

# การออกแบบขนาดและรูปร่างของระบบแขวนยึดจับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทร์ฟ ด้วยวิธีเรียนรู้แบบเพิ่มพูนโดยอาศัยกลุ่มประชากรแบบหลายเป้าหมาย

## Shape and Sizing Design of a Hard Disk Drive Suspension Using

## Multi-objective Population Based Incremental Learning

ธวัฒน์ชัย คุณะโคตร\*<sup>1</sup> สุจินต์ บุรีรัตน์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

<sup>2</sup>ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

Tawatchai Kunakote\*<sup>1</sup> Sujin Bureerat<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University,  
Kantarawichai, Mahasarakham 44150

<sup>2</sup>Sustainable and infrastructure research and development centre, Department of Mechanical  
Engineering, Faculty of Engineering, KhonKaen University,

AmphurMuang, KhonKaen 40002

Tel: 0-4375-4321 E-mail: kunakote@yahoo.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอกระบวนการหาขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดเพื่อเพิ่มสมรรถนะระบบแขวนยึดจับหัวอ่าน / เขียนฮาร์ดดิสก์ไทร์ฟที่ได้จากกระบวนการหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด ร่วมกับการกำหนดปัญหาออกแบบที่มีฟังก์ชันหลายเป้าหมาย สำหรับ เพิ่มความถี่ธรรมชาติให้มากที่สุดใหม่ทดแรกของการส่ายด้านข้าง ขณะเดียวกันค่าความแข็งตึงของการดัดต้องต่ำสุดแต่ก็ต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขในการออกแบบ ซึ่ง ประกอบด้วย ความถี่ธรรมชาติใหม่ทดแรกของการดัดและการบิดตัว ส่วนการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้คือ วิธีเรียนรู้แบบเพิ่มพูนโดยอาศัยกลุ่มประชากรแบบหลายเป้าหมาย (MOPBIL) ถูกใช้เป็นเครื่องมือสำหรับค้นหาขอบหน้าพารेटโตของปัญหาออกแบบพร้อมด้วยขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของระบบแขวนยึดจับหัวอ่าน/เขียนที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับเพื่อประเมินสมรรถนะ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการออกแบบจริงของวิธีเรียนรู้แบบเพิ่มพูนโดยอาศัยกลุ่มประชากรสำหรับออกแบบหาขนาด

และรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของระบบแขวนยึดจับหัวอ่าน /เขียนฮาร์ดดิสก์ไทร์ฟ

**คำหลัก** วิธีเรียนรู้แบบเพิ่มพูนโดยอาศัยกลุ่มประชากรขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุด ทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด ขอบหน้าพารेटโต ความแข็งตึงของการดัด แขวนยึดจับหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไทร์ฟ

### Abstract

This paper presents a shape and sizing optimisation process to enhance the performance of a hard disk drive (HDD) suspension obtained from topology optimisation. A multiobjective design problem is set to explore Pareto optimum solutions that maximise the first sway mode natural frequency and simultaneously minimise bending stiffness of the suspension. Design constraints include the first bending and torsion modes natural frequencies. Structural analysis is carried out by using a finite element procedure. Multi-Objective Population based incremental learning (MOPBIL) is used to explore a

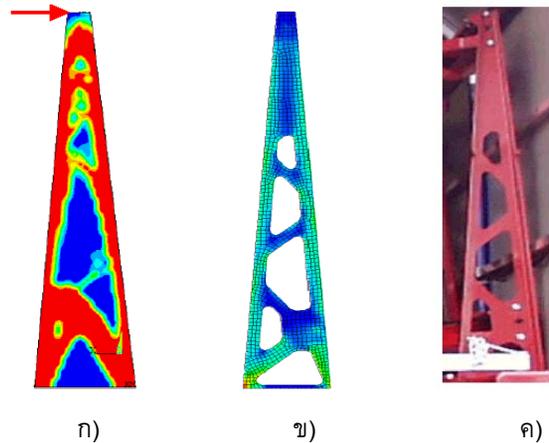
Pareto optimal front of the design problem. Structural shape and sizing results obtained from using MOPBIL are illustrated and compared. It is illustrated that the use of MOPBIL to find optimal shape and sizing of a hard disk drive (HDD) suspension is effective and practical.

**Keywords:** Population based incremental learning (PBIL), shape and sizing optimisation, topology optimisation, pareto optimal front, bending stiffness, hard disk drive suspension

## 1. บทนำ

เพื่อการออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดหรือให้สมรรถนะสูงสุดภายใต้เงื่อนไขหรือสภาวะการนำไปใช้งาน (constraints) จำเป็นต้องอาศัยขั้นตอนในการออกแบบสำหรับวิธีการค้นหาโครงสร้างใหม่ที่เหมาะสมที่สุดนั้น ปัจจุบันได้มีการออกแบบโดยประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการ (evolutionary algorithms) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimisation method) ร่วมกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะทางกายภาพของโครงสร้าง ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการนี้สามารถลดเวลาในการออกแบบลงได้มาก เมื่อเปรียบเทียบกับ การออกแบบดั้งเดิมที่ใช้วิธีการลองผิดลอง ถูก (trial and error) เพื่อให้ได้โครงสร้างหรือชิ้นส่วนทางกลที่ให้สมรรถนะบรรลุตามเป้าหมายที่ได้ตั้งไว้ซึ่งต้องใช้เวลาในการออกแบบ แรกเริ่มนั้นขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการใช้กับปัญหาที่มีเป้าหมายเดียว แต่ปัญหาทางด้านวิศวกรรมนั้นโดยส่วนใหญ่มีมากกว่าหนึ่งเป้าหมาย (multiobjective) ในการออกแบบเพื่อให้ครอบคลุมกับปัญหาและข้อกำหนดต่างๆ ในการใช้งานจริง ดังนั้นขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการแบบหลายเป้าหมาย (multiobjective evolutionary algorithms, MOEAs) [1-5] จึงเป็นเครื่องมือที่มีบทบาทสำคัญกับการแก้ปัญหา และผลเฉลยจากขั้นตอนวิธีนี้ อยู่ในรูปเซตของผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบง่า (non-dominated solutions) หรือ ผลเฉลย 'พาเรโต' (Pareto solutions) หรือ ขอบหน้าพาเรโต (Pareto front) ด้วยการรันเพียงครั้งเดียวเท่านั้น เมื่อเทียบกับวิธีที่ใช้อนุพันธ์ซึ่งต้องการจำนวนครั้งในการหาค่าที่เหมาะสมเท่ากับจำนวนผลเฉลยในขอบหน้าพาเรโตที่ผู้ออกแบบต้องการ ด้วยสมรรถนะในการค้นหาคำตอบ

ดังที่กล่าวมา จึงได้มีการประยุกต์ใช้ MOEAs กับการออกแบบทางด้านวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง และจากผลการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการต่างๆ [6-7] กับการออกแบบหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด [8-9] ของโครงสร้างคานยื่นแบบแผ่นโดยมีหลายเป้าหมายภายใต้เงื่อนไขบังคับต่างๆ ในการออกแบบ ได้แสดงให้เห็นว่า วิธี MOPBIL มีสมรรถนะในการค้นหาผลเฉลยของปัญหาการออกแบบหลากหลายรูปแบบ ดังนั้นในงานวิจัยของ ธวัชชัย คุณะโคตร และ สุจินต์ บุรีรัตน์ [10] จึงได้นำวิธี MOPBIL มาเป็นเครื่องมือสำหรับออกแบบหาขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุด (shape and sizing optimisation) [11-14] ของโครงสร้างแบบแผ่น (cantilever plate) ซึ่งเป็นขั้นตอนการออกแบบขั้นต้น (preliminary design) เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพของโครงสร้าง จากกรอบแนวคิดในการออกแบบ (conceptual design) ที่ได้จากขั้นตอนการหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด (topology optimisation) และสุดท้ายเป็นขั้นตอนของการออกแบบในรายละเอียด (detail design) และทดสอบเพื่อให้โครงสร้างเหมาะสมกับลักษณะการใช้งานมากที่สุด ดังแสดงขั้นตอนการออกแบบในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุด [6]

- ก) ทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด (กรอบแนวคิดในการออกแบบ)
- ข) รูปร่างและขนาดที่เหมาะสมที่สุด
- ค) การออกแบบในรายละเอียด

เป้าหมายของงานวิจัยนี้คือการออกแบบโครงสร้างระบบแขนยึดจับหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นซึ่งจากสมรรถนะในการออกแบบของวิธี MOPBIL

กับขั้นตอนการหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด และขั้นตอนการหาขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างแบบแผ่นในงานวิจัย [7, 10] ดังนั้นจึงได้นำวิธี MOPBIL มาประยุกต์ใช้กับการออกแบบหาขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างแขนยึดจับหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ ซึ่งเป็นขั้นตอนการออกแบบขั้นต้น โดยนำกรอบแนวคิดในการออกแบบหรือโครงสร้างทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุดใน [15] มาเป็นต้นแบบ สำหรับการปรับปรุงขนาดและรูปร่างเพื่อให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

**2. การหาค่าที่เหมาะสมหลายเป้าหมายด้วยขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการ**

ปัญหาการออกแบบที่มีหลายเป้าหมาย สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบทั่วไปดังสมการที่ 1

Objective functions

$$\min: \mathbf{f} = \{f_1(\mathbf{x}), \dots, f_p(\mathbf{x})\} \tag{1}$$

Subject to

$$g_j(\mathbf{x}) \leq 0$$

$$h_i(\mathbf{x}) = 0$$

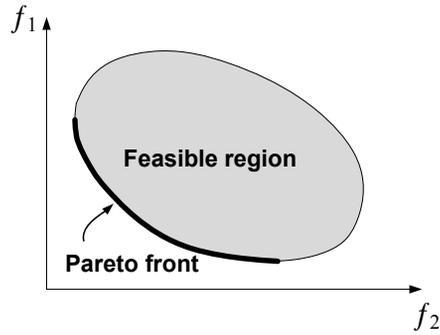
เมื่อ  $\mathbf{x}$  คือ เวกเตอร์ของตัวแปรออกแบบ

$f_i$  คือ ฟังก์ชันเป้าหมาย

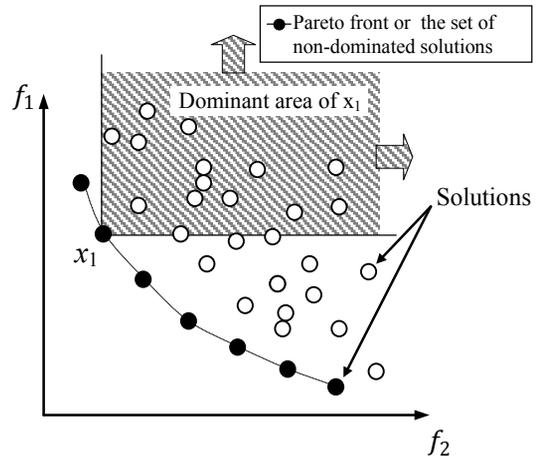
$g_j$  คือ เงื่อนไขบังคับแบบอสมการ

$h_i$  คือ เงื่อนไขบังคับแบบสมการ

ผลลัพธ์ที่ได้จากสมการที่ 1 ถ้าพิจารณาในโดเมนของฟังก์ชันเป้าหมาย เรียกว่าขอบหน้าพารेटโต หรือเซตของผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ แสดงดังรูปที่ 2 ผลเฉลยที่อยู่ในเซตผลเฉลยเหมาะสมที่สุดพารेटโตนี้ถือว่ามีคุณภาพไม่ด้อยกว่ากันหรือไม่มีการครอบงำ (dominate) ซึ่งกันและกัน ด้วยเหตุนี้การเลือกผลเฉลยในแต่ละจุดนั้นขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบว่าต้องการให้นำหนักไปที่เป้าหมายใด เช่น ถ้าต้องการโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาหรือต้นทุนในการผลิตต่ำ ก็ต้องแลกมาด้วยความแข็งแรงของโครงสร้างที่ลดลง ดังนั้นผู้ออกแบบต้องแลกเปลี่ยนหรือถ่วงดุล (trade - off) เป้าหมายการออกแบบให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ผู้ออกแบบต้องการมากที่สุด



ก) ตัวอย่างขอบหน้าพารेटโตหรือเซตของผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ



ข) รูปแบบการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ

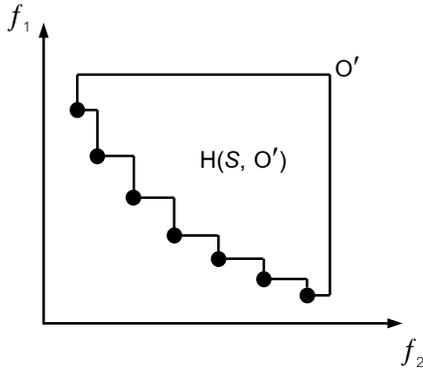
รูปที่ 2 ปัญหาที่มีการออกแบบสองเป้าหมาย [10]

ขั้นตอนวิธี MOPBIL ในบทความนี้ใช้หลักการวิวัฒนาการบนพื้นฐานของพารेटโต (Pareto-based method) กล่าวคือในแต่ละรอบการคำนวณ (generation) ขณะที่ชุดประชากรใหม่ถูกสร้างขึ้น เซตผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำจะถูกจัดกลุ่มระหว่างจำนวนสมาชิกของประชากรนั้นๆ (หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “ผลเฉลยพารेटโตเฉพาะที่” (local Pareto solutions)) หลังจากนั้นจะถูกนำไปดำเนินการในรอบการคำนวณครั้งต่อไปจนกระทั่งเข้าสู่หาคำตอบ ในการศึกษานี้จะใช้ค่าตัวบ่งชี้ปริมาตรหลายมิติ (hypervolume, HV) หรือค่าการครอบครองพื้นที่เป้าหมาย เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาการลู่เข้าสู่คำตอบ ดังรูปที่ 3 [10] ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2

$$HV = \bigcup_{i \in A} V_i \tag{2}$$

เมื่อ HV คือ ค่าตัวบ่งชี้ปริมาตรหลายมิติ

$V_i$  คือ ปริมาตรที่เกิดจากจุดผลเฉลย  $x_i$  หรือที่ถูกสร้างขึ้นด้วยผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำแต่ละตัวกับจุดอ้างอิง  $O'$  และเซต  $S$  ซึ่งเขียนแทนด้วย  $H(S, O')$



รูปที่ 3 รูปแบบของการพิจารณาหาค่า HV

### 3. การหาขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุด

การประยุกต์ใช้ วิธี MOPBIL กับขั้นตอน การออกแบบหาขนาดและ รูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของ โครงสร้าง แขนยึดจับหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เริ่มต้นด้วยการ กำหนดปัญหาสำหรับออกแบบ เงื่อนไขข้อจำกัดต่างๆ และตัวแปรที่ใช้

#### 3.1 ปัญหาการออกแบบ

ปัญหาการออกแบบที่ใช้ในขั้นตอนนี้ยังคงเป็น ปัญหาการออกแบบเช่นเดียวกับการหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุดดังสมการที่ 3

Objective functions

$$\min: K_{BS}(x) \ \& \ \max: \omega_{1sw}(x) \quad (3)$$

subject to

$$K_{BS} \leq 15 \text{ N/m}$$

$$\omega_{1B} \geq 3.5 \text{ kHz}$$

$$\omega_{1T} \geq 8.0 \text{ kHz}$$

เมื่อ  $K_{BS}$  คือ ค่าความแข็งตึง ของการดัด (bending stiffness) ของแขนยึดจับหัวอ่าน/เขียน

$\omega_{1sw}$  คือ ค่าความถี่ธรรมชาติค่าแรกในโหมดของการส่ายด้านข้าง (1<sup>st</sup> sway mode frequency)

$\omega_{1B}$  คือ ค่าความถี่ธรรมชาติค่าแรกในโหมดของการดัด (1<sup>st</sup> bending mode frequency)

$\omega_{1T}$  คือ ค่าความถี่ธรรมชาติค่าแรกในโหมดของการบิด (1<sup>st</sup> torsion mode frequency) และ

$x$  คือ เวกเตอร์ของตัวแปรออกแบบหรือพิกัด

ตำแหน่งที่ใช้สร้างเส้นโค้งกำลังสาม (cubic spline)

ฟังก์ชันเป้าหมายแรกตั้งขึ้นเพื่อให้หัวอ่านสามารถ

เคลื่อนที่ขึ้นลงในขณะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วน

ฟังก์ชันเป้าหมายที่สองใช้เพื่อลดความคลาดเคลื่อนใน

การอ่าน - เขียนข้อมูลของหัวอ่านอันเนื่องมาจากการ

สั่นสะเทือนด้านข้างของ แขนยึดจับหัวอ่าน /เขียน

เงื่อนไขบังคับแรก นำเสนอเพื่อไม่ให้ค่า  $K_{BS}$  สูงเกินค่า

มาตรฐาน เงื่อนไขบังคับที่สอง นำเสนอเพื่อไม่ให้ความ

แข็งตึงในโหมดของการดัดต่ำเกินไปในขณะที่เรา

พยายามลดค่า  $K_{BS}$  ส่วนเงื่อนไขบังคับที่สามตั้งขึ้นมาเพื่อ

ไม่ให้ลดค่า  $K_{BS}$  จนเกิดปัญหาการออกนอกกลุ่มของการ

อ่าน/เขียน เช่นเดียวกับการเพิ่มค่า  $\omega_{1sw}$

#### 3.2 ตัวแปรออกแบบ

การกำหนดตัวแปรออกแบบเพื่อใช้ปรับปรุงหา

ขนาดและรูปร่างของโครงสร้างที่ได้จากขั้นตอนการหาทอ

พอโลยีที่เหมาะสมที่สุดนั้น ตำแหน่งและพิกัดของตัวแปร

ออกแบบจะต้องอยู่ในกรอบโครงสร้างทอพอโลยีที่ได้ และ

เนื่องจากช่วงตำแหน่งในการออกแบบเป็นเลขจำนวนจริง

แต่ตัวดำเนินการสำหรับขั้นตอนวิวัฒนาการของวิธี

MOPBIL ใช้เลขฐานสอง (เลข '0' และ '1') ดังนั้นจึงต้อง

แปลงเลขฐานสองเป็นเลขจำนวนจริงในขอบเขตของตัว

แปรออกแบบที่กำหนดก่อน ซึ่งสามารถแปลงได้ตาม

$$x_i = x_{l,i} + (x_{u,i} - x_{l,i}) \frac{bt}{2^{N_b} - 1} \quad (4)$$

เมื่อ  $b$  คือ เมตริกซ์ขนาด  $1 \times N_b$  ซึ่งประกอบด้วย '0'

หรือ '1'  $t$  คือ เมตริกซ์สำหรับแปลงค่า ขนาด  $N_b \times 1$

โดยที่  $t_i = 2^{(N_b - i)}$ ,  $x_{l,i}$  คือ ขีดจำกัดล่าง และ  $x_{u,i}$

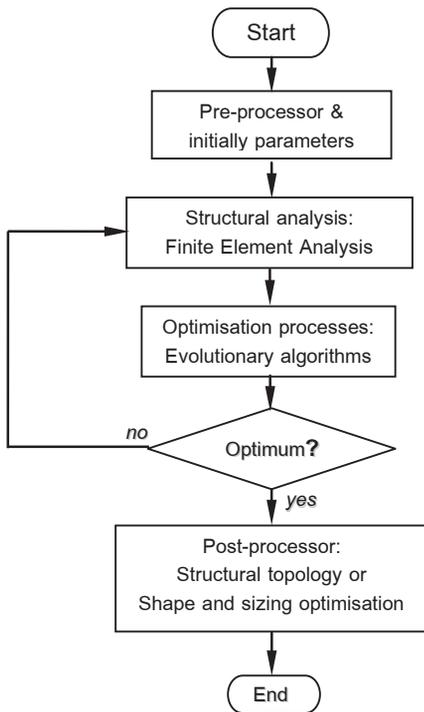
คือ ขีดจำกัดบนของ  $x_i$

ส่วนค่าคุณลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างที่ใช้

เป็นเป้าหมายและเงื่อนไขในการออกแบบได้จาก

โปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีลำดับขั้นการ

วิเคราะห์ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนผังขั้นตอนการหาทอพอโลยีหรือการหาขนาดและรูปร่างของโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการ

จากรูปที่ 4 แสดงแผนผังขั้นตอนการหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างคานยื่นแบบแผ่นโดยใช้ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการ และมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1) Pre-processor & initial parameters: กำหนดรูปร่าง ตัวแปรออกแบบ ฟังก์ชันเป้าหมาย เงื่อนไขบังคับและพารามิเตอร์อื่นๆ

2) Structural analysis: คำนวณหาคุณสมบัติทางกายภาพของโครงสร้างที่ผู้ออกแบบสนใจ เช่น ค่าความถี่ธรรมชาติ, แฟกเตอร์การโก่งตัว, ค่าความเค้นสูงสุด (maximum stress) หรือระยะการโก่งตัว (deflection) เป็นต้น

3) Optimization processes: เป็นขั้นตอนการค้นหาค่าตัวแปรออกแบบหรือ ค่าความหนาของแต่ละเอลิเมนต์พร้อมกับลักษณะการกระจายตัวของเอลิเมนต์ในโดเมนออกแบบที่เหมาะสมที่สุด ตามเป้าหมายที่กำหนดและข้อจำกัดของเงื่อนไขต่างๆ โดยใช้ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการ

4) กำหนดให้ กระบวนการดำเนินการวิเคราะห์ โดยอัตโนมัติ จนกระทั่งได้ค่าฟังก์ชันที่เหมาะสมที่สุด ตามเกณฑ์ที่ผู้ออกแบบต้องการ

5) เมื่อได้ค่าฟังก์ชันเป้าหมายเหมาะสมที่สุดแล้ว นำค่าตัวแปรที่ได้มาพล็อตโครงสร้างเบื้องต้น (ทอพอโลยีของโครงสร้าง) หรือ ขนาดและรูปร่างของโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดในขั้นตอนการหาขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุด

#### 4. วิธีเรียนรู้แบบเพิ่มพูนโดยอาศัยกลุ่มประชากรแบบหลายเป้าหมาย (MOPBIL) [1, 6]

วิธี MOPBIL เป็นวิธีที่ใช้ประชากรเลขไบนารี หรือ เลขฐานสอง ในการหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด และใช้เวกเตอร์ของความน่าจะเป็นมากกว่าหนึ่งเวกเตอร์ซึ่งเรียกว่า เมตริกซ์ของความน่าจะเป็น (probability matrix) เขียนแทนด้วย  $P$  ในขั้นตอนเริ่มต้น เอลิเมนต์ทุกเอลิเมนต์ของเมตริกซ์ของความน่าจะเป็น ในการมีเลข "1" จะถูกตั้งค่าเป็น 0.5 ซึ่งหมายความว่ามีการกระจายตัวเลข "0" และ "1" ในแนวคอลัมน์ของประชากร (ที่มีผลเฉลยอยู่ในแนวแถว) ให้มีจำนวนเท่ากัน โดยกำหนดให้  $N$  คือ ขนาดของประชากรหรือ จำนวนผลเฉลย  $I$  คือ จำนวนเวกเตอร์ของความน่าจะเป็นที่ต้องการใช้ และ  $n_b$  คือ ความยาวของตัวเลขฐานสองสำหรับผลเฉลยใดๆ ดังนั้นเมตริกซ์ของความน่าจะเป็นจะมีขนาดเป็น  $I \times n_b$  โดยที่แต่ละแถวของเมตริกซ์คือเวกเตอร์ของความน่าจะเป็นย่อยที่ใช้ในการผลิตประชากรย่อยเป็นจำนวน  $\frac{N}{I}$  ผลเฉลยตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างรูปแบบการสร้างประชากรเลขฐานสองจากเวกเตอร์ของความน่าจะเป็น

ตารางที่ 1 เวกเตอร์ของความน่าจะเป็นและประชากรเลขฐานสอง

ประชากร 1	ประชากร 2	ประชากร 3
0 0 1 1	0 1 0 0	0 1 0 1
1 1 0 0	1 1 1 1	1 0 0 1
0 0 1 1	1 0 0 0	0 1 0 1
1 1 0 0	0 1 0 0	0 1 0 0
0 1 0 0	0 0 1 1	0 1 0 0
เวกเตอร์ของความน่าจะเป็น		
2/5, 3/5, 2/5, 2/5	2/5, 3/5, 2/5, 2/5	1/5, 4/5, 0/5, 3/5

การผลิตประชากรในแต่ละรอบของการคำนวณ (iteration) จะได้จากการรวมกลุ่มประชากรย่อย  $I$  กลุ่มเข้าด้วยกัน จากนั้นทำการหาค่าของฟังก์ชันเป้าหมายของผลเฉลยในกลุ่มประชากรที่สร้างขึ้นมา ขั้นตอนต่อมาคือ การคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ (non-dominated)

sorting) จากการรวมกลุ่มของประชากรชุดใหม่ที่ได้ กับ ผลเฉลยที่ไม่ถูกรอรับในรอบการคำนวณที่ผ่านมา หลังจากนั้นทำการปรับปรุงเมตริกซ์ของความน่าจะเป็น โดยใช้ผลเฉลยที่ไม่ถูกรอรับในการแปลงค่าเอลิเมนต์ของเมตริกซ์ สำหรับแถวที่  $i^{\text{th}}$  ของเมตริกซ์ เราสามารถคำนวณค่าใหม่สำหรับเอลิเมนต์ของ  $P$  ได้ตามสมการที่ 5 [1, 6]

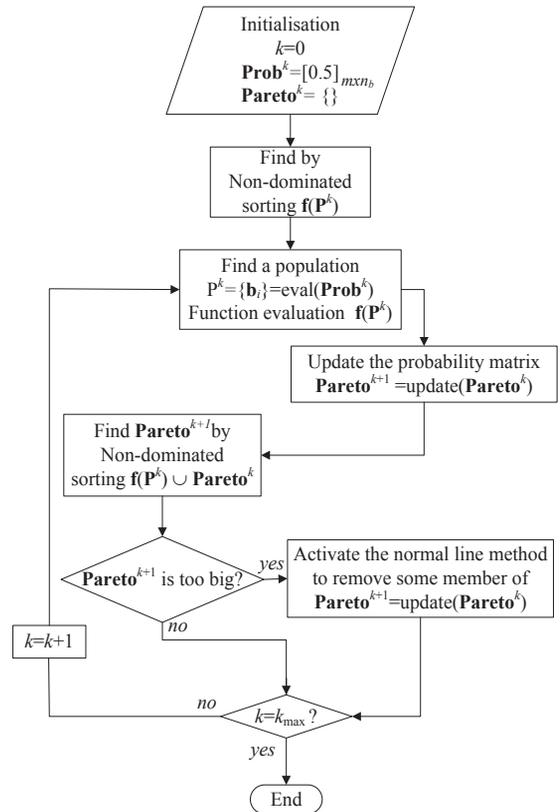
$$P_{ij}^{\text{new}} = P_{ij}^{\text{old}} (1 - L_R) + \bar{b}_j L_R \quad (5)$$

เมื่อ  $L_R \in [0, 1]$  เรียกว่าค่าอัตราการเรียนรู้ (learning rate)  $\bar{b}_j$  คือ เอลิเมนต์ที่  $j^{\text{th}}$  ของผลเฉลยที่เป็นเลขฐานสองและเราสามารถปรับปรุงค่าเมตริกซ์ของความน่าจะเป็นด้วยกระบวนการมิวเทชัน (mutation) ดังสมการที่ 6

$$P_{ij}^{\text{new}} = P_{ij}^{\text{old}} (1 - m_s) + \text{rand} \cdot (0 \text{ or } 1) \cdot m_s \quad (6)$$

เมื่อ  $m_s$  คือ ค่าการเลื่อนของการเปลี่ยนแปลง โอกาสในการประยุกต์ใช้สมการนี้ถูกกำหนดโดยความน่าจะเป็นของการเกิดการมิวเทชัน เช่นเดียวกับในกรณีของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithms) ขั้นตอนการดำเนินการของวิธี MOPBIL ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ใน [1, 6] บทความนี้จะใช้ค่า HV [3-4] ในการพิจารณาเกณฑ์การลู่เข้าของขอบหน้าพาเรโตหรือค่าการครอบครองพื้นที่ในการออกแบบ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในวิธี MOPBIL ที่ใช้ในการออกแบบนี้ ประกอบด้วย กำหนดให้เมตริกซ์ความเป็นไปได้ของการเกิดกลุ่มประชากร  $P$  ขนาด  $10 \times 120$  จำนวนประชากร = 50 ค่าอัตราการเรียนรู้  $L_R = 0.5$  อัตราการเกิดมิวเทชัน = 0.05 และ  $m_s = 0.2$  ในส่วนขั้นตอนการหาขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุด นั้น กลุ่มตัวแปรออกแบบ ที่ใช้เป็นเลขจำนวนจริง ซึ่งได้จากการแปลงเลข ฐานสอง ( ตัวแปรดำเนินการในขั้นตอนวิวัฒนาการ ) เป็นเลขจำนวนจริงที่ใช้ออกแบบก่อนและกำหนดให้ขนาดของเมตริกซ์เก็บผลเฉลยของพาเรโต (Pareto) คือ 150 ในขั้นตอนการหาขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุด นี้ จะดำเนินการหาผลเฉลยเพียงหนึ่ง ครั้งและมีจำนวนรอบในการคำนวณ 2 50 รอบ เหตุผลที่หาผลเฉลยเพียงหนึ่งครั้งเนื่องจากในงานวิจัยของ ธวัชณชัย คุณะโคตร และ สุจินต์ บุรีรัตน์ [10] ได้ทดสอบ และแสดงให้เห็นถึงความคงเส้นคงวา

(consistency) ของวิธี MOPBIL ที่มีเสถียรภาพสูงกับการออกแบบในขั้นตอนนี้ แผนผังการดำเนินการของขั้นตอนวิธี MOPBIL แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนผังขั้นตอนของวิธี MOPBIL [6]

## 5. ผลการทดสอบและการอภิปราย

5.1 โครงสร้างทอพอโลยีที่ใช้ในการทดสอบออกแบบ ผลการออกแบบจากงานวิจัยใน [15] โดยมีโดเมนการออกแบบดังรูปที่ 6 และมีเป้าหมายในการออกแบบ ดังสมการที่ 7 Objective functions

$$\min: K_{BS} \ \& \ \max: \omega_{1SW} \quad (7)$$

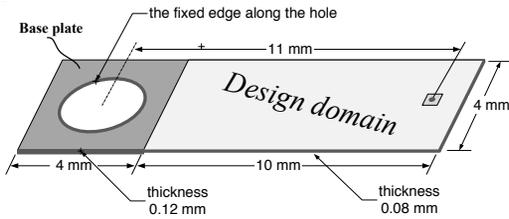
subject to

$$\omega_{1B} \geq 3.5 \text{ kHz}$$

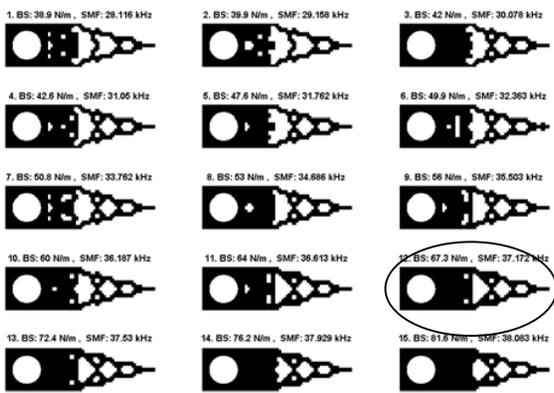
$$\omega_{1T} \geq 8.0 \text{ kHz}$$

ผลเฉลยที่ได้จากปัญหาการทดสอบออกแบบคือ โครงสร้างทอพอโลยีของระบบ แขนยึดจับหัวอ่าน /เขียน ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ดังรูปที่ 7 และเลือกผลเฉลยที่ 12 พร้อมทั้งทดสอบปรับ ความหนาจุดพับ (hinge thickness)

เท่ากับ 0.0282 mm (รูปที่ 8) เพื่อให้ได้ค่า  $K_{BS}$  น้อยที่สุด แต่ก็ต้องอยู่ในช่วง  $5 \text{ N/m} \leq K_{BS} \leq 15 \text{ N/m}$  ซึ่งเป็นเงื่อนไขการออกแบบชั้นเพนชันแบบเฟมโต (femto suspension) [6,15-16] มาเป็นกรอบแนวคิดในการออกแบบเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบ แขนยึดจับหัวอ่าน /เขียน ให้สูงขึ้นด้วยขั้นตอนการหาขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุด

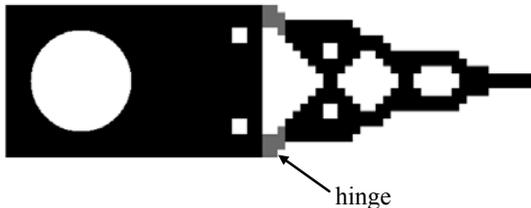


รูปที่ 6 โดเมนการออกแบบของระบบแขนยึดจับหัวอ่าน/เขียน [6, 15]



รูปที่ 7 ทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุดของระบบแขนยึดจับหัวอ่าน/เขียน อาร์ตดิสก์ไดรฟ์ จาก [6, 15]

SMF = 35.255 kHz, BMF = 4.476 kHz, TMF = 8.4378 kHz  
Bending stiffness = 14.9126 N/m, Hinge thickness = 0.0282 mm



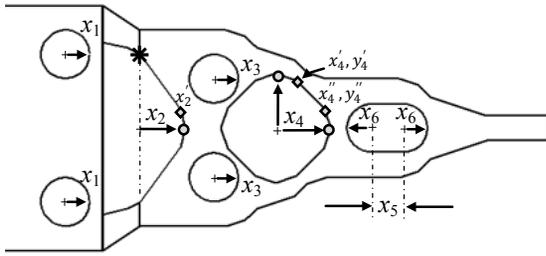
รูปที่ 8 สมรรถนะของระบบแขนยึดจับหัวอ่าน/เขียน จากการปรับ hinge thickness = 0.0282 mm [6, 15]

## 5.2 ขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของระบบแขนยึดจับหัวอ่าน/เขียน

เมื่อได้โครงร่างของโครงสร้างหรือกรอบแนวคิดในการออกแบบจากขั้นตอนที่หนึ่ง ดัง รูปที่ 7 บริเวณโครงสร้างที่เป็นช่องว่างหรือรูบนโครงสร้าง แขนยึดจับหัวอ่าน/เขียน จะใช้เป็นตัวแปรออกแบบในการกำหนดรูปร่างและขนาด ในส่วนตัวแปรออกแบบ  $x_2$  และ  $x_4$  เป็นตัวกำหนดเส้นรูปร่างออกแบบและพิกัดสัดส่วนตำแหน่งที่ใช้สร้างเส้นโค้งแสดงดังรูปที่ 9 สัญลักษณ์  $\diamond$  คือ พิกัดตำแหน่งของตัวแปรออกแบบ สัญลักษณ์  $\diamond$  คือ ตำแหน่งที่ต้องแปรผันตามสัดส่วนของตัวประกอบตำแหน่ง และ \* คือจุดยึดที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในการหาตัวประกอบกำหนดตำแหน่ง (factor) หาได้จากพิกัดโครงร่างของโครงสร้างทอพอโลยีที่นำมาออกแบบ (รูปที่ 8) และในกรณีทดสอบออกแบบนี้กำหนดค่าตัวประกอบตำแหน่ง ( $Fx'_2$ ) ตามแนวแกน  $x$  ของ  $x'_2$  คือ  $Fx'_2 = 0.9881$  ดังนั้นจะได้  $x'_2 = 0.9881x_2$  เช่นเดียวกันในกรณีตำแหน่ง  $x'_4$  และ  $x''_4$  ได้ค่าตัวประกอบตำแหน่งตามแนวแกน  $x$  คือ  $Fx'_4 = 0.375$  และ  $Fx''_4 = 0.875$  ดังนั้นจะได้  $x'_4 = 0.375x_4$  และ  $x''_4 = 0.875x_4$  เนื่องจากรูปร่างที่เจาะซึ่งเกิดจากตัวแปรออกแบบ  $x_4$  มีลักษณะสมมาตร ดังนั้นพิกัดที่ได้ตามแนวแกน  $y$  คือ  $y'_4 = 0.875x_4$  และ  $y''_4 = 0.375x_4$  ในกรณีตำแหน่ง 3 ส่วนที่เหลือของรูเจาะที่กำหนดโดยตัวแปรออกแบบ  $x_4$  พิจารณาเช่นเดียวกัน จากตำแหน่งของตัวแปรออกแบบที่ได้จะนำมาประมาณค่าในช่วง (interpolation) ด้วยเส้นโค้งกำลังสาม ซึ่งทำให้รูปร่างของชิ้นงานเรียบเนียนยิ่งขึ้น และตำแหน่งพิกัดของ ตัวแปรที่ใช้ออกแบบ แสดงดังรูปที่ 9 โดยมีช่วงการออกแบบสำหรับค้นหา ตัวแปรออกแบบ คือ  $a \leq x \leq b$  ดังแสดงใน ตารางที่ 2 ซึ่งใช้เป็นตัวจำกัดขอบเขตบริเวณ (bound constraints) สำหรับปรับขนาดช่องว่างบนโครงสร้างออกแบบและค่าขอบเขตนี้ต้องอยู่ภายใต้กรอบโครงร่างของโครงสร้างทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุดที่นำมาเป็นต้นแบบ ด้วยเหตุผลเดียวกันนี้เส้นขอบด้านนอกของโครงสร้างแขนยึดจับหัวอ่าน /เขียน จึงใช้การขึ้นรูปเส้นด้วยวิธีเดียวกัน

ในการกำหนดความหนาของจุดพับภายใต้ความ ต้องการให้ระบบแขนยึดจับหัวอ่าน /เขียนมีความแข็งแรงดึงเชิงพลวัตสูงสุด แต่ค่าความแข็งแรง ดึง ของการตัด ต้องมีค่าน้อยกว่า 15 N/m ดังนั้นในขั้นตอนนี้ ได้เพิ่มความหนา 0.0282 mm ไปเป็น 0.0285 mm สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เลือกใช้เอลิเมนต์ ชนิด 4

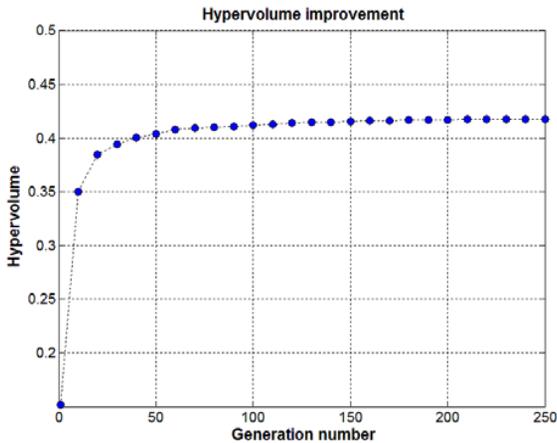
เหลี่ยม 4 โหนด ส่วนการแบ่งเอลิเมนต์ของโครงสร้างนั้น เพื่อความสะดวกจะใช้การแบ่งแบบอิสระ (free mesh) เนื่องจากรูปแบบโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงทุกรอบการคำนวณ ตามค่าของตัวแปรออกแบบหรือพิกัดที่ใช้สร้างรูปร่างของโครงสร้าง จากการทดสอบการเพิ่มความหนาที่ค่าในระบบโครงสร้างยังคงอยู่ภายใต้ เงื่อนไข  $K_{BS} \leq 15$  N/m แต่ให้โหมดแรกของการส่ายด้านข้างสูงขึ้น



รูปที่ 9 ตำแหน่งพิกัดของตัวแปรที่ใช้ออกแบบ

ตารางที่ 2 ขอบเขตของตัวแปรออกแบบ:  $x$  (มิลลิเมตร)

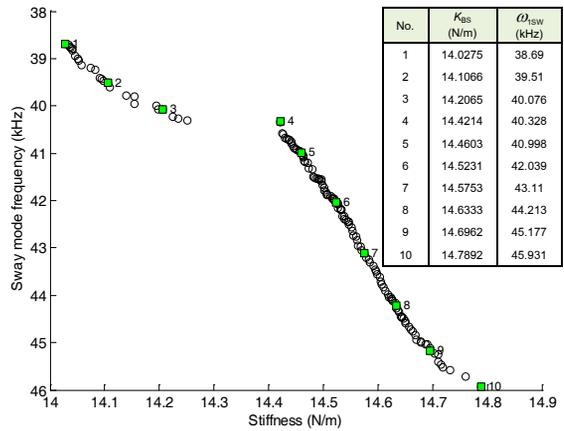
$b$	0.4	1.0	0.4	0.9	0.4	0.3
$x$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$
$a$	0.1	0	0.1	0.1	0.1	0.1



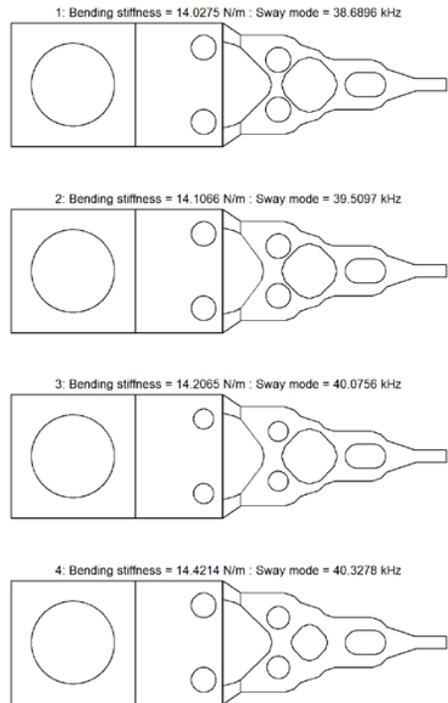
รูปที่ 10 hypervolume improvement

ผลลัพธ์ที่ได้จากการหาค่าต่ำสุดของ ค่าความแข็งตึงของการดัดและค่าสูงสุดโหมดแรกของการส่ายด้านข้างของโครงสร้าง จากการรันหาคำตอบ 1 ครั้ง (ปัญหาการออกแบบสมการที่ 3) ส่วนค่า HV หรือ ค่าการครอบครองเป้าหมายในการออกแบบ จะพิจารณาจากการลู่เข้าสู่คำตอบของปัญหา เมื่อค่า HV มีค่าเกือบจะคงที่

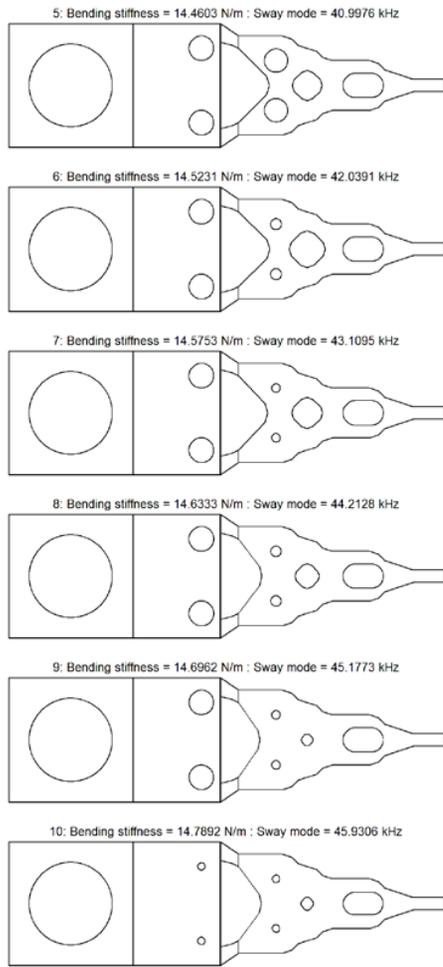
ดังรูปที่ 10 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่า HV เริ่มคงที่ ที่รอบการคำนวณที่ 200 ดังนั้นการกำหนดรอบในการคำนวณที่ 250 รอบ มีค่ามากเพียงพอสำหรับการหาผลเฉลยของขอบหน้าพาราโบลในรูปที่ 11 พร้อมทั้งจุดผลเฉลยที่เลือกนำมาแสดง ของโครงสร้าง ขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุด ดังรูปที่ 12



รูปที่ 11 ขอบหน้าพาราโบลของขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างระบบแขนยึดจับหัวอ่าน / เขียน และ จุดผลเฉลยที่เลือกนำมาแสดง



รูปที่ 12 ขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดที่เลือกมาแสดงจากขอบหน้าพาราโบล ในรูปที่ 11



รูปที่ 12 ขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดที่เลือกมาแสดงจาก ขอบหน้าต่างอาร์ตไดคัท (ต่อ)

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบสมรรถนะระบบแขนยึดจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ขั้นตอนการวิเคราะห์	ตัวแปรทางกล (Mechanical Parameter)			
	$K_{BS}$ (N/m)	$\omega_{1SW}$ (kHz)	$\omega_{1B}$ (kHz)	$\omega_{1T}$ (kHz)
วิธีหาค่าเหมาะที่สุด [16]	14.5	29.5	5.5	16.7
วิธีทอพอโลยีเหมาะที่สุด [6,15]	14.9126	35.255	4.476	8.4378
กรณีทดสอบออกแบบ	14.4603	40.9976	5.3975	10.4194



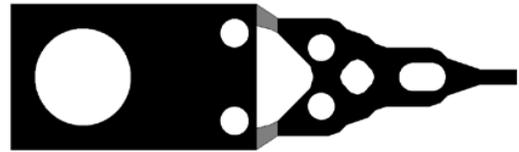
1. เข้าสู่กระบวนการ Topology optimisation

SMF = 35.255 kHz, BMF = 4.476 kHz, TMF = 8.4378 kHz  
Bending stiffness = 14.9126 N/m, Hinge thickness = 0.0282 mm



2. เข้าสู่กระบวนการ Shape and sizing optimisation

5: SMF = 40.9976 kHz, BMF = 5.3976 kHz, TMF = 10.4194 kHz  
Bending stiffness = 14.4603 N/m, Hinge thickness = 0.0285 mm



Structural shape and sizing optimisation

รูปที่ 13 ลำดับขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างชิ้นเพนชันที่เหมาะสมที่สุดทั้ง 2 ขั้นตอน

จากตารางที่ 3 เป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะของผลเฉลยที่ 5 ของขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุด (ในรูปที่ 11-12) ที่มีค่า  $K_{BS}$  ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ S. K. Yu และ B. Liu. [16] มาเปรียบเทียบพร้อมทั้งค่าที่ได้จากการหาทอพอโลยีเหมาะที่สุด [15] ที่นำมาปรับปรุงสามารถสรุปได้ว่า ระบบ แขนยึดจับหัวอ่าน /เขียน ในรูปที่ 12 มีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่าด้วยเงื่อนไขของการออกแบบ เพราะมีค่าความถี่ธรรมชาติ  $\omega_{1SW}$  สูงกว่า และ  $K_{BS}$  ต่ำกว่า (ซึ่งหมายถึงความคล่องตัวในการอ่าน /เขียนข้อมูลที่ดีกว่า) ระบบแขนยึดจับหัวอ่าน/เขียน ทั้งในงานวิจัยของชววัฒน์ชัย คุณะโคตร และ สุจินต์ บุรีรัตน์ [15] พร้อมทั้งในงานวิจัยของ S. K. Yu และ B. Liu. [16] ในส่วนของพารามิเตอร์ตัวอื่นคือ  $\omega_{1B}$  และ  $\omega_{1T}$  ผลการออกแบบจาก [16] อาจดีกว่า แต่ถ้าวัดตามเงื่อนไขบังคับในการออกแบบแล้ว ระบบแขนยึดจับหัวอ่าน/เขียนในรูปที่ 13 ก็ผ่านเงื่อนไขบังคับนี้ทุกประการเช่นกัน แต่มี

ความสามารถในการป้องกันปัญหาการอ่าน /เขียนที่ออกนอกกล่องข้อมูล (off-track problem) และความคล่องตัวในการอ่าน /เขียนข้อมูลได้ดีกว่า และเมื่อพิจารณาผลเฉลี่ยในขอบหน้าพาเรโตทั้งหมดแล้ว  $K_{BS}$  อยู่ในช่วง  $5 \text{ N/m} \leq K_{BS} \leq 15 \text{ N/m}$  ซึ่งก็เป็นไปตามข้อกำหนดในการออกแบบ แต่ค่า  $\omega_{1sw}$  ที่ได้ทุกจุดมีค่าสูงกว่าในงานวิจัย [16] จากผลลัพธ์ที่ได้นี้แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะที่สูงของวิธี MOPBIL กับการออกแบบในขั้นตอนนี้

## 6. สรุป

จากการประยุกต์ใช้วิธีเรียนรูแบบเพิ่มพูนโดยอาศัยกลุ่มประชากรแบบหลายเป้าหมาย หรือ วิธี MOPBIL กับการออกแบบหาขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างที่เป็นแนวคิดในการออกแบบซึ่งได้มาจากระดับของการหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุดเพื่อเพิ่มสมรรถนะระบบแขนยึดจับหัวอ่าน /เขียนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ และจากผลลัพธ์ที่ได้ทั้งขอบหน้าพาเรโตและขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุด แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธี MOPBIL กับการออกแบบในขั้นตอนนี้ โดยสามารถปรับปรุง ค้นหาโครงสร้างที่ให้สมรรถนะเพิ่มขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ วัฒนชัย คุณะโคตร และ สุจินต์ บุรีรัตน์ [15] อีกทั้งในงานวิจัยของ S. K. Yu และ B. Liu. [16] สำหรับนำไปใช้งานจริง และเพื่อให้โครงสร้างมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นสามารถทดสอบปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้กำเนิดหรือเกิดการวิวัฒนาการของกลุ่มประชากร พร้อมด้วยการเพิ่มตัวแปรออกแบบที่เป็นขอบโครงสร้างด้านนอกของระบบแขนยึดจับหัวอ่านเขียน

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

## เอกสารอ้างอิง

[1] สุจินต์ บุรีรัตน์. 2556. การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของระบบทางวิศวกรรมเครื่องกล, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

- [2] Zitzler E and Thiele L. 1999. Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength pareto approach, IEEE Tran. on Evolutionary Computation, 3(4): 257-271.
- [3] Sujin Bureerat and Sungkom Srisomporn. 2010. Optimum plate-fin heat sinks by using a multi-objective evolutionary algorithm. Engineering Optimization, 42: 305-343.
- [4] Sungkom Srisomporn and Sujin Bureerat. 2008. Geometrical design of plate-fin heat sinks using hybridization of MOEA and RSM. IEEE Transaction on Components and Packaging Technologies, 31(2): 351-359.
- [5] Tawatchai Kunakote, Supachai Sombudha and Sujin Bureerat. 2009. Comparative performance of MOEAs on topological design of plate structures. 23<sup>th</sup> ME-NETT Conf., Chiang Mai, Thailand.
- [6] Tawatchai Kunakote. 2011. Multiobjective structural topology optimisation using evolutionary algorithms. The Degree of Doctor of Philosophy, Mechanical Engineering, Khon Kean University.
- [7] Tawatchai Kunakote and Sujin Bureerat. 2011. Multi-objective topology optimization using evolutionary algorithms. Engineering Optimization, 43(5): 541 – 557.
- [8] Grener, D. and Hajela. 2013. Truss topology optimization for mass and reliability considerations - co - evolutionary multiobjective formulations. Structural and multidisciplinary optimization, 45(1): 589-613.
- [9] Zou, Z.H., Xie, Y. M. and Huang, X. 2010. An improved bi-directional evolutionary topology optimization method for frequencies. International journal of structural stability topology optimization method for frequencies, 10(1): 55-75.
- [10] วัฒนชัย คุณะโคตร และ สุจินต์ บุรีรัตน์. 2557.

การหาค่าเหมาะที่สุดสองขั้นตอนแบบหลาย  
เป้าหมายของโครงสร้างแบบแผ่นโดยใช้วิธีเรียนรู้  
แบบเพิ่มพูนโดยอาศัยกลุ่มประชากร . วารสารวิจัย  
มช. 19(2): 233-244

- [11] Norapat Noilublao and Sujin Bureerat. 2011. Simultaneous topology, shape and sizing optimisation of a three-dimensional slender truss tower using multiobjective evolutionary algorithms. *Computers and Structures*, 89: 2531–2538.
- [12] Thein, C.K. and Liu, J.-S. 2012. Effective structural sizing/shape optimization through optimisation reliability-related multifactor approach. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 8(2): 159-177.
- [13] Leandro Fleck Fadel Miguel, Rafael Holdorf Lopez and Leticia Fleck Fadel Miguel. 2013. Multimodal size, shape, and topology optimisation of truss structures using the Firefly algorithm. *Advances in Engineering Software*, 56: 23–37
- [14] Noilublao, C. and Bureerat, S. 2011. Topology and sizing optimization of trusses with adaptive ground finite elements using multiobjective PBIL. *Advanced Materials Research*, 308-310: 1116-1121.
- [15] Tawatchai Kunakote and Sujin Bureerat. 2010. Topological design of a hard disk drive suspension using multi-objective population Based Incremental Learning, The First TSME International Conference on Mechanical Engineering, Ubon Ratchathani.
- [16] S. K. Yu and B. Liu. 2005. Topology optimization for femto suspension design. *Microsystem Technologies*, 11: 851-856.