

การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการสำหรับการวิเคราะห์และลดปริมาณรบกวนในการหล่อโลหะ  
อะลูมิเนียมผสม

นายณัฐณพัชร์ กวีพรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2557  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Application of Evolutionary Algorithm for Aluminum Alloy Casting Porosity Analysis  
and Optimization

Mr. Natnapat Gaviphatt

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Computer Engineering  
Department of Computer Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2014  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการสำหรับการวิเคราะห์และลดปริมาณรูปทรงในการหล่อโลหะอะลูมิเนียมผสม
โดย	นายณัฐณพัชร์ กวีพรรณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร. ประภาส จงสถิตย์วัฒนา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร. เชษฐา พันธุ์เครือบุตร

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ศาสตราจารย์ ดร. ประภาส จงสถิตย์วัฒนา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(อาจารย์ ดร. เชษฐา พันธุ์เครือบุตร)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมะทัต วิภาตะวานิช)

ณัฐณพัชร์ กวีพรรณ : การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการสำหรับการวิเคราะห์และลดปริมาณรูพรุนในการหล่อโลหะอะลูมิเนียมผสม (Application of Evolutionary Algorithm for Aluminum Alloy Casting Porosity Analysis and Optimization) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร. ประภาส จงสฤษดิ์วิวัฒนา, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: อ. ดร. เชษฐา พันธุ์เครือบุตร, 65 หน้า.

โลหะผสมเป็นรูปแบบของวัสดุที่มีการใช้งานตั้งแต่สมัยอดีตกาล การพัฒนาทางโลหะวิทยาและวัสดุศาสตร์ที่มีควบคู่กันมาทำให้ทุกวันนี้มีทรงคุณภาพและเป็นที่ยอมรับและจะเป็นเป็นได้มากกว่านี้ในอนาคต หนึ่งในโลหะผสมที่ใช้กันมากคืออะลูมิเนียมผสมด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นในแง่ของการขึ้นรูป ความแข็งแรงและน้ำหนัก แต่ปัญหาสำคัญหนึ่งของอะลูมิเนียมหล่อผสมนั้นคือรูพรุนที่ทำให้วัสดุมีคุณสมบัติด้อยลง วิทยานิพนธ์นี้จึงเป็นการวิจัยเพื่อหาแนวทางในการลดปริมาณรูพรุนจากการหล่ออะลูมิเนียมผสม

การพัฒนาทางคอมพิวเตอร์นั้นเป็นที่โดดเด่นมากในช่วงครึ่งทศวรรษที่ผ่านมาทั้งทางด้านอุปกรณ์และศิลปวิทยาการ หนึ่งในนั้นมีศาสตร์ที่เน้นการหาจุดที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาต่าง ๆ นั่นก็คือหัวข้อการหาจุดที่ดีที่สุด ในเรื่องการหาจุดที่ดีที่สุดนั้นมีการประยุกต์ใช้ความรู้มากมายทางคณิตศาสตร์มาใช้เพื่อให้สามารถหาจุดที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาที่ยากแก่การวิเคราะห์ได้ เครื่องมือหนึ่งของการหาจุดที่ดีที่สุดที่โดดเด่นและใช้งานกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบันคือขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithm) โดยแม้ว่าจะใช้ทรัพยากรการประมวลผลค่อนข้างสูงและกินเวลาแต่ถ้าได้รับการปรับปรุงให้เหมาะสมต่อปัญหาก็สามารถทำให้การหาจุดที่ดีที่สุดมีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ วิทยานิพนธ์นี้จึงตั้งใจนำเสนอการนำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) และการวิวัฒนาการเชิงผลต่าง (Differential Evolution) มาปรับปรุงใช้กับการทำนายปริมาณรูพรุนในโลหะอะลูมิเนียมผสมด้วยการสร้างโมเดลฟังก์ชันขึ้นมาอธิบายแนวโน้มการเกิดรูพรุนและหาส่วนผสมที่ทำให้เกิดปริมาณรูพรุนน้อยที่สุดจากโมเดลฟังก์ชันที่สร้างขึ้นในลำดับถัดมา โดยผลการปรับปรุงเป็นที่น่าพอใจและสามารถสร้างสมการทำนายรูพรุนที่มีค่าความผิดพลาดไม่มากได้รวมถึงสามารถหาส่วนผสมที่ทำให้เกิดปริมาณรูพรุนน้อยที่สุดของสมการทำนายได้เช่นกัน

ภาควิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์	ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....
ปีการศึกษา	2557	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5770410121 : MAJOR COMPUTER ENGINEERING

KEYWORDS: POROSITY / EVOLUTIONARY ALGORITHM

NATNAPAT GAVIPHATT: Application of Evolutionary Algorithm for Aluminum Alloy Casting Porosity Analysis and Optimization. ADVISOR: PROF. PRABHAS CHONGSTITVATANA, Ph.D., CO-ADVISOR: CHEDTHA PUNCREOBUTR, Ph.D., 65 pp.

Alloy is a form of materials that has been used since the third millenia BC. Metallurgy and Material Science, which it was concurrently developed with, had made it great quality and popular, and it would be even more in the future. Aluminum alloy is one of useful alloys, well-accepted for its outstanding properties in castability, strenght and weight. But the most important issue is porosity which always occurs and degrades its properties. This thesis aimed to research for a way to reduce the porosity from aluminum casting alloy.

Development in computer technology has been amazingly remarkable in the past half-decade both in physical equipments and arts and sciences. Among them, there exists a topic of finding the best solutions for problems. The topic that applied many ideas from Mathematics to achieve the best solutions for challenging problems. It is the topic of Optimization. Evolutionary algorithm is a general-purpose and recognized group of tools for Optimization. Though they take heavy computational resources and time and perform not so magnificent as general-purpose algorithms, with good adjustment, they could be powerful. This thesis purposed an application of genetic algorithm and differential evolution, branches of evolutionary algorithms, to porosity prediction for aluminum casting alloy by constructing a model function from casting composition to explain its trend. The model function was then applied with differential evolution to find the best composition. The results of adjustment were pleasing, achieving low error prediction and being able to find the optimized composition based on the model function.

Department: Computer Engineering Student's Signature .....

Field of Study: Computer Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014 Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ศ. ดร. ประภาส จงสถิตย์วัฒนา ที่ประสาทริวิชาการความรู้และคำแนะนำ แนวคิดต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์มากมายทางด้านคอมพิวเตอร์ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม อ. ดร. เชษฐา พันธุ์ศรีบุตร สำหรับการเริ่มต้น คำแนะนำ ความรู้ทางโลหะวิทยา ความรู้ทางวัสดุศาสตร์และการช่วยเหลือที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี ขอขอบคุณ รศ. ดร. สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล ที่เป็นประธานกรรมการ และ ผศ. ดร. เขมชาติ วิภาตะวนิช กรรมการจากภายนอกสำหรับแนวคิดที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณ อ. ดร. พีรพล เวทีกุล และ ผศ. ดร. เศรษฐา ปานงาม ที่ให้โอกาสและเปิดโลกทัศน์ในด้านการศึกษแก่ข้าพเจ้าและขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. สุกรี สินธุภิญโญ สำหรับการไขข้อสงสัยในบางปัญหา

ขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนตลอดมาทั้งกำลังทรัพย์ กำลังปัญญา รวมไปถึงกำลังใจในการศึกษาให้สำเร็จจุล่งได้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่มอบโอกาสและทุนการศึกษาอัจฉริยะคืนรังในการศึกษาต่อระดับมหาบัณฑิต รวมถึงบัณฑิตวิทยาลัยที่มอบทุนสนับสนุนการตีพิมพ์ผลงานวิชาการและนำเสนอผลงานในต่างประเทศแก่ข้าพเจ้า

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	2
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 ผลงานตีพิมพ์ .....	4
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1.1 ขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการ .....	5
2.1.1.1 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm).....	6
การแทนลักษณะ (Representations).....	6
การคัดเลือกต้นแบบ (Parent Selection).....	8
การคัดเลือกผู้รอด (Survivor Selection).....	8
2.1.1.2 กลยุทธ์เชิงวิวัฒนาการ (Evolution Strategy).....	8
การแทนลักษณะ (Representation).....	8

การคัดเลือกต้นแบบ (Parent Selection).....	9
การคัดเลือกผู้อยู่รอด (Survivor Selection).....	10
2.1.1.3 วิวัฒนาการเชิงผลต่าง (Differential Evolution).....	10
การแทนลักษณะ (Representation).....	10
การคัดเลือกต้นแบบ (Parent Selection).....	11
การคัดเลือกผู้อยู่รอด (Survivor Selection).....	11
2.1.2 แนวโน้มของปริมาณรุกราน.....	14
2.1.3 วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบไม่เชิงเส้น .....	15
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.3.1 งานวิจัยทางด้านโลหะวิทยาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เครื่องมือต่าง ๆ.....	16
2.3.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน.....	17
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	18
3.1 การเพิ่มประสิทธิภาพการวิวัฒนาการเชิงผลต่าง.....	19
3.1.1 วิเคราะห์คุณสมบัติของค่าน้ำหนักเชิงผลต่าง (F) และอัตราการแลกเปลี่ยน (Cr)..	19
3.1.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างสำหรับฟังก์ชันต่อเนื่องที่ สามารถหาค่าเหมาะที่สุดได้และไม่ขึ้นกับเวลา .....	22
3.1.3 การเพิ่มประสิทธิภาพของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างสำหรับปัญหาการเลือก สัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมกับข้อมูล .....	27
3.2 การสร้างต้นแบบการประมาณค่าเชิงคณิตศาสตร์.....	32
3.3 การหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการหล่อ .....	38
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	40
4.1 ผลการทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพการวิวัฒนาการเชิงผลต่าง .....	40
4.1.1 วิเคราะห์คุณสมบัติของค่าน้ำหนักเชิงผลต่าง (F) และอัตราการแลกเปลี่ยน (Cr)..	40
4.1.1.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	44



4.1.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างสำหรับฟังก์ชันต่อเนื่องที่ สามารถหาอนุพันธ์ย่อยได้และไม่ขึ้นกับเวลา .....	46
4.1.2.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง .....	47
4.1.3 การเพิ่มประสิทธิภาพของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างสำหรับปัญหาการเลือก สัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมกับข้อมูล .....	49
4.1.3.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง .....	50
4.2 การสร้างต้นแบบการประมาณค่าเชิงคณิตศาสตร์ .....	51
4.2.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง .....	53
4.4 การหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการหล่อ .....	54
4.4.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง .....	54
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย .....	56
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	56
5.2 การวิจัยที่อาจทำได้ในอนาคต .....	58
รายการอ้างอิง .....	60
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	65

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 แผนภาพการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการ .....	6
รูปที่ 2.2 แนวโน้มของ (a) ปริมาณรูปพูนจากไฮโดรเจน (b) ปริมาณรูปพูนจากการหดตัว.....	14
รูปที่ 3.1 ภาพรวมการดำเนินงาน.....	18
รูปที่ 3.2 ภาพในมุมมองต่าง ๆ ของสมการที่ 3.1 (ก) มุมก้มในสามมิติ (ข) กราฟแบบคอนทัวร์ (ค) กราฟของฟังก์ชันที่ระนาบ $X = 0$ .....	19
รูปที่ 3.3 แผนภาพการทำงานของการพัฒนาการเชิงผลต่างที่ปรับใช้การลงตามแนวลาดชันสูงสุด.....	23
รูปที่ 3.4 แผนภาพการทำงานของการพัฒนาการเชิงผลต่างที่ปรับใช้วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอर्टท์ .....	28
รูปที่ 3.5 ต้นแบบการแทนปัญหาสำหรับขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการ .....	34
รูปที่ 3.6 แผนภูมิลำดับการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม .....	36
รูปที่ 3.7 แผนภูมิลำดับการทำงานของการค้นหาส่วนผสมที่ดีที่สุด.....	39
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการแจกแจงของจำนวนรอบที่ใช้ในการหาเจอ .....	43
รูปที่ 4.2 กราฟเทียบระหว่างค่าจากการทดลองของข้อมูลชุดที่หนึ่งกับค่าจากการประมาณด้วยสมการที่ 4.1 .....	51
รูปที่ 4.3 กราฟเทียบระหว่างค่าจากการทดลองของข้อมูลชุดที่หนึ่งรวมกับชุดที่สองกับค่าจากการประมาณด้วยสมการที่ 4.2 .....	52

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 การตั้งค่าของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างเพื่อการทดลอง .....	20
ตารางที่ 3.2 ค่าน้ำหนักเชิงผลต่างและอัตราการแลกเปลี่ยนที่จะทำการทดลอง และทดลอง เพิ่มเติม .....	21
ตารางที่ 3.3 ฟังก์ชันสำหรับการทดสอบอื่น ๆ สำหรับปัญหาจุดต่ำสุดในปริภูมิต่อเนื่องและการตั้ง ค่าที่ใช้ .....	26
ตารางที่ 3.4 ฟังก์ชันสำหรับการทดสอบในปัญหาการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมและการตั้งค่าที่ ใช้ .....	31
ตารางที่ 3.5 การตั้งค่าของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและการวิวัฒนาการเชิงผลต่างสำหรับการหา ฟังก์ชันการประมาณค่า .....	37
ตารางที่ 3.6 การตั้งค่าของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างสำหรับการหาส่วนผสมที่จะให้ปริมาณรูพรุน จากการหล่อน้อยที่สุด .....	38
ตารางที่ 4.1 โอกาสการค้นพบเมื่อตั้งค่าด้วยค่าน้ำหนักเชิงผลต่างและอัตราการรวมตัวต่าง ๆ ..	40
ตารางที่ 4.2 ค่าเชิงสถิติเมื่อตั้งค่าด้วยค่าน้ำหนักเชิงผลต่างและอัตราการรวมตัวต่าง ๆ .....	42
ตารางที่ 4.3 ค่าทางสถิติเทียบกันระหว่างการค้นหาบริเวณต่ำสุดกับจุดใกล้จุดต่ำสุด .....	44
ตารางที่ 4.4 ค่าทางสถิติของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่ปรับปรุงแล้วบนฟังก์ชันที่สร้างขึ้นเอง ..	46
ตารางที่ 4.5 ค่าทางสถิติของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่ปรับปรุงแล้วบนฟังก์ชันทดสอบอื่น ๆ ..	47
ตารางที่ 4.6 ค่าทางสถิติเทียบกันระหว่างการค้นหาบริเวณต่ำสุดกับจุดใกล้จุดต่ำสุดกับจุดใกล้จุด ต่ำสุดแต่ใช้วิธีที่ปรับปรุงแล้ว .....	48
ตารางที่ 4.7 ค่าทางสถิติของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่ปรับปรุงแล้วด้วยวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ค วอร์ตท์ .....	49
ตารางที่ 4.8 เวลาที่ใช้ในการทำงานของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างเทียบกันระหว่างก่อนและหลัง ปรับปรุง .....	50
ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงค่าความผิดพลาดเทียบกันระหว่างสมการที่ 4.1 กับโครงข่ายประสาท เทียม .....	52

ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงค่าความผิดพลาดเทียบกันระหว่างสมการที่ 4.2 กับโครงข่ายประสาทเทียม .....	53
ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงส่วนผสมที่ให้รูปพุนน้อยที่สุดจากการประมาณค่าของสมการที่ 4.1 ..	54
ตารางที่ 4.12 ตารางแสดงส่วนผสมที่ให้รูปพุนน้อยที่สุดจากการประมาณค่าของสมการที่ 4.2 ..	54

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

โลหะผสม (Alloy) เป็นวัสดุที่ถูกบันทึกไว้ในประวัติศาสตร์คู่กับมนุษย์มาหลายพันปี ซึ่งใช้ในการผลิตเครื่องประดับ สิ่งของเครื่องใช้งานต่าง ๆ รวมถึงอาวุธ ในปัจจุบันโลหะผสมกลายเป็นสิ่งที่มีการใช้งานกันทั่วไปมากขึ้นกว่าในอดีต เพราะโลหะผสมในได้รับการปรับปรุงพัฒนาต่อมาจากในอดีตมาก แม้แต่โลหะบริสุทธิ์มีการนำมาใช้กันมากไม่เท่า [1] ทั้งด้วยประสบการณ์จากการทดลองและการผลิตที่ผ่านมา และความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ทุกวันนี้กระบวนการขึ้นรูปโลหะผสมสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การดึง การอบเหนียว การหลอมและการอัดเป็นต้น แต่วิธีที่สะดวกในการขึ้นรูปมากที่สุดและไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์มากนั่นคือการหล่อ

เมื่อกล่าวถึงการหล่อโลหะ โลหะหล่อชนิดหนึ่งที่เป็นที่นิยมในปัจจุบันคืออะลูมิเนียมซึ่งเป็นธาตุที่มีมากที่สุดเป็นอันดับสามบนเปลือกโลก [2] อะลูมิเนียมผสมมีข้อได้เปรียบอันโดดเด่นกว่าโลหะผสมชนิดอื่น ๆ คือแม้จะมีความแข็งแรง แต่ก็ยังมีน้ำหนักเบา และที่สำคัญที่สุดคือมีราคาถูกเมื่อเทียบกับคุณภาพเพราะสามารถหาได้ง่าย ในการหล่ออะลูมิเนียมผสมนั้นมีประเด็นที่ต้องพิจารณามากมาย ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติของวัสดุเป้าหมาย แต่สิ่งที่มีมักจะประเด็นปัญหาที่สำคัญคือรูพรุน (Porosity) ในเนื้อโลหะนั้นรูพรุนที่เกิดขึ้นจะทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ ของโลหะผสมด้อยลงได้ [3] ไม่ว่าจะเป็นความแข็งแรง [4] หรือแม้แต่ผิวสัมผัส

รูพรุนในเนื้อโลหะอะลูมิเนียมผสมเกิดขึ้นจาก 2 สาเหตุหลัก กรณีแรกคือรูพรุนจากการหดตัวในกระบวนการแข็งตัวของโลหะผสมเนื้อโลหะจะเกิดการหดตัว ทั้งนี้การหล่อโลหะไม่ได้มีการใช้แรงอัดแต่อย่างใด การหดในขณะที่กำลังแข็งตัวจึงมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดช่องว่างภายในขึ้นได้ง่าย [5] อีกกรณีหนึ่งคือเมื่อโลหะผสมลดอุณหภูมิลงในขณะที่เป็นของเหลว ความสามารถในการทำละลายก๊าซไฮโดรเจนจะลดลง ส่งผลให้ฟองก๊าซหลุดออกมาและทำให้เกิดช่องว่างเมื่อแข็งตัวโลหะในที่สุด [6]

ด้วยส่วนผสมของโลหะและปัจจัยการหล่อที่แตกต่างกัน ปริมาณและลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในโลหะก็จะต่างกันด้วย ดังนั้นจึงเป็นที่แน่นอนว่ามีความสัมพันธ์บางอย่างระหว่างปัจจัย

เหล่านั้นกับปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้น จึงเป็นเรื่องที่ท้าทายมากในการที่จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวออกมาเป็นสมการเชิงคณิตศาสตร์ตรง ๆ เนื่องจากปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องมีหลากหลาย ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีโมเดลเชิงสถิติเช่นการถดถอยหรือโครงข่ายประสาทเทียม ที่สามารถประมาณความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ แต่โมเดลเหล่านั้นสามารถนำมาวิเคราะห์ปัจจัยได้น้อยกว่าสมการ นอกจากนี้ความสัมพันธ์ที่ได้ยังสามารถนำไปสู่การคำนวณหาสูตรผสมที่จะทำให้ได้อะลูมิเนียมผสมที่มีรูพรุนภายในน้อยที่สุดได้อีกด้วย ดังนั้นขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีสำหรับการหาค่าเหมาะสมที่มีประสิทธิภาพมากวิธีหนึ่งทั้งในแง่ความอเนกประสงค์และศักยภาพ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการและเทคนิควิธีต่าง ๆ มาปรับใช้ในการหาสมการความสัมพันธ์ดังกล่าว

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ออกแบบโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ที่สามารถประมาณปริมาณรูพรุนในเนื้อโลหะโดยมีส่วนผสมในการหล่อต่าง ๆ เป็นปัจจัยได้
2. วิเคราะห์โมเดลเชิงคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหาการรูพรุนในเนื้อโลหะ
3. ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดกับปัญหาการลดรูพรุนในเนื้ออะลูมิเนียมผสมจากการหล่อ
4. วิเคราะห์ผลของปริมาณส่วนผสมต่างๆต่อแนวโน้มการเกิดปริมาณรูพรุนในเนื้อโลหะอะลูมิเนียม
5. นำข้อมูลจากการวิเคราะห์หาค่าเหมาะสมที่สุดที่ทำให้เกิดรูพรุนในเนื้ออะลูมิเนียมผสมจากการหล่อน้อยที่สุด

## 1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

1. โมเดลเชิงคณิตศาสตร์สร้างขึ้นโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithm) วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear Least Square) หรือการถดถอย (Regression)
2. การหาส่วนผสมของการหล่อที่จะให้ปริมาณรูพรุนน้อยที่สุดกระทำโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการเป็นหลัก

3. โมเดลการประมาณค่าเชิงคณิตศาสตร์และการหาค่าเหมาะสมที่สุดรองรับการหาตัวแปรดำเนินการที่เหมาะสมที่สุดในประเด็นปัญหาของการหาอัตราส่วนตัวแปรปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้รุกรุนน้อยที่สุดจากการหล่ออะลูมิเนียมผสม
4. โปรแกรมพัฒนาบน Visual Studio โดยใช้ภาษา C, C++ และ C# เป็นหลัก และใช้ MATLAB ช่วยในการประเมินและแสดงผล

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. โมเดลเชิงสถิติสามารถประมาณปริมาณรุกรุนในเนื้อโลหะโดยมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเป็นหนึ่งในปัจจัยได้โดยเฉพาะกรณีของการหล่ออะลูมิเนียมผสม
2. การประมาณคุณสมบัติจากกระบวนการเชิงโลหะด้วยโมเดลเชิงสถิติสามารถนำไปปรับใช้กับสถานการณ์อื่น ๆ ได้
3. การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดกับปัญหาการลดรุกรุนในเนื้ออะลูมิเนียมผสมจากการหล่อสามารถหาคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ
4. ได้ส่วนส่วนผสมของตัวแปรปัจจัยที่ทำให้เกิดรุกรุนในเนื้อโลหะจากการหล่ออะลูมิเนียมผสมน้อยที่สุด
5. รูปแบบในการหาค่าตัวแปรกระบวนการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดำเนินการทางเชิงโลหะด้วยการใช้ระเบียบวิธีเชิงวิวัฒนาการสามารถนำไปปรับใช้กับสถานการณ์อื่น ๆ ได้

#### 1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะประกอบไปด้วยข้อมูลที่แบ่งเป็นทั้งหมด 5 บท

**บทที่ 1 บทนำ** บทนำจะกล่าวเกี่ยวกับที่มาเบื้องหลังของการทำงานวิจัยนี้ ความคาดหวังขอบเขต ข้อกำหนดเบื้องต้นและข้อมูลป้อนข้อมูลอื่น ๆ ของงานวิจัยที่ไม่สามารถจัดอยู่บ่ออื่นได้เป็นหลัก

**บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง** ในบทนี้ในช่วงแรกจะเป็นข้อมูลเกี่ยวกับทฤษฎีและความรู้ต่าง ๆ ที่มีประโยชน์และสำคัญกับงานวิจัยนี้ ส่วนถัดไปจะเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดในทางด้านโลหะวิทยาและคอมพิวเตอร์

**บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย** บทนี้จะกล่าวถึงการทดลองต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตั้งแต่ขั้นตอนการทดลองรวมไปถึงเทคนิคแนวคิดที่ใช้และวัตถุประสงค์ของการทดลองนั้น ๆ ด้วย

**บทที่ 4 ผลการวิจัย** โดยหลัก ๆ แล้วจะเป็นผลจากการทดลองทั้งหมดที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 แต่จะมีการวิเคราะห์ผลการทดลองต่าง ๆ เพิ่มเข้าไปด้วย

**บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย** บทสุดท้ายจะกล่าวถึงผลการวิจัยโดยรวมและสรุปว่าเป็นอย่างไร จากนั้นจะกล่าวถึงการวิจัยต่อยอดที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต

## 1.6 ผลงานตีพิมพ์

ในการวิจัยนี้ได้มีผลงานนำเสนอในการประชุมเชิงวิชาการระดับนานาชาติทั้งหมด 2 ครั้ง พร้อมกับได้รับการตีพิมพ์ลงในเอกสารการประชุมทั้งสอง

1) 2015 The 4th International Conference on Manufacturing Engineering and Process (ICMEP) โดยจัดขึ้นที่กรุงปารีส ประเทศฝรั่งเศสระหว่างวันที่ 13-15 เมษายน พ.ศ.2558 โดยนำเสนอในชื่อ “Application of Evolution Algorithms to Aluminium Alloy Casting Porosity Prediction Function” ซึ่งผลงานดังกล่าวเป็นการตีพิมพ์ผลงานนี้ในวงการวิชาการทางโลหะวิทยา เนื้อหาส่วนใหญ่เขียนสำหรับให้นักโลหะวิทยาทำความเข้าใจและวิเคราะห์ได้ง่ายกว่า

2) 2015 12<sup>th</sup> International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2015) โดยจัดขึ้นในประเทศไทยระหว่างวันที่ 24-26 มิถุนายน พ.ศ. 2558 โดยนำเสนอในชื่อ “Porosity Prediction in Aluminium Casting Using Approximate Functions Generated by Evolutionary Algorithm” ซึ่งผลงานดังกล่าวเป็นการตีพิมพ์ผลงานนี้ในวงการของอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ ทำให้เนื้อหาส่วนใหญ่เป็นปัจจุบันมากกว่าการประชุมในข้อแรก อีกทั้งยังเขียนข้อมูลในแง่มุมมองคอมพิวเตอร์มากกว่า



## บทที่ 2

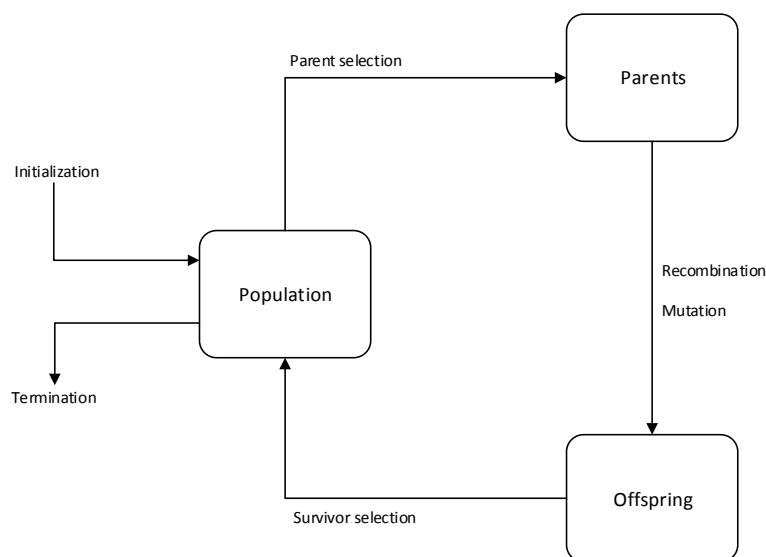
### งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 ขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการ

ขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithm) เป็นการคำนวณหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic Optimization) ที่ทำตามอย่างการวิวัฒนาการที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ อันได้แก่ การสืบพันธุ์ การแลกเปลี่ยนยีน การกลายพันธุ์ และการคัดเลือก ซึ่งขั้นตอนวิธีดังกล่าว สามารถนำไปใช้ได้กับปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดได้อย่างกว้างขวาง โดยขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการส่วนใหญ่จะมีรูปแบบขั้นตอนเหมือน ๆ กันดังนี้ [7]

1. ทำการสร้างประชากรกลุ่มแรกขึ้นมาด้วยการสุ่ม
2. ประเมินความเหมาะสมของแต่ละสมาชิกประชากร
3. วนดำเนินการกระบวนการทำงานต่อไปเรื่อยๆจนกว่าจะได้ถึงจุดที่เหมาะสมหรือเข้าเงื่อนไขการหยุดแล้ว
  - 3.1. คัดเลือกประชากรขึ้นมาเป็นต้นกำเนิด
  - 3.2. ผสมคู่ของต้นกำเนิดเข้าด้วยกันออกมาเป็นสมาชิกตัวใหม่
  - 3.3. ทำการกลายพันธุ์สมาชิกที่เกิดขึ้นจากขั้นที่แล้ว
  - 3.4. ประเมินความเหมาะสมของแต่ละสมาชิกประชากรใหม่
  - 3.5. คัดเลือกสมาชิกที่จะเป็นประชากรรุ่นถัดไป



รูปที่ 2.1 แผนภาพการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการ

ทั้งนี้ในกลุ่มของขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการก็มีขั้นตอนวิธีย่อย ๆ หลากหลายรูปแบบ ขั้นตอนวิธีที่เป็นที่รู้จักมากที่สุดในกลุ่มนี้คือ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) ซึ่งแต่ละวิธีการคำนวณและมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในสถานการณ์และรูปแบบปัญหาที่แตกต่างกันออกไป โดยขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ มีดังนี้

### 2.1.1.1 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm)

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมถูกคิดขึ้นครั้งแรกโดยคุณฮอลแลนด์ เพื่อให้เป็นวิธีหนึ่งในการศึกษาพฤติกรรมการปรับตัว [8] อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวได้ถูกมองว่าเป็นวิธีการหาค่าเหมาะสมอย่างกว้างขวาง สำหรับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ประเด็นสำคัญของปัญหาที่จะนำมาประยุกต์ใช้นั้นคือการแทนค่าสมาชิกของปัญหาหรือการเข้ารหัสโครโมโซม ซึ่งโดยทั่วไปแล้วรูปแบบการเข้ารหัสมีดังต่อไปนี้

#### การแทนลักษณะ (Representations)

3) การแทนลักษณะแบบเลขฐานสอง (Binary Representation) รูปแบบการแทนค่านี้นี้จะพิจารณาสมาชิกแต่ละตัวเป็นสายของบิตที่แต่ละตำแหน่งมีค่าเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้นเช่น 01001010110 เป็นต้น ดังนั้นเทคนิควิธีที่ใช้ในการกลายพันธุ์ยีนของแต่ละสมาชิกจะทำการเปลี่ยนบิตจาก 0 เป็น 1 หรือ 1 เป็น 0 ซึ่งแต่ละบิตจะได้รับการพิจารณาแยกกันโดยสุ่มว่าบิตนั้น ๆ จะเปลี่ยนเลขหรือไม่

ในส่วนของการรวมตัว สามารถแบ่งได้เป็นสามแบบ แบบแรกคือแบบจุดข้ามเดียว การรวมตัวแบบนี้จะต้องกำหนดจุดข้ามขึ้นมาจุดหนึ่ง แล้วทำการสลับสายของบิตดังตัวอย่าง 00111|10 x 01101|00 -> 0011100,0110110 เป็นต้น แบบที่สองคือจุดข้ามมากกว่าหนึ่งซึ่งจะมีจุดข้ามตามแต่จะกำหนด และแบบที่สามคือจุดข้ามสม่ำเสมอ ในแบบนี้จะทำการพิจารณาแยกกันว่ายีนในแต่ละตำแหน่งจะทำการสลับกับของคู่ผสมหรือหรือไม่โดยการสุ่ม

4) การแทนลักษณะแบบเลขจำนวนเต็ม (Integer Representation) รูปแบบการแทนค่านี้จะพิจารณาสมาชิกแต่ละตัวเป็นสายของเลขจำนวนเต็มในช่วงที่กำหนด เทคนิควิธีที่ใช้ในการกลายพันธุ์ยีนของแต่ละสมาชิกโดยทั่วไปมี 2 แบบ แบบแรกคือการสุ่มใหม่ เมื่อตัวเลขในตำแหน่งหนึ่ง ๆ ของยีนถูกกำหนดให้กลายพันธุ์ ตำแหน่งนั้นต้องทำการสุ่มตัวเลขจากช่วงที่กำหนดใหม่ แบบที่สองคือการค่อย ๆ เปลี่ยน โดยเมื่อตัวเลขในตำแหน่งหนึ่ง ๆ ของยีนถูกกำหนดให้กลายพันธุ์ตัวเลขในตำแหน่งนั้น ๆ จะต้องถูกบวกเข้าไปด้วยค่าที่สุ่มขึ้นมา ซึ่งค่าดังกล่าวนี้มักจะถูกสุ่มด้วยการแจกแจงที่สมมาตรรอบ 0 และมีค่าน้อย สำหรับการรวมตัวของ การแทนค่าแบบนี้สามารถทำได้ด้วยวิธีเดียวกับการแทนค่าแบบเลขฐานสอง

5) การแทนลักษณะแบบเลขจำนวนจริง (Real number representation) รูปแบบการแทนค่านี้จะพิจารณาสมาชิกแต่ละตัวเป็นสายของเลขจำนวนจริงในช่วงที่กำหนด เทคนิควิธีที่ใช้ในการกลายพันธุ์จะมีลักษณะคล้ายกับวิธีการของการแทนค่าแบบเลขจำนวนเต็ม แบบแรกคือ การกลายพันธุ์อย่างสม่ำเสมอ ค่าในตำแหน่งที่ถูกกำหนดให้กลายพันธุ์จะถูกสุ่มใหม่จากช่วงที่กำหนด และแบบที่สองคือ การกลายพันธุ์อย่างไม่สม่ำเสมอด้วยการแจกแจงคงที่ ซึ่งจะทำการบวกค่าที่สุ่มจากการแจกแจงที่กำหนด เข้าไปในตัวเลขตำแหน่งที่ถูกพิจารณาให้กลายพันธุ์ โดยการแจกแจงที่นิยมคือการแจกแจงแบบเกาส์เซียน และการแจกแจงแบบโคชี สำหรับการรวมตัวของ การแทนค่าแบบนี้ อาจทำได้ด้วยวิธีเดียวกับการแทนค่าแบบเลขฐานสองก็ได้ โดยจะเรียกว่าการรวมแบบไม่ต่อเนื่อง หรืออาจรวมเชิงคณิตศาสตร์แทนก็ได้ ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการรวมแบบไม่ต่อเนื่อง เพียงแต่ในส่วนของยีนที่จะทำการสลับกันระหว่างคู่ผสม จะใช้ค่าระหว่างคู่แทนที่จะสลับกันตรง ๆ

6) การแทนลักษณะแบบเรียงสับเปลี่ยน (Permutation representation) รูปแบบการแทนค่านี้จะแทนค่าสมาชิกของปัญหาด้วยสายของอันดับซึ่งมักเป็นตัวเลขจำนวนเต็ม โดยพิจารณารูปแบบการเรียงมากกว่าที่จะพิจารณาว่าค่าในแต่ละตำแหน่งเป็นอะไร ตัวอย่างปัญหาที่มักใช้การแทนค่าแบบเรียงสับเปลี่ยนเช่นปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling salesman problem) [9]

### การคัดเลือกต้นแบบ (Parent Selection)

จากประเด็นของการเลือกรูปแบบการแทนค่ายีนให้แก่ปัญหา จะเห็นว่าการผสมระหว่างคู่ต้นแบบเป็นขั้นตอนหลักอันหนึ่งของกระบวนการ ดังนั้นการเลือกคู่ผสมจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยวิธีการเลือกคู่ผสมที่นิยมมีดังนี้

1. Fitness Proportional Selection
2. Ranking Selection
3. Tournament Selection
4. Roulette wheel algorithm
5. Stochastic Universal Sampling

### การคัดเลือกผู้อยู่รอด (Survivor Selection)

ซึ่งหลังจากที่การผสมกันเกิด จะเกิดสมาชิกผู้สืบทอดกลุ่มใหม่ขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการเลือกสมาชิกที่อยู่รอดและกำจัดสมาชิกส่วนเกินออก โดยวิธีการคัดเลือกผู้อยู่รอดที่นิยม มีดังนี้

1. Age-based replacement
2. Fitness-based replacement
  - 2.1. Replace worst
  - 2.2. Elitism

#### 2.1.1.2 กลยุทธ์เชิงวิวัฒนาการ (Evolution Strategy)

กลยุทธ์เชิงวิวัฒนาการได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นประมาณปีค.ศ. 1960 โดย Rechenberk และ Schwefel สำหรับใช้กับปัญหา Shape Optimization [10] ที่เป็นปัญหาบนจำนวนจริง เนื่องจากเป็นขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบหนึ่ง ลักษณะต่าง ๆ จึงคล้ายกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ดังนี้

### การแทนลักษณะ (Representation)

เนื่องจากผู้พัฒนาต้องการใช้กับปัญหาที่เป็นจำนวนจริง การแทนลักษณะในกลยุทธ์เชิงวิวัฒนาการจึงเหมือนกับการแทนแบบจำนวนจริงของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม คือจะพิจารณาสมาชิกแต่ละตัวเป็นสายของเลขจำนวนจริงในช่วงที่กำหนดหรือเป็นเวกเตอร์นั่นเอง หากแต่ข้อแตกต่าง

สำคัญของกลุ่ยทธ์เชิงวิวัฒนาการกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอยู่ที่ขั้นตอนการกลายพันธุ์ สำหรับการกลายพันธุ์โดยทั่วไปของกลุ่ยทธ์เชิงวิวัฒนาการ มีลักษณะดังนี้

$$x'_i = x_i + N(0, \sigma) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $x'_i$  คือจำนวนจริงในตำแหน่งที่  $i$  ของเวกเตอร์หลังจากการกลายพันธุ์  
 $x_i$  คือจำนวนจริงในตำแหน่งที่  $i$  ของเวกเตอร์ที่จะทำการกลายพันธุ์  
 $N(0, \sigma)$  คือค่าที่สุ่มจากการแจกแจงปกติโดยมีค่าเฉลี่ยที่ 0 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $\sigma$

หมายความว่าเวกเตอร์  $(x_1, x_2, \dots, x_n, \sigma)$  หลังจากการกลายพันธุ์จะเป็น  $(x'_1, x'_2, \dots, x'_n, \sigma')$  ในส่วนของการกลายพันธุ์  $\sigma$  มีลักษณะดังต่อไปนี้

1.  $\sigma' = \sigma e^{N(0, \tau)}$  เมื่อใช้  $\sigma$  สำหรับการกลายพันธุ์จำนวนจริงใด ๆ ในเวกเตอร์
2.  $\sigma'_i = \sigma_i e^{N(0, \tau') + N(0, \tau)}$  เมื่อใช้  $\sigma_i$  สำหรับการกลายพันธุ์เฉพาะ  $x_i$  ในเวกเตอร์ โดย  $\tau' \propto 1/\sqrt{2n}$  และ  $\tau \propto 1/\sqrt{2\sqrt{n}}$  และ  $n$  คือมิติของเวกเตอร์
3.  $\sigma'_i = \sigma_i e^{N(0, \tau') + N(0, \tau)}$   
 $\alpha'_j = \alpha_j + N(0, \beta)$   
 $\bar{x}' = \bar{x} + \bar{N}(0, C')$

ซึ่งใช้สำหรับกรณีที่ต้องการให้ทรงรีของค่าสุ่มเกิดบนแกนใดๆ

ในส่วนของการรวมตัวสำหรับกลุ่ยทธ์เชิงวิวัฒนาการนั้น เช่นเดียวกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม แต่สำหรับก็คือการรวมแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete recombination) หรืออาจรวมโดยใช้ค่าระหว่าง (Intermediary recombination)

$$z_i = \begin{cases} \frac{x_i + y_i}{2}, & \text{Intermediary recombination} \\ x_i \text{ or } y_i, & \text{Discrete recombination} \end{cases} \quad (2.2)$$

การคัดเลือกต้นแบบ (Parent Selection)

ในการคัดเลือกต้นแบบของกลุ่ยทธ์เชิงวิวัฒนาการจะไม่เหมือนกับของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่กลุ่มของต้นแบบจะต้องคัดเลือกขึ้นมาจากกลุ่มของประชากรด้วยวิธีต่าง ๆ กลุ่ยทธ์เชิง

วิวัฒนาการจะให้สิทธิ์แก่ประชากรทุกตัวเท่ากันโดยไม่สนใจค่าใด ๆ กล่าวคือในขั้นตอนการรวมตัวของกลยุทธ์ ต้นแบบจะถูกสุ่มขึ้นมาจากประชากรด้วยการแจกแจงอย่างเท่าเทียม

#### การคัดเลือกผู้รอด (Survivor Selection)

หลังจากขั้นตอนทุกอย่าง ในขั้นตอนสุดท้ายของวงวนจะเป็นการคัดเลือกกลุ่มประชากรรุ่นถัดไป การคัดเลือกของกลยุทธ์เชิงวิวัฒนาการนั้นไม่ซับซ้อน คือจะทำการเลือกสมาชิกที่มีค่าความเหมาะสมที่สุดมาเข้ากลุ่มประชากรใหม่ อย่างไรก็ตามการเลือกจะเลือกจากกลุ่มของผู้สืบทอดที่ได้มาจากขั้นตอนการรวมตัวและการกลายพันธุ์อย่างเดียว ( $(\mu, \lambda) Selection$ ) หรือเลือกจากประชากรกลุ่มเดิมด้วย ( $(\mu + \lambda) Selection$ ) ก็แล้วแต่ผู้ใช้เลือก

#### 2.1.1.3 วิวัฒนาการเชิงผลต่าง (Differential Evolution)

วิวัฒนาการเชิงผลต่างถูกพัฒนาขึ้นโดย Price และ Storn [11] เพื่อให้เป็นเครื่องมือหาค่าฟังก์ชันเหมาะสมที่ง่ายต่อการใช้งาน โดยเน้นให้ใช้กับปัญหาบนปริภูมิต่อเนื่องเช่นเดียวกับกลยุทธ์เชิงวิวัฒนาการ [12]

#### การแทนลักษณะ (Representation)

เนื่องจากผู้พัฒนาต้องการใช้กับปัญหาที่เป็นจำนวนจริง การแทนลักษณะในการวิวัฒนาการเชิงผลต่างจึงเหมือนกับการแทนลักษณะด้วยจำนวนจริงของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม คือจะพิจารณาสมาชิกแต่ละตัวเป็นสายของเลขจำนวนจริงในช่วงที่กำหนดหรือเป็นเวกเตอร์นั่นเอง

ในส่วนของการกลายพันธุ์การวิวัฒนาการเชิงผลต่างจะใช้การรวมกันของเวกเตอร์ต่าง ๆ ที่สุ่มขึ้นมาดังนี้

$$v_i = x_{r0} + F \cdot (x_{r1} - x_{r2}) \quad (2.3)$$

เมื่อ	$v_i$	คือ เวกเตอร์กลายพันธุ์ตัวที่ $i$
	$x_{rx}$	คือ เวกเตอร์ที่ $x$ ที่สุ่มมาจากกลุ่มประชากร
	$F$	คือค่าน้ำหนักเชิงผลต่าง (Differential weight) ซึ่ง $F \in [0,1]$

ส่วนการรวมตัวนั้น เป็นขั้นตอนที่จะต้องทำหลังจากการกลายพันธุ์ โดยจะเหมือนการรวมตัวแบบไม่ต่อเนื่องของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม แต่การรวมตัวของการวิวัฒนาการเชิงผลต่าง จะสุ่มเลือกระหว่างค่าเดิม หรือค่าจากเวกเตอร์กลายพันธุ์ดังนี้

$$u_{j,i} = \begin{cases} v_{j,i}, & \text{rand}_j(0,1) \leq Cr \\ x_{j,i}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $u_{j,i}$  คือ ค่าในมิติที่  $j$  ของเวกเตอร์ทดลองตัวที่  $i$

$v_{j,i}$  คือ ค่าในมิติที่  $j$  ของเวกเตอร์กลายพันธุ์ตัวที่  $i$

$x_{j,i}$  คือ ค่าในมิติที่  $j$  ของเวกเตอร์เป้าหมายตัวที่  $i$

$\text{rand}_j(0,1)$  คือ ฟังก์ชันการสุ่มค่าในช่วงเปิด 0 ถึง 1

$Cr$  คือ ค่าระบุอัตราการแลกเปลี่ยน(Crossover Rate) ซึ่ง  $Cr \in [0,2]$

การคัดเลือกต้นแบบ (Parent Selection)

เมื่อก้าวถึงการคัดเลือกต้นแบบสำหรับการวิวัฒนาการเชิงผลต่าง จะพบว่า มีลักษณะที่แตกต่างออกไปจากขั้นตอนวิธีอื่น ๆ ที่กล่าวไปข้างต้น โดยในการกลายพันธุ์ การรวมตัว และการคัดเลือกผู้อยู่รอด จะมีการคัดเลือกต้นแบบที่แตกต่างกันไป เช่นการเลือกเวกเตอร์เป้าหมาย ทุก ๆ เวกเตอร์ในกลุ่มประชากรจะได้เป็นเวกเตอร์เป้าหมายภายใน 1 รอบการคำนวณ ส่วนในขั้นตอนการกลายพันธุ์ จะมีการสุ่มเลือกสามเวกเตอร์จากในกลุ่มประชากรด้วยการแจกแจงอย่างเท่าเทียม

การคัดเลือกผู้อยู่รอด (Survivor Selection)

หลังจากที่การคำนวณได้ผ่านพ้นขั้นตอนการกลายพันธุ์และการรวมตัวมาแล้ว ขณะนั้นจะมีเวกเตอร์สำคัญที่เกี่ยวข้อง 2 อันคือ เวกเตอร์ทดลอง และเวกเตอร์เป้าหมายที่อยู่ในกลุ่มประชากร การเลือกผู้อยู่รอดของการวิวัฒนาการเชิงผลต่าง จะใช้การเปรียบเทียบกันว่าจากสองเวกเตอร์นั้น ฝ่ายที่มีความเหมาะสมมากกว่าจะได้กลับเข้าสู่กลุ่มประชากร

$$x_{i,g+1} = \begin{cases} u_{i,g}, & f(u_{i,g}) \leq f(x_{i,g}) \\ x_{i,g}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.5)$$

- เมื่อ  $x_{i,g+1}$  คือ เวกเตอร์ที่  $i$  ในกลุ่มประชากรรุ่นที่  $g + 1$   
 $u_{i,g}$  คือ เวกเตอร์ทดลองที่  $i$  ในรุ่นที่  $g$   
 $x_{i,g}$  คือ เวกเตอร์ที่  $i$  ในกลุ่มประชากรรุ่นที่  $g$   
 $f(X)$  คือ ค่าความเหมาะสมของเวกเตอร์  $X$



ดังนั้นเมื่อสรุปภาพรวมการทำงานของกระบวนการวิวัฒนาการเชิงผลต่างอย่างง่าย (Simple Differential Evolution) จะได้ดังรหัสเทียมต่อไปนี้

```

N : Number of population          P : Population of vectors
Cu : Vector of upper bound constraint    Cl : Vector of lower bound constraint
D : Dimension of every vector
F : Scaling factor                Cr : Crossover rate
V : Group of mutant vectors        U : Group of trial vectors
// Initialization
for each( vector x in P ){
    for( i = 1 to D) x[i] = rand(0,1)*(Cu[i]-Cl[i]) + Cl[i];
}
// Operation
while( not met termination criterion){
    //Generate trial vectors
    for( j = 1 to N ){
        r1,r2,r3 = random pick vectors from P which r1≠r2≠r3 ;
        V[j]= r1 + F*(r2-r3);
        for( i = 1 to D)
            if( rand(0,1) ≤ Cr) U[j][i] = min(max(V[j][i],Cl[i]),Cu[i]);
            else U[j][i]=P[j][i];
        }
    }
    // Survivor selection
    for( j = 1 to N) if( U[j] is better fit than P[j] ) P[j] = U[j];
}

```

นอกจากการวิวัฒนาการเชิงผลต่างแบบดั้งเดิมที่ยกตัวอย่างไปข้างต้น การวิวัฒนาการเชิงผลต่างยังมีกลยุทธ์ให้เลือกใช้อีก 5 รูปแบบซึ่งเมื่อรวมรูปแบบดั้งเดิมเข้าไปจึงเป็น 6 รูปแบบคือ

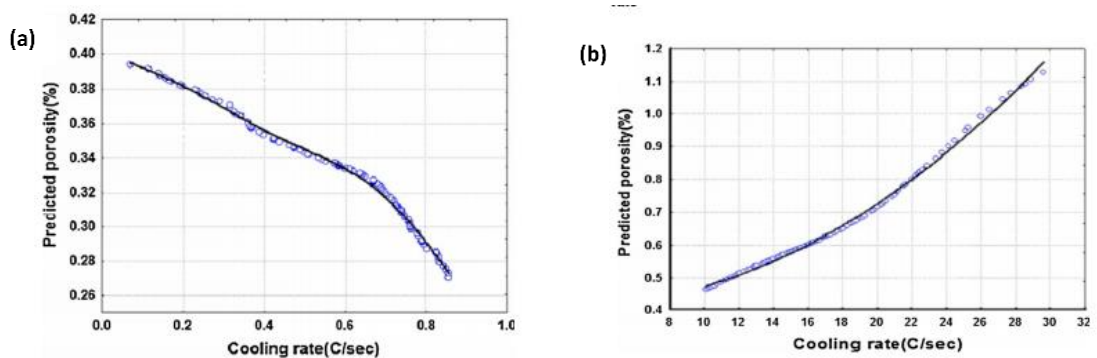
1. DE/rand/1 (classical DE)
2. DE/local-to-best/1
3. DE/best/1 with jitter
4. DE/rand/1 with per-vector-dither
5. DE/rand/1 with per-generation-dither
6. DE/rand/1 either-or-algorithm

### 2.1.2 แนวโน้มของปริมาณรูพรุน

จาก [13] ในการหล่อแต่ละครั้งรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อโลหะเกิดขึ้นมาจากสองสาเหตุหลักคือ

1) รูพรุนจากฟองก๊าซไฮโดรเจน การเกิดรูพรุนจากสาเหตุนี้เป็นเพราะความสามารถในการทำละลายก๊าซไฮโดรเจนของโลหะ เมื่อเป็นของเหลวอุณหภูมิสูงนั้นมากกว่าของเหลวอุณหภูมิต่ำ ลงมาและมากกว่าของแข็ง ทำให้เกิดฟองก๊าซผุดขึ้นมาในเนื้อโลหะ ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนจะสามารถละลายลงมาในโลหะเหลวได้มากขึ้น ถ้าโลหะเหลวคงสภาพอยู่เช่นนั้นนาน กล่าวคือ ยิ่งกระบวนการเย็นตัวช้าลงเท่าใด ปริมาณฟองก๊าซก็จะมากขึ้นเท่านั้น

2) รูพรุนจากการหดตัวของเนื้อโลหะเมื่อเกิดการแข็งตัว เมื่อโลหะอะลูมิเนียมเหลวเย็นตัวลงและเกิดการแข็งตัวจะมีการหดตัว ซึ่งมีแนวโน้มทำให้เกิดรูพรุนภายในเนื้อโลหะเช่นเดียวกัน โดยที่



รูปที่ 2.2 แนวโน้มของ (a) ปริมาณรูพรุนจากไฮโดรเจน (b) ปริมาณรูพรุนจากการหดตัว

หากอัตราการเย็นตัวมีค่าสูงขึ้น เนื้อโลหะจะไม่สามารถไหลมาเติมเต็มช่องว่างได้ทันทำให้แนวโน้มของปริมาณรูพรุนสูงขึ้นตามเช่นเดียวกัน

### 2.1.3 วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบไม่เชิงเส้น

การวิเคราะห์กำลังสองน้อยสุดแบบไม่เชิงเส้นเป็นรูปแบบหนึ่งของการวิเคราะห์กำลังสองน้อยสุดเพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบไม่เชิงเส้นที่กำหนดกับชุดของตัวเลขใด ๆ ซึ่งวิธีนี้มักจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น โดยวิธีนี้จะต้องทำการประมาณค่าของตัวแปรเริ่มต้นขึ้นมาก่อน หลังจากนั้นจึงทำการวนปรับปรุงค่าของตัวแปรให้ดีขึ้นเรื่อย ๆ ดังสมการ

$$x_{k+1} = x_k + p_k \quad (2.6)$$

เมื่อ  $x$  คือเวกเตอร์ของตัวแปรที่กำลังการปรับปรุง  $p$  คือเวกเตอร์ของค่าที่จะเพิ่มให้กับตัวแปร และ  $k$  หมายถึงรอบที่  $k$  โดยวิธีในกลุ่มนี้มีหลากหลายเช่น

7. วิธีลงตามแนวลาดชันสูงสุด (Steepest Descend Method)[14]

$$p_k = \frac{\nabla f_{(k)}(x)}{\|\nabla f_{(k)}(x)\|} \cdot \alpha \quad (2.7)$$

8. ขั้นตอนวิธีเกาส์-นิวตัน (Gauss-Newton Algorithm)[15]

$$p_k = -H_{(k)}^{-1}g_{(k)} \quad (2.8)$$

9. ขั้นตอนวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควาร์ดท์ (Levenberg-Marquardt Algorithm)

$$p_k = -(H_{(k)} + \lambda D)^{-1}g_{(k)} \quad (2.9)$$

เมื่อ	$H_{(k)}$	คือ Hessian Matrix
	$g_{(k)}$	คือ Gradient Matrix
	$\lambda$	คือค่าคงตัว
	$D$	คือเมตริกซ์ขั้นบันได เช่น เมตริกซ์เอกลักษณ์

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.3.1 งานวิจัยทางด้านโลหะวิทยาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เครื่องมือต่าง ๆ

การนำเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ทางการรู้จำของเครื่อง (Machine Learning) และการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) มาปรับใช้กับปัญหาทางด้านวัสดุและโลหะการนั้นมีให้เห็นมากขึ้นในทศวรรษที่ผ่านมา [16, 17] โดยงานวิจัยในลักษณะการหาค่าเหมาะสมด้วยการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อประมาณค่าปัญหาก่อน แล้วนำโครงข่ายประสาทเทียมดังกล่าวมาหาค่าเหมาะสมด้วยขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการนั้นมีให้พบเจอโดยทั่วไป [18-22] จนบางครั้งมีการนำไปใช้โดยที่โครงข่ายประสาทเทียมนั้นไม่ได้เกิดประโยชน์สูงสุด [17]

[23] ได้ทำการสร้างโมเดลเชิงสถิติด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ในการอธิบายความสัมพันธ์ของปริมาณรูพรุนจากการหล่ออะลูมิเนียมผสมกับตัวแปรปัจจัยชุดหนึ่ง ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนผสมต่าง ๆ ของโลหะกับอัตราการเย็นตัวของการหล่อ ทำให้สามารถนำโมเดลดังกล่าวมาใช้ในการคาดคะเน ปริมาณรูพรุนที่จะเกิดขึ้นในภายหลังได้ และยังสามารถนำโมเดลดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยต่อผลลัพธ์อีกด้วย อย่างไรก็ตามในงานดังกล่าวยังขาดตัวแปรที่สำคัญไปอีกตัวหนึ่งคือปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นในทางทฤษฎีเป็นปัจจัยหลักตัวหนึ่งในการเกิดรูพรุน

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยต่อยอดจากงานวิจัยดังกล่าว [18] โดยนำโมเดลเชิงสถิติที่ได้จากการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ความเหมาะสมให้แก่ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ผลที่ได้จากงานวิจัยดังกล่าวจึงได้ค่าประมาณของส่วนผสมที่ควรจะให้ปริมาณรูพรุนน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวยังคงไม่สามารถประมาณค่าและประมาณค่าจุดเหมาะสมให้กับกรณีที่มีปัจจัยปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนตอนเริ่มต้นเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย นอกจากนี้ยังมีขั้นตอนวิธีที่สามารถใช้งานกับเลขจำนวนจริงได้อีกดังเช่น มีการนำการวิวัฒนาการเชิงผลต่างมาใช้ในการมาประยุกต์ใช้กับการหาค่าตัวแปรที่ดีที่สุดในการป้อนวัสดุเข้าเครื่องตัดเพื่อให้ได้วัสดุที่มีความขรุขระของผิวมากที่สุด [24] ซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

### 2.3.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน

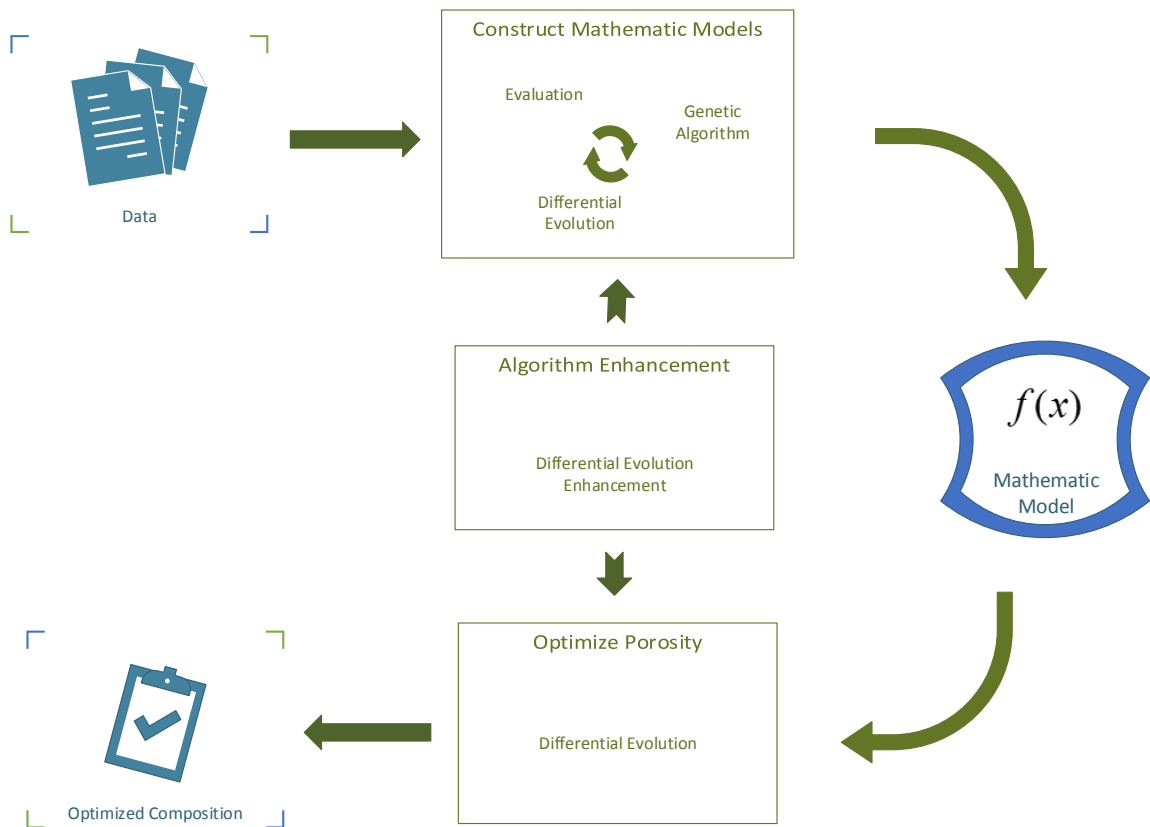
จากงานวิจัย [25] ทำให้เห็นว่าในกรณีที่สมการที่ต้องการสุ่มสร้างเพื่อนำมาประมาณค่าผลลัพธ์ของชุดข้อมูลนั้นเป็นพหุนามแล้ว การใช้งานขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแม้จะเป็นเพียงการตั้งค่าง่าย ๆ ก็สามารถทำงานได้ดีเทียบเท่ากับ [26] ที่ใช้การโปรแกรมเชิงพันธุกรรมและใช้วิธีที่ซับซ้อนกว่า

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการกับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน มีทั้งงานวิจัยที่นำขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการมาใช้ตรง ๆ และนำมาปรับปรับก่อนการใช้งาน ผู้วิจัยส่วนมากจะนำเทคนิคอื่นเข้ามาช่วยในการเพิ่มอัตราการลู่เข้าของขั้นตอนวิธี เช่นใน [27, 28] ที่ใช้มีการใช้เทคนิคกำลังสองน้อยที่สุดเข้ามาในขั้นตอนของการวิวัฒนาการเชิงผลต่าง และให้ผลลัพธ์การลู่เข้าที่น่าพอใจ

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

ภาพรวมในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยต้องการทำการประมาณปริมาณรูพรุนจากการหล่ออะลูมิเนียมผสมด้วยต้นแบบเชิงคณิตศาสตร์ จากนั้นจึงทำการทำต้นแบบการประมาณค่าดังกล่าว มาทำการค้นหาส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดดังแผนภาพต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ภาพรวมการดำเนินงาน

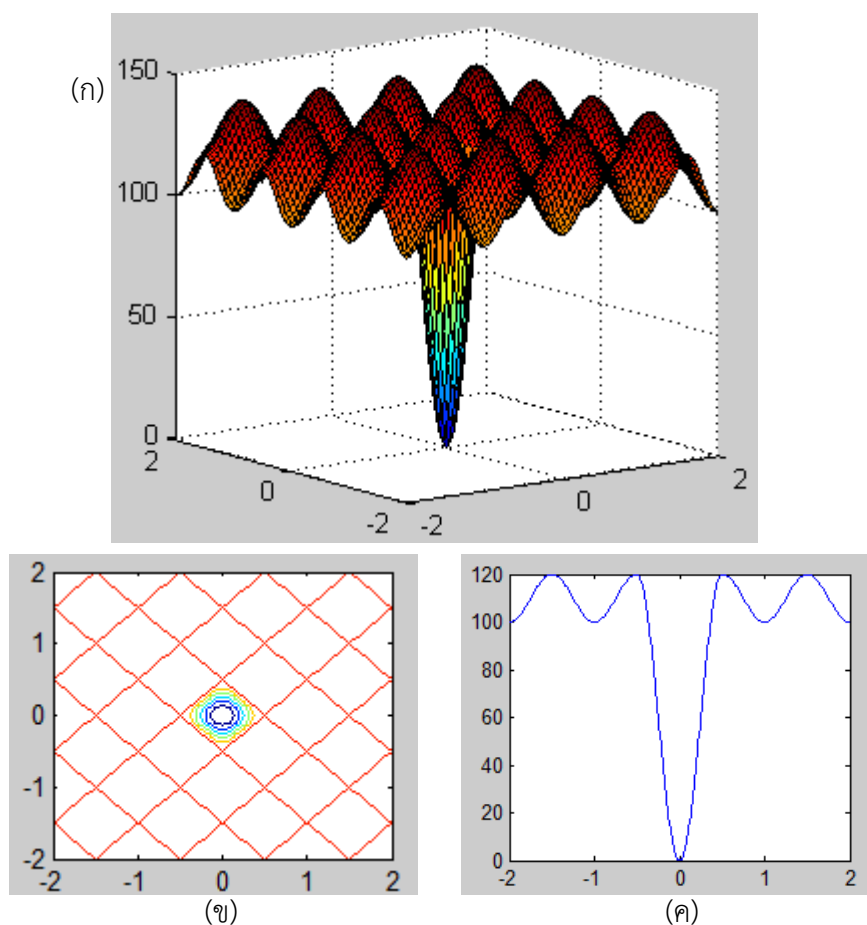
### 3.1 การเพิ่มประสิทธิภาพการวิวัฒนาการเชิงผลต่าง

ในขั้นตอนต่าง ๆ ของการวิจัยนี้มีการนำการวิวัฒนาการเชิงผลต่าง มาใช้ในการทำงานทั้งหมดสองส่วน คือในส่วนของ การสร้างต้นแบบการประมาณค่าเชิงคณิตศาสตร์ และส่วนของการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการหล่อ ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างจะช่วยให้ประสิทธิภาพโดยรวมของการทำการวิจัยและคุณภาพของผลการวิจัยดีขึ้นได้มาก

#### 3.1.1 วิเคราะห์คุณสมบัติของค่าน้ำหนักเชิงผลต่าง (F) และอัตราการแลกเปลี่ยน (Cr)

ในการวิเคราะห์ผลของตัวแปรทั้งสอง จำเป็นต้องมีฟังก์ชันที่ใช้ช่วยในการวิเคราะห์ โดยในการวิเคราะห์จะเน้นความสามารถของขั้นตอนวิธีในการค้นหาบริเวณที่มีค่าเหมาะสมให้เจอเป็นสำคัญ ผู้วิจัยได้สร้างฟังก์ชันขึ้นมาดังสมการที่ 3.1 เพื่อช่วยในการวิเคราะห์

$$f(x, y) = \begin{cases} 120 - 60 \cos(2\pi x) - 60 \cos(2\pi y) ; & |x| + |y| < 0.5 \\ 120 - 10 \cos(2\pi x) - 10 \cos(2\pi y) ; & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.2 ภาพในมุมมองต่าง ๆ ของสมการที่ 3.1 (ก) มุมก้มในสามมิติ (ข) กราฟแบบคอนทัวร์ (ค) กราฟของฟังก์ชันที่ระนาบ  $X = 0$

คุณสมบัติของฟังก์ชันดังกล่าวคือเป็นฟังก์ชันพื้นผิวตามช่วงคาบในปริภูมิสามมิติ โดยพื้นผิวมีลักษณะเป็นคลื่นซึ่งจะก่อให้เกิดจุดต่ำสุดสัมพัทธ์มากมายที่จุด  $(x, y)$  เมื่อ  $x, y$  เป็นจำนวนเต็มใด ๆ โดยค่าต่ำสุดจะมีค่าเท่ากันทั้งหมดที่ 100 ยกเว้นค่าต่ำสุดที่จุดกำเนิด  $(0,0)$  ที่จะมีค่าต่ำสุดสัมพัทธ์เท่ากับ 0 และเป็นค่าต่ำสุดสัมบูรณ์ด้วยของฟังก์ชันอีกด้วย

เมื่อฟังก์ชันมีจุดต่ำสุดสัมพัทธ์เป็นจำนวนมากกระจายอยู่ทั่วไปโดยที่มีค่าไม่แตกต่างกัน จะทำให้การดำเนินการในแต่ละครั้งของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างไม่มีการลำเอียงไปในทิศทางหนึ่ง ๆ เช่นทิศทางเข้าหาจุดต่ำสุดสัมบูรณ์ หรือทิศทางออกห่างจากจุดต่ำสุดสัมบูรณ์ซึ่งจะช่วยให้วิเคราะห์ผลของตัวแปรทั้งสองต่อความสามารถในการค้นหาโดยภาพรวมได้ดีที่สุด

ในการทดลองจะทำการตั้งค่าของขั้นตอนวิธีเชิงผลต่างดังต่อไปนี้

Configuration Name	Value
Max Iteration	2000
Bound Constraints	(-50,50)
$\mu$ (Number of Population)	50
Target Value	99.999999
F	Step
Cr	Step
Strategy	DE/rand/1 either-or-algorithm

ตารางที่ 3.1 การตั้งค่าของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างเพื่อการทดลอง

เนื่องจากการวิวัฒนาการเชิงผลต่างนั้นทำงานอยู่บนพื้นฐานของการสุ่มและความน่าจะเป็น เป็นสำคัญ ในการทดลองแต่ละครั้งจึงจะมีการทำซ้ำ 5,000 ครั้ง เพื่อให้สามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์เชิงสถิติและให้สามารถวัดประสิทธิภาพการทำงานในภาพรวมได้อย่างแม่นยำ

สาเหตุที่ใช้ Target Value = 99.999999 ซึ่งมีความหมายว่าขั้นตอนวิธีจะหยุดทำงานเมื่อค้นพบจุด  $(x, y)$  ที่  $f(x, y) \leq 99.999999$  ซึ่งเป็นค่าแรก ๆ ที่อยู่ต่ำกว่าจุดต่ำสุดสัมพัทธ์อื่นใดทั้งหมด เนื่องจากการทดลองนี้ผู้วิจัยต้องการทราบแค่ความสามารถในการค้นหาทั่วโดเมนของปัญหา หาใช่ความสามารถในการลู่เข้าจุดต่ำสุดที่มีค่าเป็น 0 ไม่ จึงกำหนดเพียงค่าดังกล่าว นอกจากนี้



การที่การวิวัฒนาการเชิงผลต่างสามารถหาจุดที่อยู่ต่ำกว่าจุดต่ำสุดสัมพัทธ์อื่นใดทั้งหมดเจอนั้น เท่ากับเป็นจุดเริ่มต้นของการลู่เข้าจุดต่ำสุดสมบูรณ์และจะการันตีได้ว่าหลังจากนี้จะลู่เข้าจุดต่ำสุดสัมบูรณ์อย่างเดียวนั้น โดยจากนี้ไปผู้วิจัยจะเรียกบริเวณที่อยู่โดยรอบจุดต่ำสุดสัมบูรณ์และอยู่ต่ำกว่าจุดต่ำสุดสัมพัทธ์อื่นใดทั้งหมดนอกจากจุดต่ำสุดสัมบูรณ์ว่า บริเวณต่ำสุด

ในการทดลองแต่ละครั้งจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักเชิงผลต่าง ( $F$ ) และ อัตราการเปลี่ยนแปลง ( $Cr$ ) ไปเรื่อย ๆ ดังตารางต่อไปนี้

$F$ $Cr$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1									
0.2									
0.3					X				
0.4									
0.5			X		X		X		
0.6									
0.7					X				
0.8									
0.9									

ตารางที่ 3.2 ค่าน้ำหนักเชิงผลต่างและอัตราการแลกเปลี่ยนที่จะทำการทดลอง และทดลองเพิ่มเติม

ช่องที่บในตารางหมายถึงการตั้งค่าของค่าน้ำหนักเชิงผลต่างและอัตราการเปลี่ยนแปลงที่จะมีการทำการทดลองขึ้น ส่วนช่องว่างหมายถึงไม่มีการทำการทดลอง ส่วนช่องที่มีสัญลักษณ์กากบาทจะเป็นช่องที่มีการทำการทดลองซ้ำโดยปรับค่า Target Value = 0.000001 เพื่อทำการทดลองว่า อัตราการค้นพบจะมีลักษณะเป็นอย่างไร

ผลการทดลองจะอยู่ในรูปของ อัตราการค้นพบบริเวณต่ำสุด ค่าเฉลี่ยของจำนวนรอบการทำงานที่ใช้ ค่าความแปรปรวน และการแจกแจงของจำนวนรอบการทำงานหรือจำนวนประชากรขึ้นระดับหนึ่ง ซึ่งจะส่งผลให้เวลาการทำงานสูงขึ้นมาก

### 3.1.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างสำหรับฟังก์ชันต่อเนื่องที่สามารถหาอนุพันธ์ย่อยได้และไม่ขึ้นกับเวลา

จากผลการทดลองในหัวข้อก่อนหน้า จะเห็นได้ว่าเมื่อเปลี่ยนเป้าหมายของการค้นหาจากบริเวณต่ำสุดเป็นบริเวณใกล้ชิดกับจุดต่ำสุดที่มีค่าไม่เกิน  $10^{-6}$  อัตราการค้นพบต่ำลงชัดเจนมาก ซึ่งหมายความว่าเพื่อที่จะให้การวิวัฒนาการเชิงผลต่างมีอัตราการค้นพบบริเวณดังกล่าวเพิ่มขึ้น จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนรอบการทำงาน

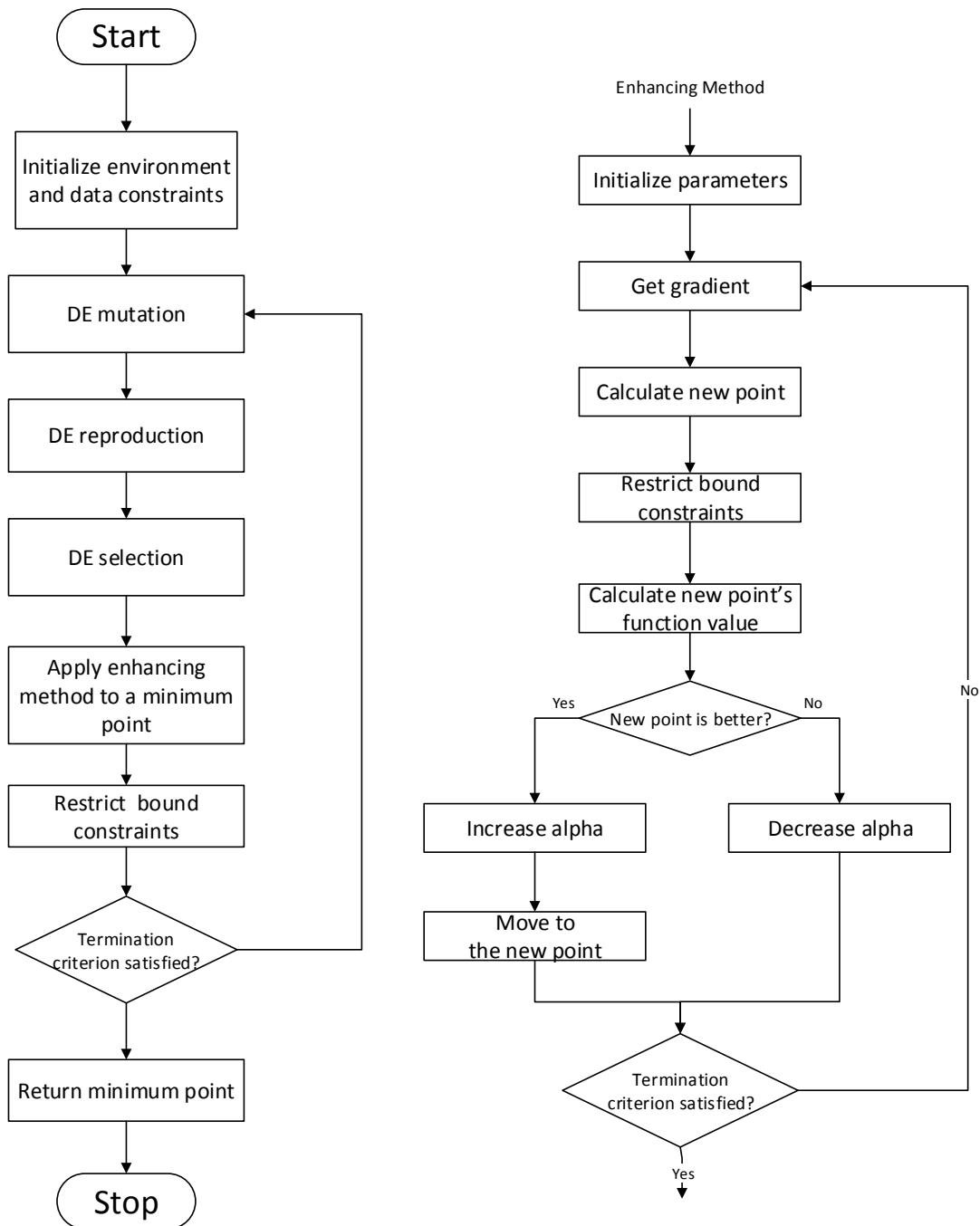
ดังที่เคยกล่าวไว้ข้างต้นว่าวิวัฒนาการเชิงผลต่าง ได้ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับปัญหาบนปริภูมิของจำนวนจริง โดยตั้งใจให้เป็นขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สามารถใช้เป็นเครื่องมืออเนกประสงค์ได้ ทำให้ขั้นตอนวิธีนี้ จำเป็นต้องมองข้ามผ่านคุณสมบัติเฉพาะของปัญหาบางอย่าง เช่นความต่อเนื่องหรือแม้แต่ความคงที่ ทำให้การวิวัฒนาการเชิงผลต่างสามารถนำไปใช้กับฟังก์ชันที่มีความไม่ต่อเนื่องหรือเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ด้วย ผลของเป้าหมายนี้ทำให้เกิดการวิจัยและพัฒนาขั้นตอนวิธีนี้จนมีศักยภาพสูงแม้จะมองข้ามคุณสมบัติอันเป็นประโยชน์ดังกล่าวไปแล้วก็ตาม การวิวัฒนาการเชิงผลต่างนั้น ในแต่ละขั้นจะทำการค้นหาจุดต่ำสุด (หรือจุดเหมาะสมที่สุด) อย่างครอบคลุมและทั่วถึงในขณะเดียวกันก็ละเอียดและมีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ดี สำหรับปัญหาคงที่และสามารถหาอนุพันธ์ได้ คุณสมบัติที่ถูกละทิ้งไปนั้นเป็นประโยชน์เกินกว่าที่จะละทิ้งไปได้ ทำให้ผู้วิจัยคิดว่าหากนำขั้นตอนวิธีที่ใช้ความสามารถจากคุณสมบัติเหล่านั้นมาประกอบกับความสามารถของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างจะสามารถทำให้การลู่เข้าจุดต่ำสุดของขั้นตอนวิธีมีความอัตราและความเป็นไปได้ที่สูงขึ้น

ขั้นตอนวิธีหนึ่งที่สามารถนำมาใช้กับเหตุการณ์แบบนี้ได้คือวิธีการลงตามแนวลาดชันสูงสุด (Steepest Descend) หรือแม้แต่วิธีเกาส์-นิวตัน (Gauss-Newton) ก็สามารถใช้ได้ อย่างไรก็ตามวิธีเกาส์-นิวตันจำเป็นต้องใช้อนุพันธ์อันดับสอง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะใช้เพียงแนวคิดของวิธีการลงตามความลาดชันสูงสุดที่ใช้เพียงอนุพันธ์อันดับหนึ่งเข้ามาช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพ

แนวคิดในการเพิ่มประสิทธิภาพของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างจะใช้แนวคิดที่ว่าภายหลังจากการที่การวิวัฒนาการเชิงผลต่างนั้นสามารถค้นพบบริเวณต่ำสุดได้สำเร็จ จุดดังกล่าวจะเป็นจุดที่อยู่ต่ำที่สุดและจะไม่หายออกจากกลุ่มประชากรอีกจนกว่าจะค้นพบจุดอื่นที่ดีกว่าดังนั้นเมื่อขั้นตอนวิธี

ดำเนินมาถึงขั้นที่ค้นพบบริเวณต่ำสุดแล้ว หากนำขั้นตอนวิธีการลงตามแนวลาดสูงสุดมาใช้งาน ควรจะสามารถทำให้จุดดังกล่าวลู่เข้าสู่จุดต่ำสุดได้รวดเร็วยิ่งขึ้นดังที่แสดงในแผนผังการทำงานคร่าวๆ



รูปที่ 3.3 แผนผังการทำงานของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่ปรับใช้การลงตามแนวลาดชันสูงสุด

จากแผนผังการทำงานโดยภาพรวม ในส่วนของขั้นตอนวิธีการลงตามความลาดชันสูงสุด สามารถนำมาเขียนเป็นรหัสเทียมได้ดังนี้

```
//Initialize parameters
double[] hX = new double[I_dimensionspara];
double[] hD = new double[I_dimensionspara];
double[] hNX = new double[I_dimensionspara];
hX = theBestPoint;
double hZ = Fx(hX);
//Restrict alpha limit
if (alpha < 0.000000001 || alpha > 2) alpha = 0.01;
//Loop of steepest descend
//Termination Criteria 1:Don't calculate more than 9 times
//
//                2:Don't move more than 5 times
for (int hI = 0, hIBound = 0; hI < 5 && hIBound < 9; hIBound++){
    //Get gradient
    hD = calculateGradient(hX);
    //Calculate new point
    double hR = hD.magnitude();
    hNX = hX - alpha * hD / hR;
    //Restrict bound constraints
    for(int hJ = 0;hJ<I_dimensionspara;hJ++){
        if (hNX[hJ] > maxBound[hJ]) hNX[hJ] = maxBound[hJ];
        if (hNX[hJ] < minBound[hJ]) hNX[hJ] = minBound[hJ];
    }
    //Calculate new value
    double hNZ = Fx(hNX);
    if (hNZ < hZ){ //The new value is better!!
        //Move to the new point
        hX = hNX;
        hZ = hNZ;
        theBestPoint = hX;
        //Increase alpha
        alpha *= 2.0;
        hI++;
    }else{ //The new value is worse!!
        //Decrease alpha
        alpha /= 7.0;
    }
}
}
```

ในขั้นต้นของการทำงาน จำเป็นจะต้องทำการจองพื้นที่การคำนวณและกำหนดค่าเริ่มต้นของจุดที่สนใจก่อนเป็นอันดับแรก โดยจุดที่สนใจก็คือจุดที่ดีที่สุดหลังจากขั้นตอนการคัดเลือกของการวิวัฒนาการนั่นเอง หลังจากนั้นจึงทำการคำนวณค่าของจุดดังกล่าวว่ามีค่าเท่าไรและทำการจดจำไว้เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบในระหว่างการค้นหา จากนั้นจึงเริ่มทำการเข้าวงวนของการลงตามความลาดชันสูงสุด โดยข้อกำหนดของการหยุดการทำงานก็คือ

1. วงซ้ำครบจำนวนครั้งที่กำหนด (ในงานวิจัยนี้ใช้ 9 ครั้ง)
2. เจอจุดที่ดีกว่าเดิมครบจำนวนครั้งที่กำหนด (ในงานวิจัยนี้ใช้ 5 ครั้ง)

เหตุผลที่ใช้ข้อกำหนดตามข้อที่ 1 เพื่อป้องกันการดำเนินงานที่ไร้ความหมาย เนื่องจากวิธีนี้โดยปกติแล้วจะสามารถมุ่งหน้าสู่จุดที่ดีกว่าได้ภายในไม่กี่ครั้งแรกอยู่แล้ว หากแต่ถ้าไม่เจอจุดที่ดีขึ้นเลยก็ควรหยุดทำงานลงแล้วรอจุดใหม่ที่ดีกว่าจากการวิวัฒนาการเชิงผลต่าง ส่วนข้อที่ 2 ตั้งขึ้นเพื่อไม่ให้เกิดการทำงานหนักเกินไปใน 1 รอบการทำงานของวิวัฒนาการเชิงผลต่าง ทั้งนี้โดยทั่วไปขั้นตอนวิธีการลงตามความลาดชันจะสามารถเข้าสู่จุดต่ำสุดได้โดยง่าย แต่ถึงแม้จะยังไม่เจอก็ยังคงมีการทำงานของการวิวัฒนาการรอบถัดไปอยู่ดี ซึ่งอาจให้จุดเริ่มต้นที่ดีกว่าเดิมอีกด้วย

ภายในวงวนการทำซ้ำ สิ่งแรกที่ต้องทำคือการคำนวณหาความลาดชัน (Gradient) ของจุดที่กำลังสนใจ จากนั้นจึงคำนวณจุดใหม่โดยมุ่งหน้าสวนทางทิศที่ความลาดชันชี้ไป เพราะเวกเตอร์ของความลาดชันจะมุ่งตามแนวลาดชันสูงสุดโดยมีทิศไปในทางที่สูงขึ้นเสมอ ส่วนระยะทางที่จะมุ่งไปนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ที่กำหนดขึ้นซึ่งในงานวิจัยนี้เรียกอัลฟา (Alpha) ให้มีค่าเริ่มต้นที่ 0.01 ทั้งนี้ค่าอัลฟาจะต้องมีการปรับเปลี่ยนอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้มีความเหมาะสมกับการเปลี่ยนตำแหน่งที่จะเกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อการก้าวออกไปจุดใหม่หนึ่ง ๆ ประสบความสำเร็จกล่าวคือค้นพบจุดใหม่ที่มีค่าต่ำกว่าเดิม ทำให้เชื่อได้ว่าค่าอัลฟาที่ใช้รอบที่แล้วนั้น ไม่ได้มีค่าน้อยเกินไป ดังนั้นเราสามารถที่จะเพิ่มค่าอัลฟาได้โดยหวังว่าจะทำให้เข้าสู่จุดต่ำสุดที่อยู่ห่างไกลเร็วขึ้น แต่หากว่าก้าวขานั้นไม่ประสบความสำเร็จ จำเป็นการระบุงว่าระยะก้าวอย่างมีค่าสูงเกินไปทำให้ก้าวเลยจุดที่ควรจะลดลง ดังนั้นเพื่อให้ก้าวขาลดไปมีโอกาสดค้นพบจุดต่ำลงได้มากขึ้นจึงต้องทำการลดค่าอัลฟาลง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการเพิ่มอัลฟาเป็น 2 เท่าเมื่อประสบความสำเร็จ แต่จะลดค่าอัลฟาลงเหลือเพียง 1/7 เท่าในกรณีตรงข้าม

ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีการวิวัฒนาการเชิงผลต่างนี้จะทำโดยการนำไปใช้กับฟังก์ชันที่สร้างขึ้นจากการทดลองหัวข้อก่อนหน้า โดยใช้การตั้งค่าแบบต่าง ๆ 5 รูปแบบที่มีเครื่องหมายกากบาท (X) แล้วเปรียบเทียบกับการทำงานโดยไม่มีส่วนเพิ่มความสามารถที่เป็นผลการทดลองของหัวข้อที่แล้วเช่นเดียวกัน โดยผลการทดลองจะอยู่ในรูปของโอกาสการค้นพบบริเวณเป้าหมาย ค่าเฉลี่ยของจำนวนรอบที่ใช้และค่าความแปรปรวนของจำนวนรอบที่ใช้ นอกจากนี้ขั้นตอนวิธีจะถูกนำไปทดสอบกับฟังก์ชันทดสอบอื่น ๆ อีกโดยเปรียบเทียบกับระหว่างกรณีที่ใช้ส่วนเพิ่มประสิทธิภาพกับกรณีที่ไม่ใช้ส่วนเพิ่มประสิทธิภาพ ฟังก์ชันอื่น ๆ ที่ว่าพร้อมการตั้งค่า มีดังต่อไปนี้

ฟังก์ชันทดสอบ	ขอบล่าง	ขอบบน	ค่าเป้าหมาย
Ackley	-5	5	1.00E-05
Beale	-4.5	-4.5	1.00E-05
Booth	-10	10	1.00E-05
BukinNo.6	{-15,-3}	{-5,3}	1.00E-02
Easom	-100	100	-0.99999
Eggholder	-512	512	-959.641
Goldstein	$-\infty$	$\infty$	3.00001
Lévy	-10	10	1.00E-05
Matyas	-10	10	1.00E-05
McCormick	{-1.5,-3}	{4,4}	-1.9132
Rosenbrock	$-\infty$	$\infty$	1.00E-05
SchafferNo.2	-100	100	1.00E-05
SchafferNo.4	-100	100	0.292589
Sphere	$-\infty$	$\infty$	1.00E-05
Stablinski-Tang	-5	5	-78.3323
ThreeHumpCamel	-5	5	1.00E-05

ตารางที่ 3.3 ฟังก์ชันสำหรับการทดสอบอื่น ๆ สำหรับปัญหาจุดต่ำสุดในปริภูมิต่อเนื่องและการตั้งค่าที่ใช้

### 3.1.3 การเพิ่มประสิทธิภาพของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างสำหรับปัญหาการเลือก สัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมกับข้อมูล

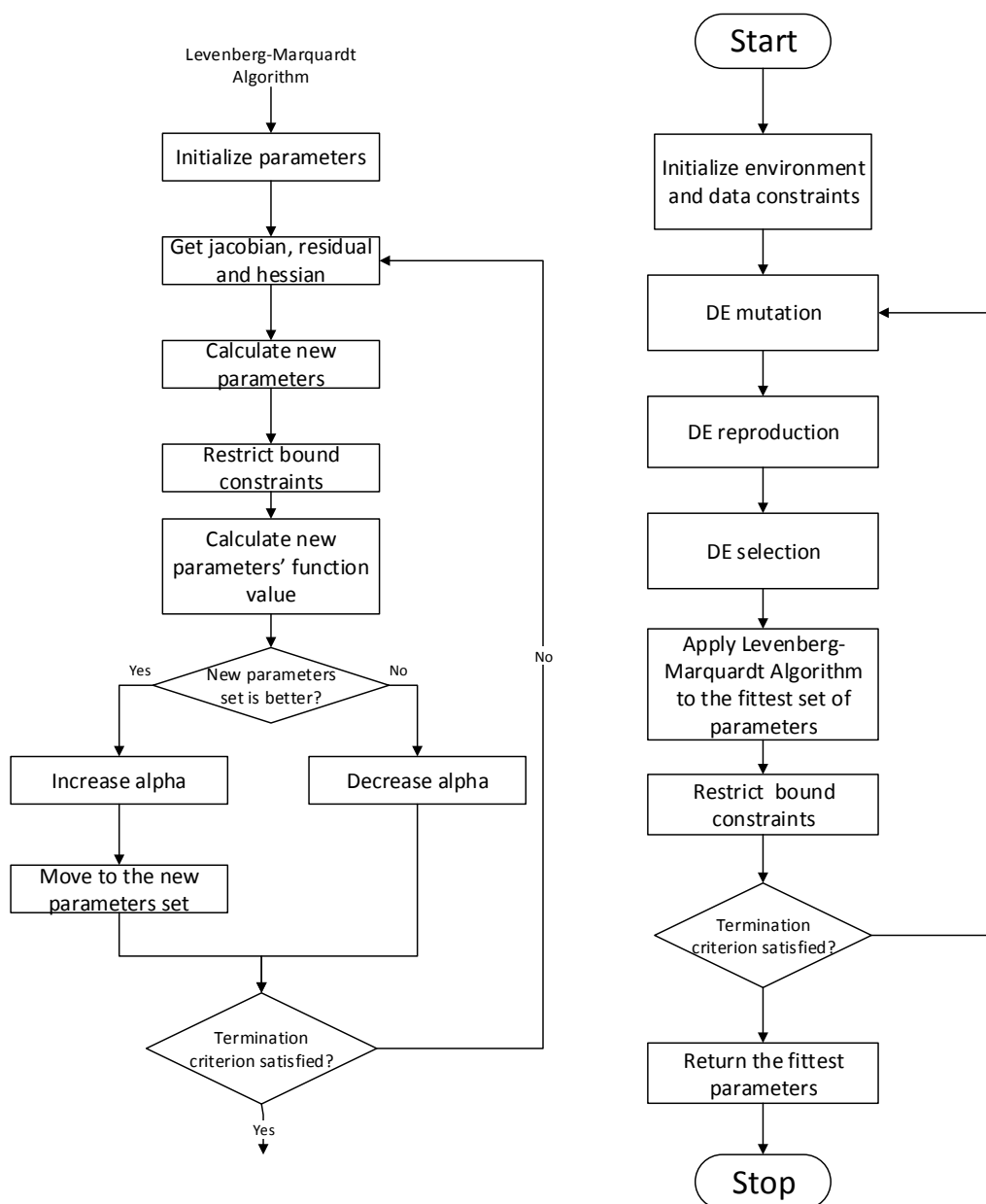
เช่นเดียวกับการทดลองหัวข้อก่อนหน้านี้ ในขั้นตอนนี้จะกล่าวถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างแต่เปลี่ยนจากปัญหาในรูปแบบของการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันที่ไม่ขึ้นกับเวลา ในปริภูมิต่อเนื่องของจำนวนจริงและสามารถหาอนุพันธ์ได้ มาเป็นปัญหาของการเลือกสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมกับข้อมูล (Curve fitting) สำหรับโมเดลแบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear) แทน การเลือกสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมกับข้อมูลนั้นก็คือการที่เราต้องการหาเส้นโค้งขึ้นมาอธิบายหรือประมาณค่าชุดข้อมูลที่มีอยู่โดยการประมาณค่าด้วยโมเดลที่กำหนดขึ้นให้ได้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดหรือน้อยจนอยู่ในระดับที่รับได้

ปัญหาเช่นนี้แบ่งอย่างง่ายที่สุดได้เป็นสองแบบคือเชิงเส้นกับไม่เชิงเส้น ถ้าเป็นลักษณะของปัญหาที่เป็นเชิงเส้นหรือปัญหาที่ไม่เชิงเส้นแต่สามารถถูกลดมาเป็นปัญหาเชิงเส้นได้ ก็สามารถใช้เทคนิควิธีการถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear Regression) มาวิเคราะห์ได้โดยไม่ยาก อย่างไรก็ตาม เมื่อปัญหานี้พิจารณาบนโมเดลที่เป็นรูปแบบไม่เชิงเส้นและไม่สามารถถูกลดมาเป็นแบบเชิงเส้นได้ การจัดการกับปัญหาจะค่อนข้างยุ่งยากโดยมีหลากหลายวิธีให้ได้เลือกให้กัน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมักจะใช้วิธีการในกลุ่มของการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) และการวิเคราะห์กำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Analysis) ทว่าวิธีดังกล่าวเบาเสเกี่ยวกับจุดเริ่มต้นของการพิจารณานั้นเป็นปัจจัยที่สำคัญมาก การเริ่มต้นไม่ถูกที่จะส่งผลให้การคำนวณไม่สามารถเข้าสู่จุดเหมาะสมที่สุดได้ ดังนั้นหากเราให้เบาเสได้เพียงบริเวณกว้าง ๆ ของจุดที่จะให้หาคำตอบ จึงเหมาะสมกว่าที่จะใช้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ประชากรเป็นฐาน (Population-based) โดยจะเห็นได้ว่าลักษณะของปัญหาเป็นปัญหาบนปริภูมิของจำนวนจริง ดังนั้นขั้นตอนวิธีที่มีประสิทธิภาพที่สุดจึงคือการวิวัฒนาการเชิงผลต่าง

เป็นที่แน่ชัดว่าการใช้การวิวัฒนาการเชิงผลต่างเพียงอย่างเดียวในการแก้ปัญหาหนึ่ง ๆ นั้นไม่ใช่ทางเลือกที่ดีที่สุด แม้ว่าการวิวัฒนาการเชิงผลต่างจะถูกพัฒนามาให้เป็นอุปกรณ์อเนกประสงค์ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมบนปริภูมิของจำนวนจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ก็ต้องแลกมาด้วยการมองข้ามคุณสมบัติเฉพาะที่แอบซ่อนอยู่ในปัญหาเหล่านั้นซึ่งอาจมีส่วนทำให้การแก้ปัญหาเป็นไปได้สะดวกยิ่งขึ้นได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเห็นควรแก่การทดลองนำเทคนิควิธีที่เป็นที่นิยมในการแก้ปัญหา ซึ่งคือขั้นตอนวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควาร์ดท์ (Levenberg-Marquardt Algorithm) ซึ่งหาก

เทียบกับการทดลองในขั้นก่อนหน้านั้น จะพบว่ามีลักษณะคล้ายกัน เพียงแต่วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ตต์นั้นมีลักษณะการคำนวณเป็นแบบสำหรับลดความผิดพลาดของกลุ่มข้อมูล ไม่ใช่การลดความสูงของจุดในปริภูมิเท่านั้นและมีการนำอนุพันธ์อันดับสองเข้ามาพิจารณาด้วยเท่านั้น

ด้วยเหตุผลและหลักการเดียวกัน ลักษณะการแก้ไขและแทรกการทำงานของขั้นตอนวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ตต์เข้าไปในการวิวัฒนาการเชิงผลต่างจะเป็นลักษณะเดียวกับการแทรกในการทดลองก่อนหน้า คืออยู่หลังการคัดเลือกนั่นเอง



รูปที่ 3.4 แผนภาพการทำงานของกรวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่ปรับใช้วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ตต์



จากแผนผังการทำงานโดยภาพรวม ในส่วนของขั้นตอนวิธีการลงตามความลาดชันสูงสุด สามารถนำมาเขียนเป็นรหัสเทียมได้ดังนี้

```

//initialize parameters
Vector<double> x = theBestParameters;
Vector<double> newX = x.Clone();
double z = f(x);
double newZ = z;
if (alpha < 0.000000001 || alpha > 2) alpha = 0.01;
//Loop of Levenberg-Marquardt Algorithm
//Termination Criteria 1:Don't calculate more than 4 times
//                2:Don't move more than 2 times
for (int hI = 0, hIBound = 0; hI < 2 && hIBound < 4; hIBound++){
    //Get jacobian, residual, hessian and hessian diagonal
    Vector<double> residual = fxResidual(x);
    Matrix<double> jacobian = fxJacobian(x);
    Matrix<double> hessian = jacobian.Transpose() * jacobian;
    Matrix<double> hessDiag = hessian.Diagonal();
    //Restrict hessian diagonal value
    double min = Abs(hessDiag.getMax()) / 1000.0;
    for each double X in hessDiag{
        if (Abs(X) < min) X = Sign(Sign(X)-0.5)*min;
    }
    //solve : (Hessian + alpha*Diagonal) * step = Jacobian' * residual
    Matrix<double> Nhessian = hessian + alpha * hessDiag;
    Vector<double> gradient = jacobian.Transpose() * residual;
    Vector<double> step = Nhessian.Invert() * gradient;
    newX = x - step;
    //Restrict bound constraints
    for(int hJ = 0; hJ < I_dimensionspara; hJ++){
        if (newX [hJ] > maxBound[hJ]) newX [hJ] = maxBound[hJ];
        if (newX [hJ] < minBound[hJ]) newX [hJ] = minBound[hJ]
    }
    //Calculate new function value
    newZ = f(newX);
    if (newZ < z) { //The new value is better!!
        //Decrease alpha!!
        alpha /= 2.0;
        //Move to the new set of parameters
        x = newX;
        z = newZ;
        hI++;
    }else{ //The new value is worse!!
        //Increase alpha
        alpha *= 7.0;
    }
}
}

```

เหมือนกับในการทดลองก่อนหน้านี้ ในการทำงานขั้นแรกสุดจำเป็นต้องทำการจองพื้นที่การคำนวณและกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรที่สนใจก่อนเป็นอันดับแรก โดยชุดค่าของตัวแปรที่สนใจก็คือชุดที่ดีที่สุดหลังจากขั้นตอนการคัดเลือกของการวิวัฒนาการนั่นเอง หลังจากนั้นจึงทำการคำนวณค่าความผิดพลาดของชุดตัวแปรดังกล่าวว่ามีค่าเท่าไรและทำการจดจำไว้เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบใน

ระหว่างการค้นหา จากนั้นจึงเริ่มทำการเข้าวงวนของขั้นตอนวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอर्ट์ โดยข้อกำหนดของการหยุดการทำงานคือ

1. วงซ้ำครบจำนวนครั้งที่กำหนด (ในงานวิจัยนี้ใช้ 4 ครั้ง)
2. เจอจุดที่ดีกว่าเดิมครบจำนวนครั้งที่กำหนด (ในงานวิจัยนี้ใช้ 2 ครั้ง)

เหตุที่ในการเพิ่มประสิทธิภาพครั้งนี้มีรอบการทำงานน้อยกว่าของขั้นที่แล้ว สาเหตุหลักเป็นเพราะว่าขั้นตอนวิธีของเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอर्ट์นั้นถือได้ว่าเป็นขั้นตอนวิธีที่พัฒนาไปมากกว่าการลงตามความลาดชันสูงสุด ทั้งนี้เพราะไม่ได้ใช้ตัวแปรอัลฟาในการกำหนดระยะก้าวอย่างตามแนวลาดชัน หากแต่ใช้การพิจารณาร่วมกับอนุพันธ์อันดับสองร่วมกับการปรับสเกลด้วยอัลฟา ทำให้การลู่เข้าของขั้นตอนวิธีของเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอर्ट์นั้นเป็นไปได้เร็วกว่ามาก นอกจากนี้การคำนวณของส่วนนี้เป็น การคำนวณแบบชุดข้อมูล ซึ่งกินทรัพยากรการคำนวณมากกว่าอีกแบบหลายพันเท่า ทำให้เป็นการเหมาะสมกว่า หากจะจำกัดจำนวนรอบของการคำนวณให้อยู่ต่ำเพื่อประสิทธิภาพโดยรวมของการค้นหา เพราะในช่วงแรกที่มีการวิวัฒนาการเชิงผลต่างยังค้นหาไม่เจอบริเวณต่ำสุด การคำนวณด้วยการลงตามแนวลาดชันสูงสุดและขั้นตอนวิธีของเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอर्ट์ก็คือการคำนวณที่เกือบจะเสียเปล่านั่นเอง

ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีการวิวัฒนาการเชิงผลต่างนี้จะทำโดยการนำไปใช้กับฟังก์ชันที่สร้างขึ้น โดยใช้การตั้งค่าในรูปแบบเดียว แล้วเปรียบเทียบกับการทำงานโดยไม่มีส่วนเพิ่มความสามารถ โดยผลการทดลองจะอยู่ในรูปของอัตราการค้นหาพบบริเวณเป้าหมาย ค่าเฉลี่ยของจำนวนรอบที่ใช้และค่าความแปรปรวนของจำนวนรอบที่ใช้ ฟังก์ชันที่สร้างขึ้น มีดังต่อไปนี้

1. Linear Function

$$f = 4.58ab^2c^2de + 7.17b^2ce^3 + 0.19d^3e - 2.71a^2b^2de - 4.12abc^3d^3e \quad (3.1)$$

ฟังก์ชันเชิงเส้น เป็นกลุ่มของโมเดลฟังก์ชันที่ง่ายที่สุด อันที่จริงแล้วสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ทันทีด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น อย่างไรก็ตาม สำหรับการทดลองนี้ โมเดลฟังก์ชันที่ง่ายที่สุดย่อมจำเป็นต้องนำมาใช้สำหรับทดสอบประสิทธิภาพ

## 2. Trigonometric Function

$$f = -1.67 \sin(-3.68a^3bc^2de + 0.99ac^2e^2 - 4.2a^2b^3c^2d^3e) + 3.55 \cos(-2.01a^3b^3c^2d^3e^2 - 4.3a^2bc^3d^2 + 3.41b^3d^3) \quad (3.2)$$

ฟังก์ชันตรีโกณมิติ เป็นโมเดลฟังก์ชันที่เป็นที่นิยมโดยสัมประสิทธิ์มักจะเป็นขนาดของฟังก์ชัน อัตราส่วนของความถี่เชิงมุมและเฟส อย่างไรก็ตาม ในกรณีนี้แทนความถี่เชิงมุมและเฟสด้วยฟังก์ชันพหุนามเพื่อให้มีความซับซ้อนมากขึ้น

## 3. Exponential Function

$$f = -0.67 \exp^{-2.6ab^2c^2d^2 - 6.86a^2b^2cd^3e^2 - 9.79a^3b^3d^2e^2} + 1.43 \exp^{5.13ace - 3.74b^3c^2d - 5.82a^2c^3d^3e^3} \quad (3.3)$$

ฟังก์ชันเลขชี้กำลัง เป็นอีกหนึ่งกลุ่มฟังก์ชันที่นิยมรวมทั้งในขั้นตอนถัด ๆ ไปของงานวิจัยนี้ ก็มีการนำขั้นตอนวิธีที่กำลังพัฒนาอยู่ไปใช้กับฟังก์ชันเลขชี้กำลังอีกด้วยฟังก์ชันประเภทนี้สามารถแก้ปัญหาได้ง่ายกว่าฟังก์ชันตรีโกณมิติอยู่ระดับหนึ่ง

## 4. Logistic Function

$$f(x, y) = \frac{6.94a^2b^3cd + 2.61ac + 0.18a^3c^2d^2}{1 + 5.96 \exp^{7.26c^2d^3 + 7.32a^3b^2c^2d^3 + 0.85a^3cd^2 - e(9.54a^2c^2d^2 + 0.28b^2 + 3.52a^3b)}} \quad (3.4)$$

ฟังก์ชันโลจิสติก เป็นฟังก์ชันที่มีการนำมาใช้ในการวิจัยนี้เช่นเดียวกับฟังก์ชันเลขชี้กำลัง ทำให้เป็นอีกหนึ่งในฟังก์ชันที่เหมาะสมที่จะนำมาทดสอบประสิทธิภาพก่อนและหลังการปรับปรุงประสิทธิภาพ

ฟังก์ชันทดสอบ	ขอบล่าง	ขอบบน	ค่าเป้าหมาย
Linear	-20	20	3.00E-04
Trigonometry	-20	20	6.00E-03
Exponential	-20	20	1.00E-04
Logistic	0	20	1.00E-07

ตารางที่ 3.4 ฟังก์ชันสำหรับการทดสอบในปัญหาการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมและการตั้งค่าที่ใช้

### 3.2 การสร้างต้นแบบการประมาณค่าเชิงคณิตศาสตร์

ในการสร้างโมเดลเชิงคณิตศาสตร์จากขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการ จะใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์ จากที่ได้คาดการณ์มาจากการงานวิจัยเกี่ยวกับแนวโน้มของปริมาณรุกรานที่กล่าวถึงข้างต้น [13] โดยชุด ข้อมูลเพิ่มเติมที่ใช้ในการศึกษาผู้จัดทำจะใช้ข้อมูลจากเอกสารตีพิมพ์ทางวิชาการ [29, 30] เป็นหลัก โดยข้อมูลจาก [29] นับเป็นข้อมูลชุดที่หนึ่ง และข้อมูลจาก [30] นับเป็นข้อมูลชุดที่สอง การฟังก์ชัน การประมาณค่าจะสร้างขึ้นมาสองฟังก์ชัน ฟังก์ชันแรกสร้างจากข้อมูลชุดที่หนึ่งเท่านั้น ส่วนฟังก์ชันที่สองจะสร้างจากข้อมูลที่รวมกันของชุดที่หนึ่งและชุดที่สอง

ในการพิจารณาโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหาแนวโน้มของปริมาณรุกราน จะพิจารณาแยกระหว่างส่วนที่เป็นผลของรุกรานจากฟองก๊าซไฮโดรเจนและรุกรานจากการหดตัวเพื่อความสะดวก

แนวโน้มของปริมาณรุกรานจากการหดตัวนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการเย็นตัวที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงมีโมเดลการคำนวณที่เหมาะสมมากมายตั้งแต่ ฟังก์ชันกำลัง ฟังก์ชันเลขชี้กำลัง ฟังก์ชัน ลอการิทึม ฟังก์ชันแทนเจนต์ผกผัน และฟังก์ชันลอจิสติก อย่างไรก็ตามเป็นที่แน่ชัดว่าปริมาณรุกรานที่เกิดขึ้นแม้ว่าจะทำการเพิ่มอัตราการเย็นตัวของการหล่อเท่าใด ย่อมมีค่าไม่เกินเขตเขตค่าหนึ่งเสมอ ทำให้ฟังก์ชันกำลัง ฟังก์ชันเลขชี้กำลังและฟังก์ชันลอการิทึมมีคุณสมบัติดีกว่าอีกสองฟังก์ชัน ในระหว่างฟังก์ชันทั้งสองเองตัวที่มีคุณสมบัติดีกว่าจะเป็นฟังก์ชันลอจิสติกด้วยเหตุผลสองประการคือ อันดับแรกการคำนวณหาผลลัพธ์ด้วยฟังก์ชันลอจิสติกจะมีความเร็วสูงกว่าการคำนวณด้วยฟังก์ชัน แทนเจนต์ผกผัน อีกเหตุผลหนึ่งคือ ฟังก์ชันแทนเจนต์ผกผันเป็นฟังก์ชันที่ผ่านจุดกำเนิดทำให้การ แปลงกราฟทำได้ยุ่งยากกว่าฟังก์ชันลอจิสติกเล็กน้อย

สำหรับแนวโน้มของปริมาณรุกรานจากฟองก๊าซไฮโดรเจนเนื่องจากปริมาณรุกรานจะมีแนวโน้ม ลดลงเมื่อการหล่อมีอัตราการเย็นตัวที่สูงขึ้น อีกทั้งเป็นที่แน่ชัดว่าปริมาณรุกรานย่อมไม่มีทางที่จะลดลง จนไม่มีเลย ฟังก์ชันที่เข้าข่ายจึงมีฟังก์ชันกำลังลบ ฟังก์ชันเลขชี้กำลังลบ และฟังก์ชันลอจิสติกกลับ ด้าน หรือแม้แต่ฟังก์ชันแทนเจนต์ผกผันก็ด้วย ฟังก์ชันเลขชี้กำลังลบมีจุดหนึ่งที่ฟังก์ชันไม่ต่อเนื่อง เป็น จุดที่กราฟขาดออกจากกันและมีการลู่อู่อื่นๆ ทำให้ฟังก์ชันนี้ถูกตัดออกไป ในขณะที่อีกสาม ฟังก์ชันที่เหลือ เมื่อเทียบคุณสมบัติกันแล้วมีความคล้ายคลึงกันมาก ผู้วิจัยจึงเลือกฟังก์ชันเลขชี้กำลัง

ลบเป็นโมเดลสำหรับแนวโน้มปริมาณรุกรานจากฟองก๊าซไฮโดรเจนเนื่องจากมีอัตราเร็วในการคำนวณสูงสุด

เนื่องจากทั้งโมเดลของฟังก์ชันเลขชี้กำลังลบและฟังก์ชันลอจิสติกนั้นตัวแปรตามจุดต่าง ๆ ของฟังก์ชันจะถูกกำหนดขึ้นเพื่อให้สามารถแปลงฟังก์ชันให้เข้าใกล้ชุดข้อมูลเป้าหมายได้ อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยไม่ทราบรายละเอียดปลีกย่อยอื่น ๆ เกี่ยวกับปัญหามากนักจึงให้ส่วนที่เป็นตัวแปรเกี่ยวกับการแปลงฟังก์ชันทั้งหมดถูกแทนด้วยการประมาณค่าด้วยฟังก์ชันพหุนามหลายตัวแปร นอกจากนี้บนสมมติฐานว่าแนวโน้มการเกิดปริมาณรุกรานจากทั้งสองกรณี มีความสัมพันธ์เป็นอิสระต่อกันอย่างสิ้นเชิง จะได้ว่าแนวโน้มของปริมาณรุกรานโดยรวมจะเป็นผลรวมของปริมาณรุกรานทั้งสองดังสมการที่ 3.5

$$Por = \frac{P_1}{e^{rP_2+P_3}} + \frac{P_4}{1 + e^{-rP_5+P_6}} \quad (3.5)$$

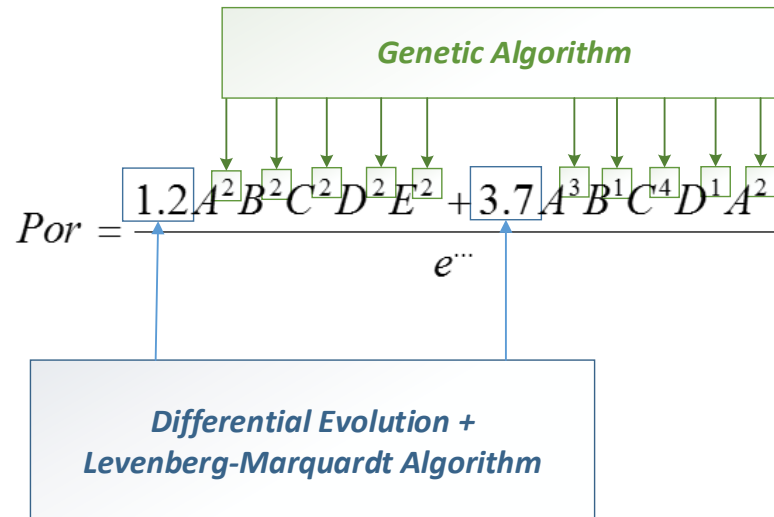
เมื่อ	Por	คือ อัตราส่วนปริมาณรุกรานในเนื้ออะลูมิเนียมหล่อ
	$P_i$	คือ สมการพหุนามดีกรีใด ๆ ที่มีอัตราส่วนผสมของการหล่อเป็นตัวแปร
	e	คือ ค่าคงตัวซึ่งมีค่า 2.71828183...
และ	r	คือ อัตราการเย็นตัว (K/s)

จากความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม มาผสมผสานกับการวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่ได้รับการปรับปรุงมาจากการทดลองก่อนหน้านี้ในการช่วยหาความสัมพันธ์ในรูปแบบสมบูรณืได้ตามโมเดลในหน้าถัดไป ในส่วนของเงื่อนไขการหยุด (Termination Criteria) มีดังต่อไปนี้

1. การค้นหาดำเนินการเป็นเวลานานเกิน 15 นาทีหลังจากการค้นหาพบครั้งล่าสุด
2. ค้นพบสมการที่ได้ค่า Absolute mean error ต่ำลง

กิจกรรมเหล่านั้นจะดำเนินการไปเรื่อย ๆ (Restart) เป็นเวลารวม 24 ชั่วโมง หรือเมื่อได้ค่า Absolute mean error ต่ำกว่า 0.01 เพื่อให้ได้สมการที่เหมาะสมที่สุด โดยหลังจากได้ต้นแบบการประมาณค่ามาแล้วแต่ละต้นแบบจะได้รับวิเคราะห์ประสิทธิภาพโดยการเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จาก

โมเดลการประมาณค่าที่ได้จาก Neural Network ในรูปของค่าเฉลี่ยความผิดพลาด (Absolute Error Mean) และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) นอกจากนี้จะลองนำฟังก์ชันที่ได้ มาลองพล็อตเทียบกับข้อมูลจริง รวมถึงนำโมเดลที่ได้จากฟังก์ชันแรกไปทดลองใช้กับฟังก์ชันที่สองด้วย เพื่อพิจารณาความเหมาะสม



รูปที่ 3.5 ต้นแบบการแทนปัญหาสำหรับขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการ

ในการหาสมการที่เหมาะสมขั้นตอนวิธีจะต้องสามารถค้นหาพหุนามหลายตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับตำแหน่งต่าง ๆ ผู้วิจัยจึงออกแบบให้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นตัวค้นหาหลักของโครงสร้างพหุนามหรือค้นหาชุดของเลขชี้กำลังที่เหมาะสมสำหรับตัวแปรต่าง ๆ และใช้การวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่เพิ่มประสิทธิภาพแล้วจากการทดลองก่อนหน้านี้ในการค้นหาสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมภายในขอบเขตที่กำหนด

การแทนลักษณะของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้น แน่นอนว่าจะเป็นการแทนด้วยสายของจำนวนเต็มบวกซึ่งจำนวนเต็มแต่ละตัวจะหมายถึงเลขชี้กำลังของตัวแปรหนึ่งในสมการ สายของจำนวนเต็มเหล่านี้จะถูกแบ่งออกเป็นหลายสายโดยจำนวนเท่ากับจำนวนพหุนามของปัญหา ในที่นี้มี 6 พหุนามจึงมีจำนวนสายทั้งหมด 6 สาย แต่ละสายสามารถมีความยาวที่ปรับเปลี่ยนเพิ่มหรือลดได้ขึ้นอยู่กับขั้นตอนว่าจะเพิ่มหรือลดจำนวนพจน์ของพหุนามหรือไม่

ในขั้นตอนย่อยต่าง ๆ ของขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการนั้นผู้วิจัยใช้รูปแบบที่มีอยู่แล้วคือการกลายพันธุ์ผู้วิจัยใช้แบบสม่ำเสมอ (Uniform Mutation) ส่วนการคัดเลือกผู้วิจัยใช้แบบเก็บตัวเก่ง (Elitist) แต่ขั้นตอนบางส่วนของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจำเป็นจะต้องถูกปรับเปลี่ยนเพื่อให้เหมาะสมกับปัญหา ในที่นี้คือการรวมตัว ดังที่ได้ยกตัวอย่างไว้ข้างต้นแล้วว่าการรวมตัวมีวิธีอย่างไรให้เลือกใช้บ้าง แต่วิธีเหล่านั้นก็ยังคงไม่เหมาะสมกับปัญหานี้มากนักเนื่องจากการรวมตัวในวิธีข้างต้นจะพิจารณาแต่ละช่องของสายแยกกัน ซึ่งผู้วิจัยเห็นว่าในที่นี้การมองรวมเป็นแต่ละพจน์ของพหุนามจะได้ประโยชน์มากกว่า ทำให้ผู้วิจัยได้ปรับแก้ขั้นตอนการรวมตัวให้มีลักษณะดังนี้

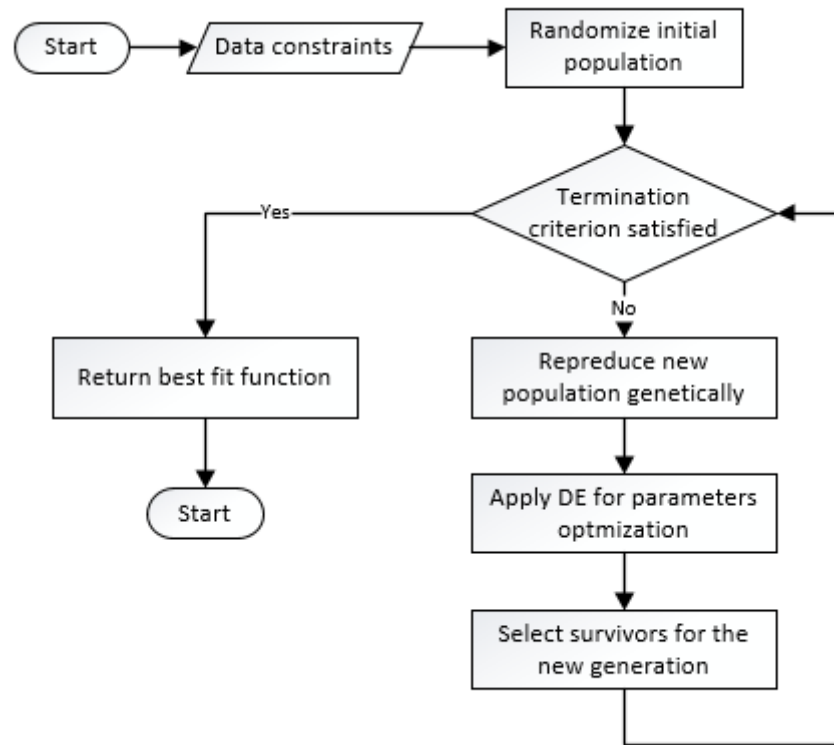
1. พิจารณารวมเป็นพจน์ของพหุนาม
2. การสร้างพหุนามสำหรับประชากรตัวใหม่คือการรวมพหุนามในตำแหน่งเดียวกันของต้นแบบ แล้วตัดพจน์ที่ซ้ำออก
3. ถ้ามีจำนวนพจน์เกินที่กำหนด สุ่มตัดออกจนพอดีแล้วสุ่มตัดพจน์บางพจน์ออกอีกตามการตั้งค่า

ซึ่งเขียนได้เป็นรหัสเทียมดังนี้

```

n : number of parents to crossover
m : number of polynomials
P1,P2,...,Pn : parents of crossing over
c1,c2,...,cm : maximum length of each polynomial
Dr : deletion rate
P = initialize new Equation;
for i = 1 to m{
    P(i).addTermsFrom(P1(i)..Pn(i));
    P(i).removeDuplicatedTerms();
    P(i).randomRemoveTermsUntil(ci);
    for each (Term t in P(i)) if(random(0,1) < Dr) P(i).remove(t);
}
Return P;

```



รูปที่ 3.6 แผนภูมิลำดับการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ขั้นตอนการทำงานโดยหลักแล้วจะเป็นการดำเนินขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมไปเรื่อย ๆ เพื่อสร้างประชากรของโครงสมการขึ้นมา โครงสมการแต่ละอันที่ถูกสร้างขึ้นมาจากขั้นตอนการกลายพันธุ์ และการรวมตัวนั้นจะต้องนำมาหาสัมประสิทธิ์ของแต่ละพจน์ที่เหมาะสมเสียก่อนที่จะคำนวณค่าความผิดพลาดของสมการนั้นได้ การวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่ถูกเพิ่มประสิทธิภาพแล้วเพื่อหาสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมนั้นจึงจะถูกดำเนินกับทุก ๆ ประชากรที่ได้มาจากขั้นตอนการรวมตัวและการกลายพันธุ์ เมื่อได้สัมประสิทธิ์สำหรับทุก ๆ ประชากรใหม่แล้ว จึงจะเข้าสู่ขั้นตอนของการคัดเลือกต่อไป



การตั้งค่าสำหรับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและการวิวัฒนาการเชิงผลต่างมีดังนี้

การตั้งค่า	ค่าที่ตั้ง
GA - Population ( $\mu$ )	250
GA - Offspring ( $\lambda$ )	200
GA - Upper Bound	3
GA - Lower Bound	0
GA - Mutation Rate ( $p_m$ )	0.3
GA - Deletion Rate ( $D_r$ )	0.2
DE - Population ( $\mu$ )	200
DE - Max Iteration	2000
DE - Upper Bound	200
DE - Lower Bound	0
DE - Weight Factor ( $F$ )	0.85
DE - Crossover Rate ( $C_r$ )	0.75
DE - Strategy	DE/rand/1 either-or-algorithm

ตารางที่ 3.5 การตั้งค่าของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและการวิวัฒนาการเชิงผลต่างสำหรับการหาฟังก์ชันการประมาณค่า

### 3.3 การหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการหล่อ

ในส่วนของ การค้นหาอัตราส่วนผสมที่จะให้เกิดรูพรุนน้อยที่สุด จะใช้การวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่เพิ่มประสิทธิภาพแล้วจากการทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพของการวิวัฒนาการเชิงผลต่าง สำหรับฟังก์ชันต่อเนื่องที่สามารถหาอนุพันธ์ย่อยได้และไม่ขึ้นกับเวลา คือเพื่อให้เหมาะสมกับรูปแบบปัญหาในปริภูมิต่อเนื่องของจำนวนจริง โมเดลเชิงสถิติจากขั้นตอนที่แล้วจะถูกนำมาใช้ในการประมาณปริมาณรูพรุนให้กับโมเดลนี้ สำหรับการวิวัฒนาการเชิงผลต่างนี้มีเงื่อนไขการหยุดดังต่อไปนี้

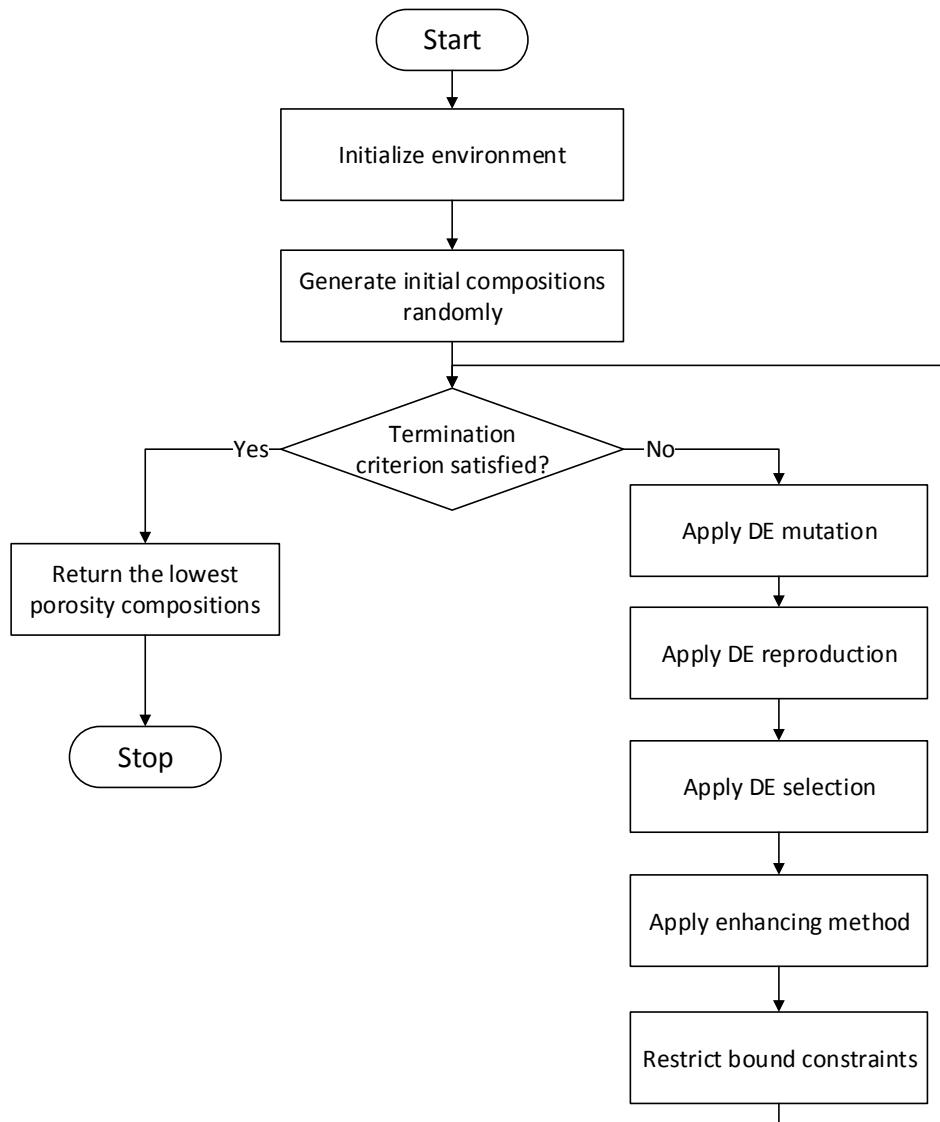
1. การค้นหาดำเนินการเป็นเวลาเกิน 10 วินาทีหลังจากการค้นหาพบครั้งสุดท้าย
2. ค้นหาส่วนผสมที่ให้ปริมาณรูพรุนน้อยกว่าเดิม

โดยกิจกรรมเหล่านี้จะดำเนินการไปเรื่อย ๆ (Restart) จนกว่าจะไม่สามารถหาส่วนผสมใหม่ที่ดีขึ้นได้แล้วเป็นจำนวน 20 ครั้งเพื่อให้มั่นใจได้ว่าค้นพบค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการหล่อโลหะ อะลูมิเนียมผสมเพื่อให้เกิดปริมาณรูพรุนน้อยที่สุดแล้วจริง ๆ ตามสมการที่ได้จากขั้นตอนที่แล้ว

การตั้งค่าสำหรับการวิวัฒนาการเชิงผลต่างมีดังนี้

การตั้งค่า	ค่าที่ตั้ง
DE - Population ( $\mu$ )	1000
DE - Max Iteration	1000
DE - Upper Bound {Si,Fe,Cu,Mg,Mn,Sr,Ti,r}	{10,1.3,3.5,0.6,0.7,0.02,0.2,25}
DE - Lower Bound {Si,Fe,Cu,Mg,Mn,Sr,Ti,r}	{6,0.2,0.2,0.05,0.05,0,0,6}
DE - Weight Factor (F)	0.65
DE - Crossover Rate (Cr)	0.75
DE - Strategy	DE/rand/1 either-or-algorithm

ตารางที่ 3.6 การตั้งค่าของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างสำหรับการหาส่วนผสมที่จะให้ปริมาณรูพรุนจากการหล่อที่น้อยที่สุด



รูปที่ 3.7 แผนภูมิลำดับการทำงานของการทำงานของการหาส่วนผสมที่ดีที่สุด

## บทที่ 4 ผลการวิจัย

### 4.1 ผลการทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพการวิวัฒนาการเชิงผลต่าง

#### 4.1.1 วิเคราะห์คุณสมบัติของค่าน้ำหนักเชิงผลต่าง (F) และอัตราการแลกเปลี่ยน (Cr)

เมื่อผู้วิจัยได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของน้ำหนักเชิงผลต่างและอัตราการแลกเปลี่ยนด้วยการตั้งค่าดังกล่าวแล้ว ได้ผลดังนี้

โอกาสค้นพบบริเวณต่ำสุดภายใน 2000 รอบการค้นหา (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์, พื้นที่เขียว หมายถึงอัตราการค้นพบสูง พื้นที่แดงหมายถึงอัตราการค้นพบต่ำ)

F \ Cr	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1	20.1	20.3	19.5	20.5	26.4	18.0	16.1	16.1	13.0
0.2	23.3				29.1				15.9
0.3	22.7				29.1				18.4
0.4	22.4				29.2				20.8
0.5	23.2	22.4	22.8	23.8	30.7	22.7	23.4	20.6	20.6
0.6	24.0				31.8				21.6
0.7	23.7				36.1				23.5
0.8	26.4				33.7				23.1
0.9	25.3	25.7	26.0	24.7	32.0	24.7	25.2	24.0	22.9

ตารางที่ 4.1 โอกาสการค้นพบเมื่อตั้งค่าด้วยค่าน้ำหนักเชิงผลต่างและอัตราการรวมตัวต่าง ๆ

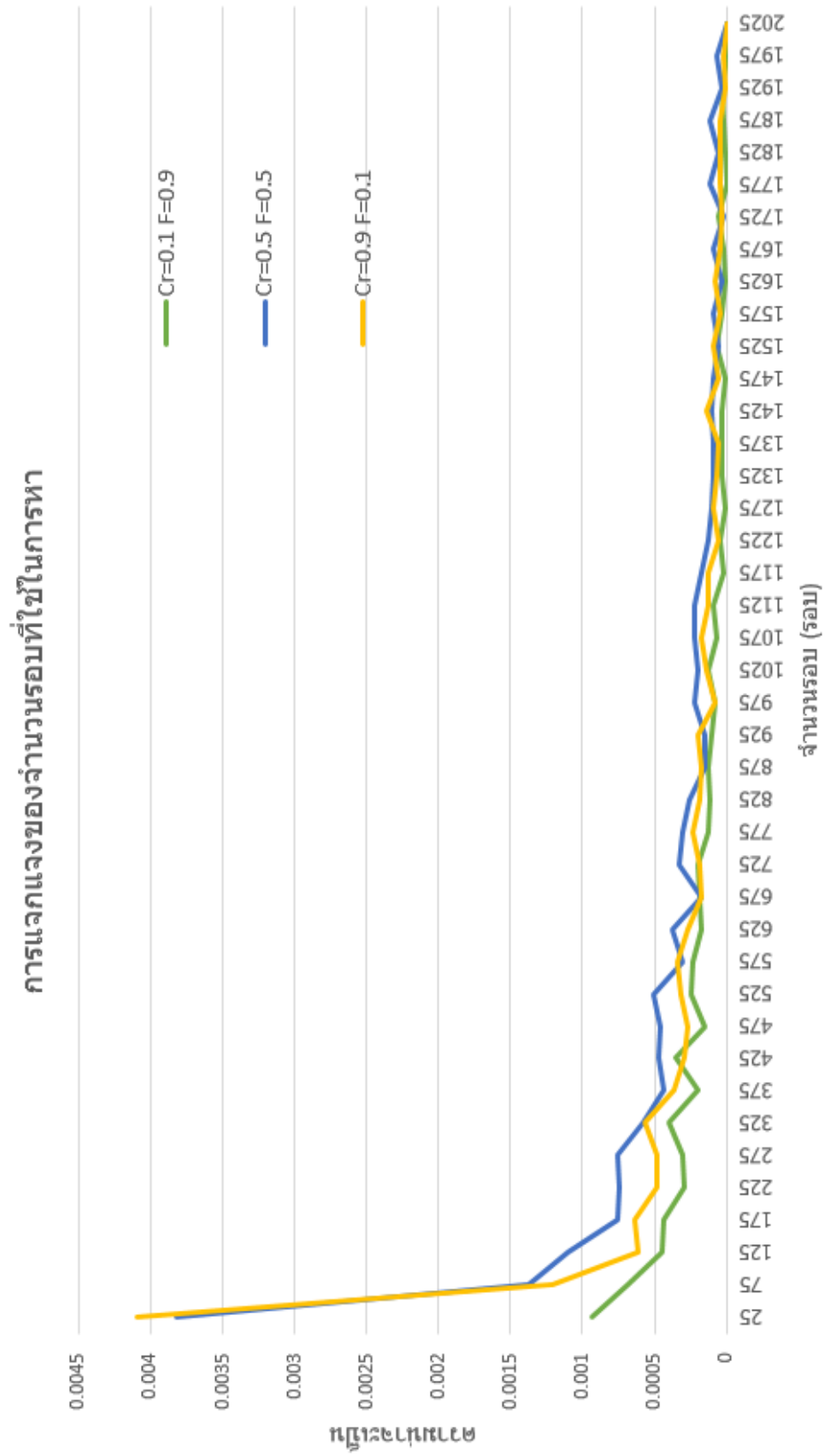
รวมผลการทดลองทั้งหมดมีค่าดังนี้

การตั้งค่า F และ Cr		โอกาสค้นพบ	ค่าเฉลี่ยจำนวนรอบ $\bar{x}$	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
F	Cr	(%)	(รอบ)	$\sigma$ (รอบ)
0.1	0.1	20.20	471.35	454.36
	0.2	23.28	385.55	416.79
	0.3	22.70	383.74	435.97

การตั้งค่า $F$ และ $Cr$		โอกาสค้นพบ	ค่าเฉลี่ยจำนวนรอบ $\bar{x}$	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
$F$	$Cr$	(%)	(รอบ)	$\sigma$ (รอบ)
	0.4	22.44	394.76	450.93
	0.5	23.24	359.60	435.51
	0.6	24.04	366.46	446.99
	0.7	23.68	370.15	445.69
	0.8	26.36	355.61	425.23
	0.9	25.32	369.56	444.53
0.2	0.1	20.32	503.86	480.08
	0.5	22.36	338.48	440.71
	0.9	25.72	363.75	423.74
0.3	0.1	19.50	459.48	455.16
	0.5	22.84	343.21	430.16
	0.9	25.98	341.09	408.62
0.4	0.1	20.54	468.26	444.40
	0.5	23.86	331.70	406.14
	0.9	24.74	363.51	418.64
0.5	0.1	26.54	599.28	520.29
	0.2	29.10	480.87	490.27
	0.3	29.10	434.60	474.98
	0.4	29.18	417.49	464.27
	0.5	30.74	420.13	468.39
	0.6	31.80	395.96	464.42
	0.7	36.08	372.57	420.85
	0.8	33.74	375.61	432.31
	0.9	32.08	376.59	421.53
0.6	0.1	18.02	458.42	448.06
	0.5	22.74	308.23	376.69
	0.9	24.74	336.45	385.85
0.7	0.1	16.10	443.04	440.97

การตั้งค่า $F$ และ $Cr$		โอกาสค้นพบ	ค่าเฉลี่ยจำนวนรอบ $\bar{x}$	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
$F$	$Cr$	(%)	(รอบ)	$\sigma$ (รอบ)
	0.5	23.36	354.17	408.43
	0.9	25.18	369.00	405.56
0.8	0.1	16.14	454.45	440.62
	0.5	20.64	352.18	391.97
	0.9	24.02	379.83	411.46
0.9	0.1	12.96	435.69	416.39
	0.2	15.94	363.21	374.45
	0.3	18.42	337.50	374.29
	0.4	20.80	344.44	362.74
	0.5	20.56	322.12	361.24
	0.6	21.56	335.29	374.51
	0.7	23.46	327.03	353.96
	0.8	23.06	342.51	375.80
	0.9	22.90	398.02	414.71

ตารางที่ 4.2 ค่าเชิงสถิติเมื่อตั้งค่าด้วยค่าน้ำหนักเชิงผลต่างและอัตราการรวมตัวต่าง ๆ



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการแจกแจงของจำนวนรอบที่ใช้ในการหาเจอ

สำหรับการทดลองเพิ่มเติมได้มีการทดลองเปลี่ยนค่า Target value(T) จากค่าเดิม  $T = 99.999999$  (กรณี 1) ที่แสดงถึงบริเวณต่ำสุดให้เหลือเพียง  $T = 0.000001$  (กรณี 2) ที่มีค่าเข้าใกล้จุดต่ำสุดสมบูรณ์ ได้ผลการทดลองดังนี้

การตั้งค่า $F$ และ $Cr$		โอกาสค้นพบ (%)		ค่าเฉลี่ยจำนวนรอบ $\bar{x}$		ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\sigma$	
$F$	$Cr$	กรณี 1	กรณี 2	กรณี 1	กรณี 2	กรณี 1	กรณี 2
0.3	0.5	22.84	3.22	343.21	1225.48	430.16	440.74
0.5	0.2	29.10	6.26	480.87	1410.29	490.27	405.97
	0.5	30.74	8.60	420.13	1315.76	468.39	439.96
	0.7	36.08	9.14	372.57	1240.14	420.85	441.83
0.7	0.5	23.36	4.26	354.17	1359.32	408.43	403.32

ตารางที่ 4.3 ค่าทางสถิติเทียบกันระหว่างการค้นหาบริเวณต่ำสุดกับจุดใกล้จุดต่ำสุด

#### 4.1.1.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

สำหรับผลการทดลองในขั้นตอนนี้ เห็นได้ชัดเจนว่าอัตราการแลกเปลี่ยน ( $Cr$ ) ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง  $(0.6, 0.8)$  ส่วนค่าน้ำหนักเชิง ( $F$ ) ผลต่างที่เหมาะสมจะมีค่าอยู่ใกล้กับ  $0.5$  ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าที่จุด  $(F, Cr) = (0.5, 0.7)$  ขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการนั้นสามารถค้นหาบริเวณต่ำสุดได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดโดยสังเกตได้จากการที่ขั้นตอนวิธีมีโอกาสหาบริเวณต่ำสุดได้สูงถึง  $36\%$  อย่างไรก็ตามผู้วิจัยได้ค้นพบว่าตำแหน่งของบริเวณต่ำสุดก็มีผลต่อผลการทดลองเช่นเดียวกัน ผู้วิจัยค้นพบว่าการพัฒนาการเชิงผลต่างจะได้ผลดีที่สุดที่  $F = 0.5$  ก็ต่อเมื่อบริเวณต่ำสุดอยู่ ณ ใจกลางของบริเวณทั้งหมดของการค้นหา ดังที่ได้ทำการทดลองหาในบริเวณ  $(x, y)$  จาก  $(-50, -50)$  ถึง  $(50, 50)$  โดยมีบริเวณต่ำสุดอยู่รอบ  $(0, 0)$  ที่เป็นตรงกลางพอดี ผู้วิจัยได้ทดลองเปลี่ยนบริเวณต่ำสุดไม่ให้อยู่ตรงกลางแล้ว พบว่าการตั้งค่าที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดไม่ได้อยู่ที่  $F = 0.5$  อีกต่อไป หากแต่ย้ายไปอยู่ที่ช่วง  $F \in (0.5, 0.9)$  แทนในขณะที่  $Cr$  ยังคงให้ประสิทธิภาพสูงสุดบนช่วง  $Cr \in (0.6, 0.8)$  เช่นเดิม



เมื่อพิจารณาการทดลองในลำดับถัดมาที่ทดลองเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 99.999999 กลายเป็น 0.000001 สำหรับบางการตั้งค่านั้น เป็นไปตามที่คาดไว้คืออัตราการค้นพบบริเวณต่ำกว่าค่าเป้าหมายนั้นลดลงอย่างมากโดยการตั้งค่าที่  $(F, Cr) = (0.5, 0.7)$  ลดลงเหลือ 9% จาก 36% และจำนวนรอบเฉลี่ยจาก 372 รอบก็ขึ้นไปเป็น 1240 รอบ ซึ่งหมายความว่าในการให้การวิวัฒนาการเชิงผลต่างนั้นหาค่าที่เข้าใกล้จุดต่ำสุดนั้นต้องใช้เวลามากกว่าการเข้าใกล้บริเวณต่ำสุดมากซึ่งหากนำไปใช้ในงานที่ต้องการทั้งความเร็วในการทำงานและความสามารถในการหาเจอนั้นอาจเกิดปัญหาการเป็นขั้นตอนที่ถ่วงเวลาการทำงานได้

สำหรับการแจกแจงของจำนวนรอบที่ใช้ในการค้นหาเจอนั้น ดังที่เห็นแล้วว่าการแจกแจงมีลักษณะกองหรือกระจุกตัวกันมากในช่วง 1 ถึง 100 รอบในขณะที่หลังจากนั้นการแจกแจงลดลงอย่างรวดเร็วจนเหลือเพียงไม่ถึง 1 ใน 10 เท่าของช่วงต้นสิ่งนี้ทำให้รู้ว่าการยัด Max iteration ให้ยาวสำหรับการวิวัฒนาการเชิงผลต่างนั้น ไม่มีประโยชน์ ตั้ง Max iteration ให้ไม่ต้องสูงมากเช่น 100 ถึง 200 รอบก็เพียงพอแล้วทำการเพิ่มจำนวนประชากรแทนโดยควบคุมให้ค่า จำนวนประชากร  $\times$  รอบการทำงาน ยังคงเท่าเดิมเท่านี้ก็จะทำให้เวลาการทำงานไม่เปลี่ยนไปจากเดิม (อาจเปลี่ยนเล็กน้อย) ในขณะที่มีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้นกว่าเดิมมาก

#### 4.1.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างสำหรับฟังก์ชันต่อเนื่องที่สามารถหาค่าอนุพันธ์ได้อย่างง่ายดายและไม่ขึ้นกับเวลา

เมื่อนำการวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่ได้รับการเพิ่มประสิทธิภาพแล้วมาใช้ในการค้นหาบริเวณใกล้จุดต่ำสุดที่ Target value = 0.000001 ได้ผลการทดลองดังนี้ (การวิวัฒนาการเชิงผลต่างอย่างเดียว = No extra, การวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่เสริมขั้นตอนการลงตามแนวลาดชันสูงสุด = With extra)

การตั้งค่า $F$ และ $Cr$		โอกาสค้นพบ (%)	ค่าเฉลี่ยจำนวนรอบ $\bar{x}$ (รอบ)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\sigma$ (รอบ)
$F$	$Cr$			
0.3	0.5	23.96	310.53	359.29
0.5	0.2	28.58	409.94	422.87
	0.5	31.50	369.32	418.56
	0.7	33.32	384.25	437.62
0.7	0.5	21.48	291.76	327.72

ตารางที่ 4.4 ค่าทางสถิติของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่ปรับปรุงแล้วบนฟังก์ชันที่สร้างขึ้นเอง

และเมื่อนำการวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่ได้รับการเพิ่มประสิทธิภาพแล้วมาทดสอบกับฟังก์ชันทดสอบอื่นอีก 16 ฟังก์ชัน ได้ผลการทดลองดังนี้

ฟังก์ชันทดสอบ	โอกาสค้นพบ (%)		ค่าเฉลี่ยจำนวนรอบ $\bar{x}$		ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\sigma$	
	No extra	With extra	No extra	With extra	No extra	With extra
Ackley	99.70	100	167.42	19.22	162.18	12.42
Beale	99.40	100	181.55	75.98	198.63	79.02
Booth	100	100	64.73	18.53	78.73	9.81
BukinNo.6	1.60	9.40	854.93	239.74	447.55	370.98
Easom	99.20	100	122.67	25.26	159.01	12.31
Eggholder	42.70	68.5	757.40	215.08	520.68	289.10
Goldstein	99.60	99.90	193.34	160.45	231.47	192.54

ฟังก์ชันทดสอบ	โอกาสค้นพบ (%)		ค่าเฉลี่ยจำนวนรอบ $\bar{x}$		ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\sigma$	
	No extra	With extra	No extra	With extra	No extra	With extra
Lévy	98.30	99.70	119.88	16.23	150.42	8.02
Matyas	99.40	100	38.01	17.82	76.359	7.77
McCormick	98.10	99.6	76.03	47.46	151.63	47.46
Rosenbrock	93.20	99.90	532.63	303.19	447.24	330.11
SchafferNo.2	82.60	96.6	533.38	316.51	428.39	319.29
SchafferNo.4	26.90	76.2	1014.53	474.01	553.87	437.60
Sphere function	100	100	33.248	4.82	24.317	2.59
Stablinski-Tang	99.9	100	79.85	10.907	82.83	7.66
ThreeHumpCamel	99.5	100	63.78	8.15	138.07	5.33

ตารางที่ 4.5 ค่าทางสถิติของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่ปรับปรุงแล้วบนฟังก์ชันทดสอบอื่น ๆ

#### 4.1.2.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่

กรณี 1 ใช้ค่า Target value = 99.999999 การวิวัฒนาการเชิงผลต่างไม่ได้รับการเพิ่มประสิทธิภาพ

กรณี 2 ใช้ค่า Target value = 0.000001 การวิวัฒนาการเชิงผลต่างไม่ได้รับการเพิ่มประสิทธิภาพ

กรณี 3 ใช้ค่า Target value = 0.000001 การวิวัฒนาการเชิงผลต่างได้รับการเพิ่มประสิทธิภาพ

ดังตาราง

การตั้งค่า $F$ และ $Cr$		โอกาสค้นพบ (%)			ค่าเฉลี่ยจำนวนรอบ $\bar{x}$ (รอบ)		
$F$	$Cr$	กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3	กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3
0.3	0.5	22.84	3.22	23.96	343.21	1225.48	310.53
0.5	0.2	29.10	6.26	28.58	480.87	1410.29	409.94
	0.5	30.74	8.60	31.5	420.13	1315.76	369.32
	0.7	36.08	9.14	33.32	372.57	1240.14	384.25

การตั้งค่า $F$ และ $Cr$		โอกาสค้นพบ (%)			ค่าเฉลี่ยจำนวนรอบ $\bar{x}$ (รอบ)		
$F$	$Cr$	กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3	กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3
0.7	0.5	23.36	4.26	21.48	354.17	1359.32	291.76

ตารางที่ 4.6 ค่าทางสถิติเทียบกันระหว่างการค้นหาบริเวณต่ำสุดกับจุดใกล้จุดต่ำสุดกับจุดใกล้จุดต่ำสุดแต่ใช้วิธีที่ปรับปรุงแล้ว

สังเกตได้ว่าในกรณีที่ 3 จะมีอัตราการค้นพบเทียบเท่ากับกรณีที่ 1 ในขณะที่จำนวนรอบการค้นหาเฉลี่ยของกรณีที่ 3 มีค่าใกล้เคียงกับของกรณีที่ 1 แม้ว่าของกรณีที่ 3 นั้นน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่อัลกอริทึมนั้นจะทำให้อัตราการค้นพบจุดต่ำสุดสูงขึ้นมาใกล้เคียงกับอัตราการค้นพบบริเวณต่ำสุด

อย่างไรก็ดีเมื่อนำการวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่ได้รับการเพิ่มประสิทธิภาพแล้วมาทดสอบกับฟังก์ชันอื่น ๆ อีก 16 ฟังก์ชันนั้นเห็นได้ชัดเจนว่าการวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่ได้รับการเสริมประสิทธิภาพแล้วสามารถทำได้ดีกว่าในทุกๆฟังก์ชันทั้งอัตราการค้นพบและจำนวนรอบเฉลี่ยในการค้นพบที่น้อยกว่าทำให้สรุปได้ว่าการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยวิธีดังกล่าวจะมีประโยชน์ในระดับหนึ่ง

สำหรับ Bukin function N.6 นั้นสังเกตเห็นได้ว่าเป็นฟังก์ชันที่หาจุดต่ำสุดได้ยากโดยแม้แต่การวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่เพิ่มประสิทธิภาพแล้วยังสามารถเพิ่มโอกาสการค้นพบได้ไม่เกิน 10% เลย ทั้งที่แท้จริงแล้วเป็นฟังก์ชันที่ลาดลงสู่จุดต่ำสุดอันเดียวเดียวและมีเพียงจุดต่ำสุดสัมพัทธ์เดียวอีกด้วย สิ่งเหล่านี้มีสาเหตุมาจากการที่ผู้ออกแบบฟังก์ชันได้ทำให้ฟังก์ชันมีลักษณะเป็นแนวร่องผาสูงชันเป็นแนวเส้นตรงแต่ให้ลาดลงสู่จุดต่ำสุดด้วยความชันต่ำทำให้เกรเดียนต์ที่คำนวณได้มีทิศพุ่งไปหาอีกฝั่งของแนวร่องแทนที่จะพุ่งหาจุดต่ำสุดนั่นเอง

#### 4.1.3 การเพิ่มประสิทธิภาพของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างสำหรับปัญหาการเลือกสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมกับข้อมูล

โอกาสค้นพบสำหรับกรณีที่ไม่ได้ใช้การเพิ่มประสิทธิภาพนั้น ทั้งสี่ฟังก์ชันทดสอบ ไม่มีครั้งใดเลยที่ขั้นตอนวิธีสามารถหาบริเวณที่ต่ำกว่าค่าเป้าหมายเจอ กล่าวคือโอกาสค้นพบเป็น 0% ทั้งหมด ผลการทดลองในตารางจึงมี เพียงอัตราการค้นพบและจำนวนรอบเฉลี่ยในการค้นพบของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่ได้รับการปรับแต่งแล้วเท่านั้น ส่วนค่าผิดพลาดที่แต่ละวิธีสามารถหาได้นั้นถูกนำเสนอในรูปของค่าผิดพลาดต่ำสุดที่เคยค้นพบและค่าผิดพลาดเฉลี่ย (การวิวัฒนาการเชิงผลต่างอย่างเดียว = No extra, การวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่เสริมขั้นตอนของเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ตซ์ = With extra)

ฟังก์ชันทดสอบ	โอกาสค้นพบ (%)	รอบเฉลี่ย $\bar{x}$	ค่าผิดพลาดต่ำสุดที่ค้นพบ		ค่าผิดพลาดต่ำสุดเฉลี่ย	
			No extra	With extra	No extra	With extra
Linear	100.00	5.686	0.000589	0.000299	14.90022	0.000299
Trigonometry	21.00	91.67	9.36643	0.005241	245.4881	86.81756
Exponential	56.00	83.07	0.003245	7.68E-07	228.8	102.2666
Logistic	100.00	85.96	0.000566	1.94E-09	0.007878	2.34E-08

ตารางที่ 4.7 ค่าทางสถิติของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่ปรับปรุงแล้วด้วยวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ตซ์

เปรียบเทียบเวลาการทำงานของแต่ละฟังก์ชันทดสอบในหน่วยมิลลิวินาที ในที่นี้ไม่มีเวลาของฟังก์ชันทดสอบเชิงเส้นเนื่องจากฟังก์ชันเชิงเส้นนั้นเพียงดำเนินขั้นตอนของเลเวนเบิร์กมาร์ควอร์ตซ์เพียงไม่กี่รอบก็จะเข้าสู่จุดต่ำสุดแน่นอนอยู่แล้ว ไม่มีความจำเป็นต้องเปรียบเทียบกับการทำงานของวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่ช้ากว่ามากแน่ ๆ

ฟังก์ชันทดสอบ	เวลาการทำงานเฉลี่ย (มิลลิวินาที)	
	No extra	With extra
Trigonometry	1296	1192
Exponential	1788	1408
Logistic	2092	857

ตารางที่ 4.8 เวลาที่ใช้ในการทำงานของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างเทียบกับระหว่างก่อนและหลังปรับปรุง

#### 4.1.3.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

เป็นไปตามความคาดหมายว่าสำหรับทุกฟังก์ชันทดสอบการวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่ได้รับการเพิ่มประสิทธิภาพจะสามารถเข้าใกล้จุดต่ำสุดได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่า สำหรับฟังก์ชันเชิงเส้นการรู้เข้าเป็นไปด้วยความรวดเร็วมากเพราะฟังก์ชันเชิงเส้นเป็นฟังก์ชันที่ง่ายที่สุดโดยมีรอบเฉลี่ยที่ 5.69 รอบเท่านั้น และเมื่อพิจารณาเทียบกับระหว่างฟังก์ชันตรีโกณมิติ ฟังก์ชันเลขชี้กำลังและฟังก์ชันลอจิสติกนั้น ฟังก์ชันตรีโกณมิติจะเป็นฟังก์ชันที่ยากที่สุดเพราะขั้นตอนวิธีนั้นมีโอกาสค้นพบเพียง 21% เท่านั้นซึ่งเมื่อเทียบกับฟังก์ชันเลขชี้กำลังที่มีโอกาสค้นพบถึง 56% และลอจิสติกฟังก์ชันที่โอกาสค้นพบคือ 100%

นอกจากผู้วิจัยจะวิเคราะห์ความสามารถในการค้นหาแล้ว ผู้วิจัยยังทำการจับเวลาเพื่อทดสอบเกี่ยวกับเวลาการทำงานโดยเฉลี่ยด้วย เพราะการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ตต์นั้นค่อนข้างใช้ทรัพยากรการคำนวณสิ้นเปลือง หากโอกาสค้นพบเพิ่มสูงขึ้นและรอบเฉลี่ยในการค้นหาลดลงแต่ใช้เวลาในการทำงานสูงขึ้นมากก็อาจทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมจริง ๆ แล้วไม่ได้เพิ่มขึ้นแต่อย่างใด อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการคำนวณเพิ่มเติมจากขั้นตอนวิธีของเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ตต์นั้นไม่ได้มากจนส่งผลให้การทำงานโดยรวมช้าลงโดยวิเคราะห์ได้จากการที่นอกจากจะใช้เวลาเฉลี่ยน้อยกว่าในทุก ๆ ฟังก์ชันทดสอบแล้วยังสามารถค้นหาได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าอีกด้วย

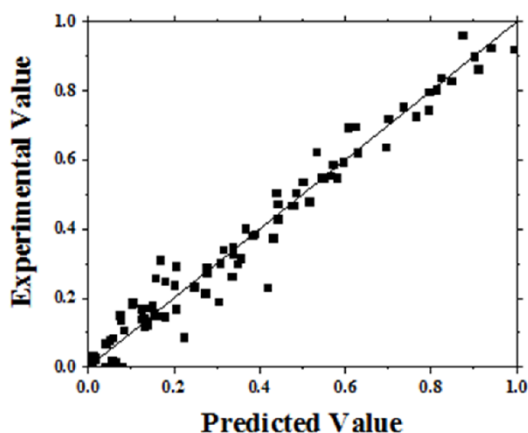
## 4.2 การสร้างต้นแบบการประมาณค่าเชิงคณิตศาสตร์

ผลลัพธ์จากการดำเนินขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและการวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่ปรับแต่งแล้ว กับชุดข้อมูลที่หนึ่ง ได้สมการประมาณค่ามีลักษณะเป็นไปตามสมการที่ 4.1

$$Por = \frac{0.65 + 2.43Mn + 1.25Mg + 0.8Fe + 140.86MnSr}{e^{0.17r+200FeMgMn^2Ti+15.18Fe^2MgMn^2} + \frac{2.57CuSr + 2SiSr + 0.001SiFe}{1 + e^{9.21Mg+6.8Ti+48.5FeMnTi-0.73rMg-2.45rTi}}} \quad (4.1)$$

เมื่อ	Por	คือ ปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นภายหลังการหล่อ (% ปริมาตร)
	Si	คือ ปริมาณธาตุซิลิคอนที่ใช้เป็นส่วนผสม (% น้ำหนัก)
	Fe	คือ ปริมาณธาตุเหล็กที่ใช้เป็นส่วนผสม (% น้ำหนัก)
	Cu	คือ ปริมาณธาตุทองแดงที่ใช้เป็นส่วนผสม (% น้ำหนัก)
	Mg	คือ ปริมาณธาตุแมกนีเซียมที่ใช้เป็นส่วนผสม (% น้ำหนัก)
	Mn	คือ ปริมาณธาตุแมงกานีสที่ใช้เป็นส่วนผสม (% น้ำหนัก)
	Sr	คือ ปริมาณธาตุสตรอนเชียมที่ใช้เป็นส่วนผสม (% น้ำหนัก)
	Ti	คือ ปริมาณธาตุไททาเนียมที่ใช้เป็นส่วนผสม (% น้ำหนัก)
และ	r	คือ อัตราการลดอุณหภูมิของการหล่อ (เคลวิน/วินาที)

เมื่อนำข้อมูลจากสมการประมาณค่าที่ 4.1 มาสร้างกราฟเปรียบเทียบกับข้อมูลจากชุดข้อมูลที่หนึ่งได้ผลลัพธ์ดังกราฟ



รูปที่ 4.2 กราฟเทียบระหว่างค่าจากการทดลองของข้อมูลชุดที่หนึ่งกับค่าจากการประมาณด้วยสมการที่ 4.1

และเมื่อค่าความผิดพลาดจากชุดข้อมูลที่หนึ่งของสมการประมาณค่าที่ 4.1 มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์การประมาณค่าจากการใช้โครงข่ายประสาทเทียม ได้ผลดังตารางที่ 9

รูปแบบการวิเคราะห์	โมเดลที่นำเสนอ	โครงข่ายประสาทเทียม
รากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย	0.0502 (%ปริมาณ)	0.0643 (%ปริมาณ)
ค่าเฉลี่ย	0.0353 (%ปริมาณ)	0.0472 (%ปริมาณ)
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	0.9941	0.9765

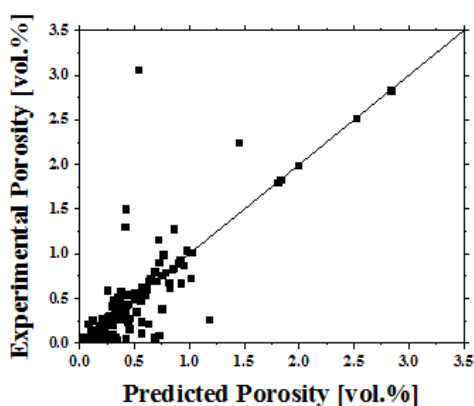
ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงค่าความผิดพลาดเทียบกันระหว่างสมการที่ 4.1 กับโครงข่ายประสาทเทียม

ผลลัพธ์จากการดำเนินขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและการวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่ปรับแต่งแล้วกับชุดข้อมูลที่หนึ่งผสมกับชุดข้อมูลที่สอง ได้สมการประมาณค่ามีลักษณะเป็นไปตามสมการที่ 4.2

$$Por = \frac{0.61 + 0.98Mg + 1.01Mn + 82.17Sr + 0.97MnSrSi^2}{e^{2.45Sr+0.13r+162.57SrH+143.61TiMn^2}} + \frac{0.47Ti + 18.19H^3}{1 + e^{27.38H-26.17rMn}} \quad (4.2)$$

เมื่อ H คือ ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่วัดได้ก่อนทำการหล่อ (มิลลิลิตร/100กรัม)

เมื่อนำข้อมูลจากสมการประมาณค่าที่ 4.2 มาสร้างกราฟเปรียบเทียบกับข้อมูลจากชุดข้อมูลที่หนึ่งผสมกับชุดข้อมูลที่สองได้ผลลัพธ์ดังกราฟ



รูปที่ 4.3 กราฟเทียบระหว่างค่าจากการทดลองของข้อมูลชุดที่หนึ่งรวมกับชุดที่สองกับค่าจากการประมาณด้วยสมการที่ 4.2



และเมื่อค่าความผิดพลาดจากชุดข้อมูลที่หนึ่งผสมกับชุดข้อมูลที่สองของสมการประมาณค่าที่ 4.2 มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์การประมาณค่าจากการใช้โครงข่ายประสาทเทียม ได้ผลดังตารางที่ 10

รูปแบบการวิเคราะห์	โมเดลที่นำเสนอ	โครงข่ายประสาทเทียม
รากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย	0.2523 (%ปริมาตร)	0.5174 (%ปริมาตร)
ค่าเฉลี่ย	0.1303 (%ปริมาตร)	0.3197 (%ปริมาตร)
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	0.8798	0.3514

ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงค่าความผิดพลาดเทียบกันระหว่างสมการที่ 4.2 กับโครงข่ายประสาทเทียม

#### 4.2.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลลัพธ์ในลักษณะสมการที่เกิดขึ้นมีลักษณะตามที่ตั้งไว้คือเป็นการประกอบกันของฟังก์ชันเลขชี้กำลังและฟังก์ชันลอจิสติกโดยมีส่วนต่าง ๆ เป็นพหุนาม เมื่อนำฟังก์ชันจากชุดข้อมูลที่หนึ่งมาทดสอบแล้วพล็อตกราฟระหว่างค่าที่วัดได้และค่าจากการประมาณค่าพบว่ากระจายตัวอยู่โดยรอบแนวกลางอย่างเป็นระเบียบและเมื่อนำไปทดสอบความผิดพลาดแล้วมีความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0353 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรซึ่งเมื่อเทียบกับการประมาณค่าจากโมเดลของโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ 0.0472 นั้นถือว่าน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ ค่าสถิติทั้งสองค่าอย่างรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยและสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของวิธีการนำเสนอก็ยังได้ผลที่ดีกว่า

อย่างไรก็ตาม หลังจากที้นำข้อมูลชุดที่หนึ่งมารวมกับข้อมูลชุดที่สอง แล้วทำเช่นเดียวกันพบว่าความแม่นยำในการประมาณค่าลดลงมากทั้งจากโมเดลที่นำเสนอคือ 0.1303 และจากโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม 0.3197 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แม้ว่าความผิดพลาดจากโมเดลที่นำเสนอ นั้นจะยังคงน้อยกว่าอยู่ดี ความผิดพลาดที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากการที่ข้อมูลชุดที่สองนั้นมีลักษณะที่ไม่ค่อยเป็นระเบียบและนอกจากนี้น่าจะเป็นผลมาจากการที่ข้อมูลชุดที่หนึ่งและชุดที่สองมีการควบคุมตัวแปรได้ไม่เหมือนกันอีกด้วย

#### 4.4 การหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการหล่อ

ภายหลังจากทำการทดลองหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการหล่อด้วยการใช้การวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่เพิ่มประสิทธิภาพแล้ว สำหรับฟังก์ชันการประมาณค่าโดยอาศัยข้อมูลชุดที่หนึ่งเท่านั้น ได้ผลการทดลองดังนี้

ส่วนผสม (%น้ำหนัก)							อัตราการเย็นตัว (K/s)	ปริมาณรูพรุน (%ปริมาตร)
Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Sr	Ti		
6	1.3	2.09	0.6	0.7	6.53E-21	0.2	6	6.87E-08

ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงส่วนผสมที่ให้รูพรุนน้อยที่สุดจากการประมาณค่าของสมการที่ 4.1

และสำหรับฟังก์ชันการประมาณค่าโดยอาศัยข้อมูลชุดที่หนึ่งร่วมกับข้อมูลชุดที่สอง ได้ผลการทดลองดังนี้

ส่วนผสม (%น้ำหนัก)							อัตราการเย็นตัว (K/s)	ก๊าซไฮโดรเจน (mL/100gm)	ปริมาณรูพรุน (%ปริมาตร)
Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Sr	Ti			
9.17	1.00	1.06	0.05	0.7	5.81E-19	0.01	25	0.05	0.0134

ตารางที่ 4.12 ตารางแสดงส่วนผสมที่ให้รูพรุนน้อยที่สุดจากการประมาณค่าของสมการที่ 4.2

##### 4.4.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อนำโมเดลการประมาณค่าปริมาณรูพรุนทั้งสองมาลองค้นหาจุดต่ำสุดด้วยการวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่ปรับปรุงแล้วพบว่าผลการจุดต่ำสุดจากทั้งสองโมเดลนั้นไม่ตรงกันสำหรับโมเดลแรกที่ได้มาจากข้อมูลชุดที่หนึ่งอย่างเดียวนั้นได้ปริมาณรูพรุนต่ำที่สุดที่ 0.687 ส่วนจากพันล้านส่วนโดยใช้อัตราการเย็นตัวอยู่ที่ 6 เคลวินต่อวินาทีขณะทำการหล่อโดยมีต้นแปรต้น 6 ตัวอยู่ที่ริมขอบของบริเวณที่กำหนดแม้กระนั้น ก็ไม่มีข้อมูลในชุดข้อมูลจากการทดลองที่อยู่ใกล้มากพอจะให้เปรียบเทียบผลของการทดลองกับผลของการประมาณค่าได้

ส่วนผลการประมาณค่าต่ำที่สุดจากโมเดลจากข้อมูลชุดที่หนึ่งร่วมกับข้อมูลชุดที่สองนั้นพบที่ความพรุนที่มากกว่าจากกรณีแรกทั้งนี้ต้องระลึกไว้เสมอว่าโมเดลการประมาณค่าจากข้อมูลชุดที่หนึ่งและข้อมูลชุดที่สองนั้นมีความผิดพลาดโดยเฉลี่ยสูงกว่าโมเดลการประมาณค่าจากข้อมูลชุดแรก ดังนั้น

จุดต่ำสุดจากข้อมูลชุดแรกจึงเป็นข้อมูลที่น่าเชื่อถือมากกว่า อย่างไรก็ตามก็ตีผลการประมาณค่าของโมเดล จากชุดข้อมูลผสมนั้นแนะนำให้ใช้ปริมาณไฮโดรเจนต่ำที่สุดคือ 0.05 มิลลิลิตร/100กรัม ซึ่งมีเหตุผล เพราะปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในการผสมควรถูกควบคุมให้มีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นจึงไม่สามารถกล่าวได้ว่า โมเดลการประมาณค่าจากชุดข้อมูลผสมนั้นไม่มีประโยชน์เลยซะทีเดียว แต่ยังคงสามารถมาใช้ช่วย วิเคราะห์ส่วนผสมกับการเกิดรูพรุนได้อยู่

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยในบทที่แล้ว เราสามารถแบ่งการสรุปผลได้ออกเป็นสามเรื่องใหญ่ ๆ อันได้แก่ ช่วงที่ทำการเพิ่มประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการเพื่อให้โดยรวมสามารถค้นหาจุดเหมาะสมหรือจุดต่ำสุดได้ดีขึ้น ขั้นถัดมาคือขั้นตอนการสร้างโมเดลหรือฟังก์ชันการประมาณค่าด้วยการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและการวิวัฒนาการเชิงผลต่างและสุดท้ายคือการใช้การวิวัฒนาการเชิงผลต่างในการหาส่วนผสม ซึ่งในบทนี้ผู้วิจัยจะทำการสรุปผลการทดลองทั้งหมดแล้วจึงวิเคราะห์ว่ายังมีปัญหาใดอีกที่สามารถพัฒนาต่อได้อีก

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

สำหรับในขั้นตอนของการเพิ่มประสิทธิภาพการวิวัฒนาการเชิงผลต่างนั้นได้แบ่งการวิจัยเป็นสามช่วง ช่วงแรกคือการทดสอบการตั้งค่าต่าง ๆ เพื่อค้นหาว่าการตั้งค่าที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานการวิวัฒนาการเชิงผลต่างนั้นเป็นอย่างไร ในที่สุดจึงได้ผลสรุปว่า การตั้งค่าของน้ำหนักเชิงผลต่าง (F) นั้นควรใช้  $F \in (0.5, 0.9)$  และอัตราการแลกเปลี่ยน (Cr) ที่  $Cr \in (0.6, 0.8)$  นอกจากนี้ เนื่องจากเวลาในการทำงานนั้นเมื่อพิจารณาจากขั้นตอนวิธีของการทำงานแล้วพบว่าแปรผันตรงกับทั้งจำนวนประชากรและจำนวนงานสูงสุด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของการค้นพบคำตอบนั้นสูงอยู่ในช่วงไม่กี่ร้อยครั้งแรกของการค้นหา การค้นหาหลังจากนั้นพบว่ามี การค้นพบบริเวณที่ต้องการต่ำลง ดังนั้นจึงเป็นการดีกว่าที่จะเพิ่มจำนวนประชากรหากต้องเลือกระหว่างประชากรกับรอบการทำงานสูงสุด แต่ก็ไม่ใช่ว่าจะลดรอบการทำงานจนเหลือเพียงหลักสิบครั้ง เพราะจำนวนรอบการทำงานก็ส่งผลต่อความละเอียดหรือการลู่เข้าใกล้จุดต่ำสุดนั่นเอง

เมื่อทราบถึงการตั้งค่าที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานการวิวัฒนาการเชิงผลต่างแล้วจึงสามารถนำการตั้งค่านั้นมาใช้เป็นหลักในการทดลองเพิ่มประสิทธิภาพต่อ ๆ ไป โดยการเพิ่มประสิทธิภาพของการวิวัฒนาการเชิงผลต่างกับปัญหาจุดต่ำสุดในปริภูมิต่อเนื่องไม่ขึ้นกับเวลาที่สามารถหาอนุพันธ์ย่อยได้นั้น ได้นำแนวคิดการลงตามแนวลาดชันสูงสุดเข้ามาใช้โดยอาศัยจากสมมติฐานของการเพิ่มอัตรา การลู่เข้าให้เร็วขึ้นเมื่อไรก็ตามที่ประชากรแม้เพียงตัวเดียวสามารถหาบริเวณต่ำสุดพบ หลัก ๆ คือมีผลทำให้การค้นหาจุดใกล้จุดต่ำสุดนั้นมีอัตราการค้นพบสูงขึ้นและรอบเฉลี่ยในการทำงานต่ำลงมา

ใกล้เคียงกับการค้นหาแค่เพียงบริเวณต่ำสุดสำหรับฟังก์ชันที่ไม่ซับซ้อนมาก ซึ่งจากการทดสอบด้วยฟังก์ชันทดสอบทั้งหมดก็แสดงให้เห็นว่าขั้นตอนวิธีทำได้ดีขึ้นจริงแม้ว่าสำหรับบางปัญหาจะยังดีขึ้นไม่มากโดยเฉพาะปัญหาที่จุดต่ำสุดอยู่ในแนวร่องลึกทางยาวที่เวกเตอร์ชี้แนวลาดสูงสุดจะชี้ลงสู่ร่องแทนที่จะใช้ไปตามแนวร่อง อย่างไรก็ตามมันไม่น่าแปลกใจนักเนื่องจากปัญหานี้เป็นปัญหาหลักสำหรับวิธีการลงตามแนวลาดสูงสุดที่นำมาใช้อยู่แล้ว

หลังจากที่การวิจัยเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการลงตามแนวลาดชันสูงสุดได้ผลเป็นที่น่าพอใจ แนวคิดแบบเดียวกันจึงถูกนำมาปรับใช้กับการนำการวิวัฒนาการเชิงผลต่างไปแก้ปัญหาการเลือกสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมกับชุดข้อมูล โดยแนวที่จะใช้การลงตามแนวลาดชันสูงสุดผู้วิจัยเลือกใช้แนวคิดที่ได้รับการต่อยอดมากกว่านั้นคือวิธีของเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ตต์ที่แทนที่จะใช้อนุพันธ์อันดับหนึ่งเท่านั้น วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอร์ตต์นั้นใช้อนุพันธ์อันดับสองที่ได้จากการประมาณค่าเข้ามาใช้ในการพิจารณาร่วมกับการปรับเพิ่มลดค่าตัวแปรในกรณีที่ผลการค้นหาไม่เป็นที่น่าพอใจด้วย ซึ่งแน่นอนว่าผลการค้นหาโดยรวมเป็นที่น่าพอใจมากเพราะประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้นจากการทดลองที่ไม่ได้ใช้ส่วนเสริมมาก เพราะนอกจากการค้นหาด้วยวิธีที่เพิ่มประสิทธิภาพจะมีอัตราการค้นพบที่สูงกว่าแล้ว ยังมีอัตราเร็วในการทำงานสูงกว่าอีกด้วย

สำหรับการนำการวิวัฒนาการเชิงผลต่างที่ได้รับการปรับปรุงแล้วมาใช้ร่วมกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้นฟังก์ชันการประมาณค่าที่ได้ออกมาแน่นอนว่ามีลักษณะที่ไม่น่าประทับใจเท่าใดเนื่องจากขั้นในสุดเป็นการประมาณค่าด้วยฟังก์ชันพหุนามหลายตัวแปร อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับโมเดลการประมาณค่าด้วยโครงข่ายประสาทเทียม โมเดลการประมาณค่าของผู้วิจัยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ต่ำกว่า และโมเดลการประมาณค่าจากชุดข้อมูลที่หนึ่งก็มีลักษณะที่ดีมาก ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าโมเดลการประมาณค่าโดยอิงสมมติฐานเกี่ยวกับปริมาณรุกรุ่นจากการหดตัวและปริมาณรุกรุ่นจากก๊าซไฮโดรเจนแล้วแทนด้วยฟังก์ชันเลขชี้กำลังและฟังก์ชันลอจิสติกนั้นถือว่าประสบความสำเร็จ อย่างไรก็ตามก็ดีสำหรับโมเดลการประมาณค่าบนชุดข้อมูลที่หนึ่งรวมกับชุดข้อมูลที่สองโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถประมาณค่าในกรณีที่มีไฮโดรเจนเป็นตัวแปรต้นได้ด้วยนั้น ผลการประมาณมีค่าความผิดพลาดมากกว่าการโมเดลที่ใช้ข้อมูลชุดเดียวอยู่มากพอสมควร ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากหลายปัจจัยไม่ว่าจะเป็นการที่ข้อมูลทั้งสองชุดอาจควบคุมตัวแปรได้แตกต่างกัน แต่โดยหลัก ๆ แล้วคือการที่ข้อมูลการทดลองชุดที่สองนั้นมีคุณภาพในเชิงปริมาณเมื่อเทียบกับจำนวนตัวแปรต้นแล้ว

แยกว่าข้อมูลชุดที่หนึ่งมาก นอกจากนี้ยังมีความไม่เป็นระบบระเบียบของตัวแปรต้นอีกต่างหากทำให้ไม่น่าแปลกใจที่ข้อมูลชุดผสมจะให้โมเดลการประมาณค่าแยกว่าอย่างเห็นได้ชัด

ในการค้นหาส่วนผสมที่จะให้ปริมาณรุกรุนน้อยที่สุดนั้นใช้การวิวัฒนาการเชิงผลต่างเป็นสำคัญโดยปรับให้ขอบเขตการค้นหาอยู่เพียงขอบเขตของข้อมูลจากชุดข้อมูลเพื่อจำกัดให้เกิดความผิดพลาดจากการประมาณค่านอกขอบเขตให้น้อยที่สุด ผลการค้นหาจากทั้งสองโมเดลนั้นได้ผลที่แตกต่างกันโดยผลที่ได้จากโมเดลแรกประมาณรุกรุนไว้ที่ 0.7 ส่วนจากพันล้านส่วนซึ่งมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับผลจากการทดลองในข้อมูลที่ค่าต่ำสุดอยู่ที่ระดับไมโครเปอร์เซ็นต์ ส่วนโมเดลที่สองนั้นแม้จะให้ผลการประมาณค่าต่ำสุดอยู่ที่ 134 ส่วนจากล้านส่วนแต่ด้วยความที่ค่าความผิดพลาดตอนวิเคราะห์โมเดลนั้นค่อนข้างมากทำให้ความน่าเชื่อถือด้อยกว่าผลจากโมเดลแรกอยู่พอสมควร แต่โมเดลที่สองนี้มีความพิเศษกว่าโมเดลแรกอยู่ที่มีการนำปริมาณก๊าซไฮโดรเจนก่อนทำการหล่อเข้ามาพิจารณาร่วมด้วยโดยผลของโมเดลที่สองแสดงชัดเจนว่าให้ปริมาณไฮโดรเจนมีน้อยที่สุดคือ 0.05 มิลลิกรัม/100 กรัม ซึ่งนับว่าสมเหตุสมผลและเป็นไปตามที่คาดเอาไว้

## 5.2 การวิจัยที่อาจทำได้ในอนาคต

สำหรับงานวิจัยต่อยอดที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตได้นั้นมีมากมายไม่ว่าจะเป็นในประเด็นทางเทคนิคการแก้ปัญหาคอมพิวเตอร์หรือทฤษฎีทางโลหะวิทยา การวิจัยต่อยอดที่สามารถทำได้ในทางคอมพิวเตอร์อย่างเช่น การพัฒนาให้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมให้มีความเหมาะสมกับการหาพหุนามมากกว่านี้อีก เพราะในงานวิจัยนี้ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นคือการที่การค้นหาสมการการประมาณค่านั้นใช้เวลาค่อนข้างมาก โดยหลัก ๆ แล้วอยู่ที่การวนทำงานไปเรื่อย ๆ ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและการวิวัฒนาการเชิงผลต่าง ซึ่งจริง ๆ แล้วอาจมีวิธีที่ทำให้การค้นหาเป็นไปได้ด้วยความรวดเร็วกว่านี้ไม่ว่าจะเป็นการนำไปทำงานบนหน่วยประมวลผลกราฟฟิกส์ หรือแม้แต่การปรับเปลี่ยนการกลายพันธุ์ การรวมตัว การคัดเลือกหรือแม้แต่การแทนค่าให้มีความเหมาะสมกับปัญหามากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถทำการเปลี่ยนขั้นตอนได้อีก โดยอาจไม่ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและการวิวัฒนาการเชิงผลต่างแล้ว แต่ใช้ขั้นตอนวิธีอื่น ๆ ประกอบกันจนมีผลทำให้การทำงานออกมามีความแม่นยำกว่าหรือเร็วกว่าก็ได้

ส่วนการวิจัยต่อยอดทางโลหะวิทยาที่อาจทำได้คือหากหวังผลของการหล่อให้มีรูพรุนน้อย สิ่งสำคัญที่สุดคือข้อมูลจากการทดลองที่มีความเหมาะสมทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ ข้อมูลที่น้อยเกินไปก็ไม่อาจทำให้การประมาณค่าออกมามีผลดีได้เนื่องจากมีข้อมูลให้ขั้นตอนวิธีเรียนรู้ได้จำกัด เปรียบได้กับการต้องการวาดวงกลมที่ชัดเจนอันหนึ่งแต่ระบุจุดบนเส้นรอบวงให้เพียงสองจุดซึ่งมีวงกลมนับไม่ถ้วนที่เข้าข่าย เช่นเดียวกับการทดลองที่ออกแบบมาไม่ดี ควบคุมตัวแปรและผลลัพธ์ได้อย่างไม่มีศักยภาพ ผลการทดลองลักษณะนี้มีผลแต่จะทำให้การประมาณค่าเบี่ยงเบนออกจากค่าที่ถูกต้อง นอกจากการเพิ่มข้อมูลการทดลองแล้ว สิ่งที่อาจทำได้อีกคือการลองสร้างโมเดลการประมาณค่าโดยอิงจากทฤษฎีอื่น ในงานวิจัยนี้อิงจากผลรวมของฟังก์ชันเพิ่มและลดตามทฤษฎีเกี่ยวกับการเกิดรูพรุนด้วยการหดตัวและก๊าซไฮโดรเจนเป็นหลัก ซึ่งความเป็นจริงแล้วหรือในอนาคตอาจมีโมเดลที่เหมาะสมกว่านี้ซึ่งแน่นอนว่าจะทำให้การหาโมเดลการประมาณค่ามีความแม่นยำและประสิทธิภาพมากกว่าเดิม

## รายการอ้างอิง

- [1] B. S. Murty, J. W. Yeh, and S. Ranganathan, "Chapter 1 - A Brief History of Alloys and the Birth of High-Entropy Alloys," in *High Entropy Alloys*, B. S. M. W. Y. Ranganathan, Ed., ed Boston: Butterworth-Heinemann, 2014, pp. 1-12.
- [2] R. N. Lumley, "1 - Introduction to aluminium metallurgy," in *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*, R. Lumley, Ed., ed: Woodhead Publishing, 2011, pp. 1-19.
- [3] A. Mitrasinovic, F. C. Robles Hernández, M. Djurdjevic, and J. H. Sokolowski, "On-line prediction of the melt hydrogen and casting porosity level in 319 aluminum alloy using thermal analysis," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 428, pp. 41-46, 7/25/ 2006.
- [4] C. Tekmen, I. Ozdemir, U. Cocen, and K. Onel, "The mechanical response of Al-Si-Mg/SiCp composite: influence of porosity," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 360, pp. 365-371, 11/15/ 2003.
- [5] D. R. Gunasegaram, D. J. Farnsworth, and T. T. Nguyen, "Identification of critical factors affecting shrinkage porosity in permanent mold casting using numerical simulations based on design of experiments," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, pp. 1209-1219, 2/1/ 2009.
- [6] K.-D. Li and E. Chang, "Mechanism of nucleation and growth of hydrogen porosity in solidifying A356 aluminum alloy: an analytical solution," *Acta Materialia*, vol. 52, pp. 219-231, 1/5/ 2004.
- [7] A. E. Eiben and J. E. Smith, *Introduction to Evolutionary Computing*: Springer, 2003.
- [8] J. H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*: University of Michigan Press, 1975.
- [9] D. E. Goldberg and J. Robert Lingle, "Alleles and the Traveling Salesman Problem," presented at the Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms, 1985.



- [10] H.-G. Beyer and H.-P. Schwefel, "Evolution strategies – A comprehensive introduction," *Natural Computing*, vol. 1, pp. 3-52, 2002/03/01 2002.
- [11] R. Storn and K. Price, "Differential Evolution - A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces," *Journal of Global Optimization*, 1995.
- [12] K. Price, R. M. Storn, and J. A. Lampinen, *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*: Springer, 2005.
- [13] I. Ghosh, S. Das, and N. Chakraborty, "An artificial neural network model to characterize porosity defects during solidification of A356 aluminum alloy," *Neural Computing and Applications*, vol. 25, pp. 653-662, 2014/09/01 2014.
- [14] W. Eric. *Method of Steepest Descent*. Available: <http://mathworld.wolfram.com/MethodofSteepestDescent.html>
- [15] D. M. Bates and D. G. Watts, *Nonlinear Regression Analysis and Its Applications*: Wiley, 1988.
- [16] W. Paszkowicz, "Genetic Algorithms, a Nature-Inspired Tool: Survey of Applications in Materials Science and Related Fields," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 24, pp. 174-197, 2009/01/23 2009.
- [17] W. Sha and K. L. Edwards, "The use of artificial neural networks in materials science based research," *Materials & Design*, vol. 28, pp. 1747-1752, // 2007.
- [18] S. H. M. Anijdan, A. Bahrami, H. R. M. Hosseini, and A. Shafyei, "Using genetic algorithm and artificial neural network analyses to design an Al–Si casting alloy of minimum porosity," *Materials & Design*, vol. 27, pp. 605-609, // 2006.
- [19] S. Nourouzi, H. Baseri, A. Kolahdooz, and S. M. Ghavamodini, "Optimization of semi-solid metal processing of A356 aluminum alloy," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 27, pp. 3869-3874, 2013/12/01 2013.
- [20] G. Pirge, A. Hacıoglu, M. Ermis, and S. Altintas, "Determination of the compositions of NiMnGa magnetic shape memory alloys using hybrid evolutionary algorithms," *Computational Materials Science*, vol. 45, pp. 189-193, 3// 2009.

- [21] M. Reihanian, S. R. Asadollahpour, S. Hajarpour, and K. Gheisari, "Application of neural network and genetic algorithm to powder metallurgy of pure iron," *Materials & Design*, vol. 32, pp. 3183-3188, 6// 2011.
- [22] M. Zakeri, A. Bahrami, and S. H. Mousavi Anijdan, "Using genetic algorithm in heat treatment optimization of 17-4PH stainless steel," *Materials & Design*, vol. 28, pp. 2034-2039, // 2007.
- [23] A. Shafyei, S. H. M. Anijdan, and A. Bahrami, "Prediction of porosity percent in Al-Si casting alloys using ANN," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 431, pp. 206-210, 9/15/ 2006.
- [24] N. V. V. S. Sudheer and K. K. Pavan, "Effect of Carburizing Flame and Oxidizing Flame on Surface Roughness in Turning of Aluminium Metal Matrix Composite and Differential Evolution Optimization of Process Parameters," *Procedia Materials Science*, vol. 6, pp. 840-850, // 2014.
- [25] J. Clegg, J. F. Dawson, S. J. Porter, and M. H. Barley, "The use of a genetic algorithm to optimize the functional form of a multi-dimensional polynomial fit to experimental data," in *Evolutionary Computation, 2005. The 2005 IEEE Congress on*, 2005, pp. 928-934 Vol.1.
- [26] J. W. Davidson, D. A. Savic, and G. A. Walters, "Method for the identification of explicit polynomial formulae for the friction in turbulent pipe flow," *Journal of Hydroinformatics*, vol. 1, pp. 115--126, 1999.
- [27] E. O. Tartan and H. Erdem, "A hybrid least squares-differential evolution based algorithm for harmonic estimation," in *Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2012 20th*, 2012, pp. 1-4.
- [28] E. O. Tartan and H. Erdem, "Fundamental frequency and interharmonic estimation by Differential Evolution-Least Squares based hybrid algorithm," in *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2013 Fourth International Conference on*, 2013, pp. 1640-1642.
- [29] M. Dash and M. Makhlof, "Effect of key alloying elements on the feeding characteristics of aluminum-silicon casting alloys," *Journal of Light Metals*, vol. 1, pp. 251-265, 11// 2001.

- [30] N. Roy, A. M. Samuel, and F. H. Samuel, "Porosity formation in Al-9 Wt Pct Si-3 Wt Pct Cu alloy systems: Metallographic observations," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 27, pp. 415-429, 1996/02/01 1996.

ภาคผนวก

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ข้าพเจ้านายณัฐณพัชร กวีพรรณ เกิดเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2535 สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมที่โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ เตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์จาก คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี พ.ศ. 2557