

การสร้างแบบจำลองทางสมบัติของวัสดุของลวดบัดกรีอ่อนปลอดตะกั่ว
โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบผสม



นายเชษฐา พันธุ์เครือบุตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MODELING LEAD-FREE SOLDER ALLOY PROPERTIES
USING HYBRID EVOLUTIONARY ALGORITHMS



Mr Chedtha Puncreobutr

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

เชษฐา พันธุ์เครือบุตร : การสร้างแบบจำลองทางสมบัติของวัสดุของลวดบัดกรีอ่อน
ปลอดตะกั่วโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบผสม. (MODELING LEAD-FREE SOLDER
ALLOY PROPERTIES USING HYBRID EVOLUTIONARY ALGORITHMS)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ.ดร.ประภาส จงสถิตย์วัฒนา, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม:
อ.ดร.บุญรัตน์ โล่ห์วงศ์วัฒน, 109 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางสมบัติของวัสดุจากขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบผสมเพื่อออกแบบส่วนผสมทางเลือกของลวดบัดกรีอ่อนปลอดตะกั่ว กำหนดการเชิงพันธุกรรมถูกนำมาใช้เพื่อหาค้นหาผลเฉลยในการทำนายอุณหภูมิวิกฤต และอุณหภูมิโซลิดัส โดยข้อมูลทางความร้อนของส่วนผสมจำนวน 250 ส่วนผสมจากหลักวิธี CALPHAD และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลในการสอน ผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองแสดงให้เห็นประสิทธิภาพที่ดีในการทำนายชุดข้อมูลสอน ความถูกต้องของแบบจำลองได้รับการยืนยันจากผลการทดลองของ 25 ส่วนผสมที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งผลลัพธ์จะได้ผลการทำนายที่มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลทดสอบ ผลเฉลยจากกำหนดการเชิงพันธุกรรมจะถูกนำไปใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์ ซึ่งขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ 2 (NSGA-II) ถูกนำมาใช้เพื่อหาส่วนผสมที่ดีที่สุดของลวดบัดกรีอ่อน โดยให้ความสนใจใน 3 วัตถุประสงค์คือ อุณหภูมิวิกฤต ช่วงการแข็งตัว และสภาพเปียกได้ส่วนผสมที่ได้ 10 ส่วนผสมจากแบบจำลองถูกนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง ผลการทดสอบทางความร้อนจากเครื่อง DSC แสดงให้เห็นถึงผลการทำนายที่แม่นยำของแบบจำลอง และเมื่อพิจารณาเวลาในการเปียกที่วัดได้จากวิธี wetting balance จะพบความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ติดกับค่าแรงตึงผิวที่ทำนายได้จากแบบจำลอง

สมบัติทางความร้อนและสภาพเปียกได้ของลวดบัดกรีอ่อนทั้ง 10 ส่วนผสมถูกนำไปเปรียบเทียบกับลวดบัดกรีอ่อนจำนวน 25 ส่วนผสมจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อหาความดีของแบบจำลอง จากผลการเปรียบเทียบจะพบสมบัติที่ดีของส่วนผสมที่ได้จากแบบจำลองคือมีอุณหภูมิวิกฤตที่ต่ำ โดยยังคงรักษาช่วงการแข็งตัวที่แคบไว้ได้ นอกจากนี้ส่วนผสมที่ได้จากแบบจำลองยังมีเวลาในการเปียกที่สั้นกว่าส่วนผสมอื่นจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้วย นั่นแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบผสมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้สามารถค้นหาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ดีและเหมาะสมจะนำไปใช้ในงานเชื่อมได้

ภาควิชา.....วิศวกรรมคอมพิวเตอร์.....ลายมือชื่อนิสิต 16๗๓ พันธุ์เครือบุตร
สาขาวิชา.....วิศวกรรมคอมพิวเตอร์.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก *ประภาส*
ปีการศึกษา.....2552.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม *บุญรัตน์*

5170290621 : MAJOR COMPUTER ENGINEERING

KEYWORDS : Hybrid Evolutionary Algorithms / Genetic Algorithms / Genetic Programming / Lead-free Solder Alloys / Materials Properties Modeling

CHEDTHA PUNCREOBUTR : MODELING LEAD-FREE SOLDER ALLOY PROPERTIES USING HYBRID EVOLUTIONARY ALGORITHMS.THESIS
 ADVISOR : PROF.PRABHAS CHONGSTITVATTANA, Ph.D., THESIS
 CO-ADVISOR : BOONRAT LOHWONGWATANA,Ph.D., 109 pp.

This thesis proposed the modeling of material properties using hybrid evolutionary algorithms to design the candidate lead-free solder alloys. Genetic programming was developed to predict liquidus/solidus temperature of solders by using thermal properties of 250 solder's compositions that calculated from CALPHAD method and from literature as the training data. The results showed the effectiveness of the training result. Accuracy of the model was verified with the experimental results of 25 compositions from references and the results showed the good agreement of predicted results and testing data. These solutions from genetic programming were used as the objective functions of multi-objective genetic algorithms. The non-dominated sorting genetic algorithms II (NSGA-II) was developed to find the optimized quinary alloy contents by consider the liquidus temperature, solidification range, and wettability as the objective functions. Ten solder compositions from the model were experimentally tested to confirm the predicted results of the model. Thermal properties of solders from DSC testing demonstrated the good predictive results of genetic programming and the wetting time results from wetting balance test were showed the good correlation with the predicted surface tension.

Thermal properties and wettability of the ten solder compositions were compared with 25 compositions from references to determine the goodness of model. The compared results illustrated that the lead-free solder compositions from the model have lower liquidus temperature with narrow solidification range. Moreover, the wetting time of all ten solders was lower than the other alloys from literature. These confirmed that the employed hybrid evolutionary algorithms could generate good alloy candidates for lead-free solder application.

Department : ...Computer Engineering.....

Field of Study : ...Computer Engineering.....

Academic Year :2009.....

Student's Signature 16/08/2551 พันธ์ 1030005

Advisor's Signature 

Co-Advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความสามารถอย่างเป็นทางการที่สุดของท่านศาสตราจารย์ ดร. ประภาส จงสิตวิวัฒนา ที่ได้สละเวลาอันมีค่ารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ โดยได้ให้แนวทางในการวิจัยและคำแนะนำอันมีค่ายิ่งในการเขียนวิทยานิพนธ์ ตลอดจนตรวจทานแก้ไข วิทยานิพนธ์ฉบับนี้โดยละเอียดด้วยความเต็มใจตั้งแต่แรกเริ่มจนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ จนทำให้ผู้เขียนสามารถเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสร็จสมบูรณ์ภายในเวลาที่ตั้งใจไว้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณและขอระลึกถึงคุณความดีและความเมตตาของท่านตลอดไป

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ ดร.บุญรัตน์ โล่ห์วงศ์วัฒน ที่ได้กรุณาสละเวลารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม และได้ให้แนวทางในการวิจัยและให้คำแนะนำอันมีค่าทั้งในความรู้ทางโลหวิทยา และหลักการทำการวิจัย ตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้โดยละเอียดด้วยความเต็มใจตั้งแต่แรกเริ่มจนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ผู้เขียนขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ประสิทธิ์จิตรระกุล รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ และรองศาสตราจารย์ ดร.ณชลไชยรัตน์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและช่วยตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

นอกจากนี้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณโครงการพัฒนาอัจฉริยะภาพทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสำหรับเด็กและเยาวชน (JSTP) และโครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. (สัญญาเลขที่ MRG-WI515E016) ที่ได้ให้ทุนวิจัยสนับสนุนในงานวิจัยนี้ ตลอดจนขอขอบพระคุณบริษัท Mektec Manufacturing Corporation (Thailand) Ltd. ที่ได้ให้ความร่วมมือ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือทดสอบในงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณนายอนันต์ เลววรรณ และนายปิตินันท์ ปิยวาทีน รวมทั้งสมาชิกห้องปฏิบัติการระบบอัจฉริยะ ที่ให้การช่วยเหลือในการดำเนินการ และให้คำแนะนำ และขอขอบคุณเพื่อน พี่ และน้องของผู้เขียน ที่คอยให้การช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ผู้เขียนเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 : บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 : ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	6
2.1.1 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	6
2.1.1.1 การสร้างกลุ่มประชากร	8
2.1.1.2 การประเมินค่าความแข็งแรงของผลเฉลย	8
2.1.1.3 การสร้างประชากรของผลเฉลยรุ่นใหม่	8
(1) การสืบพันธุ์	9
(2) การไขว้เปลี่ยน	9
(3) การกลายพันธุ์.....	9
2.1.1.4 การค้นหาผลเฉลย	10

2.1.2 กำหนดการเชิงพันธุกรรม	10
2.1.2.1 การสร้างกลุ่มประชากร	11
2.1.2.2 การประเมินค่าความแข็งแรงของผลเฉลย	12
2.1.2.3 การสร้างประชากรของผลเฉลยรุ่นใหม่	12
(1) การสืบพันธุ์	13
(2) การไขว้เปลี่ยน	13
(3) การกลายพันธุ์	14
2.1.2.4 การค้นหาผลเฉลย	14
2.1.3 กระบวนการแข็งตัวของโลหะผสม	15
2.1.3.1 กระบวนการแข็งตัวในสภาวะสมดุล	17
2.1.3.2 กระบวนการแข็งตัวตามแบบจำลองของ Scheil-Gulliver	18
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 : ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์	22
3.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	22
3.2 ตัวแปรตัดสินใจ	22
3.3 ข้อจำกัด	22
3.4 รูปแบบปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์	23
3.5 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด	23
3.6 การแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ด้วยขั้นตอนเชิงวิวัฒนาการ	24
3.6.1 การกำหนดค่าความแข็งแรง	25
3.6.2 การกำหนดค่าความหนาแน่น	26
3.7 ขั้นตอนการทำงานของ Non-Dominated Sorting Genetic Algorithms II (NSGA-II)....	28
บทที่ 4 : การคำนวณสมบัติของวัสดุและข้อมูลที่นำมาใช้	30
4.1 การคำนวณทางอุณหพลศาสตร์	30
4.2 การคำนวณค่าแรงดึงผิวตามสมการของ Butler	33
4.3 ข้อมูลที่นำมาใช้สอนในกำหนดการเชิงพันธุกรรม	36
4.4 ข้อมูลที่นำมาใช้ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	38

4.4.1 ชุดข้อมูลทดสอบสำหรับแบบจำลองที่ใช้ทำนายสมบัติของวัสดุจากกำหนดการ เชิงพันธุกรรม	38
4.4.2 ชุดข้อมูลทดสอบสำหรับแบบจำลองการหาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ดีที่สุดจาก ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์.....	38
บทที่ 5 : การออกแบบและพัฒนาแบบจำลองด้วยขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒน์แบบผสม	39
5.1 การทำนายสมบัติของวัสดุจากกำหนดการเชิงพันธุกรรม.....	39
5.1.1 ฟังก์ชันและเทอร์มินอล	40
5.1.2 การสร้างประชากรผลเฉลยเริ่มต้น.....	41
5.1.3 การวัดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของผลเฉลย	42
5.1.4 การสร้างประชากรผลเฉลยใหม่	43
5.1.4.1 การสืบพันธุ์	43
5.1.4.2 การไขว้เปลี่ยน	43
5.1.4.3 การกลายพันธุ์.....	44
5.1.5 การค้นหาผลเฉลย	44
5.2 การหาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ดีที่สุดจากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลาย วัตถุประสงค์	45
5.2.1 การกำหนดรหัสพันธุกรรม	45
5.2.2 การสร้างประชากรผลเฉลยเริ่มต้น.....	46
5.2.3 การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	47
5.2.4 การวัดค่าความแข็งแรงและค่าระยะความหนาแน่น	50
5.2.5 การสร้างประชากรผลเฉลยใหม่	50
5.2.5.1 การสืบพันธุ์	50
5.2.5.2 การไขว้เปลี่ยน	50
5.2.5.3 การกลายพันธุ์.....	51
5.2.6 การค้นหาผลเฉลย	51
5.3 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	52
5.3.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	52
5.3.2 การทดสอบสภาพเปียกได้.....	53

บทที่ 6 : ผลการทดลอง	56
6.1 ผลการทำนายสมบัติของวัสดุจากกำหนดการเชิงพันธุกรรม	56
6.1.1 ผลเฉลยในการทำนายคุณหมูลิควิดส์	56
6.1.2 ผลเฉลยในการทำนายคุณหมูมิโซลิดส์	59
6.2 การเปรียบเทียบผลการทำนายสมบัติของวัสดุจากกำหนดการเชิงพันธุกรรมกับชุดข้อมูลทดสอบจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	62
6.3 ผลการหาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ดีที่สุดจากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์	66
6.4 ผลการทดสอบสมบัติของวัสดุของลวดบัดกรีอ่อน	69
6.5 เปรียบเทียบผลการทำนายจากแบบจำลองกับผลการทดลอง	72
6.5.1 สมบัติทางความร้อน	73
6.5.2 สภาพเป็ยกได้	77
6.6 ความดีของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่หาได้จากแบบจำลอง	80
บทที่ 7 : สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	84
7.1 สรุปผลการวิจัย	84
7.2 ข้อเสนอแนะ	86
รายการอ้างอิง	87
ภาคผนวก	94
ภาคผนวก ก ชุดข้อมูลสอนในกำหนดการเชิงพันธุกรรม	95
ภาคผนวก ข ชุดข้อมูลทดสอบในกำหนดการเชิงพันธุกรรม	106
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	109

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การหาค่าความแข็งแรงของประชากร เช่น $f(x) = x^2$	8
2	ค่าแรงดึงผิวของธาตุบริสุทธิ์	35
3	ค่าพารามิเตอร์อันตรกิริยาของลวดบัดกรีอ่อนในระบบต่างๆ	35
4	จำนวนชุดข้อมูลสอนที่ได้จากการคำนวณทางอุณหพลศาสตร์ในแต่ละระบบธาตุ.....	37
5	จำนวนชุดข้อมูลสอนที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในแต่ละระบบธาตุ.....	37
6	การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆในกำหนดการเชิงพันธุกรรม	45
7	ขอบเขตส่วนผสมของธาตุต่างๆที่เป็นไปได้ในผลเฉลย.....	47
8	การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์.....	52
9	ประสิทธิภาพในการทำนายของกำหนดการเชิงพันธุกรรมเทียบกับข้อมูลในการสอน	62
10	ประสิทธิภาพในการทำนายอุณหภูมิลิควิดส์และอุณหภูมิลิควิดส์ของกำหนดการเชิงพันธุกรรมเทียบกับชุดข้อมูลทดสอบ	65
11	ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ใช้ทดสอบ....	70
12	ผลการทดสอบสภาพเปื่อยได้ของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ใช้ทดสอบ.....	71
13	ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำในการทำนายสมบัติทางความร้อน.....	76
14	ค่า p-value ของการวิเคราะห์ t-test แบบสองกลุ่มตัวอย่าง	77
15	ความสัมพันธ์ของค่าแรงดึงผิวที่ทำนายได้จากแบบจำลองกับเวลาในการเปื่อยและแรงในการเปื่อยที่วัดได้จากการทดลอง	80
16	เปรียบเทียบสภาพเปื่อยได้ของส่วนผสมที่ได้จากแบบจำลองกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	83

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แผนภูมิสายงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	7
2	ตัวอย่างการไขว้เปลี่ยน.....	9
3	ตัวอย่างการกลายพันธุ์.....	10
4	ต้นไม้แทนนิพจน์เชิงสัญลักษณ์ $(+ (* 2 \pi) (- (+ x 3) (/ y (+ 5 1))))$	12
5	ตัวอย่างการไขว้เปลี่ยน (ก) โครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยต้นแบบที่ถูกเลือกมา ทำการไขว้เปลี่ยน (ข) โครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยใหม่หลังทำการไขว้เปลี่ยน	13
6	โครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลย ก่อนการกลายพันธุ์ (ซ้าย) หลังการกลายพันธุ์ (ขวา).....	14
7	แผนภูมิสายงานของกำหนดการเชิงพันธุกรรม	14
8	แผนภูมิเฟสแสดงกระบวนการเย็นแข็งตัวของโลหะผสมตะกั่ว-ดีบุก	15
9	แผนภูมิเฟสสมมติซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนคงที่.....	16
10	กระบวนการแข็งตัวในทิศทางเดียวของโลหะผสมซึ่งแสดงข้อมูลลักษณะ จำเพาะของส่วนผสมที่อุณหภูมิ T_2 ตามภาพที่ 9	17
11	แผนภูมิเฟสสมมติที่ไม่มีการแพร่เกิดขึ้นในเฟสของแข็ง	18
12	ข้อมูลลักษณะจำเพาะของส่วนผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_1 เล็กน้อย.....	18
13	ข้อมูลลักษณะจำเพาะของส่วนผสมที่อุณหภูมิ T_2	19
14	ข้อมูลลักษณะจำเพาะของส่วนผสมที่อุณหภูมิยูเทคติก	19
15	ขอบเขตพื้นที่คำตอบที่เป็นไปได้และขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด.....	24
16	วิธีการจัดลำดับผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ.....	26
17	ขั้นตอนการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับผลเฉลยที่ไม่ ถูกครอบงำ 2 (NSGA-II)	29
18	พื้นผิวแนวการหลอมตัวของลวดบัดกรีอ่อนในดีบุก-เงิน-ทองแดง (ก) Calculated Liquidus Projection (ข) Sn-rich Part.....	30
19	ผลการคำนวณกระบวนการแข็งตัวของลวดบัดกรีอ่อน Sn-2Ag-0.75Cu	31
20	แผนภูมิสามเฟสของลวดบัดกรีอ่อน Sn-3Ag-0.5Cu-1Bi ที่อุณหภูมิ 210°C	32
21	ผลการคำนวณกระบวนการแข็งตัวของลวดบัดกรีอ่อน Sn-3Ag-0.5Cu-1Bi.....	32

ภาพที่		หน้า
22	ตัวอย่างชุดข้อมูลสอนของกำหนดการเชิงพันธุกรรม	36
23	การสร้างประชากรผลเฉลยเริ่มต้นด้วยวิธี Grow	41
24	การสร้างประชากรผลเฉลยเริ่มต้นด้วยวิธี Full	42
25	โครโมโซมคำตอบส่วนผสมที่ดีที่สุดของลวดบัดกรีอ่อน	46
26	การจัดกลุ่มผลเฉลยและการกำหนดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสภาพเป็ยกได้	49
27	เครื่อง DSC ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	53
28	กราฟที่ได้จากการทดสอบสภาพเป็ยกได้ด้วยเครื่อง Wetting Balance.....	54
29	เครื่อง Wetting Balance	54
30	ลักษณะการทดสอบแบบเม็ดกลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	55
31	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และขนาดโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยในการทำนาย คุณสมบัติควิตัส ในแต่ละรุ่น	56
32	โครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยในการทำนายคุณสมบัติควิตัส.....	57
33	กราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติควิตัสที่ทำนายได้กับข้อมูลที่ใช้ในการสอน	58
34	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และขนาดโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยในการทำนาย คุณสมบัติโซลิตัสในแต่ละรุ่น.....	59
35	โครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยในการทำนายคุณสมบัติโซลิตัส	60
36	กราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติโซลิตัสที่ทำนายได้กับข้อมูลที่ใช้ในการสอน	61
37	ผลการทำนายคุณสมบัติควิตัสที่ได้จากกำหนดการเชิงพันธุกรรมเทียบกับ ชุดข้อมูลทดสอบจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเทียบกับค่าที่คำนวณได้จาก หลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc	63
38	ผลการทำนายคุณสมบัติโซลิตัสที่ได้จากกำหนดการเชิงพันธุกรรมเทียบกับ ชุดข้อมูลทดสอบจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเทียบกับค่าที่คำนวณได้จาก หลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc	64
39	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เฉลี่ยของคุณสมบัติควิตัสในแต่ละรุ่นของการ วิวัฒนาการ.....	66
40	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เฉลี่ยของคุณสมบัติโซลิตัสในแต่ละรุ่นของการ วิวัฒนาการ.....	67
41	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เฉลี่ยของสภาพเป็ยกได้ในแต่ละรุ่นของการวิวัฒนาการ ...	67
42	ปริภูมิวัตถุประสงค์ของผลเฉลย 25 ลำดับแรกในรุ่นสุดท้ายของการวิวัฒนาการ...	68

ภาพที่	หน้า
43	กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC..... 69
44	กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์สภาพเปียกได้ด้วยเครื่อง Wetting Balance 70
45	เวลาในการเปียกเทียบกับแรงในการเปียกของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ใช้ทดสอบ..... 72
46	ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิวิกฤตที่ทำนายได้จากแบบจำลองกับผลที่วัดได้จริงจากการทดลอง และผลการคำนวณตามหลัก CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc 73
47	ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิโซลิดัสที่ทำนายได้จากแบบจำลองกับผลที่วัดได้จริงจากการทดลอง และผลการคำนวณตามหลัก CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc 74
48	ผลการเปรียบเทียบช่วงการแข็งตัวที่ทำนายได้จากแบบจำลองกับผลการทดลอง.. 75
49	กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงตึงผิวกับเวลาในการเปียก..... 78
50	กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงตึงผิวกับแรงในการเปียก..... 79
51	สมบัติทางความร้อนที่วัดได้จากการทดลองของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ได้จากแบบจำลอง..... 81
52	ผลของการเติม (ก) บิสมัท (ข) อินเดียม ต่ออุณหภูมิวิกฤตและอุณหภูมิโซลิดัส.. 81
53	เปรียบเทียบอุณหภูมิวิกฤตและช่วงการแข็งตัวของส่วนผสมที่ได้จากแบบจำลองกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 82

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เป็นระยะเวลาเกือบศตวรรษที่ลวดบัดกรีอ่อน (Solder Alloys) ในระบบดีบุก-ตะกั่ว หรือที่คนทั่วไปรู้จักในชื่อ “ตะกั่วบัดกรี” ถูกใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อย่างแพร่หลาย ด้วยคุณสมบัติที่ดีหลายประการ อาทิ ราคาถูก ความสามารถในการเชื่อม (Solderability) ที่ดี ช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวที่เหมาะสม รวมทั้งมีสมบัติทางกล (Mechanical Properties) และความต้านทานความล้า (Fatigue Resistance) ที่ดี แต่ด้วยข้อจำกัดในด้านความเป็นพิษของตะกั่ว ส่งผลให้ทั่วโลกต่างให้ความสนใจและต้องการที่จะควบคุมปริมาณการใช้ลวดบัดกรีอ่อนที่มีสารตะกั่วเจือปน โดยคณะกรรมการการยุโรปหรืออีซี (European Commission - EC) ได้ออกระเบียบเศษเหลือทิ้งของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Waste Electrical and Electronic Equipment: WEEE) (Directive 2003/96/EC) มีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 13 สิงหาคม 2548 และข้อจำกัดเกี่ยวกับการใช้สารอันตราย (Restriction on Hazardous Substances: RoHS) (Directive 2003/95/EC) มีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2549 เป็นระเบียบสหภาพยุโรป ซึ่งมีวัตถุประสงค์ให้ประเทศสมาชิกวางมาตรการในการป้องกันการเพิ่มปริมาณของซากผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และต้องการให้มีการลดปริมาณการใช้สารตะกั่วในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เพื่อป้องกันปัญหาสิ่งแวดล้อม [1]

จากความเข้มงวดในด้านการใช้วัสดุพิษและการใช้สารที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ประกอบกับแนวโน้มในการบริโภคสินค้าที่อนุรักษ์สิ่งแวดล้อมของผู้บริโภคที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีความต้องการที่จะพัฒนาลวดบัดกรีอ่อนปลอดตะกั่ว (Lead-free Solder) ในระบบอื่นขึ้นมาทดแทน โดยต้องคงคุณสมบัติที่ดีบางประการเอาไว้ไม่ให้ต่ำกว่าลวดบัดกรีอ่อนผสมตะกั่ว (Lead-based Solder) เช่น มีความสามารถในการเชื่อมที่ดี มีช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวที่เหมาะสมต่อการใช้งาน สมบัติทางกลที่ดี และมีราคาที่ไม่สูงเกินไป [2] ลวดบัดกรีอ่อนระบบต่างๆได้ถูกคิดค้นขึ้น ทั้งที่เป็นโลหะผสม 2 ธาตุ อาทิ ลวดบัดกรีอ่อนในระบบดีบุก-เงิน (Sn-Ag), ดีบุก-ทองแดง (Sn-Cu), ดีบุก-สังกะสี (Sn-Zn), ดีบุก-บิสมัท (Sn-Bi), ดีบุก-อินเดียม (Sn-In) หรือโลหะผสม 3 ธาตุ เช่น ลวดบัดกรีอ่อนในระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง (Sn-Ag-Cu), ดีบุก-เงิน-บิสมัท (Sn-Ag-Bi) และดีบุก-สังกะสี-บิสมัท (Sn-Zn-Bi) ซึ่งลวดบัดกรีอ่อนแต่ละชนิดก็จะมีลักษณะเด่นแตกต่างกันออกไป แต่ลวดบัดกรีอ่อนที่นิยมใช้กันมากที่สุด ในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ คือ ลวดบัดกรีอ่อนในระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง (Sn-Ag-Cu) หรือ SAC ซึ่งเป็นลวดบัดกรีอ่อนที่มีราคาค่อนข้างแพง แต่มี

ข้อได้เปรียบด้านสมบัติทางกล ความสามารถในการเชื่อม และสภาพเปียกได้ (Wettability) ที่โดดเด่นกว่าลวดบัดกรีอ่อนในระบบอื่น [3-6] จึงเหมาะที่จะนำมาใช้เพื่อทดแทนลวดบัดกรีอ่อนผสมตะกั่วแบบเดิมในระบบดีบุก-ตะกั่ว (Sn-Pb)

ถึงแม้ว่าลวดบัดกรีอ่อนในระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง (Sn-Ag-Cu) จะมีสมบัติที่ดีในหลายๆ ด้าน แต่ปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งคือ จุดหลอมเหลวที่สูงถึง 217°C สูงกว่าลวดบัดกรีอ่อนชนิดดีบุก-ตะกั่ว (Sn-Pb) ซึ่งมีจุดหลอมเหลว 183°C ดังนั้นเมื่อนำไปใช้งานอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์รวมถึงแผงวงจรได้ นอกจากนี้จุดหลอมเหลวของลวดบัดกรีอ่อนที่ต่ำลงย่อมส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของพลังงานที่ใช้ในกระบวนการบัดกรีอ่อน (Solder Pasting) ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่านสนใจที่จะปรับปรุงส่วนผสมของลวดบัดกรีอ่อนในระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง (Sn-Ag-Cu) เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด วิธีการหนึ่งที่ได้รับการยอมรับคือการเติมธาตุบางชนิดเข้าไปเล็กน้อยเพื่อปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (Thermal Properties) สมบัติทางกลและความสามารถในการเชื่อม ทำให้ได้เป็นโลหะผสมหลายธาตุ (Multi-Component Alloy) ที่มีสมบัติดีขึ้น โดยธาตุที่นิยมเติมเข้าไปเพื่อปรับปรุงสมบัติของลวดบัดกรีอ่อนมีด้วยกันหลายธาตุ เช่น บิสมัท (Bi), อินเดียม (In), นิกเกิล (Ni), สังกะสี (Zn), โคบอลต์ (Co), พลวง (Sb) เป็นต้น แต่จากการศึกษาพบว่า ธาตุที่เมื่อเติมลงไปแล้วทำให้จุดหลอมเหลวของลวดบัดกรีอ่อนลดต่ำลงได้ โดยยังคงมีสมบัติทางกลในด้านอื่นคือ บิสมัท (Bi) และอินเดียม (In) [7-9]

ด้วยข้อจำกัดในการวิจัยทางโลหวิทยาที่มีความยากในกระบวนการทดลอง และต้องใช้เวลาในการศึกษา ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของลวดบัดกรีอ่อน นอกจากนั้นปริมาณของธาตุบิสมัท (Bi) และอินเดียม (In) ที่เติมลงไปยังส่งผลต่อสมบัติในด้านอื่นของลวดบัดกรีอ่อน อาทิ ช่วงการแข็งตัว (Solidification Range) และการทำให้เปียกได้ซึ่งเป็นสมบัติที่ส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการเชื่อม จึงเป็นการยากที่จะหาส่วนผสมของลวดบัดกรีอ่อนในระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง-บิสมัท-อินเดียม (Sn-Ag-Cu-Bi-In) ที่ให้สมบัติที่ดีทั้งในด้านอุณหภูมิหลอมเหลว ช่วงการแข็งตัว และการทำให้เปียกได้

งานวิจัยนี้จึงมีความคิดที่จะนำขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบผสม (Hybrid Evolutionary Algorithms) เข้ามาใช้เพื่อสร้างแบบจำลองทางสมบัติของวัสดุ เพื่อใช้หาส่วนผสมของลวดบัดกรีอ่อนในระบบหลายธาตุที่ดี และเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นลวดบัดกรีอ่อนปลอดตะกั่วสำหรับงานในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยจะใช้หลักการทำงานของกำหนดการเชิงพันธุกรรม (Genetic Programming) ร่วมกับหลักการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithms) เพื่อสร้างแบบจำลองทางสมบัติของวัสดุสำหรับแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลาย

วัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization Problems) โดยจะกำหนดให้สมบัติด้านอุณหภูมิ หลอมเหลว ช่วงการแข็งตัว และการทำให้เปียกได้ของลวดบัดกรีอ่อนเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ในแบบจำลองทางสมบัติของวัสดุนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. สร้างแบบจำลองทางสมบัติของวัสดุด้วยกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้ทำนายความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิหลอมเหลว (Liquidus Temperature) กับส่วนผสมของลวดบัดกรีอ่อนในระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง-บิสมัท-อินเดียม (Sn-Ag-Cu-Bi-In) และความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิโซลิดัส (Solidus Temperature) กับส่วนผสมของลวดบัดกรีอ่อนในระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง-บิสมัท-อินเดียม (Sn-Ag-Cu-Bi-In)

2. สร้างแบบจำลองทางสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำนายสภาพเปียกได้ (Wettability) ของลวดบัดกรีอ่อนในระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง-บิสมัท-อินเดียม (Sn-Ag-Cu-Bi-In) จากการคำนวณค่าแรงตึงผิวตามสมการของ Butler (Butler's Equation)

3. นำหลักการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์มาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดที่เหมาะสมที่สุดของลวดบัดกรีอ่อนในระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง-บิสมัท-อินเดียม (Sn-Ag-Cu-Bi-In) ที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว ช่วงการแข็งตัว และสภาพเปียกได้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์

4. ได้แบบจำลองทางสมบัติของวัสดุจากการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบผสมเพื่อหาค่าเหมาะที่สุดที่เหมาะสมที่สุดของลวดบัดกรีอ่อนตลอดทั่วระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง-บิสมัท-อินเดียม (Sn-Ag-Cu-Bi-In)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. งานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะสมบัติของลวดบัดกรีอ่อนในระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง-บิสมัท-อินเดียม (Sn-Ag-Cu-Bi-In) เท่านั้น

2. แบบจำลองขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบผสมในงานวิจัยนี้จะนำหลักการของกำหนดการเชิงพันธุกรรมและขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์ตามหลักวิธี Non-dominated Sorting Genetic Algorithms II มาใช้เท่านั้น

3. ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของลวดบัดกรีอ่อนที่ได้จากแบบจำลองในงานวิจัยนี้ จะสนใจเฉพาะสมบัติด้านอุณหภูมิหลอมเหลว ช่วงการแข็งตัว และสภาพเปียกได้

4. การคำนวณทางอุณหพลศาสตร์จะใช้การคำนวณจากโปรแกรม Thermo-Calc [10] (version 5) บนฐานข้อมูล NSLD-II

5. สภาพเป็ยกได้ของลวดบัดกรีอ่อนในแบบจำลองจะอ้างอิงจากค่าแรงดึงผิวที่ได้จากการคำนวณตามสมการของ Butler โดยจะละเลยพารามิเตอร์อันตรกิริยา (Interaction Parameter) ระหว่างธาตุในระบบ 4 ธาตุ (Quaternary System)

6. ผลการทำนายจากแบบจำลองจะนำมาเปรียบเทียบกับค่าสมบัติในด้านต่างๆของลวดบัดกรีอ่อนในระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง-บิสมัท-อินเดียม (Sn-Ag-Cu-Bi-In) ที่ได้จากการทดลองจำนวน 10 ส่วนผสม

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของการคำนวณทางอุณหพลศาสตร์ ผลของการเติมอินเดียม (In) และบิสมัท (Bi) ต่อจุดหลอมเหลว ช่วงการแข็งตัว และสภาพเป็ยกได้ของลวดบัดกรีอ่อนในระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง-บิสมัท-อินเดียม

2. ศึกษาหลักการกำหนดการเชิงพันธุกรรม และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์ตามขั้นตอนวิธี NSGA-II

3. สร้างแบบจำลองที่ใช้ทำนายสมบัติของวัสดุจากกำหนดการเชิงพันธุกรรม โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณทางอุณหพลศาสตร์เป็นข้อมูลสอน จำนวน 250 ชุดข้อมูล

4. ปรับปรุงความถูกต้องของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบผลการทำนายกับข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจำนวน 25 ชุดข้อมูล

5. สร้างโมเดลการคำนวณค่าแรงดึงผิวจากสมการของ Butler เพื่อใช้ทำนายสภาพเป็ยกได้ของลวดบัดกรีอ่อน

6. สร้างแบบจำลองจากหลักการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์ตามขั้นตอนวิธี NSGA-II เพื่อหาค่าส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของลวดบัดกรีอ่อนในดีบุก-เงิน-ทองแดง-บิสมัท-อินเดียม ที่มีอุณหภูมิควิตัส ช่วงการแข็งตัว และสภาพเป็ยกได้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์

6. ทำการทดลองเพื่อวัดค่าสมบัติทางความร้อนและสภาพเป็ยกได้ตามส่วนผสมของลวดบัดกรีอ่อนที่ได้จากแบบจำลอง จำนวน 10 ส่วนผสม

7. ตรวจสอบผลความถูกต้องของผลการทำนายจากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลอง

8. สรุปผล วิเคราะห์ผล และจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แบบจำลองจากกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่สามารถทำนายคุณสมบัติควิตัส อุณหภูมิโซลิตัส ของลวดบัดกรีอ่อนในระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง-บิสมาท-อินเดียม
2. ได้แบบจำลองทางสมบัติของวัสดุที่สามารถแก้ปัญหาการหาค่าส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของลวดบัดกรีอ่อนในระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง-บิสมาท-อินเดียมที่มีอุณหภูมิควิตัส ช่วงการแข็งตัว และสภาพเปื่อยได้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบผสม
3. ได้วิธีการใหม่ที่ใช้ความรู้ทางคอมพิวเตอร์เข้าไปช่วยในการแก้ปัญหาทางโลหวิทยา และสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาลวดบัดกรีอ่อนปลอดตะกั่วได้ รวมทั้งยังเป็นการพัฒนาศาสตร์ในการพัฒนาโลหะผสม (Alloy Development) ต่อไปได้
4. ได้ส่วนผสมของลวดบัดกรีอ่อนปลอดตะกั่วที่มีสมบัติที่ดี และเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นตัวเลือกทดแทนการใช้ลวดบัดกรีอ่อนผสมตะกั่ว



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการนำหลักการขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒน์แบบผสมมาใช้เพื่อทำนายสมบัติด้านต่างๆของลวดบัดกรีอ่อน และหาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งประกอบไปด้วยสองวิธีที่สำคัญคือ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม และกำหนดการเชิงพันธุกรรม โดยจะนำเสนอรายละเอียดการทำงานของทั้งสองวิธีแยกออกจากกัน และเพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงความสำคัญของสมบัติทางความร้อนของลวดบัดกรีอ่อน จึงอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับกระบวนการแข็งตัวของโลหะผสม (Alloy Solidification) เพิ่มเติมไว้ด้วย

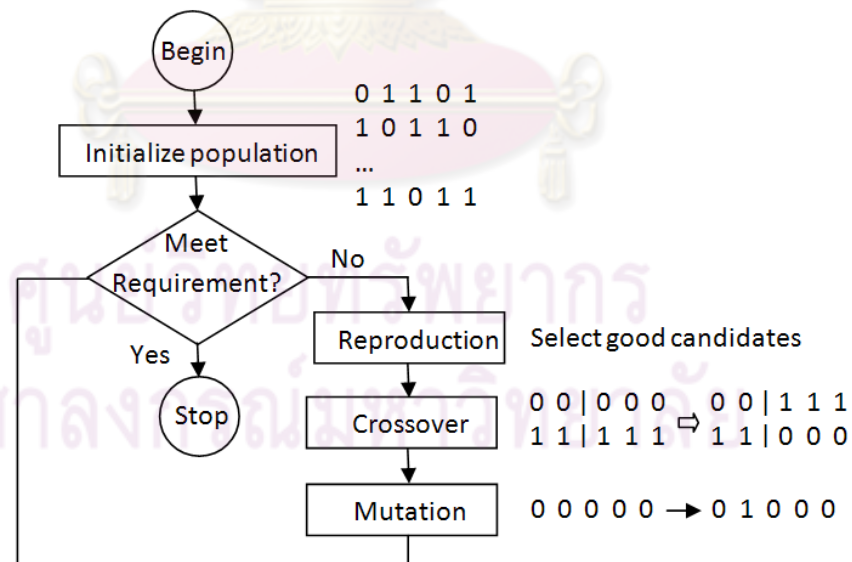
2.1.1 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมถูกคิดค้นขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1965 โดย Holland และตีพิมพ์ออกมาในปี ค.ศ. 1975 [11] ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นวิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) วิธีการหนึ่งซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒน์ (Evolutionary Algorithms) มีลักษณะการค้นหาผลเฉลย (Solution) ที่เลียนแบบกระบวนการวิวัฒนาการของธรรมชาติ ตามทฤษฎีของ Darwin ซึ่งพูดถึงการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมจากรุ่นหนึ่งสู่อีกหนึ่งรุ่นหนึ่ง ว่าพ่อแม่สามารถถ่ายทอดลักษณะต่างๆ ไปสู่รุ่นลูกได้ ดังจะเห็นได้จากการที่ลูกมีหน้าตาเหมือนพ่อ ฉลาดเหมือนแม่ เป็นต้น สิ่งมีชีวิตในธรรมชาติอาศัยการถ่ายทอดพันธุกรรมนี้เพื่อที่จะดำรงเผ่าพันธุ์อยู่ต่อไป สิ่งมีชีวิตที่มีลักษณะเหมาะสมและสามารถปรับตัวเพื่อความอยู่รอดในสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ ก็จะสืบลูกหลานต่อไป แต่ถ้าสิ่งมีชีวิตใดไม่สามารถปรับตัวได้หรือไม่เหมาะสมก็จะล้มตายลง และด้วยกระบวนการคัดเลือกสิ่งที่เหมาะสมที่จะได้อยู่รอดนี้เองทำให้เกิดกระบวนการวิวัฒนาการในธรรมชาติขึ้น สิ่งมีชีวิตต่างๆ จะต้องพยายามพัฒนาตัวเองขึ้นเพื่อให้อยู่รอด และเมื่อผ่านเวลาไประยะหนึ่ง ก็จะได้สิ่งมีชีวิตที่ดีและเหมาะสมกับสิ่งแวดล้อม

ในการค้นหาผลเฉลยของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะเริ่มจากชุดของผลเฉลยที่ได้จากการสุ่ม นำผลเฉลยเหล่านั้นมาวัดค่าความแข็งแรง (Fitness) หลังจากนั้นจะเลือกเอาผลเฉลยที่มีลักษณะดีออกมาแล้วจึงใช้สร้างผลเฉลยใหม่ที่มีลักษณะของผลเฉลยที่ดีเป็นพื้นฐาน ส่วนผลเฉลยที่ไม่ดีก็就会被คัดทิ้งไป โดยคาดว่าชุดของผลเฉลยชุดใหม่นั้นจะมีค่าความแข็งแรงมากกว่าชุดเดิม เมื่อได้ผลเฉลยชุดใหม่มาแล้วก็จะประเมินค่าความแข็งแรงของผลเฉลยเหล่านั้น และคัดเลือกเช่นเดิมอีกครั้ง ทำเช่นนี้ซ้ำไปเรื่อยๆจนกระทั่งได้ผลเฉลยตามเงื่อนไขที่ต้องการ

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะแทนคำตอบหรือผลเฉลยของปัญหาต่างๆ ในรูปแบบของโครโมโซม (Chromosome) แต่ละโครโมโซมจะแทนด้วยสายอักขระเลขฐานสองหรือสายอักขระอื่นๆที่เหมาะสมกับปัญหา ตามธรรมชาติสิ่งมีชีวิตหนึ่งๆ ก็จะประกอบด้วยโครโมโซมชุดหนึ่ง เทคนิคการคำนวณนี้ก็เช่นเดียวกัน ประชากรหนึ่งตัว (Individual) ก็ประกอบด้วยสายอักขระชุดหนึ่ง และหลายๆ ประชากรรวมกันก็จะกลายเป็นกลุ่มประชากร (Population) การประเมินค่าความแข็งแรงของประชากร ทำโดยการแปลงสายอักขระที่ถูกจัดเก็บไว้แล้วนำมาคำนวณค่าความแข็งแรงโดยใช้ฟังก์ชันความแข็งแรง (Fitness Function) ซึ่งเป็นการวัดค่าความดีของผลเฉลยแต่ละตัว ฟังก์ชันความแข็งแรงนี้จะแตกต่างกันไปขึ้นกับแต่ละปัญหา ชุดของประชากรที่ทำการประเมินค่าแล้วจะถูกเลือกและสร้างประชากรรุ่นใหม่ขึ้น แต่ครั้งที่สร้างประชากรรุ่นใหม่ขึ้นมาจะเรียกว่ารุ่น (Generation)

วิธีการสร้างประชากรรุ่นใหม่ นั้น จะอาศัยตัวดำเนินการทางพันธุกรรม (Genetic Operator) มากกระทำกับสายอักขระ โดยตัวดำเนินการที่นิยมใช้มีอยู่ 3 ตัว คือ การสืบพันธุ์ (Reproduction) การไขว้เปลี่ยน (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation) ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป จากหลักการพื้นฐานดังกล่าวสามารถสรุปแผนภูมิสายงาน (Flow Chart) ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมได้ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนภูมิสายงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม [12]

2.1.1.1 การสร้างกลุ่มประชากร

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะกำหนดประชากรเริ่มต้น (Initialize Population) ด้วยวิธีการสุ่ม (Random) ประชากรแต่ละตัวจะถูกแสดงด้วยสายอักขระฐานสอง (Binary String) ฝที่มีความยาวคงที่ การสุ่มเริ่มต้นนี้จะทำการสุ่มสายอักขระฐานสองให้กับประชากรทุกตัวเป็นค่าเริ่มต้นและจะสุ่มจำนวนสายอักขระฐานสองเท่ากับจำนวนประชากร เช่น ถ้ากำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 5 ก็จะมีสายอักขระฐานสองมา 5 สายแทนประชากร 5 ตัว

2.1.1.2 การประเมินค่าความแข็งแรงของผลเฉลย

ขั้นตอนนี้เป็นการวัดค่าความแข็งแรงของประชากรแต่ละตัว โดยใช้ฟังก์ชันความแข็งแรง และค่าที่ได้จากฟังก์ชันนี้จะเรียกว่าค่าความแข็งแรง (Fitness Value) ซึ่งค่าความแข็งแรงนี้จะเป็นตัวบอกว่าประชากรตัวใดเหมาะสมหรือดีกว่ากัน ค่านี้จะถูกนำไปใช้ในการคัดเลือกประชากรสำหรับรุ่นต่อไป การประเมินค่าความแข็งแรงจะทำโดยการแปลงผลเฉลยซึ่งอยู่ในรูปของสายอักขระฐานสองให้เป็นผลเฉลยในรูปแบบที่มีค่า สามารถนำไปคำนวณค่าความแข็งแรงตามฟังก์ชันความแข็งแรงได้ ตัวอย่างการหาค่าความแข็งแรงของประชากรแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การหาค่าความแข็งแรงของประชากร เช่น $f(x) = x^2$

สายอักขระ	Value (x)	Fitness value (x^2)
1 0 1 0 1	21	441
1 0 0 0 1	17	289
0 1 0 1 0	10	100
1 0 1 1 1	23	529
1 0 1 1 0	22	484

จากตารางที่ 1 จะพบว่าสายอักขระ 10101 จะถูกแปลงเป็นผลเฉลยที่มีค่าเท่ากับ 21 จากนั้นผลเฉลยจะถูกคำนวณค่าความแข็งแรงตามฟังก์ชันความแข็งแรง ซึ่งในตัวอย่างนี้เป็นฟังก์ชันกำลังสอง ทำให้ผลเฉลยนี้มีค่าความแข็งแรงเป็น 441

2.1.1.3 การสร้างประชากรของผลเฉลยรุ่นใหม่

เมื่อทำการวัดค่าความแข็งแรงของผลเฉลยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการสร้างกลุ่มประชากรใหม่ ที่จะคัดเลือกเอาเฉพาะผลเฉลยที่ดีที่สุด ซึ่งจะพิจารณาจากค่าความแข็งแรง โดย

ประชากรที่มีค่าความแข็งแรงสูงกว่า จะมีโอกาสถูกเลือกได้มากกว่าประชากรที่มีค่าความแข็งแรงต่ำ เมื่อเลือกประชากรต้นแบบหรือประชากรพ่อแม่ (Parents) ได้แล้ว ก็จะมีการสร้างกลุ่มประชากรรุ่นใหม่ หรือประชากรลูก (Children) โดยใช้ตัวดำเนินการทางพันธุกรรม 3 ประเภท คือ การสืบพันธุ์ การไขว้เปลี่ยน และการกลายพันธุ์

(1) การสืบพันธุ์

การสืบพันธุ์เป็นการสร้างผลเฉลยรุ่นใหม่ที่มีลักษณะเหมือนกับผลเฉลยต้นแบบทุกประการโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ตัวดำเนินการนี้มักนิยมใช้กับผลเฉลยที่มีค่าความแข็งแรงสูงที่สุดในรุ่นนั้นๆ เพื่อที่จะได้ถ่ายทอดลักษณะที่ดีที่สุดไว้ในรุ่นถัดไป แต่จะไม่นิยมใช้กับผลเฉลยอื่นๆ เพราะผลเฉลยใหม่ที่ได้จะไม่มีค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยที่ดีเพิ่มมากขึ้น เพียงแต่จะคงเดิมเท่านั้น

(2) การไขว้เปลี่ยน

การไขว้เปลี่ยนเป็นการสร้างผลเฉลยใหม่จากผลเฉลยต้นแบบ จำนวน 2 ผลเฉลย โดยแลกเปลี่ยนโครโมโซมบางส่วนของผลเฉลยทั้งสองซึ่งกันและกัน การแลกเปลี่ยนจะเริ่มต้นจากการสุ่มเลือกตำแหน่งในผลเฉลยต้นแบบทั้งสองเพื่อที่จะตัดแบ่งผลเฉลยทั้งสองที่ตำแหน่งนั้น จากนั้นจะสลับส่วนสายอักขระฐานสองที่ตัดของผลเฉลยแรกกับผลเฉลยที่สอง แล้วต่อส่วนที่สลับนั้นเข้าไป ผลลัพธ์ที่ได้คือผลเฉลยใหม่สองตัวที่มีลักษณะร่วมของผลเฉลยต้นแบบทั้งสอง ตัวอย่างการไขว้เปลี่ยนแสดงไว้ดังภาพที่ 2

parents	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
children	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0

ภาพที่ 2 ตัวอย่างการไขว้เปลี่ยน

(3) การกลายพันธุ์

การกลายพันธุ์เป็นการสร้างผลเฉลยใหม่ขึ้นจากผลเฉลยต้นแบบเพียง 1 ผลเฉลย โดยจะทำการเปลี่ยนโครโมโซมบางส่วนของผลเฉลยต้นแบบ กล่าวคือ จะทำการเปลี่ยนค่าในสายอักขระจากเดิมเป็นค่าใหม่ด้วยการสุ่มตำแหน่งในสายอักขระ แล้วเปลี่ยนค่าตรงตำแหน่งนั้น เช่น ถ้าตำแหน่งเดิมเป็น 0 ก็เปลี่ยนเป็น 1 แต่ถ้าเป็น 1 อยู่ ก็เปลี่ยนเป็น 0

จำนวนตำแหน่งที่จะทำการกลายพันธุ์นั้นขึ้นอยู่กับอัตราการกลายพันธุ์ ซึ่งอาจจะมีอัตราเท่ากันสำหรับทุกๆ ผลเฉลย หรืออาจจะแปรตามค่าความแข็งแรงก็ได้ ตัวอย่างการกลายพันธุ์แสดงดังภาพที่ 3

parent	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
child	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1

ภาพที่ 3 ตัวอย่างการกลายพันธุ์

2.1.1.4 การค้นหาผลเฉลย

ในการค้นหาผลเฉลยโดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้น จะกระทำตามขั้นตอนที่แสดงในภาพที่ 1 ซ้ำวนรอบไปจนกว่าผลเฉลยที่ค้นหาได้จะตรงกับผลเฉลยที่ต้องการ หรือได้กระทำการในวงรอบดังกล่าวเป็นจำนวนครั้งเท่ากับจำนวนวงรอบมากที่สุดที่ได้กำหนดไว้ หรืออาจตรงกับเงื่อนไขการหยุด (Stopping Criteria) ที่กำหนดไว้เป็นอย่างอื่นก็ได้

2.1.2 กำหนดการเชิงพันธุกรรม

กำหนดการเชิงพันธุกรรมเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้สำหรับการเรียนรู้จากชุดข้อมูลสอน (Training Data) และเป็นวิธีการที่ได้รับการพัฒนามาจากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม กำหนดการเชิงพันธุกรรมถูกคิดค้นโดย Koza ในปี ค.ศ. 1992 [13] โดยมีหลักการค้นหาผลเฉลยจากการจำลองแบบตามกฎการคัดเลือกโดยธรรมชาติ (Natural Selection) ในการค้นหาผลเฉลยของกำหนดการเชิงพันธุกรรมจะเริ่มจากการสุ่ม สร้างกลุ่มของผลเฉลยที่เป็นไปได้ ทำการวิวัฒนาการโดยเก็บผลเฉลยที่ดีที่สุดบางส่วนไว้ เพื่อนำไปเป็นต้นแบบในการให้สร้างผลเฉลยใหม่ ส่วนผลเฉลยที่ไม่ดีก็จะถูกกำจัดทิ้ง โดยขั้นตอนการวิวัฒนาการจะเกิดขึ้นวนรอบไปจนกว่าจะได้ผลลัพธ์เป็นผลเฉลยที่ต้องการ หรือตรงกับเงื่อนไขการหยุด สำหรับความแตกต่างของกำหนดการเชิงพันธุกรรมกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมคือลักษณะของการแทนผลเฉลย โดยกำหนดการเชิงพันธุกรรมจะแทนผลเฉลยในลักษณะของต้นไม้ (Tree) ซึ่งมีขนาดและรูปร่างที่ไม่แน่นอน ส่วนผลเฉลยของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะมีลักษณะเป็นสายอักขระ (String) โดยที่ความยาวของสายอักขระจะมีขนาดคงที่

ขั้นตอนหลักในการทำงานของกำหนดการเชิงพันธุกรรมแบ่งออกเป็น การสร้างกลุ่มประชากร การประเมินค่าความแข็งแรงของผลเฉลย การสร้างประชากรของผลเฉลยรุ่นใหม่ และการค้นหาผลเฉลย

2.1.2.1 การสร้างกลุ่มประชากร

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนเริ่มต้นของกำหนดการเชิงพันธุกรรม ซึ่งจะทำการสร้างประชากรของผลเฉลยแบบสุ่ม ในแต่ละผลเฉลยจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบ 2 ชนิดคือ ฟังก์ชัน (Function) และเทอร์มินอล (Terminal)

ฟังก์ชัน เป็นสัญลักษณ์ที่ใช้แทนความหมายของตัวดำเนินการ โดยลักษณะที่สำคัญของฟังก์ชันคือ ฟังก์ชันต้องการอาร์กิวเมนต์ (Argument) เพื่อช่วยในการทำงาน โดยที่อาร์กิวเมนต์ของฟังก์ชันอาจเป็นอีกฟังก์ชันก็ได้ ตัวอย่างของฟังก์ชัน ได้แก่

- ตัวดำเนินการทางคณิตศาสตร์ เช่น {+, -, *, /, SIN, EXP, LOG}
- ตัวดำเนินการทางตรรกะ เช่น {AND, OR, NOT}
- ตัวดำเนินการทางเงื่อนไข เช่น {if-then-else}
- ตัวดำเนินการวนซ้ำ เช่น {Do-Until}
- ฟังก์ชันที่นิยามขึ้นเองเพื่อใช้แก้ปัญหา

เทอร์มินอล เป็นสัญลักษณ์ที่ใช้แทนความหมายของการทำงาน ค่าคงที่หรือตัวแปรซึ่งเป็นอิสระต่อกันและแบ่งย่อยไม่ได้อีก อาจกล่าวได้ว่า เทอร์มินอลคือฟังก์ชันที่ไม่มีอาร์กิวเมนต์ก็ได้ ตัวอย่างของเทอร์มินอล ได้แก่

- ค่าคงที่ เช่น 500, 1000
- ตัวแปร เช่น x, y, z
- การทำงาน เช่น เดินหน้า เลี้ยวซ้าย เลี้ยวขวา

ทั้งฟังก์ชันและเทอร์มินอลจะต้องมีการคืนค่า (Return Value) เพื่อให้โปรแกรมที่สร้างจากฟังก์ชันและเทอร์มินอลสามารถเชื่อมต่อกันและทำงานเป็นขั้นตอน รวมทั้งมีความเข้ากันได้ (Closure Property) กล่าวคือ การสร้างกลุ่มประชากรนั้นเป็นการสุ่มเลือกเอาฟังก์ชันและเทอร์มินอลมาสร้างเป็นต้นไม้นั้น ดังนั้นไม่ว่าจะเลือกฟังก์ชันและเทอร์มินอลใดมาต่อกันจะต้องแปลความหมายของขั้นตอนการทำงานได้ ด้วยเหตุนี้ฟังก์ชันทุกตัวจึงสามารถใช้งานร่วมกับเทอร์มินอลได้ทุกตัว

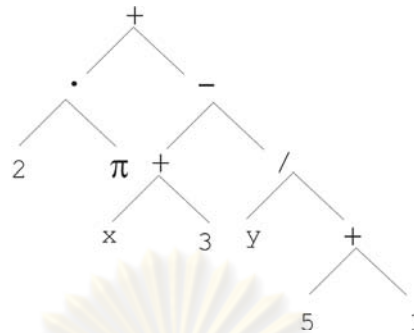
ในการเขียนสัญลักษณ์แทนผลเฉลย มักนิยมเขียนในรูปแบบของนิพจน์เชิงสัญลักษณ์ (Symbolic Expression) เช่นตัวอย่างของผลเฉลย

$$2\pi + \left\{ (x + 3) - \frac{y}{5 + 1} \right\}$$

เขียนในรูปของนิพจน์เชิงสัญลักษณ์เป็น

$$\left(+ (* 2 \pi) \left(- (+ x 3) (/ y (+ 5 1)) \right) \right)$$

และแสดงในรูปของต้นไม้ได้ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ต้นไม้แทนนิพจน์เชิงสัญลักษณ์ $(+ (* 2 \pi) (- (+ x 3) (/ y (+ 5 1))))$

2.1.2.2 การประเมินค่าความแข็งแรงของผลเฉลย

หลังจากที่ได้กลุ่มประชากรผลเฉลยเริ่มต้นแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการทำการประเมินค่าความแข็งแรงของผลเฉลยแต่ละตัว โดยการประเมินค่าความแข็งแรงของผลเฉลยจะทำการประเมินจากราก (Root) ของต้นไม้ไปถึงตำแหน่งของเทอร์มินอลและฟังก์ชันต่างๆจนครบทั้งต้น โดยการคำนวณค่าความแข็งแรงจะใช้ฟังก์ชันความแข็งแรงซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับแต่ละปัญหา

ค่าความแข็งแรงจะใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจว่าประชากรตัวใดจะอยู่รอดและประชากรตัวใดควรถูกกำจัดทิ้งไป ดังนั้นเพื่อให้ประชากรที่ดีที่มีความสามารถสูงในการแก้ปัญหาได้อยู่รอดต่อไป จึงต้องกำหนดฟังก์ชันความแข็งแรงที่เหมาะสมกับปัญหาให้มากที่สุด เพราะความสามารถที่ทำให้ประสิทธิภาพของประชากรจากรุ่นหนึ่งไปยังรุ่นถัดไปจะเพิ่มขึ้นได้มากหรือน้อยเพียงใดนั้น ส่วนสำคัญที่สุดส่วนหนึ่งก็อยู่ที่การกำหนดฟังก์ชันความแข็งแรงนั่นเอง

2.1.2.3 การสร้างประชากรของผลเฉลยรุ่นใหม่

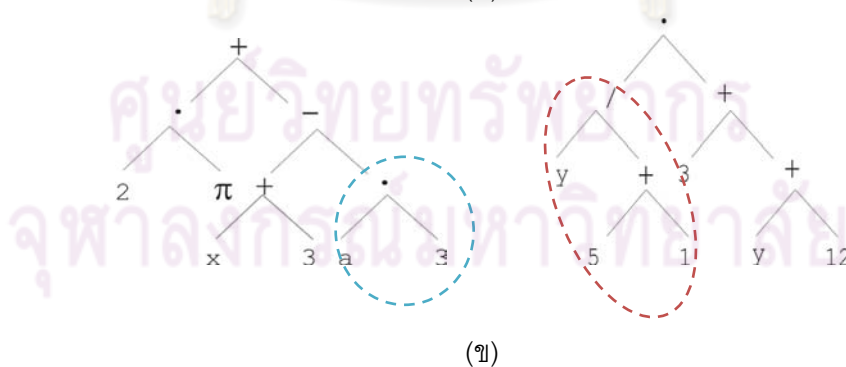
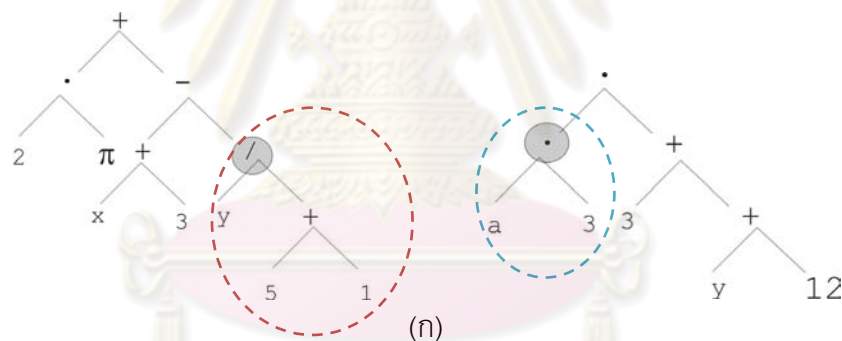
จากขั้นตอนที่ผ่านมา ผลเฉลยแต่ละตัวจะได้ค่าความแข็งแรง ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในขั้นตอนการสร้างกลุ่มประชากรของผลเฉลยรุ่นใหม่ ค่าความแข็งแรงของผลเฉลยจะใช้เป็นเกณฑ์ในการคัดเลือก ซึ่งวิธีการคัดเลือกก็สามารถทำได้หลายวิธี เช่น เรียงลำดับผลเฉลยตามค่าความแข็งแรง แล้วคัดเลือกผลเฉลยที่เรียงลำดับไว้ตามจำนวนที่ต้องการ หรืออาจเปลี่ยนจากค่าความแข็งแรงเป็นโอกาสที่ผลเฉลยตัวนั้นจะถูกเลือก เป็นต้น ผลเฉลยที่ผ่านการคัดเลือกจะได้รับการวิวัฒนาการต่อไป ส่วนผลเฉลยที่ไม่ถูกเลือกก็จะถูกกำจัดทิ้งไป ผลเฉลยที่ถูกเลือกจะถูกใช้เป็นต้นแบบในการสร้างประชากรรุ่นใหม่ ซึ่งการสร้างผลเฉลยใหม่นี้อาศัยตัวดำเนินการทางพันธุกรรม ซึ่งมีอยู่ 3 ตัวดำเนินการหลักๆ คือ การสืบพันธุ์ การไขว้เปลี่ยน และการกลายพันธุ์

(1) การสืบพันธุ์

การสืบพันธุ์เป็นการนำผลเฉลยที่ได้รับการคัดเลือกมาเป็นต้นแบบ จากนั้นทำการคัดลอกผลเฉลยนั้นไปไว้ในกลุ่มประชากรรุ่นใหม่ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ภายในผลเฉลย โดยตัวเนืงการนี้นิยมทำกับผลเฉลยที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในแต่ละรุ่น

(2) การไขว้เปลี่ยน

การไขว้เปลี่ยนเป็นกระบวนการในการสร้างผลเฉลยใหม่โดยทำการแลกเปลี่ยนส่วนประกอบบางส่วนซึ่งกันและกันระหว่างผลเฉลย 2 ผลเฉลยที่เลือกมาจากกลุ่มประชากรที่ได้จากการสืบพันธุ์ วิธีการคือจะสุ่มเลือกผลเฉลย 2 ผลเฉลยมาเพื่อเป็นผลเฉลยต้นแบบ จากนั้นจะสุ่มเลือกตำแหน่งในการไขว้เปลี่ยน ซึ่งก็คือโหนด (node) บนโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยทั้งสองตัว ตัดโครงสร้างต้นไม้ย่อย (Subtree) ทั้งสองออกจากตำแหน่งในผลเฉลยแต่ละตัว แล้วทำการไขว้เปลี่ยนกันไปไว้ยังตำแหน่งที่ตัดออกมานั้น จากวิธีการนี้จะได้ผลเฉลยใหม่จำนวน 2 ผลเฉลยที่มีลักษณะร่วมกันระหว่างผลเฉลยต้นแบบทั้งสอง เปรียบได้กับการผสมพันธุ์ (Sexual Combination) ในธรรมชาติ ตัวอย่างการไขว้เปลี่ยนแสดงดังภาพที่ 5



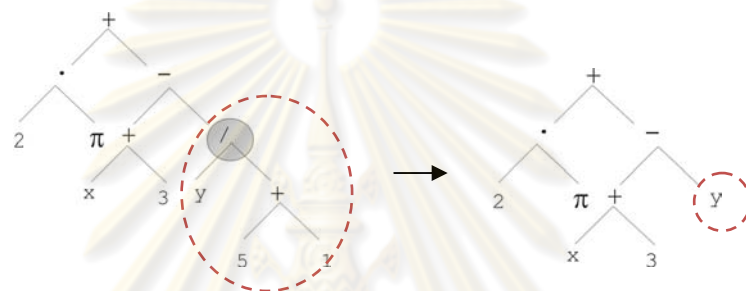
ภาพที่ 5 ตัวอย่างการไขว้เปลี่ยน

(ก) โครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยต้นแบบที่ถูกเลือกมาทำการไขว้เปลี่ยน

(ข) โครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยใหม่หลังทำการไขว้เปลี่ยน

(3) การกลายพันธุ์

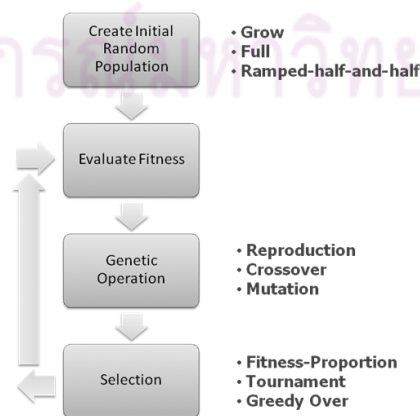
การกลายพันธุ์เป็นกระบวนการในการสร้างผลเฉลยใหม่โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบบางส่วนของผลเฉลยที่ได้จากการสืบพันธุ์ กระบวนการจะเริ่มต้นจากการสุ่มเลือกผลเฉลยขึ้นมาหนึ่งตัว แล้วทำการสุ่มเลือกตำแหน่งที่ต้องการให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างต้นไม้ จากนั้นจะนำต้นไม้ย่อยที่สร้างใหม่ หรือโหนดที่สร้างใหม่ไปแทนที่ต้นไม้ย่อยเดิมที่เกิดจากตำแหน่งที่สุ่มเลือกนั้น ในกรณีที่ตำแหน่งที่เลือกนั้นไม่มีต้นไม้ย่อย โหนดหรือต้นไม้ย่อยใหม่ก็จะแทนที่โหนดเดิม ผลลัพธ์คือจะได้ผลเฉลยใหม่ที่กลายพันธุ์มาจากผลเฉลยต้นแบบ ตัวอย่างการกลายพันธุ์แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลย ก่อนการกลายพันธุ์ (ซ้าย) หลังการกลายพันธุ์ (ขวา)

2.1.2.4 การค้นหาผลเฉลย

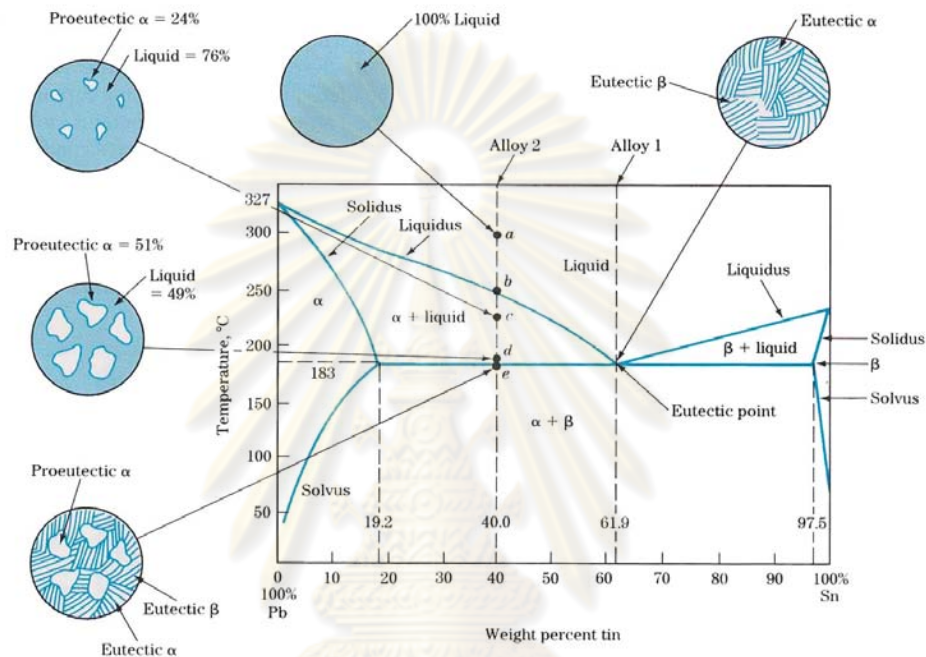
กำหนดการเชิงพันธุกรรมอาศัยกระบวนการวิวัฒนาการเพื่อหาผลเฉลย ในกระบวนการวิวัฒนาการนั้นโดยเฉลี่ยแล้วผลเฉลยในแต่ละรุ่นจะมีค่าความแข็งแรงดีขึ้น คือมีความสามารถในการแก้ปัญหาได้ดีขึ้น กระบวนการวิวัฒนาการจะดำเนินเป็นรุ่นไปและสิ้นสุดเมื่อพบคำตอบที่เหมาะสมแล้ว หรือพบเงื่อนไขที่ได้ตั้งไว้ ซึ่งผลเฉลยในรุ่นสุดท้ายที่แก้ปัญหาได้สำเร็จ จะเป็นผลเฉลยที่ได้จากการกำหนดการเชิงพันธุกรรม การทำงานของกำหนดการเชิงพันธุกรรมสามารถสรุปเป็นแผนภูมิสายงานได้ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แผนภูมิสายงานของกำหนดการเชิงพันธุกรรม

2.1.3 กระบวนการแข็งตัวของโลหะผสม

ในระหว่างกระบวนการแข็งตัวของโลหะผสม (Alloy Solidification) เฟสของแข็งต่างๆที่เกิดขึ้นจากองค์ประกอบภายในโลหะผสมจะเกิดขึ้นและค่อยๆเพิ่มปริมาณขึ้นเมื่ออุณหภูมิของระบบลดลง โดยแผนภูมิเฟส (Phase Diagram) เป็นสิ่งหนึ่งที่สามารถใช้อธิบายถึงชนิดและปริมาณของเฟสของแข็งที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิหนึ่งๆที่เปลี่ยนแปลงไป



ภาพที่ 8 แผนภูมิเฟสแสดงกระบวนการเย็นแข็งตัวของโลหะผสมตะกั่ว-ดีบุก [14]

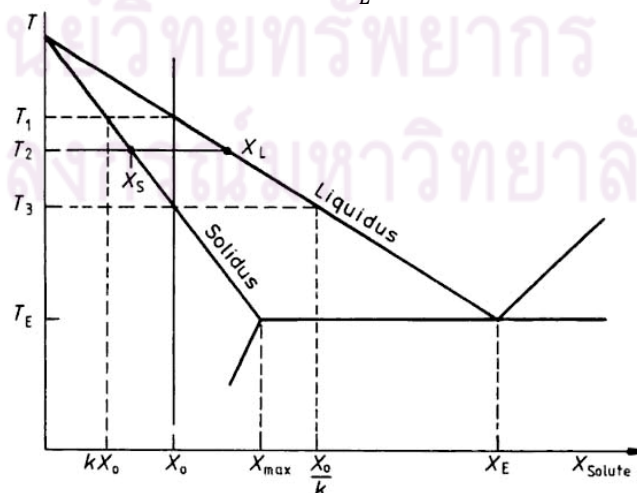
จากภาพที่ 8 จะพบว่าที่จุด a นั้น alloy 2 จะมีสภาพเป็นของเหลวสมบูรณ์ เมื่ออุณหภูมิของระบบค่อยๆลดต่ำลงจนถึงจุด b ก็จะตัดกับเส้นลิควิดัส (Liquidus Line) ซึ่งเป็นเส้นที่แสดงการเริ่มเปลี่ยนสถานะของโลหะจากของเหลวเป็นของแข็ง เมื่ออุณหภูมิของโลหะผสมต่ำกว่าจุดนี้ ก็จะเริ่มเกิดเฟสของแข็งขึ้น (ในภาพที่ 8 เกิดเฟส Proeutectic α ขึ้น) และเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงปริมาณเฟสของแข็งก็จะยิ่งเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณเฟสของเหลวก็จะลดต่ำลง ดังแสดงในจุด c และ d ตามลำดับ แต่เมื่ออุณหภูมิของระบบลดต่ำลงถึงจุด e ซึ่งเป็นจุดที่อยู่บนเส้นโซลิดัส (Solidus Line) และมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิยูเทคติก (Eutectic Temperature) เฟสของเหลวที่เหลือก็จะเปลี่ยนเป็นเฟสของแข็งยูเทคติกทั้งหมด ซึ่งที่จุดยูเทคติกนี้เป็นจุดที่มีอุณหภูมิของการแข็งตัวต่ำที่สุด

โลหะผสมที่มีส่วนผสมต่างกันก็จะเริ่มเกิดกระบวนการแข็งตัวและสิ้นสุดกระบวนการแข็งตัวที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยโลหะผสมหนึ่งๆจะเริ่มเกิดการแข็งตัวที่อุณหภูมิลiquidusและจะสิ้นสุดการแข็งตัวที่อุณหภูมิลiquidus

แต่กระบวนการแข็งตัวของโลหะดังกล่าวจะเกิดขึ้นในสภาวะสมดุลเท่านั้น เนื่องจากผลของอัตราการเย็นตัวที่ส่งผลต่อกระบวนการแข็งตัว โดยถ้าโลหะเย็นตัวลงอย่างช้า ๆ จะทำให้อะตอมของโลหะผสมแพร่กระจายไปในเนื้อโลหะหลักได้ทัน เนื้อโลหะจะมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันตลอด แต่อย่างไรก็ดีในทางปฏิบัติอาจไม่เป็นไปตามที่กล่าวได้ เนื่องจากโลหะจะเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เนื้อโลหะไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด และไม่ปฏิบัติตามแผนภูมิเฟสในภาพที่ 8 ซึ่งจำเป็นต้องใช้แบบจำลองอื่นเพื่ออธิบายถึงกระบวนการแข็งตัวนี้ ดังนั้นเพื่ออธิบายถึงปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการแข็งตัว จึงนำขออธิบายเพิ่มเติมถึงลักษณะกระบวนการแข็งตัวของโลหะผสมแบบเฟสเดียว (Solidification of Single-Phase Alloys) โดยในงานวิจัยนี้จะสนใจกระบวนการแข็งตัวใน 2 กรณีคือ กระบวนการแข็งตัวในสภาวะสมดุล และกระบวนการแข็งตัวตามแบบจำลองของ Scheil-Gulliver

สมมติให้โลหะผสมที่เราสนใจมีส่วนผสม X_0 และสมมติให้เส้นliquidusและเส้นsolidusมีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังแสดงในแผนภูมิเฟสสมมติในภาพที่ 9 ซึ่งถ้าหากเรานิยามให้สัมประสิทธิ์การแบ่งส่วน (Partition Coefficient : k) มีค่าเป็นสัดส่วนโมลของอะตอมตัวถูกละลายในของแข็งต่ออะตอมตัวถูกละลายในเฟสของเหลว ณ สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิหนึ่งๆที่สนใจแสดงได้ดังสมการที่ 1 ก็จะได้พบว่า แผนภูมิเฟสสมมติในภาพที่ 9 มีค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วน เป็นค่าคงที่

$$k = \frac{X_S}{X_L} \quad (1)$$

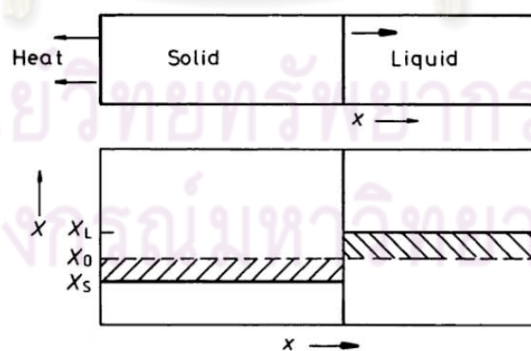


ภาพที่ 9 แผนภูมิเฟสสมมติซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนคงที่ [15]

เพื่อลดความซับซ้อนของผลจากอัตราการเย็นตัวและอัตราการโตของผลึก จึงจะทำการพิจารณากระบวนการแข็งตัวภายในท่อซึ่งมีการแข็งตัวในทิศทางเดียว (Unidirectional Solidification) และมีการเคลื่อนที่ของระนาบผิวสัมผัสระหว่างเฟสของแข็งและเฟสของเหลวไปตามความยาวของท่อเท่านั้น รายละเอียดกระบวนการแข็งตัวใน 2 กรณีคือ กระบวนการแข็งตัวในสภาวะสมดุล และกระบวนการแข็งตัวตามแบบจำลองของ Scheil-Gulliver มีดังต่อไปนี้

2.1.3.1 กระบวนการแข็งตัวในสภาวะสมดุล

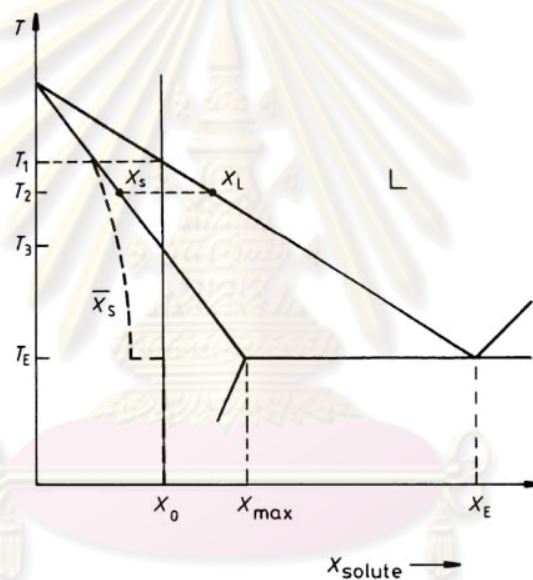
กระบวนการแข็งตัวในสภาวะสมดุล (Equilibrium Solidification) จะเกิดขึ้นเมื่อเวลาในการแข็งตัวนานพอที่จะทำให้อะตอมมีเวลาในการแพร่และขยับเข้าไปในแลตทิซ (Lattice) จนส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน หรือไม่เกิดการไล่ระดับของส่วนผสม (Concentration Gradient) ขึ้น ซึ่งโลหะผสมที่มีส่วนผสม X_0 ในภาพที่ 9 จะเริ่มเกิดเฟสของแข็งที่มีโมลของตัวถูกละลาย kX_0 ขึ้นที่อุณหภูมิ T_1 ในขณะที่ลดอุณหภูมิลงไปเรื่อยๆ นั้นสัดส่วนโมลของตัวถูกละลายในของแข็งจะมีค่าสม่ำเสมอและแปรตามเส้นโซลิดัส ส่วนสัดส่วนโมลของตัวถูกละลายในของเหลวมีค่าสม่ำเสมอและแปรตามเส้นลิควิดัส เช่นที่อุณหภูมิ T_2 เฟสของแข็งก็จะมีโมลของตัวถูกละลาย X_S ส่วนเฟสของเหลวก็จะมีโมลของตัวถูกละลาย X_L และเนื่องจากเป็นการแข็งตัวในทิศทางเดียว ดังนั้นอะตอมของตัวถูกละลายในพื้นที่แรกๆ ในภาพที่ 10 จึงเท่ากันในเฟสของแข็งและของเหลวเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงถึงอุณหภูมิ T_3 เฟสของเหลวสุดท้ายจะมีโมลของตัวถูกละลาย X_0/k และเฟสของแข็งจะมีส่วนผสม X_0 ตลอดทั้งความยาวท่อ โดยในภาพที่ 10 จะแสดงความเข้มข้นของโมลตัวถูกละลาย (X) เทียบกับระยะบนท่อ (x)



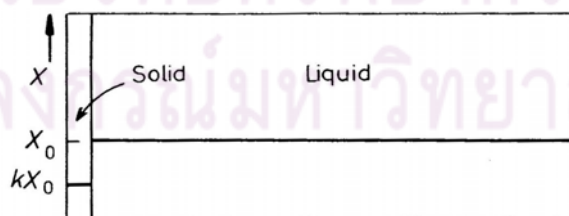
ภาพที่ 10 กระบวนการแข็งตัวในทิศทางเดียวของโลหะผสมซึ่งแสดงข้อมูลลักษณะจำเพาะของส่วนผสมที่อุณหภูมิ T_2 ตามภาพที่ 9 [15]

2.1.3.2 กระบวนการแข็งตัวตามแบบจำลองของ Scheil-Gulliver

บ่อยครั้งที่อัตราการเย็นตัว (Cooling Rate) เร็วมากจนไม่มีเวลาให้อะตอมในเฟสของแข็งเกิดการแพร่ได้ทัน จึงต้องใช้กระบวนการแข็งตัวตามแบบจำลองของ Scheil-Gulliver มาอธิบายแทน ซึ่งจะสมมติให้ไม่มีการแพร่เกิดขึ้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวมีส่วนผสมเอกพันธ์ (Homogeneous Composition) โดยถ้าสมมติให้โลหะผสมที่มีส่วนผสม X_0 มีการแข็งตัวในทิศทางเดียว เย็นตัวถึงอุณหภูมิ T_1 ดังแสดงในภาพที่ 11 จะเกิดเฟสของแข็งที่มีอะตอมตัวถูกละลายเข้มข้น kX_0 ซึ่ง $kX_0 < X_0$ ดังนั้นเฟสของแข็งจึงมีความบริสุทธิ์มากกว่าเฟสของเหลวเนื่องจากอะตอมตัวถูกละลายในเฟสของแข็งจะถูกผลักไปอยู่ในเฟสของเหลว ทำให้เฟสของเหลวมีอะตอมตัวถูกละลายเข้มข้นกว่า X_0 ดังแสดงในภาพที่ 12



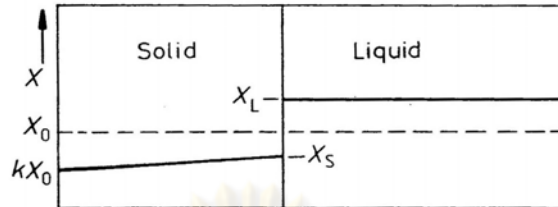
ภาพที่ 11 แผนภูมิเฟสสมมติที่ไม่มี การแพร่เกิดขึ้นในเฟสของแข็ง [15]



ภาพที่ 12 ข้อมูลลักษณะจำเพาะของส่วนผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_1 เล็กน้อย [15]

อุณหภูมิของผิวสัมผัสระหว่างเฟสของแข็งและของเหลวจะต้องลดต่ำกว่าอุณหภูมิ T_1 จึงจะเกิดกระบวนการแข็งตัวต่อได้ ซึ่งเฟสของแข็งใหม่ที่เกิดขึ้นก็จะบริสุทธิ์ยิ่งขึ้น (มีอะตอมของตัวถูกละลายน้อยลง) เมื่อเวลาผ่านไปเฟสของเหลวก็จะมีอะตอมของตัวถูกละลาย

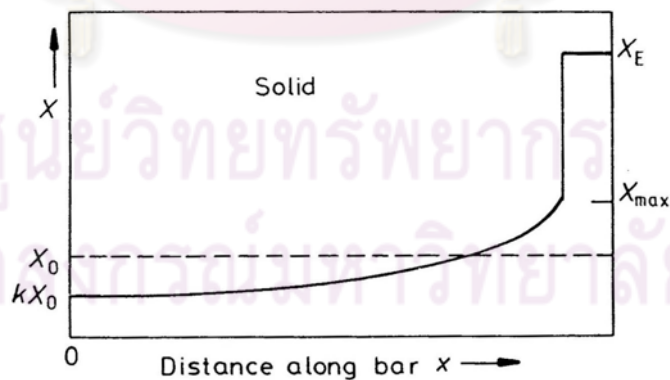
เข้มข้นขึ้น และกระบวนการแข็งตัวก็จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิที่ต่ำลงเรื่อยๆ ซึ่งข้อมูลลักษณะจำเพาะของส่วนผสม ณ อุณหภูมิ T_2 แสดงได้ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ข้อมูลลักษณะจำเพาะของส่วนผสมที่อุณหภูมิ T_2 [15]

ในระหว่างกระบวนการแข็งตัวตามแบบจำลองของ Scheil-Gulliver จะเกิดสภาวะสมดุลเฉพาะที่ (Local Equilibrium) ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างเฟสของแข็งและเฟสของเหลว แต่เนื่องจากการแพร่เกิดขึ้นในเฟสของแข็งทำให้เกิดการแยกชั้นของเฟสของแข็งที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายแตกต่างกัน ซึ่งค่าเฉลี่ยส่วนผสมของเฟสของแข็ง (\bar{X}_S) จะต่ำกว่าส่วนผสมที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างเฟสของแข็งและเฟสของเหลวเสมอ ดังแสดงได้ตามเส้นประในภาพที่ 11

กระบวนการแข็งตัวจะไปสิ้นสุดที่อุณหภูมิมุทเคติก ซึ่งจะเกิดเฟสของแข็งที่มีส่วนผสมมุทเคติกขึ้น และเฟสของแข็งสุดท้ายจะมีส่วนผสมที่กระจายตัวตลอดความยาวท่อแสดงในภาพที่ 14 โดยมี $\bar{X}_S = X_0$



ภาพที่ 14 ข้อมูลลักษณะจำเพาะของส่วนผสมที่อุณหภูมิมุทเคติก [15]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาเรื่องการเชื่อมโดยใช้ลวดบัดกรีอ่อนปลอดตะกั่ว ลวดบัดกรีอ่อนในระบบต่างๆได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อหาส่วนผสมที่ให้สมบัติในด้านต่างๆที่ดีที่สุด ลวดบัดกรีอ่อนประเภทหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์คือ ลวดบัดกรีอ่อนในระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง (Sn-Ag-Cu) [16] โดย Zhu et al. [17] ได้วิจัยเปรียบเทียบสมบัติของลวดบัดกรีอ่อนระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง กับลวดบัดกรีอ่อนผสมตะกั่วระบบดีบุก-ตะกั่ว (Sn-Pb) พบว่า ลวดบัดกรีอ่อนปลอดตะกั่วระบบดีบุก-เงิน-ทองแดงมีสมบัติการต้านทานแรงดึงใกล้เคียงกับลวดบัดกรีอ่อนผสมตะกั่วระบบดีบุก-ตะกั่ว ซึ่งถือว่ามีสมบัติทางกลที่ดีและเหมาะสมกับการใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ แต่ลวดบัดกรีอ่อนในระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง ก็ยังมีข้อด้อยคือ มีจุดหลอมเหลวสูงถึง 217°C [18] สูงกว่าลวดบัดกรีอ่อนผสมตะกั่วระบบดีบุก-ตะกั่วซึ่งมีจุดหลอมเหลว 183°C นอกจากนั้น Pan et al. [19] ยังพบว่าลวดบัดกรีอ่อนปลอดตะกั่วระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง ยังมีค่าความต้านทานความเค้นแรงเฉือนต่ำกว่าลวดบัดกรีอ่อนผสมตะกั่วระบบดีบุก-ตะกั่ว ซึ่งเป็นผลมาจากสภาพเปื่อยก็ได้ที่ไม่ดีนั่นเอง ดังนั้นนักวิจัยหลายท่านจึงพยายามหาธาตุบางชนิดที่จะเติมเข้าไปในลวดบัดกรีอ่อนในระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านจุดหลอมเหลวและสมบัติทางกลของลวดบัดกรีอ่อนให้ดียิ่งขึ้น Zhao et al. [8] ได้ศึกษาผลของการเติมบิสมัท (Bi) ลงในลวดบัดกรีอ่อนในระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง พบว่าบิสมัทจะช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึง แต่การยืดตัว (Elongation) ก็จะลดลง ส่วน Ohnuma [20] ได้พบว่าบิสมัทจะช่วยทำให้อุณหภูมิวิกฤตของลวดบัดกรีอ่อนลดต่ำลงได้ แต่ก็จะทำให้ช่วงการแข็งตัวกว้างมากขึ้นด้วยเมื่อปริมาณของบิสมัทที่เติมสูงขึ้น ซึ่งช่วงการแข็งตัวที่กว้างก็จะส่งผลให้เกิดความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ขึ้นภายในรอยเชื่อม ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญหนึ่งที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเติมปริมาณบิสมัทอย่างเหมาะสม

นอกเหนือจากบิสมัทแล้ว อินเดียม (In) ก็เป็นอีกธาตุหนึ่งที่ได้รับการยอมรับว่าสามารถปรับปรุงสมบัติของลวดบัดกรีอ่อนในระบบดีบุก-เงิน-ทองแดงได้ โดยจากผลการวิจัยของ Chew and Pang [21] พบว่าอินเดียม สามารถลดอุณหภูมิวิกฤตของลวดบัดกรีอ่อนให้ต่ำลงได้ แต่ก็ทำให้ช่วงการแข็งตัวกว้างมากขึ้นเช่นเดียวกันกับการเติมบิสมัท นอกจากนั้น Chew and Pang ยังพบว่า การเติมอินเดียมจะไม่ทำให้สมบัติทางกลและความต้านทานความล้าของลวดบัดกรีอ่อนต่ำลง ในส่วนของสภาพเปื่อยก็ได้ Peng and Liu [9] พบว่าทั้งบิสมัทและ อินเดียมช่วยทำให้อุณหภูมิของลวดบัดกรีอ่อนมีสภาพเปื่อยได้ดีขึ้น ซึ่งก็สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bukat et al. [22] ในปี 2008 ที่ใช้หลักการทางสถิติเข้ามาศึกษาผลของการเติมบิสมัทต่อสภาพเปื่อยได้ของลวดบัดกรีอ่อน

สภาพเปียกได้เป็นสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของลวดบัดกรีอ่อน ซึ่งสมบัตินี้สามารถชี้วัดได้จากหลายค่า อาทิ ค่ามุมสัมผัส (Contact Angle) ระหว่างผิวสัมผัสของโลหะพื้นกับลวดบัดกรีอ่อน ค่าแรงตึงผิว (Surface Tension) เวลาในการเปียก (Wetting Time) แรงในการเปียก (Wetting Force) หรือพื้นที่ในการเชื่อมติด (Spreading Area) โดยค่าแรงตึงผิวของลวดบัดกรีอ่อนเป็นดัชนีที่ถูกนำมาใช้เพื่อบ่งบอกถึงสภาพเปียกได้มากที่สุด เนื่องจากสามารถทำการคำนวณได้จากข้อมูลทางอุณหพลศาสตร์ของลวดบัดกรีอ่อนระบบหนึ่งๆโดยใช้สมการของ Butler [23] ซึ่งจากผลการศึกษาของ Moser et al. [24-26] พบว่า การเติมบิสมีทและอินเดียมจะช่วยทำให้ลวดบัดกรีอ่อนมีค่าแรงตึงผิวลดลง หรือก็คือลวดบัดกรีอ่อนมีสภาพเปียกได้ที่ดีขึ้น ซึ่งผลจากการคำนวณนี้ก็สอดคล้องกับการทดลองวัดค่ามุมสัมผัส เวลาในการเปียก และแรงในการเปียกที่วัดได้จากห้องปฏิบัติการ

ด้วยข้อจำกัดในการวัดค่าสมบัติในด้านต่างๆทางโลหวิทยา ที่ต้องใช้เวลาและยากในการเตรียมการทดลองและการวัด ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่านพยายามนำเอาวิธีการทางคอมพิวเตอร์ในรูปแบบต่างๆเข้ามาใช้เพื่อช่วยทำนายสมบัติของวัสดุในด้านต่างๆ หรือใช้หาความสัมพันธ์ของสมบัติของวัสดุจากข้อมูลที่มีอยู่เดิม Brezocnik, Balic และ Kuzman ก็เป็นกลุ่มหนึ่งที่พยายามนำเอาหลักการทางคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพมาใช้กับงานทางด้านวัสดุศาสตร์ โดยพวกเขาได้นำเอาหลักการของกำหนดการเชิงพันธุกรรมเข้ามาใช้ในการทำนายสมบัติความเค้นการไหล (Flow Stress) ของโลหะในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป [27, 28] รวมทั้งนำไปใช้เพื่อทำนายความสามารถในการตัดโค้งโลหะแผ่น [29] ส่วน Zakeri, Bahrami และ Mousavi ก็นำเอาหลักขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเข้ามาใช้หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการอบชุบทางความร้อน (Heat Treatment) เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) [30] โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neuron Network) ก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งทางคอมพิวเตอร์ที่ถูกนำมาใช้ในงานทางวัสดุศาสตร์ โดยในปี 2004 Picha, Vrestal และ Kroupa ได้นำโครงข่ายประสาทเทียมเข้ามาช่วยในการคำนวณค่าแรงตึงผิวของลวดบัดกรีอ่อน [31] ซึ่งสามารถปรับปรุงให้คำตอบที่ได้จากสมการของ Butler มีความถูกต้องมากขึ้น นอกจากนั้นในปี 2008 งานวิจัยของ Pirge et al. [32] ยังนำหลักการของขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการเข้ามาใช้เพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของโลหะจำรูป (Shape Memory Alloys) ในระบบ Ni-Mn-Ga

งานวิจัยนี้จึงมุ่งหวังที่จะนำเอาหลักการทางคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพนี้เข้ามาช่วยในการพัฒนาส่วนผสมของลวดบัดกรีอ่อนปลอดตะกั่วที่มีสมบัติในด้านต่างๆที่เหมาะสม เพื่อจะนำไปใช้ทดแทนลวดบัดกรีอ่อนในระบบเดิมที่กำลังจะถูกพิจารณาให้ยกเลิกการใช้งานจากผลเสียของธาตุตะกั่วที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

บทที่ 3

ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์

การหาค่าเหมาะสมที่สุดเป็นวิธีการที่ใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาภายใต้เงื่อนไขหรือข้อจำกัดที่กำหนดขึ้น โดยสามารถแบ่งปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดออกเป็น 2 รูปแบบตามการพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบวัตถุประสงค์เดียว (Single Objective Optimization Problem) และปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization Problem)

3.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด จะมีเกณฑ์ที่ใช้ในการคำนวณค่าเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยที่เกณฑ์นี้จะเป็นตัวกำหนดเป้าหมายในการค้นหาคำตอบว่าเป็นไปในลักษณะใด ซึ่งจะเรียกเกณฑ์นี้ว่า ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยมากฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะเกี่ยวข้องกับการหาค่ามากที่สุด (Maximization) หรือน้อยที่สุด (Minimization) ของปัญหาหนึ่งๆ

3.2 ตัวแปรตัดสินใจ

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable) คือตัวแปรที่สามารถใช้ในการปรับเปลี่ยนหรือควบคุมขั้นตอนในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแล้วทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เปลี่ยนแปลงได้ โดยทั่วไปแล้วปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดมักเกี่ยวข้องกับหลายตัวแปรตัดสินใจ ดังนั้นสิ่งสำคัญคือการคัดเลือกตัวแปรตัดสินใจที่ส่งผลต่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากที่สุด

3.3 ข้อจำกัด

หลังจากที่ได้มีการเลือกตัวแปรตัดสินใจของปัญหาได้แล้ว จะพบว่าตัวแปรตัดสินใจจะต้องมีความสอดคล้องกับข้อเท็จจริงต่างๆทางกายภาพ ทางเคมี หรืออื่นๆของระบบ โดยอาจกำหนดเป็นข้อจำกัดทางด้านทรัพยากร วัตถุประสงค์ หรือเวลา เป็นต้นแล้วแต่กรณี สิ่งเหล่านี้จะเรียกว่าเป็นข้อจำกัด (Constraints) ในปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด ซึ่งข้อจำกัดนี้จะต้องอยู่ในความเป็นไปได้ของคำตอบที่สามารถยอมรับได้ ซึ่งสามารถเขียนข้อจำกัดในรูปของสมการ (Equality Constraints) หรืออสมการ (Inequality Constraints) ก็ได้

3.4 รูปแบบปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์

การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ เป็นการค้นหาเซตคำตอบภายในพื้นที่ของคำตอบที่เป็นไปได้เพื่อต้องการหาค่าที่ต่ำที่สุด หรือค่าสูงที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในแต่ละวัตถุประสงค์พร้อมๆกัน ดังสมการที่ 2 โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาคือเซตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด

$$f(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})]^T \quad (2)$$

ดังนั้นรูปแบบปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะเป็นการค้นหาเวกเตอร์คำตอบ \vec{x}^* ตามสมการที่ 3

$$\vec{x}^* = [\bar{x}_1^*, \bar{x}_2^*, \dots, \bar{x}_n^*]^T \quad (3)$$

ภายใต้ m ข้อจำกัดแบบสมการ ดังสมการที่ 4 หรือได้ p ข้อจำกัดแบบสมการ ดังสมการที่ 5

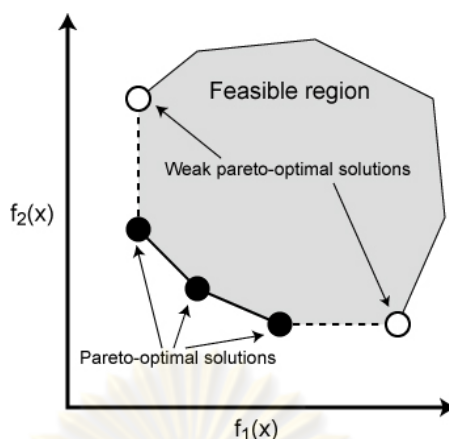
$$g_i(\vec{x}) \geq 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (4)$$

$$h_i(\vec{x}) = 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, p \quad (5)$$

ข้อจำกัดในสมการที่ 4 และ 5 จะเป็นการกำหนดขอบเขตพื้นที่คำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Region: Ω) และทุกๆจุดในขอบเขตพื้นที่คำตอบที่เป็นไปได้อีกคือ คำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Solution) โดยที่เวกเตอร์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้นี้ จะทำการค้นหาคำตอบในเซต Ω ให้กลายเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดภายใต้ค่าที่เป็นไปได้ทั้งหมดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มี k วัตถุประสงค์ และมี \vec{x}^* แทนคำตอบที่ดีที่สุด

3.5 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด

เมื่อได้ขอบเขตพื้นที่คำตอบที่เป็นไปได้แล้ว ถ้าพบว่าคำตอบที่ได้ในพื้นที่คำตอบที่เป็นไปได้ เป็นคำตอบที่ไม่มีคำตอบใดดีกว่า หรือไม่มีคำตอบใดที่สามารถครอบงำ (Dominate) ชุดคำตอบนี้ได้ จะเรียกรวมคำตอบนี้ว่า กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal) และเรียกสมาชิกคำตอบทุกคำตอบที่อยู่ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดว่า เซตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Set) หรือเซตคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำจากทุกคำตอบ (Non-Dominated Set) ซึ่งเซตคำตอบนี้จะใช้ในการกำหนดพื้นที่ขอบเขตคำตอบ และเรียกว่า ขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Frontier) หรือขอบเขตของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำจากทุกคำตอบ (Non-Dominated Frontier) ภาพที่ 15 แสดงแนวคิดของขอบเขตพื้นที่คำตอบที่เป็นไปได้และขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด



ภาพที่ 15 ขอบเขตพื้นที่คำตอบที่เป็นไปได้และขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด

สำหรับเป้าหมายของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์คือการระบุเซตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่หาได้ให้ใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง (True Pareto Optimal) และเซตกลุ่มคำตอบเหล่านี้ควรมีการกระจายสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) ตลอดขอบเขตกลุ่มคำตอบ

3.6 การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการ

ขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถค้นหาคำตอบแบบหลายจุดพร้อมกัน แก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และใช้ได้อย่างกว้างขวางกับทุกปัญหาการหาค่าความเหมาะสมที่สุด [33] โดยทั่วไปแล้วการหาค่าตอบในปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์จะเกี่ยวข้องกับสองเป้าหมาย เป้าหมายแรกคือ การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-based Fitness Assignment) ซึ่งจะใช้เป็นแนวทางในการค้นหาขอบเขตกลุ่มคำตอบ เป้าหมายที่สองคือ วิธีการประมาณความหนาแน่นของประชากรคำตอบ (Population Density) เพื่อใช้รักษาความหลากหลาย (Diversity) ให้กับคำตอบ ทำให้ลักษณะการกระจายของคำตอบบนขอบเขตกลุ่มคำตอบมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งกลุ่มคำตอบ ไม่เกาะอยู่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง

วิธีการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ที่เป็นที่ยอมรับในความสามารถในการหาคำตอบ วิธีหนึ่งคือ การหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Multi-Objective Genetic Algorithms) ซึ่งเป็นวิธีที่อ้างอิงมาจากการหา

ค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการ (Multi-Objective Evolutionary Algorithms: MOEAs) และได้มีการพัฒนาเป็นขั้นตอนวิธี (Algorithms) ต่างๆ ได้แก่

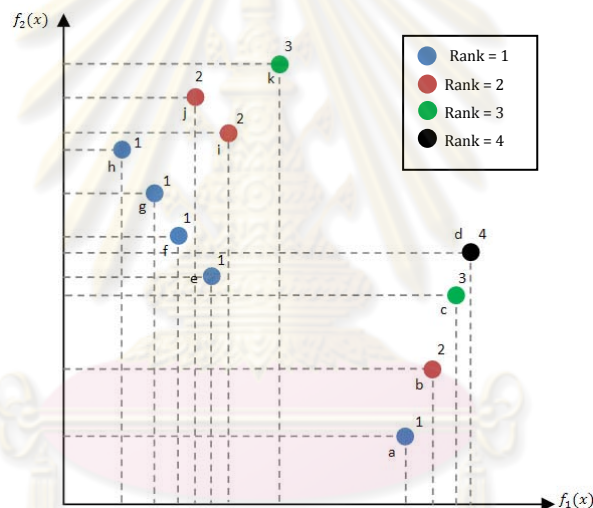
- MOGA: Multi-Objective Genetic Algorithm [34]
- NSGA: Non-dominated Sorting Genetic [35]
- SPEA: Strength Pareto Evolutionary Algorithm [36]
- SPEA 2: Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2 [37]
- NSGA-II: Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II [38]
- RDGA: Rank Density Genetic Algorithm [39]

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ตามขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ 2 (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II: NSGA-II) เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถแก้ปัญหาในกรณีที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีความไม่ต่อเนื่อง หรือเป็นปัญหาที่ให้คำตอบที่มีลักษณะของขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดแบบไม่โค้งงอ (Non-Convex Pareto-Optimal Region) และสามารถให้กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่มีลักษณะกระจายตัว ไม่เกาะกลุ่มกัน ซึ่งรายละเอียดการกำหนดค่าความแข็งแรง และการกำหนดความหนาแน่นของวิธี NSGA-II มีดังต่อไปนี้

3.6.1 การกำหนดค่าความแข็งแรง

สิ่งสำคัญในการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ในปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์คือ ต้องมีการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสมาชิกของกลุ่มประชากรแต่ละตัวอย่างเหมาะสม และสอดคล้องกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งในวิธี NSGA-II จะกำหนดค่าความแข็งแรงแบบวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยวิธีนี้จะใช้การจัดลำดับแบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) ในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟังก์ชันจุดประสงค์และค่าความแข็งแรง โดยใช้หลักการของการครอบงำพาเรโต (Pareto Dominance) เพื่อกำหนดค่าความแข็งแรง หรือใช้ความน่าจะเป็นในการเลือกคำตอบ ซึ่งประชากรจะถูกจัดลำดับตามหลักกฎการครอบงำ (Dominance Rule) แต่ละคำตอบถูกกำหนดค่าความแข็งแรงภายใต้พื้นฐานลำดับคำตอบ ซึ่งไม่ใช่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์จริง หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness Value) นั่นเอง เปรียบเสมือนการแยกกลุ่มคำตอบโดยใช้ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงเป็นตัวกำหนด นอกจากนี้สมาชิกคำตอบที่มีลำดับเดียวกันจะถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มคำตอบเดียวกัน ซึ่งถือว่าสมาชิกคำตอบนี้จะมีโอกาสหรือมีความน่าจะเป็นที่เท่าเทียมกันในการที่จะถูกเลือกไปดำเนินการให้เกิดผลเฉลยใหม่

สำหรับวิธีการกำหนดค่าความแข็งแรงแบบนี้ จะทำให้มีคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา มากกว่าหนึ่งคำตอบ และอยู่ในรูปแบบที่เป็นเซตหรือกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด วิธีการกำหนดค่าความแข็งแรงที่ใช้วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดมีอยู่หลายวิธี แต่วิธีที่ใช้สำหรับขั้นตอนวิธี NSGA-II เรียกว่าวิธีการจัดลำดับผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-Dominated Sorting) หรือการจัดลำดับของ Goldberg (Goldberg's Ranking) [40] แนวคิดพื้นฐานของเทคนิคนี้ คือการจัดลำดับเซตของผลเฉลยในประชากรผลเฉลยทั้งหมด โดยจะพิจารณาผลเฉลยที่ไม่มีผลเฉลยใดดีกว่าเซตผลเฉลยนี้เป็นลำดับแรก และมีลำดับ (Rank) เป็นลำดับที่หนึ่ง จากนั้นจะถูกตัดออกจากการพิจารณาของประชากรผลเฉลยทั้งหมด เซตของผลเฉลยที่เหลือจะถูกจัดให้เป็นลำดับต่อมา โดยที่กระบวนการหาผลเฉลยที่ดีที่สุดของเทคนิคนี้จะค้นหาจนกระทั่งผลเฉลยในประชากรผลเฉลยทั้งหมดถูกจัดลำดับ แสดงได้ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 วิธีการจัดลำดับผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ

จากภาพที่ 16 จะเห็นได้ว่าสมาชิกประชากรผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำจากคำตอบอื่น จะถูกจัดให้มีลำดับที่หนึ่ง จากนั้นจะไม่พิจารณาสมาชิกดังกล่าวชั่วคราว เพื่อกำหนดลำดับให้สมาชิกประชากรผลเฉลยที่เหลืออยู่ โดยถ้าสมาชิกประชากรผลเฉลยนั้นไม่ถูกครอบงำจากผลเฉลยอื่นจะถูกจัดลำดับที่ให้เป็นลำดับต่อมา และพิจารณาไปเรื่อยๆจนครบสมาชิกผลเฉลยทุกผลเฉลย โดยเริ่มต้นจากสมาชิกตัวที่แข็งแรงที่สุดจนถึงสมาชิกตัวที่มีความอ่อนแอที่สุด

3.6.2 การกำหนดความหนาแน่น

ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์นั้น มีเป้าหมายเพื่อให้ได้ขอบเขตกลุ่มผลเฉลยที่ดีที่สุด และมีลักษณะรูปแบบการกระจายของเซตผลเฉลยบน

ขอบเขตกลุ่มผลเฉลยที่ดีที่สุดแบบสม่ำเสมอ เนื่องจากหากสมาชิกผลเฉลยที่อยู่บนขอบเขตผลเฉลยเดียวกันมีการเกาะกลุ่มกันอยู่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง จะส่งผลให้บริเวณอื่นๆไม่มีสมาชิกผลเฉลยอยู่เลย ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การลอยเลื่อนทางพันธุกรรม (Genetic Drift) ดังนั้นจึงต้องอาศัยเทคนิคที่เรียกว่า วิธีการสร้างความหลากหลายให้กับประชากรคำตอบ ซึ่งจัดว่าเป็นการกำหนดความหนาแน่นให้กับประชากรผลเฉลยหรือ การแบ่งปันค่าความแข็งแรง (Fitness Sharing) เพื่อลดทอนค่าความแข็งแรงของสมาชิกผลเฉลยที่เกาะอยู่เป็นกลุ่ม ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนสมาชิกที่เกาะบริเวณผลเฉลยนั้น

ระยะห่างความหนาแน่น (Crowding Distance) เป็นเทคนิคหนึ่งที่มีความสามารถในการทำให้ประชากรผลเฉลยบนขอบเขตกลุ่มผลเฉลยที่ดีที่สุดมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้นและนำมาใช้ในขั้นตอนวิธี NSGA-II โดยคำนวณระยะห่างระหว่างสมาชิกประชากรผลเฉลยที่อยู่ในส่วนหน้า (Front) เดียวกันเท่านั้น ขั้นตอนการคำนวณระยะห่างความหนาแน่นแสดงได้ดังนี้

- **ขั้นตอนที่ 1** ถ้าสมาชิกประชากรผลเฉลยมีลำดับเท่ากันแล้วให้คำนวณขั้นตอนที่ 2 และ 3 ดังนี้

- **ขั้นตอนที่ 2** กำหนดให้ l แทนจำนวนประชากรผลเฉลยทั้งหมดในส่วนหน้าที่ j เมื่อ $j = 1, \dots, R$ และ $x_{[i,k]}$ แทน สมาชิกประชากรผลเฉลยที่ i ในวัตถุประสงค์ k ที่ได้รับการเรียงลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากน้อยไปมาก โดยสมาชิกประชากรผลเฉลยที่มีลำดับที่ 1 (ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยสุด) และลำดับสุดท้าย (ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากที่สุด) จะถูกกำหนดให้มีระยะห่างความหนาแน่นเป็นค่ามากๆ เข้าใกล้อนันต์ นั่นคือ $cd_k(x_{[1,k]}) = \infty$ และ $cd_k(x_{[l,k]}) = \infty$ ส่วนสมาชิกประชากรผลเฉลยรายการเรียงลำดับที่ 2 ถึงลำดับที่ $l-1$ จะคำนวณระยะห่างความหนาแน่นจากสมการที่ 6 โดยที่ f_k คือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของวัตถุประสงค์ k

$$cd_k(x_{[i,k]}) = \frac{f_k(x_{[i+1,k]}) - f_k(x_{[i-1,k]})}{f_k^{max} - f_k^{min}} \quad (6)$$

- **ขั้นตอนที่ 3** คำนวณผลรวมของระยะห่างความหนาแน่นทั้ง k ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จะได้ว่า $cd(x) = \sum cd_k(x)$ นั่นคือค่าระยะห่างความหนาแน่นของสมาชิกผลเฉลยนั้นๆ โดยค่านี้จะแสดงถึงระยะห่างระหว่างจุดที่อยู่ต่อเนื่องกันบนผลเฉลยใน Front เดียวกัน ค่าระยะห่างความหนาแน่นน้อยจะแสดงให้เห็นถึงกลุ่มผลเฉลยใน Front นั้นมีการเกาะกลุ่มกัน ส่วนค่าระยะห่างความหนาแน่นมากจะแสดงให้เห็นว่ากลุ่มผลเฉลยใน Front มีการกระจายตัว

3.7 ขั้นตอนการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับผลเฉลี่ยที่ไม่ถูกครอบงำ 2 (NSGA-II)

กำหนดให้ในรุ่นที่ t

P_t แทน ประชากรผลเฉลี่ยต้นแบบ

Q_t แทน ประชากรผลเฉลี่ยใหม่

R_t แทน ประชากรผลเฉลี่ยต้นแบบรวมกับผลเฉลี่ยใหม่

- ขั้นตอนที่ 1 สร้างประชากรผลเฉลี่ยเบื้องต้นอย่างสุ่ม P_t จำนวน N ประชากร

- ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรผลเฉลี่ยเบื้องต้น

- ขั้นตอนที่ 3 กำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสมาชิกประชากรผลเฉลี่ยด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด ตามวิธีการจัดลำดับผลเฉลี่ยที่ไม่ถูกครอบงำ โดยในขั้นตอนนี้จะทำให้ได้ขอบเขตกลุ่มผลเฉลี่ยที่ดีที่สุดออกมาหลายกลุ่มตามค่าความแข็งแรงที่ไม่แท้จริง

- ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่าระยะห่างความหนาแน่นตามสมการที่ 6 เพื่อใช้เป็นตัววัดความแตกต่างของประชากรคำตอบที่มีลำดับเดียวกัน หรืออยู่บนเส้นขอบเขตกลุ่มผลเฉลี่ยเดียวกัน โดยสมาชิกประชากรผลเฉลี่ยที่มีค่าระยะห่างความหนาแน่นมากจะมีโอกาสได้รับการคัดเลือกเข้าสู่สถานที่ผสมพันธุ์ (Mating Pool) มาก

- ขั้นตอนที่ 5 คัดเลือกคำตอบเข้าสู่สถานที่ผสมพันธุ์ด้วยวิธีการคัดเลือกแบบแข่งขันทีละคู่ (Binary Tournament Selection) วิธีนี้จะใช้การแข่งขันของประชากรผลเฉลี่ย 2 ตัว โดยประชากรผลเฉลี่ยใดที่มีค่าความแข็งแรงที่ไม่แท้จริงน้อยกว่า จะได้รับเลือกเข้าสู่สถานที่ผสมพันธุ์ และในกรณีที่พบว่าผลเฉลี่ยทั้งสองนั้นมีค่าความแข็งแรงเท่ากัน จะพิจารณาให้ประชากรผลเฉลี่ยที่มีค่าระยะห่างความหนาแน่นมากกว่าได้รับเลือกเข้าสู่สถานที่ผสมพันธุ์

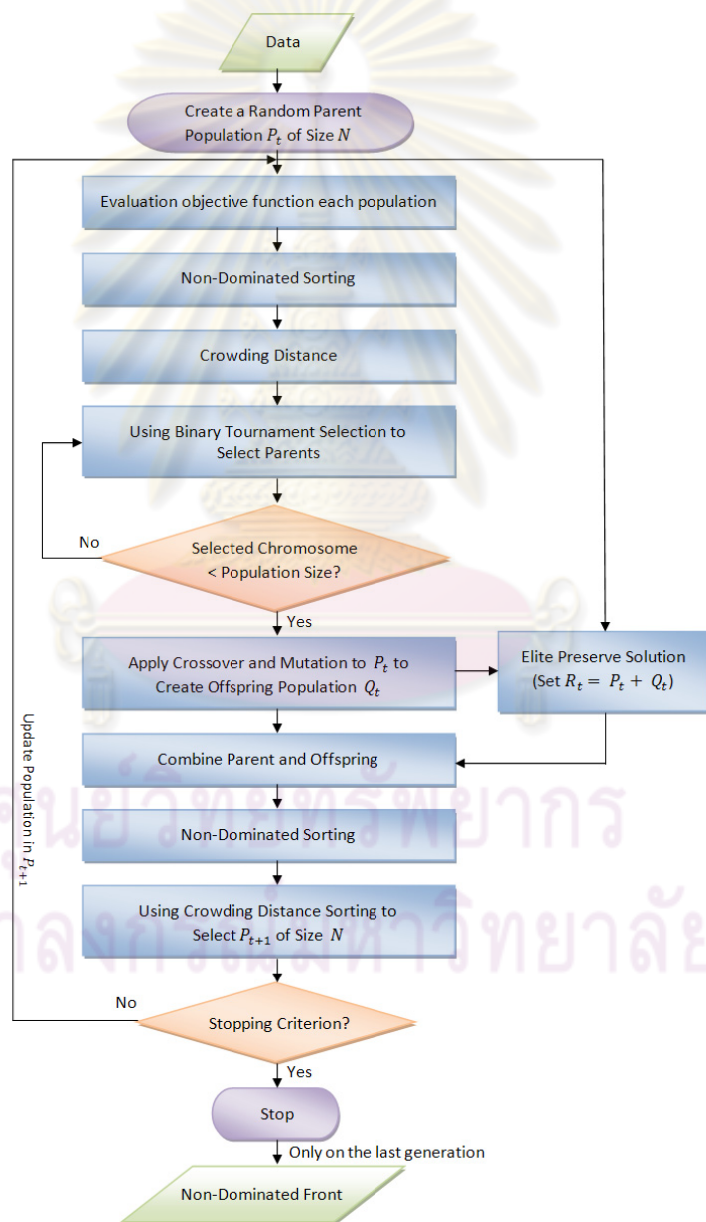
- ขั้นตอนที่ 6 ใช้ตัวดำเนินการทางพันธุกรรมอย่างการไขว้ไปเปลี่ยนและการกลายพันธุ์ในการสร้างประชากรผลเฉลี่ยใหม่ จากประชากรผลเฉลี่ย P_t จำนวน N ประชากร

- ขั้นตอนที่ 7 รวมประชากรผลเฉลี่ยต้นแบบและประชากรผลเฉลี่ยใหม่เป็นประชากรใน R_t ซึ่งจะทำให้มีประชากรผลเฉลี่ยทั้งหมดเท่ากับ $2N$

- ขั้นตอนที่ 8 คำนวณค่าความแข็งแรงด้วยวิธีการจัดลำดับผลเฉลี่ยที่ไม่ถูกครอบงำ และคำนวณระยะห่างความหนาแน่นให้กับประชากรผลเฉลี่ย R_t เพื่อคัดเลือกประชากรผลเฉลี่ยไปสู่ประชากรผลเฉลี่ยต้นแบบในรุ่นที่ $t + 1$ จำนวน N ประชากร โดยประชากรผลเฉลี่ยที่มีลำดับเป็นหนึ่ง (Rank = 1) จะได้รับโอกาสในการคัดเลือกไปเป็นผลเฉลี่ยในรุ่นที่ $t + 1$ เป็นลำดับแรก ส่วนในลำดับอื่นๆจะได้รับโอกาสลดหลั่นลงมา เมื่อพบว่าจำนวนผลเฉลี่ยในลำดับที่พิจารณาอยู่มี

มากกว่าจำนวนประชากรผลเฉลยที่เหลือที่จะนำไปเป็นประชากรผลเฉลยรุ่นที่ $t + 1$ จะใช้ระยะห่างความหนาแน่นในการคัดเลือก โดยประชากรผลเฉลยที่มี ระยะห่างความหนาแน่นน้อย จะถูกตัดออกไปและคัดเลือกจนครบจำนวน N ประชากร

- **ขั้นตอนที่ 9** ตรวจสอบว่าตรงกับเงื่อนไขการหยุด (Stopping Criteria) หรือไม่
- ถ้าไม่ตรงกับเงื่อนไขการหยุด จะทำการคัดเลือกประชากรผลเฉลยไปเป็นประชากรผลเฉลยต้นแบบในรุ่นที่ $t + 1$ (กลับไปขั้นตอนที่ 2)
- ถ้าตรงกับเงื่อนไขการหยุด จะนำผลเฉลยในรุ่นนี้ไปเป็นผลเฉลยสุดท้าย



ภาพที่ 17 ขั้นตอนการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ 2 (NSGA-II)

บทที่ 4

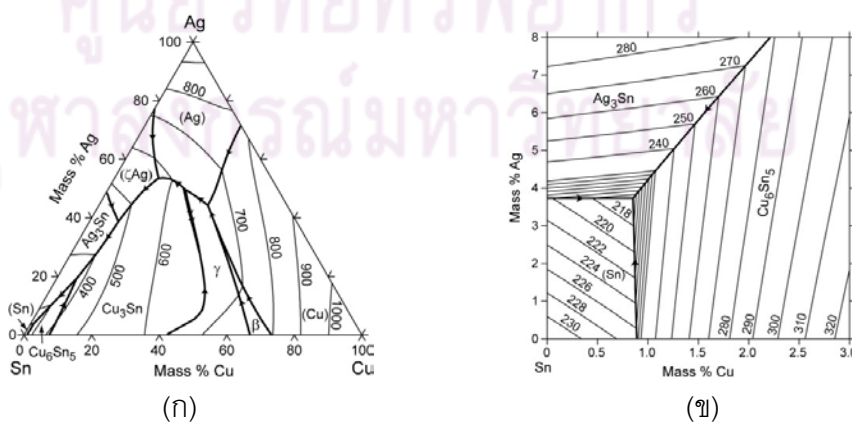
การคำนวณสมบัติของวัสดุและข้อมูลที่น่ามาใช้

ในการวิจัยเพื่อหาส่วนผสมของลวดบัดกรีอ่อนปลอดตะกั่วชนิดใหม่ที่มีสมบัติต่างๆที่ดีในงานเชื่อมและสามารถนำมาใช้เพื่อทดแทนลวดบัดกรีอ่อนผสมตะกั่วได้นั้นสนใจถึงสมบัติของวัสดุที่สำคัญใน 3 ด้าน คือ อุณหภูมิหลอมเหลว (อุณหภูมิที่เริ่มเกิดกระบวนการแข็งตัว) ช่วงการแข็งตัว และสภาพเป็ยกได้ โดยสมบัติด้านอุณหภูมิหลอมเหลวและช่วงการแข็งตัวของลวดบัดกรีอ่อนที่ส่วนผสมหนึ่งๆสามารถคำนวณได้จากหลักการทางอุณหพลศาสตร์ ส่วนสภาพเป็ยกได้ของลวดบัดกรีอ่อนสามารถทำนายได้จากค่าแรงตึงผิวที่คำนวณจากสมการของ Butler (Butler's Equation)

4.1 การคำนวณทางอุณหพลศาสตร์

อุณหภูมิที่เริ่มเกิดกระบวนการแข็งตัวและช่วงการแข็งตัวของลวดบัดกรีอ่อนสามารถคำนวณได้โดยใช้หลักการ Calculation of Phase Diagram (CALPHAD) [41] โดยใช้ข้อมูลทางอุณหพลศาสตร์ของธาตุต่างๆที่เป็นส่วนประกอบของลวดบัดกรีอ่อน CALPHAD เป็นหลักการที่ใช้การคำนวณค่าสมมูลระหว่างเฟสของโลหะในระบบหลายธาตุซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานอิสระเพื่ออธิบายถึงเฟสต่างๆของระบบวัสดุหนึ่งๆที่เกิดขึ้น ซึ่งมีคุณลักษณะที่สัมพันธ์กันระหว่างอุณหภูมิและส่วนผสมของระบบวัสดุนั้น

จากหลักการดังกล่าวทำให้สามารถศึกษาถึงเฟสต่างๆที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการแข็งตัวของลวดบัดกรีอ่อนในระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง (Sn-Ag-Cu) ได้จากผลการศึกษาพื้นผิวแนวการหลอมตัว (Liquidus Surface) ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 พื้นผิวแนวการหลอมตัวของลวดบัดกรีอ่อนในดีบุก-เงิน-ทองแดง [42]

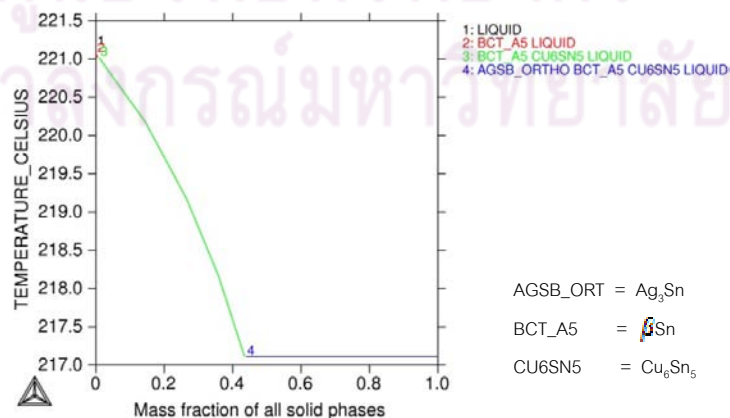
(ก) Calculated Liquidus Projection (ข) Sn-rich Part

โดยจะพบว่าที่อุณหภูมิ 217°C จะเกิดปฏิกิริยายูเทคติกหรือปฏิกิริยาที่เฟสของเหลวเปลี่ยนไปเป็นเฟสของแข็งตามสมการที่ 7



วิธีการดังกล่าวข้างต้นทำให้ทราบถึงอุณหภูมิที่ลวดบัดกรีอ่อนเริ่มแข็งตัว (เกิดเฟสของแข็ง) ชนิดและปริมาณของเฟสของแข็งที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิต่างๆที่เปลี่ยนแปลงไปได้ แต่หลักการดังกล่าวเป็นการคำนวณในสภาวะสมดุล ซึ่งในทางปฏิบัติอาจได้ผลที่คลาดเคลื่อนไปจากการคำนวณ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาถึงกระบวนการแข็งตัวในสภาวะที่ไม่สมดุล (Nonequilibrium Solidification) ตามแบบจำลองของ Scheil-Gulliver ที่สมมติให้เกิดสภาวะสมดุลเฉพาะที่ (Local Equilibrium) ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างเฟสของของเหลวกับเฟสของแข็ง ซึ่งจะทำให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจริงมากขึ้น [43]

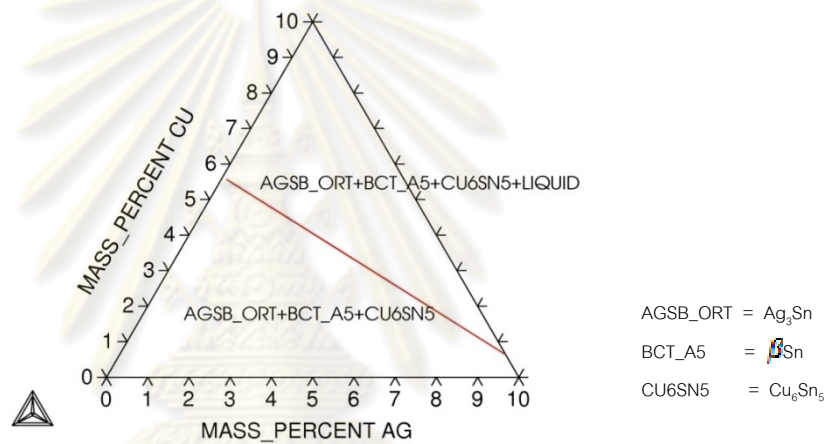
โดยในการคำนวณนั้นจะใช้การคำนวณตามหลักการ CALPHAD ผ่านทางโปรแกรม Thermo-Calc [44] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณทางอุณหพลศาสตร์ โดยจะใช้ร่วมกับฐานข้อมูล National Physical Laboratory Solder Solutions Database 2.1 (NSLD-II) ซึ่งเป็นฐานข้อมูลเฉพาะทางด้านอุณหพลศาสตร์สำหรับโลหะในกลุ่มลวดบัดกรีอ่อน ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างผลการคำนวณกระบวนการแข็งตัวตามแบบจำลองของ Scheil-Gulliver ของลวดบัดกรีอ่อน Sn-2Ag-0.75Cu ได้ดังภาพที่ 19 ซึ่งจากผลการคำนวณกระบวนการแข็งตัวจะทำให้ได้ข้อมูลที่สำคัญต่อการนำไปใช้ในการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ 2 ข้อมูลคือ อุณหภูมิลิควิดัส (Liquidus Temperature) และอุณหภูมิโซลิดัส (Solidus Temperature) โดยอุณหภูมิลิควิดัสคืออุณหภูมิที่จะเกิดเฟสของเหลวสมบูรณ์ ส่วนอุณหภูมิโซลิดัสคืออุณหภูมิที่เฟสของเหลวเปลี่ยนเป็นเฟสของแข็งทั้งหมด



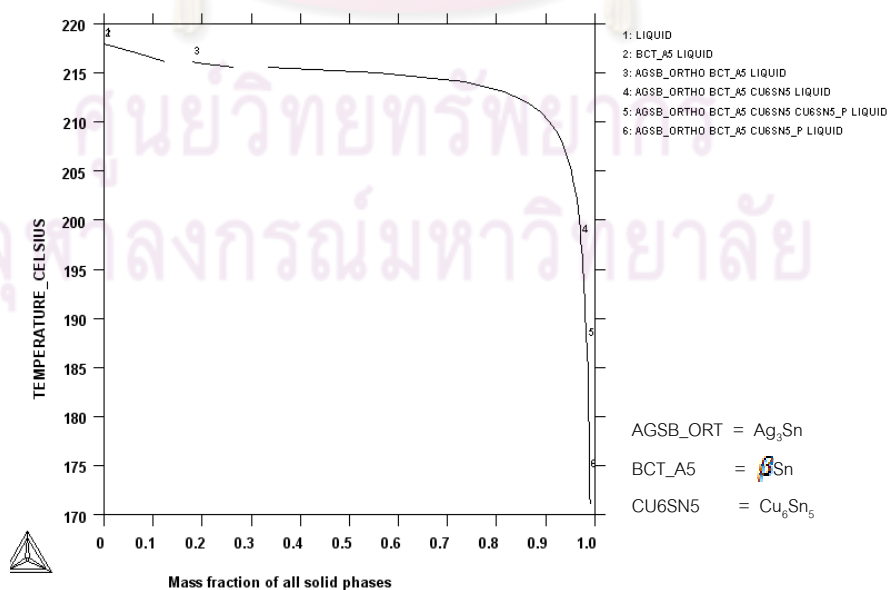
รูปที่ 19 ผลการคำนวณกระบวนการแข็งตัวของลวดบัดกรีอ่อน Sn-2Ag-0.75Cu

จากภาพที่ 19 พบว่าเฟสของเหลวจะเริ่มมีการเกิดผลึกของ βSn (BCT_A5) ที่อุณหภูมิ 221°C และสิ้นสุดกระบวนการแข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า (อุณหภูมิ 217°C) ดังนั้นลวดบัดกรีอ่อน Sn-2Ag-0.75Cu จะมีค่าอุณหภูมิลiquidus ที่ 221°C และมีค่าอุณหภูมิลiquidus ที่ 217°C

อีกตัวอย่างหนึ่งของการคำนวณกระบวนการแข็งตัวของลวดบัดกรีอ่อนในระบบ Sn-3Ag-0.5Cu-1Bi แสดงได้ดังภาพที่ 20 และภาพที่ 21 โดยภาพที่ 20 จะแสดงถึงการคำนวณแผนภูมิสามเฟส (Ternary Phase Diagram) ของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อน Sn-3Ag-0.5Cu-1Bi ในสภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิที่เริ่มเกิดปฏิกิริยาอุเทคติก และภาพที่ 21 แสดงการคำนวณกระบวนการแข็งตัวตามแบบจำลองของ Scheil-Gulliver ของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อน Sn-3Ag-0.5Cu-1Bi



ภาพที่ 20 แผนภูมิสามเฟสของลวดบัดกรีอ่อน Sn-3Ag-0.5Cu-1Bi ที่อุณหภูมิ 210°C



ภาพที่ 21 ผลการคำนวณกระบวนการแข็งตัวของลวดบัดกรีอ่อน Sn-3Ag-0.5Cu-1Bi

4.2 การคำนวณค่าแรงตึงผิวตามสมการของ Butler

สภาพเปียกได้ของลวดบัดกรีอ่อนเป็นสมบัติหนึ่งซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการเชื่อมและความแข็งแรงของรอยเชื่อม ซึ่งลวดบัดกรีอ่อนที่ดีควรจะสภาพเปียกได้ดี ซึ่งสภาพเปียกได้สามารถวัดได้ในหลายรูปแบบ อาทิ ค่ามุมสัมผัส (Contact Angle) ค่าแรงตึงผิว (Surface Tension) ค่าเวลาในการเปียก (Wetting Time) และค่าแรงในการเปียก (Wetting Force) ซึ่งแต่ละแบบก็จะมีรูปแบบการวัดค่าที่แตกต่างกันออกไป แรงตึงผิวเป็นรูปแบบหนึ่งที่สามารถใช้เพื่อบ่งบอกถึงสภาพเปียกได้ของลวดบัดกรีอ่อน โดยลวดบัดกรีอ่อนจะสามารถทำให้เปียกได้ดีขึ้น หากลวดบัดกรีอ่อนในส่วนผสมนั้นมีค่าแรงตึงผิวที่น้อย ส่วนลวดบัดกรีอ่อนที่มีค่าแรงตึงผิวสูงกว่าก็จะทำให้เปียกได้ยากกว่า

เนื่องจากในกระบวนการวัดค่าแรงตึงผิวนั้นต้องใช้เวลาที่นาน ประกอบกับความยากในการทดลอง ในปี ค.ศ. 1934 Butler [23] จึงได้เสนอแนวคิดในการคำนวณค่าแรงตึงผิวนี้โดยใช้หลักการทางอุณหพลศาสตร์ และให้ชื่อสมการของ Butler (Butler's Equation) โดยที่การคำนวณค่าแรงตึงผิวตามสมการของ Butler ของส่วนผสมหนึ่งๆของลวดบัดกรีอ่อน สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 8

$$\sigma = \sigma_i + \frac{RT}{A_i} \ln \frac{X_i^S}{X_i^B} + \frac{1}{A_i} (G_i^{E,S} - G_i^{E,B}) \quad (8)$$

$$\text{เมื่อ } \sum_{i=1}^n X_i^S = 1, \quad 0 \leq X_i^S \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

โดย σ = ค่าแรงตึงผิวของลวดบัดกรีอ่อน (mN/m)

σ_i = ค่าแรงตึงผิวของธาตุ i (mN/m)

A_i = พื้นที่ผิวต่อโมลของธาตุ i (m²)

X_i^S = สัดส่วนโมลของธาตุ i ในชั้นพื้นผิว

X_i^B = สัดส่วนโมลของธาตุ i ในเฟส Bulk

$G_i^{E,S}$ = พลังงาน Gibbs ส่วนเกิน ของธาตุ i ในชั้นพื้นผิว

$G_i^{E,B}$ = พลังงาน Gibbs ส่วนเกิน ของธาตุ i ในเฟส Bulk

i = ธาตุในส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อน (Sn, Ag, Cu, Bi, In)

n = จำนวนธาตุในส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อน

R = ค่าคงที่ของแก๊ส (J/mol/K)

T = อุณหภูมิ (K)

โดยที่ค่าพื้นที่ผิวต่อโมลของธาตุ i คำนวณได้จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ 9

$$A_i = 1.091N^{1/3} \left(\frac{M_i}{\rho_i} \right)^2 \quad (9)$$

โดย N = เลขอาโวกาโดร (Avogadro's number)

M_i = มวลของธาตุ i

ρ_i = ความหนาแน่นของธาตุ i

จากการสมมติให้มีความสมดุลระหว่างชั้นผิว (Surface Layer) กับเฟส Bulk ทำให้สามารถประมาณพลังงาน Gibbs ส่วนเกิน (Excess Gibbs Energy) ของธาตุ i ในชั้นผิว เป็นสัดส่วนของพลังงาน Gibbs ส่วนเกิน ของธาตุ i ในเฟส Bulk ได้ตามสมการที่ 10

$$G_i^{E,S} = \beta G_i^{E,B} \quad (10)$$

โดย $\beta = 0.75 - 0.83$

พลังงาน Gibbs ส่วนเกิน ของธาตุ i ในเฟส Bulk สามารถคำนวณได้จากหลักการทางอุณหพลศาสตร์ ตามสมการที่ 11 และสมการที่ 12 [45]

$$G_i^{E,B} = G^{E,B} + \sum_{j=2}^n (\delta_{ij} - X_j) \frac{\partial G^{E,B}}{\partial X_j} \quad (11)$$

โดย δ_{ij} = Kronecker's Symbol

($\delta_{ij} = 0$ เมื่อ $i \neq j$ และ $\delta_{ij} = 1$ เมื่อ $i = j$)

$$G^{E,B} = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n X_i X_j W_{ij} + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n X_i X_j X_k W_{ijk} \quad (12)$$

โดย W_{ij} = พารามิเตอร์อันตรกิริยา (Interaction Parameter) ของธาตุ i กับธาตุ j

W_{ijk} = พารามิเตอร์อันตรกิริยาของธาตุ i ธาตุ j และธาตุ k

นอกจากนี้ค่าค่าแรงตึงผิวของธาตุ i (σ_i) และค่าพารามิเตอร์อันตรกิริยา (W) ของลวดบัดกรีอ่อนระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง-บิสมัท-อินเดียม (Sn-Ag-Cu-Bi-In) สามารถใช้ข้อมูลตามตารางที่ 2 และตารางที่ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ค่าแรงตึงผิวของธาตุบริสุทธิ์

ธาตุ	แรงตึงผิว (N/m)	ที่มา
Ag	$\sigma_{Ag} = 1.134 - 0.0001905T$	[46-48]
Bi	$\sigma_{Bi} = 0.405 - 0.0000492T$	[48, 49]
Cu	$\sigma_{Cu} = 1.475648 - 0.00014224T$	[50]
In	$\sigma_{In} = 0.5938 - 0.0000942T$	[47]
Sn	$\sigma_{Sn} = 0.5828 - 0.0000834T$	[46, 49, 51, 52]

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์อันตรกิริยา (W) ของลวดบัดกรีอ่อนในระบบต่างๆ

ระบบ	พารามิเตอร์อันตรกิริยา (W)	ที่มา
Ag-Bi	$W_{Ag,Bi} = [4589.8 + 23.73047T - 3.93814T \ln T]$ $+ (-5716.6 - 0.91452T)(X_{Ag} - X_{Bi})$ $+ (-2630.2 + 0.88522T)(X_{Ag} - X_{Bi})^2$	[53]
Ag-Cu	$W_{Ag,Cu} = (17534.6 - 4.45479T) + (2251.3 - 2.6733T)(X_{Ag} - X_{Cu})$ $+ 492.7(X_{Ag} - X_{Cu})^2$	[53]
Ag-In	$W_{Ag,In} = (-14403.297 - 8.176539T)$ $+ (-15551.028 - 2.6648T)(X_{Ag} - X_{In})$ $+ (-710.6291 - 5.292674T)(X_{Ag} - X_{In})^2$ $+ 3955.27(X_{Ag} - X_{In})^3$	[54]
Ag-Sn	$W_{Ag,Sn} = (-4902.5 - 4.30532T)$ $+ (-16474 + 3.12507T)(X_{Ag} - X_{Sn})$ $- 7298.6(X_{Ag} - X_{Sn})^2$	[53]
Bi-Cu	$W_{Bi,Cu} = (24105.9 - 9.93287T)$ $+ (-2584.5 + 0.00906T)(X_{Bi} - X_{Cu})$	[53]
Bi-Sn	$W_{Bi,Sn} = -32 - 0.235T$	[53]
Cu-In	$W_{Cu,In} = (-4460.82 - 2.28201T)$ $+ (18516.8 - 4.49307T)(X_{Cu} - X_{In})$ $+ (-14031.3 + 6.6144T)(X_{Cu} - X_{In})^2$ $+ (1840.16 + 1.00558T)(X_{Cu} - X_{In})^3$	[55]
Cu-Sn	$W_{Cu,Sn} = (-9002.8 - 5.8381T)$ $+ (-20100.4 + 3.6366T)(X_{Cu} - X_{Sn})$ $- 10528.4(X_{Cu} - X_{Sn})^2$	[53]
In-Sn	$W_{In,Sn} = (-711 - 1.6934T) + (-64 - 1.3592T)(X_{In} - X_{Sn})$	[53]
Ag-Bi-Sn	$W_{Ag,Bi,Sn} = (11000 + 4T)X_{Ag} + (20000 - 38.95T)X_{Bi}$	[53]
Ag-Cu-Sn	$W_{Ag,Cu,Sn} = (10416.06 - 107.98375T)X_{Sn}$	[53]
Ag-In-Sn	$W_{Ag,Cu,In} = (64.697 - 8.82T)X_{Ag} + (23.474 - 22.792T)X_{In}$ $+ (13.374 - 27.171T)X_{Sn}$	[54]

4.3 ข้อมูลที่นำมาใช้สอนในกำหนดการเชิงพันธุกรรม

ในงานวิจัยนี้ นำกำหนดการเชิงพันธุกรรมมาใช้เพื่อทำนายอุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิโซลิดัสของลวดบัดกรีอ่อนในระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง-บิสมัท-อินเดียมที่ส่วนผสมหนึ่งๆ ดังนั้น ข้อมูลที่จะนำมาใช้สอนกำหนดการเชิงพันธุกรรมจึงต้องประกอบไปด้วยส่วนผสมในแต่ละธาตุของลวดบัดกรีอ่อน อุณหภูมิหลอมเหลว และอุณหภูมิโซลิดัสของส่วนผสมนั้นๆ ตัวอย่างชุดข้อมูลสอน (Training Data) ของกำหนดการเชิงพันธุกรรม แสดงดังภาพที่ 22

Composition					Properties	
Sn	Ag	Cu	Bi	In	Liquidus	Solidus
96.190	3.240	0.570	0.000	0.000	218.3	217.1
97.250	2.000	0.750	0.000	0.000	221.1	217.1
96.300	3.200	0.500	0.000	0.000	218.9	217.1
95.500	3.800	0.700	0.000	0.000	225.8	217.1
95.000	4.500	0.500	0.000	0.000	239.2	217.1
98.500	1.000	0.500	0.000	0.000	225.8	217.1

ภาพที่ 22 ตัวอย่างชุดข้อมูลสอนของกำหนดการเชิงพันธุกรรม

โดยชุดข้อมูลสอนของกำหนดการเชิงพันธุกรรมมีจำนวนทั้งสิ้น 250 ชุดข้อมูลจาก 250 ส่วนผสมของลวดบัดกรีอ่อน โดยสามารถแบ่งตามที่มาของข้อมูลได้เป็น 2 กลุ่มคือ ชุดข้อมูลสอนที่ได้จากการคำนวณทางอุณหพลศาสตร์ตามหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc จำนวน 240 ชุดข้อมูล และชุดข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจำนวน 10 ชุดข้อมูล โดยเมื่อแยกพิจารณาชุดข้อมูลสอนในแต่ละกลุ่มแล้วพบว่า ชุดข้อมูลสอนที่ได้จากการคำนวณทางอุณหพลศาสตร์ประกอบไปด้วยส่วนผสมของลวดบัดกรีอ่อนใน 4 ระบบธาตุคือ ระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง (Sn-Ag-Cu) ระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง-บิสมัท (Sn-Ag-Cu-Bi) ระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง-อินเดียม (Sn-Ag-Cu-In) และระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง-บิสมัท-อินเดียม (Sn-Ag-Cu-Bi-In) ซึ่งจำนวนชุดข้อมูลสอนที่ได้จากการคำนวณทางอุณหพลศาสตร์ในแต่ละระบบธาตุแสดงไว้ในตารางที่ 4 โดยเหตุผลที่ใช้ในการเลือกข้อมูลทดสอบในระบบธาตุต่างๆ จะเลือกให้ครอบคลุมช่วงส่วนผสมที่เป็นไปได้ในระบบ 3 ธาตุและระบบ 4 ธาตุตามงานวิจัยในอดีต ส่วนในระบบ 5 ธาตุจะเลือกส่วนผสมในปริมาณที่มากกว่าเนื่องจากยังไม่ทราบถึงช่วงส่วนผสมที่เป็นไปได้จากงานวิจัยในอดีต โดยส่วนผสมที่เลือกจะกระจายให้ครอบคลุมทั้งช่วงส่วนผสม แต่จะมีปริมาณบิสมัทและปริมาณอินเดียมในส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนอย่างละไม่เกิน 12% โดยมวล

ตารางที่ 4 จำนวนชุดข้อมูลสอนที่ได้จากการคำนวณทางอุณหพลศาสตร์ในแต่ละระบบธาตุ

ระบบธาตุของลวดบัดกรีอ่อน	จำนวนชุดข้อมูลสอน
Sn-Ag-Cu	15 ส่วนผสม
Sn-Ag-Cu-Bi	50 ส่วนผสม
Sn-Ag-Cu-In	50 ส่วนผสม
Sn-Ag-Cu-Bi-In	125 ส่วนผสม
รวม	240 ส่วนผสม

ส่วนชุดข้อมูลสอนที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วยส่วนผสมของลวดบัดกรีอ่อนใน 3 ระบบธาตุคือ ระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง (Sn-Ag-Cu) ระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง-บิสมัท (Sn-Ag-Cu-Bi) และระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง-อินเดียม (Sn-Ag-Cu-In) รวมทั้งสิ้น 10 ชุดข้อมูลซึ่งได้มาข้อมูลการทดสอบทางความร้อนของลวดบัดกรีอ่อน 10 ส่วนผสม จาก 4 งานวิจัย [7, 56-58] โดยจำนวนชุดข้อมูลสอนแยกตามระบบธาตุของลวดบัดกรีอ่อนแสดงไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 จำนวนชุดข้อมูลสอนที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในแต่ละระบบธาตุ

ระบบธาตุของลวดบัดกรีอ่อน	จำนวนชุดข้อมูลสอน
Sn-Ag-Cu	4 ส่วนผสม
Sn-Ag-Cu-Bi	3 ส่วนผสม
Sn-Ag-Cu-In	3 ส่วนผสม
รวม	10 ส่วนผสม

รายละเอียดของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนทั้ง 250 ส่วนผสมที่นำมาใช้เป็นข้อมูลในการสอน กำหนดการเชิงพันธุกรรม รวมทั้งข้อมูลอุณหภูมิลิควิดัส และอุณหภูมิลิควิดัสของแต่ละส่วนผสม แสดงไว้ในภาคผนวก ก

4.4 ข้อมูลที่นำมาใช้ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ข้อมูลที่นำมาใช้ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ชุดข้อมูลทดสอบ (Testing Data) ที่นำมาทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้ทำนายสมบัติของวัสดุ จากกำหนดการเชิงพันธุกรรม และชุดข้อมูลทดสอบที่นำมาทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง การหาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ดีที่สุดจากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์ รายละเอียดของชุดข้อมูลทดสอบในแต่ละกลุ่มมีดังต่อไปนี้

4.4.1 ชุดข้อมูลทดสอบสำหรับแบบจำลองที่ใช้ทำนายสมบัติของวัสดุจากกำหนดการเชิงพันธุกรรม

ชุดข้อมูลทดสอบสำหรับแบบจำลองที่ใช้หลักกำหนดการเชิงพันธุกรรมเพื่อทำนายสมบัติของวัสดุ จะประกอบไป 3 ส่วนคือ 1) ส่วนผสมในแต่ละธาตุของลวดบัดกรีอ่อน 2) อุณหภูมิหลอม และ 3) อุณหภูมิโซลิดัสของส่วนผสมนั้นๆ ซึ่งมีลักษณะเดียวกันกับชุดข้อมูลในภาพที่ 22 โดยชุดข้อมูลทดสอบที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้ ได้มาจากการรวบรวมข้อมูลการทดสอบทางความร้อนของลวดบัดกรีอ่อน 25 ส่วนผสมใน 3 ระบบธาตุคือ ระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง (Sn-Ag-Cu) ระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง-บิสมัท (Sn-Ag-Cu-Bi) และระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง-อินเดียม (Sn-Ag-Cu-In) จาก 8 งานวิจัย [8, 57, 59-64] โดยรายละเอียดชุดข้อมูลทั้ง 25 ส่วนผสมแสดงไว้ในภาคผนวก ข

4.4.2 ชุดข้อมูลทดสอบสำหรับแบบจำลองการหาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ดีที่สุดจากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์

ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้หลักการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อหาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ดีที่สุด จะประกอบไปด้วย 6 ส่วน คือ (1) ส่วนผสมในแต่ละธาตุของลวดบัดกรีอ่อน (2) อุณหภูมิหลอมจากการทดลองด้วยเครื่อง DSC ซึ่งมีรายละเอียดการทดสอบในหัวข้อการทดสอบทางความร้อนในบทที่ 5 (3) อุณหภูมิโซลิดัสจากการทดลองด้วยเครื่อง DSC (4) ช่วงการแข็งตัว (5) เวลาในการเป็ยก และ (6) แรงในการเป็ยก ซึ่งส่วนผสมของชุดข้อมูลทดสอบนี้ได้มาจากการทำนายของแบบจำลอง (รายละเอียดของส่วนผสมอยู่ในบทผลการทดลอง) โดยจุดมุ่งหมายของชุดข้อมูลทดสอบนี้เพื่อตรวจสอบผลการทำนายสมบัติของวัสดุในแต่ละด้านของลวดบัดกรีอ่อนที่ได้จากแบบจำลอง

บทที่ 5

การออกแบบและพัฒนาแบบจำลองด้วยขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒน์แบบผสม

งานวิจัยนี้นำขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒน์แบบผสม (Hybrid Evolutionary Algorithms) มาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางสมบัติของวัสดุ เพื่อหาส่วนผสมที่ดีที่สุดของลวดบัดกรีอ่อนปลอดตะกั่ว โดยจะให้ความสนใจในสมบัติ 3 ด้านของลวดบัดกรีอ่อนคือ คุณสมบัติการแข็งตัว และสภาพเปื่อยได้ ซึ่งสมบัติทั้ง 3 ด้านนี้จะถูกนำมาพิจารณาในแบบจำลองในรูปของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 วัตถุประสงค์ ซึ่งในแต่ละวัตถุประสงค์ก็จะมีหลักการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน โดยหลักการคำนวณที่นำมาใช้นี้จะอาศัยหลักการทางอุณหพลศาสตร์ และหลักการทางโลหวิทยาเข้ามาช่วยในการคำนวณ

โดยที่การออกแบบและการพัฒนาแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนการทำนายสมบัติของวัสดุของลวดบัดกรีอ่อนด้วยกำหนดการเชิงพันธุกรรม (Genetic Programming) และส่วนของการหาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ดีที่สุดจากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Genetic Algorithms) โดยในแต่ละส่วนของแบบจำลองมีรายละเอียดในการออกแบบและพัฒนาดังต่อไปนี้

5.1 การทำนายสมบัติของวัสดุจากกำหนดการเชิงพันธุกรรม

สมบัติทางความร้อนและอุณหภูมิกการหลอมเหลวของลวดบัดกรีอ่อนเป็นสมบัติหนึ่งที่สำคัญเนื่องจากเป็นสมบัติที่ส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมหลังทำการเชื่อม นอกจากนั้นอุณหภูมิกการหลอมเหลวที่ต่ำลงย่อมส่งผลต่อการประหยัดพลังงานในการหลอมเหลว อุณหภูมิกการหลอมเหลวเป็นสมบัติเฉพาะของสารประกอบหนึ่งๆ ซึ่งเป็นอุณหภูมิกที่ทำให้เกิดความสมดุลระหว่างเฟสของแข็งและเฟสของเหลว ในทางปฏิบัติแล้วอุณหภูมินี้มักจะไม่ได้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิกใดอุณหภูมิกหนึ่งเพียงจุดเดียว แต่มักจะเป็นช่วงการหลอมเหลว (Melting range) โดยจะมีขอบเขตล่างของช่วงการหลอมเหลวที่อุณหภูมิกซิลิไซด์ หรืออุณหภูมิกสูงสุดที่จะเกิดเฟสของแข็งสมบูรณ์ และมีขอบเขตบนของช่วงการหลอมเหลวที่อุณหภูมิกลิควิดัส หรืออุณหภูมิกต่ำที่สุดที่จะเกิดเฟสของเหลวสมบูรณ์

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าอุณหภูมิกลิควิดัสและอุณหภูมิกซิลิไซด์เป็นสมบัติของวัสดุที่สามารถทำนายได้จากการคำนวณทางอุณหพลศาสตร์ตามวิธี CALPHAD ซึ่งแม้ผลที่ได้จากการคำนวณ จะได้รับการยอมรับว่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง แต่การคำนวณดังกล่าวจะให้ข้อมูลอุณหภูมิกลิควิดัสและอุณหภูมิกซิลิไซด์ของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนส่วนผสมหนึ่งๆเท่านั้น ซึ่งทำให้เป็น

ข้อจำกัดหากจะนำหลักการคำนวณนี้ไปใช้ต่อในกระบวนการหาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ดีที่สุด ในแบบจำลองขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์ เนื่องจากในการคำนวณแต่ละครั้ง จำเป็นต้องใช้เวลาในการคำนวณ ทั้งยังเป็นการสิ้นเปลืองทรัพยากรในการคำนวณอีกด้วย

แบบจำลองการทำนายสมบัติของวัสดุจากกำหนดการเชิงพันธุกรรมนี้จึงเริ่มต้นจากการทำการคำนวณทางอุณหพลศาสตร์ตามหลักวิธี CALPHAD เพื่อหาค่าอุณหภูมิวิกฤตและอุณหภูมิโซลิดัสของลวดบัดกรีอ่อนจำนวน 240 ส่วนผสม ด้วยโปรแกรม ThermoCalc [44] เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการสอน (Training Data) ในกำหนดการเชิงพันธุกรรม และใช้ข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอีก 10 ส่วนผสมเพื่อช่วยให้แบบจำลองมีผลการทำนายที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น

รายละเอียดของกำหนดการเชิงพันธุกรรมในการสร้างแบบจำลองการทำนายสมบัติของวัสดุมีดังต่อไปนี้

5.1.1 ฟังก์ชันและเทอร์มินอล

ฟังก์ชันที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นฟังก์ชันคณิตศาสตร์มาตรฐานทั่วไป สามารถต่อเข้ากับเทอร์มินอลต่างๆ และสื่อถึงความหมายของสมการคำตอบได้ง่าย ฟังก์ชันที่ใช้ประกอบด้วย

- ฟังก์ชันบวก (+)
- ฟังก์ชันลบ (-)
- ฟังก์ชันคูณ (*)
- ฟังก์ชันหาร (/) โดยเพิ่มเงื่อนไข $A/B = 0$ เมื่อ $B = 0$
- ฟังก์ชันยกกำลังสอง (^2)
- ฟังก์ชันลอการิทึมฐานธรรมชาติ (\ln) โดยเพิ่มเงื่อนไข $\ln A = \ln|A|$ เมื่อ $A < 0$

สำหรับเทอร์มินอลที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือตัวแปรส่วนผสมธาตุต่างๆของลวดบัดกรีอ่อน และค่าคงที่ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการสุ่ม

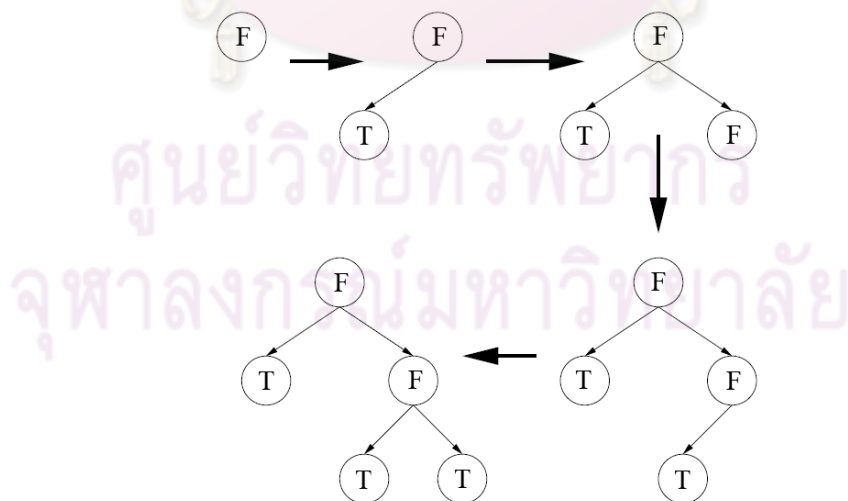
- X_1 เปอร์เซนต์ส่วนผสมโดยมวลของดีบุก (Sn) ในลวดบัดกรีอ่อน
- X_2 เปอร์เซนต์ส่วนผสมโดยมวลของเงิน (Ag) ในลวดบัดกรีอ่อน
- X_3 เปอร์เซนต์ส่วนผสมโดยมวลของทองแดง (Cu) ในลวดบัดกรีอ่อน
- X_4 เปอร์เซนต์ส่วนผสมโดยมวลของบิสมัท (Bi) ในลวดบัดกรีอ่อน
- X_5 เปอร์เซนต์ส่วนผสมโดยมวลของอินเดียม (In) ในลวดบัดกรีอ่อน
- rand(0,1) ค่าคงที่ที่เกิดจากการสุ่มค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1

5.1.2 การสร้างประชากรผลเฉลยเริ่มต้น

กำหนดการเชิงพันธุกรรมจะทำการสุ่มฟังก์ชันและเทอร์มินอลมาสร้างเป็นโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยเริ่มต้นจำนวน 200 ผลเฉลย โดยผลเฉลยเริ่มต้นแต่ละตัวจะมีความสูงของโครงสร้างต้นไม้เริ่มต้นสูงสุด (Initial Maximum Tree Depth) เท่ากับ 2 ($D_{ini_max} = 2$) โดยรูปแบบการสร้างผลเฉลยเริ่มต้นจะใช้วิธี Ramped-half-by-half [13] ซึ่งเป็นวิธีที่ทำให้โครงสร้างต้นไม้ที่สร้างขึ้นมีความหลากหลายของขนาดและรูปร่างที่ดี

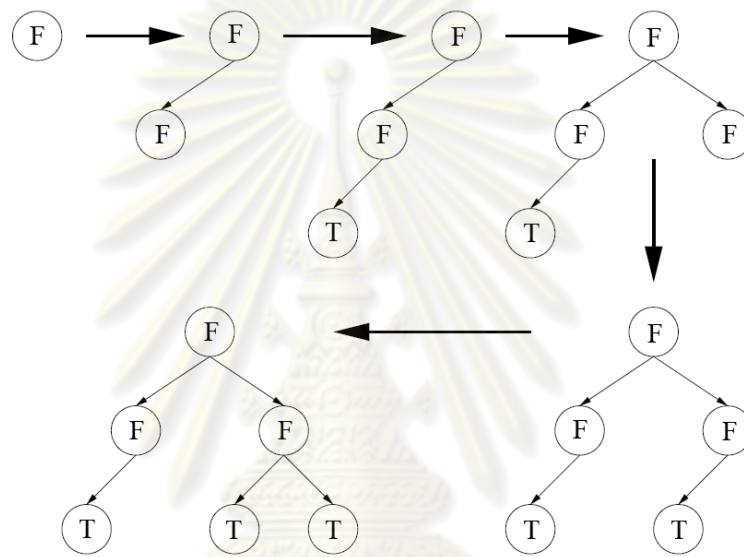
การสร้างประชากรผลเฉลยเริ่มต้นด้วยวิธี Ramped-half-by-half นี้ จะเริ่มต้นจากการแบ่งประชากรออกเป็น n กลุ่ม ($n = D_{ini_max} - 1$) ซึ่งประชากรผลเฉลยที่จะถูกสร้างขึ้นในแต่ละกลุ่มก็จะมีค่าความสูงของโครงสร้างต้นไม้สูงสุดแตกต่างกัน ตั้งแต่ 2 จนถึงค่าความสูงของโครงสร้างต้นไม้เริ่มต้นสูงสุด โดยที่ประชากรผลเฉลยครั้งหนึ่งในแต่ละกลุ่มจะถูกสร้างจากวิธี Full และอีกครึ่งหนึ่งจะถูกสร้างขึ้นจากวิธี Grow โดยรายละเอียดของทั้งสองวิธี มีดังต่อไปนี้

- การสร้างประชากรผลเฉลยเริ่มต้นด้วยวิธี Grow จะเริ่มต้นจากการสุ่มฟังก์ชันมาหนึ่งตัว และกำหนดให้มีระดับความสูงต้นไม้เท่ากับ 0 จากนั้นก็จะสุ่มฟังก์ชัน (F) หรือเทอร์มินอล (T) มาต่อที่ระดับความสูงต้นไม้เท่ากับ 1 และจะทำซ้ำไปเช่นนี้ทั่วทั้งโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยที่ระดับความสูงต้นไม้ระดับต่างๆ จนระดับความสูงต้นไม้ไม่มีค่าเท่ากับค่าความสูงของต้นไม้สูงสุด จึงจะสุ่มเฉพาะเทอร์มินอลมาต่อในโครงสร้างต้นไม้ โดยขั้นตอนการสร้างประชากรผลเฉลยเริ่มต้นด้วยวิธี Grow แสดงได้ดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 การสร้างประชากรผลเฉลยเริ่มต้นด้วยวิธี Grow

- การสร้างประชากรผลเฉลยเริ่มต้นด้วยวิธี Full จะเริ่มต้นจากการสุ่มฟังก์ชันมาหนึ่งตัว และกำหนดให้มีระดับความสูงต้นไม้เท่ากับ 0 จากนั้นก็จะสุ่มเฉพาะฟังก์ชัน (F) มาต่อที่ระดับความสูงต้นไม้เท่ากับ 1 และจะทำซ้ำไปเช่นนี้ทั่วทั้งโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยที่ระดับความสูงต้นไม้ระดับต่างๆ จนระดับความสูงต้นไม้มีค่าเท่ากับค่าความสูงของต้นไม้สูงสุด จึงจะสุ่มเฉพาะเทอร์มินอล (T) มาต่อในโครงสร้างต้นไม้ โดยขั้นตอนการสร้างประชากรผลเฉลยเริ่มต้นด้วยวิธี Full แสดงได้ดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 การสร้างประชากรผลเฉลยเริ่มต้นด้วยวิธี Full

5.1.3 การวัดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของผลเฉลย

เมื่อสร้างกลุ่มประชากรผลเฉลยเริ่มต้นแล้ว ประชากรผลเฉลยแต่ละตัวก็จะถูกประมวลผลเพื่อวัดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์นี้จะใช้เป็นเกณฑ์ในการคัดเลือกประชากรเพื่อดำเนินการทางพันธุกรรมต่อไป ในการวัดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของผลเฉลยนั้น จะเริ่มการประมวลผลจากราก (Root) ของโครงสร้างต้นไม้ ลงไปยังโหนดล่างสุดของโครงสร้างต้นไม้ (Leaf) ซึ่งเมื่อประมวลผลครบทั้งต้นไม้แล้ว ก็จะได้สมการคณิตศาสตร์หนึ่งทีประกอบขึ้นจากฟังก์ชันและเทอร์มินอลภายในโครงสร้างต้นไม้ โดยสมการคณิตศาสตร์ที่ได้นี้ก็จะใช้เป็นสมการทำนายค่าคุณทรมูลิควิดัส / คุณทรมูลิซิลิดัสของลวดบัดกรีอ่อน ซึ่งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของผลเฉลยแต่ละตัวจะคำนวณจากค่า Root mean square error (RMSE) ระหว่างค่าสมบัติของวัสดุที่คำนวณได้จากสมการคณิตศาสตร์นี้กับค่าสมบัติของวัสดุจากข้อมูลสอน ดังสมการที่ 13

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (13)$$

โดยที่ y_i = ค่าคุณหมุมิลิควิตัส/โซลิตัสจากข้อมูลสอน
 \hat{y}_i = ค่าคุณหมุมิลิควิตัส/โซลิตัสที่คำนวณได้จากสมการคณิตศาสตร์ที่ได้จากโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลย
 n = จำนวนข้อมูลสอน

5.1.4 การสร้างประชากรผลเฉลยใหม่

ประชากรผลเฉลยแต่ละตัวเมื่อถูกคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการสร้างกลุ่มประชากรใหม่ ที่จะคัดเลือกเอาเฉพาะผลเฉลยที่ดีที่สุดไว้ โดยใช้ตัวดำเนินการทางพันธุกรรม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1.4.1 การสืบพันธุ์

กำหนดการเชิงพันธุกรรมจะใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการคัดเลือกประชากรผลเฉลยใหม่ที่เรียกว่า Lexicographic Tournament Selection [65] ขนาดการแข่งขัน (size) เท่ากับ 4 ซึ่งจะเริ่มต้นจากการสุ่มผลเฉลยจำนวน 4 ผลเฉลยจากกลุ่มประชากรผลเฉลยเดิมมาทำการแข่งขันกัน โดยใช้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และขนาดโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยเป็นเกณฑ์ เนื่องจากปัญหาในงานวิจัยนี้เป็นปัญหาการหาค่าน้อยที่สุด (Minimization) ของแต่ละวัตถุประสงค์ ผลเฉลยที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุดจะถูกเลือกเพื่อคัดลอกมาเป็นกลุ่มประชากรผลเฉลยใหม่ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลย แต่ถ้าหากมีผลเฉลยที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุดมากกว่าหนึ่งผลเฉลยก็จะใช้ขนาดโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยมาพิจารณา โดยผลเฉลยที่มีขนาดโครงสร้างต้นไม้ที่เล็กที่สุดก็จะเป็นผลเฉลยที่ถูกเลือก ซึ่งในการแข่งขันหนึ่งครั้งก็จะมีผลเฉลยหนึ่งผลเฉลยที่ถูกเลือกเป็นกลุ่มประชากรผลเฉลยใหม่ กำหนดการเชิงพันธุกรรมจะทำการสุ่มประชากรผลเฉลยมาแข่งขันกันและเลือกผลเฉลยที่ดีที่สุดเข้าสู่กลุ่มประชากรผลเฉลยใหม่จนครบจำนวน 20 ผลเฉลย โดยการสืบพันธุ์นี้คิดเป็น 10% ของกลุ่มประชากรผลเฉลย

5.1.4.2 การไขว้เปลี่ยน

การไขว้เปลี่ยนจะนำประชากรผลเฉลย 20 ผลเฉลยที่ได้จากการสืบพันธุ์มาเป็นประชากรต้นแบบ โดยการไขว้เปลี่ยนจะเริ่มจากการสุ่มเลือกผลเฉลยต้นแบบ (Parents) ที่ไม่ซ้ำกัน 2 ผลเฉลยมาทำการไขว้เปลี่ยนโครงสร้างต้นไม้กัน ซึ่งจะทำให้ได้ผลเฉลยใหม่ (Children) 2

ผลเฉลยมาเป็นประชากรใหม่ การไขว้เปลี่ยนจะวนทำจนได้ผลเฉลยใหม่จำนวน 180 ผลเฉลย ซึ่งคิดเป็น 90% ของกลุ่มประชากร โดยในแต่ละครั้งของการไขว้เปลี่ยนจะไม่ขึ้นต่อกันคืออาจเลือกผลเฉลยต้นแบบซ้ำกันได้ หรือได้ผลเฉลยใหม่ที่ซ้ำกันได้

5.1.4.3 การกลายพันธุ์

ในงานวิจัยนี้จะไม่ใช้การกลายพันธุ์

เมื่อได้กลุ่มประชากรผลเฉลยใหม่ครบแล้ว กลุ่มประชากรนี้จะถูกนำไปวัดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์อีกครั้ง และวนทำในขั้นตอนต่างๆดังกล่าวข้างต้นจนกระทั่งครบจำนวนรุ่นที่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีจำนวนรุ่นเท่ากับ 500 รุ่น

ในระหว่างกระบวนการสร้างผลเฉลยใหม่ในแต่ละรุ่นของกำหนดการเชิงพันธุกรรม ความสูงของโครงสร้างต้นไม้ไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้แบบพลวัต (Dynamic Growth) เพื่อจำกัดไม่ให้ขนาดของโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยโตเร็วเกินไป เพราะจะทำให้เปลืองทรัพยากรและเวลาในการคำนวณ โดยการเพิ่มขึ้นแบบพลวัตของโครงสร้างต้นไม้จะพิจารณาจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เฉลี่ยของกลุ่มประชากร หากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เฉลี่ยของกลุ่มประชากรรุ่นปัจจุบันมีความแตกต่างกับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เฉลี่ยของกลุ่มประชากรรุ่นก่อนหน้าไม่เกิน 1% ซึ่งอาจจะเกิดจากขนาดโครงสร้างต้นไม้เล็กเกินไปจนไม่สามารถสร้างผลเฉลยที่ดีขึ้นกว่าเดิมได้ กำหนดการเชิงพันธุกรรมก็จะทำการเพิ่มระดับความสูงของต้นไม้สูงสุดอีกหนึ่งระดับในรุ่นถัดไป โดยที่ความสูงของต้นไม้จะเพิ่มขึ้นได้สูงสุดที่ระดับความสูงเท่ากับ 10 เพื่อจำกัดขนาดโครงสร้างต้นไม้ไม่ให้ใหญ่จนเกินไป

5.1.5 การค้นหาผลเฉลย

เมื่อกำหนดการเชิงพันธุกรรมวิวัฒนาการกลุ่มประชากรผลเฉลยครบตามจำนวนรุ่นที่ต้องการแล้ว กลุ่มประชากรผลเฉลยในรุ่นสุดท้ายจะเป็นกลุ่มผลเฉลยสำหรับปัญหาการหาค่าสมบัติของวัสดุของลวดบัดกรีอ่อน

รายละเอียดต่างๆและพารามิเตอร์ของกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆในกำหนดการแข่งขันทุกรวม

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
ขนาดกลุ่มประชากร	200
จำนวนรุ่น	500
วิธีการสร้างประชากรผลเฉลยเริ่มต้น	Ramped-half-by-half
ความสูงของโครงสร้างต้นไม้เริ่มต้นสูงสุด	2
ความสูงของโครงสร้างต้นไม้สูงสุด	10
การเพิ่มความสูงของโครงสร้างต้นไม้	แบบพลวัต
วิธีการคัดเลือกประชากรใหม่	Lexicographic Tournament Selection size 4
อัตราการสืบพันธุ์	10%
อัตราการไขว้เปลี่ยน	90%
อัตราการกลายพันธุ์	0%

5.2 การหาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ดีที่สุดจากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้จะใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์เพื่อหาส่วนผสมของลวดบัดกรีอ่อนปลอดตะกั่วชนิดใหม่ที่มีสมบัติต่างๆที่ดีในงานเชื่อมและสามารถนำมาใช้เพื่อทดแทนลวดบัดกรีอ่อนผสมตะกั่วได้ โดยจะกำหนดให้อุณหภูมิหลอม ช่วงการแข็งตัว และสภาพเป็ยกได้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ซึ่งอุณหภูมิหลอมและช่วงการแข็งตัวจะอาศัยค่าที่ได้จากการทำนายสมบัติของวัสดุของลวดบัดกรีอ่อนที่ได้จากกระบวนการทางพันธุกรรม ส่วนสภาพเป็ยกได้จะคำนวณจากค่าแรงดึงผิวตามสมการของ Butler

รายละเอียดของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์ในการสร้างแบบจำลองการหาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ดีที่สุดมีดังต่อไปนี้

5.2.1 การกำหนดรหัสพันธุกรรม

ส่วนผสมที่ดีที่สุดของลวดบัดกรีอ่อนที่เป็นคำตอบที่ต้องการของปัญหา ประกอบไปด้วยส่วนผสมโดยมวลของธาตุ 5 ธาตุคือดีบุก (Sn), เงิน (Ag), ทองแดง (Cu), บิสมัท (Bi) และอินเดียม (In) โดยผลเฉลยแต่ละตัวในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะแสดงส่วนผสมของลวด

บิตกรีนหนึ่งๆในรูปของโครโมโซมเลขฐานสอง (Binary Chromosome) ความยาว 30 บิต โดย 8 บิตแรกจะใช้เพื่อแทนส่วนผสมโดยมวลของเงิน (Ag), 8 บิตถัดมาใช้เพื่อแทนส่วนผสมโดยมวลของทองแดง (Cu), 7 บิตแทนส่วนผสมโดยมวลของบิสมีท์ (Bi) และ 7 บิตสุดท้ายแทนส่วนผสมโดยมวลของอินเดียม (In) ในส่วนของส่วนผสมโดยมวลของดีบุก (Sn) จะเป็นสัดส่วนที่เหลืออยู่ทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 25



ภาพที่ 25 โครโมโซมค่าตอบส่วนผสมที่ดีที่สุดของลวดบิตกรีน

ในการถอดรหัสพันธุกรรมจากโครโมโซมเลขฐานสอง ให้กลายเป็นส่วนผสมโดยมวลของแต่ละธาตุ จะเริ่มต้นจากการนำสายโครโมโซมมาแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งยาว 8 บิต ส่วนที่สองยาว 8 บิต ส่วนที่สามยาว 7 บิต และส่วนที่สี่ยาว 7 บิต จากนั้นสายโครโมโซมในแต่ละส่วนจะถูกนำไปถอดรหัส แล้วคำนวณค่าส่วนผสมโดยมวลของธาตุตามสมการที่ 14 โดยที่ค่าที่คำนวณได้จากส่วนที่ 1,2,3,4 คือ ส่วนผสมโดยมวลของเงิน (Ag), ทองแดง (Cu), บิสมีท์ (Bi), และอินเดียม (In) ตามลำดับ และสุดท้ายก็จะทำการหาส่วนผสมโดยมวลของดีบุก (Sn) จากเปอร์เซ็นต์ที่เหลือจากทั้งสี่

$$X_i = X_i^{\min} + (X_i^{\max} - X_i^{\min}) \left(\frac{\text{decimal}}{2^L - 1} \right) \quad (14)$$

โดย X_i = ส่วนผสมโดยมวลของธาตุ i ในลวดบิตกรีน

X_i^{\min} = ขอบเขตส่วนผสมต่ำสุดของ ธาตุ i

X_i^{\max} = ขอบเขตส่วนผสมสูงสุดของ ธาตุ i

decimal = ค่าที่ได้จากการแปลงเลขฐานสองของส่วนโครโมโซมเป็นเลขฐานสิบ

L = ความยาวบิตของส่วนโครโมโซม

5.2.2 การสร้างประชากรผลเฉลยเริ่มต้น

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะสร้างประชากรผลเฉลยเริ่มต้นจำนวน 2000 ผลเฉลย โดยเริ่มต้นจากการสุ่มค่าเลขฐานสอง (0 และ 1) ในแต่ละบิตของโครโมโซมผลเฉลย โดยผลเฉลยเริ่มต้นแต่ละตัวที่สร้างขึ้นจะถูกกำหนดขอบเขตหรือช่วงส่วนผสมของธาตุต่างๆที่เหมาะสมไว้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ขอบเขตส่วนผสมของธาตุต่างๆที่เป็นไปได้ในผลเฉลย

ธาตุ	ขอบเขตเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมโดยมวล	
	ต่ำสุด	สูงสุด
เงิน (Ag)	0.10	5.22
ทองแดง (Cu)	0.10	2.66
บิสมัท (Bi)	0.00	6.40
อินเดียม (In)	0.00	6.40

ขอบเขตเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมโดยมวลของธาตุผสมแต่ละตัวในตารางที่ 7 ถูกกำหนดขึ้นจากแนวคิดของงานวิจัยที่จะปรับปรุงส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนระบบดีบุก-เงิน-ทองแดงด้วยการเติมธาตุบิสมัทและอินเดียมในปริมาณที่เหมาะสม ดังนั้นจึงต้องกำหนดให้มีปริมาณต่ำสุดของทองแดงและเงินไม่เท่ากับ 0 โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีค่าเป็น 0.10 เปอร์เซ็นต์ ส่วนบิสมัทและอินเดียมนั้นไม่จำเป็นต้องมีปริมาณต่ำสุดที่ต้องมีส่วนผสม จึงกำหนดให้ขอบเขตต่ำสุดเท่ากับ 0 ในส่วนของขอบเขตสูงสุดที่เป็นไปได้ในผลเฉลยของธาตุเงินและทองแดงได้จากการกำหนดให้มีค่าครอบคลุมช่วงส่วนผสมจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด ส่วนบิสมัทและอินเดียมจะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากันคือ 6.40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นปริมาณที่จะให้ช่วงการแข็งตัวของลวดบัดกรีอ่อนไม่เกิน 30 °C จากการคำนวณตามหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc

5.2.3 การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมี 3 วัตถุประสงค์ คือ อุณหภูมิหลอมเหลว ช่วงการแข็งตัว และสภาพเป็ยกได้ การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของผลเฉลยแต่ละตัวจะเริ่มจากนำผลเฉลยที่ผ่านการถอดรหัสพันธุกรรมเป็นส่วนผสมธาตุต่างๆแล้วมาคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในแต่ละวัตถุประสงค์ มีรายละเอียดของการคำนวณ ดังต่อไปนี้

- อุณหภูมิหลอมเหลว ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้จากการคำนวณตามสมการผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองการทำนายสมบัติอุณหภูมิหลอมเหลวด้วยกำหนดการเชิงพันธุกรรม โดยสมการผลเฉลยที่ได้แสดงไว้ดังสมการที่ 15

$$\begin{aligned}
 \text{Liquidus Temperature} = & 0.6631 + 2X_1 + X_2 + X_4 + 18.5667X_3^2 \\
 & + \text{Log}[X_1 + X_2^2 - X_4]^2 + \text{Log}[-X_1 + X_2^4 + X_3^2] \\
 & - \frac{X_3^4}{0.0129 + X_3^{11}} \quad (15)
 \end{aligned}$$

- โดย X_1 = เปอร์เซ็นต์ส่วนผสมโดยมวลของดีบุกในลวดบัดกรีอ่อน
 X_2 = เปอร์เซ็นต์ส่วนผสมโดยมวลของเงินในลวดบัดกรีอ่อน
 X_3 = เปอร์เซ็นต์ส่วนผสมโดยมวลของทองแดงในลวดบัดกรีอ่อน
 X_4 = เปอร์เซ็นต์ส่วนผสมโดยมวลของบิสมีทในลวดบัดกรีอ่อน
 X_5 = เปอร์เซ็นต์ส่วนผสมโดยมวลของอินเดียมในลวดบัดกรีอ่อน

- ช่วงการแข็งตัว ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้จากผลต่างของการคำนวณตามสมการผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิวิกฤตด้วยกำหนดการเชิงพันธุกรรมดังสมการที่ 15 กับการคำนวณตามสมการผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิโซลิดัสด้วยกำหนดการเชิงพันธุกรรมดังสมการที่ 16 ซึ่งจะทำให้เขียนสมการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของช่วงการแข็งตัวเขียนได้ดังสมการที่ 17

$$\begin{aligned}
 \text{Solidus Temperature} = & 0.2940 + 2X_1 + \frac{0.3305}{X_2} + 3X_2 + \frac{X_3}{X_4} - 3X_4 + X_3X_4 - X_4X_5 \\
 & - 0.8800X_5 - \text{Log}[0.3305(-0.0534 + X_4 + X_5 + X_5^2)] \\
 & + \text{Log}[|0.3305 + X_1 + X_4^2X_5^2|] + \text{Log}[0.3305 + X_1 + X_5 \\
 & + X_2^2X_5^2 + X_4^2(0.0534 - X_3 - X_5)X_5^2|] \quad (16)
 \end{aligned}$$

- โดย X_1 = เปอร์เซ็นต์ส่วนผสมโดยมวลของดีบุกในลวดบัดกรีอ่อน
 X_2 = เปอร์เซ็นต์ส่วนผสมโดยมวลของเงินในลวดบัดกรีอ่อน
 X_3 = เปอร์เซ็นต์ส่วนผสมโดยมวลของทองแดงในลวดบัดกรีอ่อน
 X_4 = เปอร์เซ็นต์ส่วนผสมโดยมวลของบิสมีทในลวดบัดกรีอ่อน
 X_5 = เปอร์เซ็นต์ส่วนผสมโดยมวลของอินเดียมในลวดบัดกรีอ่อน

$$\text{Solidification Range} = \text{Liquidus Temperature} - \text{Solidus Temperature} \quad (17)$$

- สภาพเป็ยกได้ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะอ้างอิงกับการคำนวณค่าแรงต้งผิวตามสมการของ Butler แต่จะไม่ได้ใช้ค่าแรงต้งผิวโดยตรง เนื่องจากค่าแรงต้งผิวที่ต่างกันเล็กน้อยไม่สามารถบ่งบอกถึงความดีของสภาพเป็ยกได้ของลวดบัดกรีอ่อนที่ต้องการเปรียบเทียบ

ดังนั้นจึงต้องทำการจัดกลุ่มผลเฉลยในประชากรผลเฉลยแต่ละรุ่น แล้วจึงกำหนดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้ลดหลั่นกันในแต่ละกลุ่ม โดยผลเฉลยที่ถูกจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกันก็จะมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เท่ากัน รูปแบบของการจัดกลุ่มนั้นจะเริ่มต้นจากการหาค่าเฉลี่ย (μ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ของค่าแรงต้งผิวของประชากรผลเฉลยในรุ่น จากนั้นจะแบ่งออกเป็น 6 กลุ่มคือ

- กลุ่มที่ 1 ผลเฉลยที่มีค่าแรงต้งผิวน้อยกว่า $\mu - 2\sigma$ จะถูกกำหนดให้มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสภาพเป็ยกได้เท่ากับ 1

- กลุ่มที่ 2 ผลเฉลยที่มีค่าแรงต้งผิวน้อยกว่า $\mu - \sigma$ แต่มากกว่าหรือเท่ากับ $\mu - 2\sigma$ จะถูกกำหนดให้มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสภาพเป็ยกได้เท่ากับ 2

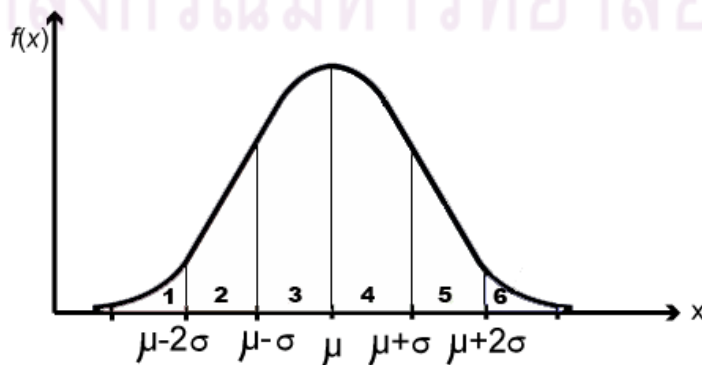
- กลุ่มที่ 3 ผลเฉลยที่มีค่าแรงต้งผิวน้อยกว่า μ แต่มากกว่าหรือเท่ากับ $\mu - \sigma$ จะถูกกำหนดให้มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสภาพเป็ยกได้เท่ากับ 3

- กลุ่มที่ 4 ผลเฉลยที่มีค่าแรงต้งผิวน้อยกว่า $\mu + \sigma$ แต่มากกว่าหรือเท่ากับ μ จะถูกกำหนดให้มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสภาพเป็ยกได้เท่ากับ 4

- กลุ่มที่ 5 ผลเฉลยที่มีค่าแรงต้งผิวน้อยกว่า $\mu + 2\sigma$ แต่มากกว่าหรือเท่ากับ $\mu + \sigma$ จะถูกกำหนดให้มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสภาพเป็ยกได้เท่ากับ 5

- กลุ่มที่ 6 ผลเฉลยที่มีค่าแรงต้งผิวมากกว่า $\mu + 2\sigma$ จะถูกกำหนดให้มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสภาพเป็ยกได้เท่ากับ 6

สามารถแสดงการจัดกลุ่มผลเฉลยและการกำหนดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสภาพเป็ยกได้ ได้ดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 การจัดกลุ่มผลเฉลยและการกำหนดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสภาพเป็ยกได้

5.2.4 การวัดค่าความแข็งแรงและค่าระยะห่างความหนาแน่น

ประชากรผลเฉลยแต่ละตัวเมื่อถูกคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในแต่ละวัตถุประสงค์แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการคำนวณค่าความแข็งแรงตามวิธีการจัดลำดับผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ โดยขั้นตอนนี้จะทำให้ได้ขอบเขตกลุ่มผลเฉลยที่ดีที่สุดออกมาหลายกลุ่มตามค่าความแข็งแรงที่ได้จากการจัดลำดับผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ

หลังจากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการคำนวณค่าระยะห่างความหนาแน่น ตามสมการที่ 6 เพื่อใช้เป็นตัววัดความแตกต่างของประชากรคำตอบที่มีลำดับเดียวกัน หรืออยู่บนเส้นขอบเขตกลุ่มผลเฉลยเดียวกัน โดยสมาชิกประชากรผลเฉลยที่มีค่าระยะห่างความหนาแน่นมากจะมีโอกาสได้รับการคัดเลือกเข้าสู่สถานที่สืบพันธุ์ (Mating Pool) มากกว่า

5.2.5 การสร้างประชากรผลเฉลยใหม่

ประชากรผลเฉลยเมื่อผ่านขั้นตอนการวัดค่าความแข็งแรงและค่าระยะห่างความหนาแน่นแล้วก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการสร้างประชากรผลเฉลยใหม่ และคัดเลือกเอาเฉพาะผลเฉลยที่ดีไว้ในรุ่นถัดไป โดยจะใช้ตัวดำเนินการทางพันธุกรรมเพื่อสร้างประชากรผลเฉลยใหม่ รายละเอียดของตัวดำเนินการทางพันธุกรรมมีดังต่อไปนี้

5.2.5.1 การสืบพันธุ์

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะคัดเลือกผลเฉลยต้นแบบเข้าสู่สถานที่สืบพันธุ์ ด้วยวิธีการคัดเลือกแบบแข่งขันเป็นคู่ (Binary Tournament Selection) ซึ่งวิธีนี้จะใช้การแข่งขันของประชากรผลเฉลย 2 ตัว โดยประชากรผลเฉลยใดที่มีค่าความแข็งแรงที่ได้จากวิธีการจัดลำดับผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำน้อยกว่า จะได้รับเลือกเข้าสู่สถานที่สืบพันธุ์ และในกรณีที่พบว่าผลเฉลยทั้งสองนั้นมีค่าความแข็งแรงเท่ากัน จะพิจารณาให้ประชากรผลเฉลยที่มีค่าระยะห่างความหนาแน่น มากกว่าได้รับเลือกเข้าสู่สถานที่สืบพันธุ์ โดยผลเฉลยที่ได้รับเลือกจะถูกคัดลอกเข้าสู่สถานที่สืบพันธุ์โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครโมโซมผลเฉลย ในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีสถานที่สืบพันธุ์ขนาด 1000 นั่นคือจะมีผลเฉลย 1000 ตัวถูกคัดเลือกมาทำการสืบพันธุ์

5.2.5.2 การไขว้เปลี่ยน

การไขว้เปลี่ยนจะนำประชากรเฉลย 1000 ผลเฉลยใน Mating Pool มาทำการไขว้เปลี่ยน โดยจะเริ่มจากการสุ่มเลือกผลเฉลยพ่อแม่ (Parents) ที่ไม่ซ้ำกัน 2 ผลเฉลยมาทำการไขว้เปลี่ยนรหัสพันธุกรรมกัน ด้วยวิธี Two-point Crossover ซึ่งจะทำให้ได้ผลเฉลยใหม่ (Children) 2 ผลเฉลยที่มีรหัสพันธุกรรมร่วมกันของผลเฉลยพ่อแม่ โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีความน่าจะเป็นในการไขว้เปลี่ยน (Probability of Crossover: P_c) เท่ากับ 0.9

5.2.5.3 การกลายพันธุ์

การกลายพันธุ์จะเริ่มจากการสุ่มเลือกผลเฉลยพ่อแม่ (Parents) มา 1 ผลเฉลยจากสถานที่สืบพันธุ์จากนั้นจะสุ่มตำแหน่งที่จะเกิดการกลายพันธุ์ เมื่อได้ตำแหน่งที่จะเกิดการกลายพันธุ์แล้ว ก็จะสุ่มเลือกผลเฉลยมาอีกหนึ่งตัว เพื่อสุ่มหารหัสพันธุกรรมที่จะนำไปแทนที่ในตำแหน่งที่จะเกิดการกลายพันธุ์ เมื่อผ่านขั้นตอนการกลายพันธุ์ก็จะทำให้ได้ผลเฉลยใหม่หนึ่งตัว ที่มีรหัสพันธุกรรมเปลี่ยนไปจากเดิม โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ (Probability of Mutation: P_m) เท่ากับ 0.1

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะดำเนินการไขว้เปลี่ยนและการกลายพันธุ์วนซ้ำไปจนกว่าจะได้ประชากรผลเฉลยใหม่จำนวน 2000 ผลเฉลย จากนั้นก็จะรวมประชากรต้นแบบเข้ากับประชากรผลเฉลยใหม่ ทำให้มีประชากรผลเฉลยรวม 4000 ผลเฉลย ซึ่งเท่ากับสองเท่าของขนาดประชากรผลเฉลย (Population Size)

เมื่อได้ประชากรผลเฉลยรวมแล้วก็จะคำนวณค่าความแข็งแรงตามวิธีการจัดลำดับผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำและค่าระยะห่างความหนาแน่นเพื่อคัดเลือกประชากรผลเฉลยไปเป็นผลเฉลยในรุ่นถัดไป โดยประชากรผลเฉลยที่มีลำดับเป็นหนึ่งในลำดับที่ 1 จะได้รับโอกาสในการคัดเลือกไปเป็นผลเฉลยในรุ่นถัดไปเป็นลำดับแรก ส่วนในลำดับอื่นๆจะได้รับโอกาสลดลงมา เมื่อพบว่าจำนวนผลเฉลยในลำดับที่พิจารณาอยู่มากกว่าจำนวนประชากรผลเฉลยที่เหลือที่จะนำไปเป็นประชากรผลเฉลยรุ่นถัดไป ก็จะใช้ระยะห่างความหนาแน่นในการคัดเลือก โดยประชากรผลเฉลยที่มีระยะห่างความหนาแน่นน้อยจะถูกตัดออกไปและคัดเลือกจนครบจำนวน 2000 ผลเฉลย

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะวนทำในขั้นตอนต่างๆดังกล่าวข้างต้นเพื่อสร้างประชากรผลเฉลยใหม่ในแต่ละรุ่น และคัดเลือกประชากรผลเฉลยที่ดีไปเป็นผลเฉลยในรุ่นถัดไป และจะดำเนินไปเรื่อยๆจนครบจำนวนรุ่นที่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีจำนวนรุ่นเท่ากับ 500 รุ่น

5.2.6 การค้นหาผลเฉลย

เมื่อขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมวิวัฒนาการกลุ่มประชากรผลเฉลยครบตามจำนวนรุ่นที่ต้องการแล้ว กลุ่มประชากรผลเฉลยในรุ่นสุดท้ายที่ได้ก็จะเป็นส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ดีที่สุดที่ได้จากขั้นตอนเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์

รายละเอียดต่างๆและพารามิเตอร์ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
ขนาดกลุ่มประชากร	2000
จำนวนรุ่น	500
ขนาด Mating Pool	1000
วิธีการไขว้เปลี่ยน	Two-point Crossver
ความน่าจะเป็นในการไขว้เปลี่ยน	0.9
ความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์	0.1

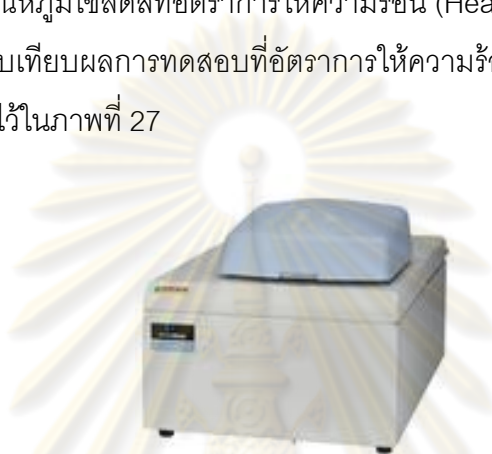
5.3 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ในการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนจำนวน 10 ส่วนผสมที่ได้จากแบบจำลองการหาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ดีที่สุดจากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์จะถูกนำมาทดสอบสมบัติของวัสดุในห้องปฏิบัติการและเปรียบเทียบกับค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลอง โดยขั้นตอนแรกของการทดสอบคือการเตรียมตัวอย่างส่วนผสมทั้ง 10 ส่วนผสม ซึ่งทำได้โดยการชั่งน้ำหนักธาตุต่างๆตามส่วนผสม แล้วนำไปหลอมรวมกันให้เป็นลวดบัดกรีอ่อนที่มีส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องหลอมแบบอาร์ค (Arc Melter) จากนั้นจึงจะนำส่วนผสมเหล่านี้ไปทดสอบสมบัติของวัสดุ โดยสมบัติที่จะทำการทดสอบแบ่งเป็น สมบัติทางความร้อนและสภาพเปียกได้

5.3.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ลวดบัดกรีอ่อนทั้ง 10 ส่วนผสมจะถูกทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) โดยเครื่อง DSC เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ชนิดหนึ่งที่จะวัดอุณหภูมิและการไหลถ่ายความร้อน (Heat Flow) จากการเปลี่ยนแปลงความร้อน (Thermal Transition) ของวัสดุเปรียบเทียบกับอุณหภูมิหรือเวลา ทำให้ได้ข้อมูลทั้งทางด้านคุณภาพและปริมาณ (Qualitative and Quantitative) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมี การเปลี่ยนแปลงนี้จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดหรือคายความร้อน (Endothermic or Exothermic Processes) หรือการเปลี่ยนแปลงความจุความร้อน (Heat Capacity Changes) ซึ่งจากหลักการนี้ทำให้สามารถวัดค่าอุณหภูมิวิกฤตและอุณหภูมิโซลิดัสของลวดบัดกรีอ่อนทั้ง 10 ส่วนผสมได้จากเครื่อง DSC

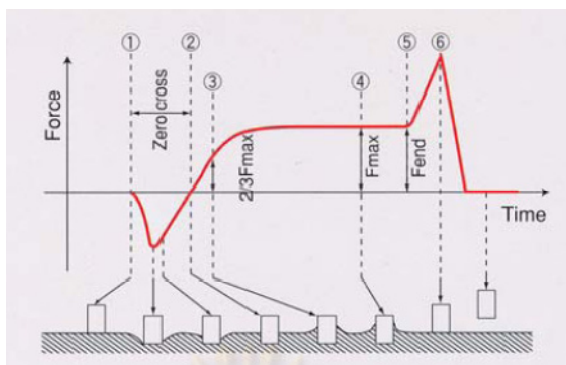
ขั้นตอนในการทดสอบจะเริ่มจากการเตรียมชิ้นลวดบัดกรีอ่อนให้มีขนาดประมาณ 10 มิลลิกรัมแล้วนำไปอัดใส่ภาชนะทดสอบ (Pan) จากนั้นจะนำเข้าเครื่อง DSC เพื่อวัดค่าอุณหภูมิวิกฤตและอุณหภูมิโซลิดัสตามต้องการ โดยที่เครื่อง DSC ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเครื่อง DSC Diamond ของบริษัท Perkin Elmer และภาชนะทดสอบที่ใช้เป็นแบบที่ใช้สำหรับทดสอบชิ้นงานที่เป็นของแข็ง ผลิตจากวัสดุที่เป็นอะลูมิเนียม นอกจากนี้ในการทดสอบจะวัดค่าอุณหภูมิวิกฤตและอุณหภูมิโซลิดัสที่อัตราการให้ความร้อน (Heating Rate) 10 °C/min และ 20 °C/min เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบที่อัตราการให้ความร้อนต่างกัน ลักษณะเครื่อง DSC ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงไว้ในภาพที่ 27



ภาพที่ 27 เครื่อง DSC ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

5.3.2 การทดสอบสภาพเปียกได้

ลวดบัดกรีอ่อนทั้ง 10 ส่วนผสมจะนำมาทดสอบสภาพเปียกได้ด้วยเครื่อง Wetting Balance โดยใช้วิธีการทดสอบแบบเม็ดกลม (Globule Test) ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบลวดบัดกรีอ่อนที่มีขนาดเล็ก โดยเครื่อง Wetting Balance เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดแรงที่เกิดขึ้นในระหว่างการจุ่มแผ่นทองแดงบาง (Copper Coupon) ลงในลวดบัดกรีอ่อนหลอมเหลว (Molten Solder) ซึ่งมีทั้งแบบที่เป็นอ่างลวดบัดกรีอ่อนหลอมเหลว (Molten Solder Bath) และที่เป็นแบบเม็ดกลม สิ่งที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง Wetting Balance คือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาในระหว่างการจุ่มแผ่นทองแดงบางลงในลวดบัดกรีอ่อนหลอมเหลว ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 28 ข้อมูลสำคัญที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์นี้คือ เวลาในการเปียก (ระยะ zero cross ในภาพที่ 28) และแรงในการเปียก (ระยะ Fmax ในภาพที่ 28)



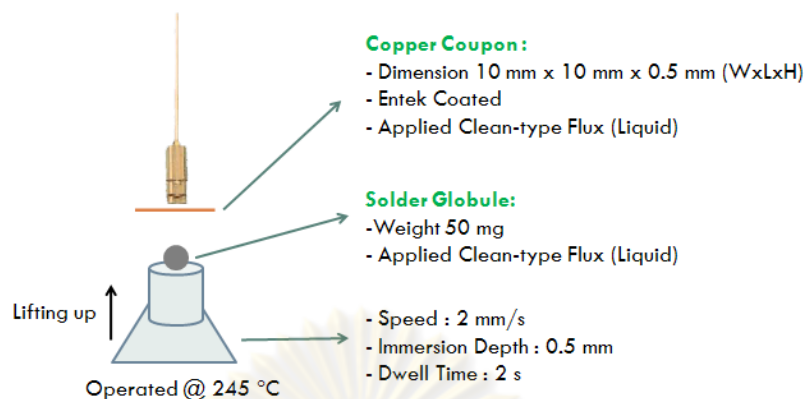
ภาพที่ 28 กราฟที่ได้จากการทดสอบสภาพเปียกได้ด้วยเครื่อง Wetting Balance

โดยการทดสอบใช้อุณหภูมิในการทดสอบที่ $245\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามมาตรฐานการทดสอบ IPC-TM-650 ลวดบัดกรีอ่อนที่ใช้ทดสอบมีน้ำหนักประมาณ 50 มิลลิกรัม แผ่นทองแดงบางที่ใช้ทดสอบมีขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร และหนา 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งแผ่นทองแดงบางที่ใช้ทดสอบจะผ่านการเคลือบน้ำยา Entek มาก่อนเพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ที่ผิวทองแดง

การทดสอบจะเริ่มจากการทาฟลักซ์ (Flux) ประเภทที่ต้องทำความสะอาดหลังใช้งาน (Clean Type) แบบของเหลวที่แผ่นทองแดง จากนั้นก็นำลวดบัดกรีอ่อนที่เตรียมไว้มาวางบนแท่นโลหะให้ความร้อน เมื่อลวดบัดกรีอ่อนหลอมเหลวแล้วก็จะหยดฟลักซ์ประเภทที่ต้องทำความสะอาดหลังใช้งานแบบของเหลวลงไปเล็กน้อย แล้วจึงเริ่มทำการทดสอบโดยตั้งค่าความลึกในการจุ่ม (Immersion Depth) เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร ความเร็วในการจุ่มเท่ากับ 2 มิลลิเมตรต่อวินาที และเวลากดค้าง (Dwell Time) เท่ากับ 2 วินาที โดยลักษณะเครื่อง Wetting Balance ที่ใช้ใน งานวิจัยนี้แสดงไว้ในภาพที่ 29 และภาพที่ 30 แสดงลักษณะการทดสอบแบบเม็ดกลม



ภาพที่ 29 เครื่อง Wetting Balance



ภาพที่ 30 ลักษณะการทดสอบแบบเม็ดกลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

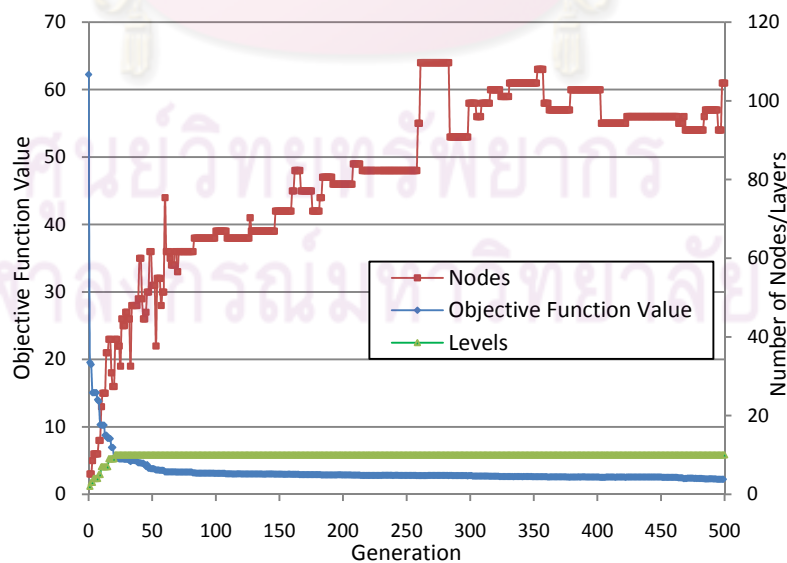
ผลการทดลอง

6.1 ผลการทำนายสมบัติของวัสดุจากกำหนดการเชิงพันธุกรรม

แบบจำลองการทำนายสมบัติของวัสดุจากกำหนดการเชิงพันธุกรรมจะใช้ข้อมูลอุณหภูมิ ลิควิดัสและอุณหภูมิโซลิดัสของลวดบัดกรีอ่อนจากการคำนวณทางอุณหพลศาสตร์ตามหลักวิธี CALPHAD จำนวน 240 ส่วนผสม และข้อมูลอุณหภูมิลิควิดัสและอุณหภูมิโซลิดัสของลวดบัดกรี อ่อนจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจำนวน 10 ส่วนผสมมาเป็นข้อมูลในการสอน โดยผลเฉลยที่ดีที่สุด ที่ได้จากแบบจำลองแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ผลเฉลยในการทำนายอุณหภูมิลิควิดัส และผลเฉลยในการทำนายอุณหภูมิโซลิดัส

6.1.1 ผลเฉลยในการทำนายอุณหภูมิลิควิดัส

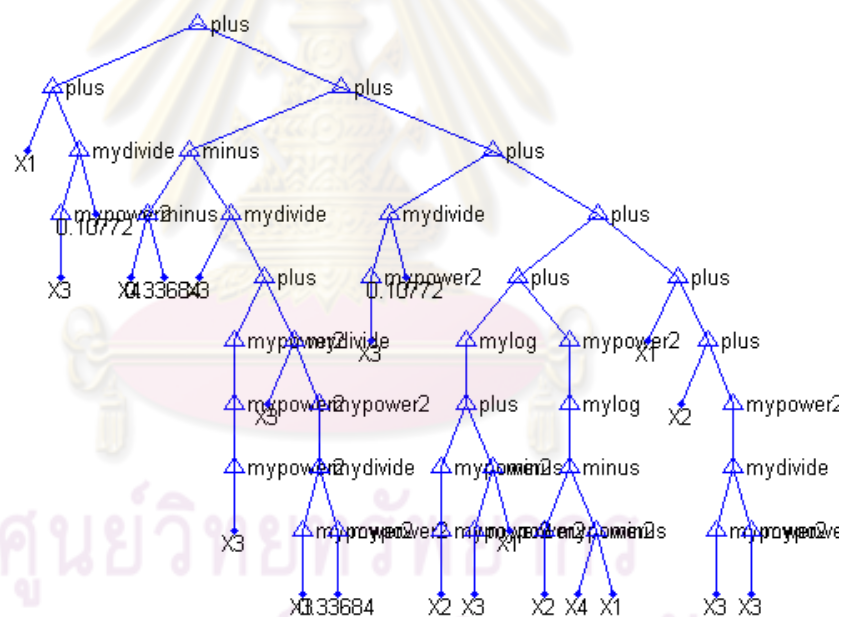
ในแต่ละรุ่นของกำหนดการเชิงพันธุกรรม ประชากรผลเฉลยจำนวน 200 ผลเฉลย จะถูกคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามสมการที่ 13 และวัดขนาดของโครงสร้างต้นไม้ ประชากรผลเฉลยที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อย และมีขนาดโครงสร้างต้นไม้ที่เล็กก็จะมีโอกาสอยู่รอดในรุ่นต่อไปได้มากกว่า เมื่อผ่านกระบวนการวิวัฒนาการจนครบ 500 รุ่น ก็จะได้ผลเฉลยที่ดีที่สุดในการทำนายอุณหภูมิลิควิดัส โดยค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และขนาดโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละรุ่นแสดงได้ดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และขนาดโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยในการทำนายอุณหภูมิลิควิดัสในแต่ละรุ่น

เมื่อพิจารณาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และขนาดโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยเฉลี่ยในแต่ละรุ่นจะพบว่า ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะลดลงอย่างรวดเร็วในรุ่นที่ 1 ถึงรุ่นที่ 50 และจะค่อยๆ ลดอัตราการลดลงของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ลงจนเกือบจะไม่เปลี่ยนแปลงในรุ่นที่ 100 ถึงรุ่นที่ 500 ในทางกลับกันขนาดโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยจะโตขึ้นอย่างรวดเร็วในรุ่นแรกๆ โดยความสูงของต้นไม้จะโตถึงระดับความสูงต้นไม้สูงสุดในรุ่นที่ 32 และมีปริมาณโหนดถึง 40 โหนดใน 100 รุ่นแรกของการวิวัฒนาการ ซึ่งเป็นลักษณะที่แสดงให้เห็นถึงการลู่เข้า (Convergence) ของผลเฉลยในประชากรผลเฉลย

โดยผลเฉลยที่ดีที่สุดในการทำนายอนุกรมมิลิคิวิตส์ที่ได้จากกำหนดการแข่งขันพันธุกรรมในรุ่นที่ 500 มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (ค่า RMSE) เท่ากับ 2.3347 มีโครงสร้างต้นไม้ที่มีความสูง 10 ระดับ และมีจำนวนโหนดเท่ากับ 61 โหนด โดยลักษณะโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยที่ใช้ทำนายอนุกรมมิลิคิวิตส์แสดงไว้ในภาพที่ 32



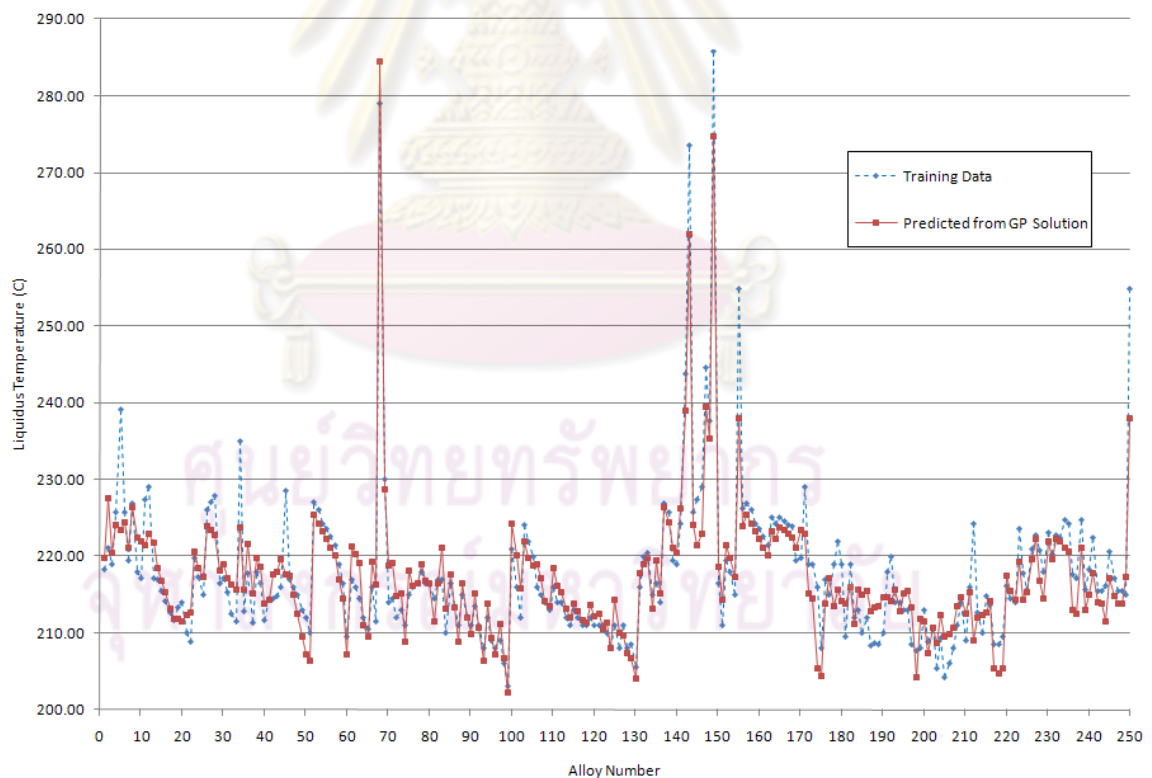
ภาพที่ 32 โครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยในการทำนายอนุกรมมิลิคิวิตส์

โครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยในการทำนายอนุกรมมิลิคิวิตส์ในภาพที่ 32 สามารถแสดงให้อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ตามสมการที่ 15

$$\begin{aligned}
 \text{Liquidus Temperature} = & 0.6631 + 2X_1 + X_2 + X_4 + 18.5667X_3^2 \\
 & + \text{Log}[X_1 + X_2^2 - X_4]^2 + \text{Log}[-X_1 + X_2^4 + X_3^2] \\
 & - \frac{X_3^4}{0.0129 + X_3^{11}}
 \end{aligned} \tag{15}$$

- โดย X_1 = เปอร์เซนต์ส่วนผสมโดยมวลของดีบุกในลวดบัดกรีอ่อน
 X_2 = เปอร์เซนต์ส่วนผสมโดยมวลของเงินในลวดบัดกรีอ่อน
 X_3 = เปอร์เซนต์ส่วนผสมโดยมวลของทองแดงในลวดบัดกรีอ่อน
 X_4 = เปอร์เซนต์ส่วนผสมโดยมวลของบิสมัทในลวดบัดกรีอ่อน
 X_5 = เปอร์เซนต์ส่วนผสมโดยมวลของอินเดียมในลวดบัดกรีอ่อน

และเมื่อนำค่าอุณหภูมิวิกฤตที่ทำนายได้จากผลเฉลยที่ได้จากกำหนดการเชิงพันธุกรรมนี้มาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิวิกฤตของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนจำนวน 250 ส่วนจากข้อมูลที่ใช้ในการสอน จะได้ผลการเปรียบเทียบดังภาพที่ 33

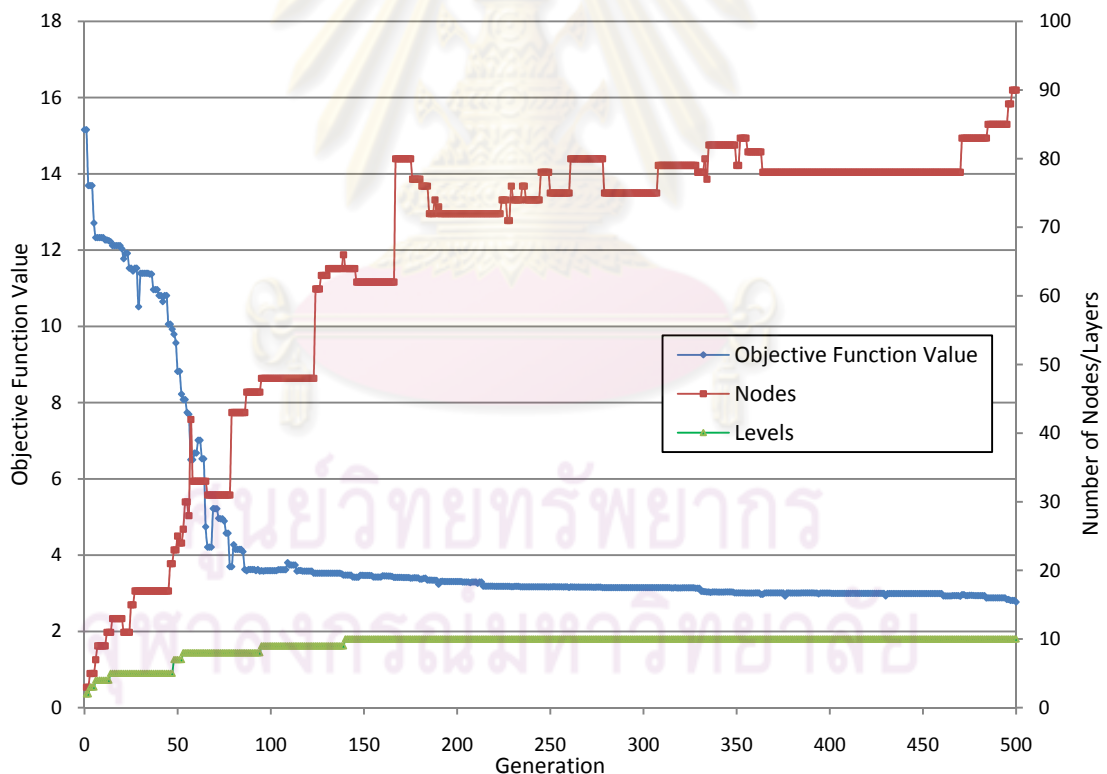


ภาพที่ 33 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิวิกฤตที่ทำนายได้กับข้อมูลที่ใช้ในการสอน

โดยเมื่อทำการคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายได้กับค่าจากข้อมูลในการสอนในภาพที่ 33 ด้วยวิธีการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (R-square) เท่ากับ 0.8644 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการมีความสัมพันธ์กันในระดับที่ดีของค่าที่ทำนายได้กับค่าจากข้อมูลในการสอน

6.1.2 ผลเฉลยในการทำนายอุณหภูมิโซลิดัส

ในแต่ละรุ่นของการกำหนดการเชิงพันธุกรรม ประชากรผลเฉลยจำนวน 200 ผลเฉลยจะถูกคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และวัดขนาดของโครงสร้างต้นไม้ ประชากรผลเฉลยที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อย และมีขนาดโครงสร้างต้นไม้ที่เล็กก็จะมีโอกาสอยู่รอดในรุ่นต่อไปได้มากกว่า เมื่อผ่านกระบวนการวิวัฒนาการจนครบ 500 รุ่น ก็จะได้ผลเฉลยที่ดีที่สุดในการทำนายอุณหภูมิโซลิดัส โดยค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และขนาดโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละรุ่นแสดงได้ดังภาพที่ 34

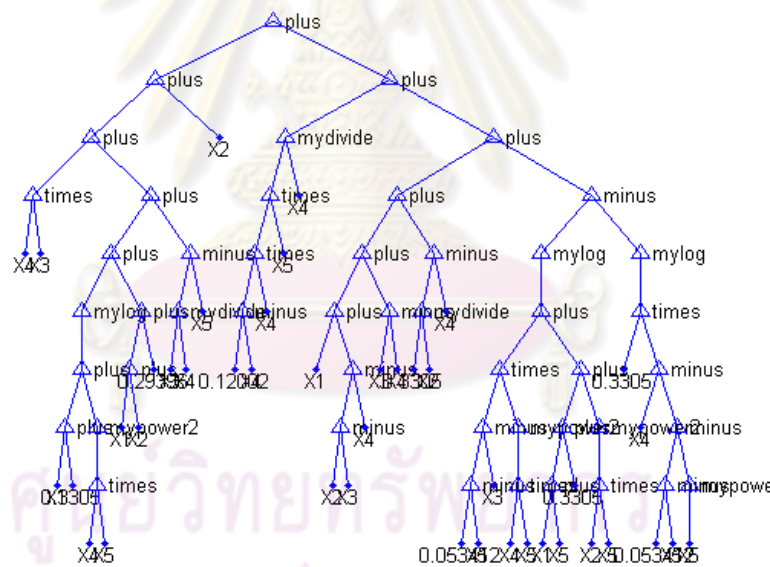


ภาพที่ 34 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และขนาดโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยในการทำนายอุณหภูมิโซลิดัสในแต่ละรุ่น

เมื่อพิจารณาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และขนาดโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยเฉลี่ยในแต่ละรุ่น พบว่า ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะค่อยๆ ลดลงจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 15 ในรุ่นแรก

มาเป็นค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 10 ในรุ่นที่ 50 โดยที่ขนาดของโครงสร้างต้นไม้ยังมีการเปลี่ยนแปลงไปไม่มากนัก แต่หลังจากนั้นขนาดของโครงสร้างต้นไม้จะเพิ่มขนาดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะจำนวนโหนดภายในต้นไม้ที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก จนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เฉลี่ยของผลเฉลยลดลงมาอยู่ที่ 5 จากนั้นอัตราการลดลงของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ก็จะค่อยๆลดลงจนเกือบจะไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่เดียวกันขนาดโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยจะค่อยๆเพิ่มขนาดความสูงของต้นไม้ขึ้นจนถึงระดับความสูงต้นไม้สูงสุด (ระดับความสูง 10) ในรุ่นที่ 187 ในส่วนของปริมาณโหนดในโครงสร้างต้นไม้เมื่อมีจำนวนโหนดประมาณ 80 โหนดแล้วจึงค่อยลดระดับอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณโหนดลงจนถึง 88 โหนดในรุ่นสุดท้าย

โดยผลเฉลยที่ดีที่สุดในการทำนายอุณหภูมิซิลิคัสที่ได้จากกำหนดการเชิงพันธุกรรมได้จากประชากรผลเฉลยในรุ่นที่ 500 โดยมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (ค่า RMSE) เท่ากับ 1.7109 มีโครงสร้างต้นไม้ที่มีความสูง 10 ระดับ และมีจำนวนโหนดเท่ากับ 90 โหนด โดยลักษณะโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยแสดงไว้ในภาพที่ 35



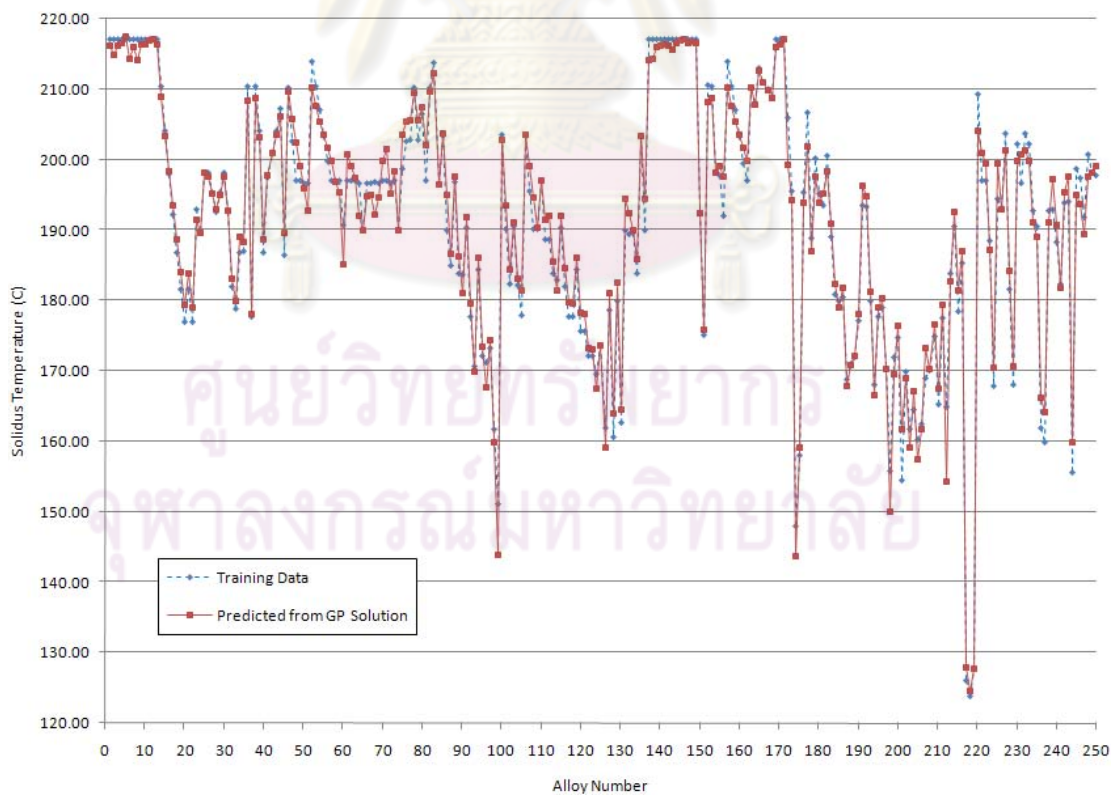
ภาพที่ 35 โครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยในการทำนายอุณหภูมิซิลิคัส

โครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยในการทำนายอุณหภูมิซิลิคัสในภาพที่ 35 สามารถแสดงในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ตามสมการที่ 16

$$\begin{aligned}
 \text{Solidus Temperature} = & 0.2940 + 2X_1 + \frac{0.3305}{X_2} + 3X_2 + \frac{X_3}{X_4} - 3X_4 + X_3X_4 - X_4X_5 \\
 & - 0.8800X_5 - \text{Log}[0.3305(-0.0534 + X_4 + X_5 + X_5^2)] \\
 & + \text{Log}[|0.3305 + X_1 + X_4^2X_5^2|] + \text{Log}[0.3305 + X_1 + X_5 \\
 & + X_2^2X_5^2 + X_4^2(0.0534 - X_3 - X_5)X_5^2|] \quad (16)
 \end{aligned}$$

- โดย X_1 = เปอร์เซนต์ส่วนผสมโดยมวลของดีบุกในลวดบัดกรีอ่อน
 X_2 = เปอร์เซนต์ส่วนผสมโดยมวลของเงินในลวดบัดกรีอ่อน
 X_3 = เปอร์เซนต์ส่วนผสมโดยมวลของทองแดงในลวดบัดกรีอ่อน
 X_4 = เปอร์เซนต์ส่วนผสมโดยมวลของบิสมีทในลวดบัดกรีอ่อน
 X_5 = เปอร์เซนต์ส่วนผสมโดยมวลของอินเดียมในลวดบัดกรีอ่อน

และเมื่อนำค่าอุณหภูมิซิลิเดสที่ทำนายได้จากผลเฉลยที่ได้จากกำหนดการเชิงฟังก์ชันนี้มาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิซิลิเดสของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนจำนวน 250 ส่วนจากข้อมูลที่ใช้ในการสอน จะได้ผลการเปรียบเทียบดังภาพที่ 36



ภาพที่ 36 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิซิลิเดสที่ทำนายได้กับข้อมูลที่ใช้ในการสอน

โดยเมื่อทำการคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายได้กับค่าจากข้อมูลในการสอนในภาพที่ 36 ด้วยวิธีการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นพบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (R-square) เท่ากับ 0.9807 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการมีความสัมพันธ์กันในระดับที่ดีมากของค่าที่ทำนายได้กับค่าจากข้อมูลในการสอน

ประสิทธิภาพในการทำนายอุณหภูมิวิกฤตและอุณหภูมิโซลิดัสจากกระบวนการเชิงพันธุกรรมเทียบกับค่าจากข้อมูลในการสอนของลวดบัดกรีอ่อนจำนวน 250 ส่วนผสม สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 9

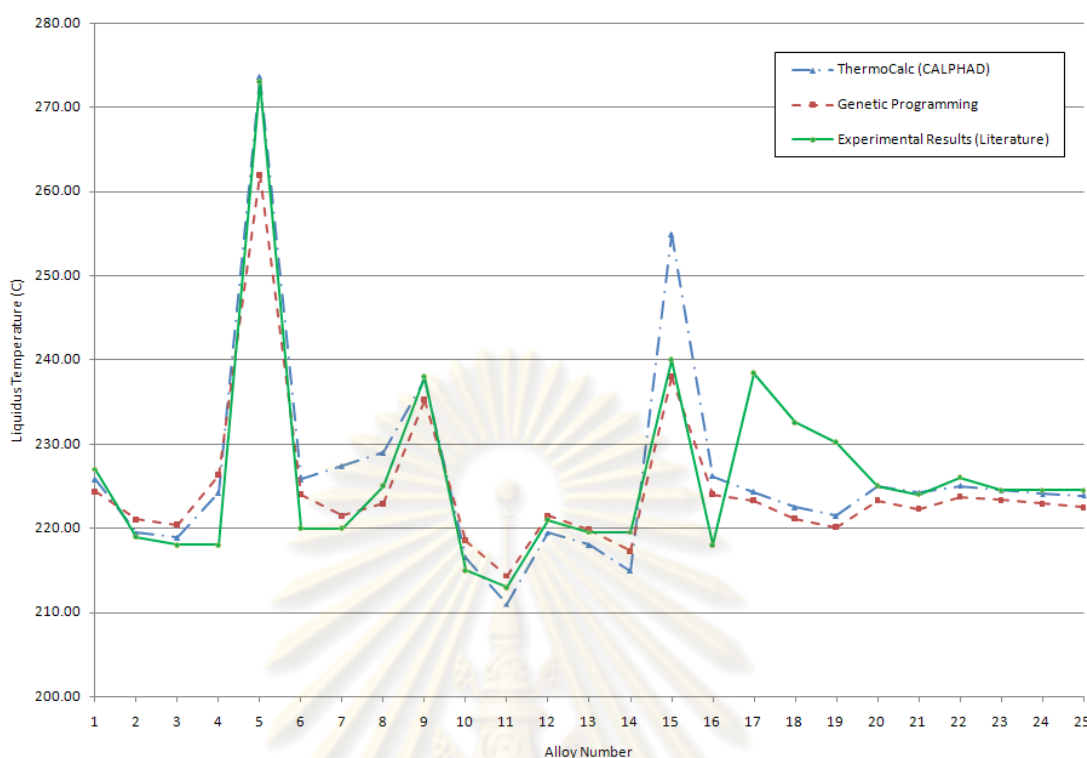
ตารางที่ 9 ประสิทธิภาพในการทำนายของกำหนดการเชิงพันธุกรรมเทียบกับข้อมูลในการสอน

สมบัติของวัสดุ ที่ทำนาย	ประสิทธิภาพในการทำนาย	
	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (= ค่า RMSE)	ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย
อุณหภูมิวิกฤต	2.3347	0.8644
อุณหภูมิโซลิดัส	1.7109	0.9807

6.2 การเปรียบเทียบผลการทำนายสมบัติของวัสดุจากกำหนดการเชิงพันธุกรรมกับชุดข้อมูลทดสอบจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำในการทำนายสมบัติของวัสดุจากกำหนดการเชิงพันธุกรรม ข้อมูลอุณหภูมิวิกฤตและอุณหภูมิโซลิดัสที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจำนวน 25 ส่วนผสม (รายละเอียดในภาคผนวก ข) จะถูกใช้เป็นชุดข้อมูลทดสอบในงานวิจัยนี้ โดยผลการทำนายอุณหภูมิวิกฤตและอุณหภูมิโซลิดัสที่ได้จากผลเฉลยของกำหนดการเชิงพันธุกรรมจะถูกนำมาหาประสิทธิภาพในการทำนายเทียบกับวิธีการคำนวณทางอุณหพลศาสตร์ตามหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc ด้วย

ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทำนายอุณหภูมิวิกฤตที่ได้จากกำหนดการเชิงพันธุกรรม เทียบกับชุดข้อมูลทดสอบที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเทียบกับผลการคำนวณทางอุณหพลศาสตร์ตามหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc แสดงไว้ในภาพที่ 37

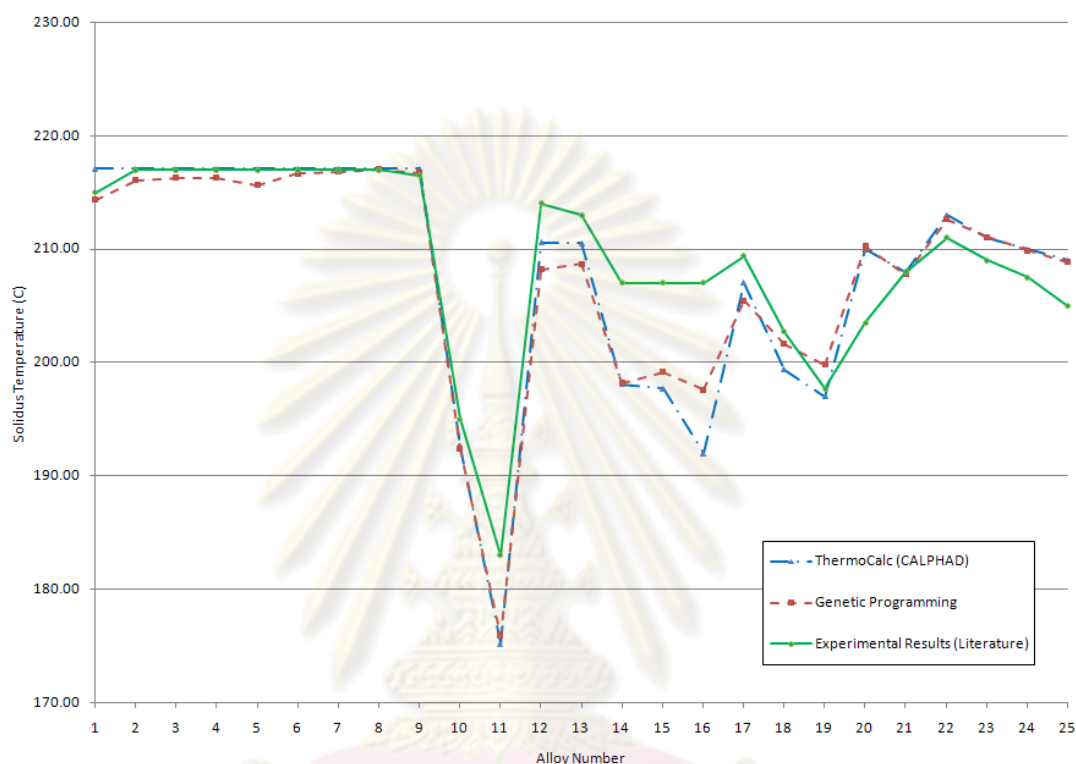


ภาพที่ 37 ผลการทำนายอุณหภูมิหลอมที่ได้จากการเชิงพันธุกรรมเทียบกับชุดข้อมูลทดสอบจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc

จากภาพที่ 37 จะพบว่า อุณหภูมิหลอมที่ทำนายได้จากการเชิงพันธุกรรมมีทิศทางไปในทางเดียวกันกับชุดข้อมูลทดสอบ และข้อมูลที่คำนวณได้จากหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc โดยเมื่อหาความแม่นยำของการทำนายจากการเชิงพันธุกรรมเทียบกับชุดข้อมูลทดสอบด้วยวิธี Root Mean Square Error (RMSE) จะได้ค่า RMSE เท่ากับ 4.9260 ซึ่งมีความแม่นยำมากกว่าการคำนวณตามหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc ซึ่งจะมีค่า RMSE เท่ากับ 5.1390 เมื่อเทียบกับชุดข้อมูลทดสอบ

นอกจากนั้นเมื่อทำการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายได้จากการเชิงพันธุกรรมกับชุดข้อมูลทดสอบด้วยวิธีการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (R-square) เท่ากับ 0.8160 ซึ่งแสดงถึงการมีความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ดี และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยที่ได้จากการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณตามหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc กับชุดข้อมูลทดสอบ จะพบว่า สัมประสิทธิ์การถดถอยของหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc กับชุดข้อมูลทดสอบ มีค่าเพียง 0.7883

ในส่วนของผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทำนายอุณหภูมิโซลิดัสที่ได้จากกำหนดการเชิงพันธุกรรม เทียบกับชุดข้อมูลทดสอบที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเทียบกับผลการคำนวณทางอุณหพลศาสตร์ตามหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc แสดงไว้ในภาพที่ 38



ภาพที่ 38 ผลการทำนายอุณหภูมิโซลิดัสที่ได้จากกำหนดการเชิงพันธุกรรมเทียบกับชุดข้อมูลทดสอบจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc

จากภาพที่ 38 จะพบว่า อุณหภูมิโซลิดัสที่ทำนายได้จากกำหนดการเชิงพันธุกรรมมีทิศทางไปในทางเดียวกันกับชุดข้อมูลทดสอบ และข้อมูลที่คำนวณได้จากหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc โดยสามารถทำนายค่าอุณหภูมิโซลิดัสผิดพลาดไปจากชุดข้อมูลทดสอบไม่เกิน 10 °C เมื่อหาความแม่นยำของการทำนายจากกำหนดการเชิงพันธุกรรมเทียบกับชุดข้อมูลทดสอบด้วยวิธี Root Mean Square Error (RMSE) จะได้ค่า RMSE เท่ากับ 3.6898 ซึ่งมีความแม่นยำมากกว่าการคำนวณตามหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc ซึ่งจะมีค่า RMSE เท่ากับ 4.2190 เมื่อเทียบกับชุดข้อมูลทดสอบ

นอกจากนั้นเมื่อทำการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายได้จากกำหนดการเชิงพันธุกรรมกับชุดข้อมูลทดสอบด้วยวิธีการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์การ

ถดถอย (R-square) เท่ากับ 0.8403 ซึ่งแสดงถึงการมีความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ดี และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยที่ได้จากการวิธีการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณตามหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc กับชุดข้อมูลทดสอบ จะพบว่า สัมประสิทธิ์การถดถอยของหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc กับชุดข้อมูลทดสอบ มีค่าใกล้เคียงกันคือ 0.8294

สามารถสรุปผลการหาประสิทธิภาพในการทำนายอุณหภูมิวิกฤตและอุณหภูมิโซลิดัสของกำหนดการเชิงพหุกรรมเทียบกับชุดข้อมูลทดสอบ และการหาประสิทธิภาพในการคำนวณค่าอุณหภูมิวิกฤตและอุณหภูมิโซลิดัสของหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc เทียบกับชุดข้อมูลทดสอบ ได้ดังตารางที่ 10

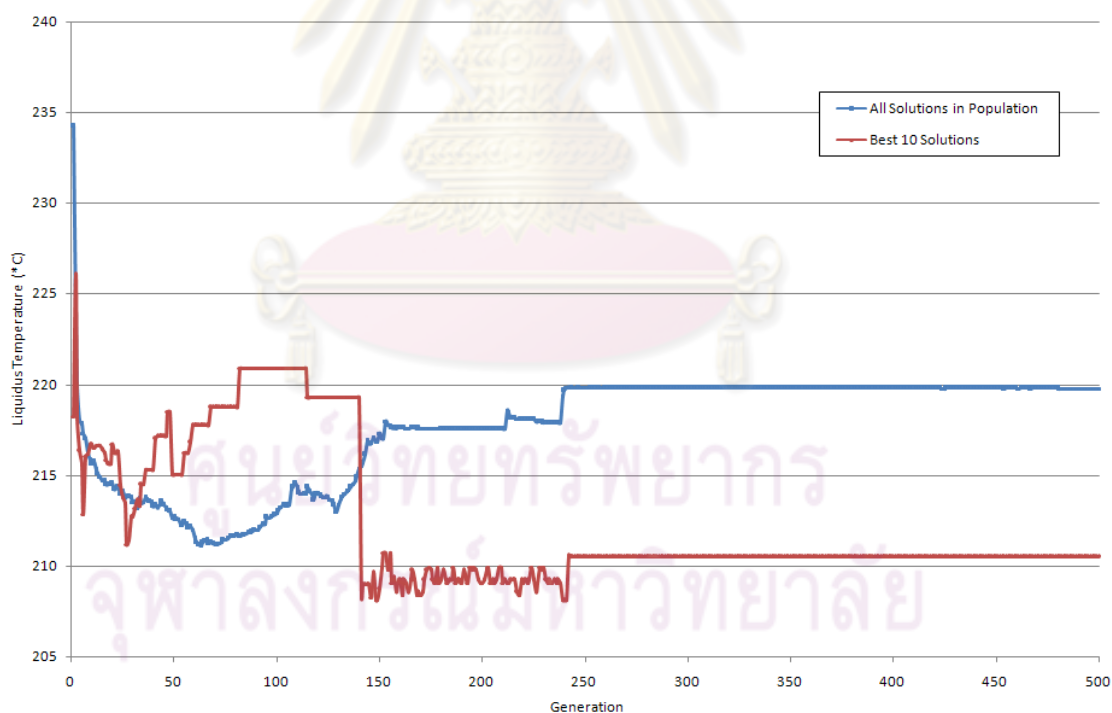
ตารางที่ 10 ประสิทธิภาพในการทำนายอุณหภูมิวิกฤตและอุณหภูมิโซลิดัสของกระบวนการเชิงพหุกรรมเทียบกับชุดข้อมูลทดสอบ

ชุดข้อมูลทดสอบจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเทียบกับ	อุณหภูมิวิกฤต		อุณหภูมิโซลิดัส	
	RMSE	R-Square	RMSE	R-Square
ค่าที่ทำนายได้จากกระบวนการเชิงพหุกรรม	4.9260	0.8160	3.6898	0.8403
ค่าที่คำนวณได้ตามหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc	5.1390	0.7883	4.2190	0.8294

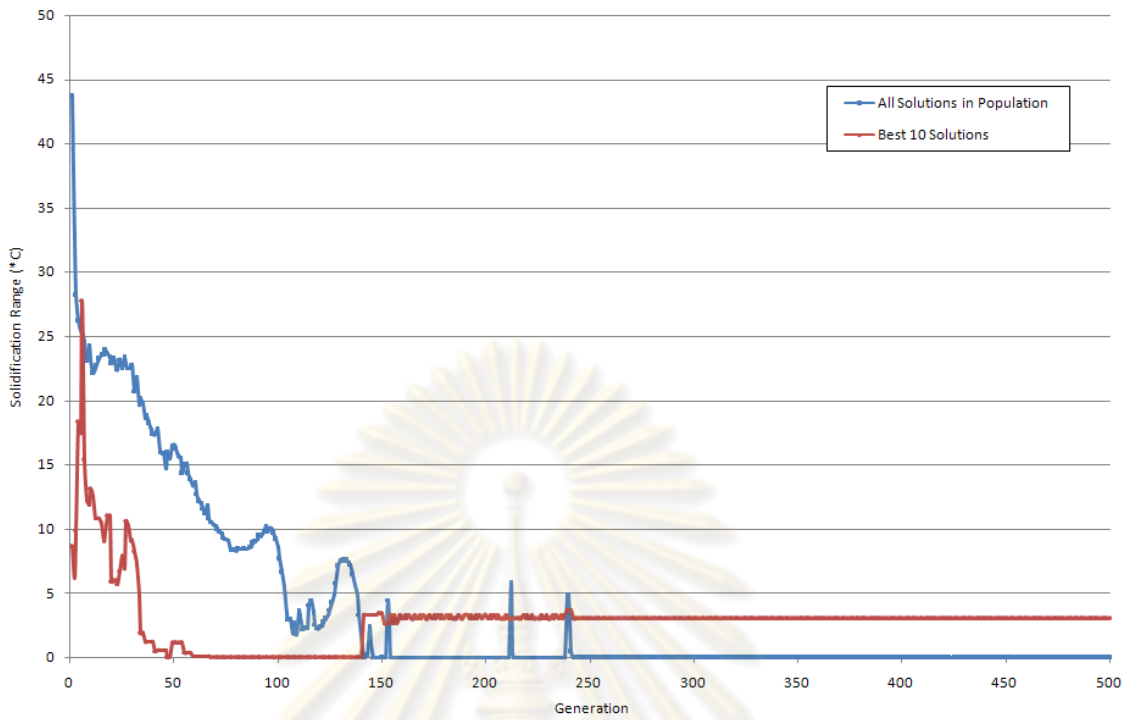
จากผลการหาประสิทธิภาพในการทำนายของแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 10 ทำให้สรุปได้ว่า กำหนดการเชิงพหุกรรมมีประสิทธิภาพที่ดีในการทำนายอุณหภูมิวิกฤตและอุณหภูมิโซลิดัสของลวดบัดกรีอ่อน โดยผลการทำนายมีทิศทางเดียวกันกับค่าที่วัดได้จริงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และให้ผลการทำนายที่ไม่แย่ไปกว่าค่าที่คำนวณได้จากหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc แต่สามารถทำการคำนวณหาค่าได้อย่างรวดเร็ว ทั้งยังครอบคลุมช่วงส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ต้องการ ดังนั้นจึงเหมาะที่จะนำผลเฉลยที่ได้จากกำหนดการเชิงพหุกรรมนี้ไปใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนปลอดภัยที่ดีที่สุดจากขั้นตอนวิธีเชิงพหุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์ต่อไป

6.3 ผลการหาค่าส่วนผสมลดบัดกรีอ่อนที่ดีที่สุดจากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์

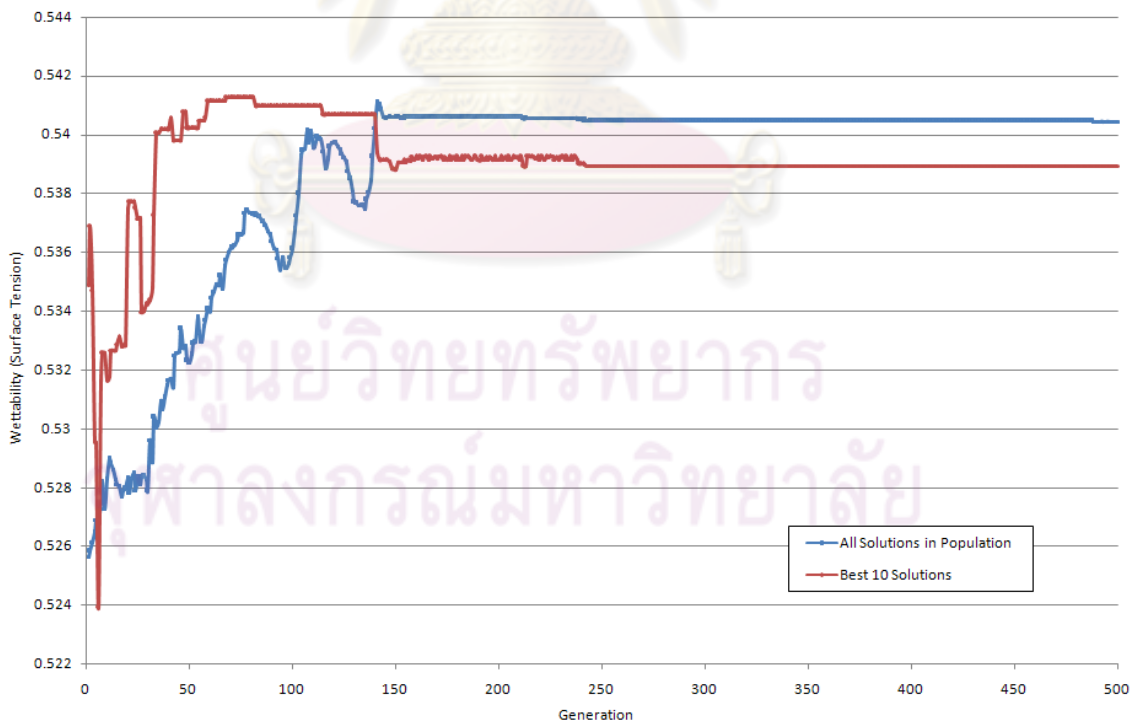
ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์จะมีการวิวัฒนาการในแต่ละรุ่นที่ผ่านไป โดยค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรผลเฉลี่ยในแต่ละวัตถุประสงค์จะมีแนวโน้มที่ดีขึ้น จนเมื่อการวิวัฒนาการสิ้นสุดลง ก็จะบรรลุดตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการจะหาส่วนผสมลดบัดกรีอ่อนที่มีสมบัติของวัสดุที่ดีที่สุดในทุกด้านคุณสมบัติควิตัส ช่วงการแข็งตัว และสภาพเปียกได้ เพื่อแสดงให้เห็นถึงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในแต่ละวัตถุประสงค์ที่เปลี่ยนไปในแต่ละรุ่นของประชากรผลเฉลี่ย ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เฉลี่ยของประชากรผลเฉลี่ยทั้งรุ่นจึงถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เฉลี่ยของประชากรผลเฉลี่ยที่ดีที่สุดในรอบ 10 ผลเฉลี่ย (10 ลำดับแรกของการจัดลำดับด้วยวิธี Non-Dominated Sorting) โดยจะแสดงการเปรียบเทียบแยกตามวัตถุประสงค์คือ คุณสมบัติควิตัส ช่วงการแข็งตัว และสภาพเปียกได้ ผลการเปรียบเทียบแสดงไว้ในภาพที่ 39 ภาพที่ 40 และภาพที่ 41 ตามลำดับ



ภาพที่ 39 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เฉลี่ยของคุณสมบัติควิตัสในแต่ละรุ่นของการวิวัฒนาการ



ภาพที่ 40 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เฉลี่ยของช่วงการแข็งตัวในแต่ละรุ่นของการวิวัฒนาการ

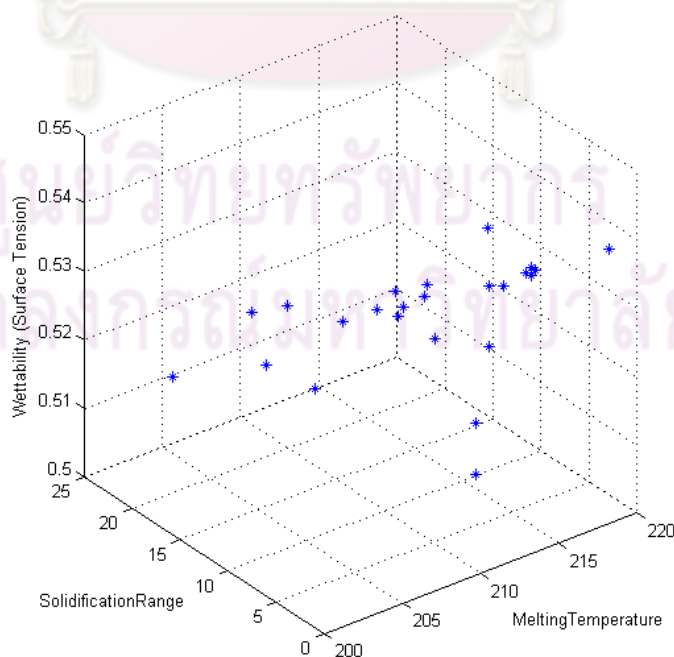


ภาพที่ 41 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เฉลี่ยของสภาพเปียกได้ในแต่ละรุ่นของการวิวัฒนาการ

จะเห็นได้จากภาพที่ 39-41 ว่าการวิวัฒนาการของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์จะเกิดขึ้นอย่างมากในรุ่นแรกๆของการวิวัฒนาการ โดยจะเห็นถึงความสัมพันธ์กันในแต่ละวัตถุประสงค์ของปัญหาการหาค่าส่วนผสมลดบัดกรีอ่อนที่ดีที่สุด คือ เมื่ออุณหภูมิคิวิตลดลงจะทำให้ช่วงการแข็งตัวกว้างขึ้น และสภาพเป็ยกได้แย่ง (ค่าสูงขึ้น) ดังนั้นจึงพบลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เฉลี่ยของอุณหภูมิคิวิตในบางรุ่นของการวิวัฒนาการเพื่อปรับให้ผลเฉลยที่ได้มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของช่วงการแข็งตัว และสภาพเป็ยกได้ดีด้วย ในขณะที่เดียวกันค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของช่วงการแข็งตัวก็จะปรับตัวสูงขึ้นเล็กน้อยตั้งแต่นที่ 150 เพื่อปรับให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของอุณหภูมิคิวิตดีขึ้น ในส่วนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสภาพเป็ยกได้จะมีแนวโน้มการปรับขึ้น-ลงของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สลับกันไปมาในแต่ละรุ่นของการวิวัฒนาการที่ผ่านไป

นอกจากนั้นยังพบว่าประชากรผลเฉลยทั้ง 2000 ผลเฉลยจะสามารถรักษาความแตกต่างภายในประชากรผลเฉลยได้จนถึงรุ่นที่ 250 ของการวิวัฒนาการ ซึ่งตั้งแต่นที่ไปจนถึงรุ่นสุดท้ายของการวิวัฒนาการ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เฉลี่ยทั้งประชากรผลเฉลยและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เฉลี่ยของผลเฉลย 10 ลำดับแรกจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในแต่ละวัตถุประสงค์

เมื่อนำข้อมูลค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในแต่ละวัตถุประสงค์ของประชากรผลเฉลย 25 ลำดับแรกในรุ่นสุดท้ายของการวิวัฒนาการ (รุ่นที่ 500) มาแสดงในปริภูมิวัตถุประสงค์ (Objective Space) จะได้ดังภาพที่ 42



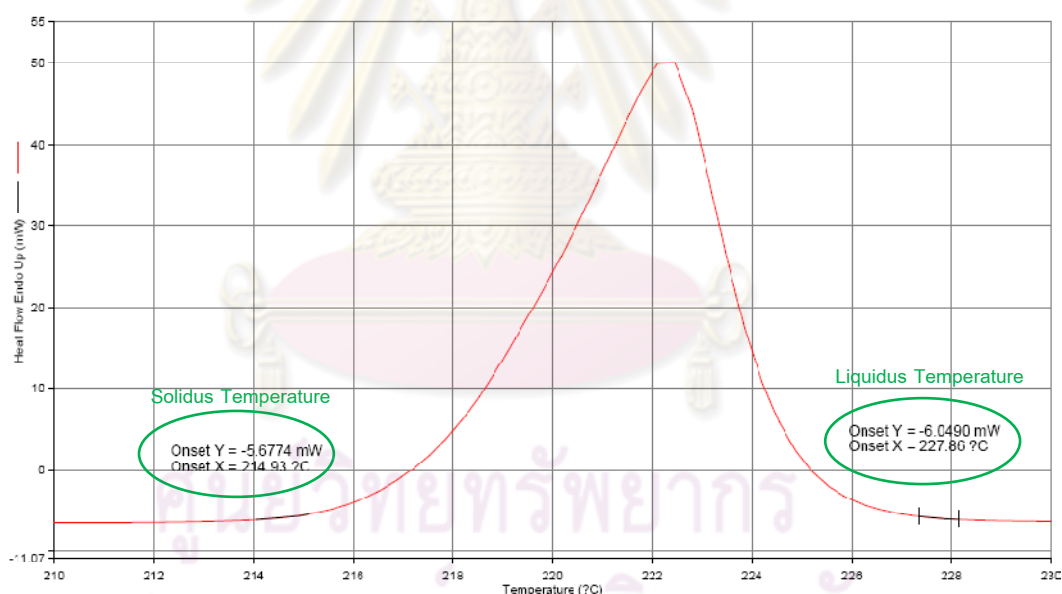
ภาพที่ 42 ปริภูมิวัตถุประสงค์ของผลเฉลย 25 ลำดับแรกในรุ่นสุดท้ายของการวิวัฒนาการ

จากการวิวัฒนาการจำนวน 500 รุ่นของแบบจำลองการหาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ดีที่สุดจากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์ทำให้ได้ผลเฉลยหรือส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ต้องการ และเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง ส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนจำนวน 10 ส่วนผสมที่ได้จากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์ในรุ่นที่ 500 จึงถูกเลือกขึ้นมาเพื่อนำไปทดสอบสมบัติของวัสดุในห้องปฏิบัติการ

6.4 ผลการทดสอบสมบัติของวัสดุของลวดบัดกรีอ่อน

การทดสอบสมบัติของวัสดุของลวดบัดกรีอ่อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนการทดสอบสมบัติทางความร้อน และส่วนการทดสอบสภาพเปียกได้

ในส่วนของการทดสอบทางความร้อนจะนำชิ้นงานทดสอบลวดบัดกรีอ่อนทั้ง 10 ส่วนผสมไปทดสอบด้วยเครื่อง DSC ซึ่งผลการทดสอบจะได้กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนต่อเวลา ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 43



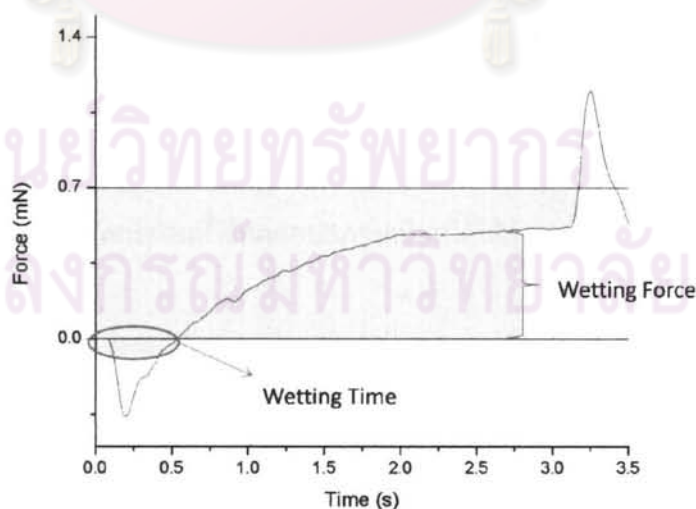
ภาพที่ 43 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC

จากภาพที่ 43 จะสามารถวิเคราะห์ผลได้อุณหภูมิติดตัวเท่ากับ 227.86°C และอุณหภูมิไฮลิตัสเท่ากับ 214.93°C เมื่อทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC ของลวดบัดกรีอ่อนทั้ง 10 ส่วนผสมจะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ใช้ทดสอบ

รหัส ส่วนผสม	อุณหภูมิควิตัส (°C)		อุณหภูมิโซลิตัส (°C)	
	อัตราการให้ความร้อน	อัตราการให้ความร้อน	อัตราการให้ความร้อน	อัตราการให้ความร้อน
	10°C/min	20°C/min	10°C/min	20°C/min
SACIB-01	224.97	227.86	216.02	214.93
SACIB-02	222.69	222.24	209.16	209.70
SACIB-03	224.05	227.30	213.73	211.01
SACIB-04	221.00	224.12	211.25	209.99
SACIB-05	219.04	221.55	207.14	207.73
SACIB-06	217.14	219.96	205.99	205.51
SACIB-07	217.70	220.44	203.74	202.03
SACIB-08	217.62	222.55	198.01	197.76
SACIB-09	216.68	219.89	207.73	207.02
SACIB-10	216.00	220.36	205.74	205.44

ในส่วนของการทดสอบสภาพเปียกได้ของลวดบัดกรีอ่อน จะนำไปส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อน ทั้ง 10 ส่วนผสมไปทดสอบด้วยเครื่อง Wetting Balance แบบวิธีเม็ดกลม ซึ่งผลการทดสอบจะได้เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ มีลักษณะดังภาพที่ 44



ภาพที่ 44 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์สภาพเปียกได้ด้วยเครื่อง Wetting Balance

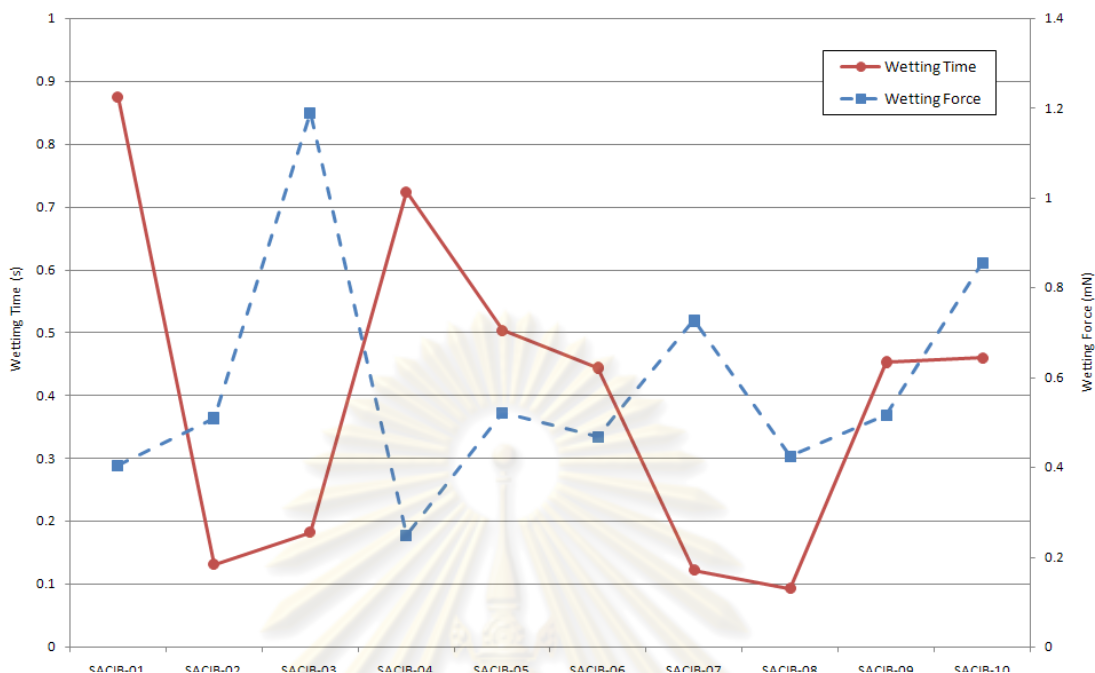
จากภาพที่ 44 จะสามารถวิเคราะห์ผลได้เวลาในการเปียกและแรงในการเปียกของลวดบัดกรีอ่อนที่ส่วนผสมหนึ่งๆได้ เช่น ในภาพที่ 44 ลวดบัดกรีอ่อนนี้จะมีค่าเวลาในการเปียก เท่ากับ 0.453 วินาที และมีแรงในการเปียกเท่ากับ 0.517 มิลลินิวตัน

เมื่อทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบสภาพเปียกได้ด้วยเครื่อง Wetting Balance แบบวิธีเม็ดกลมของลวดบัดกรีอ่อนทั้ง 10 ส่วนผสมที่อุณหภูมิ 245°C จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบสภาพเปียกได้ของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ใช้ทดสอบ

รหัสส่วนผสม	สภาพเปียกได้ที่อุณหภูมิ 245°C	
	เวลาในการเปียก (s)	แรงในการเปียก (mN)
SACIB-01	0.875	0.405
SACIB-02	0.131	0.510
SACIB-03	0.182	1.189
SACIB-04	0.723	0.249
SACIB-05	0.503	0.521
SACIB-06	0.444	0.468
SACIB-07	0.121	0.727
SACIB-08	0.093	0.424
SACIB-09	0.453	0.517
SACIB-10	0.459	0.856

จากตารางที่ 12 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาในการเปียกกับแรงในการเปียกของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ใช้ทดสอบสภาพเปียกได้ดังภาพที่ 45



ภาพที่ 45 เวลาในการเปียกเทียบกับแรงในการเปียกของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ใช้ทดสอบ

เมื่อทำการคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเปียกกับแรงในการเปียกของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนทั้ง 10 ส่วนผสม พบว่า ไม่มีความสัมพันธ์กันของข้อมูล โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยจากวิธีการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น เท่ากับ 0.2065 และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบ Pearson เท่ากับ -0.4544

เนื่องจากผลของปัจจัยอื่นที่ส่งผลอย่างมากต่อการวัดค่าแรงในการเปียกในการทดลอง อาทิ พื้นที่สัมผัสระหว่างลวดบัดกรีอ่อนหลอมเหลวกับแผ่นทองแดงบาง ชนิดของฟลักซ์ที่ใช้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะสนใจที่เวลาในการเปียกเป็นสำคัญ

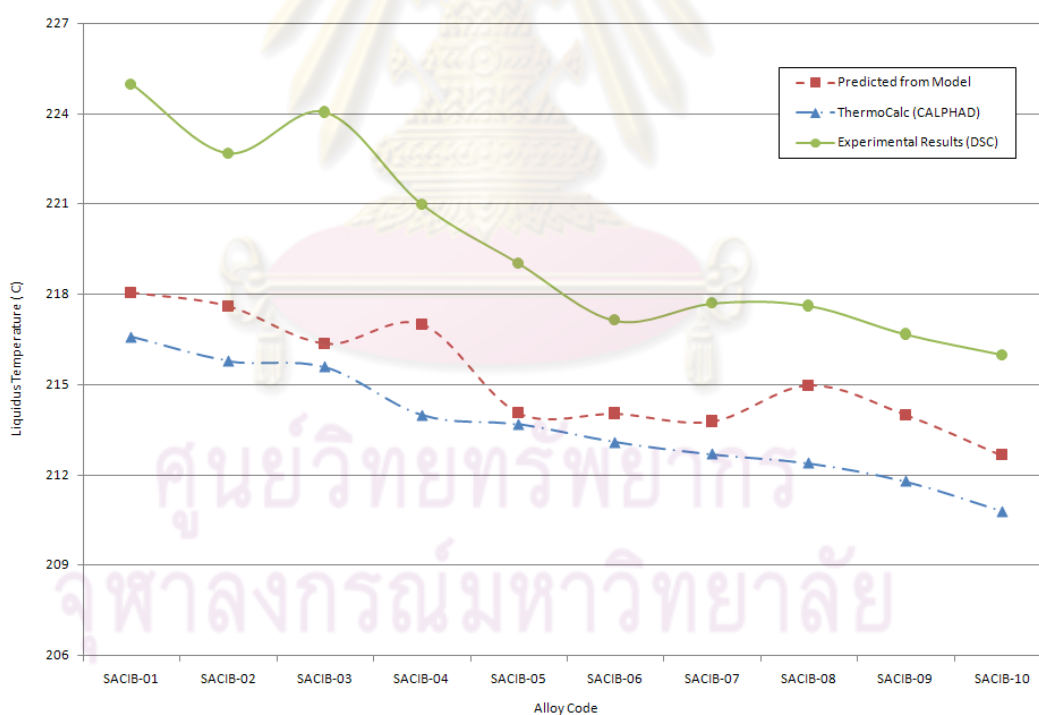
6.5 เปรียบเทียบผลการทำนายจากแบบจำลองกับผลการทดลอง

จากแบบจำลองขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบผสมจะสามารถทำนายสมบัติของวัสดุของลวดบัดกรีอ่อนได้ใน 2 สมบัติหลักคือ สมบัติทางความร้อน ซึ่งประกอบไปด้วย อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิไหลดีด และช่วงการแข็งตัว ส่วนอีกสมบัตินี้คือสภาพเปียกได้ ซึ่งทำนายในรูปของค่าแรงดึงผิวตามสมการของ Butler

6.5.1 สมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนที่ทำนายได้จากแบบจำลองจะนำไปตรวจสอบความถูกต้องของการทำนายกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC ซึ่งจะให้ข้อมูลอุณหภูมิวิกฤต อุณหภูมิโซลิดัส และช่วงการแข็งตัวของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนหนึ่งๆ ผลการเปรียบเทียบค่าที่ทำนายได้กับค่าที่วัดได้จริงจากการทดลองของอุณหภูมิวิกฤต อุณหภูมิโซลิดัส และช่วงการแข็งตัว แสดงไว้ในภาพที่ 46 ภาพที่ 47 และภาพที่ 48 ตามลำดับ และเพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการทำนายของแบบจำลองเทียบกับวิธีการคำนวณตามหลัก CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc จึงจะแสดงค่าที่ได้จากวิธี CALPHAD ไว้ด้วย

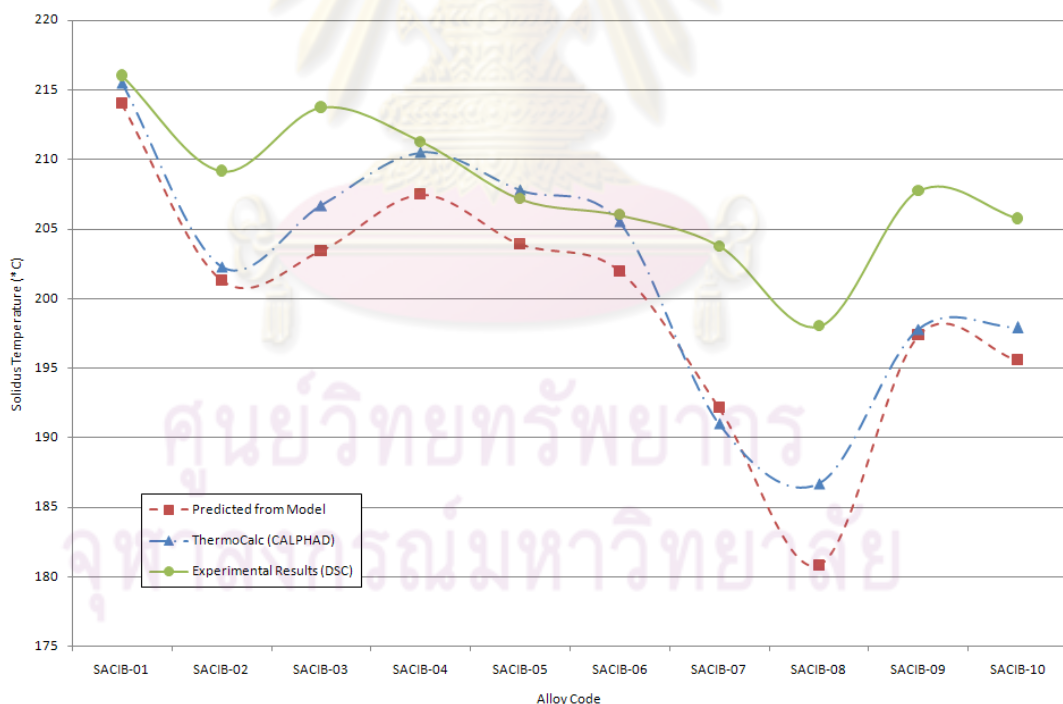
ค่าที่วัดได้จริงจากการทดลองที่นำมาเปรียบเทียบจะใช้เฉพาะค่าที่วัดที่อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 °C/min เนื่องจากเป็นอัตราความร้อนที่นิยมใช้กันในขั้นตอนการทำ Reflow (Reflow Process) ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีความต้องการนำลวดบัดกรีอ่อนปลอดตะกั่วไปใช้ทดแทนลวดบัดกรีอ่อนผสมตะกั่วแบบเดิม



ภาพที่ 46 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิวิกฤตที่ทำนายได้จากแบบจำลองกับผลที่วัดได้จริงจากการทดลองและผลการคำนวณตามหลัก CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc

จากภาพที่ 46 พบว่า อุณหภูมิหลอมเหลวที่ทำนายได้จากแบบจำลองมีทิศทางไปในทางเดียวกันกับค่าที่วัดได้จริง และข้อมูลที่ทำนายได้จากหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc โดยเมื่อหาความแม่นยำของการทำนายจากแบบจำลองเทียบกับค่าที่วัดได้จริงจากการทดลองด้วยวิธี Root Mean Square Error (RMSE) จะได้ค่า RMSE เท่ากับ 1.4944 ซึ่งมีความแม่นยำใกล้เคียงมากกว่าการคำนวณตามหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc ซึ่งจะมีค่า RMSE เท่ากับ 1.9644 เมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้จริง

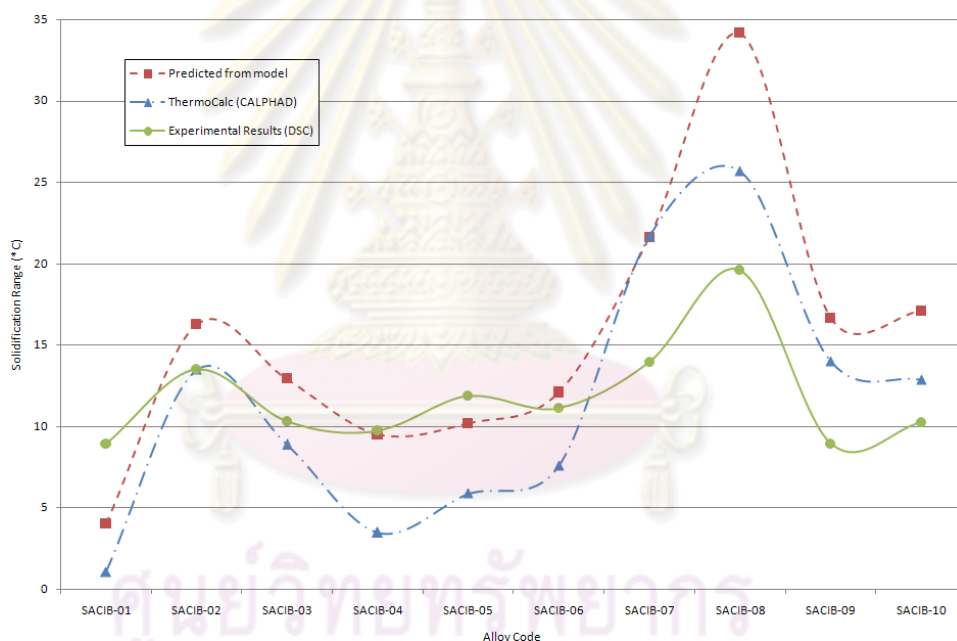
นอกจากนั้นเมื่อทำการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลองกับค่าที่วัดได้จริงด้วยวิธีการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (R-square) เท่ากับ 0.8310 ซึ่งแสดงถึงการมีความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ตี และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยที่ได้จากการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณตามหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc กับค่าที่วัดได้จริง จะพบว่า สัมประสิทธิ์การถดถอยของหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc กับค่าที่วัดได้จริงมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยคือ 0.9295



ภาพที่ 47 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิหลอมเหลวที่ทำนายได้จากแบบจำลองกับผลที่วัดได้จริงจากการทดลองและผลการคำนวณตามหลัก CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc

จากภาพที่ 47 จะพบว่า อุณหภูมิโซลิดัสที่ทำนายได้จากแบบจำลองมีทิศทางไปในทางเดียวกันกับค่าที่วัดได้จริง และข้อมูลที่คำนวณได้จากหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc โดยมีส่วนผสม SACIB-04 ที่ทำนายผิดพลาดมากที่สุด ซึ่งมีสาเหตุที่อธิบายได้ตามหลักทางโลหวิทยาว่า เกิดมาจากการที่เป็นส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่มีธาตุบิสมีทในปริมาณมาก ทำให้เกิดเป็นเฟสของเหลวที่มีปริมาณบิสมีทคงเหลือมากระหว่างกระบวนการแข็งตัว ซึ่งจะส่งผลให้มีอุณหภูมิลดต่ำลงอย่างมากในทางปฏิบัติ

เมื่อหาความแม่นยำของการทำนายจากแบบจำลองเทียบกับค่าที่วัดได้จริงจากการทดลองด้วยวิธี Root Mean Square Error (RMSE) จะได้ค่า RMSE เท่ากับ 2.9235 ซึ่งมีความแม่นยำใกล้เคียงกับการคำนวณตามหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc ซึ่งจะมีค่า RMSE เท่ากับ 2.3415 เมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้จริง



ภาพที่ 48 ผลการเปรียบเทียบช่วงการแข็งตัวที่ทำนายได้จากแบบจำลองกับผลที่วัดได้จริงจากการทดลองและผลการคำนวณตามหลัก CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc

จากภาพที่ 48 เมื่อคำนวณหาความแม่นยำของการทำนายจากแบบจำลองเทียบกับค่าที่วัดได้จริงจากการทดลองด้วยวิธี Root Mean Square Error (RMSE) จะได้ค่า RMSE เท่ากับ 2.0481 ซึ่งมีความแม่นยำน้อยกว่าการคำนวณตามหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc ซึ่งจะมีค่า RMSE เท่ากับ 1.6756 เมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้จริง

เมื่อทำการคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลองกับค่าที่วัดได้จริงด้วยวิธีการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (R-square) เท่ากับ 0.7405 ซึ่งแสดงถึงการมีความสัมพันธ์ของข้อมูลที่พอใช้ และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยที่ได้จากการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณตามหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc กับค่าที่วัดได้จริง จะพบว่า สัมประสิทธิ์การถดถอยของหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc กับค่าที่วัดได้จริงมีค่าน้อยกว่ามาก คือ 0.6266

จะพบว่า ช่วงการแข็งตัวที่ทำนายได้จากแบบจำลองมีทิศทางไปในทางเดียวกันกับค่าที่วัดได้จริง แต่ยังคงมีความแตกต่างระหว่างผลการทำนายกับค่าที่วัดได้จริงอยู่เล็กน้อย เนื่องจากข้อมูลที่ใช้ในการสอนมาจากข้อมูลอุณหภูมิวิกฤต และอุณหภูมิโซลิดัสเท่านั้น ส่วนค่าช่วงการแข็งตัวเกิดจากผลต่างของอุณหภูมิวิกฤตและอุณหภูมิโซลิดัส ดังนั้นค่าที่ทำนายได้จึงมีความแม่นยำไม่เท่ากับการทำนายอุณหภูมิวิกฤตและอุณหภูมิโซลิดัส

สามารถสรุปผลการเปรียบเทียบความแม่นยำในการทำนายสมบัติทางความร้อนของลวดบัดกรีอ่อนที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับข้อมูลที่วัดได้จริง กับค่าที่คำนวณตามหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc เทียบกับข้อมูลที่วัดได้จริง ได้ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำในการทำนายสมบัติทางความร้อน

ข้อมูลที่วัดได้จริงจาก เครื่อง DSC เทียบกับ	อุณหภูมิวิกฤต		อุณหภูมิโซลิดัส		ช่วงการแข็งตัว	
	RMSE	R-Square	RMSE	R-Square	RMSE	R-Square
ค่าที่ทำนายได้จาก แบบจำลองขั้นตอนวิธี เชิงวิวัฒนาการแบบผสม	1.4944	0.8310	2.9235	0.8506	2.0481	0.7405
ค่าที่คำนวณได้ตาม หลักวิธี CALPHAD ด้วย โปรแกรม ThermoCalc	1.9644	0.9295	2.3415	0.7755	1.6756	0.6266

จะเห็นได้ว่า แบบจำลองขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบผสมมีประสิทธิภาพในการทำนายสมบัติของวัสดุที่ดีทั้งในด้านอุณหภูมิวิกฤต อุณหภูมิโซลิดัส และช่วงการแข็งตัว โดยดูได้จากค่า RMSE ที่ต่ำซึ่งบ่งบอกถึงความคลาดเคลื่อนของการทำนายที่น้อย และค่าสัมประสิทธิ์การ

ถดถอยเชิงเส้นที่มีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งบ่งบอกถึงการมีความสัมพันธ์กันระหว่างข้อมูลที่ทำนายได้กับข้อมูลที่วัดได้จริง

นอกจากนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์ความแตกต่างในการทำนายสมบัติของวัสดุจากแบบจำลองขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบผสมเมื่อเทียบกับการคำนวณค่าสมบัติของวัสดุจากหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc ด้วยการวิเคราะห์ t-test แบบสองกลุ่มตัวอย่าง (Two samples t-test) แล้วจะพบว่าไม่มีความแตกต่างกันในการทำนาย ดังแสดงค่า p-value ของชุดข้อมูลในแต่ละสมบัติของวัสดุในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ค่า p-value ของการวิเคราะห์ t-test แบบสองกลุ่มตัวอย่าง

	อุณหภูมิลิควิดัส	อุณหภูมิโซลิดัส	ช่วงการแข็งตัว
ค่า p-value	0.070	0.561	0.279

จากตารางที่ 14 จะพบว่าการทดสอบความแตกต่างของชุดข้อมูลที่ทำนายได้จากแบบจำลองขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบผสมกับค่าที่คำนวณจากหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc ด้วยการวิเคราะห์ t-test จะให้ค่า p-value สูงกว่าค่า α ($\alpha=0.05$) ทั้งหมด นั่นคือ ไม่มีความแตกต่างกันในการใช้แบบจำลองทำนายอุณหภูมิลิควิดัส อุณหภูมิโซลิดัส และช่วงการแข็งตัวเทียบกับการคำนวณจากหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc

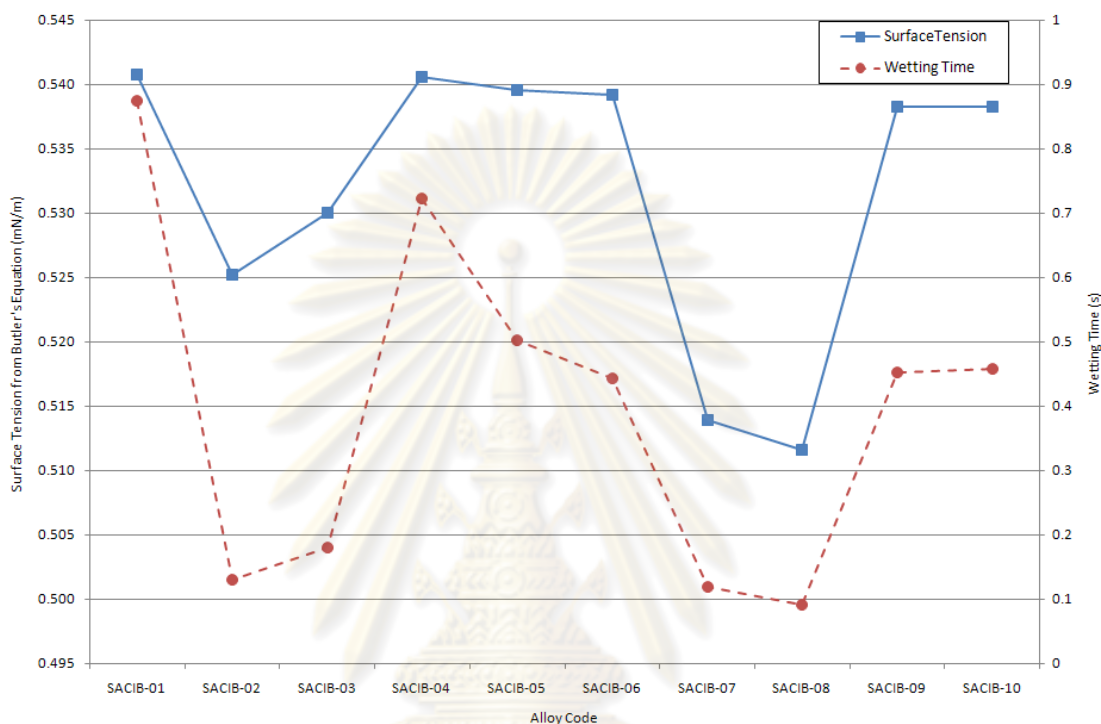
ดังนั้นจึงสามารถใช้การทำนายผลสมบัติทางความร้อนของวัสดุจากแบบจำลองขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบผสมเป็นวิธีในการวิจัยหาส่วนผสมที่ดีของลวดบัดกรีอ่อนได้ ด้วยคุณสมบัติที่ดีในการทำนายผลที่แม่นยำไม่ต่างจากวิธีการแบบเดิมที่ได้รับการยอมรับ ความรวดเร็วในการคำนวณและหาค่าตอบ รวมทั้งครอบคลุมช่วงส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ต้องการ

6.5.2 สภาพเปียกได้

สภาพเปียกได้เป็นหนึ่งในสามวัตถุประสงค์ของแบบจำลองการหาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ดีที่สุดจากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์ โดยในแบบจำลองจะอาศัยการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากค่าแรงตึงผิวของแต่ละส่วนผสมจากสมการของ Butler และจะคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยการให้คะแนนตามกลุ่มของค่าแรงตึงผิวดังได้อธิบายรายละเอียดไปแล้วในบทที่ 5

ส่วนในการทดสอบสมบัติของวัสดุด้านสภาพเปียกได้ของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ใช้ทดสอบจะใช้วิธี Wetting Balance ซึ่งให้ค่าสภาพเปียกได้ในรูปของเวลาในการเปียกและแรงใน

การเปียก ดังนั้นเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพในการทำนายสภาพเปียกได้ของแบบจำลองจึงนำค่าแรงตึงผิวที่คำนวณได้จากแบบจำลองมาสร้างกราฟเปรียบเทียบกับเวลาในการเปียกและแรงในการเปียก ดังแสดงในภาพที่ 49 และ 50 ตามลำดับ



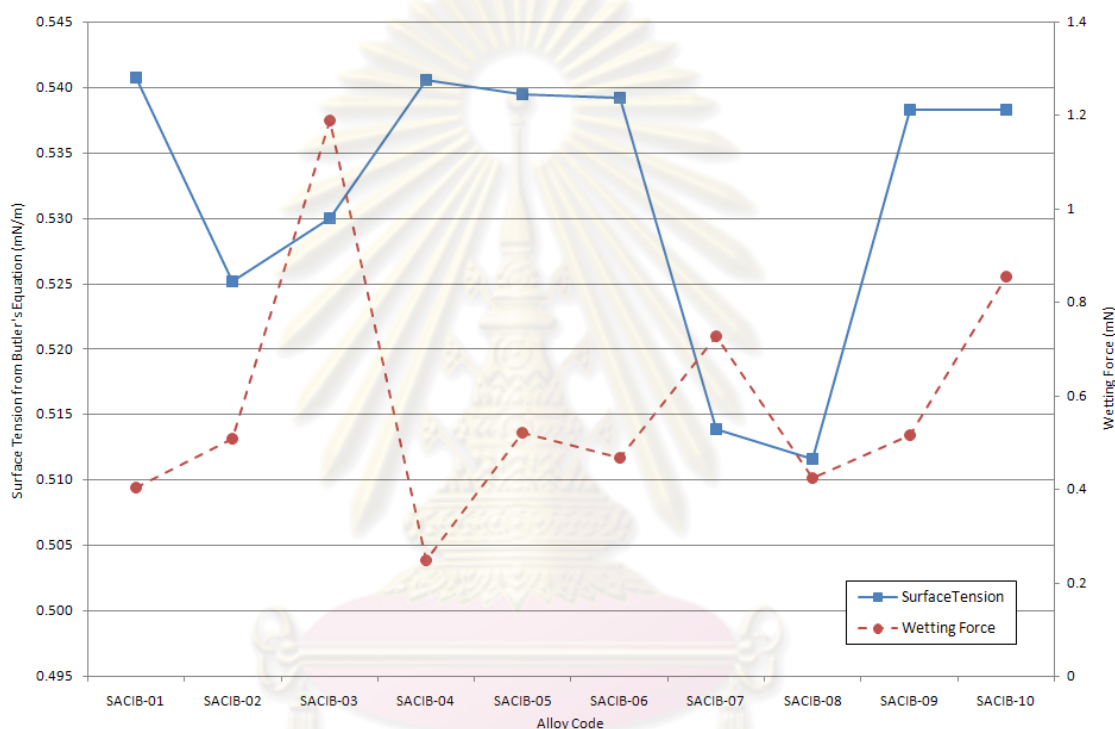
ภาพที่ 49 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงตึงผิวกับเวลาในการเปียก

จากภาพที่ 49 พบว่า แรงตึงผิวที่ทำนายได้จากแบบจำลองมีทิศทางไปในทางเดียวกันกับเวลาในการเปียกที่ได้จากการทดลอง โดยเมื่อทำการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงตึงผิวที่ทำนายได้จากแบบจำลองกับค่าเวลาในการเปียกที่วัดได้จริงด้วยวิธีการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (R-square) เท่ากับ 0.6860 และเมื่อทำการวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบบ Pearson จะได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบ Pearson เท่ากับ 0.8283 ซึ่งถือว่ายังมีความสัมพันธ์กันของชุดข้อมูลที่ยังไม่ดีนัก

แต่จากหลักการออกแบบของแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ซึ่งกำหนดให้มีการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสภาพเปียกได้ ด้วยการให้คะแนนตามกลุ่มของค่าแรงตึงผิวที่คำนวณได้จากสมการของ Butler ดังนั้นจึงต้องทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงตึงผิวที่ทำนายได้จากแบบจำลองกับค่าเวลาในการเปียกที่วัดได้จริงแบบการจัดกลุ่มและให้คะแนน (รายละเอียดการจัดกลุ่มและให้คะแนนแสดงไว้ในบทที่ 5) ซึ่งจะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยจากการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น เท่ากับ 0.8000 และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบ

Pearson เท่ากับ 0.8944 นั้นแสดงให้เห็นถึงการมีความสัมพันธ์ที่ดีของข้อมูลที่ทำนายได้จากแบบจำลองกับข้อมูลที่วัดได้จริง

จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเปียกกับแรงในการเปียกของลวดบัดกรีอ่อนที่ใช้ทดสอบตามภาพที่ 45 ซึ่งพบว่าไม่มีความสัมพันธ์กันระหว่างเวลาในการเปียกกับแรงในการเปียก ดังนั้นผลการทำนายสภาพเปียกได้จากแรงตึงผิวย่อมต้องไม่มีความสัมพันธ์กับค่าแรงในการเปียกด้วย ผลการเปรียบเทียบแรงตึงผิวกับแรงในการเปียก แสดงไว้ในภาพที่ 50



ภาพที่ 50 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงตึงผิวกับแรงในการเปียก

จากภาพที่ 50 พบว่าไม่มีความสัมพันธ์กันของแรงตึงผิวกับแรงในการเปียก โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเท่ากับ 0.0267 และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบ Pearson เท่ากับ -0.1635 และเมื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงตึงผิวที่ทำนายได้จากแบบจำลองกับค่าแรงในการเปียกที่วัดได้จริงแบบการจัดกลุ่มและให้คะแนน จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเท่ากับ 0.1240 และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบ Pearson เท่ากับ -0.3521

ผลการหาความสัมพันธ์ของแรงตึงผิวตามสมการของ Butler ที่ทำนายได้จากแบบจำลองกับเวลาในการเปียกและแรงในการเปียกที่วัดได้จริงจากการทดลอง สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ความสัมพันธ์ของค่าแรงตีงผิวที่ทำนายได้จากแบบจำลองกับเวลาในการเปียกและแรงในการเปียกที่วัดได้จากการทดลอง

แรงตีงผิวตามสมการของ Butler ที่ทำนายได้จากแบบจำลอง เทียบกับ	ค่าโดยตรง		จัดกลุ่มให้คะแนน	
	R-Square	Pearson	R-Square	Pearson
เวลาในการเปียก	0.6860	0.8283	0.8000	0.8944
แรงในการเปียก	0.0267	-0.1635	0.1240	-0.3521

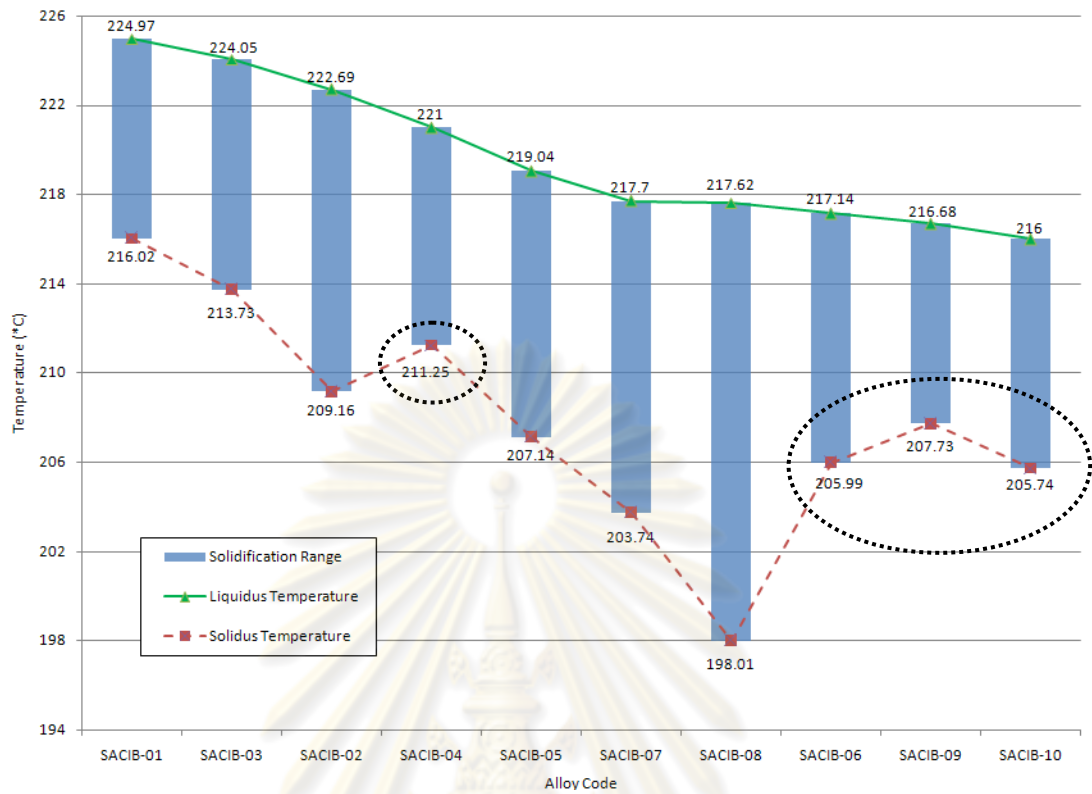
ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองมีประสิทธิภาพในการใช้ค่าแรงตีงผิวทำนายสภาพเปียกได้ของลวดบัดกรีอ่อน โดยแสดงในรูปของเวลาในการเปียกของลวดบัดกรีอ่อน แต่ไม่สามารถทำนายแรงในการเปียกได้

6.6 ความดีของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่หาได้จากแบบจำลอง

ส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ดีที่สุด 10 ส่วนผสมซึ่งเป็นตัวแทนของประชากรผลเฉลี่ยในรุ่นวิวัฒนาการที่ 500 ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์ได้ถูกเลือกขึ้นมาเพื่อทดสอบสมบัติของวัสดุในด้านต่างๆ ซึ่งผลการทดสอบก็ทำให้สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองมีประสิทธิภาพในการทำนายสมบัติในด้านต่างๆของลวดบัดกรีอ่อน ดังที่อธิบายไปแล้วข้างต้น

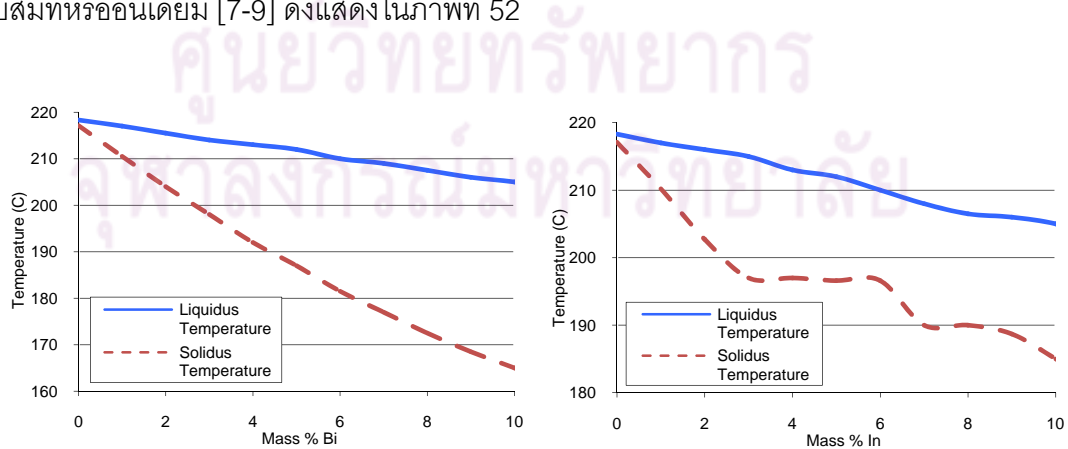
เพื่อให้ทราบถึงความดีของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่หาได้จากแบบจำลองว่าสามารถพัฒนาไปจากส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนปลอดภัยที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันหรือไม่ ส่วนผสมที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันและส่วนผสมจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจำนวน 25 ส่วนผสมดังแสดงในภาคผนวก ข รวมทั้งเกณฑ์ที่ถูกระบุขึ้นสำหรับพัฒนาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนปลอดภัย [56] จึงถูกนำมาพิจารณาเพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดของแบบจำลอง

จากผลการทดสอบทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC เมื่อนำผลอุณหภูมิวิกฤต อุณหภูมิโซลิดัส และช่วงการแข็งตัวของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ดีที่สุด 10 ส่วนผสมที่ได้จากแบบจำลองมาสร้างกราฟโดยเรียงจากส่วนผสมที่มีค่าอุณหภูมิวิกฤตสูงสุดไปหาส่วนผสมที่มีค่าอุณหภูมิวิกฤตต่ำที่สุดจะได้ผลดังแสดงในภาพที่ 51



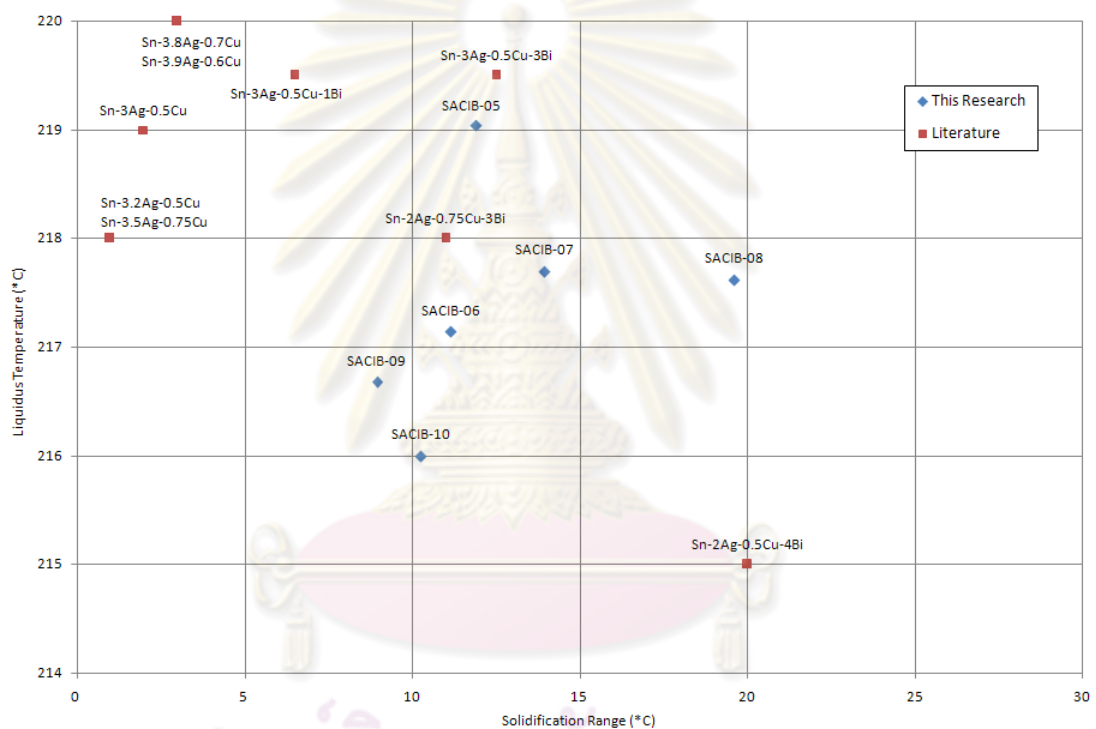
ภาพที่ 51 สมบัติทางความร้อนที่วัดได้จากการทดลองของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ได้จากแบบจำลอง

เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับแผนภูมิที่สร้างขึ้นจากหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc เพื่อศึกษาผลของการเติมธาตุบิสมัท (Bi) และอินเดียม (In) ต่อสมบัติทางความร้อนในการพัฒนาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนปลอดตะกั่วระบบดีบุก-เงิน-ทองแดง (Sn-Ag-Cu) ที่เติมบิสมัทหรืออินเดียม [7-9] ดังแสดงในภาพที่ 52



ภาพที่ 52 ผลของการเติม (ก) บิสมัท (ข) อินเดียม ต่ออุณหภูมิหลอมละลายและอุณหภูมิโซลิดัส

จากการเปรียบเทียบภาพที่ 51 และภาพที่ 52 จะเห็นข้อแตกต่างหนึ่งที่ชัดเจนคือ การเติมธาตุบิสมีทและอินเดียมจะลดอุณหภูมิลงได้ทีปริมาณการเติมธาตุสูงขึ้น แต่ก็ทำให้ช่วง การแข็งตัวกว้างมากขึ้น (ภาพที่ 52) แต่ส่วนผสมบางส่วนผสมที่ได้จากแบบจำลองขั้นตอนวิธีเชิง พันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์ที่มีอุณหภูมิวิกฤตลดลง กลับรักษาช่วงการแข็งตัวที่แคบไว้ได้ (วงกลมประในรูปที่ 51) นั่นหมายถึงแบบจำลองขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์ใน งานวิจัยนี้มีความสามารถในการหาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่มีสมบัติทางวัสดุได้ดีทั้งในด้าน อุณหภูมิวิกฤต และช่วงการแข็งตัว



ภาพที่ 53 เปรียบเทียบอุณหภูมิวิกฤตและช่วงการแข็งตัวของส่วนผสมที่ได้จากแบบจำลอง กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากภาพที่ 53 จะเห็นถึงประสิทธิภาพในการค้นหาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ดีที่สุด ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์ ที่สามารถค้นหาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่มี อุณหภูมิลดต่ำกว่าส่วนผสมอื่นจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยที่ยังคงมีช่วงการแข็งตัวที่แคบ ไว้ได้ เช่น ส่วนผสม SACIB-07, SACIB-08, SACIB-09 และ SACIB-10 เป็นต้น

เมื่อพิจารณาถึงสภาพเปียกได้ของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ได้จากแบบจำลอง เทียบกับผลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [66, 67] จะพบว่าส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ได้จากแบบจำลองมีค่าสภาพเปียกได้ดี โดยมีเวลาในการเปียกที่สั้นกว่าส่วนผสมอื่นจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังแสดงในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 เปรียบเทียบสภาพเปียกได้ของส่วนผสมที่ได้จากแบบจำลองกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รหัสส่วนผสม	Wetting Balance at 245°C	
	เวลาในการเปียก (s)	แรงในการเปียก (mN)
SACIB-01	0.875	0.405
SACIB-02	0.131	0.510
SACIB-03	0.182	1.189
SACIB-04	0.723	0.249
SACIB-05	0.503	0.521
SACIB-06	0.444	0.468
SACIB-07	0.121	0.727
SACIB-08	0.093	0.424
SACIB-09	0.453	0.517
SACIB-10	0.459	0.856
SAC305	1.090	180 mN/mm
SAC405	1.946	3.150
SAC+4In	1.166	4.800
SAC+1Bi	1.235	4.800

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ที่ถูกระบุขึ้นสำหรับพัฒนาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนปลอดตะกั่ว [56] ที่กำหนดให้ส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนปลอดตะกั่วต้องมีช่วงการแข็งตัวน้อยกว่า 30°C มีเวลาในการเปียกน้อยกว่า 6 วินาที และมีแรงในการเปียกมากกว่า 0.3 mN พบว่าจะมีส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนจากแบบจำลองเพียง 2 ส่วนผสมเท่านั้นจาก 10 ส่วนผสมที่ไม่ผ่านเกณฑ์นี้ ทำให้เป็นการยืนยันถึงประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ของแบบจำลองขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์ได้เป็นอย่างดี

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการนำขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒน์แบบมาใช้สร้างแบบจำลองทางสมบัติของวัสดุ เพื่อหาส่วนผสมที่ดีที่สุดของลวดบัดกรีอ่อนปลอดตะกั่ว โดยให้ความสนใจในสมบัติ 3 ด้านของลวดบัดกรีอ่อนคือ คุณสมบัติการเชื่อม ช่างการแข็งตัว และสภาพเปื่อยได้ การออกแบบและการพัฒนาแบบจำลองถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนการทำนายสมบัติของวัสดุของลวดบัดกรีอ่อนด้วยกำหนดการเชิงพันธุกรรม และส่วนของการหาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ดีที่สุดจากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์

แบบจำลองในการทำนายสมบัติของวัสดุจากกำหนดการเชิงพันธุกรรมโดยใช้ข้อมูลในการสอนจากการคำนวณค่าคุณสมบัติวิคิตส์และคุณสมบัติซิลิตส์ตามหลักอุณหพลศาสตร์ ด้วยโปรแกรม ThermoCalc จำนวน 240 ส่วนผสม และข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอีก 10 ส่วนผสม ผลการทำนายของแบบจำลองเมื่อเทียบกับข้อมูลที่ใช้สอนอยู่เกณฑ์ดีมากในการทำนายคุณสมบัติวิคิตส์ และอยู่ในเกณฑ์ดีสำหรับการทำนายคุณสมบัติซิลิตส์

เมื่อนำผลเฉลยที่ได้จากกำหนดการเชิงพันธุกรรมไปใช้ทำนายคุณสมบัติวิคิตส์และคุณสมบัติซิลิตส์ของลวดบัดกรีอ่อนแล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จะให้ผลการทำนายที่มีทิศทางเดียวกันกับค่าที่วัดได้จริง และมีความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ทำนายได้กับค่าที่วัดได้จริงอยู่ในเกณฑ์ดี ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากำหนดการเชิงพันธุกรรมมีประสิทธิภาพในการทำนายสมบัติทางวัสดุของลวดบัดกรีอ่อนที่ดี และเหมาะจะนำมาใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนปลอดตะกั่วที่ดีที่สุดจากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์ต่อไป

คุณสมบัติวิคิตส์ ช่างการแข็งตัวและสภาพได้ถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์เพื่อแก้ปัญหาการหาส่วนผสมที่ดีที่สุดของลวดบัดกรีอ่อนปลอดตะกั่ว ผลของการวิวัฒนาการจะเกิดขึ้นอย่างมากในรุ่นแรกๆของการวิวัฒนาการ โดยจะเห็นถึงความสัมพันธ์กันของข้อมูลในแต่ละวัตถุประสงค์ คือ เมื่อคุณสมบัติวิคิตส์ลดลงจะทำให้ช่างการแข็งตัวกว้างขึ้น และสภาพเปื่อยได้แย่ลง ในระหว่างการวิวัฒนาการ ผลเฉลยใหม่ที่ได้ก็จะถูกปรับให้มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดในทุกวัตถุประสงค์ จนเมื่อการวิวัฒนาการสิ้นสุดลง ตัวแทนผลเฉลยในรุ่นสุดท้ายจำนวน 10 ส่วนผสมถูกเลือกขึ้นมาเพื่อทดสอบสมบัติทางวัสดุในห้องปฏิบัติการ

ผลการทดสอบยืนยันว่าแบบจำลองการทำนายสมบัติทางวัสดุจากกำหนดการเชิงพันธุกรรมมีประสิทธิภาพในการทำนายอุณหภูมิวิกฤต และอุณหภูมิโซลิดัสที่ดีมากในด้านอุณหภูมิวิกฤต และอุณหภูมิโซลิดัส แต่จะลดลงเล็กน้อยในด้านช่วงการแข็งตัว โดยผลการทำนายที่ได้จะการันตีได้ว่าผลการทำนายจะไม่แย่ไปกว่าค่าที่คำนวณได้จากหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc ทั้งยังสามารถทำการคำนวณหาค่าได้อย่างรวดเร็ว และครอบคลุมช่วงส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ต้องการ

แบบจำลองยังสามารถทำนายสภาพเปื่อยได้ของลวดบัดกรีอ่อนได้อย่างแม่นยำ โดยจะเห็นถึงความสัมพันธ์กันที่ดีมากของข้อมูลแรงดึงผิวที่ใช้ทำนายสภาพเปื่อยได้ในแบบจำลองกับเวลาในการเปื่อยที่วัดถึงสภาพเปื่อยของลวดบัดกรีอ่อนในห้องทดลอง แต่จะไม่มีความสัมพันธ์กันระหว่างค่าที่ทำนายได้กับแรงในการเปื่อยที่วัดได้

เมื่อนำสมบัติทางวัสดุของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ได้จากแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่มีใช้งานอยู่ในปัจจุบันและจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะพบว่า ส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ได้จากแบบจำลองมีความดีเหนือกว่าส่วนผสมอื่นๆทั้งในด้านสมบัติทางความร้อน ที่สามารถลดอุณหภูมิวิกฤตลงมาได้พร้อมๆกับการที่รักษาช่วงการแข็งตัวให้แคบไว้ได้ และในด้านสภาพเปื่อยได้ ที่มีเวลาในการเปื่อยต่ำกว่าส่วนผสมอื่นๆ

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ที่ถูกกำหนดขึ้นสำหรับพัฒนาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนปลอดตะกั่วจะพบว่ามีส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนจากแบบจำลองเพียง 2 ส่วนผสมเท่านั้นจาก 10 ส่วนผสมที่ไม่ผ่านเกณฑ์นี้ ทำให้เป็นการยืนยันถึงประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ของแบบจำลองขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์ได้เป็นอย่างดี

จึงสรุปได้ว่าขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบผสมที่ประกอบด้วยส่วนการทำนายสมบัติของวัสดุจากกำหนดการเชิงพันธุกรรมและส่วนการหาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนที่ดีที่สุดจากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีหลายวัตถุประสงค์มีประสิทธิภาพในการทำนายและหาคำตอบที่ดีมาก และเหมาะที่จะมาใช้เป็นแนวทางใหม่สำหรับการพัฒนาส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนปลอดตะกั่วให้สามารถนำมาทดแทนลวดบัดกรีอ่อนผสมตะกั่วแบบเดิม

7.2 ข้อเสนอแนะ

1. แบบจำลองการทำนายสมบัติของวัสดุจากกำหนดการเชิงพันธุกรรม มีการใช้ข้อมูลในการสอนที่ได้จากการคำนวณตามหลักวิธี CALPHAD ด้วยโปรแกรม ThermoCalc จำนวน 240 ส่วนผสม แต่มีการใช้ข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการสอนเพียง 10 ส่วนผสมเท่านั้น ทำให้ผลการทำนายค่อนข้างอิงกับหลักวิธี CALPHAD แต่อาจจะคลาดเคลื่อนไปจากค่าจริง ดังนั้นหากมีการนำข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าจริงไปใช้เป็นข้อมูลในการสอนเพิ่มขึ้น ก็จะช่วยทำให้ได้ผลเฉลยที่สามารถทำนายอุณหภูมิหลอมเหลว และอุณหภูมิโซลิดัสที่แม่นยำมากยิ่งขึ้นได้

2. แบบจำลองที่สร้างขึ้นสนใจเฉพาะสมบัติใน 3 ด้านของลวดบัดกรีอ่อนเท่านั้น ดังนั้นจึงอาจมีการพัฒนาแบบจำลองต่อไปในอนาคตเพื่อให้ครอบคลุมสมบัติในทุกด้านของลวดบัดกรีอ่อน เพื่อให้เหมาะที่จะนำไปผลิตเพื่อใช้ในภาคอุตสาหกรรม

3. อาจมีการนำหลักการทางคอมพิวเตอร์นี้ไปใช้ในการสร้างแบบจำลองที่ใช้ทำนายสมบัติของวัสดุของโลหะประเภทอื่นต่อไปได้ เพื่อพัฒนาศาสตร์ในการพัฒนาโลหะผสม



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). สารระสำคัญของระเบียบ WEEE & ROHS [Online]. 2550. Available from: http://www.thairohs.org/index.php?option=com_content&task=view&id=104&Itemid=98 [1 มกราคม 2552]
- [2] Hwang, J.S. Environmental-Friendly Electronics: Lead-free Technology. Bristol: Electrochemical, 2001.
- [3] Islam, M.N., Chan, Y.C., Rizvi, M.J., and Jilek, W. Investigations of Interfacial Reactions of Sn-Zn based and Sn-Ag-Cu Lead-free Solder Alloys as Replacement for Sn-Pb Solder. Journal of Alloys and Compounds 400 (2005): 136-144.
- [4] Senju Metal Industry. Features of Lead-free Alloys and Their Process Characteristics [Online]. 2007. Available from: http://www.senjucomtek.com/images/tech/pdf/Pb-free_catalogue.pdf [2009, January 1]
- [5] Kim, K.S., Huh, S.H., and Suganuma, K. Effects of Intermetallic Compounds on Properties of Sn-Ag-Cu Lead-free Soldered Joints. Journal of Alloys and Compounds, 352 (2003): 226-236.
- [6] Anderson, I.E., et al. Alloying Effects in Near-eutectic Sn-Ag-Cu Solder Alloys for Improved Microstructural Stability. Journal of Electronic Materials 30 (2001): 1050-1059.
- [7] Huang, M.L. and Wang, L., Effects of Cu, Bi, and In on Microstructure and Tensile Properties of Sn-Ag-X (Cu, Bi, In) Solders. Metallurgical and Materials Transactions A 36 (2005): 1439-1446.
- [8] Zhao, J., Qi, L., Wang, X., Wang, L. Influence of Bi on Microstructures Evolution and Mechanical Properties in Sn-Ag-Cu Lead-free Solder. Journal of Alloys and Compounds 375 (2004): 196-201.
- [9] Peng, D. and Liu, Y. Physical Properties of the Sn-Ag-Cu-In-X (Zn,Bi) Solder Alloys. International Conference on Electronic Packaging Technology 8 (2007): 1-5.

- [10] Andersson, J.O., Thomas, H., Lars, H., Shi, P., and Bo, S. ThermoCalc & DICTRA, Computational Tools for Materials Science. CALPHAD 26 (2002): 273-312.
- [11] Holland, J.H. Adaptation in Natural and Artificial System: An Introduction Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence. MA: The MIT Press, 1992.
- [12] Deb, K. Genetic algorithm in search and optimization : The technique and applications. Proceedings of International Workshop on Soft Computing and Intelligent Systems. pp. 58-87. India, 1998.
- [13] Koza, J.R. Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. MA: The MIT Press, 1992.
- [14] Callister, W.D. Materials Science and Engineering: An Introduction. 7th ed. CA: Wiley, 2006.
- [15] Porter, D.A. and Easterling, K.E. Phase Transformations in Metal and Alloys. 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1992.
- [16] Suganuma, K. Advances in lead-free electronics soldering. Current Opinion in Solid State & Materials Science 5 (2001): 55-64.
- [17] Zhu, F., Wang, Z., Guan, R., Zhang, H. Mechanical Properties of a Lead-Free Solder Alloys. Proceedings of Asian Green Electronics Conference, AGECE, 2005, pp. 107-112. China, 2005.
- [18] Ohnuma, I., et al., Phase equilibria and the related properties of Sn-Ag-Cu based Pb-free solder alloys. Journal of Electronic Materials 29 (2000): 1137-1144.
- [19] Pan, J., Toleno, B.J., Chou T., Dee, W. The effect of reflow profile on SnPb and SnAgCu solder joint shear strength. Soldering & Surface Mount Technology 18 (2006): 48 - 56.
- [20] Ohnuma, I., et al. Pb-Free solders: Part II. Application of ADAMIS database in modeling of Sn-Ag-Cu alloys with Bi additions. Journal of Phase Equilibria and Diffusion 27 (2006): 245-254.
- [21] Chew, K.H. and Pang, J.H.L. Impact of drop-in Lead-free Solders on Microelectronics Packaging. Proceedings of 7th Electronic Packaging Technology Conference, EPTC, 2005, pp. 451-454. Singapore, 2005.

- [22] Bukat, K., et al. Evaluation of the Influence of Bi and Sb additions to Sn-Ag-Cu and Sn-Zn Alloys on Their Surface Tension and Wetting Properties using Analysis of Variance - ANOVA. Soldering & Surface Mount Technology 20 (2008): 9-19.
- [23] Butler, J.A.V. The Thermodynamics of the Surfaces of Solutions. Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Character, pp. 348-375. London, 1932.
- [24] Moser, Z., et al. Pb-Free Solders: Part 1. Wettability Testing of Sn-Ag-Cu Alloys with Bi Additions. Journal of Phase Equilibria and Diffusion 27 (2006): 133-139.
- [25] Moser, Z., Gasior, W., Pstrus, J., and Debski, A. Wettability Studies of Pb-Free Soldering Materials. Journal of Thermophysics 29 (2008): 1974-1986.
- [26] Moser, Z., Sebo, P., Gasior, W., Svec, P., and Pstrus, J. Effect of Indium on Wettability of SnAgCu Solders. Experiment vs. modeling, Part I. CALPHAD 33 (2009): 63-68.
- [27] Brezocnik, M., Balic, J., and Kuzman, K. Genetic Programming Approach to Determining of Metal Materials Properties. Journal of Intelligent Manufacturing 13 (2002): 5-17.
- [28] Brezocnik, M. and Gusel, L. Predicting Stress Distribution in Cold-formed Material with Genetic Programming. Journal of Advanced Manufacturing Technology 23 (2004): 467-474.
- [29] Kovacic, M., Uratnik, P., Brezocnik, M., and Turk, R. Prediction of the Bending Capability of Rolled Metal Sheet by Genetic Programming. Materials and Manufacturing Processes 22 (2007): 634-640.
- [30] Zakeri, M., Bahrami, A. and Anijdan, S.H.M. Using Genetic Algorithm in Heat Treatment Optimization of 17-4PH Stainless Steel. Materials & Design 28 (2007): 2034-2039.
- [31] Picha, R., Vrestal, J., and Kroupa, A. Prediction of Alloy Surface Tension using a Thermodynamic Database. CALPHAD 28(2004): 141-146.
- [32] Pirge, G., Hacıoglu, A., Ermis, M., and Altintas, S. Determination of the Compositions of NiMnGa Magnetic Shape Memory Alloys using Hybrid Evolutionary Algorithms. Computational Materials Science 45 (2009): 189-193.

- [33] Deb, K. Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms. UK: John Wiley & Sons, 2001.
- [34] Fonseca, C.M. and Fleming, P.J. Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization. Proceedings of 5th International Conference on Genetic Algorithms, pp. 416-423. San Francisco, CA, 1993.
- [35] Srinivas, N. and Deb, K. Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. Evolutionary Computation 2 (1994): 221-248.
- [36] Zitzler, E. and Thiele, L. Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach. Evolutionary Computation 3 (1994): 257-271.
- [37] Zitzler, E., Laumanns, M., and Thiele, L. Spea2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm [Technical Report 103]. ETH, 2001.
- [38] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. Evolutionary Computation 6 (2002): 182-197.
- [39] Lu, H. and Yen, G.G. Rank-density based multiobjective genetic algorithm. Proceedings of 2002 Congress on Evolutionary Computation, pp. 944-949. Honolulu, HI, 2002.
- [40] Goldberg, D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. MA: Addison-Wesley, 1989.
- [41] Kaufman, L. and Bernstein, H. Computer Calculation of Phase Diagrams. NY: Academic, 1970.
- [42] Metallurgy Division of Materials Science and Engineering Laboratory, NIST. Phase Diagrams & Computational Thermodynamics [Online]. 2009. Available from: <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/> [1 January 2009]
- [43] Scheil, E. Uber die Eutektische Kristallisation (On Eutectic Crystallization). Z. Metallkd 34(1942): 70-80.
- [44] Andersson, J.O., Helander, T., Hoglund, L., Shi, P., and Sundman, B. ThermoCalc & DICTRA, Computational Tools for Materials Science. CALPHAD 26 (2002): 273-312.

- [45] Lupis, C.H.P. Chemical Thermodynamics of Materials. NY: Elsevier Science, 1983.
- [46] Moser, Z., Gasior, W., and Pstrus, J. Surface Tension of Liquid Ag-Sn Alloys: Experiment versus Modeling. Journal of Phase Equilibria and Diffusion 22 (2001): 254-258.
- [47] Moser, Z., et al. Studies of the Ag-In phase diagram and surface tension measurements. Journal of Electronic Materials 30 (2001): 1120-1128.
- [48] Gasior, W., et al. Surface Tension and Thermodynamic Properties of Liquid Ag-Bi Solutions. Journal of Phase Equilibria 24 (2003): 40-49.
- [49] Moser, Z., Gasior, W., and Pstrus, J. Surface Tension Measurements of the Bi-Sn and Sn-Bi-Ag Liquid Alloys. Journal of Electronic Materials 30 (2001): 1104-1111.
- [50] Moser, Z., Gasior, W., Pstrus, J., Ohnuma, I., and Ishida, K. Influence of Sb Additions on Surface Tension and Density of Sn-Sb, Sn-Ag-Sb and Sn-Ag-Cu-Sb alloys: Experiment vs. Modeling. Journal of materials research 97 (2006): 365-370.
- [51] Gasior, W., Moser, Z., and Pstrus, J. Density and Surface Tension of the Pb-Sn Liquid Alloys. Journal of Phase Equilibria and Diffusion 22 (2001): 20-25.
- [52] Gasior, W., Moser, Z., and Pstrus, J. Surface Tension, Density, and Molar Volume of Liquid Sb-Sn Alloys: Experiment versus Modeling. Journal of Phase Equilibria 24 (2003): 504-510.
- [53] Ohnuma, I., Liu, X.J., Ohtani, H., and Ishida, K. Thermodynamic Database for Phase Diagrams in Micro-Soldering Alloys. Journal of Electronic Materials 28 (1999): 1164-1171.
- [54] Liu, X.J., et al. Experimental Determination and Thermodynamic Calculation of the Phase Equilibria and Surface Tension in the Sn-Ag-In System. Journal of Electronic Materials 31 (2002): 1139-1151.
- [55] Hultgren, R., et al. Selected Values of the Thermodynamic Properties of Binary alloys. Ohio: ASM, 1973.

- [56] Anderson, I.E., et al. Development of Eutectic and Near-Eutectic Tin-Silver-Copper Solder Alloys for Lead-Free Electronic Assemblies. Proceedings of an International Summit on Lead-Free Electronics Assemblies, IPCWorks '99, p. 575. MN, 1999.
- [57] Solberg, V. No-Lead Solder for CSP: The Impact of Higher Temperature SMT Assembly Processing. Proceedings of NEPCON West 2000 Conference. CA, 2000.
- [58] National Center for Manufacturing Sciences (NCMS). Room Temperature Tensile Properties of Lead-Free Solder Alloys [Technical Reports for the Lead Free Solder Project]. NCMS, 1998.
- [59] Indium Corporation of America. IndAlloy Specialty Alloys [Online]. 2009. Available from:http://www.indium.com/products/alloy_sorted_by_temperature.pdf [1 January 2009]
- [60] Miller, C.M., Anderson, I.E., and Smith, J.F. A Viable Tin-Lead Solder Substitute: Sn-Ag-Cu. Journal of Electronic Materials 23 (1994): 595-601.
- [61] Bradley, E., and Hramisavljevic, J. Characterization of the Melting and Wetting of Sn-Ag-X Solders. Proceedings of 50th Electronic Components and Technology Conference, pp. 1443-1448. Las Vegas, NV, 2000.
- [62] Clyde, F., and Coombs, J. Printed Circuits Handbook. 6th eds. NY: McGraw-Hill 2008.
- [63] ฉวีวรรณ ลิ่มสุวรรณ. การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมต่อสมบัติและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีชนิด Sn-0.3Ag-0.7Cu. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.
- [64] Lee, J.H., Lee, C.-W., and Kim, J.H. Quaternary Pb-free solder composition incorporating Sn-Ag-Cu-In [Patent]. Korea Institute of Industrial Technology, 2008.
- [65] Luke, S., and Panait, L. Lexicographic Parsimony Pressure. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO-2002, pp. 829-836. New York, NY, 2002.

- [66] Hwang, J.S. The Role of Wetting Ability of Lead-Free Alloys. Journal of Microcircuits and Electronic Packaging 24 (2001): 316-327.
- [67] Lifton, A., Bulwith, R.A., and Picchione, L. Wetting Characteristics of the Lead Free Alloys of Interest [Technical Paper]. Cookson Electronics, 2005.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ชุดข้อมูลสอนในกำหนดการเชิงพันธูกรรม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ชุดข้อมูลสอนในกำหนดการเชิงพันธุกรรม

รายละเอียดของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนทั้ง 250 ส่วนผสมที่นำมาใช้เป็นข้อมูลในการสอนกำหนดการเชิงพันธุกรรม รวมทั้งข้อมูลอุณหภูมิวิกฤต และอุณหภูมิโซลิดัสของแต่ละส่วนผสมแสดงได้ดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ชุดข้อมูลสอนในกำหนดการเชิงพันธุกรรม

Alloy Code	Composition					Properties		Reference
	Sn	Ag	Cu	Bi	In	Liquidus	Solidus	
TC-SAC-01	99.000	0.300	0.700	0.000	0.000	226.9	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-02	98.500	1.000	0.500	0.000	0.000	225.8	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-03	97.250	2.000	0.750	0.000	0.000	221.1	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-04	96.500	3.000	0.500	0.000	0.000	219.5	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-05	96.300	3.200	0.500	0.000	0.000	218.9	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-06	95.750	3.500	0.750	0.000	0.000	224.2	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-07	95.400	3.600	1.000	0.000	0.000	243.7	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-08	94.900	3.600	1.500	0.000	0.000	273.6	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-09	95.500	3.800	0.700	0.000	0.000	225.8	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-10	95.500	3.900	0.600	0.000	0.000	227.4	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-11	95.500	4.000	0.500	0.000	0.000	229.0	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-12	95.000	4.000	1.000	0.000	0.000	244.6	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-13	95.000	4.100	0.900	0.000	0.000	237.6	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-14	95.000	4.500	0.500	0.000	0.000	239.2	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-15	93.600	4.700	1.700	0.000	0.000	285.8	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-01	99.000	0.300	0.700	0.000	0.000	226.9	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-02	98.500	1.000	0.500	0.000	0.000	225.8	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-03	97.250	2.000	0.750	0.000	0.000	221.1	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-04	96.500	3.000	0.500	0.000	0.000	219.5	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-05	96.300	3.200	0.500	0.000	0.000	218.9	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-06	95.750	3.500	0.750	0.000	0.000	224.2	217.1	ThermoCalc

ตารางที่ ก.1 ชุดข้อมูลสอนในกำหนดการเชิงพันธกรรม (ต่อ)

Alloy Code	Composition					Properties		Reference
	Sn	Ag	Cu	Bi	In	Liquidus	Solidus	
TC-SAC-07	95.400	3.600	1.000	0.000	0.000	243.7	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-08	94.900	3.600	1.500	0.000	0.000	273.6	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-10	95.500	3.900	0.600	0.000	0.000	227.4	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-11	95.500	4.000	0.500	0.000	0.000	229.0	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-12	95.000	4.000	1.000	0.000	0.000	244.6	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-13	95.000	4.100	0.900	0.000	0.000	237.6	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-14	95.000	4.500	0.500	0.000	0.000	239.2	217.1	ThermoCalc
TC-SAC-15	93.600	4.700	1.700	0.000	0.000	285.8	217.1	ThermoCalc
TC-SACB-01	95.230	3.210	0.560	1.000	0.000	217.0	210.5	ThermoCalc
TC-SACB-02	96.000	2.500	0.500	1.000	0.000	219.5	210.6	ThermoCalc
TC-SACB-03	95.650	2.670	0.680	1.000	0.000	217.8	210.5	ThermoCalc
TC-SACB-04	95.500	3.000	0.500	1.000	0.000	218.0	210.5	ThermoCalc
TC-SACB-05	95.300	3.000	0.700	1.000	0.000	218.0	210.5	ThermoCalc
TC-SACB-06	94.800	3.400	0.300	1.500	0.000	215.9	207.3	ThermoCalc
TC-SACB-07	94.700	3.400	0.400	1.500	0.000	215.9	207.3	ThermoCalc
TC-SACB-08	94.600	3.400	0.500	1.500	0.000	215.9	207.3	ThermoCalc
TC-SACB-09	94.580	3.400	0.520	1.500	0.000	215.9	207.3	ThermoCalc
TC-SACB-10	94.270	3.170	0.560	2.000	0.000	215.5	204.1	ThermoCalc
TC-SACB-11	94.500	3.000	0.500	2.000	0.000	216.5	204.2	ThermoCalc
TC-SACB-12	94.070	3.340	0.590	2.000	0.000	214.8	204.1	ThermoCalc
TC-SACB-13	93.880	3.320	0.300	2.500	0.000	214.4	201.0	ThermoCalc
TC-SACB-14	93.780	3.320	0.400	2.500	0.000	214.4	201.0	ThermoCalc
TC-SACB-15	93.580	3.320	0.600	2.500	0.000	214.4	201.0	ThermoCalc
TC-SACB-16	93.630	3.320	0.550	2.500	0.000	214.4	201.0	ThermoCalc
TC-SACB-17	94.050	2.200	0.750	3.000	0.000	226.1	198.2	ThermoCalc
TC-SACB-18	94.250	2.000	0.750	3.000	0.000	226.2	192.0	ThermoCalc
TC-SACB-19	94.280	2.070	0.650	3.000	0.000	217.2	198.2	ThermoCalc
TC-SACB-20	93.500	3.000	0.500	3.000	0.000	214.9	198.1	ThermoCalc

ตารางที่ ก.1 ชุดข้อมูลสอนในกำหนดการเชิงพันธุกรรม (ต่อ)

Alloy Code	Composition					Properties		Reference
	Sn	Ag	Cu	Bi	In	Liquidus	Solidus	
TC-SACB-21	93.400	3.100	0.500	3.000	0.000	214.9	198.1	ThermoCalc
TC-SACB-22	93.300	3.200	0.500	3.000	0.000	214.9	198.1	ThermoCalc
TC-SACB-23	93.310	3.140	0.550	3.000	0.000	214.2	198.0	ThermoCalc
TC-SACB-24	92.700	3.200	1.100	3.000	0.000	254.9	197.7	ThermoCalc
TC-SACB-25	92.600	3.200	1.200	3.000	0.000	254.9	197.7	ThermoCalc
TC-SACB-26	93.300	3.100	0.500	3.100	0.000	214.5	197.5	ThermoCalc
TC-SACB-27	94.000	2.000	0.500	3.500	0.000	227.0	195.3	ThermoCalc
TC-SACB-28	93.750	2.000	0.750	3.500	0.000	227.0	195.3	ThermoCalc
TC-SACB-29	93.870	2.000	0.630	3.500	0.000	216.4	195.4	ThermoCalc
TC-SACB-30	94.400	1.200	0.400	4.000	0.000	219.7	192.9	ThermoCalc
TC-SACB-31	93.250	2.000	0.750	4.000	0.000	227.9	192.5	ThermoCalc
TC-SACB-32	93.500	2.000	0.500	4.000	0.000	216.5	192.6	ThermoCalc
TC-SACB-33	93.260	2.130	0.610	4.000	0.000	215.3	192.5	ThermoCalc
TC-SACB-34	92.340	3.110	0.550	4.000	0.000	212.7	192.2	ThermoCalc
TC-SACB-35	93.700	1.500	0.300	4.500	0.000	217.3	190.0	ThermoCalc
TC-SACB-36	93.600	1.500	0.400	4.500	0.000	217.3	190.0	ThermoCalc
TC-SACB-37	93.500	1.500	0.500	4.500	0.000	217.3	190.0	ThermoCalc
TC-SACB-38	91.700	2.500	0.800	5.000	0.000	235.0	186.8	ThermoCalc
TC-SACB-39	91.910	2.530	0.560	5.000	0.000	212.9	187.0	ThermoCalc
TC-SACB-40	91.440	3.050	0.510	5.000	0.000	211.6	186.8	ThermoCalc
TC-SACB-41	91.380	3.080	0.540	5.000	0.000	211.7	186.8	ThermoCalc
TC-SACB-42	90.800	3.500	0.700	5.000	0.000	228.6	186.5	ThermoCalc
TC-SACB-43	91.150	2.400	0.450	6.000	0.000	212.5	182.0	ThermoCalc
TC-SACB-44	90.410	3.050	0.540	6.000	0.000	213.3	181.7	ThermoCalc
TC-SACB-45	90.440	3.050	0.510	6.000	0.000	210.0	181.7	ThermoCalc
TC-SACB-46	90.500	2.400	0.450	6.650	0.000	211.5	178.9	ThermoCalc
TC-SACB-47	90.070	2.770	0.250	6.910	0.000	211.3	177.7	ThermoCalc
TC-SACB-48	89.540	2.980	0.480	7.000	0.000	208.9	177.0	ThermoCalc
TC-SACB-49	89.460	3.010	0.530	7.000	0.000	213.9	176.9	ThermoCalc
TC-SACB-50	90.000	2.000	0.500	7.500	0.000	211.0	175.2	ThermoCalc

ตารางที่ ก.1 ชุดข้อมูลสอนในกำหนดการเชิงพันธุกรรม (ต่อ)

Alloy Code	Composition					Properties		Reference
	Sn	Ag	Cu	Bi	In	Liquidus	Solidus	
TC-SACI-01	98.100	1.200	0.500	0.000	0.200	225.0	213.0	ThermoCalc
TC-SACI-02	97.900	1.200	0.500	0.000	0.400	224.5	211.0	ThermoCalc
TC-SACI-03	98.500	0.300	0.700	0.000	0.500	227.0	213.9	ThermoCalc
TC-SACI-04	95.450	3.370	0.680	0.000	0.500	217.0	213.8	ThermoCalc
TC-SACI-05	98.500	0.300	0.700	0.000	0.500	226.9	213.9	ThermoCalc
TC-SACI-06	98.000	1.000	0.500	0.000	0.500	225.0	210.0	ThermoCalc
TC-SACI-07	97.700	1.200	0.500	0.000	0.600	224.1	210.0	ThermoCalc
TC-SACI-08	97.500	1.200	0.500	0.000	0.800	223.9	209.0	ThermoCalc
TC-SACI-09	95.230	3.210	0.560	0.000	1.000	217.0	210.2	ThermoCalc
TC-SACI-10	98.000	0.300	0.700	0.000	1.000	226.0	210.5	ThermoCalc
TC-SACI-11	95.500	3.000	0.500	0.000	1.000	218.0	210.3	ThermoCalc
TC-SACI-12	95.240	3.160	0.600	0.000	1.000	217.0	210.2	ThermoCalc
TC-SACI-13	97.500	1.000	0.500	0.000	1.000	224.2	208.0	ThermoCalc
TC-SACI-14	97.500	0.300	0.700	0.000	1.500	224.3	207.0	ThermoCalc
TC-SACI-15	94.850	3.020	0.630	0.000	1.500	216.5	206.6	ThermoCalc
TC-SACI-16	94.270	3.170	0.560	0.000	2.000	216.0	202.7	ThermoCalc
TC-SACI-17	97.000	0.300	0.700	0.000	2.000	223.5	203.3	ThermoCalc
TC-SACI-18	94.450	2.920	0.630	0.000	2.000	216.0	202.7	ThermoCalc
TC-SACI-19	94.510	2.960	0.530	0.000	2.000	216.5	202.8	ThermoCalc
TC-SACI-20	94.500	3.000	0.500	0.000	2.000	216.5	202.8	ThermoCalc
TC-SACI-21	96.500	0.300	0.700	0.000	2.500	222.5	199.9	ThermoCalc
TC-SACI-22	94.000	2.800	0.700	0.000	2.500	215.0	198.7	ThermoCalc
TC-SACI-23	93.661	3.493	0.104	0.000	2.742	216.2	209.4	ThermoCalc
TC-SACI-24	93.310	3.140	0.550	0.000	3.000	215.0	197.0	ThermoCalc
TC-SACI-25	96.000	0.300	0.700	0.000	3.000	221.5	197.0	ThermoCalc
TC-SACI-26	94.250	2.000	0.750	0.000	3.000	217.0	197.0	ThermoCalc
TC-SACI-27	93.610	2.660	0.730	0.000	3.000	214.5	197.0	ThermoCalc
TC-SACI-28	93.300	3.100	0.500	0.000	3.100	214.5	197.0	ThermoCalc
TC-SACI-29	93.750	2.000	0.750	0.000	3.500	216.0	197.0	ThermoCalc
TC-SACI-30	93.230	2.530	0.740	0.000	3.500	214.0	197.0	ThermoCalc

ตารางที่ ก.1 ชุดข้อมูลสอนในกำหนดการเชิงพันธกรรม (ต่อ)

Alloy Code	Composition					Properties		Reference
	Sn	Ag	Cu	Bi	In	Liquidus	Solidus	
TC-SACI-31	92.685	3.486	0.119	0.000	3.710	214.5	197.1	ThermoCalc
TC-SACI-32	92.340	3.110	0.550	0.000	4.000	213.0	197.0	ThermoCalc
TC-SACI-33	94.400	1.200	0.400	0.000	4.000	219.0	197.0	ThermoCalc
TC-SACI-34	93.250	2.000	0.750	0.000	4.000	214.5	197.0	ThermoCalc
TC-SACI-35	92.600	2.700	0.700	0.000	4.000	213.0	197.0	ThermoCalc
TC-SACI-36	92.258	3.445	0.104	0.000	4.194	214.0	197.1	ThermoCalc
TC-SACI-37	93.500	1.500	0.500	0.000	4.500	216.5	197.0	ThermoCalc
TC-SACI-38	89.792	5.019	0.301	0.000	4.888	219.0	205.9	ThermoCalc
TC-SACI-39	91.380	3.080	0.540	0.000	5.000	212.0	196.6	ThermoCalc
TC-SACI-40	91.700	2.500	0.800	0.000	5.000	216.0	196.6	ThermoCalc
TC-SACI-41	91.740	2.510	0.750	0.000	5.000	211.5	196.6	ThermoCalc
TC-SACI-42	91.500	1.500	2.000	0.000	5.000	279.0	196.8	ThermoCalc
TC-SACI-43	91.500	2.500	1.000	0.000	5.000	230.0	196.6	ThermoCalc
TC-SACI-44	91.610	2.660	0.730	0.000	5.000	212.0	196.6	ThermoCalc
TC-SACI-45	90.800	3.500	0.700	0.000	5.000	210.0	196.6	ThermoCalc
TC-SACI-46	90.410	3.050	0.540	0.000	6.000	210.0	196.6	ThermoCalc
TC-SACI-47	91.150	2.400	0.450	0.000	6.000	212.0	196.6	ThermoCalc
TC-SACI-48	90.500	2.400	0.450	0.000	6.650	210.5	190.0	ThermoCalc
TC-SACI-49	90.070	2.770	0.250	0.000	6.910	211.0	190.0	ThermoCalc
TC-SACI-50	89.550	2.000	0.450	0.000	8.000	209.5	190.8	ThermoCalc
TC-SACIB-01	90.148	3.292	0.311	6.198	0.050	212.0	180.5	ThermoCalc
TC-SACIB-02	89.866	3.353	0.281	6.400	0.101	213.0	179.1	ThermoCalc
TC-SACIB-03	95.513	0.100	0.100	4.181	0.106	224.8	192.7	ThermoCalc
TC-SACIB-04	95.513	0.100	0.200	4.181	0.106	224.8	192.7	ThermoCalc
TC-SACIB-05	95.158	0.100	0.100	4.500	0.142	224.3	190.6	ThermoCalc
TC-SACIB-06	89.715	3.353	0.281	6.400	0.252	213.0	177.8	ThermoCalc
TC-SACIB-07	89.846	3.292	0.311	6.198	0.353	210.0	180.0	ThermoCalc
TC-SACIB-08	89.504	3.493	0.401	6.249	0.353	216.0	177.6	ThermoCalc
TC-SACIB-09	89.745	3.292	0.311	6.198	0.454	210.0	177.2	ThermoCalc
TC-SACIB-10	96.216	1.505	0.200	1.575	0.504	222.8	203.8	ThermoCalc

ตารางที่ ก.1 ชุดข้อมูลสอนในกำหนดการเชิงพันธกรรม (ต่อ)

Alloy Code	Composition					Properties		Reference
	Sn	Ag	Cu	Bi	In	Liquidus	Solidus	
TC-SACIB-11	96.124	1.365	0.180	1.827	0.504	223.0	202.2	ThermoCalc
TC-SACIB-12	96.206	1.505	0.210	1.575	0.504	222.8	203.8	ThermoCalc
TC-SACIB-13	95.954	1.505	0.210	1.827	0.504	222.4	202.2	ThermoCalc
TC-SACIB-14	89.202	3.493	0.401	6.249	0.655	214.0	175.0	ThermoCalc
TC-SACIB-15	94.500	3.000	0.500	1.000	1.000	216.5	203.4	ThermoCalc
TC-SACIB-16	93.500	3.000	0.500	2.000	1.000	215.0	196.8	ThermoCalc
TC-SACIB-17	92.500	3.000	0.500	3.000	1.000	213.5	190.4	ThermoCalc
TC-SACIB-18	91.500	3.000	0.500	4.000	1.000	212.0	184.4	ThermoCalc
TC-SACIB-19	89.500	3.000	0.500	6.000	1.000	209.0	173.3	ThermoCalc
TC-SACIB-20	95.250	2.000	0.750	1.000	1.000	221.0	203.6	ThermoCalc
TC-SACIB-21	93.250	2.000	0.750	3.000	1.000	224.0	190.6	ThermoCalc
TC-SACIB-22	94.500	2.820	0.680	1.000	1.000	216.0	203.4	ThermoCalc
TC-SACIB-23	93.990	2.340	0.670	2.000	1.000	216.0	196.9	ThermoCalc
TC-SACIB-24	92.400	3.000	0.600	3.000	1.000	213.0	190.4	ThermoCalc
TC-SACIB-25	91.600	2.820	0.580	4.000	1.000	212.0	184.4	ThermoCalc
TC-SACIB-26	90.150	2.400	0.450	6.000	1.000	211.0	173.7	ThermoCalc
TC-SACIB-27	94.450	2.670	0.680	1.200	1.000	216.5	203.4	ThermoCalc
TC-SACIB-28	89.140	3.292	0.311	6.198	1.058	208.5	171.9	ThermoCalc
TC-SACIB-29	88.858	3.353	0.281	6.400	1.109	208.5	170.4	ThermoCalc
TC-SACIB-30	89.039	3.292	0.311	6.198	1.159	208.7	171.0	ThermoCalc
TC-SACIB-31	88.647	3.493	0.401	6.249	1.209	211.0	170.0	ThermoCalc
TC-SACIB-32	88.606	3.353	0.281	6.400	1.361	214.0	168.1	ThermoCalc
TC-SACIB-33	88.787	3.292	0.311	6.198	1.411	208.4	168.7	ThermoCalc
TC-SACIB-34	91.961	3.132	0.220	3.124	1.562	213.7	185.3	ThermoCalc
TC-SACIB-35	95.170	0.100	0.100	2.961	1.669	223.5	188.5	ThermoCalc
TC-SACIB-36	94.946	1.285	0.210	1.858	1.701	220.9	193.1	ThermoCalc
TC-SACIB-37	88.143	3.493	0.401	6.249	1.713	209.0	165.3	ThermoCalc
TC-SACIB-38	92.250	2.000	0.750	3.000	2.000	222.0	182.2	ThermoCalc
TC-SACIB-39	93.430	2.880	0.690	1.000	2.000	215.0	195.5	ThermoCalc
TC-SACIB-40	92.860	2.470	0.670	2.000	2.000	214.0	188.7	ThermoCalc

ตารางที่ ก.1 ชุดข้อมูลสอนในกำหนดการเชิงพันธกรรม (ต่อ)

Alloy Code	Composition					Properties		Reference
	Sn	Ag	Cu	Bi	In	Liquidus	Solidus	
TC-SACIB-41	92.640	2.870	0.490	2.000	2.000	214.0	188.7	ThermoCalc
TC-SACIB-42	91.620	2.780	0.600	3.000	2.000	212.0	182.0	ThermoCalc
TC-SACIB-43	90.800	2.600	0.600	4.000	2.000	211.0	175.7	ThermoCalc
TC-SACIB-44	90.720	2.750	0.530	4.000	2.000	211.0	175.7	ThermoCalc
TC-SACIB-45	95.000	0.300	0.700	2.000	2.000	220.5	189.6	ThermoCalc
TC-SACIB-46	89.272	3.212	0.512	4.888	2.117	208.0	169.0	ThermoCalc
TC-SACIB-47	89.168	2.570	0.401	5.694	2.167	209.3	164.5	ThermoCalc
TC-SACIB-48	91.750	2.000	0.750	3.000	2.500	220.0	177.9	ThermoCalc
TC-SACIB-49	95.288	1.505	0.341	0.346	2.520	220.3	196.7	ThermoCalc
TC-SACIB-50	94.653	0.180	0.100	2.516	2.551	222.4	182.3	ThermoCalc
TC-SACIB-51	93.323	3.333	0.321	0.403	2.620	215.0	206.8	ThermoCalc
TC-SACIB-52	87.588	3.292	0.401	5.846	2.872	206.0	162.5	ThermoCalc
TC-SACIB-53	92.500	3.000	0.500	1.000	3.000	213.5	190.0	ThermoCalc
TC-SACIB-54	91.500	3.000	0.500	2.000	3.000	212.0	183.8	ThermoCalc
TC-SACIB-55	90.500	3.000	0.500	3.000	3.000	211.0	177.8	ThermoCalc
TC-SACIB-56	89.500	3.000	0.500	4.000	3.000	209.0	172.1	ThermoCalc
TC-SACIB-57	87.500	3.000	0.500	6.000	3.000	206.0	161.7	ThermoCalc
TC-SACIB-58	93.250	2.000	0.750	1.000	3.000	216.0	190.1	ThermoCalc
TC-SACIB-59	92.690	2.790	0.520	1.000	3.000	214.0	190.1	ThermoCalc
TC-SACIB-60	91.640	2.700	0.660	2.000	3.000	212.0	183.8	ThermoCalc
TC-SACIB-61	90.800	2.560	0.640	3.000	3.000	211.0	177.8	ThermoCalc
TC-SACIB-62	90.740	2.700	0.560	3.000	3.000	211.0	177.8	ThermoCalc
TC-SACIB-63	90.030	2.350	0.620	4.000	3.000	211.0	172.2	ThermoCalc
TC-SACIB-64	89.860	2.650	0.490	4.000	3.000	210.0	172.2	ThermoCalc
TC-SACIB-65	88.150	2.400	0.450	6.000	3.000	208.0	162.0	ThermoCalc
TC-SACIB-66	92.610	2.660	0.730	1.000	3.000	216.0	190.0	ThermoCalc
TC-SACIB-67	95.000	0.300	0.700	1.000	3.000	220.0	189.4	ThermoCalc
TC-SACIB-68	92.650	2.670	0.680	1.000	3.000	214.0	190.0	ThermoCalc
TC-SACIB-69	86.632	3.574	0.421	6.299	3.074	204.2	160.2	ThermoCalc
TC-SACIB-70	86.653	3.674	0.502	5.946	3.225	205.4	161.8	ThermoCalc

ตารางที่ ก.1 ชุดข้อมูลสอนในกำหนดการเชิงพันธกรรม (ต่อ)

Alloy Code	Composition					Properties		Reference
	Sn	Ag	Cu	Bi	In	Liquidus	Solidus	
TC-SACIB-71	93.165	2.951	0.231	0.346	3.307	215.6	194.4	ThermoCalc
TC-SACIB-72	92.895	3.072	0.100	0.567	3.366	215.6	193.0	ThermoCalc
TC-SACIB-73	91.807	1.987	0.612	1.965	3.628	212.7	183.9	ThermoCalc
TC-SACIB-74	92.253	0.220	0.220	3.622	3.685	217.8	167.8	ThermoCalc
TC-SACIB-75	94.310	0.220	0.210	1.575	3.685	220.8	181.6	ThermoCalc
TC-SACIB-76	92.284	0.220	0.220	3.591	3.685	217.9	168.0	ThermoCalc
TC-SACIB-77	92.824	2.991	0.110	0.390	3.685	215.5	194.1	ThermoCalc
TC-SACIB-78	94.726	1.044	0.120	0.425	3.685	220.6	198.7	ThermoCalc
TC-SACIB-79	92.824	2.991	0.110	0.390	3.685	215.5	200.7	ThermoCalc
TC-SACIB-80	87.883	3.995	0.361	3.981	3.780	208.1	172.0	ThermoCalc
TC-SACIB-81	90.500	3.000	0.500	2.000	4.000	211.0	183.7	ThermoCalc
TC-SACIB-82	88.500	3.000	0.500	4.000	4.000	208.0	171.3	ThermoCalc
TC-SACIB-83	91.820	2.750	0.430	1.000	4.000	213.0	190.1	ThermoCalc
TC-SACIB-84	90.680	2.640	0.680	2.000	4.000	211.0	183.0	ThermoCalc
TC-SACIB-85	88.890	2.500	0.610	4.000	4.000	208.0	169.6	ThermoCalc
TC-SACIB-86	90.436	4.698	0.381	0.454	4.031	219.0	200.6	ThermoCalc
TC-SACIB-87	89.871	1.927	0.492	3.679	4.031	210.6	169.9	ThermoCalc
TC-SACIB-88	91.686	0.100	0.100	4.075	4.039	217.6	161.9	ThermoCalc
TC-SACIB-89	90.265	4.979	0.120	0.504	4.132	222.0	200.2	ThermoCalc
TC-SACIB-90	92.619	2.710	0.100	0.425	4.146	215.5	193.8	ThermoCalc
TC-SACIB-91	91.402	0.100	0.100	4.217	4.181	217.1	159.8	ThermoCalc
TC-SACIB-92	91.240	1.485	0.522	2.469	4.283	213.0	174.8	ThermoCalc
TC-SACIB-93	93.239	1.867	0.110	0.390	4.394	217.2	197.4	ThermoCalc
TC-SACIB-94	92.353	2.268	0.100	0.850	4.429	215.5	191.9	ThermoCalc
TC-SACIB-95	90.835	0.100	0.100	4.500	4.465	216.2	155.6	ThermoCalc
TC-SACIB-96	92.500	1.500	0.500	1.000	4.500	215.0	183.9	ThermoCalc
TC-SACIB-97	93.468	1.365	0.100	0.567	4.500	218.2	188.4	ThermoCalc
TC-SACIB-98	89.630	4.839	0.391	0.454	4.687	218.0	193.6	ThermoCalc
TC-SACIB-99	84.411	5.200	0.411	5.191	4.787	224.2	164.9	ThermoCalc
TC-SACIB-100	89.187	5.019	0.301	0.605	4.888	219.0	195.5	ThermoCalc

ตารางที่ ก.1 ชุดข้อมูลสอนในกำหนดการเชิงพันธกรรม (ต่อ)

Alloy Code	Composition					Properties		Reference
	Sn	Ag	Cu	Bi	In	Liquidus	Solidus	
TC-SACIB-101	89.418	4.939	0.100	0.605	4.939	217.0	195.3	ThermoCalc
TC-SACIB-102	88.431	5.039	0.281	1.310	4.939	219.0	188.9	ThermoCalc
TC-SACIB-103	90.141	4.256	0.261	0.403	4.939	209.5	193.6	ThermoCalc
TC-SACIB-104	89.086	5.059	0.261	0.605	4.989	219.0	195.2	ThermoCalc
TC-SACIB-105	90.500	3.000	0.500	1.000	5.000	211.0	185.0	ThermoCalc
TC-SACIB-106	88.500	3.000	0.500	3.000	5.000	208.0	170.6	ThermoCalc
TC-SACIB-107	85.500	3.000	0.500	6.000	5.000	203.0	151.1	ThermoCalc
TC-SACIB-108	91.250	2.000	0.750	1.000	5.000	212.0	182.3	ThermoCalc
TC-SACIB-109	89.097	5.100	0.261	0.504	5.039	220.0	193.3	ThermoCalc
TC-SACIB-110	92.114	0.923	0.411	0.907	5.644	214.8	178.4	ThermoCalc
TC-SACIB-111	88.551	4.798	0.301	0.403	5.946	210.0	190.5	ThermoCalc
TC-SACIB-112	90.150	2.400	0.450	1.000	6.000	211.0	178.6	ThermoCalc
TC-SACIB-113	88.150	2.400	0.450	3.000	6.000	208.0	160.6	ThermoCalc
TC-SACIB-114	89.500	3.000	0.500	1.000	6.000	208.5	179.9	ThermoCalc
TC-SACIB-115	87.500	3.000	0.500	3.000	6.000	205.5	162.7	ThermoCalc
TC-SACIB-116	87.052	0.401	0.100	6.350	6.098	209.5	127.7	ThermoCalc
TC-SACIB-117	84.107	4.598	0.562	4.586	6.148	207.7	155.7	ThermoCalc
TC-SACIB-118	82.889	5.200	0.471	5.191	6.249	216.0	147.9	ThermoCalc
TC-SACIB-119	86.078	3.493	0.652	3.477	6.299	208.0	158.0	ThermoCalc
TC-SACIB-120	86.871	0.441	0.190	6.148	6.350	208.5	126.1	ThermoCalc
TC-SACIB-121	87.877	5.160	0.110	0.454	6.400	212.0	189.1	ThermoCalc
TC-SACIB-122	88.740	1.465	0.471	2.923	6.400	208.9	154.5	ThermoCalc
TC-SACIB-123	86.669	0.421	0.110	6.400	6.400	208.5	123.8	ThermoCalc
TC-SACIB-124	86.669	0.421	0.200	6.400	6.400	208.5	123.8	ThermoCalc
TC-SACIB-125	86.669	0.430	0.200	6.400	6.400	208.5	123.8	ThermoCalc
DAT-SAC-01	95.500	0.500	4.000	0.000	0.000	226.0	218.0	[58]
DAT-SAC-02	93.000	3.000	4.000	0.000	0.000	221.0	221.0	[58]
DAT-SAC-03	95.400	3.600	1.000	0.000	0.000	217.9	217.0	[56]
DAT-SAC-04	95.000	4.000	1.000	0.000	0.000	220.0	217.0	[57]

ตารางที่ ก.1 ชุดข้อมูลสอนในกำหนดการเชิงพันธกรรม (ต่อ)

Alloy Code	Composition					Properties		Reference
	Sn	Ag	Cu	Bi	In	Liquidus	Solidus	
DAT-SACB-01	92.700	3.200	1.100	3.000	0.000	240.0	205.0	[57]
DAT-SACB-02	93.500	3.800	0.700	2.000	0.000	219.6	213.1	[7]
DAT-SACB-03	91.500	3.800	0.700	4.000	0.000	220.3	206.4	[7]
DAT-SACI-01	91.500	0.500	3.000	0.000	5.000	212.0	140.0	[58]
DAT-SACI-02	91.500	1.500	2.000	0.000	5.000	205.0	140.0	[58]
DAT-SACI-03	91.500	2.500	1.000	0.000	5.000	205.0	140.0	[58]



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

ชุดข้อมูลทดสอบในกำหนดการเชิงพันธูกรรม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ข้อมูลทดสอบในกำหนดการเชิงพันธุกรรม

รายละเอียดของส่วนผสมลวดบัดกรีอ่อนทั้ง 25 ส่วนผสมที่นำมาใช้เป็นข้อมูลทดสอบในกำหนดการเชิงพันธุกรรม รวมทั้งข้อมูลอุณหภูมิวิกฤต และอุณหภูมิโซลิดัสของแต่ละส่วนผสม แสดงได้ดังตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลทดสอบในกำหนดการเชิงพันธุกรรม

Alloy Code	Composition					Properties		Reference
	Sn	Ag	Cu	Bi	In	Liquidus	Solidus	
REF-01	98.500	1.000	0.500	0.000	0.000	227.00	215.00	[59]
REF-02	96.500	3.000	0.500	0.000	0.000	219.00	217.00	[59]
REF-03	96.300	3.200	0.500	0.000	0.000	218.00	217.00	[57]
REF-04	95.750	3.500	0.750	0.000	0.000	218.00	217.00	[57]
REF-05	94.900	3.600	1.500	0.000	0.000	273.00	217.00	[60]
REF-06	95.500	3.800	0.700	0.000	0.000	220.00	217.00	[59]
REF-07	95.500	3.900	0.600	0.000	0.000	220.00	217.00	[59]
REF-08	95.500	4.000	0.500	0.000	0.000	225.00	217.00	[59]
REF-09	95.000	4.100	0.900	0.000	0.000	238.00	216.50	[60]
REF-10	93.500	2.000	0.500	4.000	0.000	215.00	195.00	[61]
REF-11	90.000	2.000	0.500	7.500	0.000	213.00	183.00	[61]
REF-12	96.000	2.500	0.500	1.000	0.000	221.00	214.00	[62]
REF-13	95.500	3.000	0.500	1.000	0.000	219.50	213.00	[8]
REF-14	93.500	3.000	0.500	3.000	0.000	219.50	207.00	[8]
REF-15	92.700	3.200	1.100	3.000	0.000	240.00	207.00	[57]
REF-16	94.250	2.000	0.750	3.000	0.000	218.00	207.00	[62]
REF-17	97.500	0.300	0.700	0.000	1.500	238.40	209.40	[63]
REF-18	96.500	0.300	0.700	0.000	2.500	232.60	202.70	[63]
REF-19	96.000	0.300	0.700	0.000	3.000	230.20	197.70	[63]
REF-20	98.000	1.000	0.500	0.000	0.500	225.00	203.50	[64]
REF-21	97.500	1.000	0.500	0.000	1.000	224.00	208.00	[64]

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลทดสอบในกำหนดการเชิงพันธกรรม (ต่อ)

Alloy Code	Composition					Properties		Reference
	Sn	Ag	Cu	Bi	In	Liquidus	Solidus	
REF-22	98.100	1.200	0.500	0.000	0.200	226.00	211.00	[64]
REF-23	97.900	1.200	0.500	0.000	0.400	224.50	209.00	[64]
REF-24	97.700	1.200	0.500	0.000	0.600	224.50	207.50	[64]
REF-25	97.500	1.200	0.500	0.000	0.800	224.50	205.00	[64]



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเชษฐา พันธุ์เครือบุตร เกิดเมื่อวันที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2529 ที่ตำบลเชิงเนิน อำเภอเมือง จังหวัดระยอง สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 เมื่อปีการศึกษา 2546 จากโรงเรียนระยองวิทยาคม จังหวัดระยอง และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต เมื่อปีการศึกษา 2550 จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2551

ระหว่างศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ได้รับทุนอุดหนุนการศึกษาจากโครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และจากโครงการพัฒนาอัจฉริยภาพทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำหรับเด็กและเยาวชน ภายใต้การดูแลของศาสตราจารย์ ดร.ประภาส จงสฤษดิ์วัฒนา และอาจารย์ ดร. บุญรัตน์ โฉมวงศ์วัฒน์

ปัจจุบันได้รับทุนการศึกษาโครงการเครือข่ายเชิงกลยุทธ์ เพื่อการผลิตและพัฒนาอาจารย์ในสถาบันอุดมศึกษาจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา เพื่อศึกษาต่อระดับปริญญาโทและปริญญาเอก สาขาวิชา Computational Materials Engineering ณ ประเทศอังกฤษ

ศูนย์วิทยพัชกร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย