

## การประยุกต์ใช้กระบวนการหาค่าเหมาะสมสุดแบบวิวิธนาการในการวิเคราะห์ ความเสียหายของโครงขัอมุมแบบ 2 มิติ

### Damage analysis of 2D truss structure using evolutionary optimization

รัตนกุล รัตนพล<sup>1</sup>, ณัญฉวีวัฒน์ พลดี<sup>1\*</sup> และ สุจินต์ บุรีรัตน์<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

\*ติดต่อ: nantiwat@kku.ac.th, 043-202-854, 043-202-849

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ความเสียหายในโครงขัอมุมแบบ 2 มิติด้วยกระบวนการหาค่าเหมาะสมสุดแบบวิวิธนาการ (Optimization) โดยอาศัยการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาความถี่ธรรมชาติและกระบวนการหาค่าเหมาะสมสุดจะดำเนินการค้นหาจุดที่เกิดการเสียหายจากฟังก์ชันเป้าหมายที่กำหนด (objective function) โดยฟังก์ชันเป้าหมายจะกำหนดให้หาค่าต่ำสุด (minimization) ของค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error) ของผลต่างระหว่างความถี่ธรรมชาติที่คำนวณได้ในแต่ละโหมดของโครงสร้างกับความถี่ธรรมชาติจริงของโครงสร้างเมื่อเกิดความเสียหาย โดยในงานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการหาค่าตอบของกระบวนการหาค่าเหมาะสมสุดแบบวิวิธนาการทั้งหมด 5 วิธี เพื่อหาวิธีที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์หาความเสียหายในโครงขัอมุมแบบ 2 มิติ

**คำหลัก:** โครงขัอมุมแบบ 2 มิติ, ความถี่ธรรมชาติ, การวิเคราะห์ความเสียหาย, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

#### Abstract

This paper presents damage analysis of a 2D truss structure based on changing of natural frequencies by using evolutionary optimization. Finite elements method was used to analyze the natural frequencies while the evolutionary algorithms (EAs) were used to determine damage location of structure by solving an objective function defined. The objective function was post to minimise root-mean-square error of calculated natural frequency and measured natural frequency of the damage structure for six mode shape. Several well establish EAs were used to tackle the problem and their search performance were investigated. Based on this study, evolutionary algorithms were effective and efficient for the 2D truss damage analysis based on natural frequency. The Evolution Strategy (ES) was found to be the best performer in term of both search convergence and search consistency.

## AMM-147

### 1. บทนำ

งานทางด้านวิศวกรรมโครงสร้างในปัจจุบัน นอกเหนือจากการออกแบบให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ประหยัดและใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าแล้ว การบำรุงรักษาเพื่อให้โครงสร้างสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเกิดความปลอดภัยตลอดอายุการใช้งานนั้นเป็นสิ่งที่จำเป็นและมีความสำคัญอย่างยิ่ง อย่างไรก็ตามการบำรุงรักษาโครงสร้างให้มีประสิทธิภาพนั้นต้องอาศัยการวิเคราะห์และตรวจสอบความเสียหายที่มีประสิทธิภาพ แม่นยำและไม่ทำลายโครงสร้าง ซึ่งเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก แม้ว่าความเสียหายภายนอกโครงสร้างนั้นสามารถทำได้โดยการตรวจสอบตาหรือกล้องขยาย อย่างไรก็ตามความเสียหายภายในโครงสร้างเป็นเรื่องยากที่จะตรวจสอบ แม้ในปัจจุบันมีวิธีการตรวจสอบความเสียหายภายในโครงสร้างหลายวิธี โดยไม่ทำลายโครงสร้าง เช่นการวิเคราะห์ความเสียหายด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic analysis) หรือ การวิเคราะห์ความเสียหายด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (computer Computed tomography or CT scan) เป็นต้น อย่างไรก็ตามวิธีเหล่านี้สามารถใช้ได้กับการตรวจสอบแบบเฉพาะจุด (Local-damage detection) ซึ่งสำหรับโครงสร้างขนาดใหญ่ การตรวจสอบให้ทั่วถึงนั้นทำได้ยาก ในปัจจุบันนักวิจัยจึงหันมาสนใจเทคนิคการวิเคราะห์ความเสียหายโดยอาศัยการตอบสนองการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง [1-2]

การวิเคราะห์ความเสียหายโดยอาศัยการตอบสนองการสั่นสะเทือนของโครงสร้างนั้นสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของธรรมชาติของโครงสร้าง โดยเมื่อโครงสร้างมีความเสียหายเกิดขึ้นความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ที่ทำให้เกิดความเสียหายของโครงสร้างในแต่ละโหมด (mode shapes) จะเปลี่ยนไป รวมถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละจุดที่แตกต่างกันของโครงสร้างก็ให้ค่าความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดความเสียหายของโครงสร้างในแต่ละโหมดแตกต่างกันออกไปเช่นกัน

ภายใต้เงื่อนไขนี้จึงมีการพัฒนาการวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้างด้วยความถี่ธรรมชาติร่วมกับกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด (optimisation) เพื่อนำมาวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้าง ซึ่งงานวิจัยหลายชิ้นได้แสดงให้เห็นถึงความสำเร็จในการวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้างด้วยวิธีนี้ [3-5] และมีงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้เทคนิคนี้สำหรับวิเคราะห์ความเสียหายของโครงหมุนได้สำเร็จ [6] อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ความเสียหายด้วยความถี่ธรรมชาติร่วมกับกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดนั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการหาค่าตอบของกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด ดังนั้นการศึกษาประสิทธิภาพในการหาค่าตอบของกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบวิวัฒนาการ (Evolutionary algorithm) ที่มีจุดด้อยในเรื่องของความเสถียรและการลู่เข้าหาค่าตอบได้ช้า [7] จึงเป็นสิ่งจำเป็น

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการหาค่าตอบของกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบวิวัฒนาการ 5 วิธี ได้แก่ Ant colony optimization (ACO) [8] Genetic Algorithms (GA) [9] Evolution Strategy (ES) [10] Harmony Search (HS) [11] Simulated Annealing (SA) [12] เพื่อหาวิธีที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์หาความเสียหายด้วยความถี่ธรรมชาติในโครงหมุนแบบ 2 มิติ โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาความถี่ธรรมชาติและกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดจะดำเนินการค้นหาจุดที่เกิดการเสียหายจากฟังก์ชันเป้าหมายที่กำหนด (objective function) โดยฟังก์ชันเป้าหมายจะกำหนดให้หาค่าต่ำสุด (minimization) ของค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error) ของผลต่างระหว่างความถี่ธรรมชาติที่คำนวณได้ของโครงสร้างกับความถี่ธรรมชาติจริงของโครงสร้างเมื่อเกิดความเสียหาย โดยตัวแปรออกแบบจะถูกกำหนดให้เป็นค่าเปอร์เซ็นต์

## AMM-147

ความเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นส่วนของโครงข้อหมุน

### 2. การวิเคราะห์ความเสียหายจากความถี่ธรรมชาติด้วยกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด

การวิเคราะห์ความเสียหายจากความถี่ธรรมชาติสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงของความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดของการสั่นสะเทือนโดยค่าความถี่ธรรมชาติในโหมดต่างๆ สำหรับโครงสร้างปกติจะสามารถคำนวณได้จากสมการ eigenvalue problem [8] ดังนี้

$$[\mathbf{K}]\{\phi_i\} - \lambda_i[\mathbf{M}]\{\phi_i\} = 0 \quad (1)$$

เมื่อ  $[\mathbf{K}]$  และ  $[\mathbf{M}]$  คือ stiffness matrix และ mass matrix รวมของโครงสร้าง ตามลำดับ  $\{\phi_i\}$  และ  $\lambda_i$  คือ corresponding normalized eigen vector และ eigen value ตามลำดับ

จากสมการที่ 1 ค่าความถี่ธรรมชาติในโหมดต่างๆ  $\omega_j$  จะสามารถหาได้จาก

$$\omega_j = \sqrt{\lambda_j} \quad (2)$$

ในกรณีที่โครงสร้างเกิดความเสียหายขึ้น ณ เอลิเมนต์ใดๆ ค่า stiffness matrix รวมของโครงสร้างจะมีค่าลดลงกำหนดให้โครงสร้างประกอบด้วยเอลิเมนต์ย่อยหลายเอลิเมนต์ (element) เมื่อโครงสร้างมีความเสียหายเกิดขึ้น ณ เอลิเมนต์ใดๆ ค่า stiffness ของโครงสร้าง  $[\mathbf{K}_e]$  ณ เอลิเมนต์นั้นๆ นั้นจะมีค่าลดลงทำให้ค่า stiffness ของโครงสร้างโดยรวมลดลงตามไปด้วย ดังนั้นค่า stiffness รวมของโครงสร้างที่เกิดการเสียหาย  $[\mathbf{K}_d]$  สามารถคำนวณได้จากค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละเอลิเมนต์โดยคิดจากเป็นเปอร์เซ็นต์ความเสียหายดังนี้

$$[\mathbf{K}_d] = \sum_{i=1}^{ne} \frac{100 - p_i}{100} [\mathbf{K}_e]_i \quad (3)$$

เมื่อ  $ne$  คือจำนวนเอลิเมนต์ของโครงสร้างและ  $p_i$  คือเปอร์เซ็นต์ความเสียหายของโครงสร้าง ดังนั้นค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างที่มีความเสียหายเกิดขึ้นสามารถคำนวณได้ดังนี้

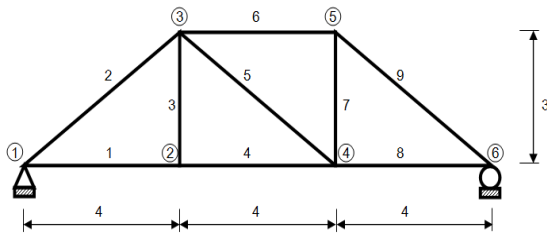
$$[\mathbf{K}_d]\{\phi_d\} - \lambda_d[\mathbf{M}]\{\phi_d\} = 0 \quad (4)$$

การวิเคราะห์ความเสียหายโดยอาศัยการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของความถี่ธรรมชาติร่วมกับกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดสามารถทำได้โดยเริ่มจากการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดของโครงสร้าง จากนั้นกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดจะถูกนำมาใช้ในการค้นหาเอลิเมนต์ที่เกิดความเสียหาย โดยการปรับเปลี่ยนค่าเปอร์เซ็นต์ความเสียหายในแต่ละเอลิเมนต์ที่ทำให้ได้ค่าความถี่ธรรมชาติที่คำนวณได้ตรงกับค่าความถี่ธรรมชาติจริงในแต่ละโหมด โดยกำหนดฟังก์ชันเป้าหมาย (objective function) เพื่อหาค่าต่ำสุด (minimisation) ของค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error) ของผลต่างระหว่างความถี่ธรรมชาติที่คำนวณได้ในแต่ละโหมดของโครงสร้างกับความถี่ธรรมชาติจริงของโครงสร้างเมื่อเกิดความเสียหาย ซึ่งในการศึกษารั้งนี้ใช้ความถี่ธรรมชาติจาก 6 mode shape ดังนั้นสมการของฟังก์ชันเป้าหมายสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$\text{Min} : f(\mathbf{x}) = 2 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{nmode} (\omega_{jdactual} - \omega_{jdcomput})^2}{nmode}} \quad (5)$$

เมื่อ  $\mathbf{x}$  คือ เวกเตอร์ของตัวแปรออกแบบในการหาค่าเหมาะสมที่สุด ในที่นี้คือ เปอร์เซ็นต์ความถี่ในแต่ละเอลิเมนต์ของโครงสร้าง  $\omega_{jdactual}$  และ  $\omega_{jdcomput}$  คือ ความถี่

# AMM-147



รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างของโครงข้อหมุน 2 มิติ

ธรรมชาติจริงของโครงสร้างเมื่อเกิดการเสียหายและความถี่ธรรมชาติที่คำนวณได้จากกระบวนการหาค่าเหมาะสมสุด *nmode* คือจำนวนโหมดของการสั่นสะเทือนที่นำมาใช้พิจารณา

### 3. การวิเคราะห์ความเสียหายของโครงข้อหมุน 2 มิติ จากความถี่ธรรมชาติด้วย optimisation

งานวิจัยนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์ความเสียหายจากความถี่ธรรมชาติด้วยกระบวนการหาค่าเหมาะสมสุดแบบวิธีวิวัฒนาการสำหรับโครงข้อหมุนใน 2 มิติ [8] ดังแสดงในรูปที่ 1 โครงสร้างประกอบด้วย 9 เอลิเมนต์ 6 จุดต่อ โดยค่าคุณสมบัติของวัสดุได้แก่ ค่า young modulus (*E*) ค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) จะถูกกำหนดให้เป็น 200 GPa และ 7850 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับ พื้นที่หน้าตัดสำหรับทุกเอลิเมนต์จะถูกกำหนดให้เป็น 0.0025 m<sup>2</sup>

ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของกระบวนการหาค่าเหมาะสมสุดแบบวิธีวิวัฒนาการสำหรับปัญหาออกแบบในการวิเคราะห์ความเสียหายของโครงข้อหมุนใน 2 มิติตั้งสมการ 5 นั้น ค่าความเสียหายจะถูกกำหนดเพื่อให้กระบวนการหาค่าเหมาะสมสุดแบบวิธีวิวัฒนาการหาคำตอบ ในที่นี้จะกำหนดปัญหาความเสียหายในโครงสร้างของโครงถักดังรูปที่ 1 ใน 2 กรณีคือ กรณีที่ 1. ความเสียหายเกิดขึ้นที่เอลิเมนต์ที่ 2 50% และ กรณีที่ 2. ความเสียหายเกิดขึ้นที่ เอลิเมนต์ที่ 2 และ เอลิเมนต์ที่ 9 50% และ 25% พร้อมกันตามลำดับ ระเบียบวิธีฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกใช้ในการคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติใน 6 โหมดแรกสำหรับใช้เป็นผลเฉลยแม่นยำ

ตารางที่ 1 ความถี่ธรรมชาติ (red/s) ใน 6 โหมดแรก ของโครงข้อหมุน 2 มิติ ในโครงสร้างปกติและโครงสร้างที่เกิดความเสียหายในกรณีที่ 1 และ 2

Mode	โครงสร้างปกติ	โครงสร้างที่เกิดความเสียหาย	
		กรณีที่ 1 50% ที่เอลิเมนต์ที่ 2	กรณีที่ 2 50% ที่เอลิเมนต์ที่ 2 และ 25% ที่เอลิเมนต์ที่ 9
1	241.03	226.26	220.07
2	468.24	417.14	416.44
3	740.32	658.83	638.57
4	1244.15	1220.27	1182.57
5	1634.49	1611.24	1608.32
6	2103.50	2103.47	2103.35

ตรงสำหรับค่าความถี่ธรรมชาติจริง ดังแสดงในตารางที่ 1 จากนั้นกระบวนการหาค่าเหมาะสมสุดแบบวิธีวิวัฒนาการทั้งหมด 5 วิธีได้แก่

Ant colony optimization (ACO) [8] ค่าตัวแปร  $q$  และ  $\zeta$  จะถูกกำหนดเป็น 0.2 และ 1.0 ตามลำดับ

Genetic Algorithms (GA) [9] ค่า Crossover และ mutation rates จะถูกกำหนดเป็น 1.0 และ 0.1 ตามลำดับ.

Evolution Strategy (ES) [10] ใช้ binary tournament selection operator และการ mutation อย่างง่ายโดยไม่สนใจผลกระทบของ rotation angles.

Harmony Search (HS) [11] กำหนดค่าตัวแปรต่างๆดังนี้ harmony memory size = 5 เท่าของจำนวนตัวแปรออกแบบ, harmony memory considering rate (HMCR) = 0.8, pitch adjusting rate (PAR)  $\in$  [0.4, 0.9], และ bandwidth (BW)  $\in$  [0.0001, 0.9].

Simulated Annealing (SA) [12] กำหนดค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและสุดท้ายเป็น 10 และ 0.001 ตามลำดับ

กระบวนการหาค่าเหมาะสมแบบวิธีวิวัฒนาการทั้ง 5 วิธีจะถูกนำมาใช้ในการค้นหาจุดเสียหายของ

## AMM-147

โครงสร้างโครงข้อหมุนจากการหาคำตอบของสมการที่ 5 วิธีละ 10 ครั้ง โดยกำหนดจำนวนรอบการวนลูป (nloop) ในแต่ละครั้งเท่ากับ 100 รอบ และจำนวนผลเฉลยในแต่ละรอบ (nsolution) เท่ากับ 50

### 4. ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

หลังจากดำเนินการหาคำตอบสำหรับปัญหาการวิเคราะห์ความเสียหายในสมการที่ 5 ทั้ง 2 กรณี ค่าฟังก์ชันเป้าหมายแสดงในตารางที่ 2 และ ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ย (Mean) และ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (STD) ของค่าฟังก์ชันเป้าหมายจากการหาคำตอบ 10 ครั้งจะถูกใช้เป็นตัวชี้วัดความเร็วในการหาคำตอบและค่าความเสถียรของ algorithm โดย algorithm ที่มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าแสดงว่าสามารถหาคำตอบได้ ตารางที่ 2. ค่าฟังก์ชันเป้าหมายที่ได้จากกระบวนการหาค่าเหมาะสมสุดแบบวิธีวิวัฒนาการทั้ง 5 วิธีในกรณีที่ 1

EAs	กรณีที่ 1 50% ที่เอลิเมนต์ที่ 2			
	Mean	STD	Max.	Min.
ES	$6.64 \times 10^{-8}$	$1.04 \times 10^{-7}$	$6.01 \times 10^{-9}$	$3.23 \times 10^{-7}$
ACOR	$4.05 \times 10^{-6}$	$2.44 \times 10^{-6}$	$1.37 \times 10^{-6}$	$9.52 \times 10^{-6}$
SA	0.0785	$8.94 \times 10^{-2}$	0.0034	0.264
HS	0.145	$7.77 \times 10^{-2}$	0.0093	0.249
GA	1.52	1.14	0.647	2.85

ตารางที่ 3. ค่าฟังก์ชันเป้าหมายที่ได้จากกระบวนการหาค่าเหมาะสมสุดแบบวิธีวิวัฒนาการทั้ง 5 วิธีในกรณีที่ 2

EAs	กรณีที่ 2 50% ที่เอลิเมนต์ที่ 2 และ 25% ที่เอลิเมนต์ที่ 9			
	Mean	STD	Max.	Min.
ES	$4.82 \times 10^{-6}$	$6.66 \times 10^{-6}$	$3.55 \times 10^{-7}$	$2.25 \times 10^{-5}$
ACOR	$1.70 \times 10^{-4}$	$6.63 \times 10^{-5}$	$1.18 \times 10^{-4}$	$8.23 \times 10^{-5}$
SA	0.983	$5.94 \times 10^{-1}$	0.33	1.47
HS	2.96	1.72	0.17	5.55
GA	4.80	2.84	2.77	10.8

เร็วกว่าและ algorithm ที่มี STD ต่ำกว่าจะมีความเสถียรมากกว่า จากตารางที่ 2 และ 3 พบว่า ES ตารางที่ 4. ค่าเปอร์เซ็นต์ความเสียหายที่ได้จากกระบวนการหาค่าเหมาะสมสุดแบบวิธีวิวัฒนาการทั้ง 5 วิธีในกรณีที่ 1

Element	ค่าที่กำหนด	เปอร์เซ็นต์ความเสียหาย				
		ค่าที่ได้จากกระบวนการหาค่าเหมาะสมสุด				
		ES	ACOR	SA	HS	GA
1	0	0	0	0	0	0
2	50	50	50	50.002	50.005	50.324
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 5. ค่าเปอร์เซ็นต์ความเสียหายที่ได้จากกระบวนการหาค่าเหมาะสมสุดแบบวิธีวิวัฒนาการทั้ง 5 วิธีในกรณีที่ 2

Element	ค่าที่กำหนด	เปอร์เซ็นต์ความเสียหาย				
		ค่าที่ได้จากกระบวนการหาค่าเหมาะสมสุด				
		ES	ACOR	SA	HS	GA
1	0	0	0	0	0.002	0
2	50	50	50	50.038	50.011	48.387
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0.008	0
5	0	0	0	0	0.008	0
6	0	0	0	0	0.004	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	25	25	25	25.024	25.083	25.807

สามารถหาคำตอบได้เร็วที่สุดรวมถึงมีความเสถียรในการหาคำตอบมากที่สุด รองลงมาคือ ACOR และ SA ตามลำดับ ในขณะที่ GA หาคำตอบได้ช้าที่สุดและมีความเสถียรน้อยที่สุด

ตารางที่ 4 และ 5 แสดงเปอร์เซ็นต์ความเสียหายในแต่ละเอลิเมนต์ของโครงสร้างที่ได้จากรอบการรันที่

## AMM-147

ดีที่สุดของแต่ละ algorithm เทียบกับค่าคำตอบที่กำหนดไว้ในกรณีที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จากตารางที่ 4 และ 5 พบว่า ES และ ACOR สามารถค้นหาจุดที่เกิดความเสียหายในโครงสร้างของโครงข้อหมุน 2 มิติได้อย่างแม่นยำตรงกับค่ากำหนดหนดไว้ในขณะที่ algorithm ที่เหลือมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยโดยรวม การวิเคราะห์ความเสียหายในโครงข้อหมุน 2 มิติจากความถี่ธรรมชาติโดยใช้กระบวนการหาค่าเหมาะสมสุดแบบวิธีวิวัฒนาการสามารถทำได้สำเร็จโดยกระบวนการหาค่าเหมาะสมสุดแบบวิธีวิวัฒนาการที่มีประสิทธิภาพในการหาค่าคำตอบมากที่สุดคือ ES

### 5. สรุป

การวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้างโครงข้อหมุน 2 มิติจากความถี่ธรรมชาติด้วยกระบวนการหาค่าเหมาะสมสุดแบบวิธีวิวัฒนาการได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้ โดยกระบวนการหาค่าเหมาะสมสุดแบบวิธีวิวัฒนาการทั้งหมด 5 วิธีได้ถูกนำมาใช้ในการหาค่าตอบของฟังก์ชันเป้าหมายสำหรับในการวิเคราะห์ความเสียหาย จากการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์ความเสียหายจากความถี่ธรรมชาติด้วยกระบวนการหาค่าเหมาะสมสุดแบบวิธีวิวัฒนาการมีประสิทธิภาพในการหาเปอร์เซ็นต์ความเสียหายในแต่ละเอลเมนต์ของโครงสร้าง โดยวิธีวิวัฒนาการ ES มีประสิทธิภาพสูงสุดในการหาค่าตอบทั้งในด้านของการลู่เข้าหาค่าตอบและความเสถียรในการหาค่าตอบ

### 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

### 7. เอกสารอ้างอิง

[1] Alvandi, A. and Cremona, C. (2006). Assessment of vibration-based damage

identification techniques, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 292(1-2), pp. 179-202,

[2] Yan, Y.J., Cheng, L., Wu, Z.Y. and Yam, L.H. (2007). Development in vibration-based structural damage detection technique, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21(5), pp. 2198-2211.

[3] Yu, L. and Xu, P. (2011). Structural health monitoring based on continuous ACO method, *Microelectronics Reliability*, Vol. 51, pp. 270-278.

[4] Vakil-Baghmisheh, M.-T., Peimani, M., Sadeghi, M.H. and Etefagh, M.M. (2008). Crack detection in beam-like structures using genetic algorithms, *Applied Soft Computing*, Vol. 8, pp. 1150-1160.

[5] Yan, Y., Cheng, L., Wu, Z. and Yam, L. (2007). Development in vibration-based structural damage detection technique, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, pp. 2198-211.

[6] Majumdar, A., Maiti, D.K. and Maity, D. (2012). Damage assessment of truss structures from changes in natural frequencies using ant colony optimization, *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 218, pp. 9759-9772.

[7] Pholdee, N., and Bureerat, S. (2014). Comparative performance of meta-heuristic algorithms for mass minimisation of trusses with dynamic constraints, *Advances in Engineering Software*, Vol. 75(0), pp. 1-13.

[8] Socha, K., and Dorigo, M. (2008). Ant colony optimisation for continuous domains, *European Journal of Operational Research*, Vol. 185, pp. 1155-1173.

[9] Lindfield, G., and Penny, J. (1995) *Numerical Methods Using MATLAB*, Ellis Horwood,

## AMM-147

[10]Bäck, T. (1996). *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice*, Oxford University Press, Oxford.

[11]Geem, Z.W., and Kim, J.H. (2001). A new heuristic optimisation algorithm: harmony search, *Simulation*, Vol. 76, pp. 60-68.

[12]Bureerat, S. and Limtragool, J. (2008). Structural topology optimisation using simulated annealing with multiresolution design variables. *Finite Element in Analysis and Design*, vol. 44, pp. 738-747.