

การออกแบบการทดลองด้วยหลักการค้นหาตัวแปรของไขนิน และวิธีการทากูชิ  
กรณีศึกษากระบวนการย้ำหมุดอลูมิเนียม

**Experimental Design with Shainin and Taguchi Methods:  
A Case Study of Aluminum Riveting Process**

ธนกรานต์ วิชิระประเสริฐ<sup>1\*</sup>, ทศพล เกียรติเจริญผล<sup>2</sup>

<sup>1\*,2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail: thanakarn.v@gmail.com

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาและกำหนดแนวทางการประยุกต์ใช้วิธีการของทากูชิและหลักการค้นหาตัวแปรของไขนิน โดยอาศัยกรณีศึกษากระบวนการย้ำหมุดอลูมิเนียม และทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบวิธีการออกแบบการทดลองของทากูชิ หลักการค้นหาตัวแปรของไขนิน กับวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ซึ่งวิธีการออกแบบการทดลองของทากูชิ จะดำเนินการทดลองแบบตารางแนวฉาก (Orthogonal Array) เป็น L16 และหลักการค้นหาตัวแปรของไขนินจะดำเนินการ 4 ขั้นตอน ส่วนวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล จะมีรูปแบบการทดลองเป็นแบบ  $2^5$  Factorial Design จากผลการทดลองพบว่าวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล คือ มีความเชื่อมั่นในทางสถิติสูง และยังใช้จำนวนการทดลองที่น้อยครั้งกว่า ส่วนวิธีการของไขนินใช้จำนวนครั้งของการทดลองที่น้อยกว่าวิธีการของทากูชิและการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ซึ่งจะช่วยทำให้เกิดประโยชน์ในเรื่องการประหยัดต้นทุนในการทดลอง การประยุกต์ใช้วิธีการของทากูชิ และไขนิน มีประโยชน์อย่างยิ่งในการศึกษาด้วยแปร ในการนิ่งที่การดำเนินการทดลองไม่สามารถทำการทดลองได้จำนวนมากและมีจำนวนตัวแปรที่ศึกษาเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทดลองแบบคัดกรอง (Screening) แต่อย่างไรก็ตามการวางแผนการทดลองของวิธีการของทากูชิและไขนิน ต้องอาศัยความรู้ในกระบวนการตัวอย่างนั้นเป็นแนวทางในการกำหนดตัวแปรและระดับของการทดลองมากกว่าแบบแฟคทอเรียล

**คำสำคัญ:** วิธีการของทากูชิ, หลักการค้นหาตัวแปรของไขนิน, ตารางแนวฉาก, แผนการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล, วิธีการทดลองแบบแฟคทอเรียล

**Abstract**

The aim of this research is to study and provide the implementation of Taguchi method and Shainin methods by using a case of Aluminum Riveting Process. Then, comparative analysis of Taguchi, Shainin and classical factorial experiment designs was carried out. Taguchi method uses the experiment of Orthogonal Array (L16) and Shainin method operates in four processes.  $2^5$  Factorial Design is used as a classical experimental designs. Taguchi method give the same result as the classical factorial experiment that provides high confidence with fewer number of trials. The number of trials of Shainin method is less than those of Taguchi method and classical factorial experiment. It is valuable to reduce cost and time of experiments. Therefore, applications of Taguchi and Shainin methods are useful for the study when a number of trials cannot be performed on many experiments, especially in case of the screening experiment. However, the approaches of Taguchi and Shainin methods require the understanding of process parameters more than that of classical factorial design in order to select factors and to set suitable levels of experimental conditions.

**Keyword:** Taguchi method, Shainin method, Orthogonal Array, Factorial Design, Classical factorial experiment designs

## 1. บทนำ

เนื่องจากเทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) คือ การทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะสามารถสังเกต และชี้ถึงสาเหตุต่างๆที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or Responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้น [1] ซึ่งเป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับมากขึ้นในแวดวง อุตสาหกรรม ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตร อุตสาหกรรมเคมี ตลอดจนอุตสาหกรรมการผลิต โดยการออกแบบการทดลองจะมี 4 ขั้นตอน คือ การวางแผน (Planning) การคัดกรอง (Screening หรือ Process characterization) การหาค่าที่ดีที่สุด(Optimization) และการทวนสอบ (Verification) ใช้ในงานด้านการพัฒนากระบวนการ การผลิต ซึ่งเป็นการลดจำนวนตัวแปรให้มีจำนวนน้อยลง โดยคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของ ผลิตภัณฑ์ การลดจำนวนตัวแปรทำให้เราสามารถที่จะพิจารณา เนพาะตัวแปรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเหล่านั้น โดยทั่วไปจะใช้แบบแพคทอเรียล (ปัจจัยมีค่าระดับมากกว่า 2 ค่าขึ้นไป) อีกเทคนิคที่ถูกเรียกว่า หลักการค้นหาตัวแปร (Variable Search Method) ซึ่งเป็นเครื่องมือหนึ่งในการ ออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของไชนิน วิธีการนี้ได้รับการ พัฒนาขึ้นโดย โดเรียน ไชนิน (Dorian Shainin) ชาวอเมริกา ผู้ ซึ่งเป็นที่ปรึกษาของบริษัทชั้นนำต่างๆมากกว่า 800 แห่ง เทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการเก็บรวบรวมข้อมูลอย่างง่ายๆ แต่ให้ประสิทธิภาพสูง และทำให้ผู้แก้ปัญหาสามารถเข้าถึง ปัญหาได้ดี โดยเทคนิคของไชนินถือเป็นกลุ่มวิธีการที่ได้รับการ ยอมรับมากขึ้นในแวดวงอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ จำเป็นต้องพึงหลักการทางสถิติที่ซับซ้อนมากนัก และเป็น วิธีการที่มีกระบวนการวิเคราะห์อย่างเป็นระบบเป็นขั้นตอน รวมทั้งได้รับการพิสูจน์ว่าสามารถประยุกต์ใช้ได้ในอุตสาหกรรม ต่างๆได้เป็นอย่างดี [2]

นอกจากนี้วิธีการอีกอย่างหนึ่งที่ได้รับการยอมรับในเชิง ปฏิบัติ คือ การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ เป็น การลดความสูญเสีย ที่เกิดจากคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ไม่ตรง ตามเป้าหมาย โดยการตรวจสอบจากผลรวมของความสูญเสีย ทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ วันเกิดจากองค์ประกอบต่างๆผันแปรไป จากคุณภาพของเป้าหมาย และหาว่าเงื่อนไขของกระบวนการ ผลิตนั้นเป็นอย่างไร รวมไปถึงคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ซึ่งจะ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ทนต่อสภาพแวดล้อมและปัจจัยอื่น ๆ ที่ นอกเหนือการควบคุม [3] โดยสำหรับในงานวิจัยนี้พัฒนาจาก งานวิจัยของสมชาย [4] กรณีศึกษาระบวนการรับเข้าห้อง อุณหภูมิเนียม และทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของการ ออกแบบการทดลองแบบแพคทอเรียล หลักการค้นหาตัวแปร และวิธีการทากูชิ

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วิธีการของไชนิน (Shainin Method)

วิธีการของไชนิน ให้เทคนิคของหลักการค้นหาตัวแปร ซึ่งมี ประโยชน์เมื่อมีจำนวนตัวแปรที่ศึกษาเท่ากับหรือมากกว่า 4 ตัว แปรนี้ไปในระบบ ซึ่งวิธีการของไชนินได้ให้คำนิยามของตัว แปรที่มีความสำคัญมากที่สุดว่า Red X และตัวแปรที่มี ความสำคัญอันดับที่ 2 ว่า PinkX และถัดมาเป็น PalePinkX และกำหนดให้ค่าตัวแปรตอบสนองเรียกว่า GreenY [5] หลักการค้นหาตัวแปรสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน

#### 2.1.1 กำหนดตัวแปร

มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดตัวแปรและค่าที่ถูกต้องในแต่ละ การทดลองโดยเริ่มจากการกำหนดเลือก Green Y ที่ใช้ในการ วัดคุณภาพและทำการวิเคราะห์และกำหนดปัจจัยที่คาดว่าจะมี ผลต่อคุณภาพสินค้า หลังจากนั้นจึงกำหนดค่าตัวแปรหรือปัจจัย แต่ละปัจจัยเพื่อการทดลอง โดยแบ่งเป็นค่าที่ดีที่สุด (Best Level; B) และค่าที่แย่ที่สุด (Marginal Level; M) โดยกำหนด ขนาดตัวอย่าง ซึ่งโดยทั่วไปกำหนดเพียง 2 ชิ้น คือ BOB (Best Of Best) และ WOW (Worst Of Worst) อย่างละเอียดและทำการ ประเมินหาแนวโน้มอย่างคร่าวๆ โดยทำการทดลอง 2 ครั้ง ครั้งแรกที่ค่าที่ดีที่สุด ครั้งที่สองที่ค่าที่แย่ที่สุดของทุกปัจจัย โดย ถ้ามีความแตกต่างของค่า Green Y อย่างมากจะว่า้วงค่าที่ดี ที่สุด และค่าที่แย่ที่สุด แสดงว่าปัจจัยที่เลือกไว้มีแนวโน้มว่าจะ เป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพอย่างแท้จริง ซึ่งถ้าค่าที่ดีที่สุดทุกค่า ดีกว่าค่าที่แย่ที่สุด แต่แตกต่างกันไม่มากแสดงว่ามีปัจจัยที่ไม่ ถูกเลือกซึ่งมีผลต่อคุณภาพหรือค่า Green Y แต่ถ้าค่าที่ดีที่สุด ไม่ได้แสดงอย่างชัดเจนว่าดีกว่าค่าที่แย่ที่สุด แสดงว่าปัจจัยที่ เลือกไว้มีผลต่อคุณภาพและให้ทำซ้ำอีก 2 ครั้ง แล้วจึง ทดสอบนัยสำคัญเพื่อพิสูจน์ว่า Green Y ของค่าที่ดีที่สุดทั้ง 3 ตัวดีกว่า Green Y ของค่าที่แย่ที่สุดทั้ง 3 ตัว โดยการทดสอบ นัยสำคัญจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนด คือ Green Y ของค่าที่ดี ที่สุดทั้ง 3 ตัว ต้องดีกว่า Green Y ของค่าที่แย่ที่สุดทั้ง 3 ตัว และอัตราส่วน D : d ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 1.25 : 1 ซึ่งถ้า การทดสอบนัยสำคัญผ่าน จะถือว่าขั้นตอนที่ 1 เสร็จสิ้น แสดง ว่าปัจจัยที่เลือกไว้ถูกต้องแล้วถ้าการทดสอบนัยสำคัญไม่ผ่าน แสดงว่าปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพยังไม่ถูกเลือกให้กลับไปทำการ วิเคราะห์และกำหนดปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อคุณภาพสินค้า ใหม่อีกครั้ง

#### 2.1.2 จำแนกแยกแยะปัจจัย

มีวัตถุประสงค์เพื่อแยกตัวแปรที่สำคัญออกจากตัวแปรที่ไม่ สำคัญและจำจัดตัวแปรที่ไม่สำคัญออกไปรวมทั้งอันตรกิริยาที่ เกิดจากตัวแปรนั้นออกไปด้วย โดยเริ่มจากการทดลองโดย การสลับค่าตัวแปรที่ลักษณะเดียวกัน แล้วคำนวณค่าสูงสุดและต่ำสุดของ ขอบเขตการตัดสินใจ โดยใช้สูตร  $median \pm 2.776 d / 1.81$  ซึ่งผลลัพธ์ที่เป็นไปได้จะมี 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 ถ้า  $A_{MRB}$  อยู่ใน Decision limits-high และ  $A_{BRM}$  อยู่ใน decision limits-low แสดงว่า A ไม่มีนัยสำคัญ กรณีที่ 2 ถ้า  $A_{MRB}$  และ  $A_{BRM}$  ให้ผล

ตรงข้ามกัน คือ  $A_{MR_B}$  ให้ผลเหมือนกรณี All Best และ ให้ผลเหมือนกรณี All Marginal แสดงว่า A เท่านั้นที่เป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ปัจจัยอื่นๆ ตัดออกได้ทั้งหมด กรณีที่ 3 ถ้า  $A_{MR_B}$  และ  $A_{BR_M}$  ค่าใดค่าหนึ่งหรือทั้งสองค่า ตกออกนอก Decision limits คือ  $A_{MR_B}$  ตกออกนอก Decision limits-high และ  $A_{BR_M}$  ตกออกนอก Decision limits-low แต่ไม่ได้ให้ผลตรงข้ามกัน แสดงว่า A มีนัยสำคัญร่วมกับปัจจัยอื่นด้วย ซึ่งถ้าผลลัพธ์เป็นแบบกรณีที่ 1 หรือ 3 ให้ทดลองต่อ สำหรับปัจจัยที่เหลือคือ B,C,D,... และปัจจัยอื่นต่อไปแต่ถ้าผลลัพธ์เป็นแบบกรณีที่ 2 ให้หยุดการทดลองแสดงว่าได้ Red X เพียงตัวเดียว

#### 2.1.3 ยืนยันตัวแปร

มีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันตัวแปรที่สำคัญและยืนยันความสำคัญของตัวแปรนั้น โดยทดสอบยืนยันผลของตัวแปรและอันตรกิริยาโดยสลับค่าของปัจจัย เช่น  $A_B B_B R_M$  และ  $A_M B_M R_B$  ทดสอบยืนยันผลอันตรกิริยา 3 ตัว (ถ้ามีปัจจัยที่มีนัยสำคัญมากกว่าหรือเท่ากับ 3 ปัจจัย)

#### 2.1.4 การวิเคราะห์ตัวแปร

มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาค่าของปัจจัยสำคัญที่จะทำให้คุณภาพสินค้าดีที่สุด โดยการหาอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมซึ่งในกรณีที่ค่าอันตรกิริยาของปัจจัยหรือตัวแปรคูณได้มีนัยสำคัญให้เขียนกราฟอิทธิพลร่วม เพื่อหาว่าอันตรกิริยาของปัจจัยคุณนั้นมีมากหรือไม่ เพื่อนำไปสู่การกำหนดค่าของปัจจัยที่จะทำให้คุณภาพสินค้าดีที่สุดต่อไป [6]

### 2.2 วิธีการทากุชิ (Taguchi Method)

วิธีการทากุชิ เป็นวิธีการที่ใช้คัดกรองปัจจัย โดยคำนึงถึงปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้หรือปัจจัยรบกวนของกระบวนการซึ่งวิธีทากุชินั้น ถือเป็นพังก์ชันความสูญเสีย โดยวัตถุประสงค์ของการออกแบบที่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลง คือ การทำให้ค่าความสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งทากุชิได้สรุปว่าการเปียงเบนได้ของกระบวนการ ผลลัพธ์ที่ออกห่างจากค่าเป้าหมายจะก่อให้เกิดค่าความสูญเสีย

2.2.1 กำหนดตารางแผนการทดลองโดยใช้ตารางแนวฉาก (Orthogonal Array) และ linear graph ใน Robust Design ในขั้นตอนการวางแผนการทดลองจะเริ่มที่การออกแบบแผนการทดลองแบบเมตริกซ์ ซึ่งทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาปัจจัยหลายๆปัจจัยพร้อมๆ กัน คือ การกำหนดตารางแผนการทดลองโดยใช้ตารางแนวฉาก

ตารางที่ 1 ตารางแนวฉาก

แผนผังการทดลอง	จำนวนตัวแปร	
	สูงสุด	สูงสุด
L4	3	2
L8	7	2
L9	4	3
L12	11	2
L16	15	2
	5	4
L18	1	2
	7	3
L27	13	3
L32	31	2
	1	2
	9	4

จากตารางข้างต้น จำนวนตัวเลขของ L คือ จำนวนครั้งของการทดลอง เช่น L8 จะมีการทดลอง 8 ครั้ง หรือ L16 จะมีการทดลอง 16 ครั้ง เป็นต้น โดยจำนวนครั้งของการทดลองยิ่งมาก ความสามารถในการตรวจสอบยิ่งมากตามไปด้วย หรือกล่าวได้ว่าการทดลองนั้นยิ่งมีความถูกต้อง ซึ่งโดยปกติปัจจัยในการเลือกขึ้นอยู่กับ [7]

- จำนวนของตัวแปรที่สนใจ
- จำนวนระดับของตัวแปรที่ต้องการ
- ความต้องการของผู้ทดลอง, งบประมาณ, และข้อจำกัดในด้านอื่นๆ

2.2.2 การวิเคราะห์ (ANOVA) ผลการทดลองจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนของ Signal-to-Noise (S/N Ratio)

อัตราส่วนของ Signal-to-Noise (S/N Ratio) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ Smaller – the – better (กรณีค่าต่ำยิ่งน้อยยิ่งดี), Nominal – the – best (กรณีค่าตรงเป้าหมายดีที่สุด) และ Larger – the – better (กรณีค่าสูงยิ่งดี) [1]

สำหรับในงานวิจัยนี้ค่าตอบสนองที่มีค่ามาก คือ ค่าที่ดีที่สุดจากกฎของทากุชิ จุดที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย คือ จุดที่ให้ค่า S/N ratio สูงสุด

2.2.3 ปัจจัยที่มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลง (Robustness factor)

เมื่อทำการวิเคราะห์ปัจจัยจะได้ค่าอัตราส่วน Signal-to-Noise Ratio ของแต่ละระดับปัจจัย ซึ่งจะได้ผลลัพธ์คือ ปัจจัยที่มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลง (Robustness factor) ซึ่งไม่จำเป็นต้องไปวิเคราะห์ในขั้นตอนการหาค่าตอบที่เหมาะสมเนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้นั้น ไม่มีความแตกต่างกันในแต่ละระดับปัจจัย

### 3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 กำหนดกรณีศึกษาที่ทราบว่าตัวแปรใด มีผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วม

กรณีศึกษาพัฒนาจากงานวิจัยระบบงานการย้อมด้วยอุ่นเนียม เพื่อหาสภาวะของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้อมอุ่นเนียม [4] ซึ่งมีตัวแปรทั้งสิ้น 5 ตัวแปร ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สภาวะของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้อมอุ่นเนียม

พารามิเตอร์	ระดับ	
	ต่ำ(-)	สูง(+)
1. ขนาดแรงกด (A)	ต่ำ	สูง
2. ขนาดรูเจาะ (B)	เล็ก	ใหญ่
3. ความหนาของงาน (C)	บาง	หนา
4. ความยาวหมุดย้ำ (D)	สั้น	ยาว
5. เวลาในการกดแซ่ (E)	น้อย	มาก

3.2 การดำเนินการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้  $2^k$  Full Factorial Design

ดำเนินการทดลองแบบแฟคทอรี่ลีตเมรูป โดยมีตัวแปรทั้งสิ้น 5 ตัวแปร และแต่ละตัวแปรมี 2 ระดับ ซึ่งจะได้รูปแบบการทดลองเป็นแบบ  $2^5$  มีจำนวนการทดลองเท่ากับ 32 ครั้ง แต่ละครั้งของการทดลอง กำหนดให้มีจำนวนการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง จึงมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 160 ครั้ง และจัดการทดลองให้เป็นแบบสุ่ม

3.3 การดำเนินการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้หลักการค้นหาตัวแปร ด้วยวิธีการของไนนิน

ดำเนินการตามขั้นตอนของการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองตามหลักการค้นหาตัวแปรของไนนิน 4 ขั้นตอน [8]

3.4 การดำเนินการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการทางคุณภาพ

ดำเนินการทดลองแบบตารางแนววิถี ซึ่งจะได้รูปแบบการทดลองเป็น L16 ( $2^5$ ) โดยมีตัวแปรทั้งสิ้น 5 ตัวแปร และแต่ละตัวแปรมี 2 ระดับ มีจำนวนการทดลองเท่ากับ 16 ครั้ง แต่ละครั้ง ของการทดลอง กำหนดให้มีจำนวนการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง จึงมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 80 ครั้ง

จากนั้นนำมาสรุป เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากการออกแบบการทดลองทั้ง 3 แบบ

### 4. ผลการดำเนินงานและทวิจารณ์

4.1 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้  $2^k$  Full Factorial Design

ดำเนินการวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยอาศัยโปรแกรม Minitab โดยแยกวิเคราะห์ผลแต่ละปัจจัย โดยทดสอบที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบร่วมกับตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้อมอุ่นเนียม คือ ปัจจัย B (ขนาดรูเจาะ) , ปัจจัย C (ความหนาของงาน) และอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยของ B และ C

#### 4.1.1 สมการทดถอย

$$Y = 1283.75 + 98.00 B + 6.00 C - 15.75 B \cdot C \quad (1)$$

เมื่อ Y = แรงเฉือนสูงสุด (Shear Force)

B = ขนาดรูเจาะ (Size)

C = ความหนาของงาน (Thick)

4.2 การออกแบบการทดลองวิธีการของไนนิน

#### 4.2.1 ขั้นตอนที่ 1 : กำหนดตัวแปร

จากการทดลอง 3 ครั้งสำหรับค่าที่ดีที่สุด และ 3 ครั้งสำหรับค่าที่แย่ที่สุด ได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 Ball Park

พารามิเตอร์	ระดับ		หน่วย
	ต่ำ (-) Marginal Level	สูง (+) Best Level	
1. ขนาดแรงกด (A)	ต่ำ	สูง	-
2. ขนาดรูเจาะ (B)	เล็ก	ใหญ่	-
3. ความหนาของงาน (C)	หนา	บาง	-
4. ความยาวหมุดย้ำ (D)	สั้น	ยาว	-
5. เวลาในการกดแซ่ (E)	น้อย	มาก	-
ผลการทดลองครั้งที่ 1	1170	1390	$N/mm^2$
ผลการทดลองครั้งที่ 2	1250	1360	$N/mm^2$
ผลการทดลองครั้งที่ 3	1230	1410	$N/mm^2$

จากการทดลองพบว่าค่า All-Best ทุกครั้ง ตีกับ All-Marginal และค่ามัธยฐานของ All-Best คือ 1390 และของ All-Marginal คือ 1230 โดย  $D = 1390 - 1230 = 160$  และ  $\bar{d} = ((1410 - 1360) + (1250 - 1170)) / 2 = 65$  ดังนั้น  $D : \bar{d} = 160 : 65$  หรือเท่ากับ 2.46 : 1 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1.25 แสดงว่า ปัจจัยที่เลือกไว้ (A ถึง E) อย่างน้อย 1 ตัว มีนัยสำคัญ

4.2.2 ขั้นตอนที่ 2 : จำแนกแยกแยะปัจจัย และแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 จำแนกแยกบ่ஜัย

Test	Combination	Result	Median	Decision Limits	Conclusion
1	A <sub>M</sub> R <sub>B</sub>	1420	1390	1290.31 to 1489.69	A not significant
2	A <sub>B</sub> R <sub>M</sub>	1200	1230	1130.31 to 1329.69	
3	B <sub>M</sub> R <sub>B</sub>	1170	1390	1290.31 to 1489.69	B significant
4	B <sub>B</sub> R <sub>M</sub>	1380	1230	1130.31 to 1329.69	
5	C <sub>M</sub> R <sub>B</sub>	1390	1390	1290.31 to 1489.69	C not significant
6	C <sub>B</sub> R <sub>M</sub>	1160	1230	1130.31 to 1329.69	
7	D <sub>M</sub> R <sub>B</sub>	1330	1390	1290.31 to 1489.69	D not significant
8	D <sub>B</sub> R <sub>M</sub>	1220	1230	1130.31 to 1329.69	
9	E <sub>M</sub> R <sub>B</sub>	1410	1390	1290.31 to 1489.69	E not significant
10	E <sub>B</sub> R <sub>M</sub>	1240	1230	1130.31 to 1329.69	

ขอบเขตการตัดสินใจ คือ Decision Limits (High sides) =  $1390 \pm 2.776 \bar{d} / 1.81 = 1290.31$  ถึง  $1489.69$  และ Decision Limits (Low sides) =  $1230 \pm 2.776 \bar{d} / 1.81 = 1130.31$  ถึง  $1329.69$  จากผลการทดลองแสดงว่าบ่ஜัย A, C, D และ E มีผลลัพธ์ที่อยู่ภายนอก Decision Limits

A, C, D และ E จึงไม่มีนัยสำคัญ ส่วนบ่ஜัย B มีผลลัพธ์อยู่นอกเหนือจาก Decision Limits แสดงว่าบ่ஜัย B มีนัยสำคัญ 4.2.3 ขั้นตอนที่ 3: ยืนยันตัวแปร แสดงผลในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ยืนยันตัวแปร

Test	Combination	Result	Median	Decision Limits	Conclusion
1	A <sub>B</sub> B <sub>B</sub> R <sub>M</sub>	1300	1390	1290.31 to 1489.69	AB significant
2	A <sub>M</sub> B <sub>M</sub> R <sub>B</sub>	1180	1230	1130.31 to 1329.69	
3	B <sub>B</sub> C <sub>B</sub> R <sub>M</sub>	1440	1390	1290.31 to 1489.69	BC significant
4	B <sub>M</sub> C <sub>M</sub> R <sub>B</sub>	1210	1230	1130.31 to 1329.69	
5	B <sub>B</sub> D <sub>B</sub> R <sub>M</sub>	1370	1390	1290.31 to 1489.69	BD not significant
6	B <sub>M</sub> D <sub>M</sub> R <sub>B</sub>	1100	1230	1130.31 to 1329.69	
7	B <sub>B</sub> E <sub>B</sub> R <sub>M</sub>	1370	1390	1290.31 to 1489.69	BE not significant
8	B <sub>M</sub> E <sub>M</sub> R <sub>B</sub>	1120	1230	1130.31 to 1329.69	

จากผลการทดลองพบว่า A<sub>B</sub>B<sub>B</sub>R<sub>M</sub>, A<sub>M</sub>B<sub>M</sub>R<sub>B</sub> และ B<sub>B</sub>C<sub>B</sub>R<sub>M</sub>, B<sub>M</sub>C<sub>M</sub>R<sub>B</sub> มีผลลัพธ์ที่อยู่ภายนอก Decision Limits

ดังนั้นบ่ஜัย A และ C ดังนั้นจึงมีบ่ஜัย A, B, C และอันตรกิริยา AB และ BC ที่มีนัยสำคัญ

4.2.4 ขั้นตอนที่ 4 : การวิเคราะห์ตัวแปร แสดงผลในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ตัวแปร

	A Best	A Marginal	C Best	C Marginal
B Best	1390 1390	1420	1420 1390	1380
	1330 1360	1380	1330 1360	1390
	1410 1410		1410 1410	
	1300		1440	
5585	Median=1390	Median=1400	Median=1410	Median=1385
B Marginal	1200	1160 1170	1160	1200 1170
	1170	1220 1250	1170	1220 1250
		1240 1230		1240 1230
		1180		1210
4790	Median=1185	Median=1220	Median=1165	Median=1220

A best = 1390+1185=2575	C best = 1410+1165=2575
A marginal = 1400+1220=2620	C marginal = 1385+1220=2605
A <sub>B</sub> B <sub>B</sub> -A <sub>M</sub> B <sub>M</sub> = 1390+1220=2610	B <sub>B</sub> C <sub>B</sub> -B <sub>M</sub> C <sub>M</sub> = 1410+1220=2630
A <sub>M</sub> B <sub>B</sub> -A <sub>B</sub> B <sub>M</sub> = 1400+1185=2585	B <sub>B</sub> C <sub>M</sub> -B <sub>M</sub> C <sub>B</sub> = 1385+1165=2550

อิทธิพลหลักของปัจจัย A =  $(2620-2575) / 2 = 22.5$   
 อิทธิพลหลักของปัจจัย B =  $(5585-4790) / 4 = 198.75$   
 อิทธิพลหลักของปัจจัย C =  $(2605-2575) / 2 = 15$   
 อันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A และ B =  $(2610-2585) / 2 = 12.5$   
 อันตรกิริยาระหว่างปัจจัย B และ C =  $(2630-2550) / 2 = 40$

จากตารางที่ 6 การวิเคราะห์ปัจจัยสามารถสรุปได้ว่าปัจจัย B มีความสำคัญมากที่สุด หรือเรียกว่า Red X ซึ่งมีค่าคือเท่ากับ 198.75 และปัจจัยที่มีความสำคัญอันดับ 2 คือการเกิดอิทธิพลร่วมกันระหว่างปัจจัย B และ C โดยมีค่าเท่ากับ 40 หรือเรียกว่า Pink X และปัจจัยที่มีความสำคัญเป็นอันดับสุดท้ายคือ ปัจจัย A โดยมีค่าเท่ากับ 22.5 หรือเรียกว่า PalePinkX

สรุป จากผลลัพธ์ข้างต้นแสดงอย่างชัดเจนว่า ปัจจัย A (ขนาดแรงกด), ปัจจัย B (ขนาดรูรูเจาะ) และอันตรกิริยาระหว่าง B และ C มีนัยสำคัญ ที่มีอิทธิพลต่อแรงเสื่อมสูงสุดของ หมุดย้ำอลูมิเนียม

#### 4.3 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ทางวิธี

สำหรับงานวิจัยนี้ เลือกใช้ค่าตอบสนองที่มีค่ามาก (Larger - the -better) และเลือกตารางแนวจากแบบ L16

Analysis of Variance for Means						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Force	1	42	42	42	0.14	0.720
Size	1	156420	156420	156420	523.87	0.000
Thick	1	650	650	650	2.18	0.190
Length	1	0	0	0	0.00	0.978
Time	1	2	2	2	0.01	0.934
Force*Size	1	240	240	240	0.80	0.404
Size*Thick	1	4290	4290	4290	14.37	0.009
Size*Length	1	6	6	6	0.02	0.890
Size*Time	1	6	6	6	0.02	0.890
Residual Error	6	1792	1792	299		
Total	15	163450				

รูปที่ 1 ข้อมูล ANOVA

จากรูปที่ 1 ข้อมูล ANOVA พบว่า ตัวแปรหลัก (Main Effect) คือ ปัจจัย B (ขนาดรูรูเจาะ), ปัจจัย C (ความหนาของงาน) และอันตรกิริยาระหว่างของปัจจัย B และ C มีอิทธิพลต่อแรงเสื่อมสูงสุดของหมุดย้ำอลูมิเนียม เนื่องจาก  $P\text{-value} < \alpha = 0.05$  ซึ่งส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของแรงเสื่อมสูงสุด

ค่าตอบสนองที่มีค่ามาก Larger – the –better คือ ค่าที่ดีที่สุดจากกฎของทางวิธี จุดที่หมายสนใจที่สุดของปัจจัย คือ จุดที่ให้ค่า S/N ratio สูงสุด โดยทำให้เกิดความสูญเสียน้อยที่สุด ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left( \sum \frac{1}{y^2} \right) / n \quad (2)$$

จากรูปที่ 2 ข้อมูล Signal to Noise Ratios พบว่าปัจจัย A (ขนาดแรงกด), ปัจจัย E (เวลาในการกดแซ่) และปัจจัย D (ความยาวหมุดย้ำ) เป็น Robustness คือ ปัจจัยเหล่านี้มีส่วนร่วมต่อสภาพแวดล้อมและปัจจัยอื่นๆที่นอกเหนือการควบคุม โดยพบว่าปัจจัย B (ขนาดรูรูเจาะ) ที่ระดับ High (ค่า 62.81) และปัจจัย C (ความหนาของงาน) ที่ระดับ High (ค่า 62.19) ให้ค่า S/N ratio ที่สูง ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าเฉลี่ยของแรงเสื่อมสูงสุดด้วย ที่ปัจจัย B (ขนาดรูรูเจาะ) ที่ระดับ High (ค่า 1383) และปัจจัย C (ความหนาของงาน) ที่ระดับ High (ค่า 1290) ที่มีค่าสูงเช่นกัน

Response Table for Signal to Noise Ratios

Larger is better

Level	Force	Size	Thick	Length	Time
1	62.13	61.46	62.08	62.13	62.14
2	62.14	62.81	62.19	62.14	62.13
Delta	0.01	1.34	0.11	0.00	0.00
Rank	3	1	2	5	4

Response Table for Means

Level	Force	Size	Thick	Length	Time
1	1282	1185	1277	1284	1284
2	1285	1383	1290	1284	1283
Delta	3	198	13	0	1
Rank	3	1	2	5	4

รูปที่ 2 ข้อมูล Signal to Noise Ratios

โดยมีสมการดังนี้ คือ

$$Y = 1283.63 - 98.87B - 6.38C - 16.37B*C \quad (3)$$

#### 4.4 การเบรรี่บเทียบวิธีออกแบบการทดลอง

จากการนี้ศึกษาการรับมืออลูมิเนียม พบว่าวิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทางวิธี และการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล จะได้ตัวแปรหลัก คือ ปัจจัย B (ขนาดรูรูเจาะ), ปัจจัย C (ความหนาของงาน) และอันตรกิริยาระหว่างของ ปัจจัย B และ C ที่มีอิทธิพลต่อแรงเสื่อมสูงสุดของหมุดย้ำอลูมิเนียม และวิธีการของใชนิน จะได้ปัจจัย A (ขนาดแรงกด), ปัจจัย B (ขนาดรูรูเจาะ) และอันตรกิริยาระหว่างของปัจจัย B และ C มีนัยสำคัญ ที่มีอิทธิพลต่อแรงเสื่อมสูงสุดของหมุดย้ำอลูมิเนียม ดังแสดงในตารางที่ 7

ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาแต่ละวิธีของการทดลอง จะพบว่าเด่นที่แตกต่างกัน โดยสามารถสรุปดังตารางที่ 8

ตารางที่ 7 สรุปผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้ำ อลูมิเนียมอย่างมีนัยสำคัญเบรียบเทียบกันทั้ง 3 วิธีของการทดลองการออกแบบการทดลอง

วิธีการ ออกแบบ การทดลอง	ตัวแปร					Signal to noise ratio (S/N)	Linear Model
	A	B	C	AB	BC		
วิธีการทางกูชิ	✓	✓			✓	✓	✓
วิธีการของ ไซนิน	✓	✓			✓		
$2^k$ Factorial Design		✓	✓		✓		✓

ตารางที่ 8 สรุปเปรียบเทียบวิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทางกูชิ 'ไซนิน และการออกแบบการทดลองแบบมาตรฐาน  $2^k$  Factorial Design

หัวข้อที่ เปรียบเทียบ	วิธีการของ ทางกูชิ	วิธีการของ ไซนิน	การออกแบบการ ทดลองแบบมาตรฐาน (แฟคทอเรียล)
เบอร์เซ็นต์ จำนวนครั้งใน การทดลองที่ ลดลงได้	80 ครั้ง (ลดลง 50%)	10 ครั้ง (ลดลง 93.75%)	160 ครั้ง
ต้นทุนที่ใช้ใน การทดลอง	ปานกลาง (ตามจำนวน ครั้งของการ ทดลอง)	ต่ำ	สูง (ตามจำนวนครั้ง ของการทดลอง)
หลักการของ การวิเคราะห์	ANOVA และ S/N Ratio	Median	ANOVA
สมการทดถอย	มี	ไม่มี	มี
ความซุ่มยาก ซับซ้อนในการ วิเคราะห์ทาง สถิติ	มาก (อาศัย วิธีการทาง สถิติ ANOVA และ S/N Ratio)	น้อย (อาศัยเพียง หลักเหตุและผล (Rule of Thumb))	มาก (อาศัยวิธีการทาง สถิติ ANOVA)
ความซื่อสัตย์ ในทางสถิติ	สูง (ใช้ ANOVA และ S/N Ratio)	น้อย (อาศัยเพียง หลักเหตุและผล (Rule of Thumb))	สูง (ใช้ ANOVA)
จำนวนตัวแปร ที่ใช้ได้กับการ ทดลอง	ปานกลาง	มาก (หากมีตัว แปรจำนวนมาก การทดลองก็ยัง น้อยอยู่ดี)	น้อย ( เพราะ จำนวนตัวแปรมาก การทดลองก็ยังมาก)

## 5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบวิธีการออกแบบการทดลองวิธีการของทางกูชิ วิธีการของไซนิน และการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล โดยอาศัยกรณีศึกษา ของการย้ำหมุดอลูมิเนียม โดยมีทั้งหมด 5 ปัจจัย พบว่าการออกแบบการทดลองของทางกูชิสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองที่สำคัญได้เหมือนกับวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล คือ มีความเชื่อมั่นในทางสถิติที่สูง อีกทั้งยังใช้จำนวนครั้งในการทดลองที่น้อยกว่า คือ 80 ครั้ง (ลดลง 50%) ซึ่งวิธีการของไซนินจะใช้จำนวนครั้งของการทดลองที่น้อยกว่า

วิธีการของทางกูชิและการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล คือใช้เพียง 10 ครั้ง (ลดลง 93.75%) ซึ่งจะช่วยทำให้เกิดประโยชน์ในเรื่องการประหยัดต้นทุนในการทดลอง แต่ทั้งนี้ วิธีการของไซนินไม่อาศัยการคำนวณทางสถิติที่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับวิธีการของทางกูชิและการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ทำให้ได้รับการยอมรับที่น้อยกว่า และไม่สามารถแสดงผลของสมการทดถอยของความสัมพันธ์ของตัวแปรได้

จากการณีศึกษา สามารถสรุปได้ว่าเมื่อจำนวนตัวแปรในการทดลองมีมากขึ้น จำนวนครั้งของการทดลองของวิธีแฟคทอเรียล จะมีจำนวนครั้งที่มากขึ้นอย่างมาก ทำให้ยากต่อการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม

ผู้วิจัยจึงเสนอการออกแบบการทดลองแบบวิธีการของทางกูชิ และวิธีการของไซนิน เป็นทางเลือกหนึ่งที่มีประโยชน์อย่างยิ่งในการศึกษาตัวแปร ที่ลดจำนวนครั้งในการทดลอง แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการของทางกูชิและไซนิน ต้องอาศัยความรู้ในกระบวนการตัวอย่างนั้นเป็นแนวทางในการกำหนดตัวแปรและระดับของการทดลอง ทำให้สามารถนำไปใช้ในภาคปฏิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการผลิต

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Montgomery, Douglas C. (2013). Design and analysis of experiments. 8<sup>th</sup> ed. Hoboken, NJ : Wiley.
- [2] Bhote, K. (2000). World Class Quality : Using Design of Experiment to Make It Happen. 2<sup>nd</sup> ed. Amacom. New York
- [3] Peace, Glen Stuart. (1993). Taguchi method : a hands- on approach. Addison-Wesley Publishing Company.
- [4] สมชาย ม้วนโภคสูง. (2553). การหาจุดเหมาะสมสำหรับการย้ำหมุด อลูมิเนียม โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะ วิศวกรรมศาสตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [5] Andrew, thomas.; & Jiju, Antony. (2004). Applying Shainin's variables search methodology in aerospace applications. Assembly Automation. 24: 184-191.
- [6] พิชิต สุเจริญพงษ์. (2550). "Shainin DOE : เทคนิคของไซนิน สำหรับการออกแบบการทดลองเพื่อการปรับปรุงคุณภาพ," ใน เอกสารประกอบการสอนมาศามลส์เสริมเทคโนโลยี (ไทย - อังกฤษ), กรุงเทพฯ.
- [7] P.J. Ross. (1996). บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย, สืบคันจาก <http://digilib.library.tu.ac.th/thesis/en/0423/04chapter3.pdf>
- [8] ยศวัจน์ ศิริกมลชัย. (2554). การศึกษาการออกแบบการทดลองด้วย วิธีการไซนิน. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัย ศรีนครินทร์วิโรฒ).



การพัฒนาคอนกรีตประสิทธิภาพสูงสำหรับกำแพงป้องกันกระสุน  
Development of high performance concrete  
for bulletproof wall panel application

ปิยพงษ์ สุวรรณ์มณฑ์ชิต<sup>1,2</sup>, พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง<sup>2,3\*</sup>, ประเทือง โมราрай<sup>4</sup>, ภานุวัฒน์ จ้อยกลัด<sup>5</sup>, ธนากร พิรพันธ์<sup>6</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาชีวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

<sup>2</sup>หน่วยวิจัยเพื่อนวัตกรรมวัสดุก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเร嫂ว

<sup>3</sup>ภาควิชาชีวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

<sup>4</sup>ภาควิชาชีวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

<sup>5</sup>ภาควิชาชีวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

<sup>6</sup>ภาควิชาชีวกรรมโยธา กองวิชาชีวกรรมไฟฟ้าและโยธา กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศ

\*Corresponding author e-mail: pop\_civil@hotmail.com

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาคอนกรีตประสิทธิภาพสูงเพื่อใช้ป้องกันกระสุน โดยสนใจความสามารถในการดูดซับพลังงานจนนิ่งของคอนกรีตปกติ (NC) คอนกรีตกำลังสูง (HSC) คอนกรีตผสมเส้นใยพอลิเมอร์ (PFRC) และคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก (SFRC) โดยหล่อแผ่นคอนกรีตขนาด 40x40 เซนติเมตร หนา 5.75 และ 10 เซนติเมตร ใช้กระสุนขนาด 7.62 มิลลิเมตร ยิงแผ่นคอนกรีต ยิงตรง ตั้งฉากห่างจากผิwtอย่าง 200 เมตร วัดความเร็วของกระสุนเป็นก่อนและหลังกระแทกแผ่นคอนกรีต รวมไปถึงพิจารณารูปแบบการวิบัติ ผลการทดสอบปรากฏว่า คอนกรีตกำลังสูงสามารถดูดซับพลังงานจนนิ่งของกระสุนได้ดี แต่เสียหายค่อนข้างมาก โดยผังหนา 5 เซนติเมตร ดูดซับพลังงานจนนิ่งเท่ากับคอนกรีต NC และ PFRC ที่หนา 7.5 เซนติเมตร เส้นใยในคอนกรีต SFRC ช่วยให้คอนกรีตหนึ่งขั้น และป้องกันแรงกระแทกจากกระสุนได้ดี โดยผิวคอนกรีตบางส่วนจะแตกออก

**คำสำคัญ:** ผนังกันกระสุน, คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก, คอนกรีตผสมเส้นใยพอลิเมอร์, คอนกรีตกำลังสูง, ความเร็วกระสุน

## Abstract

The main objective of this work is to develop high performance concrete for bulletproof application. The bullet energy adsorption efficiency of four concrete categories including normal concrete (NC), high strength concrete (HSC), polymer fiber reinforced concrete (PFRC) and steel fiber reinforced concrete (SFRC) were studied. The dimensions of the panels are 40x40 cm with the thickness of 5, 7.5 and 10 cm for energy adsorption test. The 7.62-mm bullet was shot from the distance 200 m and perpendicular to the surface. The bullet speed before and after impact through a plate were measured. This study suggested that the HSC specimens show highest energy adsorption while they reveal a lot of damage. The 5 cm. thick specimens of HSC showed energy adsorb ability equal to the NC or PFRC plate with 7.5 cm thick. Steel fiber reinforcement increased the concrete ductility and bullet resistance ability of concrete.

**Keywords:** Bulletproof Wall Panel, Steel Fiber Reinforced Concrete, Polymer Fiber Reinforced Concrete, High Strength Concrete, Bullet velocity

## 1. บทนำ

ปัญหาความไม่สงบในสามจังหวัดชายแดนใต้ส่งผลต่อความมั่นคงของประเทศไทย แม้ที่ผ่านมาหน่วยงานรัฐทุ่มทรัพยากรเพื่อแก้ปัญหา แต่ยังไม่มีแนวโน้มคลี่ค่ายในเวลาอันใกล้ กองทัพจึงเป็นหน่วยงานหลักในการแก้ปัญหาอย่างต่อเนื่อง เหตุการณ์ในช่วงปี พ.ศ. 2547-2557 ต้องสูญเสีย

เจ้าหน้าที่ตำรวจ ทหาร ไปแล้วอย่างน้อย 4,399 นาย ประชาชนบาดเจ็บ 5,782 ราย เสียชีวิต 3,786 ราย [1] หนทางหนึ่งในการลดความสูญเสียและปกป้องเจ้าหน้าที่ในสามจังหวัดชายแดนใต้ คือ สร้างอาคารที่สามารถทนทานแรงปะทะจากกระสุน อาวุธปืน หรือแรงระเบิด โดยทั่วไป นิยมสร้างอาคารถาวรเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งสามารถรับ

น้ำหนักได้สูง แต่ไม่ได้ออกแบบเพื่อรับการโจมตีด้วยอาวุธ ดังกล่าว จึงจำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติเชิงพะ เช่น จะต้องคำนึงถึงพลังงานและแรงประทของกระสุนไม่ให้ทะลุผ่านคอนกรีต เมื่อกระสุนปืนตกกระหบคอนกรีตจะมีการแตกเปลี่ยนพลังงานกัน หากคอนกรีตสามารถถ่ายเทพลังงานจากกระสุนจนหมด กระสุนก็จะไม่สามารถทะลุผ่านคอนกรีต กลไกสำคัญในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทพลังงานจากกระสุนมาที่คอนกรีตคือ การเพิ่มสมบัติทางด้านความเหนียวของวัสดุในประเด็นการรับแรงดึงและแรงกระแทก ซึ่งคอนกรีตเป็นวัสดุที่สามารถรับกำลังอัดสูงแต่มีค่าความเหนียวต่ำมาก ทำให้ความสามารถในการลดพลังงานของกระสุนปืนมีค่าต่ำ การปรับปรุงสมบัติทางด้านความเหนียวของคอนกรีตสามารถทำได้โดยการเสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใย เช่น เส้นใยแก้ว (fiberglass) เส้นใยพอลิเมอร์ (polymer fiber) [2, 3] หรือ เส้นใยเหล็ก (steel fiber) [4, 5]

Banthia และคณะ [6] ศึกษาการนำ crimped steel fiber ที่ยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ มาปรับปรุงสมบัติความเหนียวของคอนกรีต โดย crimped steel fiber ที่นำมาใช้เป็นวัสดุเสริมกำลังคอนกรีตมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง สามขนาด แบ่งเป็นสองกลุ่ม คือ crimped steel fiber ขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.80 มิลลิเมตร) และ crimped steel fiber ขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 และ 0.40 มิลลิเมตร) ปกติคอนกรีตที่ผสมเส้นใยขนาดเล็กมีกำลังดึงสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยขนาดใหญ่ เนื่องจากเส้นใยขนาดเล็กทำให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็ก (micro cracks) ขณะที่เส้นใยขนาดใหญ่เกิดรอยร้าวขนาดใหญ่ (macro cracks) เส้นใยขนาดใหญ่มีรากฐานกว่าเส้นใยขนาดเล็ก ดังนั้น งานวิจัยของ Banthia จึงศึกษา flexural toughness factor ของคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วย crimped steel fiber ขนาดใหญ่ และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ flexural toughness factor เนื่องจากการผสม crimped steel fiber ขนาดเล็ก ผลศึกษาสรุปได้ว่า การผสม crimped steel fiber เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก กับคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วย crimped steel fiber ขนาดใหญ่ ช่วยให้ flexural toughness factor ของตัวอย่างเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่า flexural toughness factor ของตัวอย่างที่ผสม crimped steel fiber ขนาดเล็ก ร่วมกับ crimped steel fiber ขนาดใหญ่ ในสัดส่วนต่างๆ มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วย crimped steel fiber ขนาดเล็ก เพียงอย่างเดียว

Tassew และคณะ [7] ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ ceramic concrete โดยเสริมกำลังด้วย chopped glass fiber โดย ceramic concrete ที่นำมาเสริมกำลังมี 2 ประเภท ได้แก่ ประเภท L (คอนกรีตมวลเบาที่ใช้ expanded clay เป็นส่วนประกอบของมวลรวม) และประเภท S (คอนกรีตที่ใช้ well-graded sand เป็นส่วนประกอบของมวลรวม) และคอนกรีตแต่ละประเภทเสริมกำลังโดยใช้ chopped

glass fiber ที่มีความยาวแตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ Lf13 (chopped glass fiber ยาว 13 มิลลิเมตร) และ Lf19 (chopped glass fiber ยาว 19 มิลลิเมตร) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การเสริมกำลังคอนกรีตด้วย chopped glass fiber ส่งผลให้ compression toughness index เพิ่มขึ้นทุกส่วนผสมและทุกความยาวของ chopped glass fiber ความยาวของ chopped glass fiber ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ compression toughness index เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผลของปริมาณเส้นใย สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณของเส้นใยส่งผลต่อลักษณะเชิงกลมากกว่าปัจจัยเนื่องจากความยาวของเส้นใย เมื่อทดสอบ load-displacement ภายใต้การรับแรงดัดพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ chopped glass fiber ส่งผลให้ flexural toughness มีค่าเพิ่มขึ้นทุกตัวอย่าง ตัวอย่างจาก ceramic concrete ประเภท L มีแนวโน้มของค่า flexural toughness ต่ำกว่า ceramic concrete ประเภท S เนื่องจากเกิดรอยแตกในส่วนที่เป็นมอร์ตาร์และมวลรวมเบา

Sukontasukkul และคณะ [8] ศึกษาการเพิ่มความสามารถในการกันกระสุนของผนังคอนกรีตโดยเสริมกำลังด้วย hooked end steel fiber และ crumb rubber โดยแบ่งประเภทของคอนกรีตออกเป็นสามกลุ่ม คือ ผนังคอนกรีตชั้นเดียวที่เสริมกำลังด้วย hooked end steel fiber (SFRC) ในอัตราส่วนร้อยละ 2 3 และ 4 โดยปริมาตร ผนังคอนกรีตชั้นเดียวที่เสริมกำลังด้วย crumb rubber (RC) โดยแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 50 75 และ 100 โดยปริมาตร และผนังคอนกรีตสองชั้น โดยผิวน้ำเป็นชั้นของคอนกรีตเสริมเหล็กมีความหนาระหว่าง 5-15 มิลลิเมตร และชั้นที่สองเป็นชั้นของ SFCR มีความหนาระหว่าง 15-25 มิลลิเมตร ทดสอบโดยยิงกระสุนปืนขนาด 9 มิลลิเมตร ที่ระยะห่าง 10 เมตร ใส่แผ่นคอนกรีตในโครงเหล็ก โดยมีดีที่มุ่งทั้งสี่ของแผ่นคอนกรีต และติดตั้งเครื่องวัดความเร่ง (accelerometer) เพื่อวัดความเร่งของกระสุนหลังจากผลกระทบแผ่นคอนกรีต ผลทดสอบสรุปได้ว่า แผ่นคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วย hooked end steel fiber เพียงอย่างเดียวกันกระสุนได้ทุกตัวอย่าง แผ่นคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วย crumb rubber เพียงอย่างเดียวป้องกันกระสุนไม่ได้ คอนกรีตที่หล่อสองชั้นส่วนมากกันกระสุนได้ อย่างไรก็ตาม ระบบป้องกันกระสุนแบบสองชั้น ลดความเร่งของกระสุนได้ดีกว่าระบบแผ่นคอนกรีตแบบชั้นเดียว

แม้ว่าปัจจุบันจะมีงานวิจัยพัฒนาคอนกรีตสำหรับกันกระสุนอยู่บ้าง แต่มีน้อยมากเนื่องจากเป็นการวิจัยเพื่อทางการทหารโดยเฉพาะ และที่สำคัญการทดสอบความสามารถในการป้องกันกระสุนมักไม่ได้ทดสอบตามมาตรฐานการ ป้องกันกระสุนใด ดังนั้น จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะพัฒนาคอนกรีตสำหรับป้องกันกระสุน โดยสนใจสมบัติด้านความสามารถในการรับกำลังอัดและความสามารถในการดูดซับพลังงานของกระสุน ตามมาตรฐาน Ballistic Resistance

## 2. วัสดุและกระบวนการทดสอบ

### 2.1 วัสดุประกอบการวิจัย

วัสดุประกอบการวิจัยประกอบด้วยสองส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 ส่วนผสมคอนกรีตประกอบไปด้วย ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทรายแม่น้ำ หินปูน หรือหินแอนดีไซต์ (แล้วแต่ประเภทคอนกรีต) และสารลดน้ำพิเศษ

ส่วนที่ 2 วัสดุเสริมกำลัง ได้แก่ เส้นใยพอลิเมอร์ (polymer fiber) ประเภท polypropylene ตามมาตรฐาน ASTM C1116-02 [10] และเส้นใยเหล็ก (steel fiber) ตาม มาตรฐาน ASTM A820 [11] ซึ่งมีสมบัติตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของเส้นใย

ประเภท	ถพ.	รูปร่าง	l (mm)	d (mm)	l/d	กำลังตึง (MPa)
เหล็ก	7.80	งอปลาย	60	0.90	65	1,160
พอลิเมอร์	0.91	เส้นตรง	12	$18 \times 10^{-3}$	650	300-400

### 2.2 ประเภทคอนกรีต

การวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในการป้องกันและการดูดซับแรงปะทะของกระสุนในคอนกรีต 4 ประเภท ดังนี้

ประเภทที่ 1 คอนกรีตปกติ (NC) เป็นคอนกรีตทั่วไป คือ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ น้ำ ทราย และ หินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40

ประเภทที่ 2 คอนกรีตกำลังสูง (HSC) เป็นคอนกรีตที่ใช้วัสดุคล้ายคอนกรีตปกติ แต่เปลี่ยนหินปูนเป็นหินแอนดีไซต์ซึ่ง มีความแข็งแรงสูงกว่าหินปูน และลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสม โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 เพื่อให้มี กำลังสูงกว่าคอนกรีต NC และมีความสามารถทำงานได้

ประเภทที่ 3 คอนกรีตผสมเส้นใยพอลิเมอร์ (PFRC) เป็น คอนกรีตที่มีรูปแบบส่วนผสมเหมือนคอนกรีตปกติ แต่เติมเส้น ใยพอลิเมอร์ลงไปในคอนกรีต โดยใช้เส้นใยพอลิเมอร์เสริม กำลังร้อยละ 0.6 โดยปริมาตร

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีต

ประเภท คอนกรีต	W/C	ส่วนผสมคอนกรีต (กิโลกรัมต่อลูกบากระเมตร)					
		ปูนซีเมนต์	น้ำ	ทราย	สารลดน้ำ พิเศษ	มวลรวมทราย	เส้นใย
NC	0.40	449	175	749	2.70	1,072	-
HSC	0.30	522	149	749	6.78	-	1,082
PFRC	0.40	449	175	749	2.70	1,072	-
SFRC	0.40	449	175	749	3.14	1,072	-
						30	-

ประเภทที่ 4 คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก (SFRC) เป็น คอนกรีตที่มีรูปแบบส่วนผสมเหมือนคอนกรีตปกติ แต่เติมเส้น ใยเหล็กลงไปในคอนกรีต โดยใช้เส้นใยเหล็กเสริมกำลังร้อยละ 3.0 โดยปริมาตร

หล่อคอนกรีตทั้งสี่ประเภทในแบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร เพื่อทดสอบกำลังอัด และหล่อแผ่นคอนกรีตขนาด 40x40 เซนติเมตร หนา 5 7.5 และ 10 เซนติเมตร ควบคุมการยุบตัวของคอนกรีตสดให้อยู่ในช่วง  $10 \pm 2.5$  เซนติเมตร โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ หลังจากหล่อคอนกรีต 24 ชั่วโมง ทดสอบหล่อและบ่มคอนกรีตในน้ำสะอาด 28 วัน จึงเริ่มทดสอบ

### 2.3 รูปแบบการทดสอบ

ทดสอบสมบัติของวัสดุ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ และทดสอบความสามารถต้านทานการสึกกร่อนของหินโดยเครื่องทดสอบแรงเจลลิส

ทดสอบสมบัติทางกายภาพของคอนกรีต ได้แก่ ความหนาแน่น และกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

ทดสอบความสามารถดูดซับพลังงานและต้านทานการประทะของกระสุน

การวิจัยนี้เลือกศึกษาความสามารถในการป้องกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ Standard-0101.06 Type III; (Rifles) [9] ซึ่งมีข้อกำหนดรายละเอียดของกระสุนเป็นขนาด 7.62 มิลลิเมตร มวล 9.6 กรัม ความเร็วชนิดกระแทบทัวอย่าง  $847 \pm 9.1$  เมตรต่อวินาที ซึ่งมีค่าพลังงานจลน์ประมาณ 3,275 จูล

การทดสอบความสามารถต้านทานการทดสอบทั้งสี่ประเภท ทำโดย วางแผ่นคอนกรีตไว้กึ่งกลางของเครื่องวัดอัตราเร็วกระสุนสองเครื่อง ยิงกระสุนขนาด 7.62 มิลลิเมตร ผ่านเครื่องวัด อัตราเร็วกระสุนเครื่องแรกซึ่งจะทราบอัตราเร็วของกระสุน ก่อนตัดกระแทบทะแผ่นคอนกรีต ( $v_i$ ) หลังจากนั้นกระสุนจะทะลุ แผ่นคอนกรีตและลดลงเครื่องวัดอัตราเร็วของกระสุนเครื่องที่สอง ทำให้ทราบอัตราเร็วของกระสุนหลังทะลุแผ่นคอนกรีต ( $v_f$ ) ดังรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 1 ภาพจำลองการทดสอบความสามารถของแผ่นคอนกรีต  
ในการดูดซึบแรงกระแทกของกระสุน

ผลลัพธ์ของกระบวนการที่ดูดกลืนโดยแผ่นคอนกรีต ( $E_{ads}$ ) แสดงดังสมการที่ (1)

$$E_{ads} = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2 \quad (1)$$

ແຜ່ນຄອນກົດທັງສີປະເກດ ທົດສອບທີ່ຄວາມໜານ 5 7.5 ແລະ 10 ເຊັນຕີເມຕີຣ ໂດຍແຕ່ລະກຣນີຈະທົດສອບສາມຄັ້ງ ເພື່ອຫາ  
ຄ່າເນັລີຍ ຄອນກົດທັງສີ 5 ແລະ 7.5 ເຊັນຕີເມຕີຣ ຈະຍົງເພີ່ມເນັດ  
ເດືອຍເພື່ອທົດສອບການຄູດຊັບພັດງານ ຂະໜັກທີ່ຄວາມໜານ 10  
ເຊັນຕີເມຕີຣ ຈະຍົງເພີ່ມເນັດໃໝ່ຈົນກະທິທີ່ຄອນກົດທັງສີປະເກດ ເພື່ອ  
ພິຈາລະນາຄວາມສາມາດຮັດຕ້ານທານກະສົນ



รูปที่ 2 ชุดอุปกรณ์ทดสอบความสามารถดูดซึบแรงกระแทกของกระสน

### 3. ผลวิจัยและวิเคราะห์ผล

### 3.1 ผลทดสอบสมบัติหินปูน หินแอนดีไซต์ และราย

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบสมบัติของวัสดุ ผลทดสอบความสามารถด้านทานการสึกกร่อนของหินแอนดีไซต์สูญเสียน้ำหนักร้อยละ 11.09 หินปูนสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 22.41 จึงใช้หินแอนดีไซต์เป็นมวลรวมทรายสำหรับคอกปริทกำลังสูง อย่างไรก็ตาม หินทั้งสองประเภทต่างกันฝาแนมมาตรฐาน ASTM C33 ที่กำหนดค่าการสูญเสียน้ำหนักของมวลรวมทรายสำหรับคอกปริทไม่เกินร้อยละ 35 [12]

### 3.2 ผลทดสอบความหนาแน่นและกำลังอัด

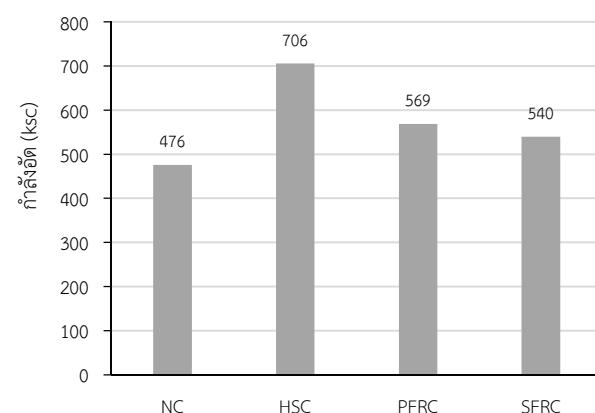
แสดงว่า  $w/c = 0.40$  คอนกรีต NC สามารถรับแรงอัดต่ำที่สุด

ส่วนคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยวัสดุพิเศษ (PFRC และ SFRC) สามารถรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตประเภท NC ร้อยละ 120 และ 113 ตามลำดับ คอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยเส้นไข่ข่ายเพิ่มความสามารถรับกำลังอัด [13-15] ในขณะที่คอนกรีตประเภท HSC มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตประเภท NC ร้อยละ 148 เนื่องจาก W/c ที่ต่ำกว่าคอนกรีต NC และการใช้หินแน่นตีไชต์ซึ่งมีความแข็งมากกว่าหินปูน

ตารางที่ 3 ผลทดสอบสมบัติของหิน

สมบัติ	ที่นปน	ที่นนแอนด์ดีไซต์	ทราย
ความถ่วงจำเพาะ	2.82	2.94	2.60
การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	0.52	0.17	0.95
ไมดูดซึมความละเมียด	7.53	6.86	2.54
การด้านท่านการสึกกร่อนของทิน โดยเครื่องลอกสูบเงาลลสี (ร้อยละ)	22.41	11.09	-

ความหนาแน่นของคอนกรีตทุกประเภทต่างกันเดือดกันอยโดยคอนกรีตประเภท NC SFRC HSC และ PFRC มีความหนาแน่น 2,474 2,479 2,520 และ 2,548 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ



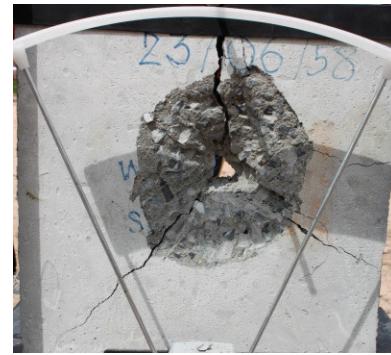
รูปที่ 3 กำลังอัดของคอนกรีต

### 3.3 รูปแบบการวิบัติของแผ่นคอนกรีต

### ๓.๓.๑ គគុបករីទា/កតិ NC



ด้านหน้า



ด้านหลัง

(ก) NC



ด้านหน้า

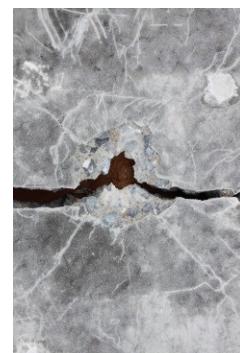


ด้านหลัง

(ข) HSC



ด้านหน้า



ด้านหลัง

(ค) PFRC



ด้านหน้า



ด้านหลัง

(ง) SFRC

รูปที่ 4 ตัวอย่างการวิบัติของแผ่นคอนกรีตหนา 5 เซนติเมตร



(ก) HSC



(ข) SFRC

รูปที่ 5 ความเสียหายของแผ่นคอนกรีตหนา 7.5 เซนติเมตร

### 3.3.2 คอนกรีตกำลังสูง HSC

คอนกรีตกำลังสูงเสียหายรุนแรงกว่าคอนกรีตปกติ โดยรอยบ่นแผ่นคอนกรีตและรอยกระเทาะของผิวคอนกรีตทั้งสองด้านกว้างกว่า (รูปที่ 4-ข) เพราะคอนกรีต HSC มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีต NC จึงมีความเปราะมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากการอยู่แตกร้าวที่ปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจน ทำให้แผ่นคอนกรีตแยกออกเป็นสามเสียงคล้ายกับคอนกรีต NC กระสุนทะลุผ่านแผ่นคอนกรีตหนา 7.5 เซนติเมตร โดยยิงเพียงนัดเดียว ส่วนแผ่นคอนกรีตหนา 10 เซนติเมตร ยิงเพียงหนึ่งนัด กระสุนไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นคอนกรีตได้ ด้านหน้าของแผ่นคอนกรีตจะเทาออกเล็กน้อยและปรากฏรอยร้าวในแนวราบ (รูปที่ 5-ก) คอนกรีตกำลังสูงหนา 10 เซนติเมตร ต้องยิงกระสุนจำนวนสามนัดที่ต่ำแห่งน่ำเดิมจึงวิบติ ซึ่งต้องใช้จำนวนกระสุนที่มากกว่ากรณีคอนกรีต NC ที่หนา 10 เซนติเมตร แสดงให้เห็นว่า กำลังของคอนกรีตมีนัยคุณซับแรงกระแทกของกระสุนเป็น

### 3.3.3 คอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิเมอร์ PFRC

รูปที่ 4 (ค) แสดงการวิบติของคอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิเมอร์ PFRC หนา 5 เซนติเมตร ผิวน้ำรอบรูเจาะจะเทาออกและปรากฏรอยแตกร้าวขนาดเล็กกว่าผ่านรูที่เกิดจากกระสุนในแนวอน ความเสียหายน้อยกว่าคอนกรีตสองประเภทแรกเนื่องจากเส้นใยพอลิเมอร์มีส่วนช่วยลดรอยแตกร้าว กระสุนเจาะทะลุแผ่นคอนกรีตหนา 5 และ 7.5 เซนติเมตร ด้วยการยิงเพียงนัดเดียว ส่วนคอนกรีตหนา 10 เซนติเมตร ต้องยิงสามนัดที่จุดเดิม กระสุนจึงสามารถทะลุแผ่นคอนกรีต ซึ่งใช้จำนวนกระสุนเท่ากับคอนกรีต HSC

### 3.3.4 คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก SFRC

คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก SFRC วิบติแตกต่างจากคอนกรีตประเภทอื่น คือ ผิวน้ำของแผ่นคอนกรีตจะเทาออกและเสียหายเฉพาะบริเวณที่กระสุนกระทบ เนื้อคอนกรีตมีเส้นใยเหล็กช่วยพยุงไว้ จึงไม่แตกร้าวโดยรอบเหมือนคอนกรีตทั้งสามประเภทข้างต้น (รูปที่ 4-ง) ด้านหลังของแผ่นคอนกรีตจะเทาเป็นเศษชิ้นเล็กใหญ่ปะปนกัน ส่วนใหญ่ยังติดอยู่กับผิวคอนกรีตเนื่องจากแสดงถึงประสิทธิภาพเส้นใยลดการแตกร้าว ซึ่งช่วยป้องกันอันตรายจากสะเก็ดได้ คอนกรีต SFRC หนา 5

เซนติเมตร วิบติจากกระสุนหนึ่งนัด ขณะที่ความหนา 7.5 เซนติเมตร แรงกระแทกของกระสุนเพียงทำให้ผิวน้ำกระเทาะเล็กน้อย (รูปที่ 5-ข) ส่วนความหนา 10 เซนติเมตร จะต้องยิงซ้ำต่ำแห่งน่ำเดิมถึง 5 นัดจึงวิบติ ซึ่งมากสุดในการวิจัยนี้

ตารางที่ 3 จำนวนกระสุนที่ใช้และรูปแบบการวิบติของคอนกรีต

ประเภท คอนกรีต	ความหนา (cm)	กระสุนที่ยิง จนวิบติ (นัด)	ลักษณะวิบติ
NC	5.0	1	เจาะทะลุ
	7.5	1	เจาะทะลุ
	10.0	2	เจาะทะลุ
HSC	5.0	1	เจาะทะลุ
	7.5	1	วิบติแต่ไม่ทะลุ
	10.0	3	เจาะทะลุ
PFRC	5.0	1	เจาะทะลุ
	7.5	1	เจาะทะลุ
	10.0	3	เจาะทะลุ
SFRC	5.0	1	เจาะทะลุ
	7.5	1	ยิงเพียงนัดเดียว (ไม่ทะลุ)
	10.0	5	กะเทาะทั้งหน้าและหลัง

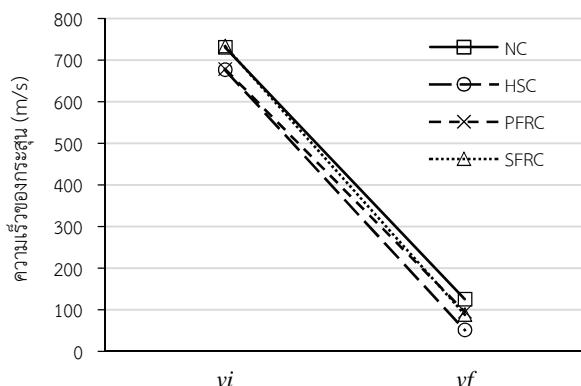
### 3.4 ความสามารถในการดูดซับพลังงานจนล้นและต้านทานการปะทะของกระสุน

การวัดอัตราเร็วของลูกกระสุนก่อน ( $v_i$ ) และหลัง ( $v_f$ ) กระแทกแผ่นคอนกรีต เพื่อคำนวณการดูดซับพลังงานจนล้นของแผ่นคอนกรีตตามสมการที่ (1) ความเร็วของลูกกระสุนก่อนกระแทกแผ่นคอนกรีตความหนา 5 เซนติเมตร มีค่าระหว่าง 650-750 เมตรต่อวินาที หลังจากกระสุนทะลุผ่านแผ่นคอนกรีตแต่ละประเภทแล้ว ความเร็วลดลงเหลือ 25-160 เมตรต่อวินาที (รูปที่ 6)

#### 3.4.1 คอนกรีตหนา 5 เซนติเมตร

กระสุนขนาด 7.62 มิลลิเมตร สามารถเจาะทะลุแผ่นคอนกรีตทุกประเภทโดยยิงเพียงหนึ่งนัด คอนกรีต HSC มีความสามารถดูดซับพลังงานเท่ากับร้อยละ 99.4 (รูปที่ 7) ซึ่งมากกว่าคอนกรีต NC (ร้อยละ 96.9) และแสดงว่า กำลังอัดของคอนกรีตเป็นปัจจัยที่ต้านทานแรงกระแทกของกระสุน

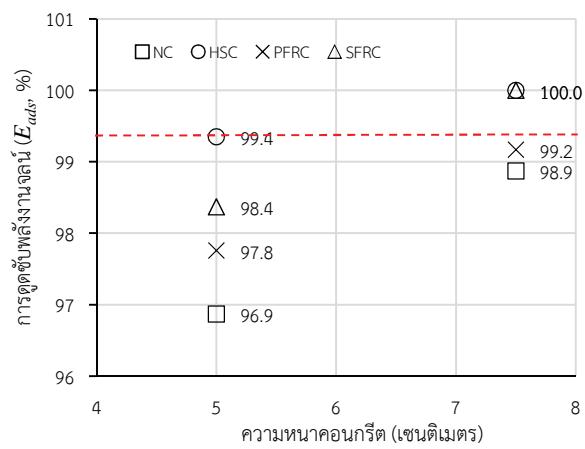
ขณะเดียวกันความเสียหายที่เกิดบนแผ่นคอนกรีต HSC มีมากกว่าคอนกรีต NC (รูปที่ 4) ซึ่งเป็นผลจากความประาะของคอนกรีต คอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยเส้นใย เส้นใยเหล็กมีประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานจนน์ติกว่าเส้นใยพอลิเมอร์ เพราะเส้นใยแข็งแรงกว่า โดยคอนกรีต SFRC และ PFRC ดูดซับพลังงานจนน์ร้อยละ 98.4 และ 97.8 ตามลำดับ สรุปได้ว่า คอนกรีต HSC มีประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานจนน์สูงสุด แต่เกิดความเสียหายมากสุดเช่นกัน คอนกรีต SFRC มีร่องรอยความเสียหายน้อยสุด ดังนั้น แนวความคิดในการใช้เส้นใยเหล็กเสริมคอนกรีตกำลังสูง จะช่วยลดการวิบัติบนแผ่นคอนกรีตและขณะเดียวกันเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานจนน์ ส่วนคอนกรีตที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานจนน์น้อยที่สุดคือ คอนกรีต NC



รูปที่ 6 ความเร็วของกระแสสูญเป็นก้อนและหลังกระแสแตกแผ่นคอนกรีตความหนา 5 เซนติเมตร

### 3.4.2 คอนกรีตหนา 7.5 เซนติเมตร

ลูกกระสุนไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นคอนกรีต HSC และ SFRC หนา 7.5 เซนติเมตร แต่สามารถเจาะทะลุผ่านแผ่นคอนกรีต NC และ PFRC ได้ โดยยิงเพียงนัดเดียว คอนกรีต NC และ PFRC ดูดซับพลังงานกระแสสูญได้ร้อยละ 98.9 และ 99.2 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับคอนกรีต HSC หนา 5 เซนติเมตร (รูปที่ 7) ดังนั้น การเลือกใช้คอนกรีต HSC จะลดความหนาของผนังคอนกรีตได้อย่างน้อย 2.5 เซนติเมตร เมื่อนำมาไปเปรียบเทียบกับการใช้คอนกรีตปกติและคอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิเมอร์ ความหนาของผนังลดลงทำให้น้ำหนักผนังเบาลง สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกและรวดเร็ว



รูปที่ 7 ความสามารถดูดซับพลังงานจนน์ของคอนกรีตหนา 5 และ 7.5 เซนติเมตร

### 3.4.3 คอนกรีตหนา 10 เซนติเมตร

กระสุนไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นคอนกรีตทุกประเภทที่หนา 10 เซนติเมตร โดยการยิงเพียงนัดเดียว ดังนั้น คอนกรีต NC กระสุนทะลุผ่านแผ่นคอนกรีตในนัดที่สอง โดยแผ่นคอนกรีตดูดซับพลังงานกระสุนได้ร้อยละ 99.7 คอนกรีต HSC และ PRFC กระสุนทะลุผ่านแผ่นคอนกรีตในนัดที่สาม โดยดูดกลืนพลังงานกระสุนในนัดที่สาม ร้อยละ 24.9 และ 97.4 ตามลำดับ คอนกรีต HSC จึงสามารถดูดซับพลังงานได้น้อยมากเมื่อคอนกรีตใกล้จะวิบัติ เพราะคอนกรีต HSC มีความสามารถในการดูดซับพลังงานกระสุนได้ดีกว่า ยิ่งกระสุนนัดที่สามทำให้คอนกรีตดูดซับพลังงานจนน์ได้น้อยลง ส่วนคอนกรีต SFRC กระสุนทะลุผ่านแผ่นคอนกรีตในนัดที่ห้า แสดงความเห็นยว่าของแผ่นคอนกรีตที่เสริมเส้นใยเหล็ก โดยเครื่องวัดอัตราเร็วไม่สามารถตรวจจับความเร็วของกระแสสูญหลังทะลุผ่านได้

## 4 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

การพัฒนาคอนกรีตประสิทธิภาพสูงเพื่อใช้ในการป้องกันกระสุนสามารถสรุปและเสนอแนะได้ว่า

### 4.1 สรุปผลวิจัย

1) กรณีผนังคอนกรีตหนา 5 เซนติเมตร คอนกรีตกำลังสูง HSC ต้านทานแรงกระแทกจากกระแสสูนและดูดซับพลังงานจนน์ได้สูงที่สุด

2) การเสริมกำลังด้วยเส้นใยเหล็ก ช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถป้องกันกระแสสูนได้ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งผนังหนา 7.5 และ 10 เซนติเมตร รูปแบบการวิบัติของคอนกรีต SFRC จะเป็นการกระเทาะที่ผิวน้ำและด้านหลังบางส่วน ซึ่งป้องกันไม่ให้เศษคอนกรีตกระเด็นไปทำอันตรายต่อผู้อื่นได้

3) การใช้คอนกรีต HSC และ SFRC ป้องกันกระแสสูนสามารถลดความหนาของผนังลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ โดยที่ประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานยังคงเท่าเดิม

ส่งผลให้ผังมีน้ำหนักเบา สะดวกและรวดเร็วในการประยุกต์ใช้ในสนามรบจริง

#### 4.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรทดลองหล่อคอนกรีตกำลังสูงผสมเส้นใยเหล็กเพื่อศึกษาประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นในการดูดซับพลังงานจน
- 2) งานวิจัยขั้นต่อไป ควรหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อประยุกต์ใช้งานจริง ซึ่งมีปัจจัยความหนี่ียวและกำลังของเหล็กเส้น

### 5 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) โครงการวิจัยทางด้านยุทธภูมิเพื่อพัฒนาศักยภาพของกองทัพและการป้องกันประเทศ ภายใต้โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษา และการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ขอขอบคุณสำนักงานวิจัยและพัฒนาการทางทหารกองทัพบกในการสนับสนุนการวิจัยในด้านต่างๆ ขอบคุณกรมบินพิเศษที่ 4 ค่ายสุขุมวิท สำนักงานวิจัยในการให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทดสอบ เจ้าหน้าที่ และยุทธภัณฑ์ ขอบคุณคณบดีวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวรในการเอื้อเพื่อสถานที่ทำการวิจัยและอุปกรณ์ประกอบการวิจัย

### 6 เอกสารอ้างอิง

- [1] รุ่งรveis เอลิมิครีกิญโญรัช และกองบรรณาธิการโรงเรียนนักข่าวชายแดนใต้. (2555). ยอดความคิดเห็นการเอกสารป่าตานี. โรงเรียนนักข่าวชายแดนใต้. สืบต้นจาก: <http://www.deepsouthwatch.org/dsj/3676>
- [2] Yang, H., Song, H., & Zhang, S. (2015). Experimental investigation of the behavior of aramid fiber reinforced polymer confined concrete subjected to high strain-rate compression. *Construction and Building Materials*, 95, 143-151.
- [3] Alberti, M. G., Enfedaque, A., & Gálvez, J. C. (2015). Comparison between polyolefin fibre reinforced vibrated conventional concrete and self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 85, 182-194.

- [4] Mertol, H. C., Baran, E., & Bello, H. J. (2015). Flexural behavior of lightly and heavily reinforced steel fiber concrete beams. *Construction and Building Materials*, 98, 185-193.
- [5] Zamanzadeh, Z., Lourenço, L., & Barros, J. (2015). Recycled Steel Fibre Reinforced Concrete failing in bending and in shear. *Construction and Building Materials*, 85, 195-207.
- [6] Banthia, N., & Sappakittipakorn, M. (2007). Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. *Cement and Concrete Research*, 37(9), 1366-1372.
- [7] Tassew, S. T., & Lubell, A. S. (2014). Mechanical properties of glass fiber reinforced ceramic concrete. *Construction and Building Materials*, 51, 215-224.
- [8] Sukontasukkul, P., Jamnam, S., Rodsin, K., & Banthia, N. (2013). Use of rubberized concrete as a cushion layer in bulletproof fiber reinforced concrete panels. *Construction and Building Materials*, 41, 801-811.
- [9] Office of Law Enforcement Standards (OLES), & United States of America. (2008). Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06.
- [10] ASTM Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete and Shotcrete. ASTM C 1116-91. ( 1991). West Conshohocken, PA: ASTM.
- [11] ASTM Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete, ASTM A820 / A820M – 11. (1991). West Conshohocken, Pa: ASTM.
- [12] ASTM Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM C33/ C33M-13, ASTM. (1991). West Conshohocken, Pa: ASTM.
- [13] Medina, N. F., Barluenga, G., & Hernández-Olivares, F. (2014). Enhancement of durability of concrete composites containing natural pozzolans blended cement through the use of Polypropylene fibers. *Composites Part B: Engineering*, 61, 214-221.
- [14] Bagherzadeh, R., Pakravan, H. R., Sadeghi, A. H., Latifi, M., & Merati, A. A. (2012). An investigation on adding polypropylene fibers to reinforce lightweight cement composites (LWC). *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 7(4), 13-21.
- [15] Ferro, G., Tulliani, J. M., Jagdale, P., & Restuccia, L. (2014). New Concepts for Next Generation of High Performance Concretes. *Procedia Materials Science*, 3, 1760-1766.

## วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดเชิงชีวภูมิศาสตร์และการประยุกต์ใช้

### Biogeography-based Optimisation method and its applications: A survey

สายสัมพันธ์ ชุ้นเจริญ<sup>1</sup> ศรีสัจจา วิทยศักดิ์<sup>2\*</sup> ภูพงษ์ พงษ์เจริญ<sup>3\*</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: <sup>1</sup>saisumpans@gmail.com, <sup>2</sup>srisatjav@nu.ac.th, <sup>3</sup>pupongp@nu.ac.th

#### บทคัดย่อ

วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดเชิงชีวภูมิศาสตร์ (Biogeography-based Optimisation: BBO) เป็นหนึ่งในวิธีการทางเมต้าอิวาริสติกส์ (Metaheuristics) ที่ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2551 และได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาหลากหลายแขนง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรม บทความวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิธีการ BBO โดยสืบค้นบทความที่เกี่ยวข้องจากฐานข้อมูลวิชาการระดับนานาชาติ กล่าวคือ ฐานข้อมูล ISI Web of Science, Scopus และ IEEE Xplore ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2551-2558 โดยอธิบายถึงแนวคิด ขั้นตอน และการประยุกต์ใช้วิธีการ BBO รวมทั้งการจำแนกกลุ่มและการดำเนินการ ตลอดจนการวิเคราะห์และสังเคราะห์ ทิศทางและแนวโน้มของการวิจัยในอนาคต

**คำสำคัญ:** วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดเชิงชีวภูมิศาสตร์, เมต้าอิวาริสติกส์, การทบทวนวรรณกรรม

#### Abstract

Biogeography-based Optimisation (BBO) introduced in 2008 is one of the metaheuristics methods and has been continuously and successfully applied to solve optimisation problems especially in the field of engineering design. This paper presents the survey of BBO-related articles indexed by the international academic databases including ISI Web of Science, Scopus, and IEEE Xplore during 2008-2015. The BBO concept, basic application, classification, critical analysis and synthesis are presented in order to foresee the directions of future research.

**Keyword:** Biogeography based Optimisation method, Metaheuristics, Literature review.

#### 1. บทนำ

ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดในความเป็นจริง (Real-world optimisation problem) ส่วนใหญ่จะเป็นปัญหาที่ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของปัญหาประเภทอื่นพิแบบยาก (Non-deterministic Polynomial-time hard; NP-hard) [1] ปัญหาประเภทนี้จะไม่มีวิธีการแก้ปัญหา (Algorithm) ที่มีประสิทธิภาพเพื่อนำมาใช้ในการแก้ปัญหา และเวลาที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้นไม่สามารถระบุให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันพหุนามได้ (Non-deterministic Polynomial-time) ตัวอย่างของปัญหาประเภทนี้ เช่น ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Travelling Salesman Problem; TSP) ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ (Vehicle Routing Problem; VRP) ปัญหาการจัดตาราง (Scheduling problem) [2] ปัญหาการจัดวางเครื่องจักร (Machine layout problem) [3] และปัญหาการเปรียบเทียบยีนหรือโครโนไซม์ในวงการแพทย์ (DNA matching) [4]

การแก้ปัญหา NP-hard ด้วยกลุ่มวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบดั้งเดิม (Conventional Optimisation Algorithms: COA) เช่น วิธีการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) และวิธีการขั้นตอนวิธีขยายและจำกัดเขต (Branch and Bound) ต้องการเวลานานในการค้นหาคำตอบโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อแก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่ วิถีแนวทางหนึ่งคือการใช้กลุ่มวิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดโดยอาศัยหลักการประมาณค่าคำตอบ (Approximation Optimisation Algorithms: AOA) [5] เพื่อลดเวลาที่ต้องใช้ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimal solution) ด้วยการประมาณค่าคำตอบที่ใกล้เคียง (Near optimal solutions) ทั้งนี้วิธีการในกลุ่ม AOA นั้นสามารถแบ่งได้อีก 2 กลุ่มย่อยได้แก่ กลุ่มวิธีการหาคำตอบแบบกำหนดโครงสร้างในการสร้างคำตอบ (Constructive approaches) ซึ่งเป็นกลุ่มวิธีการที่มีรูปแบบเฉพาะในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาใดปัญหานั่น เช่น วิธีการเส้นทางวิกฤติ

(Critical Path Method) การวางแผนความต้องการวัสดุ (Material Requirement Planning) และวิธีการจัดลำดับงาน ด้วยกฎการจัดลำดับ (Sequencing rules) เป็นต้น

อีกกลุ่มวิธีการหนึ่งที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา คือ กลุ่มวิธีการหาคำตอบแบบวนรอบซ้ำ (Iterative approaches) และปัจจุบัน วิธีการกลุ่มนี้ ถูกเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า วิธีการเมต้าอิวาริสติกส์ (Metaheuristics) ซึ่งเป็นกลุ่มวิธีที่ใช้กลไกการวนรอบซ้ำเพื่อปรับปรุงคำตอบให้ดีขึ้นในแต่ละรอบการค้นหา และใช้การจำลองความคลาดจากทางธรรมชาติตามาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคำตอบในรอบการวนซ้ำ เช่น วิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) [6] วิธีการอุบัติจริง (Simulated Annealing: SA) [7] วิธีการค้นหาต้องห้าม (Taboo Search: TS) [8] วิธีการค้างคาว (Bat Algorithm: BA) [9] และ วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดเชิงชีวภูมิศาสตร์ (Biogeography-based Optimisation: BBO) [10] เป็นต้น ในกลุ่มวิธีการนี้ วิธีการ BBO ถือว่าวิธีการที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาใหม่ในทศวรรษปัจจุบัน

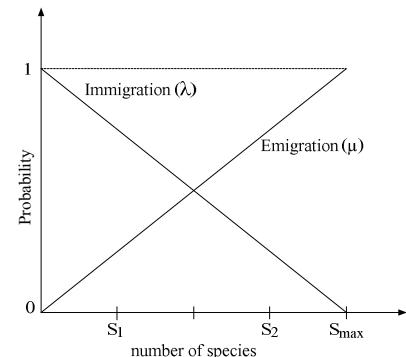
วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดเชิงชีวภูมิศาสตร์ (Biogeography-based Optimisation: BBO) ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Simon [10] ในปี พ.ศ. 2551 หลังจากนั้นเป็นต้นมา วิธีการ BBO ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาหลายประเภท เช่น ปัญหาการคัดเลือก อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณสำหรับการประเมินสภาพเครื่องยนต์ ของอากาศยาน [10] ปัญหาการออกแบบการจัดวางเครื่องจักร (Machine layout design problem) [11, 12] ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling Salesman Problem: TSP) [13] ปัญหาการจัดตารางการผลิต (Scheduling problem) [14] เป็นต้น ทั้งนี้ได้มีบทความตีพิมพ์จำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับ การประยุกต์ใช้วิธีการ BBO จากหลายฐานข้อมูลทางวิชาการใน ระดับนานาชาติ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงระดับความนิยมและทักษิภพ ของวิธีการ BBO เพื่อนำไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหา

ดังนั้น บทความวิจัยนี้จึงนำเสนอผลการบททวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการ BBO โดยจะเริ่มต้นด้วยการนำเสนอแนวคิดของวิธีการ BBO ในลำดับถัดไป ตามด้วยการนำเสนอขั้นตอนการทำงานของวิธีการ BBO ในหัวข้อที่ 3 และ การสรุปรวมวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิธีการ BBO ในหัวข้อที่ 4 หลังจากนั้น นำเสนอการจำแนกกลุ่มของการทำวิจัยของวิธีการ BBO ในหัวข้อที่ 5 และในส่วนสุดท้ายได้ทำการนำเสนอการ วิเคราะห์และสังเคราะห์แนวทางการทำงานวิจัยในอนาคต ใน หัวข้อที่ 6 ตามด้วยบทสรุปในหัวข้อที่ 7

## 2. แนวคิดของวิธีการ BBO

วิธีการ BBO เป็นวิธีที่ได้รับแรงบันดาลใจจากกลไกของการ อพยพป้ายถิ่นฐาน (Migration mechanism) ของชนิดพันธุ์ใน ธรรมชาติของระบบบิเวศใดๆ และปัจจุบันที่มีการอพยพป้ายถิ่น

ฐานไปสู่ถิ่นที่อยู่ใหม่ และอาจเป็นถิ่นที่อยู่ที่ยังไม่เกิดความสมดุล ทางธรรมชาติ หรืออาจมีจำนวนของชนิดพันธุ์ที่แตกต่างไปจาก เดิมนั้น ย่อมส่งผลให้สั่งมีชีวิตจำเป็นต้องมีกลไกการเปลี่ยนแปลง หรือกลไกพันธุ์ (Mutation mechanism) เพื่อการปรับตัวให้อยู่ รอดในสิ่งแวดล้อมใหม่ต่อไป ทั้งนี้ ความสมดุลระหว่างอัตราการ อพยพและจำนวนชนิดพันธุ์ในถิ่นฐานของระบบบิเวศ สามารถ แสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ความสมดุลของความน่าจะเป็นในการอพยพ กับจำนวนชนิดพันธุ์ [10, 15]

จากรูปที่ 1 ถนนอน แสดงถึงจำนวนชนิดพันธุ์ (Number of species) ที่มีความหลากหลายในแต่ละถิ่นที่อยู่ (Habitat) ภายใน ระบบบิเวศหนึ่งๆ ขณะที่แนวแกนตั้ง แสดงถึงอัตราการอพยพ ซึ่ง โดยปกติจะมีทั้งการอพยพออก (Emigration) และอพยพเข้า (Immigration) ทั้งนี้ระดับความสมดุลของชนิดพันธุ์ในแต่ละถิ่นที่ อยู่ จะมีผลต่อการร้ายถิ่นฐานของชนิดพันธุ์ จากเส้นกราฟการ อพยพออก จะเห็นได้ว่า ถ้าไม่พบว่ามีชนิดพันธุ์ในถิ่นที่อยู่ ย่อมไม่ เกิดความน่าจะเป็นของการอพยพออก ( $\mu=0$ ) แต่จะพบการ อพยพเข้าเท่านั้น ในทางตรงกันข้าม ถ้าพบว่ามีชนิดพันธุ์ครบทุก ชนิด ( $S_{max}$ ) ในถิ่นที่อยู่แล้ว หรือกล่าวได้ว่าเป็นถิ่นที่อยู่ที่สมบูรณ์ มีค่าดัชนีความเหมาะสมของถิ่นที่อยู่ (Habitat Suitability Index: HSI) สูง การอพยพเข้าของชนิดพันธุ์เดิมที่มีอยู่แล้ว ย่อม ไม่ได้ส่งผลใดๆ จึงไม่ต้องมีความน่าจะเป็นในการเกิดการอพยพ เข้า ( $\lambda=0$ )

ตามแนวแกนบนนี้ จะเห็นตัวอย่างคำตอบ ( $Solution_n$ ;  $S_n$ ) อยู่ท้ายคำตอบ เช่น  $S_1$  และ  $S_2$  ซึ่งเป็นคำตอบที่มีความ หลากหลายของชนิดพันธุ์ในถิ่นที่อยู่ที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ตัวอย่าง คำตอบ  $S_1$  เป็นตัวแทนของถิ่นที่อยู่ (Habitat) ที่ไม่ดี ไม่สมบูรณ์ มีค่าดัชนีความเหมาะสมของถิ่นที่อยู่ต่ำ (Low HSI) มีความ หลากหลายของชนิดพันธุ์ต่ำ หรือขาดสมดุลของชนิดพันธุ์ในถิ่นที่ อยู่นั้น จึงควรเปิดโอกาสให้มีความน่าจะเป็นของการอพยพเข้า ( $\lambda$ ) สูงขึ้น เพื่อหวังจะเพิ่มระดับความหลากหลายและเร่งการปรับ เข้าสู่สมดุลของชนิดพันธุ์ให้เร็วขึ้น

ในทางกลับกัน ตัวอย่างคำตอบ  $S_2$  เป็นตัวแทนของถินที่อยู่ (Habitat) ที่ดีและสมบูรณ์ มีค่าดัชนีความเหมาะสมของถินที่อยู่สูง (High HSI) มีความหลากหลายของชนิดพันธุ์สูง กล่าวคือ มีสมดุลของชนิดพันธุ์ในถินที่อยู่นั้นค่อนข้างดี จึงไม่มีความจำเป็นต้องเปิดโอกาสให้มีความน่าจะเป็นของการอพยพเข้าสูงนัก แต่ควรเปิดโอกาสให้มีความน่าจะเป็นของการอพยพออก ( $\mu$ ) เพื่อหวังว่าจะสร้างสมดุลที่ดีของชนิดพันธุ์ (Species) ในถินที่อยู่ (Habitat) นั้นให้เป็นแหล่งขยายชนิดพันธุ์ไปสู่ถินที่อยู่อื่นที่มีระดับความหลากหลายของชนิดพันธุ์ที่ต่ำกว่า ทั้งนี้ความสมดุลนี้ ระหว่างความน่าจะเป็นของการอพยพเข้า/ออกและจำนวนชนิดพันธุ์ในถินฐานของระบบบินิเวศ ที่แสดงไว้ด้วยรูปที่ 1 นั้น จะเป็นกลไกที่สำคัญและถูกใช้ในขั้นตอนการทำงานของวิธีการ BBO ต่อไป

### 3. ขั้นตอนการทำงานวิธีการ BBO

การทำงานของวิธีการ BBO [10] แสดงเป็นแผนผังการไหล (Flow chart) ได้ดังรูปที่ 2 ทั้งนี้ขั้นตอนการทำงานของวิธีการดังกล่าว สามารถแบ่งได้ 16 ขั้นตอน ดังนี้

#### ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์

พารามิเตอร์ของวิธีการ BBO ประกอบด้วย จำนวนของถินที่อยู่ในระบบบินิเวศ (A group of  $n$  habitats) จำนวนรอบการวนซ้ำ (Number of iterations:  $I_{max}$ ) ความน่าจะเป็นของจำนวนคำตอบที่จะเกิดการปรับปรุงคำตอบ (Probability of modification:  $P_{mod}$ ) และอัตราการกลายพันธุ์สูงสุด (Maximum mutation rate:  $M_{max}$ ) [10] การกำหนดค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของวิธีการนี้ ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อต่อไป

#### ขั้นตอนที่ 2 การสร้างคำตอบเริ่มต้น

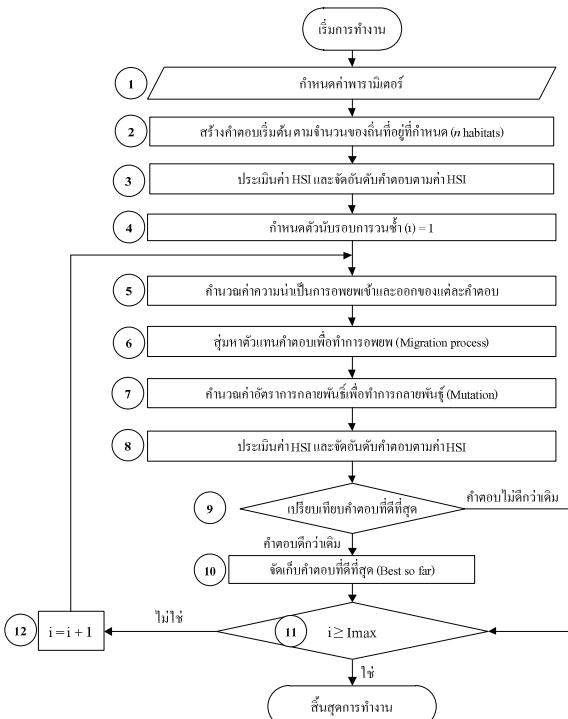
การสร้างถินที่อยู่ (Habitats) หรือกลุ่มคำตอบเริ่มต้น (Candidate solutions) นั้น จะถูกสร้างตามจำนวนถินที่อยู่ในระบบบินิเวศ ( $n$  habitats) ที่ได้กำหนดไว้ในขั้นตอนที่ 1

#### ขั้นตอนที่ 3 การประเมินค่าคำตอบ และจัดอันดับตามคุณภาพของแต่ละคำตอบ

คำตอบเริ่มต้นที่ได้สร้างขึ้นไว้ในขั้นตอนที่ 2 จะได้รับการประเมินค่าดัชนีความเหมาะสมของถินที่อยู่ (Habitat suitability index: HSI) โดยใช้สมการประเมินความเหมาะสม (Fitness function)

คำตอบทั้งหมดภายในระบบบินิเวศ จะถูกนำมาจัดเรียงอันดับโดยพิจารณาจากค่าดัชนีความเหมาะสม ที่เรียงลำดับจากน้อยไป

มาก ซึ่งอันดับของคำตอบที่ได้นั้น จะถูกนำไปใช้ในขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคำตอบต่อไป



รูปที่ 2 ขั้นตอนการทำงานของวิธีการ BBO

#### ขั้นตอนที่ 4 การกำหนดรอบเริ่มต้นของการวนซ้ำ

ทำการกำหนดให้รอบเริ่มต้นของการวนซ้ำ ในรอบการค้นหาที่ 1 มีค่าเท่ากับ 1 ( $i = 1$ )

#### ขั้นตอนที่ 5 การคำนวณค่าความน่าจะเป็นการอพยพเข้า ( $\lambda$ ) และออก ( $\mu$ ) ของแต่ละคำตอบ

ค่าอัตราการอพยพเข้า ( $\lambda_k$ ) และค่าอัตราการอพยพออก ( $\mu_k$ ) สำหรับถินที่อยู่ในลำดับที่  $k$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ [10]

$$\lambda_k = I \left( 1 - \frac{k}{n} \right) \quad (1)$$

$$\mu_k = \frac{Ek}{n} \quad (2)$$

โดย  $k$  คือ อันดับของถินที่อยู่ มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง  $n$

$n$  คือ จำนวนถินที่อยู่ทั้งหมดภายในระบบบินิเวศ

$E$  คือ ความน่าจะเป็นในการอพยพเข้าสูงสุด ( $E = 1$ )

$k$  คือ ความน่าจะเป็นในการอพยพออกสูงสุด ( $E = 1$ )

### ขั้นตอนที่ 6 การสุ่มหาคำตอบ เพื่อทำการอพยพ (Migration)

ในขั้นตอนของการอพยพของชนิดพันธุ์ (Species:  $s$ ) ระหว่าง ถินที่อยู่นั้น กล่าวคือชนิดพันธุ์อาจจะอพยพออกจากถินที่อยู่หนึ่ง ไปยังอีกถินที่อยู่หนึ่ง ดังนั้นจึงต้องมีการสุ่มเลือกถินที่อยู่ที่จะมีการอพยพออกจากชนิดพันธุ์ ( $Y_k$ ) โดยใช้หลักความน่าจะเป็นของการอพยพเข้า เมื่อสุ่มเลือกได้แล้ว จึงทำการอพยพชนิดพันธุ์ ( $s$ ) จากถินที่อยู่หนึ่ง ไปยังอีกถินที่อยู่หนึ่ง  $[Z_k(s) \leftarrow Y_k(s)]$  ทั้งนี้จำนวนถินที่อยู่ที่จะถูกคัดเลือกทั้งหมด จะต้องมีสัดส่วนที่สอดคล้องกับค่าความน่าจะเป็นของจำนวนคำตอบที่จะถูกปรับปรุงในกระบวนการอพยพ ( $P_{mod}$ ) [10] เช่น ถ้ากำหนดค่า  $P_{mod}$  เท่ากับ 0.9 หมายความว่า จำนวนคำตอบที่จะถูกสุ่มคัดเลือกในกระบวนการอพยพ ควรมีค่าเป็นร้อยละ 90 ของคำตอบทั้งหมด

### ขั้นตอนที่ 7 การคำนวณอัตราการกลยุทธ์พันธุ์

ขั้นตอนการกลยุทธ์พันธุ์เป็นขั้นตอนการเพิ่มความหลากหลายให้กับถินที่อยู่ (Habitats) ในระบบบิวต์ ซึ่งเป็นการเปิดโอกาสในการพัฒนาความสมบูรณ์ของถินที่อยู่ให้มีความหลากหลายของชนิดพันธุ์สูงขึ้น และห่วงว่าจะมีส่วนช่วยให้ค่าดัชนีความเหมาะสมของถินที่อยู่ดีขึ้น (Higher HSI) ทั้งนี้ขั้นตอนการกลยุทธ์พันธุ์ไม่ได้กำหนดรูปแบบไว้ตายตัว และที่ผ่านมา มีรูปแบบการกลยุทธ์พันธุ์หลากหลาย [10] [13] [16]

### ขั้นตอนที่ 8 ประเมินค่า HSI และจัดอันดับคำตอบตามค่า HSI (ให้ดำเนินการเหมือนขั้นตอนที่ 3)

### ขั้นตอนที่ 9 – 10 การเปรียบเทียบและจัดเก็บคำตอบที่ดีที่สุด

เป็นขั้นตอนการเปรียบเทียบคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละรอบ (Local best) กับคำตอบที่ดีที่สุดจากการค้นหาทุกๆรอบที่ผ่านมา (Best so far: BSF) ทั้งนี้เมื่อพบคำตอบที่ดีกว่า จะทำการบันทึกคำตอบ BSF ตัวใหม่ แทนคำตอบเดิมที่แย่กว่า

### ขั้นตอนที่ 11 – 12 การตัดสินใจเพื่อหยุดการทำงาน

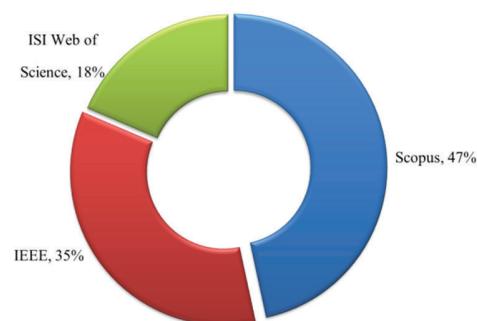
ในทุกรอบของการค้นหาคำตอบของวิธีการ BBO นั้น จะต้องมีการตัดสินใจถึงการหยุดการวนรอบการค้นหา โดยเปรียบเทียบจำนวนรอบการวนซ้ำที่ผ่านมา ( $i$ ) กับจำนวนรอบของการวนซ้ำสูงสุด ( $I_{max}$ ) ถ้าค่า  $i$  น้อยกว่า  $I_{max}$  หมายความว่า การค้นหาคำตอบของวิธีการ BBO ยังไม่ครบ จึงวนกลับไปที่ขั้นตอนที่ 5

## 4. การรวมมารณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิธีการ BBO

มารณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิธีการ BBO ได้ถูกสืบค้นจากสามฐานข้อมูลวิชาการในระดับนานาชาติ คือ ISI Web of Science,

Scopus และ IEEE Xplore โดยสืบค้นครั้งสุดท้าย ณ วันที่ 31 ธันวาคม 2558 และได้กำหนดช่วงเวลาการสืบค้นในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2551 ซึ่งเป็นปีที่วิธีการ BBO ถูกตีพิมพ์ในวารสารเป็นครั้งแรก ถึงปี พ.ศ. 2558 และได้ใช้คำสำคัญในการสืบค้น คือ Biogeography-based Optimisation หรือ Biogeography Based Optimisation และได้ระบุให้สืบค้นจากชื่อเรื่อง (Article title) บทคัดย่อ (Abstract) หรือจากคำสำคัญ (Keywords) ผลลัพธ์ที่ได้จากการสืบค้นจากทั้ง 3 ฐานข้อมูล ได้ถูกคัดลอกลงในโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อการจัดการเอกสารอ้างอิงที่มีชื่อว่า EndNote เพื่อตรวจสอบบทความที่ซ้ำซ้อนและลบบทความที่เหมือนกันทั้งไป สุดท้ายจึงพบจำนวนบทความทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับวิธีการ BBO ทั้งสิ้น 414 บทความ ซึ่งจะมีการทำวิจัยที่แตกต่างกันทั้งด้านลักษณะปัญหา และรูปแบบการประยุกต์ใช้วิธีการ BBO

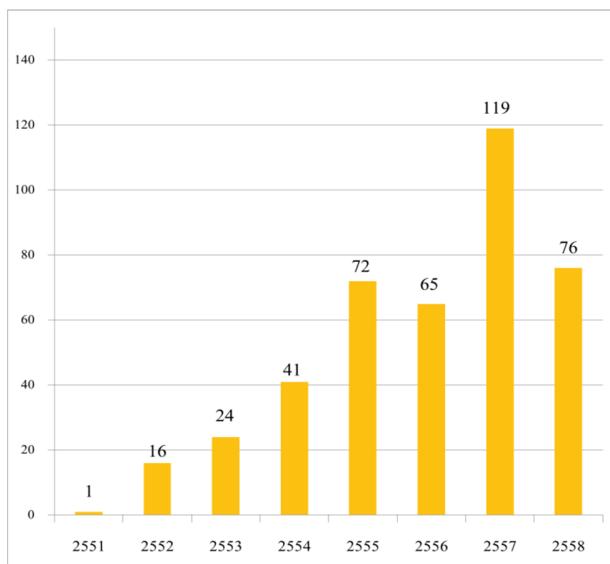
ในจำนวนบทความดังกล่าว เป็นบทความที่ค้นพบจากฐานข้อมูล Scopus คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 47 เป็นบทความจากฐานข้อมูล IEEE Xplore คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 35 และบทความจากฐานข้อมูล ISI Web of Science คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 18 แสดงตั้งในรูปที่ 3 ทั้งนี้ จากการศึกษาแนวโน้มของจำนวนบทความที่มีการตีพิมพ์เผยแพร่ในแต่ละปี ตั้งแต่ปีแรกที่มีการตีพิมพ์วิธีการ BBO จนถึงปี 2558 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งจะเห็นว่า วิธีการ BBO ได้รับสนใจเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปี พ.ศ. 2557 มีจำนวนบทความเพิ่มขึ้นเกือบท่าตัวเมื่อเปรียบเทียบกับปี พ.ศ. 2556 แต่ยังมีข้อสังเกตว่า จำนวนบทความในปี พ.ศ. 2558 มีจำนวนน้อยลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการค้นหาข้อมูลวิชาการที่ถูกสืบค้น ณ วันที่ 31 ธันวาคม 2558 นั้น อาจจะยังได้รับข้อมูลบทความที่ตีพิมพ์จากวารสารต่างๆ ไม่ครบถ้วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้อมูลบทความที่ถูกตีพิมพ์เผยแพร่ในช่วงปลายปี พ.ศ. 2558



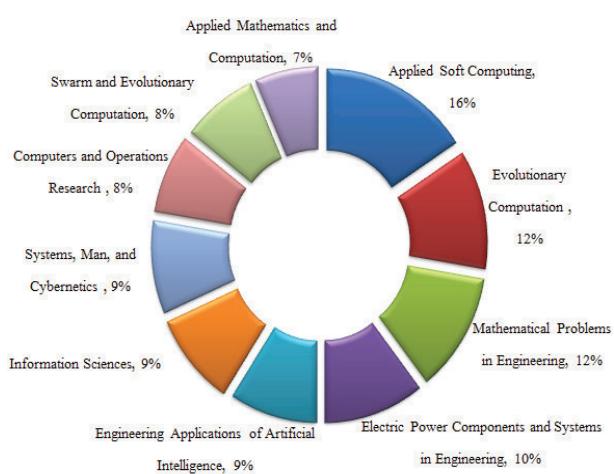
รูปที่ 3 จำนวนบทความในแต่ละฐานข้อมูล

เมื่อจำแนกตามประเภทการตีพิมพ์เผยแพร่ของบทความพบว่า มีบทความเผยแพร่ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ จำนวน 136 บทความ หรือคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 32.77 ของจำนวน

บทความทั้งหมด ขณะที่มีบทความตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ จำนวน 279 บทความ หรือคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 67.23 โดยวารสารที่มีจำนวนบทความวิจัยตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับวิธีการ BBO สูงสุดเป็นอันดับแรกคือ Applied Soft Computing มีจำนวนทั้งสิ้น 75 บทความ รองลงมาคือ Evolutionary Computation, Mathematical Problems in Engineering, Electric Power Components and Systems และ Engineering Applications of Artificial Intelligence ตามลำดับ ซึ่งวารสารที่มีการตีพิมพ์บทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการ BBO 10 อันดับแรก แสดงเป็นสัดส่วนดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 จำนวนบทความที่เกี่ยวข้องกับวิธีการ BBO ในแต่ละปี



รูปที่ 5 วารสารที่มีปริมาณการตีพิมพ์บทความที่เกี่ยวข้องกับวิธีการ BBO มากที่สุด 10 อันดับแรก

## 5. การจำแนกกลุ่มของการทำวิจัยของวิธีการ BBO

บทความวิจัยที่เกี่ยวกับวิธีการ BBO สามารถจำแนกโดยใช้เกณฑ์ในการจำแนกที่สำคัญได้ดังนี้ คือ จำแนกโดยใช้ขอบเขตเนื้อหา (Subject areas) ที่กล่าวถึงในบทความ และรูปแบบของ การประยุกต์ใช้วิธีการ BBO ใน การแก้ปัญหา โดยบทความทั้ง 414 บทความ ได้ถูกจำแนกตามเกณฑ์ดังกล่าว ดังตารางที่ 1 และ อธิบาย พร้อมยกตัวอย่างประกอบ ดังนี้

### 5.1 ขอบเขตเนื้อหา (Subject areas)

ขอบเขตเนื้อหา (Subject areas) ที่ประยุกต์ใช้วิธีการ BBO แบ่งเป็น 4 กลุ่มย่อย ตามการจำแนกจากฐานข้อมูล Scopus ซึ่ง ประกอบด้วย กลุ่มชีวิทยาศาสตร์ (Life Sciences) กลุ่ม วิทยาศาสตร์สุขภาพ (Health Sciences) กลุ่มสังคมศาสตร์และมนุษย์ (Social Sciences & Humanities) และกลุ่มวิทยาศาสตร์กายภาพ (Physical Sciences) โดยบางบทความที่ถูกค้นพบ เนพาะฐานข้อมูล ISI และ IEEE Xplore จะถูกนำมาจัดเข้าสู่กลุ่ม ย่อยดังกล่าว เช่นกัน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 5.1.1 ชีวิทยาศาสตร์ (Life Sciences)

บทความวิจัยในกลุ่มนี้มีจำนวน 12 บทความ ทั้งนี้งานวิจัย ด้านชีวิทยาศาสตร์จะเกี่ยวข้องกับการศึกษาโครงสร้างทางชีววิทยาของสิ่งมีชีวิต (Biological) [17] รวมไปถึงงานทางด้านเกษตรกรรม (Agricultural) ชีวเคมี (Biochemistry) ภูมิคุ้มกัน วิทยา (Immunology) เภสัชวิทยา (Pharmacology) พิษวิทยา (Toxicology) เป็นต้น ด้วยบทความที่ประยุกต์ใช้วิธีการ BBO แก้ปัญหาทางด้านชีวิทยาศาสตร์ เช่น งานวิจัยของ Liu et al. [18] ประยุกต์ใช้วิธีการ BBO เพื่อการพัฒนาประสิทธิภาพการวินิจฉัย และจัดหมวดหมู่โคมะเริงด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีความซับซ้อนทางชีววิทยา เพื่อให้ได้มาซึ่งตัวบ่งชี้ทางชีวภาพ (Biomarker) จากการค้นหาและระบุซับเซตของยีนที่มีความพิเศษ จำกจำนวนยีนตัวอย่างที่เก็บมาทั้งหมด

#### 5.1.2 วิทยาศาสตร์สุขภาพ (Health Sciences)

บทความวิจัยในกลุ่มนี้มีจำนวน 6 บทความ งานวิจัยด้านนี้จะ เกี่ยวข้องกับศาสตร์ทางการแพทย์ การพยาบาล ทันตแพทย์ สัตวศาสตร์ และศาสตร์ทางด้านสุขภาพอื่นๆ ยกตัวอย่าง เช่น งานวิจัยของ Srivastava et al. [19] ประยุกต์ใช้วิธีการ BBO ใน การตรวจสอบความถูกต้องของเบป์ไทด์ ใน การระบุไมเลกุลของสารประกอบหลักกลุ่ม 1 ที่สามารถทำให้เนื้อเยื่อเข้ากันได้ (Major Histocompatibility Complex Class I) ซึ่งการตรวจสอบความถูกต้องของเบป์ไทด์ เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการผลิตวัคซีนที่มี ประสิทธิภาพต่อการรักษาโรคที่เกี่ยวข้องกับระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย

ตารางที่ 1 ตารางสรุปการจำแนกบทความที่ได้สืบคันในช่วง 8 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ. 2551 ถึง พ.ศ. 2558)

หัวข้อ	รายละเอียด	จำนวน	หมายเลขอ้างอิงบทความ
ขอบเขต เนื้อหา (Subject areas)	ชีวิทยาศาสตร์ (Life Sciences)	12	18-29
	วิทยาศาสตร์สุขภาพ (Health Sciences)	6	19, 22, 23, 25, 27, 28
	สังคมศาสตร์และมนุษย์ (Social Sciences & Humanities)	40	15, 19, 21-23, 27, 28, 30-62
	วิทยาศาสตร์กายภาพ (Physical Sciences)	367	10, 13, 14, 16, 63-253, 288, 286-431, 254-425
รูปแบบการ ประยุกต์ใช้ วิธีการ BBO	การประยุกต์ใช้วิธีการ BBO แบบดั้งเดิม (Conventional BBO)	164	13, 14, 21, 24, 25, 27-29, 31, 36, 39, 48, 49, 53, 57-60, 62, 63, 66, 74-76, 79-81, 83, 84, 87, 92-95, 97-102, 109-111, 118, 122, 124, 128, 132, 135, 137, 140, 142-144, 147, 149-151, 153, 156-158, 162, 164-167, 171-173, 175, 177-179, 182-188, 193-195, 197, 198, 200, 202, 203, 205, 211-214, 217, 220, 223, 224, 226-228, 231, 234, 236, 238, 240, 242, 243, 248, 249, 254, 256, 259, 263, 266, 268, 269, 274, 282, 285, 290, 295, 297, 299, 300, 303, 308, 313, 315, 318, 323-325, 337, 339, 340, 342, 356-358, 363, 366, 375, 377, 378, 380, 382, 386, 389, 393, 395, 396, 399, 404-409, 411, 414, 416, 418, 426
	การปรับปรุงวิธีการ BBO โดยการปรับแต่ง (Modification) กระบวนการ	99	16, 18, 20, 30, 34, 37, 43, 46, 67, 68, 71, 89-91, 105, 112, 114, 115, 119, 120, 123, 126, 130, 133, 136, 145, 148, 155, 160, 176, 189-191, 206, 207, 215, 222, 225, 229, 230, 235, 237, 247, 250-252, 255, 257, 262, 265, 270-273, 278, 279, 284, 286, 288, 289, 291, 293, 294, 298, 309, 316, 317, 319, 333-335, 346-348, 353, 355, 359, 362, 365, 371, 373, 374, 384, 390, 392, 398, 400, 401, 403, 410, 412, 413, 415, 417, 421-425
	การนำวิธีการ BBO ไปผสมผสาน (Hybridisation) กับวิธีการหาคำตอบอื่น	94	19, 22, 23, 26, 32, 33, 35, 41, 45, 52, 54, 55, 61, 72, 78, 85, 86, 88, 96, 103, 104, 106-108, 113, 117, 121, 129, 131, 134, 138, 141, 146, 152, 154, 159, 161, 163, 170, 199, 204, 208-210, 216, 218, 219, 221, 232, 241, 246, 253, 258, 260, 264, 276, 277, 280, 281, 292, 296, 301, 302, 305, 306, 310-312, 314, 322, 326, 328-331, 338, 341, 343-345, 350-352, 361, 367, 369, 379, 387, 388, 391, 394, 397, 419, 420

### 5.1.3 สังคมศาสตร์และมนุษย์ (Social Sciences & Humanities)

บทความวิจัยในกลุ่มนี้มีจำนวน 40 บทความ อย่างเช่น Chatterjee et al. [59] นำเสนอเทคนิคการแบ่งภาพบนพื้นฐานของเส้นแบ่งสามระดับ (Three-level thresholding based image segmentation technique) สำหรับใช้แบ่งภาพสแกนส่วนหัวมนุษย์ที่ได้จากเครื่องซีทีสแกน (CT-Scan) โดยได้นำวิธีการ BBO เข้ามาแบ่งส่วนของภาพสแกนเพื่อหาเส้นแบ่ง (Three-level thresholding) ที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ยังพัฒนาวิจัยที่ประยุกต์ใช้วิธีการ BBO เพื่อการบูรณะรูปภาพ (Image restoration) [87] เพื่อใช้แก้ปัญหาการจับคู่รูปภาพ (Image matching problem) [249] เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพการประเมินสิ่งเคลื่อนไหวในการเข้ารหัสวีดีทัศน์ (Motion estimation in video encoding) [132, 193]

### 5.1.4 วิทยาศาสตร์กายภาพ (Physical Sciences)

การประยุกต์ใช้วิธีการ BBO มีขอบเขตเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์กายภาพมากที่สุดถึง 367 บทความ ดังตารางที่ 1 งานวิจัยในกลุ่มนี้จะเป็นการศึกษาในศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับสิ่งไม่มีชีวิต เช่น วิศวกรรมศาสตร์ คณิตศาสตร์ พลิกส์ เคเม่ วัสดุ สิ่งแวดล้อม พลังงาน โลจิสติกส์ ฯลฯ ที่เกิดจากการผสมผสานองค์ความรู้ที่กล่าวถึงข้างต้น (Multidisciplinary) ดังตัวอย่างต่อไปนี้

การประยุกต์ใช้วิธีการ BBO ในด้านไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ เช่น การประยุกต์ใช้วิธีการ BBO แก้ปัญหาการจ่ายไฟโดยอิ่มตื้นในระบบไฟฟ้ากำลัง [37, 63-66] หรือในระบบไฟฟ้ากำลังที่คำนึงถึงความสูญเสียจากการส่งผ่านในระบบไฟฟ้า [133, 135] การประยุกต์ใช้วิธีการ BBO กับปัญหาด้านระบบโครงข่ายไร้สาย เช่น ปัญหาในอุปกรณ์ตรวจจับแบบไร้สาย (Wireless sensor networks) [156, 157] ปัญหาการประเมินค่าพารามิเตอร์ในระบบเดาร์ MIMO (Parameter Estimation in MIMO Radar) [223] ปัญหาในระบบวิทยุ (Radio system) [101] การประยุกต์ใช้วิธีการ BBO กับการออกแบบมอเตอร์ในระบบไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor) [136] การออกแบบเครื่องจักรกล [361] การประยุกต์ใช้วิธีการ BBO กับปัญหาทางด้านสายอากาศ (Antenna) ที่พิจารณาถึงการกำหนดรูปแบบกระจายคลื่นของสายอากาศ (Antenna radiation patterns) [70, 71] การออกแบบสายอากาศทั่วไป [25, 28] การออกแบบสายอากาศแบบยาqui-อุดะ (Yaqi-Uda) [97, 98] การออกแบบสายอากาศที่ไม่มีการกำหนดรูปแบบตายตัว (Non-uniform circular antenna) [124, 128]

การประยุกต์ใช้วิธีการ BBO กับปัญหาในระบบควบคุม [300, 393] เช่น การประยุกต์ใช้ในระบบควบคุมแบบ สัดส่วน –

ปริพันธ์ – อนุพันธ์ (Proportional – Integral – Derivative Controller: PID Controller) ซึ่งเป็นระบบควบคุมอัตโนมัติที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุด ด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบที่ขึ้นอยู่กับตัวแปร 3 ค่า คือ ค่าสัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์ ค่าสัดส่วนกำหนดจากผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน การกำหนดค่าปริพันธ์อยู่บนพื้นฐานของผลรวมความผิดพลาดที่เพิ่งผ่านพ้นไป ขณะที่การกำหนดค่าอนุพันธ์อยู่บนพื้นฐานของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด หน้าที่ที่เกิดจากการรวมกันของทั้งสามนี้ จะใช้ในการปรับกระบวนการให้ค่าผิดพลาดเหลือค่าน้อยที่สุด

การประยุกต์ใช้วิธีการ BBO กับปัญหาในกลุ่มวิทยาศาสตร์กายภาพอื่นๆ เช่น การจัดตารางสำหรับพื้นที่การผลิตแบบยืดหยุ่น (Flexible flow shop) [210] ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบยืดหยุ่นสำหรับกระบวนการการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง (The flexible job shop scheduling problem) [14] ปัญหาการจัดตู้บรรทุกในระบบรางรถไฟแบบฉุกเฉิน (Emergency railway wagon scheduling) [32] การประยุกต์ใช้วิธีการ BBO กับปัญหาการจัดตารางการผลิต เพื่อการจัดการโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart grid scheduling) [137, 143] ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางของพนักงานขาย (TSP) [13] ปัญหาการจัดวางแผนตำแหน่งเครื่องจักรเพื่อประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (Energy efficient virtual machine placement) [254] ปัญหาการจัดการเชื้อเพลิงหลัก (Core fuel management) [298] ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ (Vehicle Routing Problem) [359] ปัญหาด้านพลังงานนิวเคลียร์ (Nuclear research) [236] ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในระบบน้ำหนา (Circulating water system) [343] เป็นต้น

## 5.2 รูปแบบการประยุกต์ใช้วิธีการ BBO

รูปแบบการประยุกต์ใช้วิธีการ BBO สามารถแบ่งได้ 4 รูปแบบ คือ การประยุกต์วิธีการ BBO แบบดั้งเดิม (Conventional BBO) กำรปรับแต่ง (Modification) กระบวนการของวิธีการ BBO การศึกษาค่าพารามิเตอร์ BBO และการนำวิธีการ BBO ไปผสมผสาน (Hybridisation) กับวิธีการหาคำตอบอื่น ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 5.2.1 การประยุกต์ใช้วิธีการ BBO แบบดั้งเดิม

การแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดนั้นสามารถทำได้โดยวิธีที่เป็นกลุ่มวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบดั้งเดิม (Conventional optimisation algorithms: COA) กลุ่มวิธีการหาคำตอบแบบกำหนดโครงสร้างในการสร้างคำตอบ

(Constructive approaches) และกลุ่มวิธีการเมต้าอิวาริสติกส์ (Metaheuristics) ดังนั้น การประยุกต์ใช้วิธีการ BBO แบบดั้งเดิม จึงมักจะเกี่ยวข้องกับการทดสอบความสามารถในการค้นหา คำตอบของวิธีการ BBO กับวิธีการอื่นๆ ผ่านปัญหาเทียบเคียง (Benchmarking problems) [198, 283] หรือเพื่อทดสอบการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมปัญหาใหม่ที่เพิ่งถูกนำเสนอด้วย วิธีการเมต้าอิวาริสติกส์ [290, 375]

### 5.2.2 การปรับแต่งของวิธีการ BBO (BBO modification)

คุณภาพของคำตอบที่ได้จากการเมต้าอิวาริสติกส์ขึ้นอยู่กับ ความสมดุลของการสำรวจเพื่อหาผลเฉลยที่เป็นไปได้ใหม่ (Exploration หรือ Diversification) และการเลือกผลเฉลยโดย อาศัยความรู้เดิมที่มีอยู่ก่อนแล้ว (Exploitation หรือ Intensification) [435, 436] ดังนั้น การปรับความสมดุลระหว่าง Exploration และ Exploitation จึงเป็นแนวทางการพัฒนา คุณภาพคำตอบ วิธีการแรกที่ใช้ในการปรับสมดุลระหว่าง Exploration และ Exploitation ของวิธีการ BBO คือ การ ปรับปรุงโดยการปรับแต่งกระบวนการคัดเลือกคำตอบ กระบวนการการอพยพ และกระบวนการกลยุทธ์ของวิธีการ BBO ดังตัวอย่างต่อไปนี้

งานวิจัยของ Sooncharoen [11] ได้ปรับแต่งกลไกการ คัดเลือกคำตอบเข้าสู่ขั้นตอนการอพยพของวิธีการ BBO ด้วยการ เพิ่มขั้นตอนการเปรียบเทียบคำตอบระหว่างคำตอบที่ดีสุด (Best solution) ที่ได้จากการค้นหาปัจจุบัน และคำตอบที่ดีที่สุด จากการค้นหาทุกๆ รอบที่ผ่านมา (Best so far: BSF) ถ้าคุณภาพ ของคำตอบจากการค้นหาปัจจุบันไม่ดีขึ้นภายในจำนวนรอบ การวนซ้ำที่กำหนด จะเปลี่ยนรูปแบบการคัดเลือกคำตอบจากการ คัดเลือกตามความน่าจะเป็นไปเป็นการคัดเลือกแบบสุ่ม (Random selection) ทั้งนี้ เพื่อเพิ่มการสำรวจ (Exploration) ในการหาผลเฉลยที่เป็นไปได้ใหม่ของวิธีการ BBO ให้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถรูปแบบการปรับปรุงคำตอบอื่นๆ ที่เคย ผ่านการทดลองแก้ปัญหาในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน แล้วให้ ผลลัพธ์ที่ดีเข้ามารับใช้กับวิธีการ BBO [11] เช่น การนำรูปแบบ การปรับปรุงคำตอบแบบ 2PECX และ 2ORS [437] ที่ให้ผลลัพธ์ ที่ดีที่สุดในการประยุกต์แก้ปัญหาการจัดเรียงเครื่องจักรผ่าน วิธีการใช้พันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) [438] โดยได้ นำมาประยุกต์ใช้ในวิธีการ BBO ด้วย ซึ่งผลการทดลองพบว่า สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

งานวิจัยของ Li et al. [112] นำเสนอตัวแบบการอพยพรูป ไซน์ (Sinusoidal migration model) เพื่อใช้ในขั้นตอนการ คัดเลือกคำตอบเข้าสู่กระบวนการอพยพ และใช้กระบวนการ กลยุทธ์แบบเกาส์เชียน (Gaussian mutation operator) โดย มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาความสามารถในการสำรวจเพื่อหาผล

เฉลยที่เป็นไปได้ใหม่ (Exploration) ของวิธีการ BBO ที่จะช่วย เพิ่มประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบของวิธีการ BBO

### 5.2.3 การศึกษาค่าพารามิเตอร์ BBO

การปรับปรุงวิธีการ BBO ด้วยการศึกษาถึงค่าพารามิเตอร์ที่ เหมาะสม เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการปรับสมดุลระหว่าง Exploration และ Exploitation การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ เหมาะสมจะทำให้แต่ละองค์ประกอบของวิธีการแก้ปัญหาสามารถ ทำงานร่วมกันได้อย่างลงตัว ซึ่งจะนำไปสู่กลไกการค้นหาและการ ปรับปรุงคำตอบที่มีประสิทธิภาพสูงสุด [439] โดยทั่วไปแล้ว องค์ประกอบของวิธีการเมต้าอิวาริสติกส์จะประกอบด้วย ตัวแทน คำตอบ (Representations) และตัวดำเนินการ (Operators) ต่างๆ เช่น ตัวดำเนินการคัดเลือกตัวแทนคำตอบ ตัวดำเนินการ ปรับปรุงคำตอบ ตัวดำเนินการเพื่อตรวจสอบเงื่อนไขต่างๆ ดัง ตัวอย่างต่อไปนี้

งานวิจัยของ Attar et al. [199] กล่าวว่า คุณภาพของวิธีการ เมต้าอิวาริสติกส์ขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าพารามิเตอร์อย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ จึงทำการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมใน การประยุกต์ใช้วิธีการ BBO เพื่อแก้ปัญหาการจัดตารางสำหรับ การทำงานไฟล์เลื่อนแบบยืดหยุ่น (Hybrid flexible flowshop scheduling problem) ด้วยวิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครง ร่างพื้นผิว (Response surface methodology) ขณะที่งานวิจัย ของ Sooncharoen [11] ได้ทำการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ เหมาะสม ด้วยวิธีการแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial design)

งานวิจัยของ Dutta et al. [367] ใช้การทดลองแบบลองผิด ลองถูก (Trial and error method) เพื่อเลือกค่าพารามิเตอร์ของ วิธีการ BBO ที่สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาการไฟล์ ของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด (Optimal power flow problem) เนื่องจากทดสอบแล้วพบว่า ประสิทธิภาพของวิธีการ BBO ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ที่กำหนด

งานวิจัยของ Berghida and Boukra [359] กล่าวไว้ว่า การ กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับวิธีการแก้ปัญหา (Algorithm) มีผลอย่างมากต่อผลลัพธ์สุดท้ายที่ได้ โดยแต่ละ ปัญหาจะมีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแตกต่างกันไป งานวิจัยนี้ เลือกใช้วิธีการปีนเขา (Hill Climbing Approach) เพื่อค้นหา ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับวิธีการ BBO ที่ถูกพัฒนาขึ้นจาก วิธีการแบบดั้งเดิม ในการประยุกต์ใช้แก้ปัญหาปัจจุบัน การจัด เส้นทางยานพาหนะ (Vehicle routing problem) ที่เรียกว่า วิธีการ An Enhanced Biogeography-based Optimisation (EBBO)