

การออกแบบการทดลองด้วยหลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน และวิธีการทาгуชิ
กรณีศึกษากระบวนการย้าหมุดอลูมิเนียม
Experimental Design with Shainin and Taguchi Methods:
A Case Study of Aluminum Riveting Process

ธนกานต์ วิจิระประเสริฐ^{1*}, ทศพล เกียรติเจริญผล²

^{1*, 2}ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
E-mail: thanakarn.v@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาและกำหนดแนวทางการประยุกต์ใช้วิธีการของทาгуชิและหลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน โดยอาศัยกรณีศึกษากระบวนการย้าหมุดอลูมิเนียม และทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบวิธีการออกแบบการทดลองของทาгуชิ หลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน กับวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ซึ่งวิธีการออกแบบการทดลองของทาгуชิ จะดำเนินการทดลองแบบตารางแนวฉาก (Orthogonal Array) เป็น L16 และหลักการค้นหาตัวแปรของไชนินจะดำเนินการ 4 ขั้นตอน ส่วนวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล จะมีรูปแบบการทดลองเป็นแบบ 2⁵ Factorial Design จากผลการทดลองพบว่าวิธีการออกแบบการทดลองของทาгуชิสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองที่สำคัญได้เหมือนกับวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล คือ มีความเชื่อมั่นในทางสถิติที่สูง และยังใช้จำนวนการทดลองที่น้อยครั้งกว่า ส่วนวิธีการของไชนินใช้จำนวนครั้งของการทดลองที่น้อยกว่าวิธีการของทาгуชิและการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ซึ่งจะช่วยให้เกิดประโยชน์ในเรื่องการประหยัดต้นทุนในการทดลอง การประยุกต์ใช้วิธีการของทาгуชิ และไชนิน มีประโยชน์อย่างยิ่งในการศึกษาตัวแปร ในกรณีที่มีการดำเนินการทดลองไม่สามารถทำการทดลองได้จำนวนมากและมีจำนวนตัวแปรที่ศึกษาเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทดลองแบบคัดกรอง (Screening) แต่อย่างไรก็ตามการวางแผนการทดลองของวิธีการของทาгуชิและไชนิน ต้องอาศัยความรู้ในกระบวนการตัวอย่างนั้นเป็นแนวทางในการกำหนดตัวแปรและระดับของการทดลองมากกว่าแบบแฟคทอเรียล

คำสำคัญ: วิธีการของทาгуชิ, หลักการค้นหาตัวแปรของไชนิน, 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. 2⁵ 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 เพื่อที่จะสามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่างๆที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or Responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้น [1] ซึ่งเป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับมากขึ้นในแวดวงอุตสาหกรรม ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต โดยการผลิตออกแบบการทดลองจะมี 4 ขั้นตอน คือ การวางแผน (Planning) การคัดกรอง (Screening หรือ Process characterization) การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) และการทวนสอบ (Verification) ใช้ในงานด้านการพัฒนากระบวนการผลิต ซึ่งเป็นการลดจำนวนตัวแปรให้มีจำนวนน้อยลง โดยคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การลดจำนวนตัวแปรทำให้เราสามารถที่จะพิจารณาเฉพาะตัวแปรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเท่านั้น โดยทั่วไปจะใช้แบบแฟคทอเรียล (ปัจจัยมีค่าระดับมากกว่า 2 ค่าขึ้นไป) อีกเทคนิคที่ถูกเรียกว่า หลักการค้นหาตัวแปร (Variable Search Method) ซึ่งเป็นเครื่องมือหนึ่งในการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของไชนิน วิธีการนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นโดย โดเรียน ไชนิน (Dorian Shainin) ชาวอเมริกา ผู้ซึ่งเป็นที่ปรึกษาของบริษัทชั้นนำต่างๆมากกว่า 800 แห่ง เทคนิคนี้ถือว่าเป็นเทคนิคในการเก็บรวบรวมข้อมูลอย่างง่าย แต่ให้ประสิทธิภาพสูง และทำให้ผู้แก้ปัญหาสามารถเข้าถึงปัญหาได้ดี โดยเทคนิคของไชนินถือเป็นกลุ่มวิธีการที่ได้รับการยอมรับมากขึ้นในแวดวงอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่จำเป็นต้องพึ่งหลักการทางสถิติที่ซับซ้อนมากนัก และเป็นวิธีการที่มีกระบวนการการวิเคราะห์อย่างเป็นระบบเป็นขั้นตอน รวมทั้งได้รับการพิสูจน์ว่าสามารถประยุกต์ใช้ได้ ในอุตสาหกรรมต่างๆได้เป็นอย่างดี [2]

นอกจากนี้วิธีการอีกอย่างหนึ่งที่ได้รับการยอมรับในเชิงปฏิบัติ คือ การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ เป็น การลดความสูญเสีย ที่เกิดจากคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ไม่ตรงตามเป้าหมาย โดยการตรวจสอบจากผลรวมของความสูญเสียทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ อันเกิดจากองค์ประกอบต่างๆผันแปรไปจากคุณภาพของเป้าหมาย และหาว่าเงื่อนไขของกระบวนการผลิตนั้นเป็นอย่างไร รวมไปถึงคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ซึ่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ทนต่อสภาพแวดล้อมและปัจจัยอื่น ๆ ที่นอกเหนือการควบคุม [3] โดยสำหรับในงานวิจัยนี้พัฒนาจากงานวิจัยของสมชาย [4] กรณีศึกษากระบวนการย้าหมุดอลูมิเนียม และทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล หลักการค้นหาตัวแปร และวิธีการทากูชิ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วิธีการของไชนิน (Shainin Method)

วิธีการของไชนิน ให้เทคนิคของหลักการค้นหาตัวแปร ซึ่งมีประโยชน์เมื่อมีจำนวนตัวแปรที่ศึกษาเท่ากับหรือมากกว่า 4 ตัวแปรขึ้นไปในระบบ ซึ่งวิธีการของไชนินได้ให้คำนิยามของตัวแปรที่มีความสำคัญมากที่สุดว่า Red X และตัวแปรที่มีความสำคัญอันดับที่ 2 ว่า PinkX และถัดมาเป็น PalePinkX และกำหนดให้ค่าตัวแปรตอบสนองเรียกว่า GreenY [5] หลักการค้นหาตัวแปรสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน

2.1.1 กำหนดตัวแปร

มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดตัวแปรและค่าที่ถูกต้องในแต่ละการทดลองโดยเริ่มจากการกำหนดเลือก Green Y ที่ใช้ในการวัดคุณภาพและทำการวิเคราะห์และกำหนดปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อคุณภาพสินค้า หลังจากนั้นจึงกำหนดค่าตัวแปรหรือปัจจัยแต่ละปัจจัยเพื่อการทดลอง โดยแบ่งเป็นค่าที่ดีที่สุด (Best Level; B) และค่าที่แย่ที่สุด (Marginal Level; M) โดยกำหนดขนาดตัวอย่าง ซึ่งโดยทั่วไปกำหนดเพียง 2 ชั้น คือ BOB (Best Of Best) และ WOW (Worst Of Worst) อย่างละชั้นและทำการประเมินหาแนวโน้มอย่างคร่าวๆ โดยทำการทดลอง 2 ครั้ง ครั้งแรกที่ค่าที่ดีที่สุด ครั้งที่สองที่ค่าที่แย่ที่สุดของทุกปัจจัย โดยถ้ามีความแตกต่างของค่า Green Y อย่างมากระหว่างค่าที่ดีที่สุด และค่าที่แย่ที่สุด แสดงว่าปัจจัยที่เลือกไว้มีแนวโน้มว่าจะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพอย่างแท้จริง ซึ่งถ้าค่าที่ดีที่สุดทุกค่าดีกว่าค่าที่แย่ที่สุด แต่แตกต่างกันไม่มากแสดงว่ายังมีปัจจัยที่ไม่ถูกเลือกซึ่งมีผลต่อคุณภาพหรือค่า Green Y แต่ถ้าค่าที่ดีที่สุดไม่ได้แสดงอย่างชัดเจนว่าดีกว่าค่าที่แย่ที่สุด แสดงว่าปัจจัยที่เลือกไว้ไม่มีผลต่อคุณภาพและให้ทำซ้ำอีก 2 ครั้ง แล้วจึงทดสอบนัยสำคัญเพื่อพิสูจน์ว่า Green Y ของค่าที่ดีที่สุดทั้ง 3 ตัวดีกว่า Green Y ของค่าที่แย่ที่สุดทั้ง 3 ตัว โดยการทดสอบนัยสำคัญจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนด คือ Green Y ของค่าที่ดีที่สุดทั้ง 3 ตัว ต้องดีกว่า Green Y ของค่าที่แย่ที่สุดทั้ง 3 ตัว และอัตราส่วน $D : d$ ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ $1.25 : 1$ ซึ่งถ้าการทดสอบนัยสำคัญผ่าน จะถือว่าขั้นตอนที่ 1 เสร็จสิ้น แสดงว่าปัจจัยที่เลือกไว้ถูกต้องแล้วถ้าการทดสอบนัยสำคัญไม่ผ่าน แสดงว่าปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพยังไม่ถูกเลือกให้กลับไปทำการวิเคราะห์และกำหนดปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อคุณภาพสินค้าใหม่อีกครั้ง

2.1.2 จำแนกแยกแยะปัจจัย

มีวัตถุประสงค์เพื่อแยกตัวแปรที่สำคัญออกจากตัวแปรที่ไม่สำคัญและกำจัดตัวแปรที่ไม่สำคัญออกไปรวมทั้งอันตรกิริยาที่เกิดจากตัวแปรนั้นออกไปด้วย โดยเริ่มจากการทดลองโดยการสลับค่าตัวแปรทีละคู่ แล้วคำนวณค่าสูงสุดและต่ำสุดของขอบเขตการตัดสินใจ โดยใช้สูตร $\text{median} \pm 2.776 d / 1.81$ ซึ่งผลลัพธ์ที่เป็นไปได้จะมี 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 ถ้า $A_M R_B$ อยู่ใน Decision limits-high และ $A_B R_M$ อยู่ใน decision limits-low แสดงว่า A ไม่มีนัยสำคัญ กรณีที่ 2 ถ้า $A_M R_B$ และ $A_B R_M$ ให้ผล

ตรงข้ามกัน คือ $A_M R_B$ ให้ผลเหมือนกรณี All Best และ ให้ผลเหมือนกรณี All Marginal แสดงว่า A เท่านั้นที่เป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ปัจจัยอื่นๆ ตัดออกได้ทั้งหมด กรณีที่ 3 ถ้า $A_M R_B$ และ $A_B R_M$ ค่าใดค่าหนึ่งหรือทั้งสองค่า ตกออกนอก Decision limits คือ $A_M R_B$ ตกออกนอก Decision limits-high และ $A_B R_M$ ตกออกนอก Decision limits-low แต่มีได้ให้ผลตรงข้ามกัน 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 $A_B B_R M$ และ $A_M B_M R_B$ ทดสอบยืนยันผลอันตรกิริยา 3 ตัว (ถ้ามีปัจจัยที่มีนัยสำคัญมากกว่าหรือเท่ากับ 3 ปัจจัย)

2.1.4 การวิเคราะห์ตัวแปร

มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาค่าของปัจจัยสำคัญที่จะทำให้คุณภาพสินค้าดีที่สุด โดยการหาอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมซึ่งในกรณีที่ค่าอันตรกิริยาของปัจจัยหรือตัวแปรคู่ใดมีนัยสำคัญให้เขียนกราฟอิทธิพลร่วม เพื่อหาว่าอันตรกิริยาของปัจจัยคู่นั้นมีมากหรือไม่ เพื่อนำไปสู่การกำหนดค่าของปัจจัยที่จะทำให้คุณภาพสินค้าดีที่สุดต่อไป [6]

2.2 วิธีการทาคุชิ (Taguchi Method)

วิธีการทาคุชิ เป็นวิธีการที่ใช้คัดกรองปัจจัย โดยคำนึงถึงปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้หรือปัจจัยรบกวนของกระบวนการซึ่งวิธีการนี้นั้น ถือเป็นฟังก์ชันความสูญเสีย โดยวัตถุประสงค์ของการออกแบบที่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลง คือ การทำให้ค่าความสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งทาคุชิได้สรุปว่าการเบี่ยงเบนใดๆของกระบวนการ ผลลัพธ์ที่ออกห่างจากค่าเป้าหมายจะก่อให้เกิดค่าความสูญเสีย

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

ตารางที่ 1 ตารางแนวฉาก

แผนผังการทดลอง	จำนวนตัวแปรสูงสุด	จำนวนระดับของตัวแปรสูงสุด
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 โดยจำนวนครั้งของการทดลองยิ่งมากความสามารถในการตรวจสอบยิ่งมากตามไปด้วย หรือกล่าวได้ว่าการทดลองนั้นยังมีความถูกต้อง ซึ่งโดยปกติปัจจัยในการเลือกขึ้นอยู่กับ [7]

1. จำนวนของตัวแปรที่สนใจ
2. จำนวนระดับของตัวแปรที่ต้องการ
3. 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 (กรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดี) , Nominal – the – best (กรณีค่าตรงเป้าหมายดีที่สุด) และ Larger – the – better (กรณีค่ายิ่งมากยิ่งดี) [1]

สำหรับในงานวิจัยนี้ค่าตอบสนองที่มีค่ามาก คือ ค่าที่ดีที่สุดจากกฎของทาคุชิ 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

กรณีศึกษาพัฒนาจากงานวิจัยกระบวนการย้าหมุดอลูมิเนียม เพื่อหาสภาวะของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้าอลูมิเนียม [4] ซึ่งมีตัวแปรทั้งสิ้น 5 ตัวแปร ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สภาวะของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้าอลูมิเนียม

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

3.2 การดำเนินการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ 2^k Full Factorial Design

ดำเนินการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ โดยมีตัวแปรทั้งสิ้น 5 ตัวแปร และแต่ละตัวแปร มี 2 ระดับ ซึ่งจะได้รูปแบบการทดลองเป็นแบบ 2^5 มีจำนวนการทดลองเท่ากับ 32 ครั้ง แต่ละครั้งของการทดลอง กำหนดให้มีจำนวนการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง จึงมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 160 ครั้ง และจัดการทดลองให้เป็นแบบสุ่ม

3.3 การดำเนินการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้หลักการค้นหาตัวแปร ด้วยวิธีการของโชนิน

ดำเนินการตามขั้นตอนของการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองตามหลักการค้นหาตัวแปรของโชนิน 4 ขั้นตอน [8]

3.4 การดำเนินการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการทากูชิ

ดำเนินการทดลองแบบตารางแนวฉาก ซึ่งจะได้รูปแบบการทดลองเป็น $L_{16} (2^5)$ โดยมีตัวแปรทั้งสิ้น 5 ตัวแปร และแต่ละตัวแปร มี 2 ระดับ มีจำนวนการทดลองเท่ากับ 16 ครั้ง แต่ละครั้งของการทดลอง กำหนดให้มีจำนวนการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง จึงมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 80 ครั้ง

จากนั้นนำมาสรุป เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากการออกแบบการทดลองทั้ง 3 แบบ

4. ผลการดำเนินงานและบทวิจารณ์

4.1 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ 2^k Full Factorial Design

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

4.1.1 สมการถดถอย

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

เมื่อ Y = แรงเฉือนสูงสุด (Shear Force)

B = ขนาดรูเจาะ (Size)

C = ความหนาของงาน (Thick)

4.2 การออกแบบการทดลองวิธีการของโชนิน

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. ความยาวหมุดย้า (D)	สั้น	ยาว	-
5. เวลาในการกดแช่ (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 ดีกว่า 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 แสดงผลในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 จำแนกแยกแยะปัจจัย

Test	Combination	Result	Median	Decision Limits	Conclusion
1	A _M R _B	1420	1390	1290.31 to 1489.69	A not significant
2	A _B R _M	1200	1230	1130.31 to 1329.69	
3	B _M R _B	1170	1390	1290.31 to 1489.69	B significant
4	B _B R _M	1380	1230	1130.31 to 1329.69	
5	C _M R _B	1390	1390	1290.31 to 1489.69	C not significant
6	C _B R _M	1160	1230	1130.31 to 1329.69	
7	D _M R _B	1330	1390	1290.31 to 1489.69	D not significant
8	D _B R _M	1220	1230	1130.31 to 1329.69	
9	E _M R _B	1410	1390	1290.31 to 1489.69	E not significant
10	E _B R _M	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 จากผลการทดลองแสดงว่าปัจจัย A, C, D และ E มีผลลัพธ์ที่อยู่ภายใน Decision Limits ดังนั้นปัจจัย

A, C, D และ E จึงไม่มีนัยสำคัญ ส่วนปัจจัย B มีผลลัพธ์อยู่นอกเหนือจาก Decision Limits แสดงว่าปัจจัย B มีนัยสำคัญ
4.2.3 ขั้นตอน ที่ 3: ยืนยันตัวแปร แสดงผลในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ยืนยันตัวแปร

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

จากผลการทดลองพบว่า A_BB_BR_M , A_MB_MR_B และ B_BC_BR_M , B_MC_MR_B มีผลลัพธ์ที่อยู่ภายใน Decision Limits ดังนั้นปัจจัย B

จึงมีอิทธิพลร่วมกับปัจจัย A และ C ดังนั้นจึงมีปัจจัย A, B, C และอันตรกิริยา AB และ BC ที่มีนัยสำคัญ

4.2.4 ขั้นตอน ที่ 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 _B B _B -A _M B _M	= 1390+1220=2610	B _B C _B -B _M C _M	= 1410+1220=2630
A _M B _B -A _B B _M	= 1400+1185=2585	B _B C _M -B _M C _B	= 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 (ขนาดรูเจาะ) และอันตรกิริยาของปัจจัย B และ C มีนัยสำคัญ ที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้าอลูมิเนียม

4.3 การออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ทากูชิ

สำหรับงานวิจัยนี้ เลือกใช้ค่าตอบสนองที่มีค่ามาก (Larger – the –better) และเลือกตารางแนวนอกแบบ 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 (ขนาดรูเจาะ), ปัจจัย C (ความหนาของงาน) และอันตรกิริยาระหว่างของปัจจัย B และ C มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้าอลูมิเนียม เนื่องจาก P-value < α = 0.05 ซึ่งส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของแรงเฉือนสูงสุด

ค่าตอบสนองที่มีค่ามาก Larger – the –better คือ ค่าที่ดีที่สุดจากกฎของทากูชิ จุดที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย คือ จุดที่ให้ค่า S/N ratio สูงสุด โดยทำให้เกิดความสูญเสียน้อยที่สุด ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2

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

จากรูปที่ 2 ข้อมูล Signal to Noise Ratios พบว่าปัจจัย A (ขนาดแรงกด), ปัจจัย E (เวลาในการกดแช่) และปัจจัย D (ความยาวหมุดย้า) เป็น Robustness คือ ปัจจัยเหล่านี้มีสถานะที่ทนต่อสภาพแวดล้อมและปัจจัยอื่นๆที่นอกเหนือการควบคุม

โดยพบว่าปัจจัย B (ขนาดรูเจาะ) ที่ระดับ High (ค่า 62.81) และปัจจัย C (ความหนาของงาน) ที่ระดับ High (ค่า 62.19) ให้ค่า S/N ratio ที่สูง ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าเฉลี่ยของแรงเฉือนสูงสุดด้วย ที่ปัจจัย B (ขนาดรูเจาะ) 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

โดยมีสมการถดถอย คือ

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

4.4 การเปรียบเทียบวิธีออกแบบการทดลอง

จากกรณีศึกษาการย้าหมุดอลูมิเนียม พบว่าวิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ และการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล จะได้ตัวแปรหลัก คือ ปัจจัย B (ขนาดรูเจาะ), ปัจจัย C (ความหนาของงาน) และอันตรกิริยาระหว่างของปัจจัย B และ C ที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้าอลูมิเนียม และวิธีการของไชนิน จะได้ปัจจัย A (ขนาดแรงกด) , ปัจจัย B (ขนาดรูเจาะ) และอันตรกิริยาของปัจจัย B และ C มีนัยสำคัญ ที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนสูงสุดของหมุดย้าอลูมิเนียม ดังแสดงในตารางที่ 7

ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาแต่ละวิธีของการทดลอง จะพบจุดเด่นที่แตกต่างกัน โดยสามารถสรุปดังตารางที่ 8

ตารางที่ 7 สรุปผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อแรงเค้นสูงสุดของหมุดย้ำอลูมิเนียมอย่างมีนัยสำคัญเปรียบเทียบกับทั้ง 3 วิธีของการทดลองการออกแบบการทดลอง

วิธีการออกแบบการทดลอง	ตัวแปร					Signal to noise ratio (S/N)	Linear Model
	A	B	C	AB	BC		
วิธีการทางทากูชิ		✓	✓		✓	✓	✓
วิธีการของไชนิน	✓	✓			✓		
2 ^k Factorial Design		✓	✓		✓		✓

ตารางที่ 8 สรุปเปรียบเทียบวิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทางทากูชิ ไชนิน และการออกแบบการทดลองแบบมาตรฐาน 2^k Factorial Design

หัวข้อที่เปรียบเทียบ	วิธีการของทากูชิ	วิธีการของไชนิน	การออกแบบการทดลองแบบมาตรฐาน (แฟคทอเรียล)
เปอร์เซ็นต์จำนวนครั้งในการทดลองที่ลดลงได้	80 ครั้ง (ลดลง 50%)	10 ครั้ง (ลดลง 93.75%)	160 ครั้ง
ต้นทุนที่ใช้ในการทดลอง	ปานกลาง (ตามจำนวนครั้งของการทดลอง)	ต่ำ	สูง (ตามจำนวนครั้งของการทดลอง)
หลักการของการวิเคราะห์	ANOVA และ S/N Ratio	Median	ANOVA
สมการถดถอย	มี	ไม่มี	มี
ความยุ่งยากซับซ้อนในการวิเคราะห์ทางสถิติ	มาก (อาศัยวิธีการทางสถิติ ANOVA และ S/N Ratio)	น้อย (อาศัยเพียงหลักเหตุและผล (Rule of Thumb))	มาก (อาศัยวิธีการทางสถิติ ANOVA)
ความเชื่อมั่นในทางสถิติ	สูง (ใช้ ANOVA และ S/N Ratio)	น้อย (อาศัยเพียงหลักเหตุและผล (Rule of Thumb))	สูง (ใช้ ANOVA)
จำนวนตัวแปรที่ใช้ได้กับการทดลอง	ปานกลาง	มาก (หากมีตัวแปรจำนวนมากการทดลองก็ยังไม่ยุ่งยาก)	น้อย (เพราะ ยังมีจำนวนตัวแปรมากการทดลองก็ยุ่งยาก)

5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบวิธีการออกแบบการทดลองวิธีการของทากูชิ วิธีการของไชนิน และการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล โดยอาศัยกรณีศึกษาของการย้ำหมุดอลูมิเนียม โดยมีทั้งหมด 5 ปัจจัย พบว่าการออกแบบการทดลองของทากูชิสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองที่สำคัญได้เหมือนกับวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล คือ มีความเชื่อมั่นในทางสถิติที่สูง อีกทั้งยังใช้จำนวนครั้งในการทดลองที่น้อยกว่า คือ 80 ครั้ง (ลดลง 50%) ซึ่งวิธีการของไชนินจะใช้จำนวนครั้งของการทดลองที่น้อยกว่า

วิธีการของทากูชิและการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลคือใช้เพียง 10 ครั้ง (ลดลง 93.75%) ซึ่งจะช่วยทำให้เกิดประโยชน์ในเรื่องการประหยัดต้นทุนในการทดลอง แต่ทั้งนี้วิธีการของไชนินไม่อาศัยการคำนวณทางสถิติที่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับวิธีการของทากูชิและการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ทำให้ได้รับการยอมรับที่น้อยกว่า และไม่สามารถแสดงผลของสมการถดถอยของความสัมพันธ์ของตัวแปรได้

จากกรณีศึกษา สามารถสรุปได้ว่าเมื่อจำนวนตัวแปรในการทดลองมีมากขึ้น จำนวนครั้งของการทดลองของวิธีแฟคทอเรียลจะมีจำนวนครั้งที่มากขึ้นอย่างมาก ทำให้ยากต่อการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม

ผู้วิจัยจึงเสนอการออกแบบการทดลองแบบวิธีการของทากูชิ และวิธีการของไชนิน เป็นทางเลือกหนึ่งที่มีประโยชน์อย่างยิ่งในการศึกษาตัวแปร ที่ลดจำนวนครั้งในการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามวิธีการของทากูชิและไชนิน ต้องอาศัยความรู้ในกระบวนการตัวอย่งนั้นเป็นแนวทางในการกำหนดตัวแปรและระดับของการทดลอง ทำให้สามารถนำไปใช้ในภาคปฏิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการผลิต

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Montgomery, Douglas C. (2013). Design and analysis of experiments. 8th ed. Hoboken, NJ : Wiley.
- [2] Bhole, K. (2000). World Class Quality : Using Design of Experiment to Make It Happen. 2nd ed. Amacom. New York
- [3] Peace, Glen Stuart. (1993). Taguchi method : a hands-on approach. Addison-Wesley Publishing Company.
- [4] สมชาย ม้วนโคสูง. (2553). การหาจุดเหมาะสมสำหรับการย้ำหมุดอลูมิเนียม โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [5] Andrew, thomas.; & Jiju, Antony. (2004). Applying Shainin's variables search methodology in aerospace applications. Assembly Automation. 24: 184-191.
- [6] พิเชิต สุขเจริญพงษ์. (2550). "Shainin DOE : เทคนิคของไชนินสำหรับการออกแบบการทดลองเพื่อการปรับปรุงคุณภาพ," ในเอกสารประกอบการสัมมนาสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น). กรุงเทพฯ.
- [7] P.J. Ross. (1996). บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย, สืบค้นจาก <http://digi.library.tu.ac.th/thesis/en/0423/04chapter3.pdf>
- [8] ยศวัจน์ ศิริภมลชัย. (2554). การศึกษาการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการไชนิน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ).

การพัฒนาคอนกรีตประสิทธิภาพสูงสำหรับกำแพงป้องกันกระสุน Development of high performance concrete for bulletproof wall panel application

ปิยพงษ์ สุวรรณณิโชติ^{1,2}, พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง^{2,3,*}, ประเทือง โมรราย⁴, ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด⁵, ธนากร พิระพันธุ์⁶

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

²หน่วยวิจัยเพื่อนวัตกรรมวัสดุก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

³ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

⁴ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

⁵ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

⁶ภาควิชาวิศวกรรมโยธา กองวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโยธา กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศ

*Corresponding author e-mail: pop_civil@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาคอนกรีตประสิทธิภาพสูงเพื่อใช้ป้องกันกระสุน โดยสนใจความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ของคอนกรีตปกติ (NC) คอนกรีตกำลังสูง (HSC) คอนกรีตผสมเส้นใยพอลิเมอร์ (PFRC) และคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก (SFRC) โดยหล่อแผ่นคอนกรีตขนาด 40x40 เซนติเมตรหนา 5.75 และ 10 เซนติเมตร ใช้กระสุนขนาด 7.62 มิลลิเมตร ยิงแผ่นคอนกรีต ยิงตรง ตั้งฉาก ห่างจากผิวตัวอย่าง 200 เมตร วัดความเร็วของกระสุนก่อนและหลังกระแทกแผ่นคอนกรีต รวมไปถึงพิจารณาการเปลี่ยนแปลงการทดสอบปรากฏว่า คอนกรีตกำลังสูงสามารถดูดซับพลังงานจลน์ของกระสุนได้ดี แต่เสียหายค่อนข้างมาก โดยผนังหนา 5 เซนติเมตร ดูดซับพลังงานจลน์เท่ากับคอนกรีต NC และ PFRC ที่หนา 7.5 เซนติเมตร เส้นใยในคอนกรีต SFRC ช่วยให้คอนกรีตเหนียวขึ้น และป้องกันแรงกระแทกจากกระสุนได้ดี โดยผิวคอนกรีตบางส่วนกะเทาะออก

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

ปัญหาความไม่สงบในสามจังหวัดชายแดนใต้ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของประเทศ แม้ที่ผ่านมาหน่วยงานรัฐทุ่มทรัพยากรเพื่อแก้ปัญหา แต่ยังไม่มีความคืบหน้าในเวลานี้ ใกล้เคียง 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 แต่ไม่ได้ออกแบบเพื่อรับการโจมตีด้วยอาวุธดังกล่าว จึงจำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติเฉพาะ เช่น จะต้องคำนึงถึงพลังงานและแรงปะทะของกระสุนไม่ให้ทะลุผ่านคอนกรีต เมื่อกระสุนปืนตกกระทบคอนกรีตจะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานกัน หากคอนกรีตสามารถถ่ายเทพลังงานจลน์จากลูกกระสุนจนหมด กระสุนก็จะไม่สามารถทะลุผ่านคอนกรีต กลไกสำคัญในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทพลังงานจากกระสุนมาที่คอนกรีตก็คือ การเพิ่มสมบัติทางด้านความเหนียวของวัสดุในประเด็นการรับแรงดึงและแรงกระแทก ซึ่งคอนกรีตเป็นวัสดุที่สามารถรับกำลังอัดสูงแต่มีความเหนียวต่ำมาก 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 ที่นำมาใช้เป็นวัสดุเสริมกำลังคอนกรีตมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสามขนาด 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) เส้นใยขนาดใหญ่มีราคาสูงกว่าเส้นใยขนาดเล็ก ดังนั้น งานวิจัยของ Banthia จึงศึกษา flexural toughness factor ของคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วย crimped steel fiber ขนาดใหญ่ และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ flexural toughness factor เนื่องจากการผสม crimped steel fiber ขนาดเล็ก ผลศึกษาสรุปได้ว่าการผสม crimped steel fiber เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กกับคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วย 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 ขนาดเล็กเพียงอย่างเดียว

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 โดยผิวหน้าเป็นชั้นของคอนกรีตเสริมเหล็กมีความหนาแน่นระหว่าง 5-15 มิลลิเมตร และชั้นที่สองเป็นชั้นของ SFRC มีความหนาแน่นระหว่าง 15-25 มิลลิเมตร ทดสอบโดยยิงกระสุนปืนขนาด 9 มิลลิเมตร ที่ระยะห่าง 10 เมตร ใส่แผ่นคอนกรีตในโครงเหล็ก โดยยึดที่มุมทั้งสี่ของแผ่นคอนกรีต และติดตั้งเครื่องวัดความเร่ง (accelerometer) เพื่อวัดความเร่งของกระสุนหลังจากตกกระทบแผ่นคอนกรีต ผลทดสอบสรุปได้ว่า แผ่นคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วย hooked end steel fiber เพียงอย่างเดียวกันกระสุนได้ทุกตัวอย่าง แผ่นคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วย crumb rubber เพียงอย่างเดียวป้องกันกระสุนไม่ได้ คอนกรีตที่หล่อสองชั้นส่วนมากกันกระสุนได้ อย่างไรก็ตาม ระบบป้องกันกระสุนแบบสองชั้น ลดความเร่งของกระสุนได้ดีกว่าระบบแผ่นคอนกรีตแบบชั้นเดียว

แม้ว่าปัจจุบันจะมีงานวิจัยพัฒนาคอนกรีตสำหรับกันกระสุนอยู่บ้าง แต่มีน้อยมากเนื่องจากเป็นการวิจัยเพื่อทางการทหารโดยเฉพาะ และที่สำคัญการทดสอบความสามารถในการป้องกันกระสุนมักไม่ได้ทดสอบตามมาตรฐานการป้องกันกระสุนใด ดังนั้น จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะพัฒนาคอนกรีตสำหรับป้องกันกระสุน โดยสนใจสมบัติด้านความสามารถในการรับกำลังอัดและความสามารถในการดูดซับพลังงานของกระสุน ตามมาตรฐาน Ballistic Resistance

of Body Armor NIJ Standard-0101.06 Type III; (Rifles)
[9]

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) ตามมาตรฐาน ASTM A820 [11] ซึ่งมีสมบัติตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของเส้นใย

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

2.2 ประเภทคอนกรีต

การวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในการป้องกันและการดูดซับแรงปะทะของกระสุนในคอนกรีต 4 ประเภท ดังนี้

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

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

ประเภทที่ 3 คอนกรีตผสมเส้นใยพอลิเมอร์ (PFRC) เป็น คอนกรีตที่มีรูปแบบส่วนผสมเหมือนคอนกรีตปกติ แต่เติมเส้นใยพอลิเมอร์ลงไปในคอนกรีต โดยใช้เส้นใยพอลิเมอร์เสริมกำลังร้อยละ 0.6 โดยปริมาตร

ประเภทที่ 4 คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก (SFRC) เป็น คอนกรีตที่มีรูปแบบส่วนผสมเหมือนคอนกรีตปกติ แต่เติมเส้นใยเหล็กลงไปในคอนกรีต โดยใช้เส้นใยเหล็กเสริมกำลังร้อยละ 3.0 โดยปริมาตร

หล่อคอนกรีตทั้งสี่ประเภทในแบบหล่อรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร เพื่อทดสอบกำลังอัด และหล่อแผ่นคอนกรีตขนาด 40x40 เซนติเมตรหนา 5 7.5 และ 10 เซนติเมตร ควบคุมการยุบตัวของคอนกรีตสดให้อยู่ในช่วง 10 ± 2.5 เซนติเมตร โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ หลังจากหล่อคอนกรีต 24 ชั่วโมง ถอดแบบหล่อ และบ่มคอนกรีตในน้ำสะอาด 28 วัน จึงเริ่มทดสอบ

2.3 รูปแบบการทดสอบ

ทดสอบสมบัติของวัสดุ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ และทดสอบความสามารถต้านทานการสึกกร่อนของหินโดยเครื่องลอสแอนเจลีส

ทดสอบสมบัติทางกายภาพของคอนกรีต ได้แก่ ความหนาแน่น และกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

ทดสอบความสามารถดูดซับพลังงานและต้านทานการปะทะของกระสุน

การวิจัยนี้เลือกศึกษาความสามารถในการป้องกันกระสุน ตามมาตรฐาน NIJ Standard-0101.06 Type III; (Rifles) [9] ซึ่งมีข้อกำหนดรายละเอียดของกระสุนเป็นขนาด 7.62 มิลลิเมตร มวล 9.6 กรัม ความเร็วขณะตกกระทบตัวอย่าง 847 ± 9.1 เมตรต่อวินาที ซึ่งมีค่าพลังงานจลน์ประมาณ 3,275 จูล

การทดสอบความสามารถคอนกรีตทั้งสี่ประเภท ทำโดยวางแผ่นคอนกรีตไว้กึ่งกลางของเครื่องวัดอัตราเร็วกระสุนสองเครื่อง ยิงกระสุนขนาด 7.62 มิลลิเมตร ผ่านเครื่องวัดอัตราเร็วกระสุนเครื่องแรกซึ่งจะทราบอัตราเร็วของกระสุนก่อนตกกระทบแผ่นคอนกรีต (v_i) หลังจากนั้นกระสุนจะทะลุแผ่นคอนกรีตและลอดผ่านเครื่องวัดอัตราเร็วกระสุนเครื่องที่สอง ทำให้ทราบอัตราเร็วของกระสุนหลังทะลุแผ่นคอนกรีต (v_f) ดังรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีต

ประเภท คอนกรีต	W/C	ส่วนผสมคอนกรีต (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)							
		ปูนซีเมนต์	น้ำ	ทราย	สารลดน้ำ พิเศษ	มวลรวมหยาบ		เส้นใย	
						หินปูน	หินแอนดีไซต์	เหล็ก	พอลิเมอร์
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	-	-	0.60
SFRC	0.40	449	175	749	3.14	1,072	-	30	-

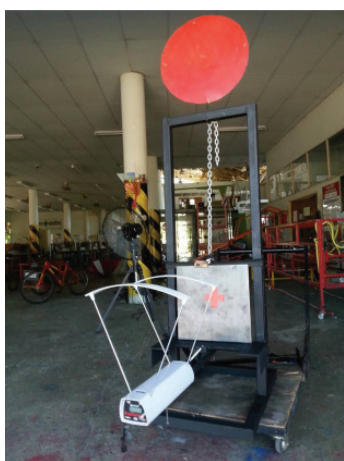


รูปที่ 1 ภาพจำลองการทดสอบความสามารถของแผ่นคอนกรีต ในการดูดซับแรงกระแทกของกระสุน

พลังงานจลน์ของกระสุนที่ดูดกลืนโดยแผ่นคอนกรีต (E_{ads}) แสดงดังสมการที่ (1)

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

แผ่นคอนกรีตทั้งสี่ประเภท ทดสอบที่ความหนา 5, 7.5 และ 10 เซนติเมตร โดยแต่ละกรณีจะทดสอบสามครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย คอนกรีตหนา 5 และ 7.5 เซนติเมตร จะยิงเพียงนัดเดียวเพื่อทดสอบการดูดซับพลังงาน ขณะที่ความหนา 10 เซนติเมตร จะยิงซ้ำตำแหน่งเดิมจนกระทั่งคอนกรีตวิบัติ เพื่อพิจารณาความสามารถต้านทานกระสุน



รูปที่ 2 ชุดอุปกรณ์ทดสอบความสามารถดูดซับแรงกระแทกของกระสุน

3. ผลวิจัยและวิเคราะห์ผล

3.1 ผลทดสอบสมบัติหินปูน หินแอนดีไซต์ และทราย

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบสมบัติของวัสดุ ผลทดสอบความสามารถต้านทานการสึกกร่อนของหินแอนดีไซต์สูญเสียน้ำหนักร้อยละ 11.09 หินปูนสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 22.41 จึงใช้หินแอนดีไซต์เป็นมวลรวมหายาสำหรับคอนกรีตกำลังสูง อย่างไรก็ตาม หินทั้งสองประเภทต่างก็ผ่านมาตรฐาน ASTM C33 ที่กำหนดค่าการสูญเสียน้ำหนักของมวลรวมหายาสำหรับคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 35 [12]

3.2 ผลทดสอบความหนาแน่นและกำลังอัด

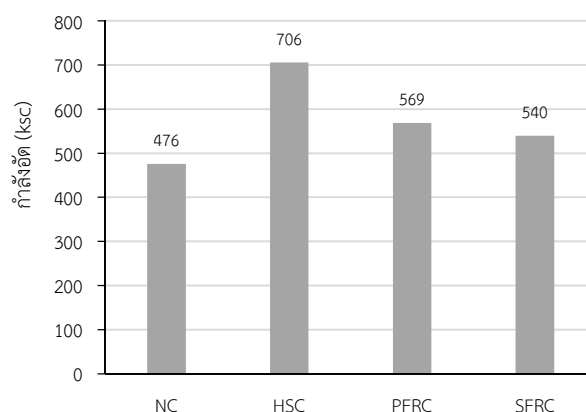
ความสามารถในการรับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน (รูปที่ 3) แสดงว่า $w/c = 0.40$ คอนกรีต NC สามารถรับแรงอัดต่ำที่สุด

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

ตารางที่ 3 ผลทดสอบสมบัติของหิน

สมบัติ	หินปูน	หินแอนดีไซต์	ทราย
ความถ่วงจำเพาะ	2.82	2.94	2.60
การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	0.52	0.17	0.95
โมดูลัสความละเอียด	7.53	6.86	2.54
การต้านทานการสึกกร่อนของหิน โดยเครื่องลอสแอนเจลิส (ร้อยละ)	22.41	11.09	-

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



รูปที่ 3 กำลังอัดของคอนกรีต

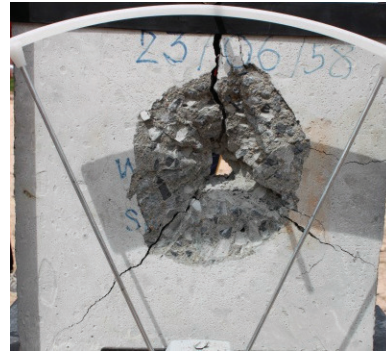
3.3 รูปแบบการวิบัติของแผ่นคอนกรีต

3.3.1 คอนกรีตปกติ NC

แผ่นคอนกรีตปกติ NC วิบัติเป็นรูเจาะขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของกระสุนปืน คอนกรีตรอบรูเจาะกะเทาะออกทั้งด้านหน้าและด้านหลังเป็นวงกลม โดยด้านหลังกะเทาะออกมากกว่า ดังรูปที่ 4 (ก) เนื่องจากความเปราะของคอนกรีตทำให้เกิดรอยแตกร้าวบนแผ่นคอนกรีตจนแยกออกเป็นสามเสี่ยง กระสุนสามารถทะลุแผ่นคอนกรีต NC หนา 5 และ 7.5 เซนติเมตร โดยการยิงเพียงหนึ่งนัด ในขณะที่ความหนา 10 เซนติเมตร จะต้องยิงซ้ำจุดเดิมถึงสองนัด กระสุนจึงทะลุผ่านแผ่นคอนกรีต



ด้านหน้า



ด้านหลัง

(ก) NC



ด้านหน้า

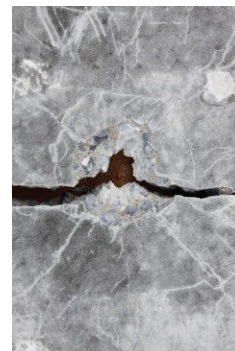


ด้านหลัง

(ข) HSC



ด้านหน้า



ด้านหลัง

(ค) PFRC



ด้านหน้า



ด้านหลัง

(ง) SFRC

รูปที่ 4 ลักษณะการวิบัติของแผ่นคอนกรีตหนา 5 เซนติเมตร



(ก) HSC



(ข) SFRC

รูปที่ 5 ความเสียหายของแผ่นคอนกรีตหนา 7.5 เซนติเมตร

3.3.2 คอนกรีตกำลังสูง HSC

คอนกรีตกำลังสูงเสียหายรุนแรงกว่าคอนกรีตปกติ โดยรอยบนแผ่นคอนกรีตและรอยกะเทาะของผิวคอนกรีตทั้งสองด้านกว้างกว่า (รูปที่ 4-ข) เพราะคอนกรีต HSC มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีต NC จึงมีความเปราะมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากรอยแตกร้าวที่ปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจน ทำให้แผ่นคอนกรีตแยกออกเป็นสามเสี่ยงคล้ายกับคอนกรีต NC กระสุนทะลุผ่านแผ่นคอนกรีตหนา 5 เซนติเมตร โดยยิงเพียงนัดเดียว ส่วนแผ่นคอนกรีตหนา 7.5 เซนติเมตร ยิงเพียงหนึ่งนัด กระสุนไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นคอนกรีตได้ ด้านหน้าของแผ่นคอนกรีตกะเทาะออกเล็กน้อยและปรากฏรอยร้าวในแนวราบ (รูปที่ 5-ก) คอนกรีตกำลังสูงหนา 10 เซนติเมตร ต้องยิงกระสุนจำนวนสามนัดที่ตำแหน่งเดิมจึงวิบัติ ซึ่งต้องใช้จำนวนกระสุนที่มากกว่ากรณีคอนกรีต NC ที่หนา 10 เซนติเมตร แสดงให้เห็นว่า กำลังของคอนกรีตมีนัยสำคัญต่อความแข็งแรงของกระสุนปืน

3.3.3 คอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิเมอร์ PFRC

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

3.3.4 คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก SFRC

คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก SFRC วิบัติแตกต่างจากคอนกรีตประเภทอื่น คือ ผิวหน้าของแผ่นคอนกรีตกะเทาะออกและเสียหายเฉพาะบริเวณที่กระสุนกระทบ เนื้อคอนกรีตมีเส้นใยเหล็กช่วยพยุงไว้ จึงไม่แตกร้าวโดยรอบเหมือนคอนกรีตทั้งสามประเภทข้างต้น (รูปที่ 4-ง) ด้านหลังของแผ่นคอนกรีตกะเทาะเป็นเศษชิ้นเล็กใหญ่ปะปนกัน ส่วนใหญ่ยังติดอยู่กับผิวคอนกรีตเนื่องจากแสดงถึงประสิทธิภาพเส้นใยลดการแตกร้าว ซึ่งช่วยป้องกันอันตรายจากสะเก็ดได้ คอนกรีต SFRC หนา 5

เซนติเมตร วิบัติจากกระสุนหนึ่งนัด ขณะที่ความหนา 7.5 เซนติเมตร แรงกระแทกของกระสุนเพียงทำให้ผิวหน้ากะเทาะเล็กน้อย (รูปที่ 5-ข) ส่วนความหนา 10 เซนติเมตร จะต้องยิงซ้ำตำแหน่งเดิมถึง 5 นัดจึงวิบัติ ซึ่งมากสุดในการวิจัยนี้

ตารางที่ 3 จำนวนกระสุนที่ใช้และรูปแบบการวิบัติของคอนกรีต

ประเภทคอนกรีต	ความหนา (cm)	กระสุนที่ยิงจนวิบัติ (นัด)	ลักษณะวิบัติ
NC	5.0	1	เจาะทะลุ
	7.5	1	เจาะทะลุ
	10.0	2	เจาะทะลุ
HSC	5.0	1	เจาะทะลุ
	7.5	1	วิบัติแต่ไม่ทะลุ
	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

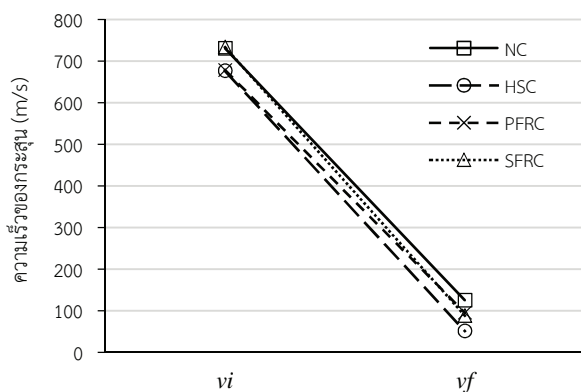
3.4 ความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์และต้านทานการปะทะของกระสุน

การวัดอัตราเร็วของลูกกระสุนก่อน (v_i) และหลัง (v_f) กระแทกแผ่นคอนกรีต เพื่อคำนวณการดูดซับพลังงานจลน์ของแผ่นคอนกรีตตามสมการที่ (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) แสดงว่า กำลังอัดของคอนกรีตเป็นปัจจัยที่ต้านทานแรงกระแทกของกระสุน

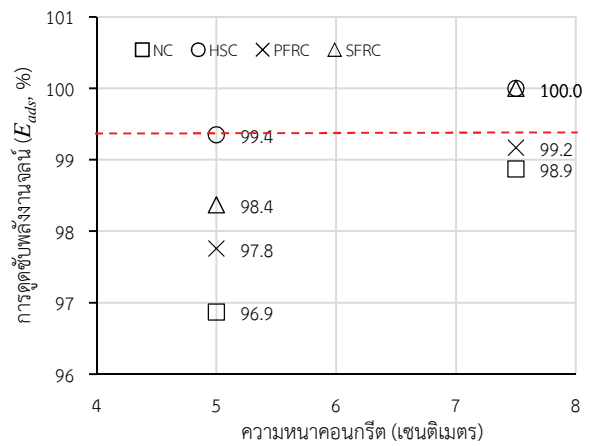
ขณะเดียวกันความเสียหายที่เกิดบนแผ่นคอนกรีต HSC มีมากกว่าคอนกรีต NC (รูปที่ 4) ซึ่งเป็นผลจากความเปราะของคอนกรีต คอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยเส้นใย เส้นใยหลักมีประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานจลน์ดีกว่าเส้นใยพอลิเมอร์ เพราะเส้นใยแข็งแรงกว่า โดยคอนกรีต SFRC และ PFRC ดูดซับพลังงานจลน์ร้อยละ 98.4 และ 97.8 ตามลำดับ สรุปได้ว่าคอนกรีต HSC มีประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานจลน์สูงสุด แต่เกิดความเสียหายมากที่สุดเช่นกัน คอนกรีต SFRC มีร่องรอยความเสียหายน้อยสุด ดังนั้น แนวความคิดในการใช้เส้นใยหลักเสริมคอนกรีตกำลังสูง จะช่วยลดการวิบัติบนแผ่นคอนกรีตและขณะเดียวกันเพิ่มความสามารถดูดซับพลังงานจลน์ ส่วนคอนกรีตที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์น้อยที่สุดคือ คอนกรีต NC



รูปที่ 6 ความเร็วของกระสุนปืนก่อนและหลังกระแทกแผ่นคอนกรีตความหนา 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 ดูดซับพลังงานกระสุนได้ร้อยละ 98.9 และ 99.2 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับคอนกรีต HSC หนา 5 เซนติเมตร (รูปที่ 7) ดังนั้น การเลือกใช้คอนกรีต HSC จะลดความหนาของผนังคอนกรีตได้อย่างน้อย 2.5 เซนติเมตร เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับการใช้คอนกรีตปกติและคอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิเมอร์ ความหนาของผนังลดลงทำให้น้ำหนักผนังเบาลงสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกและรวดเร็ว



รูปที่ 7 ความสามารถดูดซับพลังงานจลน์ของคอนกรีตหนา 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 PFRC กระสุนทะลุผ่านแผ่นคอนกรีตในนัดที่สาม โดยดูดกลืนพลังงานกระสุนในนัดที่สาม ร้อยละ 24.9 และ 97.4 ตามลำดับ คอนกรีต HSC จึงสามารถดูดซับพลังงานได้น้อยมากเมื่อคอนกรีตใกล้จะวิบัติ เพราะคอนกรีต HSC มีความเปราะมากทำให้เกิดรอยร้าวและความเสียหายขนาดใหญ่ ยิ่งกระสุนนัดที่สามทำให้คอนกรีตดูดซับพลังงานจลน์ได้น้อยลง ส่วนคอนกรีต SFRC กระสุนทะลุผ่านแผ่นคอนกรีตในนัดที่ห้า แสดงความเหนียวของแผ่นคอนกรีตที่เสริมเส้นใยหลัก โดยเครื่องวัดอัตราเร็วไม่สามารถตรวจจับความเร็วของกระสุนหลังทะลุผ่านได้

4 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

การพัฒนาคอนกรีตประสิทธิภาพสูงเพื่อใช้ในการป้องกันกระสุนสามารถสรุปและเสนอแนะได้ว่า

4.1 สรุปผลวิจัย

1) กรณีผนังคอนกรีตหนา 5 เซนติเมตร คอนกรีตกำลังสูง HSC ด้านทานแรงกระแทกจากกระสุนและดูดซับพลังงานจลน์ได้สูงที่สุด

2) การเสริมกำลังด้วยเส้นใยหลัก ช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถป้องกันกระสุนได้ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งผนังหนา 7.5 และ 10 เซนติเมตร รูปแบบการวิบัติของคอนกรีต SFRC จะเป็นการกระแทกที่ผิวหน้าและด้านหลังบางส่วน ซึ่งป้องกันไม่ให้เศษคอนกรีตกระเด็นไปทำอันตรายต่อผู้อื่นได้

3) การใช้คอนกรีต HSC และ SFRC ป้องกันกระสุนสามารถลดความหนาของผนังลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ โดยที่ประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานยังคงเท่าเดิม

ส่งผลให้ผนังมีน้ำหนักเบา สะดวกและรวดเร็วในการประยุกต์ใช้ในสนามจริง

4.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรทดลองหล่อคอนกรีตกำลังสูงผสมเส้นใยเหล็กเพื่อศึกษาประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นในประเด็นการดูดซับพลังงานจลน์

2) งานวิจัยขั้นต่อไป ควรหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อประยุกต์ใช้งานจริง ซึ่งมีปัจจัยความเหนียวและกำลังของเหล็กเส้น

5 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) โครงการวิจัยทางด้านยุทธโศภนเพื่อพัฒนาศักยภาพของกองทัพและการป้องกันประเทศ ภายใต้โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษา และการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ขอขอบคุณสำนักงานวิจัยและพัฒนาการทางทหารกองทัพบกในการสนับสนุนการวิจัยในด้านต่างๆ ขอขอบคุณกรมพิเศษที่ 4 ค่ายสุรสีห์เสนา ในการให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทดสอบ เจ้าหน้าที่ และยุทธภัณฑ์ ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวรในการเอื้อเฟื้อสถานที่ทำการวิจัยและอุปกรณ์ประกอบการวิจัย

6 เอกสารอ้างอิง

- [1] รุ่งรวี เณิมศรีภิญโญรัช และกองบรรณาธิการโรงเรียนนักข่าวชายแดนใต้. (2555). ถอดความคิดขบวนการเอกราชปาตานี. โรงเรียนนักข่าวชายแดนใต้. สืบค้นจาก: <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.

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

สายสัมพันธ์ ชุ่มเจริญ¹ ศรีสัจจา วิทยศักดิ์^{2*} ภูพงษ์ พงษ์เจริญ^{3*}

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

E-mail: ¹saisumpans@gmail.com, ²srisatjav@nu.ac.th, ³puongp@nu.ac.th

บทคัดย่อ

วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงชีวภูมิศาสตร์ (Biogeography-based Optimisation: BBO) เป็นหนึ่งในวิธีการทางเมตาฮิวริสติกส์ (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 รวมทั้งการจำแนกลักษณะการทำวิจัย และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์และสังเคราะห์ ทิศทางและแนวโน้มของการวิจัยในอนาคต

คำสำคัญ: วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงชีวภูมิศาสตร์, เมตาฮิวริสติกส์, 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

ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดในความเป็นจริง (Real-world optimisation problem) ส่วนใหญ่จะเป็นปัญหาที่ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของปัญหาประเภทเอ็นพีแบบยาก (Non-deterministic Polynomial-time hard; NP-hard) [1] ปัญหาประเภทนี้จะไม่มีการแก้ปัญหา (Algorithm) ที่มีประสิทธิภาพเพื่อนำมาใช้ในการแก้ปัญหา และเวลาที่ใช้ในการแก้ปัญหาไม่สามารถระบุให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันพหุนามได้ (Non-deterministic Polynomial-time) ตัวอย่างของปัญหาประเภทนี้เช่น ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Travelling Salesman Problem; TSP) ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ (Vehicle Routing Problem; VRP) ปัญหาการจัดตาราง (Scheduling problem) [2] ปัญหาการจัดวางเครื่องจักร (Machine layout problem) [3] และปัญหาการเปรียบเทียบยีนหรือโครโมโซมในวงการแพทย์ (DNA matching) [4]

การแก้ปัญหา NP-hard ด้วยกลุ่มวิธีการหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบดั้งเดิม (Conventional Optimisation Algorithms: COA) เช่น วิธีการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) และวิธีการขั้นตอนวิธีขยายและจำกัดเขต (Branch and Bound) ต้องการเวลานานในการค้นหาค่าตอบโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อแก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่ อีกแนวทางหนึ่งคือการใช้กลุ่มวิธีการค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดโดยอาศัยหลักการประมาณค่าคำตอบ (Approximation Optimisation Algorithms: AOA) [5] เพื่อลดเวลาที่ต้องใช้ในการค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimal solution) ด้วยการประมาณค่าคำตอบที่ใกล้เคียง (Near optimal solutions) ทั้งนี้วิธีการในกลุ่ม AOA นั้นสามารถแบ่งได้อีก 2 กลุ่มย่อยได้แก่ กลุ่มวิธีการหาค่าตอบแบบกำหนดโครงสร้างในการสร้างคำตอบ (Constructive approaches) ซึ่งเป็นกลุ่มวิธีการที่มีรูปแบบเฉพาะในการค้นหาค่าตอบสำหรับปัญหาใดปัญหาหนึ่ง เช่น วิธีการเส้นทางวิฤติ

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

อีกกลุ่มวิธีการหนึ่งที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา คือ กลุ่มวิธีการหาคำตอบแบบวนรอบซ้ำ (Iterative approaches) และบ่อยครั้ง วิธีการกลุ่มนี้ ถูกเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า วิธีการเมต้าฮีริสติกส์ (Metaheuristics) ซึ่งเป็นกลุ่มวิธีที่ใช้กลไกการวนรอบซ้ำเพื่อปรับปรุงคำตอบให้ดีขึ้นในแต่ละรอบการค้นหา และใช้การจำลองความฉลาดจากทางธรรมชาติมาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคำตอบในรอบการวนซ้ำ เช่น วิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) [6] วิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing: SA) [7] วิธีการค้นหาต้องห้าม (Taboo Search: TS) [8] วิธีการค้างคาว (Bat Algorithm: BA) [9] และวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงชีวภูมิศาสตร์ (Biogeography-based Optimisation: BBO) [10] เป็นต้น ในกลุ่มวิธีการนี้ วิธีการ BBO ถือว่าวิธีการที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาใหม่ในทศวรรษปัจจุบัน

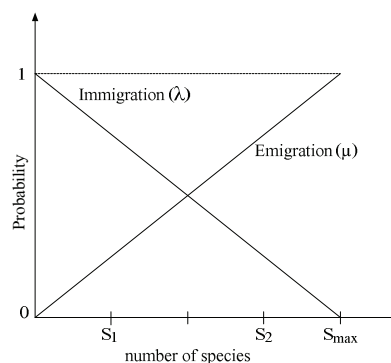
วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงชีวภูมิศาสตร์ (Biogeography-based Optimisation: BBO) ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Simon [10] ในปี พ.ศ. 2551 หลังจากนั้นเป็นต้นมา วิธีการ BBO ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาหลายประเภท เช่น ปัญหาการคัดเลือกอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณสำหรับการประเมินสภาพเครื่องยนต์ของอากาศยาน [10] ปัญหาการออกแบบการจัดวางเครื่องจักร (Machine layout design problem) [11, 12] ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling Salesman Problem: TSP) [13] ปัญหาการจัดตารางการผลิต (Scheduling problem) [14] เป็นต้น ทั้งนี้ได้มีบทความตีพิมพ์จำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการ BBO จากหลายฐานข้อมูลทางวิชาการในระดับนานาชาติ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงระดับความนิยมและศักยภาพของวิธีการ BBO เพื่อนำไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหา

ดังนั้น บทความวิจัยนี้จึงนำเสนอผลการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการ BBO โดยจะเริ่มต้นด้วยการนำเสนอแนวคิดของวิธีการ BBO ในลำดับถัดไป ตามด้วยการนำเสนอขั้นตอนการทำงานของวิธีการ BBO ในหัวข้อที่ 3 และการรวบรวมวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิธีการ BBO ในหัวข้อที่ 4 หลังจากนั้น นำเสนอการจำแนกลักษณะการทำวิจัยของวิธีการ BBO ในหัวข้อที่ 5 และในส่วนสุดท้ายได้ทำการนำเสนอการวิเคราะห์และสังเคราะห์แนวทางการทำงานวิจัยในอนาคต ในหัวข้อที่ 6 ตามด้วยบทสรุปในหัวข้อที่ 7

2. แนวคิดของวิธีการ BBO

วิธีการ BBO เป็นวิธีที่ได้รับแรงบันดาลใจจากกลไกของการอพยพย้ายถิ่นฐาน (Migration mechanism) ของชนิดพันธุ์ในธรรมชาติของระบบนิเวศใดๆ และบ่อยครั้งที่มีการอพยพย้ายถิ่น

ฐานไปสู่ถิ่นที่อยู่ใหม่ และอาจเป็นถิ่นที่อยู่ที่ยังไม่เกิดความสมดุลทางธรรมชาติ หรืออาจมีจำนวนของชนิดพันธุ์ที่แตกต่างไปจากเดิมนั้น ย่อมส่งผลให้สิ่งมีชีวิตจำเป็นต้องมีกลไกการเปลี่ยนแปลงหรือกลายพันธุ์ (Mutation mechanism) เพื่อการปรับตัวให้อยู่รอดในสิ่งแวดล้อมใหม่ต่อไป ทั้งนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอพยพและจำนวนชนิดพันธุ์ในถิ่นฐานของระบบนิเวศ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ของขนาดจะเป็นในการอพยพ กับจำนวนชนิดพันธุ์ [10, 15]

จากรูปที่ 1 แกนนอน แสดงถึงจำนวนชนิดพันธุ์ (Number of species) ที่มีความหลากหลายในแต่ละถิ่นที่อยู่ (Habitat) ภายในระบบนิเวศหนึ่งๆ ขณะที่แนวแกนตั้ง แสดงถึงอัตราการอพยพ ซึ่งโดยปกติจะมีทั้งการอพยพออก (Emigration) และอพยพเข้า (Immigration) ทั้งนี้ระดับความสมดุลของชนิดพันธุ์ในแต่ละถิ่นที่อยู่ จะมีผลต่อการย้ายถิ่นฐานของชนิดพันธุ์ จากเส้นกราฟการอพยพออก จะเห็นได้ว่า ถ้าไม่พบว่ามีชนิดพันธุ์ในถิ่นที่อยู่ ย่อมไม่เกิดความน่าจะเป็นของการอพยพออก ($\mu=0$) แต่จะพบการอพยพเข้าเท่านั้น ในทางตรงกันข้าม ถ้าพบว่าชนิดพันธุ์ครบทุกชนิด (S_{max}) ในถิ่นที่อยู่แล้ว หรือกล่าวได้ว่าเป็นถิ่นที่อยู่ที่เหมาะสม มีค่าดัชนีความเหมาะสมของถิ่นที่อยู่ (Habitat Suitability Index: HSI) สูง การอพยพเข้าของชนิดพันธุ์เดิมที่มีอยู่แล้ว ย่อมไม่ได้ส่งผลใดๆ จึงไม่ต้องมีความน่าจะเป็นในการเกิดการอพยพเข้า ($\lambda=0$)

ตามแนวแกนอนนั้น จะเห็นตัวอย่างคำตอบ (Solution_n; S_n) อยู่หลายคำตอบ เช่น S_1 และ S_2 ซึ่งเป็นคำตอบที่มีความหลากหลายของชนิดพันธุ์ในถิ่นที่อยู่ที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ตัวอย่างคำตอบ S_1 เป็นตัวแทนของถิ่นที่อยู่ (Habitat) ที่ไม่ดี ไม่สมบูรณ์ มีค่าดัชนีความเหมาะสมของถิ่นที่อยู่ต่ำ (Low HSI) มีความหลากหลายของชนิดพันธุ์ต่ำ หรือขาดสมดุลของชนิดพันธุ์ในถิ่นที่อยู่นั้น จึงควรเปิดโอกาสให้มีความน่าจะเป็นของการอพยพเข้า (λ) สูงขึ้น เพื่อหวังจะเพิ่มระดับความหลากหลายและเร่งการปรับเข้าสู่สมดุลของชนิดพันธุ์ให้เร็วขึ้น

ในทางกลับกัน ตัวอย่างคำตอบ S_2 เป็นตัวแทนของถิ่นที่อยู่ (Habitat) ที่ดีและสมบูรณ์ มีค่าดัชนีความเหมาะสมของถิ่นที่อยู่สูง (High HSI) มีความหลากหลายของชนิดพันธุ์สูง กล่าวคือ มีสมมูลของชนิดพันธุ์ในถิ่นที่อยู่นั้นค่อนข้างดี จึงไม่มีความจำเป็นต้องเปิดโอกาสให้มีความน่าจะเป็นของการอพยพเข้าสู่สูงนัก แต่ควรเปิดโอกาสให้มีความน่าจะเป็นของการอพยพออก (μ) เพื่อหวังว่าจะสร้างสมมูลที่ดีของชนิดพันธุ์ (Species) ในถิ่นที่อยู่ (Habitat) นั้นให้เป็นแหล่งขยายชนิดพันธุ์ไปสู่ถิ่นที่อยู่อื่นที่มีระดับความหลากหลายของชนิดพันธุ์ที่ต่ำกว่า ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการอพยพเข้า/ออกและจำนวนชนิดพันธุ์ในถิ่นฐานของระบบนิเวศ 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 จำนวนของถิ่นที่อยู่ในระบบนิเวศ (A group of n habitats) จำนวนรอบการวนซ้ำ (Number of iterations: I_{max}) ความน่าจะเป็นของการปรับค่าตอบ (Probability of modification: P_{mod}) และอัตราการกลายพันธุ์สูงสุด (Maximum mutation rate: M_{max}) [10] การกำหนดค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของวิธีการนี้ ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างคำตอบเริ่มต้น

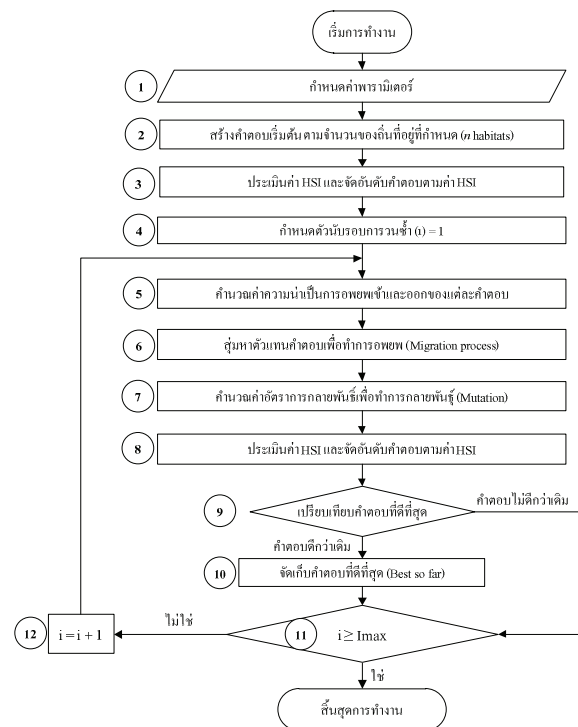
การสร้างถิ่นที่อยู่ (Habitats) หรือกลุ่มคำตอบเริ่มต้น (Candidate solutions) นั้น จะถูกสร้างตามจำนวนถิ่นที่อยู่ในระบบนิเวศ (n habitats) ที่ได้กำหนดไว้ในขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 3 การประเมินค่าคำตอบ และจัดอันดับตามคุณภาพของแต่ละคำตอบ

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

คำตอบทั้งหมดภายในระบบนิเวศ จะถูกนำมาจัดเรียงอันดับโดยพิจารณาจากค่าดัชนีความเหมาะสม ที่เรียงลำดับจากน้อยไป

มาก ซึ่งอันดับของคำตอบที่ได้มานั้น จะถูกนำไปใช้ในขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคำตอบต่อไป



รูปที่ 2 ขั้นตอนการทำงานของวิธีการ BBO

ขั้นตอนที่ 4 การกำหนดรอบเริ่มต้นของการวนซ้ำ

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

ขั้นตอนที่ 5 การคำนวณค่าความน่าจะเป็นการอพยพเข้า (λ) และออก (μ) ของแต่ละคำตอบ

ค่าอัตราการอพยพเข้า (λ_k) และค่าอัตราการอพยพออก (μ_k) สำหรับถิ่นที่อยู่ในลำดับที่ 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 อันดับของถิ่นที่อยู่ มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n

n คือ จำนวนถิ่นที่อยู่ทั้งหมดภายในระบบนิเวศ

I คือ ความน่าจะเป็นในการอพยพเข้าสู่สูงที่สุด ($I = 1$)

E คือ ความน่าจะเป็นในการอพยพออกสูงที่สุด ($E = 1$)

ขั้นตอนที่ 6 การสุ่มหาคำตอบ เพื่อทำการอพยพ (Migration)

ในขั้นตอนของการอพยพของชนิดพันธุ์ (Species: s) ระหว่างถิ่นที่อยู่หนึ่ง กล่าวคือชนิดพันธุ์อาจจะอพยพออกจากถิ่นที่อยู่หนึ่งไปยังอีกถิ่นที่อยู่หนึ่ง ดังนั้นจึงต้องมีการสุ่มเลือกถิ่นที่อยู่ที่จะมีการอพยพออกของชนิดพันธุ์ (Y_k) โดยใช้หลักความน่าจะเป็นของการอพยพออก และสุ่มเลือกถิ่นที่อยู่ที่เกิดการอพยพเข้า (Z_k) โดยคำนึงถึงความน่าจะเป็นของการอพยพเข้า เมื่อสุ่มเลือกได้แล้ว จึงทำการอพยพชนิดพันธุ์ (s) จากถิ่นที่อยู่หนึ่งไปยังอีกถิ่นที่อยู่หนึ่ง [$Z_k(s) \leftarrow Y_k(s)$] ทั้งนี้จำนวนถิ่นที่อยู่ที่จะถูกคัดเลือกทั้งหมดจะต้องมีสัดส่วนที่สอดคล้องกับค่าความน่าจะเป็นของจำนวนคำตอบที่จะถูกปรับปรุงในกระบวนการอพยพ (P_{mod}) [10] เช่น ถ้ากำหนดค่า P_{mod} เท่ากับ 0.9 หมายความว่า จำนวนคำตอบที่จะถูกสุ่มคัดเลือกในกระบวนการอพยพ ควรมีค่าเป็นร้อยละ 90 ของคำตอบทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 7 การคำนวณอัตราการกลายพันธุ์

ขั้นตอนการกลายพันธุ์เป็นขั้นตอนการเพิ่มความหลากหลายให้กับถิ่นที่อยู่ (Habitats) ในระบบนิเวศ ซึ่งเป็นการเปิดโอกาสในการพัฒนาความสมบูรณ์ของถิ่นที่อยู่ให้มีความหลากหลายของชนิดพันธุ์สูงขึ้น และหวังว่าจะมีส่วนช่วยให้ค่าดัชนีความเหมาะสมของถิ่นที่อยู่ดีขึ้น (Higher HSI) ทั้งนี้ขั้นตอนการกลายพันธุ์ไม่ได้กำหนดรูปแบบไว้ตายตัว และที่ผ่านมามีรูปแบบการกลายพันธุ์ที่หลากหลาย [10] [13] [16]

ขั้นตอนที่ 8 ประเมินค่า HSI และจัดอันดับคำตอบตามค่า HSI (ให้ดำเนินการเหมือนขั้นตอนที่ 3)

ขั้นตอนที่ 9 – 10 การเปรียบเทียบและจัดเก็บคำตอบที่ดีที่สุด

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

ขั้นตอนที่ 11 – 12 การตัดสินใจเพื่อหยุดการทำงาน

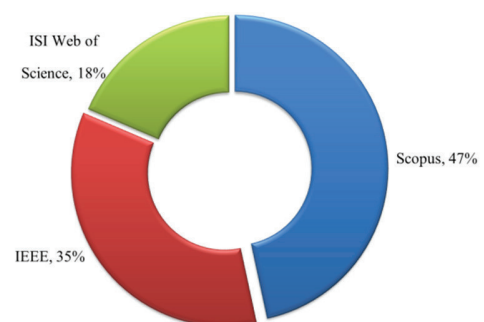
ในทุกรอบของการค้นหาคำตอบของวิธีการ BBO นั้น จะต้องมีการตัดสินใจถึงการหยุดการวนรอบการค้นหา โดยเปรียบเทียบจำนวนรอบการวนซ้ำที่ผ่านมา (i) กับจำนวนรอบของการวนซ้ำสูงสุด (I_{max}) ถ้าค่า i น้อยกว่า I_{max} หมายความว่า การค้นหาคำตอบวิธีการ BBO ยังไม่ครบ จึงวนกลับไปขั้นตอนที่ 5

4. การรวบรวมวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิธีการ BBO

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิธีการ 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 เพื่อตรวจสอบบทความที่ซ้ำซ้อนและลบบทความที่เหมือนกันทิ้งไป สุดท้ายจึงพบจำนวนบทความทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับวิธีการ BBO ทั้งสิ้น 414 บทความ ซึ่งจะมีการทำวิจัยที่แตกต่างกันทั้งด้านลักษณะปัญหา และรูปแบบการประยุกต์ใช้วิธีการ BBO

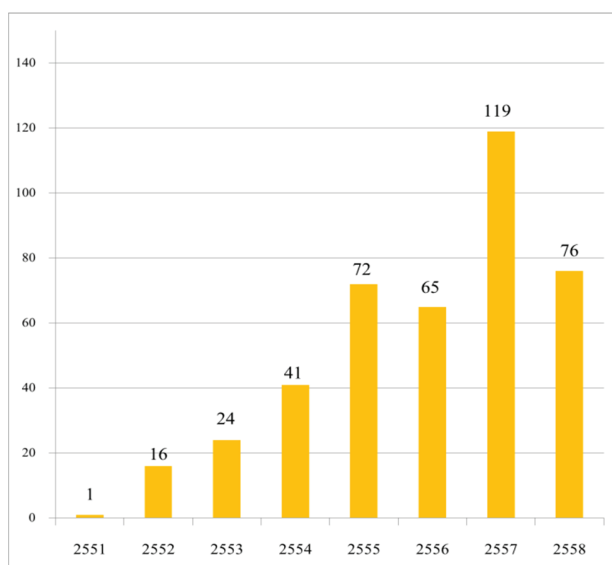
ในจำนวนบทความดังกล่าว เป็นบทความที่ค้นพบจากฐานข้อมูล Scopus คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 47 เป็นบทความจากฐานข้อมูล IEEE Xplore คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 35 และบทความจากฐานข้อมูล ISI Web of Science คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 18 แสดงดังในรูปที่ 3 ทั้งนี้ จากการศึกษาแนวโน้มของจำนวนบทความที่มีการตีพิมพ์เผยแพร่ในแต่ละปี ตั้งแต่ปีแรกที่มีการตีพิมพ์วิธีการ BBO จนถึง ปี 2558 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งจะเห็นว่า วิธีการ BBO ได้รับสนใจเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปี พ.ศ. 2557 มีจำนวนบทความเพิ่มขึ้นเกือบเท่าตัวเมื่อเปรียบเทียบกับปี พ.ศ. 2556 แต่ยังมีข้อสังเกตว่าจำนวนบทความในปี พ.ศ. 2558 มีจำนวนน้อยลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ฐานข้อมูลวิชาการที่ถูกสืบค้น ณ วันที่ 31 ธันวาคม 2558 นั้น อาจจะยังได้รับข้อมูลบทความที่ตีพิมพ์จากวารสารต่างๆ ไม่ครบถ้วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้อมูลบทความที่ถูกตีพิมพ์เผยแพร่ในช่วงปลายปี พ.ศ. 2558



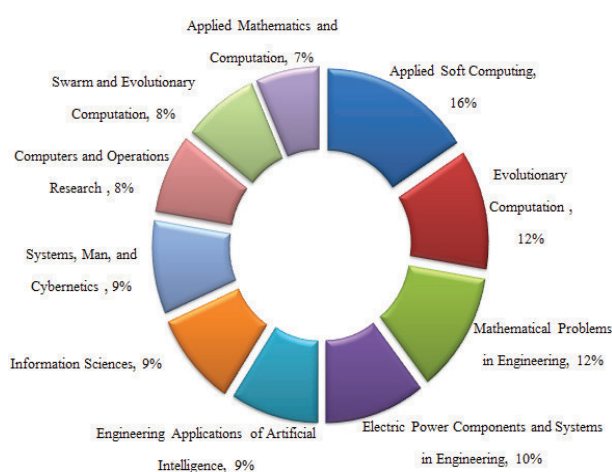
รูปที่ 3 จำนวนบทความในแต่ละฐานข้อมูล

เมื่อจำแนกตามประเภทการตีพิมพ์เผยแพร่ของบทความพบว่า มีบทความเผยแพร่ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ จำนวน 136 บทความ หรือคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 32.77 ของจำนวน

บทความทั้งหมด ขณะที่บทความตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ 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. การจำแนกลักษณะการทำวิจัยของวิธีการ BBO

บทความวิจัยที่เกี่ยวกับวิธีการ BBO สามารถจำแนกโดยใช้เกณฑ์ในการจำแนกที่สำคัญได้ดังนี้ คือ จำแนกโดยใช้ขอบเขตเนื้อหา (Subject areas) ที่กล่าวถึงในบทความ และรูปแบบของการประยุกต์ใช้วิธีการ BBO ในการแก้ปัญหา โดยบทความทั้ง 414 บทความ ได้ถูกจำแนกตามเกณฑ์ดังกล่าว ดังตารางที่ 1 และอธิบาย พร้อมยกตัวอย่างประกอบ ดังนี้

5.1 ขอบเขตเนื้อหา (Subject areas)

ขอบเขตเนื้อหา (Subject areas) ที่ประยุกต์ใช้วิธีการ BBO แบ่งเป็น 4 กลุ่มย่อย ตามการจำแนกจากฐานข้อมูล Scopus ซึ่งประกอบด้วย กลุ่มชีววิทยาศาสตร์ (Life Sciences) กลุ่มวิทยาศาสตร์สุขภาพ (Health Sciences) กลุ่มสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์ (Social Sciences & Humanities) และกลุ่มวิทยาศาสตร์กายภาพ (Physical Sciences) โดยบางบทความที่ถูกค้นพบเฉพาะฐานข้อมูล ISI และ IEEE Xplore จะถูกนำมาจัดเข้าสู่กลุ่มย่อยดังกล่าวเช่นกัน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1.1 ชีววิทยาศาสตร์ (Life Sciences)

บทความวิจัยในกลุ่มนี้มีจำนวน 12 บทความ ทั้งนี้งานวิจัยด้านชีววิทยาศาสตร์จะเกี่ยวข้องกับการศึกษาโครงสร้างทางชีววิทยาของสิ่งมีชีวิต (Biological) [17] รวมไปถึงงานทางด้านเกษตรกรรม (Agricultural) ชีวเคมี (Biochemistry) ภูมิคุ้มกันวิทยา (Immunology) เภสัชวิทยา (Pharmacology) พิษวิทยา (Toxicology) เป็นต้น ตัวอย่างบทความที่ประยุกต์ใช้วิธีการ BBO แก้ปัญหาทางด้านชีววิทยาศาสตร์ เช่น งานวิจัยของ Liu et al. [18] ประยุกต์ใช้วิธีการ BBO เพื่อการพัฒนาประสิทธิภาพการวินิจฉัย และจัดหมวดหมู่โรคมาเร็งด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีความซับซ้อนทางชีววิทยา เพื่อให้ได้มาซึ่งตัวบ่งชี้ทางชีวภาพ (Biomarker) จากการค้นหาและระบุขอบเขตของยีนที่มีความผิดปกติ จากจำนวนยีนตัวอย่างที่เก็บมาทั้งหมด

5.1.2 วิทยาศาสตร์สุขภาพ (Health Sciences)

บทความวิจัยในกลุ่มนี้มีจำนวน 6 บทความ งานวิจัยด้านนี้จะเกี่ยวข้องกับศาสตร์ทางการแพทย์ การพยาบาล ทันตแพทย์ สัตวศาสตร์ และศาสตร์ทางด้านสุขภาพอื่นๆ ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Srivastava et al. [19] ประยุกต์ใช้วิธีการ BBO ในการตรวจสอบความถูกต้องของเปปไทด์ ในการระบุโมเลกุลของสารประกอบหลักกลุ่ม 1 ที่สามารถทำให้เนื้อเยื่อเข้ากันได้ (Major Histocompatibility Complex Class I) ซึ่งการตรวจสอบความถูกต้องของเปปไทด์ เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการผลิตวัคซีนที่มีประสิทธิภาพต่อการรักษาโรคที่เกี่ยวข้องกับระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย

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

หัวข้อ	รายละเอียด	จำนวน	หมายเลขอ้างอิงบทความ
ขอบเขตเนื้อหา (Subject areas)	ชีววิทยาศาสตร์ (Life Sciences)	12	18-29
	วิทยาศาสตร์สุขภาพ (Health Sciences)	6	19, 22, 23, 25, 27, 28
	สังคมศาสตร์และมนุษย (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
รูปแบบการประยุกต์ใช้วิธีการ 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 สังคมศาสตร์และมนุษย (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 นอกจากนี้ยังพบงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้วิธีการ BBO เพื่อการบูรณะรูปภาพ (Image restoration) [87] เพื่อใช้แก้ปัญหาการจับคู่รูปภาพ (Image matching problem) [249] เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพการประเมินสิ่งเคลื่อนไหวในการเข้ารหัสวิดีโอ (Motion estimation in video encoding) [132, 193]

5.1.4 วิทยาศาสตร์กายภาพ (Physical Sciences)

การประยุกต์ใช้วิธีการ BBO มีขอบเขตเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์กายภาพมากที่สุดถึง 367 บทความ ดังตารางที่ 1 งานวิจัยในกลุ่มนี้จะเป็นการศึกษาในศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับสิ่งไม่มีชีวิต เช่น วิศวกรรมศาสตร์ คณิตศาสตร์ ฟิสิกส์ เคมี วัสดุ สิ่งแวดล้อม พลังงาน โลก ดาวเคราะห์ และดวงดาว หรือเป็นศาสตร์ที่เกิดจากการผสมผสานองค์ความรู้ที่กล่าวถึงข้างต้น (Multidisciplinary) ดังตัวอย่างต่อไปนี้

การประยุกต์ใช้วิธีการ BBO ในด้านไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ เช่น การประยุกต์ใช้วิธีการ BBO แก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดในระบบไฟฟ้ากำลัง [37, 63-66] หรือในระบบไฟฟ้ากำลังที่คำนึงถึงความสูญเสียจากการส่งผ่านในระบบไฟฟ้า [133, 135] การประยุกต์ใช้วิธีการ BBO กับปัญหาด้านระบบโครงข่ายไร้สาย เช่น ปัญหาในอุปกรณ์ตรวจจับแบบไร้สาย (Wireless sensor networks) [156, 157] ปัญหาการประเมินค่าพารามิเตอร์ในระบบเรดาร์ 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] การออกแบบสายอากาศแบบยาคิ-อูดา (Yagi-Uda) [97, 98] การออกแบบสายอากาศที่ไม่มีการกำหนดรูปแบบตายตัว (Non-uniform circular antenna) [124, 128]

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

ปริพันธ์ - อินทิกรัล (Proportional - Integral - Derivative Controller: PID Controller) ซึ่งเป็นระบบควบคุมอัตโนมัติที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุด ด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบที่ขึ้นอยู่กับตัวแปร 3 ค่า คือ ค่าสัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์ ค่าสัดส่วนกำหนดจากผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน การกำหนดค่าปริพันธ์อยู่บนพื้นฐานของผลรวมความผิดพลาดที่พ่วงผ่านไป ขณะที่การกำหนดค่าอนุพันธ์อยู่บนพื้นฐานของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด น้ำหนักที่เกิดจากการรวมกันของทั้งสามนี้ จะใช้ในการปรับกระบวนการให้ค่าผิดพลาดเหลือน้อยที่สุด

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

5.2 รูปแบบการประยุกต์ใช้วิธีการ BBO

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

5.2.1 การประยุกต์ใช้วิธีการ BBO แบบดั้งเดิม

การแก้ปัญหาคำถามที่เหมาะสมที่สุดนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่เป็นกลุ่มวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบดั้งเดิม (Conventional optimisation algorithms: COA) กลุ่มวิธีการหาคำตอบแบบกำหนดโครงสร้างในการสร้างคำตอบ

(Constructive approaches) และกลุ่มวิธีการเมตาฮิวริสติกส์ (Metaheuristics) ดังนั้น การประยุกต์ใช้วิธีการ BBO แบบดั้งเดิม จึงมักจะเกี่ยวข้องกับการทดสอบความสามารถในการค้นหาคำตอบของวิธีการ BBO กับวิธีการอื่นๆ ผ่านปัญหาเทียบเคียง (Benchmarking problems) [198, 283] หรือเพื่อทดสอบการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมปัญหาใหม่ที่เพิ่งถูกนำเสนอด้วยวิธีการเมตาฮิวริสติกส์ [290, 375]

5.2.2 การปรับแต่งของวิธีการ BBO (BBO modification)

คุณภาพของคำตอบที่ได้จากวิธีการเมตาฮิวริสติกส์ขึ้นอยู่กับความสมดุลของการสำรวจเพื่อหาผลเฉลยที่เป็นไปได้ใหม่ (Exploration หรือ Diversification) และการเลือกผลเฉลยโดยอาศัยความรู้เดิมที่มีอยู่ก่อนแล้ว (Exploitation หรือ Intensification) [435, 436] ดังนั้น การปรับความสมดุลระหว่าง Exploration และ Exploitation จึงเป็นแนวทางการพัฒนาคุณภาพคำตอบ วิธีการแรกที่ใช้ในการปรับสมดุลระหว่าง Exploration และ Exploitation ของวิธีการ BBO คือ การปรับปรุงโดยการปรับแต่งกระบวนการคัดเลือกคำตอบ กระบวนการการอพยพ และกระบวนการกลายพันธุ์ของวิธีการ BBO ดังตัวอย่างต่อไปนี้

งานวิจัยของ Sooncharoen [11] ได้ปรับแต่งกลไกการคัดเลือกคำตอบเข้าสู่ขั้นตอนการอพยพของวิธีการ BBO ด้วยการเพิ่มขั้นตอนการเปรียบเทียบคำตอบระหว่างคำตอบที่ดีที่สุด (Best solution) ที่ได้จากรอบการค้นหาล่าสุด และคำตอบที่ดีที่สุดจากการค้นหาทุกๆ รอบที่ผ่านมา (Best so far: BSF) ถ้าคุณภาพของคำตอบจากรอบการค้นหาล่าสุดไม่ดีขึ้นภายในจำนวนรอบการวนซ้ำที่กำหนด จะเปลี่ยนรูปแบบการคัดเลือกคำตอบจากการคัดเลือกตามความน่าจะเป็นไปเป็นการคัดเลือกแบบสุ่ม (Random selection) ทั้งนี้ เพื่อเพิ่มการสำรวจ (Exploration) ในการหาผลเฉลยที่เป็นไปได้ใหม่ของวิธีการ BBO ให้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถนำรูปแบบการปรับปรุงคำตอบอื่นๆ ที่เคยผ่านการทดลองแก้ปัญหาในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน แล้วให้ผลลัพธ์ที่ดีเข้ามาปรับใช้กับวิธีการ BBO [11] เช่น การนำรูปแบบการปรับปรุงคำตอบแบบ 2PECX และ 2ORS [437] ที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการประยุกต์แก้ปัญหาการจัดเรียงเครื่องจักรผ่านวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) [438] โดยได้นำมาประยุกต์ใช้ในวิธีการ BBO ด้วย ซึ่งผลการทดลองพบว่าสามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

งานวิจัยของ Li et al. [112] นำเสนอตัวแบบการอพยพรูปไซน์ (Sinusoidal migration model) เพื่อใช้ในขั้นตอนการคัดเลือกคำตอบเข้าสู่กระบวนการอพยพ และใช้กระบวนการกลายพันธุ์แบบเกาส์เซียน (Gaussian mutation operator) โดยมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาความสามารถในการสำรวจเพื่อหาผล

เฉลยที่เป็นไปได้ใหม่ (Exploration) ของวิธีการ BBO ที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบของวิธีการ BBO

5.2.3 การศึกษาค่าพารามิเตอร์ BBO

การปรับปรุงวิธีการ BBO ด้วยการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการปรับสมดุลระหว่าง Exploration และ Exploitation การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะทำให้แต่ละองค์ประกอบของวิธีการแก้ปัญหาสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างลงตัว ซึ่งจะนำไปสู่กลไกการค้นหาและการปรับปรุงคำตอบที่มีประสิทธิภาพสูงสุด [439] โดยทั่วไปแล้ว องค์ประกอบของวิธีการเมตาฮิวริสติกส์จะประกอบด้วย ตัวแทนคำตอบ (Representations) และตัวดำเนินการ (Operators) ต่างๆ เช่น ตัวดำเนินการคัดเลือกตัวแทนคำตอบ ตัวดำเนินการปรับปรุงคำตอบ ตัวดำเนินการเพื่อตรวจสอบเงื่อนไขต่างๆ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

งานวิจัยของ Attar et al. [199] กล่าวว่า คุณภาพของวิธีการเมตาฮิวริสติกส์ขึ้นอยู่กับกำหนัดค่าพารามิเตอร์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จึงทำการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้วิธีการ BBO เพื่อแก้ปัญหาการจัดตารางสำหรับการทำงานไหลเลื่อนแบบยืดหยุ่น (Hybrid flexible flowshop scheduling problem) ด้วยวิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (Response surface methodology) ขณะที่งานวิจัยของ Sooncharoen [11] ได้ทำการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ด้วยวิธีการแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial design)

งานวิจัยของ Dutta et al. [367] ใช้การทดลองแบบลองผิดลองถูก (Trial and error method) เพื่อเลือกค่าพารามิเตอร์ของวิธีการ BBO ที่สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด (Optimal power flow problem) เนื่องจากทดสอบแล้วพบว่า ประสิทธิภาพของวิธีการ BBO ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ที่กำหนด

งานวิจัยของ Berghida and Boukra [359] กล่าวไว้ว่า การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับวิธีการแก้ปัญหา (Algorithm) มีผลอย่างมากต่อผลลัพธ์สุดท้ายที่ได้ โดยแต่ละปัญหามีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแตกต่างกันไป งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการปีนเขา (Hill Climbing Approach) เพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับวิธีการ BBO ที่ถูกพัฒนาขึ้นจากวิธีการแบบดั้งเดิม ในการประยุกต์ใช้แก้ปัญหาปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ (Vehicle routing problem) ที่เรียกว่าวิธีการ An Enhanced Biogeography-based Optimisation (EBBO)