

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการออกแบบบล็อก-เบห์นเคนในการทำนาย
สมบัติทางกลของกรรมวิธีทางความร้อนสำหรับ Inconel 738 ที่ผ่านการใช้งาน
Mathematical Model of Box-Behnken Design for Predicting
Mechanical Properties of Heat Treatment of Inconel 738 Through the Use

สุภาวรรณ กริ่งรัมย์^{1*} และสุจรรรยา แก้วพรายตา²

Supawan Kringram^{1*} and Sujanya Kaewphrayta²

^{*1} สาขาวิชาเทคนิคอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคนิคราชบุรี ราชบุรี 70000

^{*1} Industrial Technology, Ratchaburi Technical College, Ratchaburi 70000

² สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์และซัพพลายเชน วิทยาลัยเทคนิคราชบุรี ราชบุรี 70000

² Logistics and Supply Chain Management, Ratchaburi Technical College, Ratchaburi 70000

Received : October 30, 2024 Revised : December 12, 2024 Accepted : December 18, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบบล็อก - เบห์นเคนในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการทำกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อทำนายค่าความแข็งสำหรับ Inconel 738 ที่ผ่านการใช้งานโดยทำการศึกษา 3 ปัจจัยหลัก คือ อุณหภูมิในการอบละลาย (X_1) อุณหภูมิในการบ่มแข็ง (X_2) และเวลาในการบ่มแข็ง (X_3) ศึกษาด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบบล็อก - เบห์นเคน เพื่อกำหนดผลการทดสอบค่าความแข็ง ผลการศึกษาพบว่า สมการทำนายสมบัติทางกลด้านความแข็งที่เหมาะสม คือ สมการเต็มรูปแบบยกกำลัง ปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดต่อค่าความแข็ง คือ อบละลายที่อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการบ่มแข็ง 20 ชั่วโมง สรุปได้ว่าอุณหภูมิในการอบละลาย อุณหภูมิในการบ่มแข็ง และเวลาในการบ่มแข็งมีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลด้านความแข็งอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นงานมีความแข็งมากที่สุดจะมีปริมาณของแทนทาลัมคาร์ไบด์หนาแน่น ซึ่งผลจากการทดลองครั้งนี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการทำกรรมวิธีทางความร้อนของ Inconel 738 ได้

คำสำคัญ : แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, ความแข็ง, Inconel 738, การออกแบบบล็อก-เบห์นเคน

Abstract

This research studied the application of Box - Behnken Design for mathematical model for predicting mechanical properties on the Inconel 738 through the use. The three main factors were studied: Solution temperature (X_1), Aging temperature (X_2) and Aging time (X_3). The resulting materials were examined using Box - Behnken experimental design to determine the resulting material hardness test. The experimental results show that using a full quadratic model with the proposed mathematical model. The most appropriate parameter for highest hardness is solution temperature 930 °C Aging temperature 600 °C and Aging time 20 hr. It can be concluded that the solution temperature, aging temperature and aging time have an influence on the hardness at statistically significant value of 0.05. The hardness of the specimen was highest with the amount of titanium carbide. The results of this research can be used as data for the heat treatment processing of Inconel 738.

Keyword : Mathematical Model, Hardness, Inconel 738, Box-Behnken Design

*สุภาวรรณ กริ่งรัมย์

E-mail : p.ksupawan@gmail.com

1. บทนำ

ปัจจุบันการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยระบบเครื่องจักรเชื้อเพลิงจากก๊าซธรรมชาติหรือระบบกังหันก๊าซธรรมชาติมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าของประเทศ เนื่องจากมีปริมาณมลพิษต่ำกว่าการผลิตจากเชื้อเพลิงชนิดอื่น และด้วยระบบการผลิตที่มีประสิทธิภาพสูงของกังหันก๊าซธรรมชาติ จำเป็นต้องใช้ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่มีสมรรถนะและเหมาะสมกับการใช้งาน ชิ้นส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญในระบบเครื่องจักร คือ ใบพัดกังหันหรือเทอร์ไบน์เบลต (อกินันท์ แต่ตระกูล และ จิรรัตน์ ธีระวรพฤกษ์, 2554) ผลิตด้วยโลหะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงในปัจจุบันได้แก่ นิกเกิลผสม และโคบอลต์ผสม (สิรินญา จันทรศักดิ์สูง, 2550) สำหรับในการทำงานของชุดใบพัดกังหันที่จำเป็นต้องใช้ในการปรับปรุงเร่งด่วนเพื่อลดภาระการบำรุงรักษาและมูลค่าอะไหล่ทดแทนในระบบหมุนคือ ใบพัดกังหันก๊าซโลหะผสมพิเศษแบบนิกเกิล (Inconel 738) เนื่องจากสภาพการใช้งานที่รุนแรงภายใต้อุณหภูมิสูงในขณะเดียวกันกับการรับความเค้นซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลและความเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายที่สูงขึ้นขณะใช้งาน (นพลสิทธิ์ ภูณเมฆ, 2556)

ในการทำงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นระยะเวลาานาน ๆ นั้น ใบพัดกังหันก๊าซ ซึ่งทำด้วยโลหะผสมพิเศษที่ผลิตด้วยวิธีการหล่อนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงและเสื่อมสภาพทางโครงสร้างจุลภาค โดยจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและระยะเวลาที่สัมผัสความร้อนขณะใช้งาน (วัลย์วิภา แก่นจันทร์, 2555) ลักษณะโครงสร้างดังกล่าวจะส่งผลต่อความแข็งแรงที่อุณหภูมิและความต้านทานต่อการคืบ นอกจากนี้การใช้งานไปนาน ๆ จะมีผลของการคืบมาเกี่ยวข้องด้วยโดยจะเกิดช่องว่าง และรอยแตกเล็ก ๆ โดยปริมาณข้อบกพร่องต่าง ๆ เหล่านี้จะแปรผันกับเวลาและอุณหภูมิที่ใบพัดกังหันก๊าซถูกใช้งานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งบริเวณเหล่านี้จะเป็นแหล่งกำเนิดของรอยแตกตามขอบเกรนและส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการแตกหัก จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงทำให้อายุการใช้งานของใบพัดกังหันก๊าซมีอย่างจำกัด แต่เนื่องจากในอดีตที่ผ่านมาแนวทางการซ่อมบำรุงชิ้นส่วนที่สำคัญในการผลิตกระแสไฟฟ้าจะใช้การเปลี่ยนชิ้นส่วนใหม่เป็นหลักเพื่อความมั่นใจในการใช้งาน โดยเมื่อผู้พิจารณาว่าใบพัดกังหันดังกล่าวมีความไม่เหมาะสมที่จะใช้งานต่อไป (Hill & Hunter, 1966) การแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีการเปลี่ยนใบพัดกังหันใบใหม่หรือเปลี่ยนทั้งชุดเพียงอย่างเดียว ซึ่งโลหะผสมพิเศษเบสิกนิกเกิลมีราคาสูงถึงประมาณหนึ่งหมื่นจนถึงห้าแสนบาท ต่อใบ และมีช่วงอายุการใช้งานประมาณสองหมื่นถึงหนึ่งแสนชั่วโมงนับเป็นจำนวนเงินที่สูงมากใน

การนำเข้าใบพัดกังหันที่ทำจากโลหะผสมเบสิกนิกเกิลต่อปีเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

แต่ในปัจจุบันวิศวกรและนักวิจัยในประเทศให้ความสนใจการทำวิจัยเกี่ยวกับโลหะที่อุณหภูมิสูงมากขึ้น จึงได้เริ่มมีการศึกษาแนวความคิดการเพิ่มอายุการใช้งานของใบพัดกังหันที่ทำจากโลหะผสมพิเศษเบสิกนิกเกิล ภายใต้เงื่อนไขการปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อน และความรู้ทางโลหะวิทยา (อภิชาติ พานิชกุล และ อุษณีย์ กิตกัธ, 2554) เพื่อให้สมบัติด้านต่าง ๆ กลับคืนสู่สภาพใกล้เคียงชิ้นส่วนใหม่เป็นการต่ออายุการใช้งานให้นานขึ้น (วีรเทพ เณิมสมิทธิ์ชัย, 2550) ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการเปลี่ยนชิ้นส่วนใหม่ ตลอดจนเป็นส่วนสำคัญในการวางแผนการซ่อมบำรุงรักษาเชิงป้องกัน สอดคล้องการดำเนินการด้านการบำรุงรักษาเครื่องจักร ดังนั้นจึงได้มีการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง (สมเกียรติ ตั้งจิตลิตเจริญ และ ภูมินทร์ แจ่มเชื้อ, 2554) ในการหาวิธีการทำนายการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของกรรมวิธีทางความร้อนสำหรับ Inconel 738 ที่ผ่านการใช้งานแล้วให้สามารถนำกลับมาใช้งานได้ใกล้เคียงเดิมและมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Gunaraj & Murugan, 1999)

ด้วยเหตุผลข้างต้นนี้จึงได้ทำการสร้างแบบจำลองการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการออกแบบบล็อก - เบ้นเคนในการทำนายสมบัติทางกลของกรรมวิธีทางความร้อนสำหรับ Inconel 738 ที่ผ่านการใช้งานเพื่อให้ได้สมการในการคำนวณหาค่าความแข็งของวัสดุ นั้น ๆ เพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุ Inconel 738 ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงเดิมมากที่สุด เพื่อยืดอายุการใช้งานของวัสดุซึ่งทำให้ลดค่าใช้จ่ายอย่างมากในด้านต้นทุนและสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเครื่องยนต์กังหันก๊าซให้มีคุณภาพและประสิทธิภาพมากที่สุด

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาและประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบบล็อก - เบ้นเคนในการทำนายสมบัติทางกลของกรรมวิธีทางความร้อนสำหรับทำนายสมบัติทางกล

2.2 เพื่อหาสมบัติทางกลด้านความแข็งด้วยกรรมวิธีทางความร้อนสำหรับ Inconel 738 ที่ผ่านการใช้งาน

3. สมมติฐานการวิจัย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการออกแบบบล็อก - เบ้นเคนในการทำนายสมบัติทางกลของกรรมวิธีทางความร้อนสำหรับ Inconel 738 ที่ผ่านการใช้งานมีผลใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง

4. วิธีการดำเนินการวิจัย

4.1 เครื่องมือและวัสดุในการทดลอง

4.1.1 เตาอบความร้อนสูง

เป็นเตาอบความร้อนสูง Linn High Therm สามารถอบได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 0 ถึง 1,800 องศาเซลเซียส

4.1.2 เครื่องขัดผิวมัน ยี่ห้อ JEAN WIRTZ

สามารถปรับอัตราความเร็วรอบได้ตั้งแต่ 30 รอบต่อนาที ถึง 600 รอบต่อนาที

4.1.3 เครื่องทดสอบความแข็งวิกเกอร์ (Hardness Vickers Tester)

4.1.4 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็น Inconel 738 โดยจะทำการตัดโดยใช้เครื่อง Wire Cut ตัดชิ้นงานขนาดความกว้าง 9 มิลลิเมตร ความยาว 9 มิลลิเมตร ทั้งหมด 45 ชิ้น



ภาพที่ 1 ภาพวัสดุ Inconel 738 ที่ใช้งานแล้ว

4.2 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการออกแบบบล็อก - เบห์นเคนในการทำนายสมบัติทางกลของกรรมวิธีทางความร้อนสำหรับ Inconel 738 ที่ผ่านการใช้งาน (Balasubramanian, 2015) ครั้งนี้ได้กำหนดให้มีปัจจัยหลักและปัจจัยตอบสนอง ดังนี้

ปัจจัยหลัก คือ ปัจจัยที่ปรับเปลี่ยนไประหว่างการทดลอง ปัจจัยชนิดนี้มีผลต่อการทดลองค่อนข้างมาก ซึ่งปัจจัยหลักที่ใช้ในการทดลองนี้มี 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิการอบละลาย (Solution Temperature) (X_1) อุณหภูมิในการบ่มแข็ง (Aging Temperature) (X_2) และเวลาในการบ่มแข็ง (Aging Time) (X_3)

ปัจจัยตอบสนอง คือ ปัจจัยที่เปลี่ยนไปตามปัจจัยหลัก มี 2 ปัจจัย ได้แก่ ความแข็ง (Hardness) และความหนาแน่น (Density) ซึ่งมีขั้นตอนในการดำเนินการ ดังนี้

4.2.1 การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

กำหนดระดับปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยโดยพิจารณาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองโดยออกแบบการทดลองแบบบล็อก - เบห์นเคน ซึ่งระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองมี 3 ระดับ

คือ ระดับต่ำ (-1) ระดับกลาง (0) และระดับสูง (+1) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ		
	-1	0	+1
Solution Temperature (X_1) ($^{\circ}$ C)	930	1030	1130
Aging Temperature (X_2) ($^{\circ}$ C)	600	670	740
Aging Time (hrs.) (X_3)	16	18	20

4.3 การออกแบบการทดลองแบบบล็อก-เบห์นเคน

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการออกแบบบล็อก - เบห์นเคนในการทำนายสมบัติทางกลของกรรมวิธีทางความร้อนสำหรับ Inconel 738 ที่ผ่านการใช้งาน ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติกำหนดลำดับการทดลองและออกแบบการทดลองแบบบล็อก - เบห์นเคนที่มี 3 ปัจจัยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ดังนั้นเมื่อโปรแกรมประมวลผลการออกแบบการทดลองจึงมีจำนวน 15 หน่วยการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองแบบบล็อก-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)

การทดลอง	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	0
2	-1	+1	0
3	+1	-1	0
4	+1	+1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	+1
7	+1	0	-1
8	+1	0	+1
9	0	-1	-1
10	0	+1	+1
11	0	-1	-1
12	0	+1	+1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

จากตารางที่ 2 พบว่าการทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ดังนั้นจึงมีหน่วยการทดลองทั้งหมด 45 หน่วยการทดลอง

4.4 ขั้นตอนการทดลองด้วยกรรมวิธีทางความร้อน

4.4.1 การอบละลาย (Solution Treatment)

ทำการอบละลายในอุณหภูมิที่ 930,1030 และ 1130 องศาเซลเซียส ในเวลา 1 ชั่วโมง

4.4.2 การบ่มแข็ง (Aging)

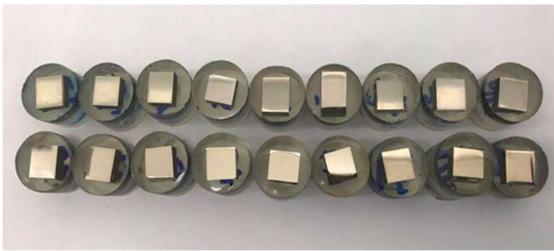
ทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 600,670 และ 740 องศาเซลเซียส ในเวลา 16,18 และ 20 ชั่วโมง โดยทำตามลำดับการออกแบบการทดลองทั้ง 45 หน่วยการทดลอง

4.5 การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติทางกล

4.5.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

ตัดชิ้นงานให้ได้ขนาดความกว้าง 9 มิลลิเมตร ความยาว 9 มิลลิเมตร และนำชิ้นงานทั้ง 45 ชิ้นไปทำตัวเรียดังแสดงในภาพที่ 2

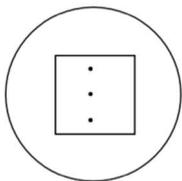
4.5.2 นำชิ้นงานมาขัดหยาบ ขัดละเอียด และขัดมัน โดยการขัดแบบน้ำ



ภาพที่ 2 ชิ้นงานที่ทำตัวเรียด

4.5.3 การทดสอบความแข็ง

นำชิ้นงานมาทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบแบบวิกเกอร์ โดยใช้หัวกดเพชรน้ำหนักที่ 500 gf ใช้เวลาในการกด 10 วินาที และกำหนดตำแหน่งการทดสอบความแข็งทั่วบริเวณชิ้นงานโดยเฉลี่ยให้เท่ากัน ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ชิ้นงานที่ทำตัวเรียด

4.6 การวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square : R^2) และการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.6.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เป็นการตรวจสอบข้อมูลที่ได้จากการทดลองก่อนนำไป

วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจและวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลองต้องเป็นไปตามสมมติฐาน 3 ข้อ คือ (1) ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ (2) ค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกันและ (3) ค่าความแปรปรวนมีเสถียรภาพ ถ้าหากค่าส่วนตกค้างเป็นไปตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ ถือว่าข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องและเหมาะสมสำหรับนำไปวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจและวิเคราะห์ความแปรปรวน

4.6.2 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ เป็นการวิเคราะห์ว่าการออกแบบที่ใช้ในการทดลองมีความเหมาะสมหรือไม่ ซึ่งในการทดลองทุกครั้งจะต้องมีความผันแปรที่อธิบายไม่ได้หรือความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ

4.6.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน เป็นการตรวจสอบแหล่งผันแปรของแบบจำลองโดยพิจารณาจากค่า P - Value ของเทอมต่าง ๆ ในตารางของการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนที่ได้เปรียบเทียบกับค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด

4.6.4 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการออกแบบบล็อก - เบห์นเคนในการทำนายสมบัติทางกลของกรรมวิธีทางความร้อนสำหรับ Inconel 738 ที่ผ่านการใช้งาน

โดยนำค่าของปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการของค่าความแข็งชิ้นงาน Inconel 738 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแล้วมาเขียนให้อยู่ในรูปแบบของสมการต่อไปนี้

$$Y = \sum A_0 + \sum_{i=1}^3 A_i X_i + \sum_{i=1}^3 A_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 A_{ij} X_i X_j$$

ซึ่งเป็นสมการเต็มรูปแบบยกกำลัง เมื่อ Y เป็นตัวแปรตาม A_0 A_i A_{ii} A_{ij} เป็นค่าสัมประสิทธิ์ ขณะที่ X_i และ X_j เป็นตัวแปรอิสระ โดยที่

X_1 = อุณหภูมิในการอบละลาย (Solution Temperature), °C

X_2 = อุณหภูมิในการบ่มแข็ง (Aging Temperature), °C

X_3 = เวลาในการบ่มแข็ง (Aging Time), ชั่วโมง

4.6.5 การหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด

การหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ค่าความแข็งของชิ้นงาน Inconel 738 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมากที่สุดโดยใช้ฟังก์ชัน response optimizer ในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ใช้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยและใช้วัดความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ (Composite Desirability : D) ซึ่งค่าความพึงพอใจของผลตอบมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ถ้า D มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึง ผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์

5. ผลการวิจัย

5.1 ผลการทดสอบค่าความแข็งของ Inconel 738 หลังทำการอบละลาย (Solution)

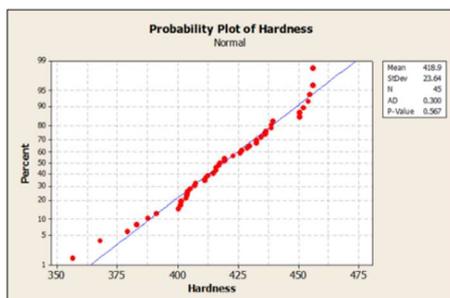
เมื่อทำการทดลองเพื่อทดสอบหาค่าความแข็งชิ้นงานก่อนทำการอบละลายอยู่ที่ 404.30 HV และพบว่าเมื่อชิ้นงานหลังทำการอบละลายส่งผลให้มีความแข็งที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความแข็งของ Inconel 738 หลังทำการอบละลาย

SolutionTemp (°C)	ครั้งที่			ค่าเฉลี่ย (HV)
	1	2	3	
930	448.4	390.3	436.4	425.03
1030	437.5	449.5	442.8	443.27
1130	452.3	451.6	453.2	452.37

5.2 ผลการทดสอบค่าความแข็งของ Inconel 738 ที่ผ่านการทำการกรรมวิธีทางความร้อน

ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติกำหนดลำดับการทดลองและออกแบบการทดลองแบบบล็อก - เบห์นเคน จำนวน 45 การทดลอง พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการกรรมวิธีทางความร้อนมีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 455.60 HV เมื่ออบละลายที่อุณหภูมิ 1130°C บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 740°C และใช้เวลาในการบ่มแข็ง 18 ชั่วโมง ส่วนค่าความแข็งเฉลี่ยต่ำสุดอยู่ที่ 371.77 HV เมื่ออบละลายที่อุณหภูมิ 930°C บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 740°C และใช้เวลาในการบ่มแข็ง 18 ชั่วโมง และเมื่อนำข้อมูลผลการทดลองมาวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square:R²) และวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของข้อมูลว่ามีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าผลการทดลองค่าความแข็งไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็นโดยพิจารณาจากค่า P - Value ได้เท่ากับ 0.567 ซึ่งมีค่ามากกว่านัยสำคัญ 0.05 จึงสรุปได้ว่าการแจกแจงแบบปกติ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แสดงการแจกแจงแบบปกติของค่าความแข็ง Inconel 738 ที่ผ่านการทำการกรรมวิธีทางความร้อน

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งของ Inconel 738 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	8	21979.0	21979.0	2747.37	38.00	0.000
Linear	3	15453.1	15453.1	5151.05	71.24	0.000
Square	3	713.7	713.7	237.89	3.29	0.031
Interaction	2	5812.2	5812.2	2906.08	40.19	0.000
Residual Error	36	2603.0	2603.0	72.31		
Lack-of-Fit	2	394.6	394.6	197.31	3.04	0.061
Pure Error	34	2208.4	2208.4	64.95		
Total	44	24582.0				

จากตารางที่ 4 พบว่าค่า P - value ของ Linear มีค่าเท่ากับ 0.000 และของ Interaction มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด (0.05) แสดงให้เห็นว่ามีส่วนโค้งเกิดขึ้นที่พื้นผิวตอบสนองและปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง ดังนั้นจึงสามารถใช้สมการในการทำนายสมบัติทางกลของ Inconel 738 ที่ผ่านการใช้งาน

ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายความแข็งของ Inconel 738 ที่ผ่านการใช้งาน โดยนำค่าของปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยของค่าความแข็ง ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร

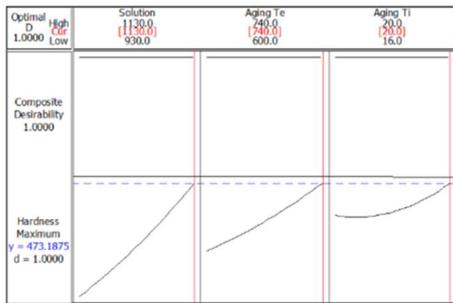
Term	Coef	Symbol
Constant	2608.86	-
Solution Temp.	-1.85040	X ₁
Aging Temp.	-3.77561	X ₂
Aging Time	-16.5744	X ₃
Solution Temp.*Solution Temp.	0.000366944	X ₁ ²
Aging Temp.*Aging Temp.	0.000536281	X ₂ ²
Aging Time*Aging Time	1.78819	X ₃ ²
Solution Temp.*Aging Temp.	0.00294881	X ₁ X ₂
Solution Temp.*Aging Time	-0.0381667	X ₁ X ₃

จากตารางที่ 5 สามารถนำค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรมาเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$Y_{IN} = 2608.86 - 1.850X_1 - 3.775X_2 - 16.574X_3 + 1.788X_1^2 + 0.002X_1X_2 - 0.038X_1X_3$$

จากสมการเมื่อพิจารณาการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of fit) ในตารางที่ 4 พบว่าค่า P-Value ของ Lack of fit มีค่าเท่ากับ 0.061 ซึ่งมากกว่า 0.05 ดังนั้นสมการที่ได้มีความแม่นยำ เพียงพอสำหรับการทำนายสมบัติทางกลของ Inconel 738 ที่ผ่านการใช้งาน

5.3 ปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการทำกรรมวิธีทางความร้อน การหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ค่าความแข็งมากที่สุดโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ใช้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยและใช้ความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ ซึ่งค่าความพึงพอใจของผลตอบมีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 1 ถ้า D มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึงผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์



ภาพที่ 5 การวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยที่ใช้ในกรรมวิธีทางความร้อนของ Inconel 738 ที่ผ่านการใช้งาน

จากภาพที่ 5 พบว่าสภาวะระดับที่เหมาะสมของปัจจัยที่ใช้ในกรรมวิธีทางความร้อนของ Inconel 738 ที่ผ่านการใช้งานเพื่อให้ได้ความแข็งมากที่สุด คือ อุณหภูมิในการอบละลายที่ 1130°C อุณหภูมิในการบ่มแข็งที่ 740°C และเวลาในการบ่มแข็งที่ 20 ชั่วโมง โดยมีค่าความพึงพอใจรวมเท่ากับ 1.0000

6. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของค่าความแข็งของ Inconel 738 ที่ผ่านการทำการกรรมวิธีทางความร้อน พบว่า ค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 455.60 HV เมื่ออบละลายที่อุณหภูมิ 1130°C บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 740°C และใช้เวลาในการบ่มแข็ง 18 ชั่วโมง ส่วนค่าความแข็งเฉลี่ยต่ำสุดอยู่ที่ 371.77 HV เมื่ออบละลายที่อุณหภูมิ 930°C บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 740°C และใช้เวลาในการบ่มแข็ง 18 ชั่วโมง

7. อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการทดสอบค่าความแข็งโดยใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบบล็อก - เบห์นเคน (Box - Behnken Design) พบว่า ปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัยคือ อุณหภูมิในการอบละลาย (X_1) อุณหภูมิในการบ่มแข็ง (X_2) และเวลาที่ใช้ในการบ่มแข็ง (X_3) โดยทั้ง 3 ปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 ซึ่งสามารถแสดงในรูปของสมการสำหรับทำนายค่าความแข็งของ Inconel 738 ที่ผ่านการใช้งาน คือ

$$Y_{HN} = 2608.86 - 1.850X_1 - 3.775X_2 - 16.574X_3 + 1.788X_3^2 + 0.002X_1X_2 - 0.038X_1X_3$$

โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจเท่ากับร้อยละ 89.41 เมื่อนำค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดโดยฟังก์ชัน Response Optimizer พบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดต่อค่าความแข็ง คือ อุณหภูมิในการอบละลายที่ 1130°C อุณหภูมิในการบ่มแข็ง 740°C และเวลาในการบ่มแข็งที่ 20 ชั่วโมง โดยมีค่าความพึงพอใจรวมเท่ากับ 1.0000 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นค่าปัจจัยที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุได้ผลใกล้เคียงคุณสมบัติก่อนการนำมาใช้งาน เนื่องจากมีการปรับโครงสร้างของวัสดุให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ละมีประสิทธิภาพใกล้เคียงเดิม

8. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน สำหรับนำค่าของอุณหภูมิการอบละลาย อุณหภูมิการบ่มแข็ง และเวลาในการบ่มแข็งที่ได้จากการทดลอง ไปใช้ในกรรมวิธีทางความร้อนสำหรับชิ้นงานประเภท Inconel และยังเป็นข้อมูลอ้างอิงในงานวิจัยอื่น ๆ ที่ปรับปรุงพัฒนาต่อไป

9. เอกสารอ้างอิง

- นพลสิทธิ์ ภูมเมฆ. (2556). ศึกษาเปรียบเทียบกลไกการเกิดความเสียหายของวัสดุ Nickel base superalloy เกรด GTD-111 และเกรด Inconel -738 ของชิ้นส่วนใบพัดเทอร์โบที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว. โครงการวิจัย ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วีรเทพ เฉลิมสมิทธิ์ชัย. (2550). การศึกษาปริมาณธาตุที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กดิบโดยวิธีการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- วัลย์วิภา แก่นจันทร์. (2555). การเพิ่มปริมาณธาตุซิลิกอนในผิวเคลือบอลูมิเนียมในโลหะผสมพิเศษเบสนิเกิลเกรด INCONEL 939. โครงการวิจัย ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

- สมเกียรติ ตั้งจิตลิตเจริญ และ ภูมินทร์ แจ่มเชื้อ. (2554). การลดฟองอากาศในกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกโดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน. **ในการประชุมวิชาการ ข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554 (IE Network 2011)** (20-21 ตุลาคม หน้า 171-175). ชลบุรี: โรงแรมแอมบาสเดอร์ซีดี จอมเทียน.
- สิรินญา จันทร์ศักดิ์สูง. (2550). **ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อความหนาและโครงสร้างชั้นเคลือบในกระบวนการ Pack-Aluminizing ของโลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ บัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อภิชาติ พานิชกุล และ อุษณีย์ กิตกำธร. (2554). **การอบชุบทางความร้อนของโลหะ.** ค้นเมื่อ ตุลาคม 23, 2566, จาก http://personal.sut.ac.th/heattreatment/context/Measurement_Of_Hardness.html
- อภิรัตน์ แต่ตระกูล และ จิรรัตน์ ธีระวราพฤกษ์. (2554, มกราคม-มิถุนายน). การศึกษาหาค่าการติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับเครื่องจักรเชื่อมอัตโนมัติ: กรณีศึกษาชิ้นส่วนเครื่องบิน. **บริหารธุรกิจเทคโนโลยีมหานคร**, 8, (1), หน้า 47-58.
- Balasubramanian, M. (2015, July). Application of Box-Behnken design for fabrication of titanium alloy and 304 stainless steel joints with silver interlayer by diffusion bonding. **Materials & Design**, 77, pp.161-169.
- Gunaraj, V., & Murugan, N. (1999). Application of response surface methodologies for predicting weld base quality in submerged arc welding of pipes. **Journal of Materials Processing Technology**, 88, (1-3), pp. 266-275.
- Hill, W.J. & Hunter, W.G. (1966, November). A Review of Response Surface Methodology. **Technometrics**, 8, (4), pp. 571-590.