างนี้จึงถูกเลือกมาเพื่อทดสอบกับอัลกอริทึมที่นำเสนอเพื่อให้เห็นถึงความสามารถในการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสม ลักษณะของโครงสร้างเป็นโครงถักระนาบมีองค์อาคารจำนวน 26 ชิ้น มีลักษณะและแรงกระทำดังรูปที่ 4.4 การเชื่อมต่อระหว่างองค์อาคารทุกจุดเป็นแบบข้อหมุน มีฐานรองรับเป็นแบบที่รองรับชนิดหมุน สูง 1.5 ม.โดยแต่ละช่วงห่าง 2 ม. หน่วยแรงดึงที่จุดครากก

2500 กก./ตร.ซม. โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก 2000000 กก./ตร.ซม. กำหนด T เริ่มต้นในการทำงานของอัลกอริทึมเท่ากับ 4.5 จำนวนชุดวัสดุที่ต้องการเลือกมีทั้งหมด 4 ชุด การเปลี่ยนขนาดวัสดุจะเปลี่ยนเป็นชุด ชิ้นส่วนที่อยู่ในชุดเดียวกันจะใช้ขนาดหน้าตัดเหล็กเท่ากัน ข้อมูลการแบ่งชุดวัสดุแสดงดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างที่ 1 สำหรับทดสอบอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลการแบ่งชุดหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 1

ชุดหน้าตัด	ชิ้นส่วน
1	1, 5, 6-10, 11-16
2	2, 3, 4
3	17-20, 23-26
4	21, 22

ผลการใช้อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวเลือกขนาดวัสดุให้กับตัวอย่างที่ 1 แสดงดังตารางถัดไป

ตารางที่ 4.6 ผลการเลือกขนาดหน้าตัดด้วยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว

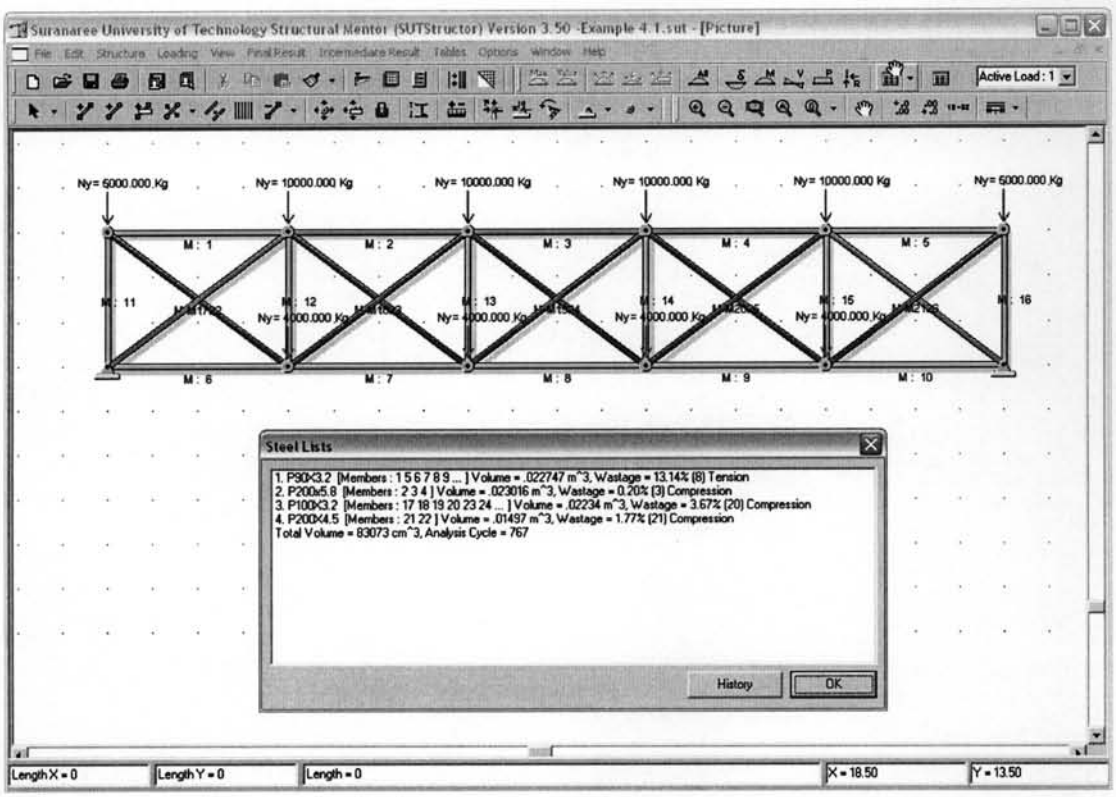
ครั้งที่	ปริมาตร[1]	จำนวนรอบ[2]	ครั้งที่	ปริมาตร[1]	จำนวนรอบ[2]
1	83073	883	14	85253	938
2	88197	833	15	83073	839
3	86017	872	16	87283	815
4	83073	862	17	85253	852

5	90227	869	18	89463	909
6	83073	961	19	87283	762
7	92407	829	20	88197	951
8	88524	938	21	83073	767
9	87283	927	22	86017	917
10	83073	872	23	85253	938
11	86017	828	24	86017	971
12	85253	751	25	88524	894
13	87283	855			

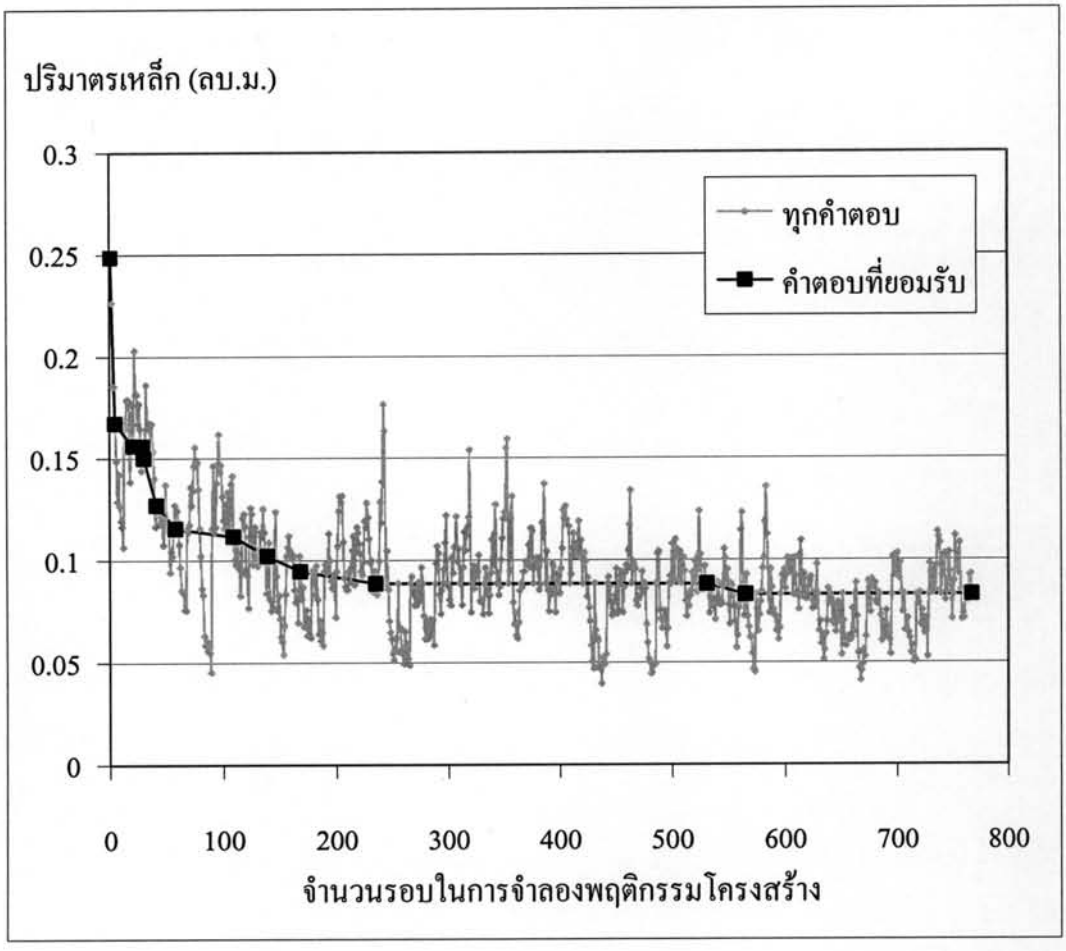
[1]ปริมาตรเหล็กของทั้งโครงสร้างมีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

[2]จำนวนรอบในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง

ผลลัพธ์ที่ได้การคำนวณโดยไมโครคอมพิวเตอร์สำหรับคำตอบที่ดีที่สุด แสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.5 ผลการเลือกขนาดวัสดุโดยอัลกอริทึมจำลองการอบเหนียว



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลระหว่างการคำนวณการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสม

ผลการเปรียบเทียบการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสมโดยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวกับอัลกอริทึมปกติที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการเลือกหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 1

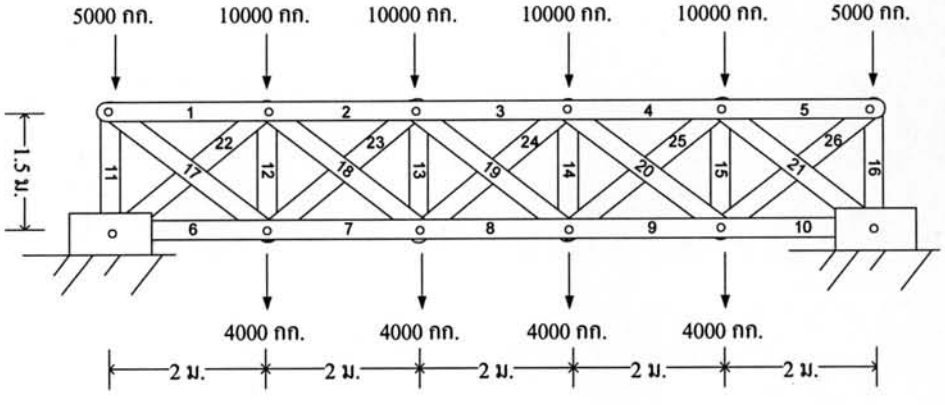
ชุดหน้าตัด	หน้าตัดที่เลือกโดยอัลกอริทึมปกติ[1]	อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว
1	P125x3.6	P90x3.2
2	P200x7	P100x3.2
3	P150x4.5	P90x4
4	P200x5.8	P200x4.5
ปริมาตรเหล็ก	127658 ลบ.ซม.	83073 ลบ.ซม.

[1]อัลกอริทึมปกติเป็นอัลกอริทึมที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันสำหรับการเลือกขนาดวัสดุดังแสดงในหัวข้อที่ 2.7 ตารางที่ 2.3

ผลของการเลือกวัสดุโดยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวเทียบกับอัลกอริทึมที่ใช้ปัจจุบันช่วยลดปริมาตรเหล็กลงได้ 35 เปอร์เซ็นต์

4.4 ผลการทดสอบการเลือกขนาดวัสดุสำหรับตัวอย่างที่ 2 โดยใช้อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว

ตัวอย่างที่ 2 เป็นโครงสร้างที่ถูกปรับมาจากตัวอย่างที่ 1 โดยให้เหล็กด้านบนและด้านล่างของโครงสร้างมีความต่อเนื่องกันเพื่อให้สะดวกในการก่อสร้างซึ่งโครงสร้างนี้จะมีความยากในการคำนวณมากขึ้นกว่าตัวอย่างที่ 1 ซึ่งจุดต่อทั้งหมดจะเป็นเพียงข้อหมุนที่มีการตรวจสอบความสามารถในการรับแรงเฉพาะแรงอัดและแรงดึงเท่านั้นแต่ในโครงสร้างแบบนี้จะมีการเพิ่มเงื่อนไขในการตรวจสอบความสามารถในการรับแรงดัดและแรงเฉือนด้วย เพื่อที่จะแสดงความสามารถอัลกอริทึมในการทำงานกับปัญหาที่มีความยากมากขึ้นตัวอย่างนี้จึงถูกเลือกมาทดสอบ ลักษณะของโครงสร้างเป็นโครงถักระนาบมีองค์อาคารจำนวน 26 ชิ้น มีลักษณะและแรงกระทำดังรูปที่ 4.7 ซึ่งคล้ายกับตัวอย่างที่ผ่านมาแต่มีความแตกต่างกันที่จุดเชื่อมต่อ การเชื่อมต่อระหว่างองค์อาคารในตัวอย่างนี้ทุกจุดเป็นแบบข้อหมุน ยกเว้นองค์อาคารหมายเลข 1, 2, 3, 4 และ 5 ที่เชื่อมต่อเป็นชิ้นเดียวกัน และองค์อาคารหมายเลข 6, 7, 8, 9 และ 10 ที่เชื่อมต่อเป็นชิ้นเดียวกันแบบข้อแข็ง มีฐานรองรับเป็นแบบที่รองรับชนิดหมุน หน่วยแรงดึงที่จุดครากเท่ากับ 2500 กก./ตร.ซม. โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก 2000000 กก./ตร.ซม. กำหนด T เริ่มต้นในการทำงานของอัลกอริทึมเท่ากับ 4.5



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างที่ 2 สำหรับทดสอบอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว

จำนวนชุดวัสดุที่ต้องการเลือกมีทั้งหมด 5 ชุด ข้อมูลการแบ่งชุดวัสดุแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ข้อมูลการแบ่งชุดหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 2

ชุดหน้าตัด	ชิ้นส่วน
1	1-5
2	6-10
3	11-16
4	17-20, 23-26
5	21, 22

ผลการใช้อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวเลือกขนาดวัสดุให้กับตัวอย่างที่ 2 แสดงดังตารางถัดไป

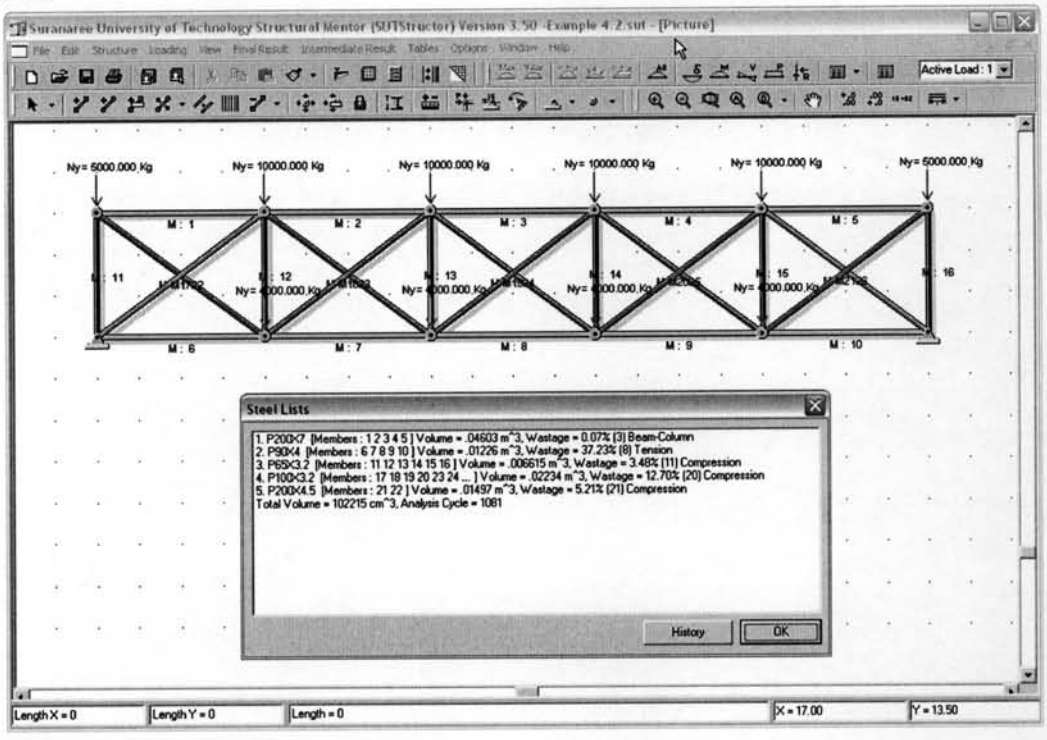
ตารางที่ 4.9 ผลการเลือกขนาดหน้าตัดด้วยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว

ครั้งที่	ปริมาตร[1]	จำนวนรอบ[2]	ครั้งที่	ปริมาตร[1]	จำนวนรอบ[2]
1	107724	1048	14	102431	1094
2	116051	1071	15	108478	1081
3	111836	883	16	102215	1081
4	102466	938	17	107641	938
5	113588	927	18	106634	971
6	106634	1015	19	112891	994
7	112720	1037	20	104466	1037
8	109311	1015	21	105653	1147
9	105591	938	22	110401	905
10	106716	916	23	103340	993
11	102250	1071	24	105688	994
12	109456	949	25	104611	906
13	105626	1037			

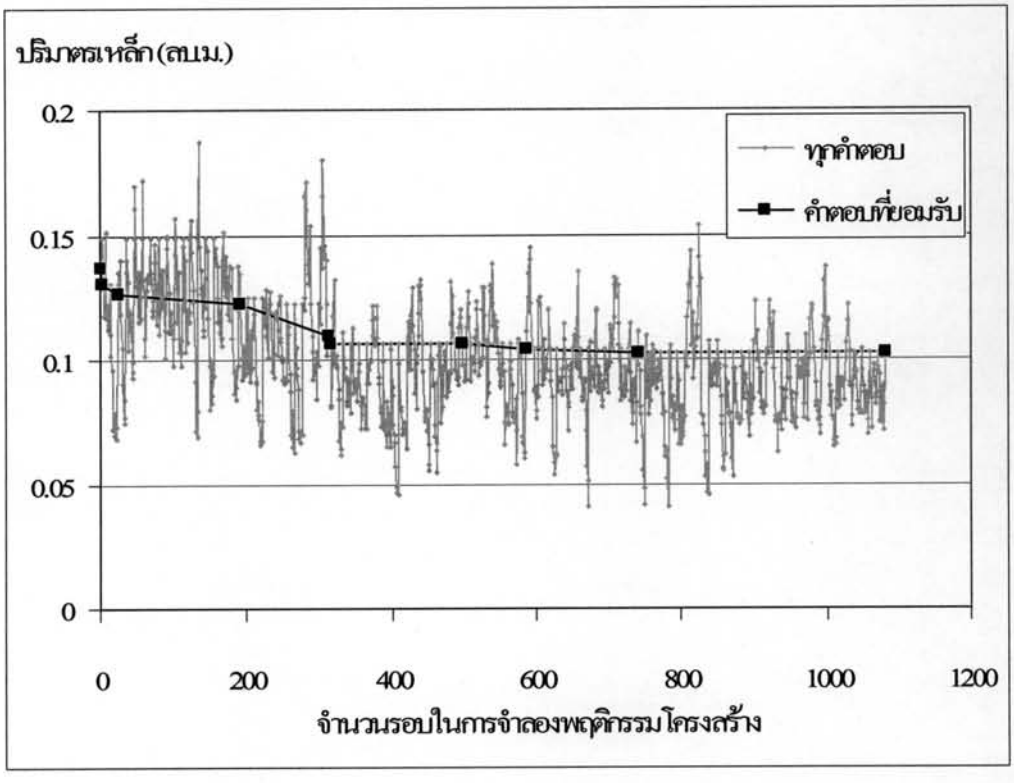
[1]ปริมาตรเหล็กของทั้งโครงสร้างมีหน่วยเป็นลบ.ซม.

[2]จำนวนรอบในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง

ผลลัพธ์ที่ได้การคำนวณโดยไมโครคอมพิวเตอร์สำหรับคำตอบที่ดีที่สุดแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9



รูปที่ 4.8 ผลการเลือกขนาดวัสดุโดยอัลกอริทึมจำลองการอบเหนียว



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลระหว่างการคำนวณการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสม

ผลการเปรียบเทียบการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสมโดยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวกับอัลกอริทึมปกติที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันแสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลการเลือกหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 2

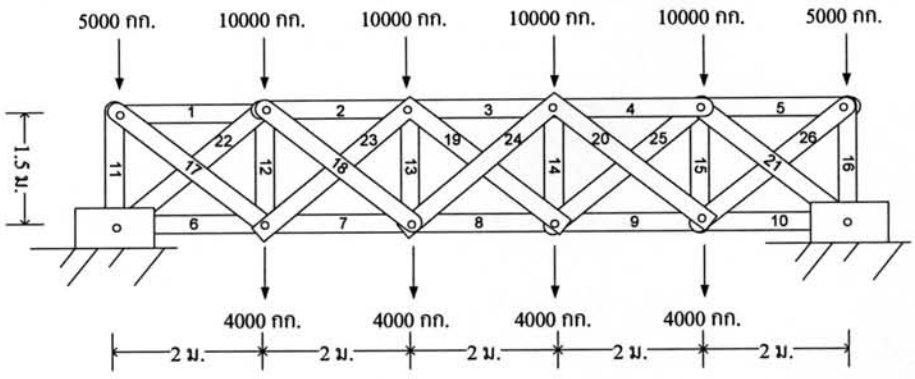
ชุดหน้าตัด	หน้าตัดที่เลือกโดยอัลกอริทึมปกติ[1]	อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว
1	P200x7	P200x7
2	P125x4.5	P90x4
3	P125x3.6	P65x3.2
4	P150x4.5	P100x3.2
5	P200x5.8	P200x4.5
ปริมาตรเหล็ก	143640 ลบ.ซม.	102215 ลบ.ซม.

[1]อัลกอริทึมปกติเป็นอัลกอริทึมที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันสำหรับการเลือกขนาดวัสดุดังแสดงในหัวข้อที่ 2.7 ตารางที่ 2.3 ใช้จำนวนรอบในการจำลองพฤติกรรมน้อยทำให้สามารถใช้การคำนวณการเลือกขนาดวัสดุด้วยมือผสมกับการจำลองพฤติกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ได้

ผลของการเลือกวัสดุโดยใช้อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวเทียบกับใช้อัลกอริทึมที่ใช้กันในปัจจุบันกับโครงสร้างที่มีจุดต่อแบบผสมช่วยลดปริมาตรเหล็กลงได้ 29 เปอร์เซ็นต์

4.5 ผลการทดสอบการเลือกขนาดวัสดุสำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว

ตัวอย่างที่ 3 เป็นโครงสร้างที่มีจุดต่อแบบผสมซึ่งยากต่อการคำนวณซึ่งการตรวจสอบความสามารถในรับหนักหรือการตรวจสอบว่าจะเป็นคำตอบได้หรือไม่ในอัลกอริทึมนอกจากจะตรวจสอบความสามารถในการรับแรงดัดและแรงอัดแล้วจะต้องเพิ่มเงื่อนไขในการตรวจสอบความสามารถในการรับแรงเฉือนและแรงดัดเข้าไปอีก ซึ่งเงื่อนไขเหล่านี้ทำให้การค้นหาคำตอบที่ดีทำได้ยากขึ้นเพราะมีคำตอบที่ไม่ผ่านมากขึ้น เพื่อตรวจสอบว่าในปัญหาที่ยากขึ้นอัลกอริทึมยังสามารถทำงานได้ตัวอย่างนี้จึงได้ถูกเลือกมาทดสอบ ตัวอย่างโครงสร้างผสมนี้ประกอบด้วยองค์อาคาร 26 ชิ้น มีลักษณะและแรงกระทำดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างที่ 3 สำหรับทดสอบอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว

ตัวอย่างโครงสร้างผสมจะคล้ายกับตัวอย่างที่ผ่านมาแต่จะแตกต่างกันที่จุดเชื่อมต่อ โดยที่การเชื่อมต่อระหว่างองค์อาคารในตัวอย่างนี้ทุกจุดเป็นแบบข้อหมุนยกเว้นองค์อาคารหมายเลข 2, 3 และ 4 ที่เชื่อมต่อเป็นชิ้นเดียวกันแบบข้อแข็ง มีฐานรองรับเป็นแบบที่รองรับชนิดหมุน กำหนด T เริ่มต้นในการทำงานของอัลกอริทึมเท่ากับ 4.5 จำนวนชุดวัสดุที่ต้องการเลือกมีทั้งหมด 5 ชุด ข้อมูลการแบ่งชุดวัสดุแสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ข้อมูลการแบ่งชุดหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 3

ชุดหน้าตัด	ชิ้นส่วน
1	1, 5, 6-10, 11-16
2	2, 3, 4
3	17, 18, 25, 26
4	21, 22
5	19, 20, 23, 24

ผลการใช้อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวเลือกขนาดวัสดุแสดงดังตารางถัดไป

ตารางที่ 4.12 ผลการเลือกขนาดหน้าตัดด้วยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว

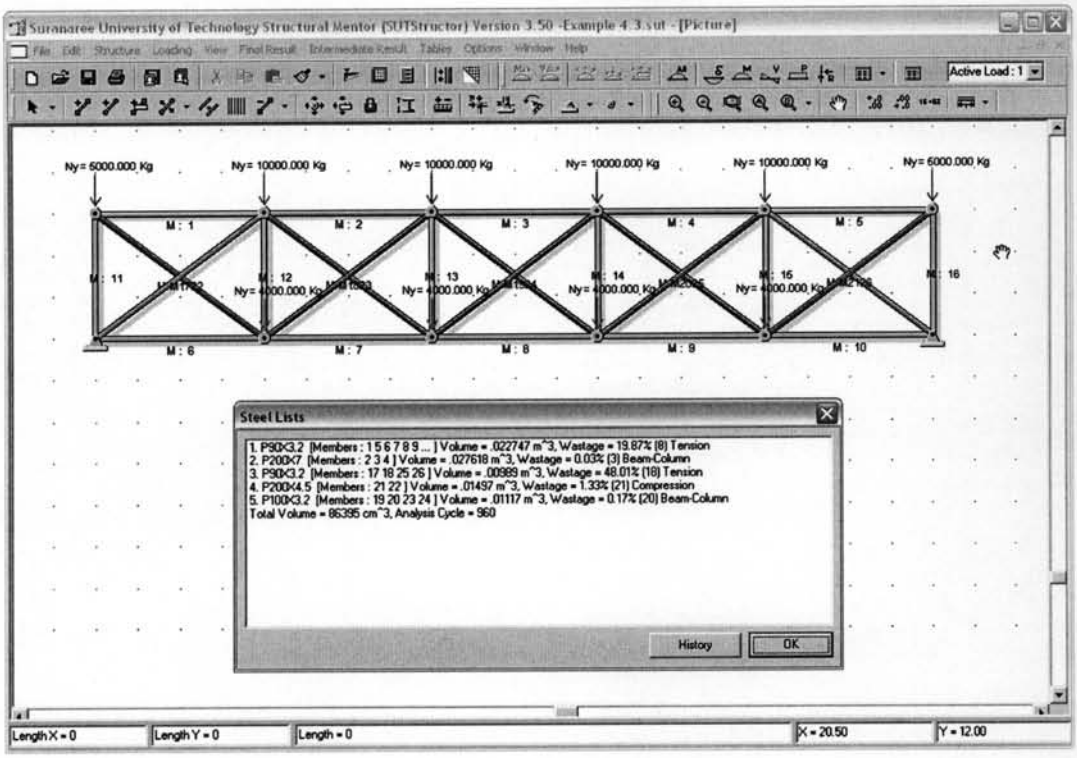
ครั้งที่	ปริมาตร[1]	จำนวนรอบ[2]	ครั้งที่	ปริมาตร[1]	จำนวนรอบ[2]
1	90619	971	14	96000	938
2	92025	960	15	86395	960
3	94450	1048	16	93150	1048
4	91415	1004	17	88765	1103

5	92080	1081	18	88765	1037
6	87750	1049	19	100406	982
7	91535	1092	20	92295	949
8	88765	1059	21	92449	1024
9	94989	1115	22	93989	1070
10	88765	1037	23	97325	960
11	92535	1147	24	86395	1147
12	89495	1169	25	91709	1126
13	92449	993			

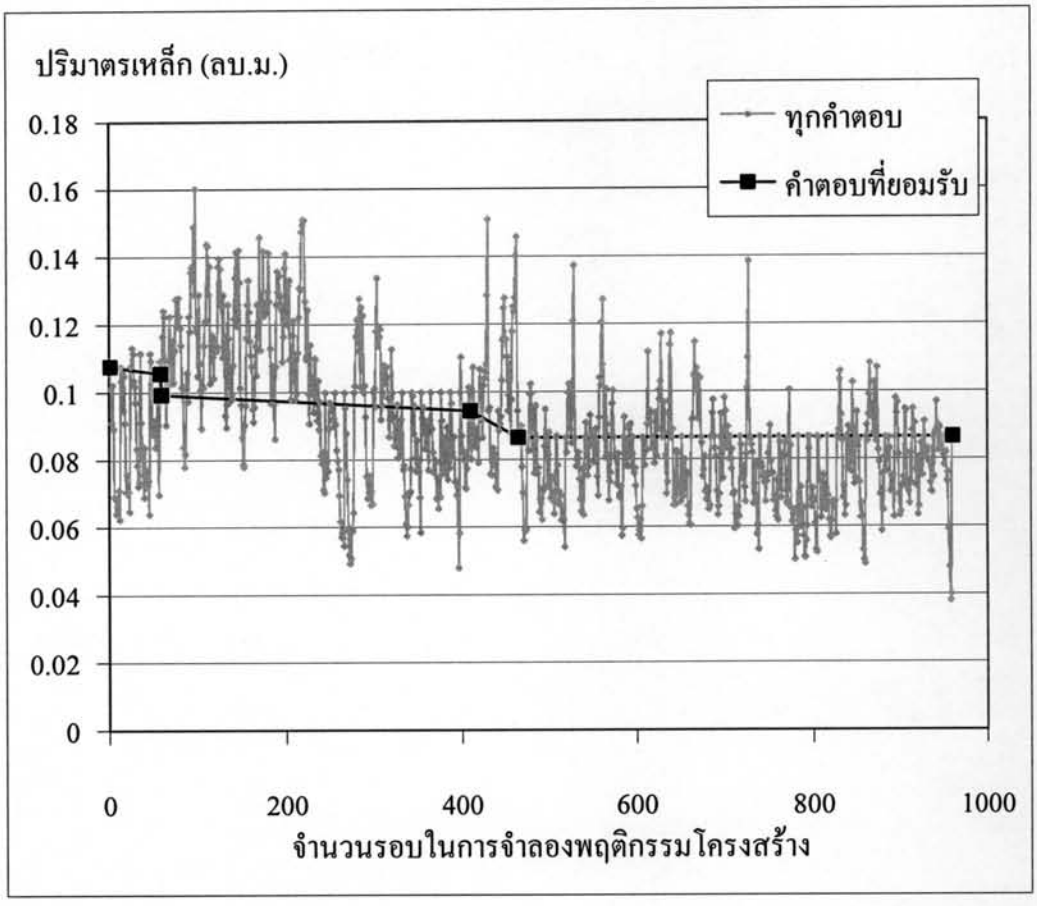
[1]ปริมาตรเหล็กของทั้งโครงสร้างมีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

[2]จำนวนรอบในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง

ผลลัพธ์ที่ได้การคำนวณโดยไมโครคอมพิวเตอร์สำหรับคำตอบที่ดีที่สุด แสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12



รูปที่ 4.11 ผลการเลือกขนาดวัสดุโดยอัลกอริทึมจำลองการอบเหนียว



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลระหว่างการคำนวณการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสม

ผลการเปรียบเทียบการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสมโดยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวกับอัลกอริทึมปกติที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันแสดงดังตารางที่ 4.13

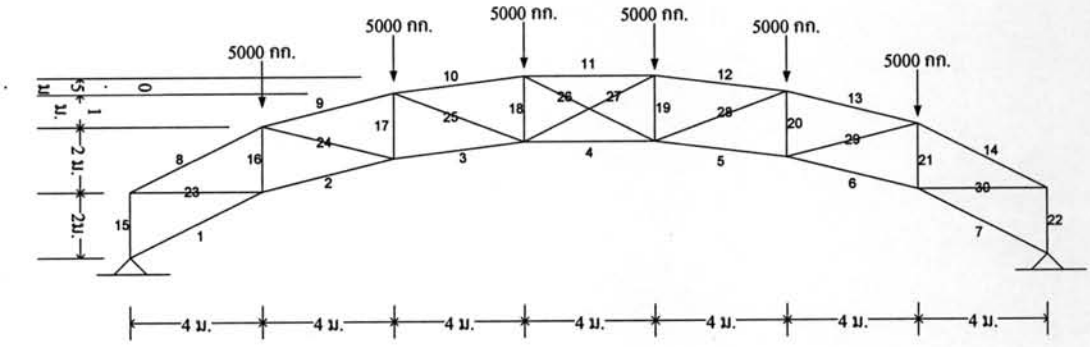
ตารางที่ 4.13 ผลการเลือกหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 3

ชุดหน้าตัด	หน้าตัดที่เลือกโดยอัลกอริทึมปกติ[1]	อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว
1	P125x3.6	P90x3.2
2	P200x7	P200x7
3	P32x2.3	P90x3.2
4	P200x5.8	P200x4.5
5	P150x4.5	P100x3.2
ปริมาตรเหล็ก	107858 ลบ.ซม.	86395 ลบ.ซม.

[1]อัลกอริทึมปกติเป็นอัลกอริทึมที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันสำหรับการเลือกขนาดวัสดุดังแสดงในหัวข้อที่ 2.7 ตารางที่ 2.3 ใช้จำนวนรอบในการจำลองพฤติกรรมน้อยทำให้สามารถใช้การคำนวณการเลือกขนาดวัสดุด้วยมือผสมกับการจำลองพฤติกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ได้

ผลของการเลือกวัสดุโดยใช้อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวเทียบกับใช้อัลกอริทึมที่ใช้กันในปัจจุบันกับโครงสร้างที่มีจุดต่อแบบผสมช่วยลดปริมาตรเหล็กลงได้ 20 เปอร์เซ็นต์

4.6 ผลการทดสอบการเลือกขนาดวัสดุสำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว



รูปที่ 4.13 ตัวอย่างที่ 4 สำหรับทดสอบอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว

ตัวอย่างที่ 4 เป็นโครงสร้างโครงข้อหมุนที่มีลักษณะซึ่งลักษณะทางกายภาพโค้งนี้มักพบได้ในการออกแบบโครงหลังคาซึ่งเป็นโครงสร้างที่ยุ่งยากในการคำนวณด้วยมือมากกว่าตัวอย่างที่ 1 ตัวอย่างนี้ถูกเลือกมาเพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของอัลกอริทึมในการทำงานกับโครงสร้างที่มีลักษณะทางกายภาพที่มีลักษณะโค้ง ลักษณะของตัวอย่างเป็นโครงถักระนาบมีองค์อาคาร 30 ชิ้น มีลักษณะโครงสร้างและแรงกระทำดังรูปที่ 4.13 การเชื่อมต่อระหว่างองค์อาคารทุกจุดเป็นแบบข้อหมุนมีฐานรองรับเป็นแบบที่รองรับชนิดหมุน จำนวนชุดวัสดุที่ต้องการเลือกมีทั้งหมด 5 ชุด ข้อมูลการแบ่งชุดวัสดุแสดงดังตารางที่ 4.14 กำหนด T เริ่มต้นในการทำงานของอัลกอริทึมเท่ากับ 4.5

ตารางที่ 4.14 ข้อมูลการแบ่งชุดหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 4

ชุดหน้าตัด	ชิ้นส่วน
1	1-7
2	8-14
3	15-22

4	22-25, 28-30
5	26, 27

ผลการใช้อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวเลือกขนาดวัสดุให้กับตัวอย่างที่ 4 แสดงดังตารางที่ 4.15

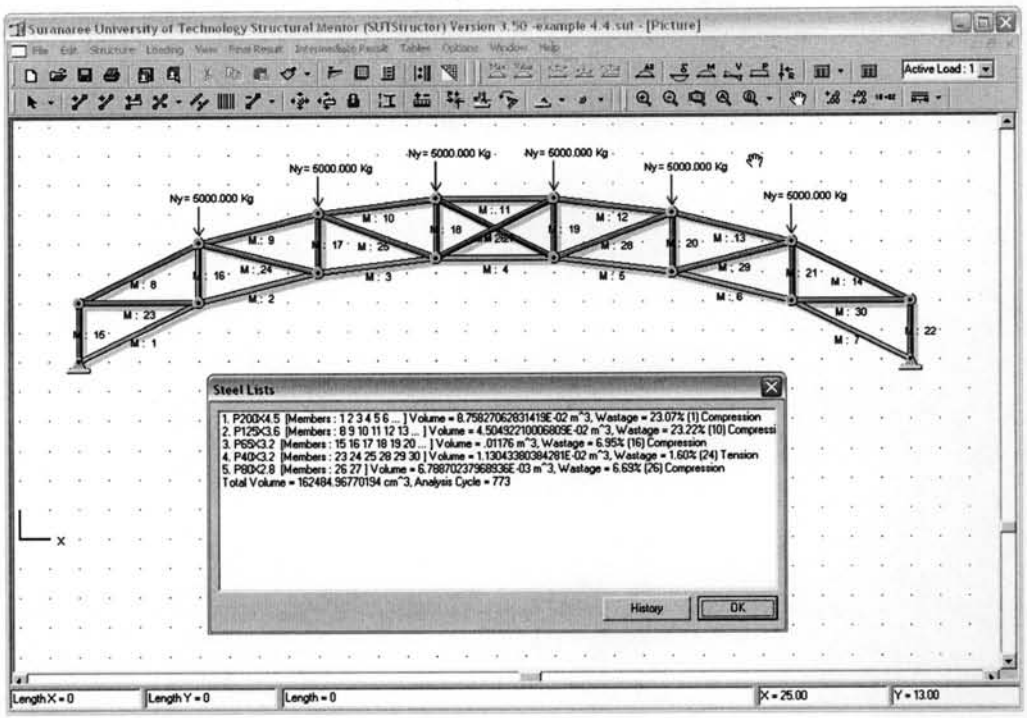
ตารางที่ 4.15 ผลการเลือกขนาดหน้าตัดด้วยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว

ครั้งที่	ปริมาตร[1]	จำนวนรอบ[2]	ครั้งที่	ปริมาตร[1]	จำนวนรอบ[2]
1	171631	598	14	169046	604
2	186354	707	15	162485	773
3	165277	674	16	171581	597
4	172355	630	17	164747	762
5	176369	720	18	173316	751
6	166049	718	19	172198	630
7	166038	598	20	176304	602
8	165131	861	21	166276	741
9	174697	677	22	175929	619
10	167693	644	23	171670	575
11	176606	719	24	173582	777
12	169786	785	25	193684	566
13	180523	654			

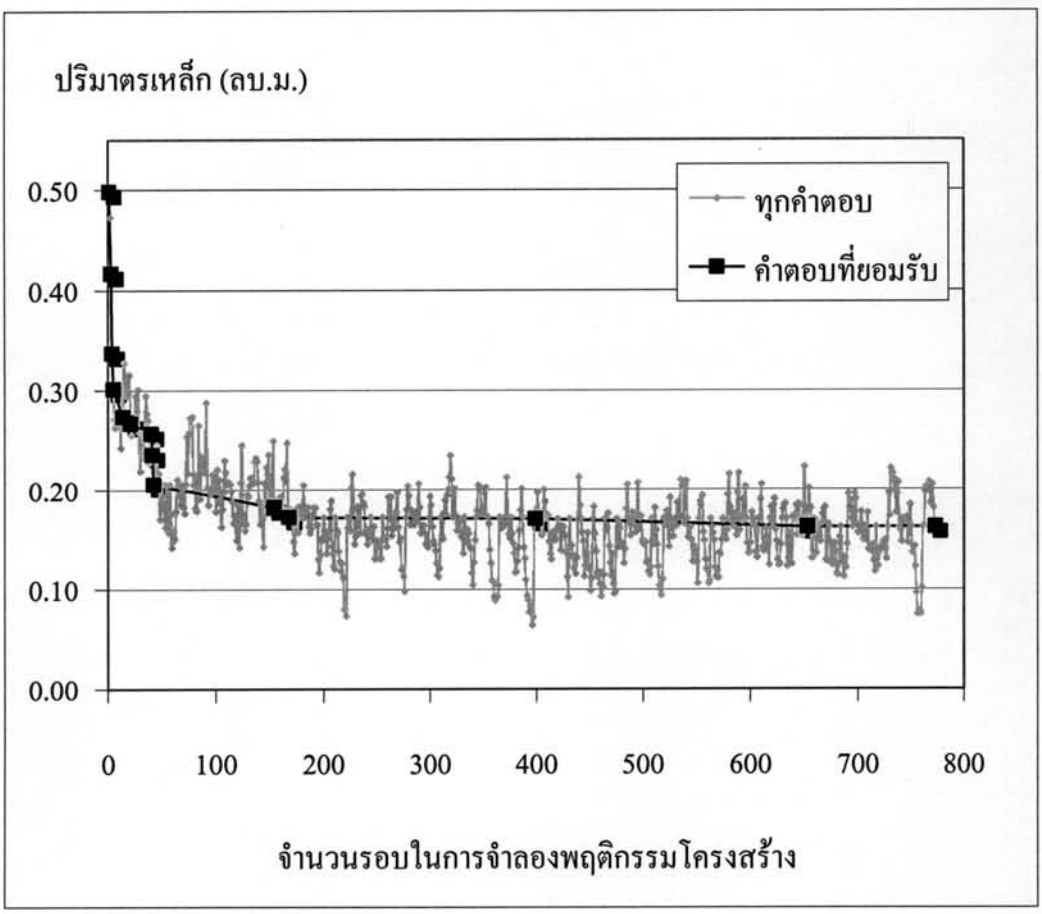
[1]ปริมาตรเหล็กของทั้งโครงสร้างมีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

[2]จำนวนรอบในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง

ผลลัพธ์ที่ได้การคำนวณโดยไมโครคอมพิวเตอร์สำหรับคำตอบที่ดีที่สุด แสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15



รูปที่ 4.14 ผลการเลือกขนาดวัสดุโดยอัลกอริทึมจำลองการอบเหนียว



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลระหว่างการคำนวณการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสม

ผลการเปรียบเทียบการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสมโดยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวกับอัลกอริทึมปกติที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันแสดงดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ผลการเลือกหน้าตัดสำหรับตัวอย่างที่ 4

ชุดหน้าตัด	หน้าตัดที่เลือกโดยอัลกอริทึมปกติ[1]	อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว
1	P125x4	P200x4.5
2	P125x4.5	P125x3.6
3	P200x4.5	P65x3.2
4	P80x2.8	P40x3.2
5	P50x3.2	P80x2.8
ปริมาตรเหล็ก	185234 ลบ.ซม.	162484 ลบ.ซม.

[1]อัลกอริทึมปกติเป็นอัลกอริทึมที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันสำหรับการเลือกขนาดวัสดุดังแสดงในหัวข้อที่ 2.7 ตารางที่ 2.3 ใช้จำนวนรอบในการจำลองพฤติกรรมน้อยทำให้สามารถใช้การคำนวณการเลือกขนาดวัสดุด้วยมือผสมกับการจำลองพฤติกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ได้

ผลของการเลือกวัสดุโดยใช้อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวเทียบกับใช้อัลกอริทึมปกติที่ใช้กันในปัจจุบันกับโครงสร้างที่มีจุดต่อแบบผสมช่วยลดปริมาตรเหล็กลงได้ 12 เปอร์เซ็นต์