การหาน้ำหนักต่ำสุดที่เหมาะสม ในการออกแบบโครงข้อหมุน โดยระเบียบวิธีเลียนแบบพันธุศาสตร์

WEIGHT OPTIMIZATION FOR TRUSS DESIGN BY GENETIC ALGORITHM

วิรัช เลิศไพฑูรย์พันธ์ (Wirat Lertpaitoonpan)[1]

[1]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

e-mail: wirat.le@spu.ac.th

บทคัดย่อ: การวิจัยนี้ศึกษากลวิธีการใช้ระเบียบวิธีเลียนแบบพันธุศาสตร์ ในการออกแบบโครงหลังคาเหล็ก ซึ่งโดยทั่วไปการออกแบบโครงหลังคาเหล็กขนาดใหญ่ เพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีขนาดและรูปร่างที่เหมาะสม นั้นจะต้องอาศัยประสบการณ์ในการออกแบบของวิศวกรผู้ออกแบบ ซึ่งอาจต้องใช้เวลามากและยังไม่สามารถรับประกันได้ว่าโครงสร้างที่ได้เป็นโครงสร้างที่เหมาะสม การวิจัยนี้เลือกใช้ระเบียบวิธีเลียนแบบพันธุศาสตร์ เป็นเครื่องมือในการค้นหาคำตอบ และเพื่อให้สามารถนำผลการวิจัยไปใช้ได้จริงในการออกแบบ การศึกษานี้จึงใช้ตัวแปรจริง ที่สอดคล้องกับการใช้งาน เช่น ชนิดของวัสดุ คุณสมบัติวัสดุ รูปร่างและลักษณะของโครงสร้าง และใช้ข้อกำหนดในการออกแบบตามมาตรฐาน AISC (LRFD) เป็นข้อจำกัดของปัญหา โดยให้น้ำหนักของโครงสร้างที่ต่ำที่สุดเป็นเป้าหมายของปัญหา จากการศึกษาพบว่าการออกแบบด้วยระเบียบวิธีเลียนแบบพันธุศาสตร์โดยใช้ตัวแปรจริงนี้สามารถให้คำตอบสำหรับการออกแบบที่เหมาะสมสัมบูรณ์หรือใกล้คำตอบที่เหมาะสมสัมบูรณ์ได้ โดยที่ประสิทธิภาพของการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น จำนวนตัวแปร จำนวนประชากร รวมไปถึงปัจจัยทางเทคนิคของระเบียบวิธีเลียนแบบพันธุศาสตร์

คำสำคัญ: ระเบียบวิธีเลียนแบบพันธุศาสตร์ ออกแบบโครงหลังคาเหล็ก คำตอบที่เหมาะสม

ABSTRACT: This research studies the techniques of using genetic algorithm for designing a steel roof truss. In general, the design of large roof truss needs a lot of experience from the designer in order to have an optimum structure. The optimum design is time consuming process. This study used the genetic algorithm as an optimal searching tool, which is good for highly nonlinear problems. This study also uses a real code technique, which easily apply to general practice. The material type, material property, structural type and structural geometry are variables of this study. The design method follows the AISC (LRFD) specification. The objective function of the problem is to find the lowest weight of the structure. The study found that the genetic algorithm with the real code could provide the global optimum design or the near global optimum design for steel roof trusses. The efficiency of this method depends on number of variables, amount of population and technique of the genetic algorithm.

KEYWORDS: Genetic Algorithm, Roof Truss Design, Structural Optimization

1. ความสำคัญของปัญหา

การออกแบบโครงข้อหมุน (Truss) เพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีขนาดและรูปร่างที่เหมาะสม คือ ชิ้นส่วนมีความแข็งแรงเพียงพอในการรับน้ำหนักบรรทุก (Load Resistance) สามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสม (Serviceability) ประหยัด (Economy) สามารถก่อสร้างได้จริง (Practical) และมีความสวยงาม (Esthetics) โดยทั่วไปจะต้องอาศัยประสบการณ์ในการออกแบบและวิธีการลองผิดลองถูก (Trial and Error) ของวิศวกรผู้ออกแบบ ซึ่งจะต้องใช้เวลามากและยังไม่สามารถรับประกันได้ว่าโครงสร้างที่ได้เป็นโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Design)

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวมีการศึกษาเพื่อนำเอาปัญญาประดิษฐ์เข้ามาใช้ช่วยในการออกแบบ แต่การศึกษาปัญญาประดิษฐ์แบบดั้งเดิมโดยส่วนใหญ่มักจะใช้ตัวแปรเป็นแบบตัวแปรต่อเนื่อง (Continuous-Variable) แต่ในการออกแบบโครงสร้างจริง ตัวแปรคือประเภทรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนซึ่งมีค่าเป็นจุดไม่ต่อเนื่อง (Discrete Variables) เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้กับงานออกแบบจริงได้ C.C. Chen and W. Kanok-Nukulchai [2] แนะนำว่าระเบียบวิธีค้นหาคำตอบที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการออกแบบโครงสร้างควรใช้ตัวแปรในลักษณะของค่าเป็นจุดไม่ต่อเนื่องเช่นกัน เพื่อให้ได้คำตอบที่สอดคล้องกับสภาพการทำงานจริง

ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการใช้ตัวแปรจริงในขบวนการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม ซึ่งโดยทั่วไปในแต่ละสายพันธุ์ของระเบียบวิธีเลียนแบบพันธุศาสตร์จะประกอบด้วยตัวแปรประเภทเดียวกันและมีขนาดของโครโมโซมเท่ากัน แต่ในการศึกษานี้ในแต่ละสายพันธุ์จะประกอบด้วยตัวแปรหลายประเภทที่มีขนาดไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับขอบเขตของแต่ละตัวแปรในการใช้งานจริง เพื่อให้สอดคล้องกับการประยุกต์ใช้งานในการออกแบบจริง

2. ระเบียบวิธีเลียนแบบพันธุศาสตร์ (GA)

ระเบียบวิธีเลียนแบบพันธุศาสตร์ (Genetic Algorithm) เป็นกระบวนการค้นหาคำตอบที่มีพื้นฐานอยู่บนทฤษฎีทางพันธุศาสตร์ และกลไกการคัดเลือกตามธรรมชาติ ตามกฎการอยู่รอดของผู้ที่แข็งแกร่งกว่า (The Survival of The Fittest) ของ ชาร์ลส์ ดาร์วิน (Charles Darwin, 1809-1882) ระเบียบวิธีนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างมากโดย กลุ่มนักวิจัยของ จอห์น ฮอลแลนด์ (John Holland) [4] ในช่วงปี ค.ศ.1960-1980

ระเบียบวิธีเลียนแบบพันธุศาสตร์ มีกระบวนการหลัก สามส่วนคือ การคัดเลือก (Selection) การไขว้สายพันธุ์ (Crossover) และการผ่าเหล่า (Mutation) กระบวนการหลักทั้งสามร่วมกันทำให้ระเบียบวิธีนี้เป็นการหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพสูงกับปัญหาหลากหลายรูปแบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับปัญหาในชีวิตจริงที่มีขนาดใหญ่และสลับซับซ้อน

การคัดเลือก (Selection) คือการเลือกสายพันธุ์ต้นแบบหรือสายพันธุ์พ่อแม่ (Parent) จากกลุ่มประชากร (Population) เพื่อสร้างประชากรใหม่ (Reproduction) โดยกำหนดให้สายพันธุ์ที่ดีมีโอกาสในการถูกเลือกสูงกว่าสายพันธุ์ที่ไม่ดีเช่นเดียวกับสภาพในธรรมชาติ ซึ่งสายพันธุ์จะดีหรือไม่ วัดจากความแข็งแกร่งของแต่ละสายพันธุ์ (Fitness) เดวิด โกลด์เบิร์ก (David Goldberg) [3] เสนอวิธีการคัดเลือกโดยอาศัยทฤษฎีวงล้อรูเรทท์ (Roulette Wheel Selection) โดยให้ค่าความน่าจะเป็นที่วงล้อจะตกในช่วงสายพันธุ์ต้นแบบที่ดี สูงกว่าความน่าจะเป็นที่วงล้อจะตกในช่วงสายพันธุ์ที่ไม่ดี กำหนดโดยใช้อัตราส่วนระหว่างความแข็งแกร่งของแต่ละสายพันธุ์ต่อความแข็งแกร่งรวมของทุกสายพันธุ์ ซึ่งก็จะทำให้สายพันธุ์ที่ดีมีโอกาสถูกเลือกมาเป็นต้นแบบมากกว่าสายพันธุ์ที่ไม่ดี

ปัจจัยที่มักจะมีผลต่อประสิทธิภาพของของระเบียบวิธีเลียนแบบพันธุศาสตร์มีด้วยกันหลายประการเช่น จำนวนของประชากรในแต่ละรุ่น (Population Size) ขบวนการไขว้สายพันธุกรรม (Crossover Technique) ความน่าจะเป็นของการไขว้สายพันธุกรรม (Crossover Probability) ความน่าจะเป็นของ

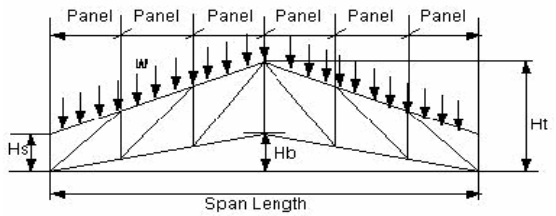
การผ่าเหล่าในสายพันธุกรรม (Mutation Probability) และรูปแบบของรหัสสายพันธุกรรม (Coding System) เป็นต้น โดยที่ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้จะมีผลมากหรือน้อยแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ เหล่านี้เพื่อให้ได้ขบวนการค้นหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น วิธีการเก็บสายพันธุ์ที่ดีที่สุดก่อนหน้าไว้ก็เป็นเทคนิคที่ช่วยให้การค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพมากขึ้น [5] ซึ่งจำเป็นต้องนำมาร่วมพิจารณาด้วย

3. การประยุกต์ขบวนการหาคำตอบที่เหมาะสมกับการออกแบบโครงสร้าง

ในการประยุกต์ขบวนการหาคำตอบที่เหมาะสมกับการออกแบบโครงสร้างมีส่วนประกอบสามส่วนคือ การสร้างแบบจำลอง (Generate Structural Model) การวิเคราะห์โครงสร้าง (Structural Analysis) การหาคำตอบที่เหมาะสม (Optimization) การศึกษานี้จะพิจารณาการออกแบบโครงหลังคาเหล็กประเภทโครงข้อหมุนสองมิติ โดยใช้ข้อกำหนดการออกแบบของ AISC (LRFD) ให้น้ำหนักกระทำเป็นแบบแผ่สม่ำเสมอกระจายไปยังจุดต่อที่คอร์ดบน หน้าตัดขององค์อาคารเป็นรูปร่างเดียวกันทั้งโครงสร้างแต่อาจมีขนาดต่างกันตามความเหมาะสม รูปแบบของโครงหลังคาเป็นแบบที่ใช้กันทั่วไปเช่นแบบแพรท และแบบโฮว์

3.1 การสร้างแบบจำลอง (Generate Structural Model)

แบบจำลองโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบกำหนดจากรูปแบบของโครงหลังคา และมิติของโครงสร้าง ดังแสดงในภาพที่1



ภาพที่ 1 แสดงข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองโครงสร้าง

โดยที่

L = ความยาวช่วงของโครงหลังคา

Hs = ความสูงของคอร์ดบนที่บริเวณฐานรองรับ

Ht = ความสูงของคอร์ดบนที่บริเวณกึ่งกลางช่วงความยาว

Hb = ความสูงของคอร์ดล่างที่บริเวณกึ่งกลางช่วงความยาว

Panel = ช่วงย่อยของโครงหลังคา

NPanel = จำนวนช่วงย่อยของโครงหลังคา

จากค่าตัวแปรที่กำหนดรูปร่างของโครงสร้างข้างต้นสามารถสร้างรูปแบบของโปรแกรมสร้างแบบจำลองโครงสร้างเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างได้ โดยอาศัยความสัมพันธ์ของขนาดและรูปร่างที่กำหนดให้

3.2 การวิเคราะห์โครงสร้าง (Structural Analysis)

ในขบวนการหาคำตอบที่เหมาะสมจะต้องมีการวิเคราะห์โครงสร้างอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยนี้จึงสร้างโปรแกรมย่อยวิเคราะห์โครงข้อหมุนโดยวิธีสติฟเนสตรงเชื่อมต่ออยู่ในโปรแกรมการออกแบบโครงหลังคานี้ โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้นจากตัวแปรที่กำหนดรูปร่างของโครงสร้าง

3.3 การหาคำตอบที่เหมาะสม (Optimization)

การหาคำตอบที่เหมาะสมเป็นขบวนการค้นหาคำตอบซึ่งสอดคล้องกับความต้องการมากที่สุดเช่นในการศึกษานี้ต้องการออกแบบโครงสร้างหลังคาเหล็กให้มีความประหยัดที่สุดและสามารถนำไปใช้งานได้จริง ดังนั้นสมการเป้าหมายของการหาคำตอบ (Objective Function) คือ

$$\text{Minimize} \quad \text{Weight} = \sum_{i=1}^{m} \left(\rho_i A_i L_i \right) \qquad (1)$$

โดยที่

m คือ จำนวนชิ้นส่วนของโครงสร้าง

ρ คือ ค่าหน่วยน้ำหนักของวัสดุ

L คือ ความยาวของชิ้นส่วน

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วน

เพื่อให้คำตอบที่ได้จากขบวนการนี้เป็นคำตอบที่สามารถใช้งานได้จริง ข้อกำหนดของการออกแบบตามมาตรฐาน AISC (LRFD) ถูกใช้เป็นข้อจำกัด (Constraint) ของปัญหานี้ ดังนั้นคำตอบที่ได้ไม่ว่าจะเป็นคำตอบที่ภาวะเหมาะสมที่สุด (Optimum) หรือใกล้เหมาะสมที่สุด (Near Optimum) ก็จะสามารถนำไปใช้งานได้จริง

4. ระเบียบวิธีเลียนแบบพันธุศาสตร์กับการใช้ตัวแปรจริง

งานวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีเลียนแบบพันธุศาสตร์ในการหาค่าคำตอบที่เหมาะสม (Optimum Solution) โดยใช้ตัวแปรจริง ประกอบขึ้นเป็นสายพันธุ์ของประชากร ขบวนการหลักของระเบียบวิธีนี้ได้นำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษานี้

4.1 สายพันธุกรรม (Chromosome)

ในระเบียบวิธีเลียนแบบพันธุศาสตร์สายพันธุกรรมเป็นสายของรหัสซึ่งแทนคำตอบหนึ่งๆ ของปัญหาซึ่งในระบบของตัวแปรจริงในงานวิจัยนี้ขนาดของสายพันธุ์จะขึ้นกับจำนวนและประเภทของตัวแปร ดังตัวอย่าง

Ht	Hs	H	Npane	Structure	Section

ตัวแปรแต่ละตัวจะถูกเข้ารหัสให้อยู่ในระบบเลขฐานสอง ที่อาจมีจำนวนบิทไม่เท่ากัน ในขณะที่อยู่ในขบวนการของ GA และจะถูกถอดรหัสกลับมาเป็นตัวแปรจริงของโครงสร้างเมื่อออกจากขบวนการ GA

ตัวแปรเหล่านี้สะท้อนปัญหาจริงที่ผู้ออกแบบต้องตัดสินใจเลือกเพื่อให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสมที่สุด แต่ปัญหาคือตัวแปรเหล่านี้มีความแตกต่างกันมากและส่งผลต่อคำตอบในน้ำหนักที่ไม่เท่ากันดังนั้นความไม่เป็นเชิงเส้นของปัญหาจึงมีสูงมาก ยากต่อการหาคำตอบที่เหมาะสม

4.2 การคัดเลือก (Selection)

การคัดเลือกสายพันธุ์ในการศึกษานี้ประยุกต์ใช้ทฤษฎีวงล้อรูเลทท์ (Roulette 13

$$pF_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^{m} F_i} \qquad (2)$$

โดยที่

pFi คือ ความน่าจะเป็นของการถูกเลือกของสายพันธุ์

Fi คือ ค่าความแข็งแกร่งของสายพันธุ์

$\sum$F คือ ผลรวมของความแข็งแกร่งของสายพันธุ์ทั้งหมด

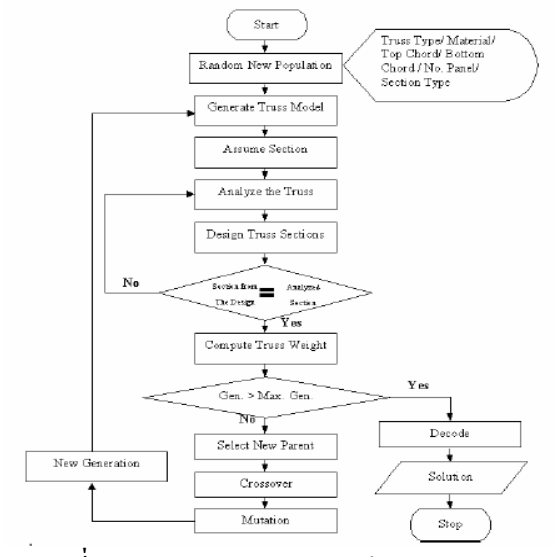
สายพันธุ์ในรุ่นถัดไปจะถูกเลือกโดยวิธีการสุ่มจากกลุ่มของสายพันธุ์พ่อแม่เหล่านี้ ในการวิจัยนี้ยังพิจารณาถึงความสำคัญของอิลิทิสซึม (Elitism) ซึ่งเก็บสายพันธุ์ที่ดีที่สุดของรุ่นปัจจุบันไว้ใช้ในรุ่นต่อไป

4.3 การคัดเลือก (Selection)

เนื่องจากตัวแปรแต่ละตัวอาจมีขนาดไม่เท่ากันและอาจเป็นตัวแปรต่างประเภทกันการไขว้สายพันธุ์ในรายงานนี้เสนอการไขว้สายพันธุ์ในตัวแปรประเภทเดียวกันโดยขั้นแรกเลือกตัวแปรที่จะต้องมีการไขว้สายพันธุ์โดยวิธีสุ่ม จากนั้นจึงไขว้สายพันธุ์ภายในตัวแปรที่ถูกเลือก โดยใช้การไขว้แบบหนึ่งจุด (One Point Crossover)

4.4 การผ่าเหล่า (Mutation)

การผ่าเหล่าใช้วิธีที่นิยมใช้ทั่วไปคือการเปลี่ยนค่า 0-1 ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งในสายพันธุกรรม โดยอาศัยการสุ่มและความน่าจะเป็นในการผ่าเหล่า ในการศึกษานี้สนใจในการปรับค่าความน่าจะเป็นในการผ่าเหล่า ให้ไม่คงที่ในแต่ละช่วงของขบวนการ ภาพที่ 2 แสดงผังงานการออกแบบโครงหลังคาเหล็กด้วย GA



ภาพที่ 2 แสดงผังงานการออกแบบโครงหลังคาเหล็กด้วย GA

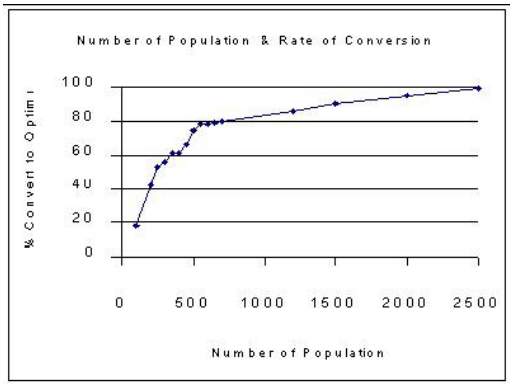
5. ผลการศึกษา

ปัจจัยของประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่เหมาะสมของ GA มีหลายประการ เช่น จำนวนประชากร (Population) จำนวนรุ่น (Generation) การคัดเลือก การไขว้สายพันธุ์ และการผ่าเหล่า เป็นต้น

รายงานนี้แสดงถึงประสิทธิภาพของปัจจัยจำนวนประชากรในแต่ละรุ่น ความน่าจะเป็นในการไขว้สายพันธุ์ ความน่าจะเป็นในการผ่าเหล่า และจำนวนรุ่นในขบวนการ การทดสอบโปรแกรมกับตัวอย่างทำโดยให้มีการทำซ้ำกับปัญหาเดิมหนึ่งร้อยครั้งเพื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมหรือใกล้เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

5.1 จำนวนประชากร

จำนวนประชากรในแต่ละรุ่นมีผลสำคัญต่อการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเป็นอย่างยิ่งและในแต่ละปัญหาก็มีความต้องการของจำนวนประชากรที่ต่างกัน ซึ่งปกติยิ่งจำนวนประชากรมากโอกาสที่จะได้คำตอบที่เหมาะสมก็จะมีมากตามไปด้วยแต่จำนวนประชากรที่มากจะทำให้เกิดปัญหาของเวลาในการหาคำตอบเพิ่มมากขึ้น จำนวนประชากรจึงควรเหมาะสมกับปัญหา ภาพที่ 3 แสดงตัวอย่างของจำนวนประชากรที่มีผลต่อการได้คำตอบที่เหมาะสมสำหรับโครงหลังคาช่วงยาว 10 เมตร จำนวนรุ่น 1000 รุ่น ความน่าจะเป็นในการไขว้สายพันธุ์ เท่ากับ 0.99 ใช้เทคนิคการเก็บรักษาสายพันธุ์ที่ดีที่สุดไว้ (Elitism) และใช้ความน่าจะเป็นในการผ่าเหล่าไม่คงที่

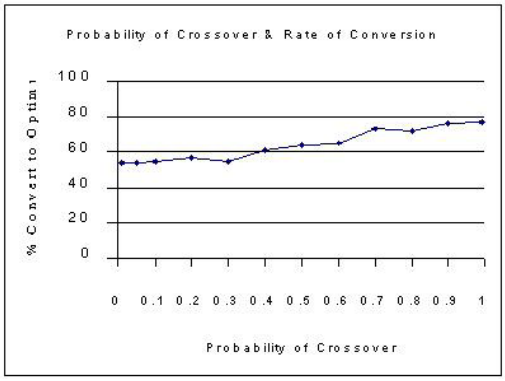


ภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนประชากรกับการได้คำตอบที่เหมาะสม

จากกราฟจะพบว่าในปัญหานี้ต้องการจำนวนประชากรประมาณ 2000 ถึง 2500 เพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสม

5.2 ความน่าจะเป็นในการไขว้สายพันธุ์

ความน่าจะเป็นในการไขว้สายพันธุ์ที่ให้คำตอบที่เหมาะสม ถูกทำการทดสอบประสิทธิภาพโดยใช้โครงหลังคาช่วงยาว 10 เมตร จำนวนรุ่น 500 รุ่น ความน่าจะเป็นในการไขว้สายพันธุ์ แปรผันจาก 0.01 ถึง 0.99 ใช้เทคนิคการเก็บรักษาสายพันธุ์ที่ดีที่สุดไว้ (Elitism)และใช้ความน่าจะเป็นในการผ่าเหล่าแบบไม่คงที่ดังผลแสดงในภาพที่ 4

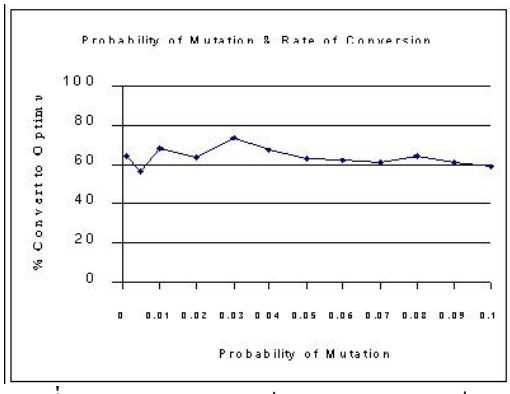


ภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการไขว้สายพันธุ์กับการได้คำตอบที่เหมาะสม

จากกราฟจะสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพของการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมแปรผันกับความน่าจะเป็นในการไขว้สายพันธุ์แต่มีความชันไม่มากนัก

5.3 ความน่าจะเป็นในการผ่าเหล่า (Probability of Mutation)

ความน่าจะเป็นในการผ่าเหล่าที่ให้คำตอบที่เหมาะสม ถูกทำการทดสอบประสิทธิภาพโดยใช้โครงหลังคาช่วงยาว 10 เมตร จำนวนรุ่น 500 รุ่น ความน่าจะเป็นในการไขว้สายพันธุ์ เท่ากับ 0.99 ใช้เทคนิคการเก็บรักษาสายพันธุ์ที่ดีที่สุดไว้ (Elitism) และใช้ความน่าจะเป็นในการผ่าเหล่าแปรผันตั้งแต่ 0.001 ถึง 0.1 ดังผลแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่ากับการได้คำตอบที่เหมาะสม

ผลการทดสอบพบว่าการเปลี่ยนแปลงความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่าในช่วงดังกล่าวไม่ส่งผลกระทบที่ชัดเจนต่อประสิทธิภาพของการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม

6. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาพบว่าการออกแบบโครงหลังคาเหล็กโดยใช้ระเบียบวิธีเลียนแบบพันธุศาสตร์โดยใช้ตัวแปรจริงนี้สามารถให้คำตอบที่เหมาะสมหรือใกล้เหมาะสมได้และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบจริงได้ เนื่องจากคำตอบทุกคำตอบอยู่ในข้อจำกัดของการออกแบบที่ถูกต้อง โดยที่ประสิทธิภาพของการค้นหาคำตอบจะขึ้นอยู่กับจำนวนประชากร และจำนวนรุ่นที่เหมาะสมกับปัญหา ความน่าจะเป็นของการไขว้สายพันธุ์ควรเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับ 1.0 เทคนิคการเก็บรักษาสายพันธุ์ที่ดีที่สุดของรุ่นก่อนหน้าไว้เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อขบวนการหาคำตอบ หากไม่ใช้เทคนิคนี้การค้นหาคำตอบอาจไม่ลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสม ส่วนความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่ายังไม่มีผลที่แตกต่างอย่างเด่นชัด อย่างไรก็ดีควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงปัจจัยอื่นๆอีกที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการหาคำตอบที่เหมาะสมเช่นประเภทของการไขว้สายพันธุ์และวิธีการคัดเลือกสายพันธุ์เป็นต้น เพื่อให้การค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศรีปทุมในการให้ความสนับสนุนงานวิจัยนี้

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Adeli, H., and Kamal, O., 1986, Efficient optimization of space trusses, Computer and Structures, Vol. 24, No.3, 501-511.

[2] Chen, C.C. and Kanok-Nukulchai, W. , 1995, Efficient Genetic Algorithms for Space Truss Optimization, Procedings of the Fifth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-5), Gold Coast, Australia, 1115-1120.

[3] Goldberg, D.E., 1989, Genetic Algorithms in search, optimization, and machine learning, Addison-Wesley, Reading, Mass.

[4] Holland, J.H., 1975, Adaption in natural and artificial systems, University of Michigan Press, Ann Arbor, Mich.

[5] Ribelito F. Torregosa and Kanok-Nukulchai, W., 2002, Weight Optimization of Steel Frames Using Genetic Algorithm, Advances in Structural Engineering, Vol.5, No.2, 99-111