การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อการบ่มเทียมโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด 6061 โดยการทดลองแบบแฟคทอเรียล

Study of Factors Affecting Artificial Aging of 6061 Aluminum Alloy by Factorial Design

กนกพร บุญจูบุตร

ธรรม์ณชาติ วันแต่ง

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

ประเภททั่วไป ประจำปีงบประมาณ 2556

การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อการบ่มเทียมโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด 6061 โดยการทดลองแบบแฟคทอเรียล

Study of Factors Affecting Artificial Aging of 6061 Aluminum Alloy by Factorial Design

กนกพร บุญจูบุตร
ธรรม์ณชาติ วันแต่ง

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
ประเภททั่วไป ประจำปีงบประมาณ 2556

กนกพร บุญจูบุตร และธรรม์ณชาติ วันแต่ง. 2556. การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อการบ่มเทียมโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 โดยการทดลองแบบแฟคทอเรียล. สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชเพชรบูรณ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งหลังจากการบ่มเทียมโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 โดยใช้แผนการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^3 ซึ่งมีปัจจัยในการทดลอง 3 ปัจจัย ดังนี้ อุณหภูมิในการอบละลาย อุณหภูมิในการบ่มเทียม และเวลาในการบ่มเทียม โดยใช้เวลาในการอบละลายคงที่ 2 ชั่วโมง และในแต่ละปัจจัยจะมีระดับการทดลองอยู่ 2 ระดับ คือ ระดับปัจจัยด้านอุณหภูมิในการอบละลายที่ 500°C และ 595°C ระดับปัจจัยด้านเวลาในการบ่มเทียมคือ 2 และ 8 ชั่วโมง และระดับปัจจัยด้านอุณหภูมิในการบ่มเทียมคือ 175°C และ 200°C จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยหลักคืออุณหภูมิในการอบละลายและเวลาในการบ่มมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลร่วมสองปัจจัยและอิทธิพลร่วมสามปัจจัยทุกปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและตัวแปรอื่นๆเป็นสมการเชิงเส้นตรง อันเป็นประโยชน์ต่อการประมาณค่าความแข็งจากค่าของตัวแปรอิสระในขอบเขตการทดลอง และได้พบว่าโมเดลให้ค่าประมาณความแข็งผิดพลาดไม่เกิน ±6.73 BHN ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

คำสำคัญ: การบ่มเทียม; โลหะผสมอะลูมิเนียม 6061; ค่าความแข็ง

Kanokpron Boonjoobhoot and Tannachart Wantang. 2013. Study of Factors Affecting Artificial Aging of 6061 Aluminum Alloy by Factorial Design. Research in Production Engineering, Faculty of Agricultural Technology and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University.

ABSTRACT

This research was aimed at to study of factors affecting artificial aging of 6061 aluminum alloy that affect the hardness by factorial design 2^3. The first factor is the solution time, second factor is aging temperature and third factor is aging time. The test material in each of the factors an experiment in 2 levels at the solution temperature at 500°C and 595°C, the aging time at 2 and 8 hr and the aging temperature at 175°C and 200°C. The result indicates found that, solution time and aging time It has affecting hardness them are significant statistically and the all factors interaction, It has affecting the hardness are significant statistically. The linear equation form the relationship between the hardness and other variables can estimate the hardness as will. Calculated from the model to the hardness hardness error is less than ±6.73 BHN at 95% confidence level.

Keywords: Artificial Age; 6061 Aluminum Alloy; Hardness

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2556 ขอขอบคุณคณาจารย์และนักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตและสาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตที่ช่วยเหลืองานวิจัยตลอดจนจบโครงการ ข้าพเจ้าจึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ ในส่วนของรายละเอียดการทำงานวิจัยชิ้นนี้นั้นเริ่มแรก อ.กนกพร บุญจูบุตร เป็นผู้ขอทุนสนับสนุนการวิจัยกับสถาบันวิจัยและพัฒนา แต่ต่อมา อ.กนกพร ได้ย้ายไปทำงานที่คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา โดยที่งานวิจัยชิ้นนี้ยังไม่เสร็จสมบูรณ์และตามระเบียบการรับทุนวิจัยผู้ที่มีหน้าที่ต้องรับผิดชอบดำเนินงานวิจัยต่อคือประธานสาขาวิชาฯ ดังนั้นข้าพเจ้าจึงได้ดำเนินงานวิจัยต่อจนเสร็จสมบูรณ์โดยได้มีการร่วมมือและติดต่อประสานงานกับ อ.กนกพร มาโดยตลอด จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ข้าพเจ้าจึงขอขอบคุณผู้เกี่ยวข้องทุกฝ่ายมา ณ โอกาสนี้อีกครั้ง

สารบัญ

สารบัญตาราง

สารบัญภาพ

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง และได้มีการนำอะลูมิเนียมมาใช้ในงานอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากอะลูมิเนียมมีน้ำหนักบา มีความสามารถในการต้านการเกิดสนิมในตัวเอง รวมถึงขึ้นรูปได้ง่าย โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 เป็นวัสดุหนึ่งที่นิยมใช้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ เรือ และวัตถุดิบในการผลิตสินค้าอื่นๆ

วัสดุโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 ที่มีใช้โดยทั่วไป คุณสมบัติอาจไม่ตรงกับความต้องการใช้งาน อาจต้องมีการทำให้วัสดุมีคุณสมบัติตรงตามความต้องการโดยผ่านการกระบวนการ เช่น การอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก (Precipitation hardening) เป็นกระบวนการเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงให้กับโลหะผสมโดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะผสมอะลูมิเนียมซึ่งกระบวนการอบชุบนี้แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ อบจนได้อุณหภูมิชุบ (Solution treatment) ชุบในน้ำ (Quenching) และบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิที่กำหนด ซึ่งโดยทั่วไปโลหะผสมอะลูมิเนียมแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทขึ้นรูปเย็น (Wrought) และประเภทหล่อหลอม (Castable) ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณธาตุส่วนผสม เนื่องจากอะลูมิเนียมสามารถผสมกับโลหะอื่นได้ง่าย เช่น ทองแดง แมกนีเซียมและซิลิคอน จึงทำให้โลหะผสมอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันได้หลากหลาย ซึ่งสามารถจัดกลุ่มโลหะผสมอะลูมิเนียมได้เป็นสองกลุ่ม คือ

กลุ่มแรกคือกลุ่มที่สามารถอบชุบเพิ่มความแข็งด้วยความร้อน เช่น โลหะผสมที่มีธาตุผสมหลักเป็นแมกนีเซียม, สังกะสี และทองแดง

กลุ่มที่สองคือกลุ่มที่ไม่สามารถอบชุบเพิ่มความแข็งด้วยความร้อน กลุ่มนี้จะเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงโดยการขึ้นรูปเย็น

โดยในกลุ่มแรกการเพิ่มขึ้นของความแข็งและความแข็งแรงในโลหะผสมอะลูมิเนียมเกิดจากการตกผลึกของเฟสที่สอง (Secondly phase) กระจายอย่างสม่ำเสมอในพื้นเนื้อเดิม (Matrix) ของโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีทางความร้อนที่เรียกว่า การชุบแข็งแบบตกผลึกหรือตกตะกอนหรือเรียกอีกอย่างว่า การบ่มแข็งถ้าปรากฏการเช่นนี้เกิดที่อุณหภูมิห้องเรียกว่า การบ่มแข็งตามธรรมชาติ (Natural aging) แต่ถ้าเกิดขึ้นภายใต้การควบคุมอุณหภูมิในการบ่มเรียกว่าการบ่มเทียม (Artificial aging) โลหะอะลูมิเนียมผสมที่มีความสามารถในการอบชุบแข็งด้วยวิธีนี้จะต้องมีส่วนผสมของโลหะบางชนิดที่สามารถละลายได้ในปริมาณสูงที่อุณหภูมิสูง และอัตราการละลายจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงทำให้เกิดการแยกเฟสของสารประกอบเชิงโลหะภายในโครงสร้างพื้นฐานของโลหะผสมอะลูมิเนียม ธาตุโลหะผสมต่างกันในอะลูมิเนียมจะเกิดสารประกอบเชิงโลหะที่แตกต่างกัน เช่น โลหะอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม-ซิลิคอน (Mg_2Si) จะให้สารประกอบเชิงโลหะ เป็นต้น

แม้ว่าในปัจจุบันมีการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการอบชุบมาแล้วแต่ยังอยู่ในวงจำกัด สำหรับงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาเพิ่มเติม

ในส่วนของข้อมูลที่ยังไม่พบ โดยศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างหลังการอบชุบด้วยวิธีการตกผลึกของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 โดยใช้แผนการทดลองทางสถิติแบบแฟคทอเรียล เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งหลังจากการบ่มเทียมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งในรูปของสมการเชิงเส้นตรง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างจุลภาคที่มีต่อค่าความแข็งหลังการอบชุบด้วยวิธีการตกผลึกของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

3.1 ใช้การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม เพื่อศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างจุลภาคที่มีต่อค่าความแข็งหลังการอบชุบด้วยวิธีการตกผลึกของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061

3.2 ปัจจัยสำหรับการทดลองประกอบด้วยตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบละลาย เวลาที่ใช้ในการบ่ม และอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม ส่วนตัวแปรตามที่พิจารณาคือความแข็ง (Hardness) ของชิ้นงาน

3.3 ทำการทดสอบชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งหลังการอบชุบด้วยวิธีการตกผลึกของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061

3.4 ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญของการทดสอบสมมุติฐาน 95% ด้วยการออกแบบการทดลองแบบ 2^3 แฟคทอเรียล

3.5 ทำการทดลองและวิเคราะห์ผล ในช่วงเวลาปีการศึกษา 2556-2557

1.4 ขั้นตอนวิธีการดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาและกำหนดปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็ง

1.4.2 ออกแบบแผนการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่สำคัญและระดับปัจจัยที่เหมาะสมกับการทดลอง

1.4.3 วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อตัดสินใจเลือกปัจจัยที่สำคัญและระดับปัจจัยที่เหมาะสม

1.4.4 ออกแบบการทดลองตามปัจจัยที่สำคัญและระดับปัจจัยที่เหมาะสม

1.4.5 ทำการทดลองตามรูปแบบการทดลองที่ได้ออกแบบไว้

1.4.6 ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล

1.4.7 แก้ไขข้อมูลให้ถูกต้อง

1.4.8 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1.4.9 สรุปผลการทดลอง

1.4.10 เขียนรายงานการวิจัย

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบามีลักษณะไม่เป็นเงา เป็นโลหะที่ดัดได้ง่าย และสามารถนำความร้อนได้ดี จึงเหมาะสมที่จะทำโลหะผสมอะลูมิเนียมไปใช้งาน และเห็นได้ว่าอะลูมิเนียมถูกนำใช้งานกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องบินและอุตสาหกรรมรถยนต์โดยเฉพาะอุตสาหกรรมรถยนต์ที่ปัจจุบันจะต้องผลิตให้มีน้ำหนักเบาเพื่อให้สามารถประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงได้มากขึ้น จากการศึกษาของ G.S. Cole and A.M. Sherman (1995) พบว่าโลหะผสมอะลูมิเนียมถูกนำมาผลิตเป็นส่วนประกอบของรถยนต์ เช่น ล้อ ประตู และอื่น ๆ ซึ่งนอกจากจะมีน้ำหนักเบาแล้วยังมีความแข็งและความแข็งแรงสูงแล้ว ยังสามารถขึ้นรูปได้ง่ายอีกด้วยและจากการศึกษา ของ C.S. Remesh และคณะ (2009) โลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 ยังถูกนำมาผลิตเป็นอุปกรณ์ที่ต้องอยู่ในสภาพที่ต้องทนการกัดกร่อนและง่ายต่อการแปรรูปเช่น ท่อ ปั๊ม และอื่น ๆ นอกจากนั้นอะลูมิเนียมยังนิยมนำมาผลิตเป็นเฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์เครื่องใช้ภายในครัวเรือนและอีกมากมายเนื่องจากคุณสมบัติที่กล่าวมาแล้วประกอบกับสามารถแต่งสีให้กับอะลูมิเนียมเพิ่มความสวยงามได้อีกด้วย

2.1.1 คุณสมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียม

โลหะอะลูมิเนียม มีน้ำหนักเบา มีความหนาแน่น = 2.7 g/cm^3 หรือประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ของเหล็ก (7.83 g/cm^3) และ 30 เปอร์เซ็นต์ของทองแดง (8.93 g/cm^3) โลหะอะลูมิเนียมและโลหะผสมอะลูมิเนียม มีค่าความแข็งแรงอยู่ในช่วงกว้าง ตั้งแต่เกรดที่มีความบริสุทธิ์สูง (Commercially Pure Al) มีความเหนียวสูงแต่ความเค้นแรงดึง (Ultimate Tensile Strength) ต่ำประมาณ 90 MPa ไปจนถึงเกรดที่มีความเหนียวและมีความแข็งแรงสูง (Very Tough High-Strength Alloys) มีความเค้นแรงดึงสูงประมาณ 690 MPa โลหะอะลูมิเนียมมีจุดหลอมเหลวต่ำ เป็นตัวนาไฟฟ้าที่อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ทนต่อการเป็นสนิมได้ดี ไม่เป็นพิษต่อร่างกายและผิวขัดมันสะท้อนแสงได้ดี

2.1.2 ประเภทของโลหะผสมอะลูมิเนียม

โลหะอะลูมิเนียมสามารถผสมกับโลหะอื่นๆได้หลายชนิด เช่น โลหะผสม Al-Cu, Al-Si, Al-Mg, Al-Zn หรืออาจจะมีโลหะผสมอะลูมิเนียมกับหลายๆธาตุร่วมกันดังตัวอย่าง เช่น Al-Cu-Si และ Mg ซึ่งโลหะผสมแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน สามารถเลือกใช้งานได้อย่างกว้างขวาง โลหะผสมอะลูมิเนียมแบ่งเป็นสองประเภท คือ

(1) โลหะผสมประเภทขึ้นรูปเย็น (Wrought) ส่วนใหญ่จะมี Cu, Si, และ Mg เป็นธาตุผสม โลหะอะลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้จะผ่านการขึ้นรูปด้วยการรีด การอัดขึ้นรูปออกมาเป็นแผ่น หรือเป็นแท่ง ซึ่งจะมีทั้งที่สามารถอบชุบแข็งด้วยความร้อนได้ (Heat treatable) และที่อบชุบแข็งไม่ได้

(2) โลหะผสมประเภทหล่อหลอม (Cast able) เป็นโลหะที่มีคุณสมบัติพิเศษมีความสามารถในการไหลดี ช่วยให้การหล่อหลอมเป็นรูปพรรณกระทาได้ง่าย ส่วนใหญ่โลหะผสมประเภทนี้สามารถอบชุบแข็งด้วยความร้อนได้

2.1.3 โลหะวิทยาของอะลูมิเนียมผสมหล่อ

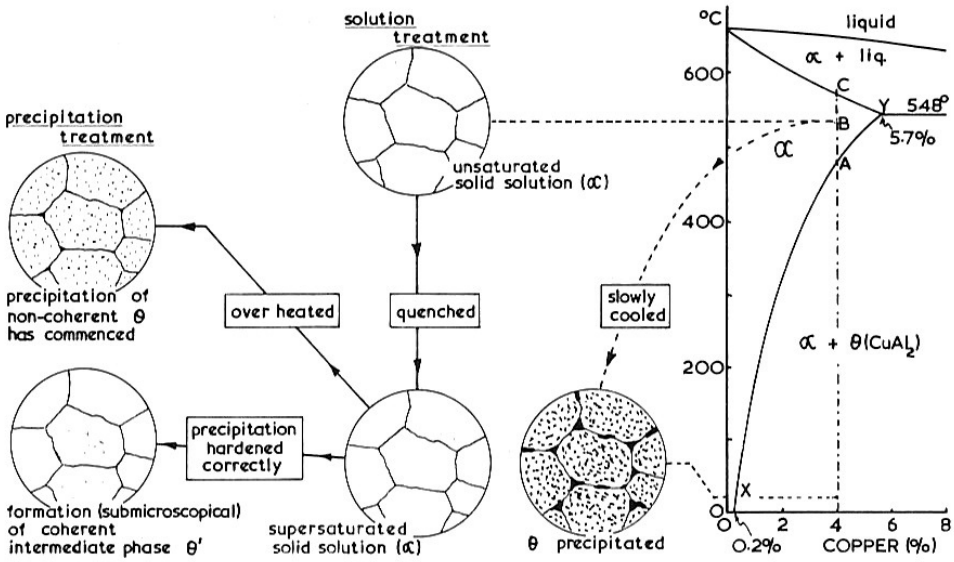
โครงสร้างพื้นฐานของโลหะผสมอะลูมิเนียม คือ α-phase โดยจะมีโครงสร้างที่เกิดจากการที่ธาตุผสมรวมตัวกับอะลูมิเนียมหรือธาตุอื่นๆแล้วแยกตัวออกมาอยู่ภายใน α -phase โครงสร้างที่ปรากฏนี้จะต่างกันในโลหะผสมอะลูมิเนียมแต่ละชนิดดังแสดงในตาราง 2.1

ตาราง 2.1 โครงสร้างหลักที่ปรากฏในโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อเกรดต่างๆ

Commercial Designation Major	Constituents
213.0	(Al-Cu), α(Al-Cu-Fe), α(Al-Fe-Si)
295.0	(Al-Cu), α(Al-Fe-Si)
242.0	α(Al-Ni), (Mg-Si), (Al-Cu-Ni), (Al-Cu)
222.0	(Al-Cu), α(Al-Cu-Fe)
443.0	(Si), α(Al-Fe-Si)
355.0	(Si), P(Al-Fe-Si), (Al-Si)
356.0	(Si), P(Al-Fe-Si), (Al-Mg)
319.0	(Si), (Al-Cu), α(Al-Fe-Si)
514.0	(Mg-Si), α(Al-Fe)
520.0	α (Al-Mg), (Mg-Si), α(Al-Fe)
710.0	(Mg-Si), α(Al-Fe-Si)
850.0	(Sn), α(Al-Ni)
712.0	(Mg-Si), α(Al-Fe-Si)

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกหรือตกตะกอน

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง สามารถชุบแข็งได้โดยกรรมวิธีการทาให้เกิดการตกผลึกของสารประกอบอะลูมิเนียม-ทองแดง ในสภาพของแข็งที่เรียกว่า การอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก (Precipitation hardening) หรือตกตะกอน หรือ การบ่มแข็ง ภาพที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมทองแดง ที่ให้ปรากฏการณ์การอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก คือ โลหะผสมอะลูมิเนียม จะยอมให้ทองแดงละลายเป็นสารละลายของแข็งได้สูงสุด 5.7 wt% Cu ที่อุณหภูมิ 548 °C และเมื่ออุณหภูมิลดลงอย่างช้าๆ (Slowly Cooled) ปริมาณของทองแดงจะละลายได้น้อยลงมากที่ 0.2 wt% Cu ที่อุณหภูมิห้อง ปริมาณของทองแดงที่เกินจุดอิ่มตัว จะไปรวมอยู่กับอะลูมิเนียม ให้สารประกอบ $CuAl_2$ หรือ เฟส θ โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่ผสมทองแดงต่ำกว่า 0.5 wt% Cu ไม่สามารถทาการอบชุบเพื่อเพิ่มความแข็งหรือความแข็งแรงโดยการทำการบ่มได้ เพราะไม่ว่าจะอบโลหะผสมให้ร้อนแล้วทาให้เย็นเร็วหรือช้าอย่างไรจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง และถ้าโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดงมากกว่า 5.7 wt% Cu การอบชุบแข็งโดยการบ่มจะให้ผลทางด้านความแข็งต่ำกว่าโลหะผสมที่ผสมทองแดงใกล้จุดสูงสุดที่ทองแดงจะละลายได้ในสารละลายของแข็ง



ภาพที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคโดยกระบวรการทางความร้อน
ที่มา : Cole and Sherman (1995)

ในกระบวนการชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก จะมี 2 ขั้นตอนที่สำคัญ ประกอบด้วย

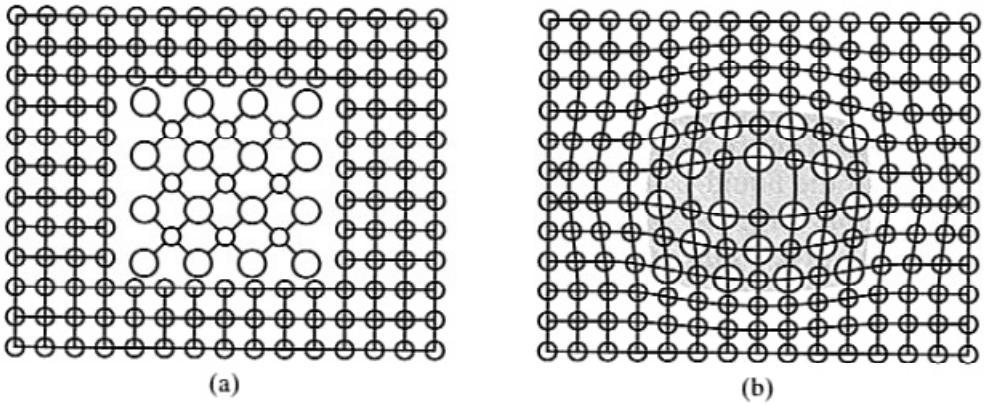
(1) การทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน + การชุบในน้ำ

การทำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยอบให้ความร้อนแก่โลหะผสมจากอุณหภูมิห้องขึ้นไปที่อุณหภูมิประมาณ 500 – 550 °C จนได้เฟส α ทั้งหมด เพื่อให้เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน (Single Phase) แล้วจึงนำโลหะผสมออกจากเตาชุบน้ำ จุดประสงค์ก็เพื่อให้เนื้อโลหะผสมมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันชั่วระยะหนึ่งที่อุณหภูมิต่ำในที่นี้คืออุณหภูมิห้องเฟสของโลหะผสมในขณะนี้จะอยู่ในสภาวะของหลอมเหลวไปสู่สภาวะของแข็ง (Metastable) จะได้สารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Super saturated solid solution) ภายหลังจากการเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิปกติแล้ว โลหะผสมจะมีโครงสร้างเป็นสารละลายของแข็งที่มีปริมาณของทองแดงสูงกว่าปริมาณที่จะมีได้ในสภาพสมดุล ซึ่งพร้อมที่จะเปลี่ยนแปลงไปสู่สภาวะ เสถียรทันทีเมื่อสภาวะต่างๆ เช่น อุณหภูมิหรือเวลาเปลี่ยนแปลงไป

(2) การบ่ม

นำโลหะผสมที่ผ่านการชุบน้ำมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิที่เหมาะสมในระยะเวลาหนึ่ง อุณหภูมิที่ใช้การบ่มอาจแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ถ้าการบ่มที่อุณหภูมิห้องธรรมดา เรียกว่า การบ่มแบบธรรมดา (Natural Aging) ส่วนอุณหภูมิการบ่มที่สูงกว่าอุณหภูมิห้องเรียกว่า การบ่มเทียม (Artificial Age) การเลือกอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ต้องพิจารณาจากส่วนผสมที่มีอยู่ในโลหะผสมดังกล่าว เช่น ถ้าโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีทองแดงผสมอยู่ประมาณ 4.5 wt% Cu อุณหภูมิการทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน 550 °C อุณหภูมิการบ่ม 180 °C เป็นเวลา 1 วัน ในขณะการบ่มจะเกิดปรากฏการการบ่มแข็งขึ้น เนื่องจากเกิดการบิดเบี้ยวของโครงสร้างสาเหตุจากการเกิดการเชื่อมโยงกัน (Coherency

Precipitation) ของ $CuAl_2$ ซึ่งมีขนาดเล็กมากและกระจายอยู่ทั่วไป ซึ่งเป็นผลให้โลหะผสมดังกล่าวมีคุณสมบัติในด้านความแข็งเพิ่มขึ้น อนึ่งเวลาของการทำการบ่มต้องเลือกให้เหมาะสมเพราะ ถ้าทำทิ้งไว้นานเกินไปจะเกิดสภาวะความแข็งที่เพิ่มขึ้นจะเริ่มลดลงเกินไป (Over Aging) ทำให้การบ่มไม่ได้ผลตามต้องการ



ภาพที่ 2.2 การตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก : (a) รูปแบบไม่ต่อเนื่องกัน (b) รูปแบบต่อเนื่องกัน
ที่มา : Cole and Sherman (1995)

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับกระบวนการทดสอบความแข็งแบบบลิเนล

การทดสอบความแข็งหนึ่งที่ถูกใช้มาอย่างยาวนานที่สุดคือการทดสอบแบบบลิเนล (Brinell hardness test) ซึ่งเป็นการทดสอบความแข็งแบบน้ำหนักคงที่ในการกดหัวกดเหล็กกล้าชุบแข็งลงบนพื้นผิว ชิ้นทดสอบ โดยปกติจะใช้หัวกดลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งหรือทังสเตนคาร์ไบด์ขนาด 10 mm. กดลงบนผิวชิ้นทดสอบด้วยน้ำหนักกด 3000 kg สำหรับโลหะแข็ง 1500 kg สำหรับโลหะที่มี ความแข็งปานกลาง และ 500 kg หรือต่ำกว่านั้นสำหรับวัสดุอ่อนนิ่มเครื่องทดสอบความแข็งแบบบลิเนลมีหลายแบบซึ่งแตกต่างกันในหัวข้อต่อไปนี้คือ

(1) กรรมวิธีการใส่น้ำหนักกด เช่น ใช้แรงดันน้ำมัน ระบบเฟืองหรือระบบคาน เป็นต้น
(2) กรรมวิธีการดำเนินการทดสอบ เช่น ใช้มือ หรือแรงขับเคลื่อน
(3) กรรมวิธีวัดน้ำหนักกด เช่น ลูกสูบกับน้ำหนัก มาตรวัดความดันชนิดบูร์ดอง (Bourdon gauge), ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) หรือระบบคาน
(4) ขนาด คือเล็กแบบตั้งโต๊ะหรือใหญ่แบบประจำที่

การทดสอบความแข็งแบบบลิเนลสามารถใช้เครื่องทดสอบแรงดึงได้โดยใช้อุปกรณ์ช่วยยึดหัวกดลูกบอล แล้วนำแผ่นโลหะที่ต้องการทดสอบยึดเข้าอุปกรณ์แขนจับยึดชิ้นงาน โดยใช้หัวกดบอลขนาด 3/64 นิ้ว และสปริง 22 ปอนด์ การทำการทดสอบความแข็งแบบบลิเนลให้นำชิ้นทดสอบไปวางบนแท่นวางชิ้นงานทดสอบแล้วยกระดับแท่นวางขึ้นจนชิ้นทดสอบสัมผัสหัวกด จากนั้นใส่น้ำหนักกดโดยการปั๊มน้ำมันเข้าไปในทรงกระบอกหลักซึ่งเลื่อนลูกสูบหลักลงและกดหัวกดบอลเข้าไปในชิ้นงานทดสอบ ซึ่งเนื้อชิ้นทดสอบจะยึดพื้นผิวหัวกดไว้ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานจากความเสียดทานเล็กน้อย โดยจะใช้

มาตรวัดชนิดบูร์ดองในการแสดงน้ำหนักกดอย่างหยาบ เมื่อใส่น้ำหนักตามที่ต้องการตาชั่งน้ำหนักด้านบนของเครื่องจะยกตัวขึ้นโดยการกระทำของลูกสูบโดยต้องระวังอย่าให้มีน้ำหนักเกิดกับหัวกดมากจนเกินไป

การทดสอบตามมาตรฐานการวัดขนาดของรอยกดจะใช้เครื่องวัดไมโครมิเตอร์ผ่าน กล้องจุลภาค หรือกล้องจุลภาคซึ่งจะมีมาตรวัดโปร่งแสงปรากฏอยู่บนภาพรอยกดบลิเนลเป็นการทดสอบความแข็งที่ดี แต่มีข้อจำกัดคือไม่สามารถใช้ได้กับวัสดุที่แข็งมาก เนื่องจากหัวกดลูกบอลจะเกิดการเสียรูปมากเกินไป รวมทั้งการทดสอบกับชิ้นงานที่บางมาก เนื่องจากรอยกดที่เกิดขึ้นอาจเกินความหนาชิ้นทดสอบ และไม่เหมาะกับการทดสอบวัสดุที่ ผ่านการชุบผิวแข็ง เนื่องจากรอยกดจะลึกเกินความหนาของชั้นชุบแข็ง ทำให้ได้ค่าความแข็ง ของแกนกลางชิ้นทดสอบซึ่งอ่อนนิ่มร่วมด้วย ส่งผลให้ค่าความแข็งผิวชุบผิดพลาด และตามค่าความแข็งบลิเนล ปกติวัดเป็นแรงดันต่อหน่วยพื้นที่ในหน่วยกิโลกรัมต่อตาราง มิลลิเมตรของรอยกดที่เกิดขึ้นหลังนำน้ำหนักกดออก โดยการหารแรงที่กระทำด้วยพื้นที่รอยกดในรูปของพื้นที่ทรงกลมดังภาพที่ 2.3 โดยนำค่าแรงที่กระทำและเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด แทนลงในสูตร

$$\text{BHN} = \frac{2L}{\pi D(D-\sqrt{D^2-d^2}}$$

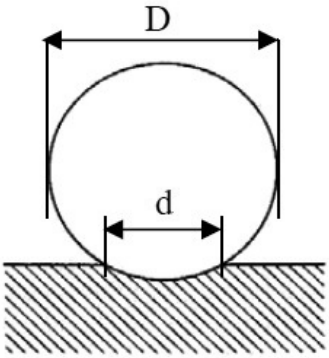
เมื่อ

BHN คือ ค่าความแข็งบลิเนล (kg/mm2)

L คือ น้ำหนักกดที่กระทำ (kg)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกด (mm)

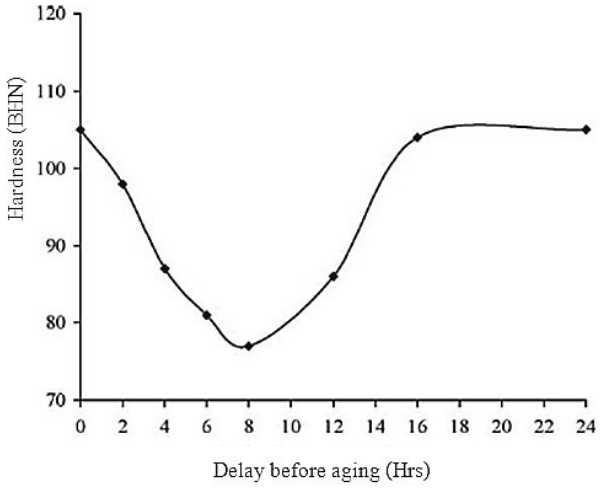
d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด (mm)



ภาพที่ 2.3 แสดงหัวกดและรอยกดในการทดสอบความแข็งบลิเนล
ที่มา : http://e-book.ram.edu/e-book/m/MY318(51)/MY318-7.pdf, 10 มีนาคม 2556.

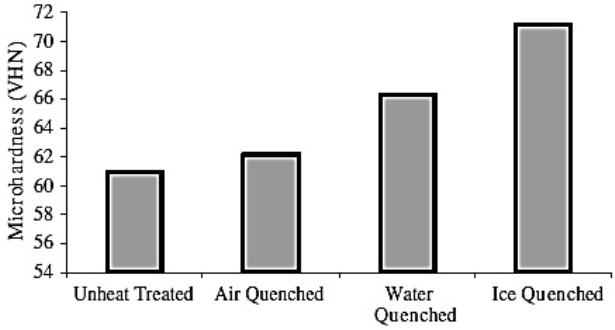
2.4 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 2005 Mahadevan และคณะ ได้ศึกษาผลของการทิ้งช่วงระยะเวลาของของโลหะผสมอะลูมิเนียม AA6061-SiC_p ก่อนนำไปบ่มโดยจากการศึกษาได้อบละลายที่อุณหภูมิ 530°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วชุบชิ้นงานทดสอบในน้ำอย่างรวดเร็วและทิ้งชิ้นงานทดสอบไว้ตามเวลาที่กำหนดก่อนนำไปบ่มคือ 0, 2, 4, 6, 8, 12,16 และ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบไปบ่มที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วเย็นตัวในอากาศ จากการศึกษาพบว่าค่าความแข็งที่ได้จะลดลงตามเวลาที่ทิ้งไว้ก่อนนำชิ้นงานทดสอบไปบ่มโดยค่าความแข็งลดต่ำสุดเมื่อทิ้งชิ้นงานทดสอบไว้ที่ 8 ชั่วโมง จากนั้นค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆและเริ่มคงที่ที่เวลา 16 ถึง 24 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 2.4

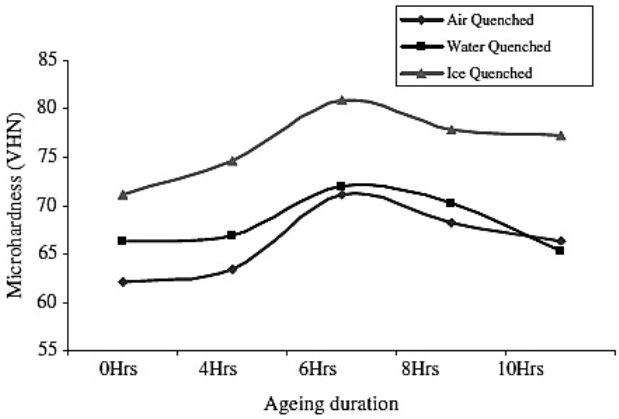


ภาพที่ 2.4 แสดงค่าความแข็งกับระยะเวลาที่ทิ้งไว้ก่อนนำไปบ่ม
(Mahadevan, Raghukanda, Senthilvelan, Pai and Pillai, 2005)

ต่อมาในปี 2009 Remesh และคณะ ได้ศึกษาคุณสมบัติของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 โดยใช้อุณหภูมิ 530°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานไปจุ่มชุบใน น้ำแข็ง น้ำ และอากาศ แล้ววัดความแข็งแบบวิคเกอร์โดยไม่ผ่านการบ่ม จากการศึกษาพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการชุบในตัวกลางที่ต่างกันจะให้ค่าความแข็งที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.5 โดยการเย็นตัวในน้ำแข็งจะให้ค่าความแข็งสูงกว่าน้ำและอากาศตามลำดับ เนื่องจากการเย็นในน้ำแข็งนั้นขนาดของเกรนจะเล็กกว่าส่งผลให้มีค่าความแข็งที่สูงกว่าเช่นกัน จากนั้นนำชิ้นงานมาบ่มที่อุณหภูมิ 175°C ด้วยเวลาที่แตกต่างกันคือ 4, 6, 8 และ 10 ชั่วโมง และวัดค่าความแข็งแบบวิคเกอร์ ผลากการศึกษาพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการชุบในตัวกลางที่ต่างกันเมื่อนำไปผ่านกระบวนการบ่มจะให้ค่าความแข็งที่ต่างกันดังแสดงในรูป 2.7 โดยชิ้นงานที่ผ่านการชุบในน้ำแข็งจะให้ค่าความแข็งสูงกว่าการชุบในน้ำและอากาศตามลำดับ โดยที่ค่าความแข็งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้บ่มและให้ค่าความแข็งสูงสุดที่เวลาประมาณ 7 ชั่วโมง จากนั้นค่าความแข็งจะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.6

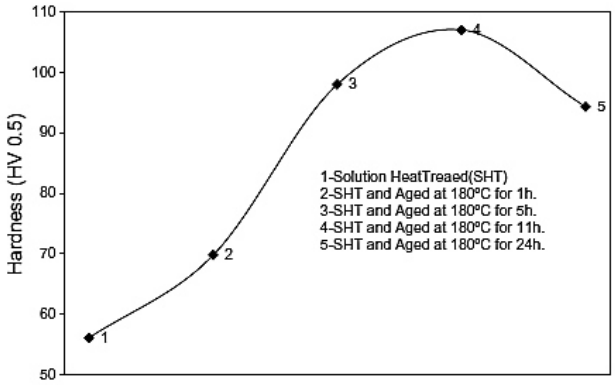


ภาพที่ 2.5 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการชุบในตัวกลางที่แตกต่างกัน
ที่มา : Remesh et al. (2009)



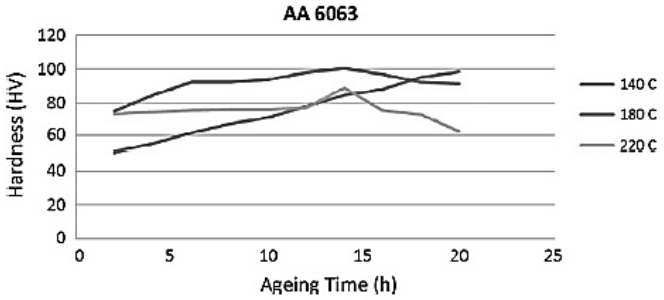
ภาพที่ 2.6 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มที่เวลาแตกต่างกัน
ที่มา : Remesh et al. (2009)

Demir and Gunduz (2009) ได้ศึกษาการอบละลายโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 ที่ส่งผลต่อความแข็งของชิ้นงาน โดยใช้อุณหภูมิการอบละลายที่ 530°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและชุบในน้ำ จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 180°C โดยใช้เวลาแตกต่างกันคือ 0, 1, 5, 11 และ 24 ชั่วโมง แล้วเย็นตัวในอากาศ จากผลการทดลองพบว่าชิ้นงานชิ้นที่ไม่ผ่านกระบวนการบ่มจะให้ค่าความแข็งที่น้อยกว่าผ่านกระบวนการบ่ม และค่าความแข็งแบบวิคเกอร์ที่มีค่าสูงสุดที่เวลา 11 ชั่วโมง และค่าความแข็งจะลดลงเมื่อใช้เวลาบ่มที่ 24 ชั่วโมง เพราะเมื่อใช้เวลาบ่มนานมากเกินไปเฟสที่เกิดขึ้นจะมีการเรียงตัวที่เป็นระเบียบและมีขนาดใหญ่จึงส่งผลให้ค่าความแข็งลดลง ดังแสดงในภาพที่ 2.7



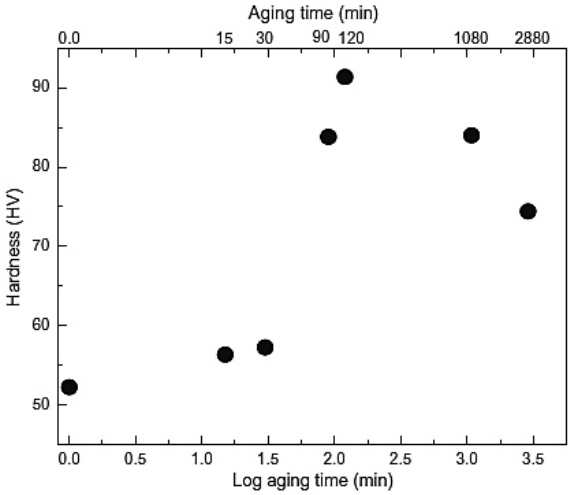
ภาพที่ 2.7 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการบ่ม
ที่มา : Demir and Gunduz (2009)

ในปี 2010 Meyveci และคณะ ได้ศึกษากระบวนการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกโลหะผสมอะลูมิเนียม 6063 ใช้อุณหภูมิอบละลายสองค่า คือ 490°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และ 530°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และใช้อุณหภูมิบ่มที่ 140°C 180°C และ 220°C เป็นเวลา 2 4 6 8 10 12 14 16 18 และ 20 ชั่งโมง ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิบ่มที่ 180°C จะให้ค่าความแข็งสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 140°C และ 220°C โดยจะเพิ่มค่าความแข็งขึ้นตามเวลาและให้ค่าความแข็งสูงสุด 100 HV ที่ 14 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับเวลาบ่ม
ที่มา : Meyveci et al. (2010)

และในปีเดียวกัน Ozturk และคณะ ได้ศึกษาโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 โดยใช้อุณหภูมิอบละลาย 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และชุบในน้ำ จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 200°C ที่เวลาแตกต่างกัน คือ 0.5, 1.5, 2, 18 และ 48 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 200°C ค่าความแข็งที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้บ่มโดยให้ค่าความแข็งสูงสุดที่เวลา 2 ชั่วโมง และค่าความแข็งลดลงเมื่อใช้เวลาบ่ม 18 และ 48 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับเวลาที่ใช้บ่ม
ที่มา : Ozturk et al. (2010)

ต่อมาในปี 2554 รัตนาภรณ์ วงษ์ทอง ได้ทำการทดลองเพื่อประเมินอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อ Artificial aging ของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 เพื่อศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างจุลภาคที่มีต่อค่าความแข็งหลังการอบชุบด้วยวิธีการตกผลึก โดยใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ในการประมาณค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 ซึ่งปัจจัย ที่ใช้ในการทดลองมี 4 ตัวแปร คือ เวลาอบละลาย อุณหภูมิอบละลาย เวลาบ่ม และอุณหภูมิบ่ม โดยที่แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ คือ เวลาอบละลาย (ชม.) : 1, 2 และ 3 ; อุณหภูมิอบละลาย (°C) : 520, 540 และ 560 ; เวลาบ่ม (ชม.) : 2, 8 และ 14 ; และอุณหภูมิบ่ม (°C) :175, 200 และ 225 จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยหลักทุกปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนั้นยังมีอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับเวลาบ่ม, อุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิบ่ม และเวลากับอุณหภูมิบ่ม ต่างก็มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองโมเดลทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและค่าความแข็งในเชิงเส้นโค้งด้วยสมการโพลิโนเมียลกาลังสอง โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 91.7% และ R^2_{adj} เท่ากับ 90.5% แสดงว่าโมเดลมีนี้ความเหมาะสมสามารถประมาณค่าความแข็งที่มีค่าความผิดพลาดไม่เกิน ±7.64 BHN ที่ความเชื่อมั่น 95% และจากการตรวจสอบค่าความผิดพลาด (errors หรือ residuals) พบว่าเป็นไปตามสมมติฐานของการออกแบบการทดลองคือ มีการแจกแจงแบบปกติและมีการกระจายตัวเป็นแบบสุ่มสม่ำเสมอกันที่แต่ละระดับของปัจจัยหลัก นอกจากนั้นจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคหลังการทดลองพบว่าเป็นไปตามหลักทฤษฎีการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การกำหนดปัจจัยสำหรับการทดลอง

ก่อนการกำหนดแผนการทดลองได้มีการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และพิจารณาร่วมกับข้อเสนอแนะทางปฏิบัติของ ASTM (ASTM Standards,1998) เพื่อหาระดับที่เหมาะสมในแต่ละปัจจัยสำหรับใช้ในการทดลอง โดยการทดลองนี้กำหนดให้เวลาในการอบละลายคงที่ที่ 2 ชั่วโมง จากข้อมูลการศึกษาของ Remesh และคณะ (2009) ได้นำมากำหนดปัจจัยในการทดลองดังตาราง 3.1 ซึ่งแสดงระดับสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละปัจจัย

ตารางที่ 3.1 แสดงปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแบบ 2^3 แฟคทอเรียล

ปัจจัย	ระดับปัจจัย	
	ต่ำ (-1)	สูง (1)
solution temperature (h), (A)	500	595
aging time (h), (B)	2	8
aging temperature (°C), (C)	175	200

3.2 แผนการทดลอง

สามารถเขียนโมเดลคณิตศาสตร์ของค่าวัด (response หรือ dependent variable) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการทดลองแบบ 2^3 แฟคทอเรียล ดังนี้

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + (\tau\beta\delta)_{ijl} + (\tau\gamma\delta)_{ikl} + \varepsilon_{ijk} \quad (3.1)$$

μ คือ ผลเฉลี่ยทั้งหมด

τ_i คือ อิทธิพลที่เกิดจากระดับที่ i ของปัจจัย A, (i=1, 2, 3)

β_j คือ อิทธิพลที่เกิดจากระดับที่ j ของปัจจัย B, (j=1, 2, 3)

γ_k คือ อิทธิพลที่เกิดจากระดับที่ k ของปัจจัย C, (k=1, 2, 3)

$(\tau\beta)_{ij}$ คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i และ β_j

$(\tau\gamma)_{ik}$ คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i และ γ_k

$(\beta\gamma)_{jk}$ คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง β_j และ γ_k

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i, β_j และ γ_k

$\varepsilon_{ijk} \approx (\tau\beta\gamma)_{ijk}$

และสรุประดับต่าง ๆ ของแต่ละปัจจัยในการทดลอง 2^3 แฟคทอเรียล ซึ่งการทดลองแบบแฟคทอเรียลนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางเนื่องจากสามารถศึกษาปัจจัยได้หลายปัจจัยพร้อมกันทั้งอิทธิพลของปัจจัยหลักและอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยหรือที่เรียกว่าอันตรกิริยา (interactions) (ประไพศรี และพงศ์ชนัน 2551) เช่น การทดลองนี้เป็นการศึกษา 3 ปัจจัย คือ ปัจจัย A, B และ C จึงสามารถจำแนกอิทธิพลที่เกิดขึ้นได้เป็น 3 ประเภท คือ

1) อิทธิพลหลักหรืออิทธิพลปัจจัยเดี่ยว (main effects) คือ อิทธิพลที่เกิดจากการพิจารณาครั้งละปัจจัย คือ ปัจจัย A, B และ C
2) อิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (Two-Factor หรือ 2-Way Interaction) คือ อิทธิพลที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยพร้อมกันครั้งละ 2 ปัจจัย คือ AB, AC, และ BC
3) อิทธิพลร่วมระหว่าง 3 ปัจจัย (Three-Factor หรือ 3-Way Interaction) คือ อิทธิพลที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยพร้อมกันครั้งละ 3 ปัจจัย คือ ABC

3.3 สมมุติฐานในการทดสอบและลำดับการทดลอง

ภาพที่แบบการทดลองนี้เป็นการทดลองแบบสุ่มตลอด (Randomized Design) โดยมีข้อสมมุติฐานในการทดสอบดังนี้

H_o : $\mu_1 = \mu_2$

H_1 : $\mu_1 \neq \mu_2$

ซึ่ง μ_1 และ μ_2 คือค่าเฉลี่ยของประชากรของค่าวัดของระดับ 1 และ 2 ตามลำดับ

ในการดำเนินการทดลอง มีการสุ่มลำดับการทดลอง (Randomization) เพื่อให้ชิ้นทดสอบมีโอกาสเท่าเทียมกันที่จะถูกทดสอบในแต่ละลำดับการทดลอง (Experimental Unit) โดยแสดงเงื่อนไขในการทดลองดังตารางที่ 3.2 และตัวเลขในตารางที่ 3.3 ข้างล่าง แสดงหมายเลขสุ่มของชิ้นทดสอบจำนวน 32 ชิ้น ของแต่ละเงื่อนไข (Treatment) ของปัจจัยการทดลอง

ตารางที่ 3.2 แสดงเงื่อนไขในการทดลองทั้งหมด 32 เงื่อนไข

aging time	aging temp	solution temp		solution temp		Solution temp		Solution temp	
		500	595	500	595	500	595	500	595
2	175	1	5	9	13	17	21	25	29
	200	2	6	10	14	18	22	26	30
8	175	3	7	11	15	19	23	27	31
	200	4	8	12	16	20	24	28	32

ตารางที่ 3.3 แสดงลำดับการทดลอง

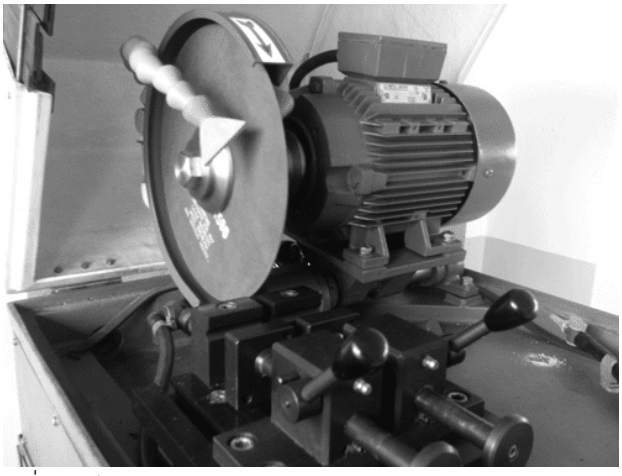
aging time	aging temp	solution temp		solution temp		solution temp		solution temp	
		500	595	500	595	500	595	500	595
2	175	2	17	20	5	25	14	29	27
	200	8	24	28	7	4	16	12	13
8	175	11	18	15	19	22	10	31	3
	200	23	1	30	9	21	26	6	32

3.4 การเตรียมการสำหรับการทดลอง

การเตรียมชิ้นงานในการทดลองเริ่มจากการนำโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด 6061 ที่มีลักษณะเป็นเส้น (rod) ไปตัดด้วยเครื่องตัดแบบสายพานให้ได้ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองจำนวน 32 ชิ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร และมีความยาวเท่ากับ 25.4$\pm$0.01 มิลลิเมตร จำนวน 16 ชิ้น ตามคำแนะนำของ ASTM แล้วกลึงให้ได้ความยาวตามที่กำหนดและมีผิวหน้าที่เรียบเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดจากขนาดของชิ้นงานและให้สามารถวัดค่าความแข็งได้ทันทีหลังผ่านกระบวนการอบชุบแข็ง รายละเอียดของการเตรียมการเพื่อการทดลองมีดังนี้

1) นำอะลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มม. มาตัดด้วยเครื่องตัดโลหะสำหรับงานทดสอบอะลูมิเนียมให้ได้ขนาดความยาวประมาณ 26-28 มม. จำนวน 32 ชิ้น ดังภาพที่ 3.1

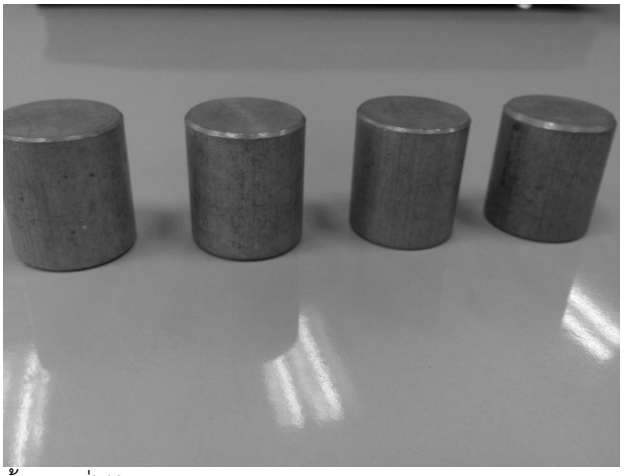
2) นำชิ้นงานที่ได้จากการตัดด้วยเครื่องตัดโลหะสำหรับงานทดสอบไปทำการกลึงปาดหน้าทั้งสองข้างด้วยเครื่องกลึง ให้ได้ความยาว 25.4±0.01 มม. แสดงดังภาพที่ 3.2 และนำไปขัดด้วยเครื่องขัด ดังภาพที่ 3.3 เพื่อให้ชิ้นงานมีผิวที่ละเอียดเรียบสม่ำเสมอ ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.1 แสดงภาพเครื่องตัดโลหะสำหรับงานทดสอบ

ภาพที่ 3.2 แสดงภาพเครื่องกลึง

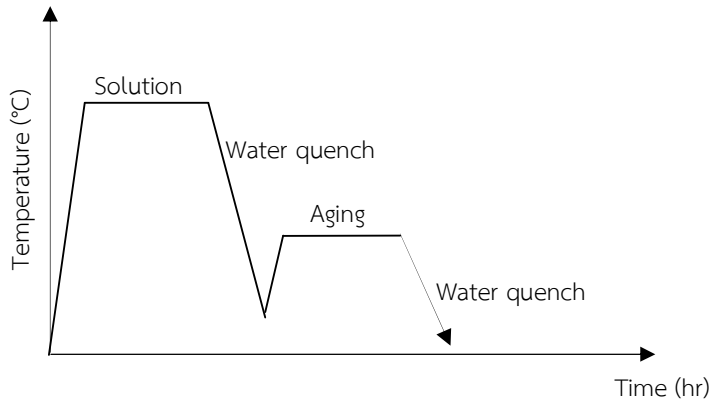
ภาพที่ 3.3 แสดงภาพเครื่องขัด



ภาพที่ 3.4 แสดงภาพชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

3.5 ขั้นตอนการอบชุบชิ้นงาน

ขั้นตอนการอบชุบชิ้นงานด้วยวิธีการตกผลึกโดยมีขั้นตอนหลัก ๆ อยู่ 3 ขั้นตอน คือ การอบละลาย (solution treatment) การชุบในน้ำ (quenching) และการทำบ่ม (aging) แสดงดังภาพที่ 3.5 โดยเวลาและอุณหภูมิของการทำอบละลายและการบ่มในการอบชุบแต่ละครั้งนั้นจะกำหนดโดยเงื่อนไขของแต่ละลำดับการทดลอง



ภาพที่ 3.5 ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการอบชุบ
ที่มา : รัตนาภรณ์ (2555)

และเนื่องจากการทดลองทั้งหมดมีจำนวน 16 เงื่อนไข จึงขอแสดงตัวอย่างขั้นตอนอบชุบชิ้นงานเงื่อนไขที่ 1 คือ อบละลายที่ 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และบ่มที่ 175°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งทดลองเป็นลำดับที่ 1 โดยมีขั้นตอน ดังนี้

1) เริ่มต้นด้วยการปรับตั้งค่าอุณหภูมิเตาไปที่ 500°C ละรอจนอุณหภูมิภายในเตาเท่ากับ 500°C ดังภาพที่ 3.6

ภาพที่ 3.6 แสดงเตาที่ใช้ในการทดลอง

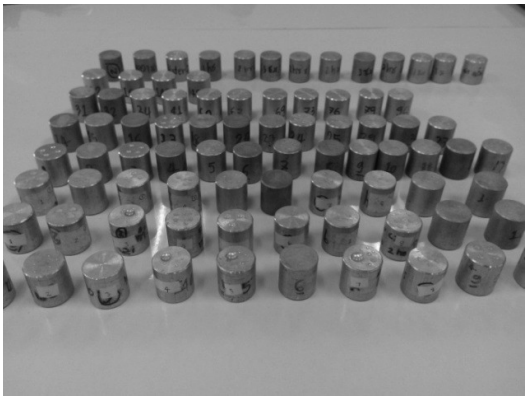
2) นำชิ้นงานเข้าเตาเผาไฟฟ้าและจับเวลาที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้เฟสของสารละลายของแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลายเป็นเฟสเดียวหรือเป็นเนื้อเดียวกันในสภาพที่เป็นของแข็ง
3) หลังจากอบละลายที่ 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานชุบในน้ำอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีธาตุผสมของ Mg_2Si ละลายอยู่ในปริมาณที่สูงกว่าสภาพสมดุล
4) นำชิ้นงานเข้าเตาที่ได้ปรับตั้งค่าอุณหภูมิเตาไว้แล้วที่ 175°C อีกครั้ง และบ่มเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการตกผลึกของ Mg_2Si ภายในโครงสร้างพื้นฐาน
5) เมื่อบ่มที่ 175°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วให้นำชิ้นงานทดสอบชุบน้ำทันทีเพื่อหยุดกระบวนการตกผลึกและวัดค่าความแข็งแบบบริเนลทันที

3.6 การทดสอบความแข็งโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแบบบริเนล

หลังจากอบชุบชิ้นงานตามเงื่อนไขที่กำหนดแล้วให้นำชิ้นงานมาวัดความแข็งแบบบริเนลทันที เพราะการปล่อยชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิห้องชิ้นงานจะยังคงเกิดการตกผลึก (Natural aging) โดยมีขั้นตอนดังนี้

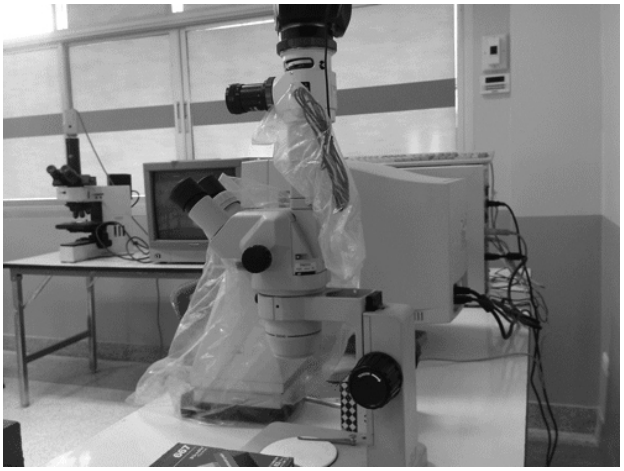
1) นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบชุบแข็งมาวัดความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนล ดังภาพที่ 3.6 ขนาดหัวกด 10 มิลลิเมตร โหลด 500 kgf กดนาน 30 วินาที โดยแต่ละชิ้นจะกดวัดจำนวน 4 ครั้ง ดังภาพที่ 3.7

ภาพที่ 3.7 แสดงเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนล

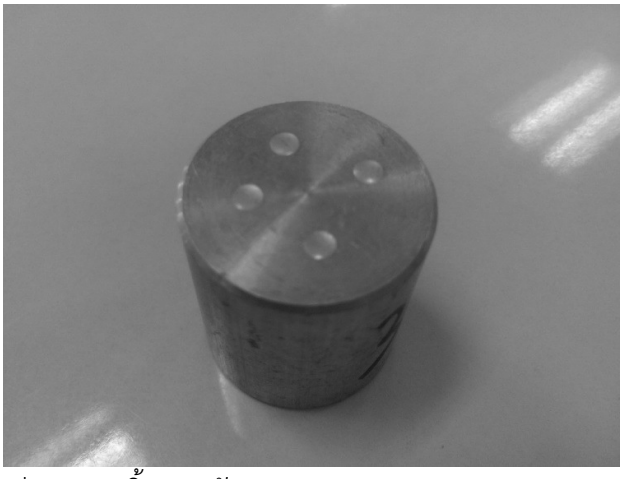


ภาพที่ 3.8 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการวัดความแข็งแบบบริเนล

2) นำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการวัดความแข็งมาวัดขนาดของรอยกดทั้ง 4 จุด ดังภาพที่ 3.8 แล้วนำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการวัดความแข็งมาวัดขนาดของรอยกดด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอไมโครสโคป (Stereo Microscope) ดังภาพที่ 3.9 โดยการวัดขนาดของรอยกดจะวัดในแนวแกน X และ Y ซึ่งแต่ละจุดจะวัดขนาดแนวแกน X จำนวน 2 ครั้ง และวัดขนาดแนวแกน Y จำนวน 2 ครั้ง แล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยเพื่อให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแต่ละจุด ดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.9 แสดงกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอไมโครสโคป



ภาพที่ 3.10 แสดงตัวอย่างรอยกดชิ้นงาน หัวกด 10 มม.

3) นำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากการเฉลี่ยแต่ละจุดมาอ่านค่าความแข็งจากตารางแสดงค่าความแข็ง (ASTM, 1998) ในตารางภาคผนวก ก เช่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.64 มม. จะสามาสามารถอ่านค่าความแข็งจากตารางได้เท่ากับ 89.70 BHN

4) นำค่าความแข็งทั้ง 4 จุด มาเฉลี่ยอีกครั้งเพื่อให้ได้ความแข็งเฉลี่ยของแต่ละชิ้นงานทดสอบแล้วบันทึกผลการทดลอง

บทที่ 4
ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดลอง

หลังจากอบชุบชิ้นงานตามเงื่อนไขที่กำหนดแล้ว นำชิ้นงานมาวัดความแข็งแบบบริเนลทันทีด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนลขนาดหัวกด 10 มิลลิเมตร โหลด 500 kgf กดนาน 30 วินาที โดยแต่ละชิ้นจะกดวัดจำนวน 4 ครั้ง แล้วนำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการวัดความแข็งมาวัดขนาดของรอยกดด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอไมโครสโคปแสดงค่าความกว้างของรอยกดดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความกว้างของรอยกดที่ผ่านเครื่องวัดความแข็งบริเนล

ลำดับการทดลอง	ความกว้างรอยกด (mm.)				Average
	1	2	3	4	
1	3.9	3.92	3.9	3.89	3.903
2	2.57	2.55	2.62	2.58	2.580
3	2.38	2.4	2.38	2.41	2.393
4	2.36	2.37	2.4	2.35	2.370
5	4	3.96	3.97	3.97	3.975
6	3.7	3.73	3.73	3.75	3.728
7	2.27	2.28	2.41	2.4	2.340
8	3.82	3.86	3.84	3.89	3.853
9	2.3	2.27	2.31	2.33	2.303
10	2.84	2.88	2.87	2.83	2.855
11	2.38	2.34	2.39	2.4	2.378
12	2.4	2.38	2.45	2.32	2.388
13	2.82	2.86	2.88	2.89	2.863
14	3.27	3.28	3.27	3.33	3.288
15	2.52	2.53	2.5	2.57	2.530
16	3.39	3.5	3.4	3.48	3.443
17	39.1	39.5	39.5	39.8	39.49
18	39.8	39.5	39.3	39.5	39.54
19	43.4	43.6	42.4	42.6	43.01
20	72.0	74.6	71.5	72.0	72.51

ตารางที่ 4.1 ค่าความกว้างของรอยกดที่ผ่านเครื่องวัดความแข็งบริเนล (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	ความกว้างรอยกด (mm.)				Average
	1	2	3	4	
21	48.0	50.0	50.3	49.1	49.36
22	88.3	91.1	88.3	88.3	89.01
23	105.3	106.2	108.0	106.2	106.38
24	103.5	102.7	98.6	101.0	101.46
25	107.2	103.6	105.2	102.4	104.62
26	40.4	39.8	39.8	39.1	39.76
27	75.1	73.0	73.5	74.0	73.92
28	54.7	55.7	54.1	55.4	54.99
29	91.8	92.5	91.1	90.4	91.45
30	107.0	107.0	106.2	107.0	106.82
31	107.0	106.2	108.9	107.0	107.28
32	114.6	113.6	111.7	113.6	113.38

จากตาราง 4.1 นำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากการเฉลี่ยแต่ละจุดมาอ่านค่าความแข็งจากตารางแสดงค่าความแข็ง (ASTM International 2013) โดยแสดงค่าความแข็งดัง ตาราง 4.2 เป็นค่าความแข็งเฉลี่ยที่ผิวชิ้นงานทดสอบซึ่งเป็นผลของการดำเนินการทดลองตามขั้นตอนดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยแสดงเป็นค่าความแข็งที่เกิดจากแต่ละเงื่อนไขของการทดลองแบบ2^3 แฟคทอเรียล

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งที่ผิวของชิ้นงานทดสอบ

aging time (B)	aging temp (C)	solution temp (A)							
		500	595	500	595	500	595	500	595
2	175	40.15	94.05	38.60	97.80	39.49	97.65	38.98	91.45
	200	44.18	111.25	41.25	109.75	44.09	104.42	39.76	106.82
8	175	76.08	110.25	76.50	112.00	43.01	106.38	73.92	107.28
	200	52.10	115.00	57.28	118.75	72.51	110.49	54.99	113.38

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยตาราง ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญของการทดสอบสมมุติฐาน 95% (α = 0.05) ด้วยการออกแบบการทดลองแบบ 2^3 แฟคทอเรียล ทำให้สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองทั้งแบบในเชิงเส้นตรง (linear) และสามารถสรุปปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญในเชิงเส้นตรงได้ดังนี้

(1) อิทธิพลของปัจจัยหลัก (main effect)

- เวลาอบละลายมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งในเชิงเส้นตรง
- อุณหภูมิอบละลายมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งทั้งในเชิงเส้นตรง
- เวลาบ่มมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งทั้งในเชิงเส้นตรง
- อุณหภูมิบ่มมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งทั้งในเชิงเส้นตรง

(2) อิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย (interaction effect)

- อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายในเชิงเส้นตรงมีอิทธิพลร่วมกับเวลาบ่มในเชิงเส้นตรง
- อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายในเชิงเส้นตรงมีมีอิทธิพลร่วมกับอุณหภูมิบ่มในเชิงเส้นตรง
- อิทธิพลร่วมระหว่างเวลาบ่มกับอุณหภูมิบ่มมีอิทธิพลร่วมกันในเชิงเส้นตรง

ตารางที่ 4.3 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^3

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F	P-Value
A	1	23862.8	23862.8	2240.13	0.000
B	1	2116.2	2116.2	198.66	0.000
C	1	1.4	1.4	0.13	0.725
A*B	1	309.6	309.6	29.06	0.005
A*C	1	727.6	727.6	68.30	0.000
B*C	1	555.1	555.1	52.11	0.000
A*B*C	1	171.6	171.6	16.11	0.001
Error	24	225.7	10.7		
Total	31	27999.9			

จากตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

(1) ปัจจัย A มีผลต่อค่าความแข็ง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

(2) ปัจจัย B มีผลต่อค่าความแข็ง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

(3) ปัจจัย C ไม่มีผลต่อค่าความแข็ง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

(4) ปัจจัยร่วม A, B มีผลต่อค่าความแข็ง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01

(5) ปัจจัยร่วม A, C มีผลต่อค่าความแข็ง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

(6) ปัจจัยร่วม B, C มีผลต่อค่าความแข็ง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

(7) ปัจจัยร่วม A, B,C ไม่มีผลต่อค่าความแข็ง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

4.2 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็ง

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยตาราง ANOVA แสดงให้เห็นว่าปัจจัยหลักมีอิทธิพลส่งผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ คือ อุณหภูมิอบละลาย (A) และเวลาบ่ม (B) นอกจากนั้นยังมีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งอีกด้วย คือ อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิบ่ม (AC) เมื่อนำข้อมูลมาพล็อตกราฟระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยกับระดับของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมจะแสดงให้เห็นผลของอิทธิพลปัจจัยในลักษณะเชิงเส้นตรงดังแสดงในภาพที่ 4.1-4.4 ซึ่งโดยปกติแล้วถ้าอิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัยมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญจะพิจารณาเพียงผลของปัจจัยร่วมเท่านั้น

4.2.1 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main Effects)

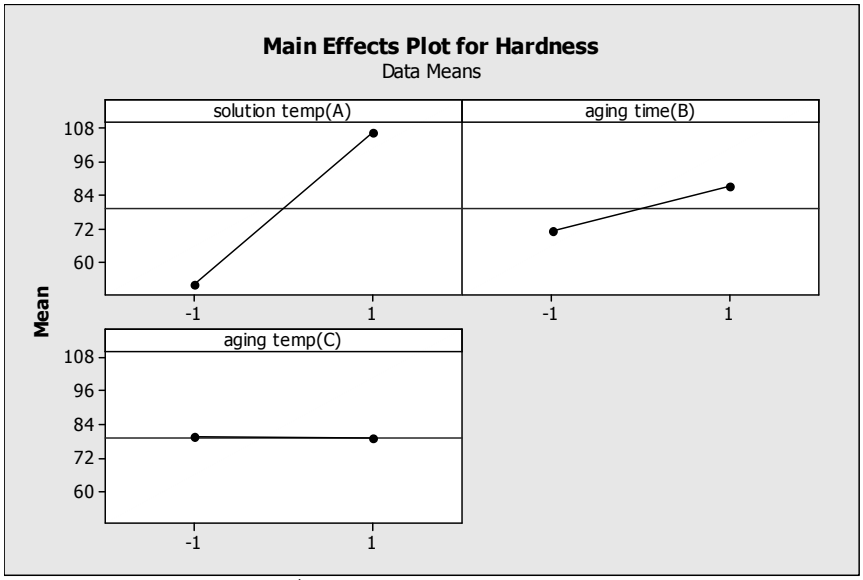
พิจารณากราฟระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยกับระดับปัจจัยหลักแต่ละปัจจัย ซึ่งกราฟจะแสดงให้เห็นผลของอิทธิพลของเวลาอบละลายในลักษณะเชิงเส้นตรง และผลของอิทธิพลของอุณหภูมิอบละลาย, เวลาบ่ม และอุณหภูมิบ่มในลักษณะเชิงเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 4.1 พบว่า

(1) อุณหภูมิอบละลาย (A) ที่ระดับปัจจัยอยู่ที่ระดับสูง คือ 595°C จะได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 106.67 BHN และที่ระดับปัจจัยอยู่ที่ระดับต่ำ คือ 500°C จะได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 52.054 BHN

(2) เวลาบ่ม (B) ที่ระดับปัจจัยอยู่ที่ระดับสูงคือ 8 ชั่วโมง จะได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 87.494 BHN และที่ระดับปัจจัยอยู่ที่ระดับต่ำคือ 2 ชั่วโมง จะได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 71.229 BHN

(3) อุณหภูมิบ่ม (C) ที่ระดับปัจจัยอยู่ที่ระดับสูงคือ 200°C จะได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 79.156 BHN และที่ระดับปัจจัยอยู่ที่ระดับต่ำคือ175°C จะได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 79.567 BHN

จะเห็นว่าเมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยหลักคือ อุณหภูมิอบละลาย, เวลาบ่ม ค่าความแข็งมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิและเวลาของปัจจัยเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ส่วนอุณหภูมิบ่มนั้นค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.1 กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยกับระดับของปัจจัยหลักแต่ละปัจจัย

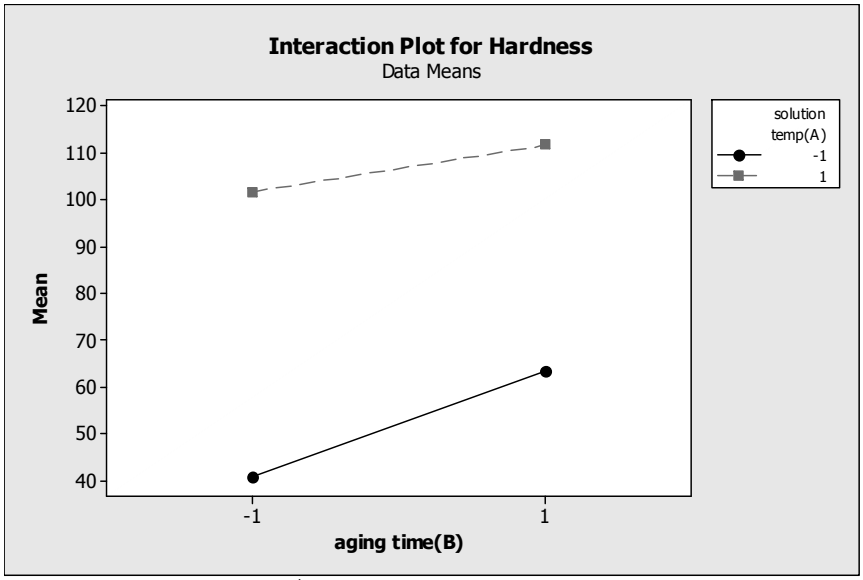
4.2.2 การวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction Effects)

พิจารณากราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับเวลาบ่มซึ่งจะแสดงให้เห็นผลของอิทธิพลร่วมในเชิงเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 4.2 พบว่า

(1) การบ่มเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิ 500°C จะได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 40.81 BHN และค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นเท่ากับ 101.65 BHN หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิ595°C

(2) การบ่มเป็นเวลา 8 ชั่วโมง หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิ 500°C จะได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 63.30 BHN และค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นเท่ากับ 111.69 BHN หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิ 595°C

จะเห็นว่าค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบละลายและเวลาที่ใช้การบ่มในลักษณะเชิงเส้นตรง โดยการอบละลายที่อุณหภูมิสูงและใช้เวลาบ่มนานจะทำให้ได้ค่าความแข็งเฉลี่ยสูงกว่าการอบละลายด้วยอุณหภูมิต่ำและใช้เวลาบ่มน้อย



ภาพที่ 4.2 กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับเวลาบ่ม

พิจารณากราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิบ่มซึ่งจะแสดงให้เห็นผลของอิทธิพลร่วมในเชิงเส้นตรงดังแสดงในภาพที่ 4.3 พบว่า

(1) การบ่มด้วยอุณหภูมิ 175°C หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิ 500°C จะได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 57.03 BHN และค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นเท่ากับ 102.10 BHN หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิ 595°C

(2) การบ่มด้วยอุณหภูมิ 200°C หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิ 500°C จะได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 47.08 BHN และค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นเท่ากับ 111.23 BHN หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิ 595°C

จะเห็นว่าค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบละลายและอุณหภูมิที่ใช้บ่มในลักษณะเชิงเส้นตรง โดยการอบละลายและบ่มที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ได้ค่าความแข็งเฉลี่ยสูงกว่าการอบละลายและบ่มที่อุณหภูมิต่ำ จากกราฟจะเห็นว่าการอบละลายด้วยอุณหภูมิ 500°C โดยใช้อุณหภูมิในการบ่มที่ 175°C จะให้ค่าความสูงสูงกว่าการบ่มด้วยอุณหภูมิ 200°C

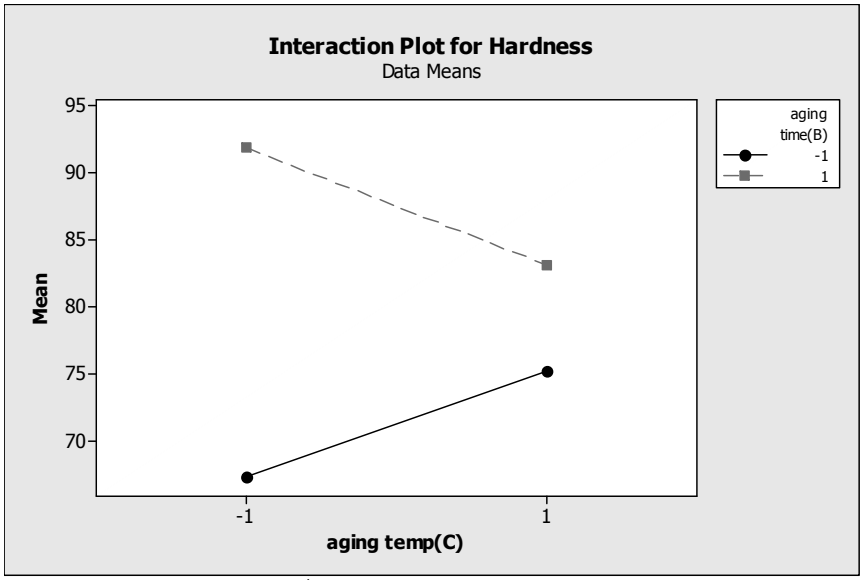
ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิบ่ม

พิจารณากราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างเวลากับอุณหภูมิบ่มซึ่งจะแสดงให้เห็นผลของอิทธิพลร่วมในเชิงเส้นตรงดังแสดงในภาพที่ 4.4 พบว่า

(1) การบ่มที่อุณหภูมิ 175°C และใช้เวลาบ่ม 2 ชั่วโมง จะได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ67.27 BHN และค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นเท่ากับ 91.86 BHN หลังผ่านการบ่มเป็นเวลา 8 ชั่วโมง

(2) การบ่มที่อุณหภูมิ 200°C และใช้เวลาบ่ม 2 ชั่วโมง จะได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 75.19 BHN และค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นเท่ากับ 83.12 BHN หลังผ่านการบ่มเป็นเวลา 8 ชั่วโมง

จะเห็นว่าค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิบ่มและเวลาที่ใช้บ่มในลักษณะเชิงเส้นตรง โดยการที่อบอุณหภูมิบ่มและเวลาบ่มที่อุณหภูมิสูงและเวลาสูงจะทำให้ได้ค่าความแข็งเฉลี่ยสูงกว่าการอบที่อุณหภูมิและเวลาบ่มต่ำ และจากกราฟจะสังเกตได้ว่า ถ้าใช้เวลาบ่มเป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิในการบ่ม 175°C จะให้ค่าความแข็งสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 200°C



ภาพที่ 4.4 กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างเวลาบ่มกับอุณหภูมิบ่ม

4.3 แบบจำลองโมเดลประมาณค่าความแข็ง

จากการทดลองสามารถสร้างแบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear regression model) ด้วยสมการเชิงเส้น (Linear) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับตัวแปรในลักษณะเชิงเส้นโค้งได้ โดยการพิจารณาเพียงปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลส่งผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญได้ดังนี้

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \hat{\beta}_{12} x_1 x_2 + \hat{\beta}_{13} x_1 x_3 + \hat{\beta}_{23} x_2 x_3 + \hat{\beta}_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (4.1)$$

โดย

$\hat{y}$ คือ ค่าประมาณความแข็ง (Fitted value)

$\hat{\beta}_0$ คือ ค่าความแข็งเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด

$\hat{\beta}$ คือ สัมประสิทธิ์การถดถอย

x_1 คือ อุณหภูมิอบละลาย (A)

x_2 คือ เวลาบ่ม (B)

x_3 คือ อุณหภูมิบ่ม (C)

จากสมการ 4.1 สามารถสร้างสมการประมาณค่าความแข็งของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญดังนี้

$$\hat{y} = 79.36+27.3A+8.13B-3.11AB+4.76AC-4.167BC+2.316ABC$$

4.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

การทดสอบสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เป็นการตรวจสอบว่าแบบจำลองโมเดลสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้กี่เปอร์เซนต์ของความแปรปรวนทั้งหมด ซึ่งค่า R^2 ควรมีค่า $0 \leq R^2 \leq 1$ ถ้า R^2 มีค่ามากหมายความว่าแบบจำลองโมเดลที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมในการประมาณค่าความแข็ง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R^2 = SS_{model}/SS_{Total} \quad (4.2)$$

$$SS_{model} = SS_A+SS_B+SS_C+SS_{AB}+SS_{AC}+SS_{BC}+SS_{ABC}$$

$$= 23862.8+2116.2+1.4+309.6+727.6+555.1+171.6=27,744.3$$

$$SS_{Total} = 27,999.9$$

$$R^2 = 27,744.3/27,999.9$$

$$= 0.9908$$

แต่ค่า R^2 ไม่สามารถแสดงขอบเขตของโมเดลได้ชัดเจนเพราะฉะนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนปัจจัย ดังนั้นจึงมีการใช้ R^2_{adj} โดยที่

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{SS_E/df_E}{SS_{Total}/df_{Total}} \quad (4.3)$$

แทนค่าในสมการจะได้

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{225.7/24}{27,999.9/31}$$

$$= 0.9896$$

จากการทดสอบสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของแบบจำลองโมเดลมีค่าเท่ากับ 99.08% หมายความว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ 99.08% ของความแปรปรวนทั้งหมดและ R^2_{adj} เท่ากับ 98.96% ดังนั้นแบบจำลองโมเดลที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมในการประมาณค่าความแข็งหลังการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก

4.3.2 การประมาณช่วงของความเชื่อมั่น (Confidence intervals)

การประมาณช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% (α = 0.05) ของค่าความแข็งที่ได้จากการประมาณค่าจากโมเดลสามารถหาได้จากสมการ

$$Y \pm t_{\alpha/2,N-a}\sqrt{MS_E} \quad (4.4)$$

ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% (α=0.05), $\alpha/2$=0.025 และค่า MS_E หาได้จากผลรวมค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Sum of Squares) ของปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญรวมกับผลรวมค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าผิดพลาด (Error) แล้วหารด้วยระดับความอิสระ (Degrees of freedom) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองโมเดลสามารถหาค่า MS_E จาก

$$MS_E = SS_{residual\ error}/df_{error} \quad (4.5)$$

ค่า $SS_{residual\ error}$ หาได้จาก

$$SS_{residual\ error} = SS_{Total}-SS_{model} \quad (4.6)$$

$$= 27,999.9-27,744.3$$

$$= 255.6$$

และค่า degrees of freedom ของปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญมีค่าเท่ากับ 24 แทนค่าในสมการ 4.22 จะได้

$$MSE = SS_{residual\ error}/df_{error}$$
$$= 255.6/24$$
$$= 10.64$$
$$\sqrt{MSE} = \sqrt{10.64}$$
$$= 3.263$$
$$t_{0.025,70} = 2.064$$

แทนค่าในสมการ 4.21 จะได้ $Y \pm t_{0.025,70}\sqrt{MSE}$

$$= Y \pm (3.26 \times 2.064)$$
$$= Y \pm 6.73 \text{ BHN}$$

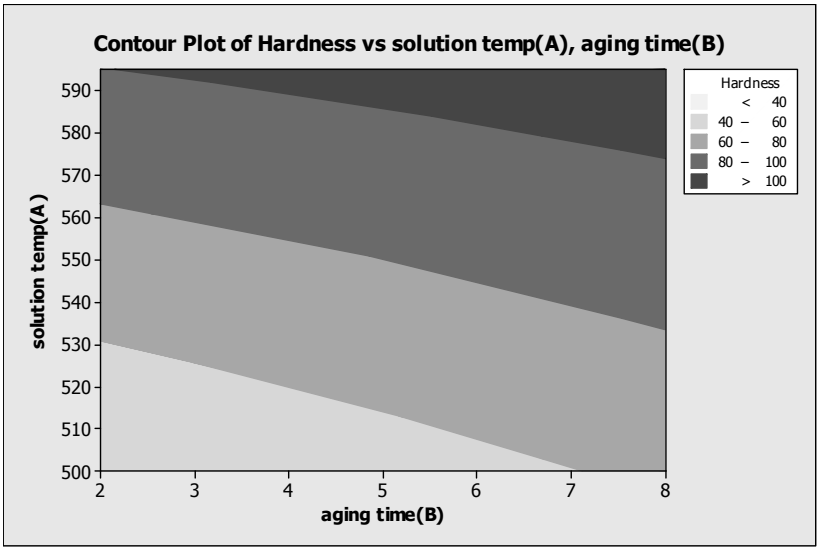
ดังนั้นค่าความแข็งที่ประมาณได้จากโมเดลจะมีช่วงของความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ ±6.73 BHN จากค่าประมาณ

4.4 กราฟโครงร่าง

กราฟโครงร่าง (Contour plot) เป็นการสร้างแผนภาพแบบ 2 มิติ ของพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) เพื่อให้ง่ายในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับระดับของปัจจัยที่พิจารณาทีละ 2 ปัจจัย กราฟโครงร่างนอกจากจะสามารถประมาณค่าความแข็งที่แต่ละระดับของปัจจัยแล้วยังสามารถแสดงแนวโน้มของค่าความแข็งที่เปลี่ยนไปตามการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยที่พิจารณา ซึ่งการทดลองครั้งนี้มีปัจจัยหลักทั้งหมด 3 ปัจจัย จึงสามารถสร้างกราฟโครงร่างที่พิจารณาร่วมกัน ทีละสองปัจจัยได้ทั้งหมด 3 แบบ ดังนี้

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งเมื่อระดับปัจจัยของอุณหภูมิในการอบละลายและเวลาในการบ่มเปลี่ยนไป จากภาพแสดงพื้นผิวตอบสนองแสดงให้เห็นค่าความแข็งที่ต่างกัน 4 ช่วง คือ 40-60 BHN, 60-80 BHN, 80-100 BHN และมากกว่า 100 BHN เมื่อพิจารณากราฟของอุณหภูมิอบละลายกับเวลาบ่ม ดังแสดงในภาพที่ 4.5 พบว่า

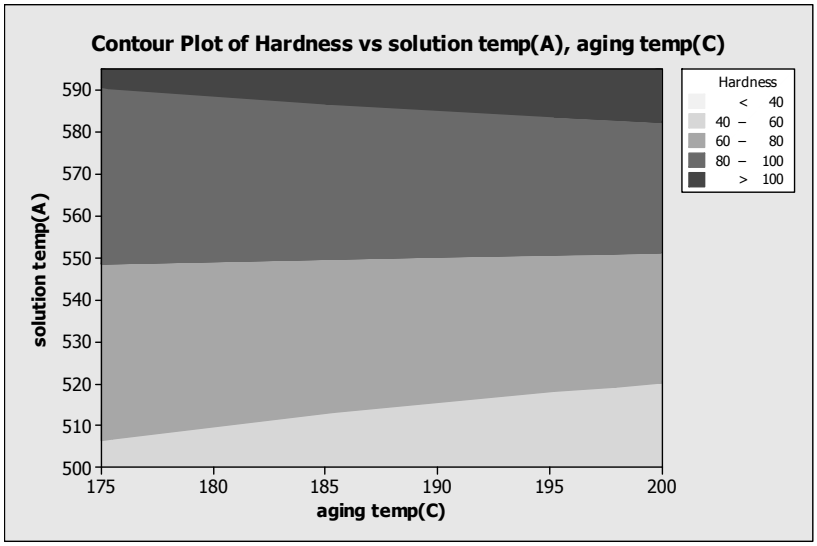
1) การอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับต่ำคือ 500°C และใช้เวลาในการบ่มในระดับต่ำคือ 2 จะให้ค่าความแข็ง 40-60 BHN และเมื่อใช้เวลาในการบ่มในระดับสูงคือ 8 ชั่วโมง จะให้ค่าความแข็ง 60-80 BHN
2) การอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับสูงคือ 595°C และใช้เวลาอบละลายทุกระดับคือ 2 จะให้ค่าความแข็ง 80-100 BHN และเมื่อใช้เวลาในการบ่ม 8 ชั่วโมง จะให้ค่าความแข็งมากกว่า 100 BHN



ภาพที่ 4.5 แสดงแผนภาพโครงร่างแบบ 2 มิติ ระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับเวลาบ่ม

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งเมื่อระดับปัจจัยของอุณหภูมิในการอบละลายและอุณหภูมิในการบ่มเปลี่ยนไป จากภาพแสดงพื้นผิวตอบสนองแสดงให้เห็นค่าความแข็งที่ต่างกัน 4 ช่วง คือ 40-60 BHN, 60-80 BHN, 80-100 BHN และมากกว่า 100 BHN เมื่อพิจารณากราฟของอุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิบ่ม ดังแสดงในภาพที่ 4.6 พบว่า

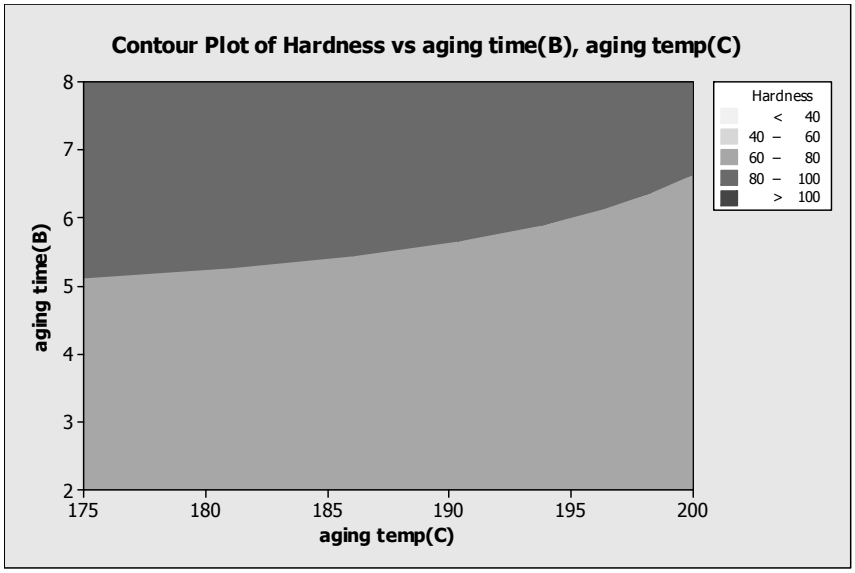
1) การอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับต่ำคือ 500°C และใช้อุณหภูมิในการบ่มในทุกระดับคือ 175°C และ 200°C จะให้ค่าความแข็ง 40-60 BHN
2) การอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับสูงคือ 595°C และใช้เวลาอบละลายทุกระดับคือ 175°C และ 200°C จะให้ค่าความแข็งมากกว่า 100 BHN



ภาพที่ 4.6 แสดงแผนภาพโครงร่างแบบ 2 มิติ ระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิบ่ม

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งเมื่อระดับปัจจัยของเวลาในการบ่มและอุณหภูมิในการบ่มเปลี่ยนไป จากภาพแสดงพื้นผิวตอบสนองแสดงให้เห็นค่าความแข็งที่ต่างกัน 4 ช่วง คือ 40-60 BHN, 60-80 BHN, 80-100 BHN และมากกว่า 100 BHN เมื่อพิจารณากราฟของอุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิบ่ม ดังแสดงในภาพที่ 4.7 พบว่า

1) เวลาในการบ่มระดับต่ำคือ 2 ชั่วโมง และใช้อุณหภูมิในการบ่มในทุกระดับคือ 175°C และ 200°C จะให้ค่าความแข็ง 60-80 BHN
2) เวลาในการบ่มระดับสูงคือ 8 ชั่วโมง และใช้อุณหภูมิในการบ่มในทุกระดับคือ 175°C และ 200°C จะให้ค่าความแข็ง 80-100 BHN

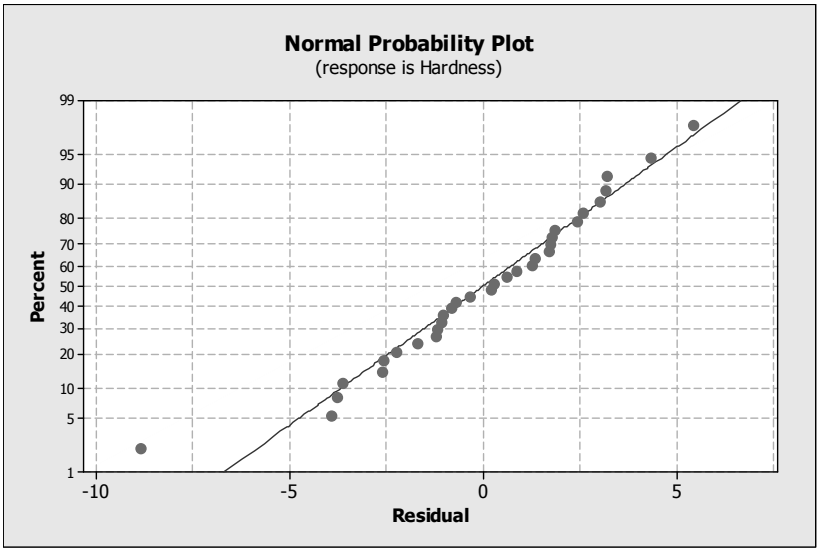


ภาพที่ 4.7 แสดงแผนภาพโครงร่างแบบ 2 มิติ ระหว่างเวลาบ่มกับอุณหภูมิบ่ม

4.5 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

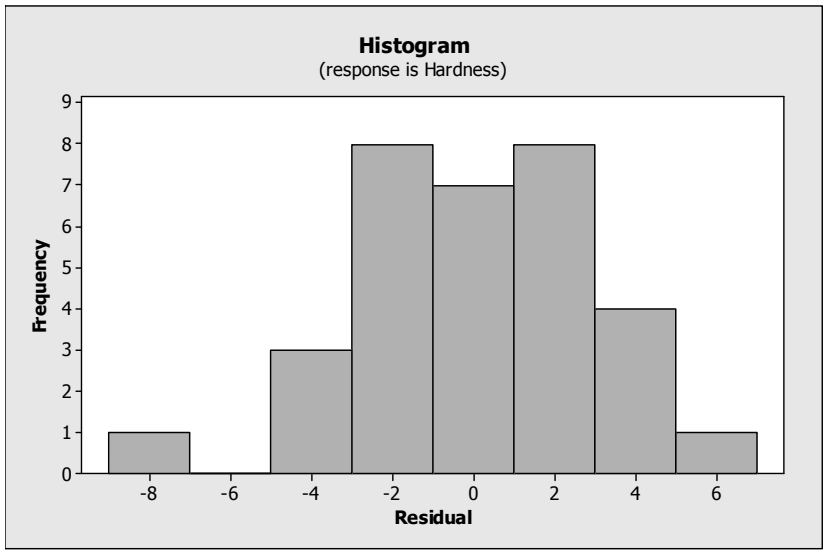
หลังการวิเคราะห์ความแปรปรวนและสร้างแบบจำลองโมเดลก่อนนำไปใช้งานทุกครั้งต้องตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล (Model adequacy checking) ข้อสมมติฐานเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองค่าความผิดพลาด (Error หรือ Residual) ของแบบจำลองจะต้องมีการแจกแจงปกติ (Normal distribution) และมีความเป็นอิสระต่อกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และมีค่าความแปรปรวนคงที่

จากภาพที่ 4.8 แสดงการพล็อตค่าความผิดพลาดหรือค่าส่วนเหลือ (Residuals) เป็นการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนเหลือ ของผลลัพธ์จากการทดลองด้วยวิธีการแจกแจงปกติจะเห็นว่าจุดพล็อตมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ข้อมูลอยู่ในแนวเส้น ทำให้ประมาณได้ว่าค่าส่วนเหลือมีการแจกแจงแบบปกติ



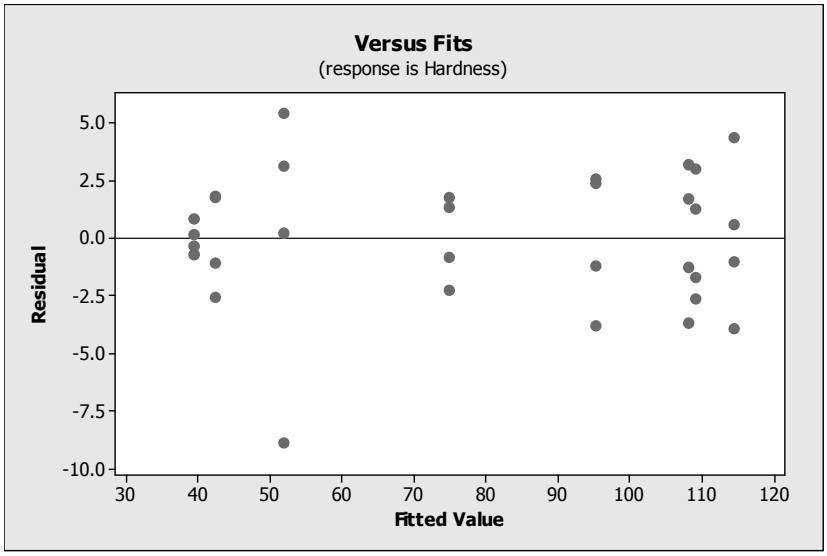
ภาพที่ 4.8 แสดงการพล็อตค่าความผิดพลาด

จากภาพที่ 4.9 ฮิสโตแกรมจะมีลักษณะเป็นทรงระฆังคว่ำหรือค่าส่วนเหลือแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบแบบปกติ



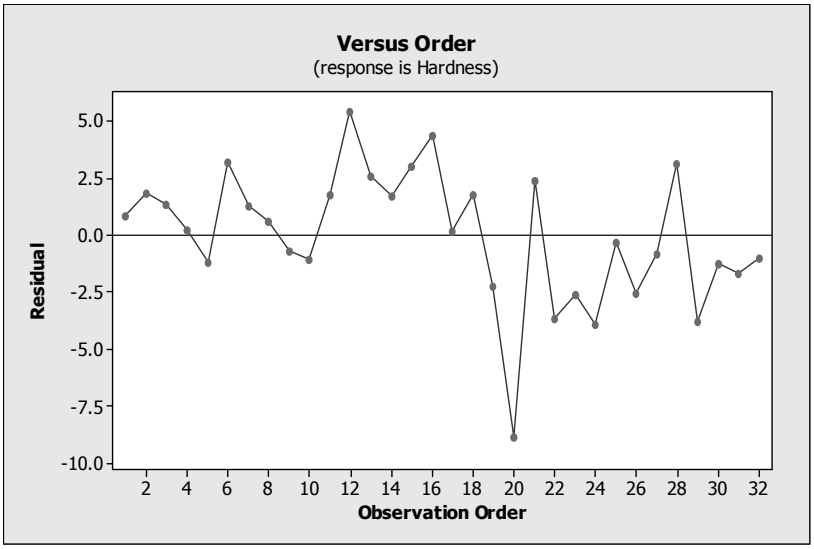
ภาพที่ 4.9 แผนภาพฮิตโตแกรม

จากภาพที่ 4.10 เป็นแผนภาพการกระจาย (Scatter diagram) พล็อตระหว่างค่าความผิดพลาดของข้อมูลกับค่าประมาณความแข็งตามโมเดล เพื่อยืนยันความไม่ขึ้นต่อกันของค่าประมาณหรือเป็นการตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) จากแผนภูมิการกระจายของค่าความคาดเคลื่อนของค่าส่วนเหลือเทียบกับค่าค่าประมาณความแข็งพบว่าการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดมีรูปแบบที่เป็นอิสระ มีการกระจายแบบสุ่มทั้งทางด้านบวกและด้านลบสม่ำเสมอพอๆกัน



ภาพที่ 4.10 กราฟพล็อตค่าระหว่างค่าความผิดพลาดของข้อมูลกับค่าประมาณความแข็งตามโมเดล

จากภาพที่ 4.11 แสดงการกระจายตัวของค่าส่วนเหลือกับลำดับการทดลอง คือลำดับต่อต้านส่วนตกค้าง (Residual plot versus the order) ค่าความคาดเคลื่อนของข้อมูลเป็นกระจายแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งไม่ขึ้นอยู่กับลำดับการทดลอง



ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดกับลำดับการทดลอง

บทที่ 5
สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งหลังการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก

จากการทดลองพบว่าปัจจัยหลักทุกมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งหลังการชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกอย่างมีนัยสำคัญทั้งในเชิงเส้นตรงของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 อิทธิพลหลักเกือบทุกปัจจัย คือ อุณหภูมิอบละลาย และเวลาการบ่มมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นอุณหภูมิในการบ่มเท่านั้นที่ไม่มีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลร่วมสองปัจจัย และอิทธิพลร่วมสามปัจจัยทุกปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้นสามารถสร้างโมเดลจากปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมสองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญเพื่อทำนายความสัมพันธ์ของค่าความแข็งกับตัวแปรที่พิจารณาในเชิงเส้นโค้งได้ดังนี้

$$\hat{y} = 79.36+27.3A+8.13B-3.11AB+4.76AC-4.167BC+2.316ABC$$

โดยโมเดลนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 99.08% และ R^2_{adj} เท่ากับ 98.96% แสดงว่าโมเดลสามารถแทนค่าหรือครอบคลุมข้อมูลจากการทดลองได้ถึง 98.96% สามารถประมาณค่าความแข็งที่มีค่าความผิดพลาดไม่เกิน ±6.73 BHN ที่ความเชื่อมั่น 95% และจากการตรวจสอบค่าความผิดพลาด (Errors หรือ Residuals) พบว่าเป็นไปตามสมมติฐานของการออกแบบการทดลองคือ มีการแจกแจงแบบปกติและมีการกระจายตัวเป็นแบบสุ่มสม่ำเสมอกันที่แต่ละระดับของปัจจัยหลัก

5.1.2 อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลความแข็งหลังการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก

(1) อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายและเวลาบ่มผลต่อค่าความแข็งหลังการอบชุบในลักษณะเชิงเส้นตรง โดยการอบละลายด้วยอุณหภูมิสูงและบ่มเป็นเวลานานจะให้ค่าความแข็งสูงกว่าการอบละลายด้วยอุณหภูมิต่ำและใช้เวลาบ่มน้อย

(2) อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายและอุณหภูมิบ่มส่งผลต่อค่าความแข็งหลังการอบชุบในลักษณะเชิงเส้นตรง โดยการอบละลายด้วยอุณหภูมิสูงและใช้อุณหภูมิในการบ่มสูงจะให้ค่าความแข็งสูงกว่าการอบละลายด้วยอุณหภูมิต่ำและใช้อุณหภูมิบ่มต่ำ แต่การอบละลายด้วยอุณหภูมิ 500°C โดยใช้อุณหภูมิในการบ่มที่ 175°C จะให้ค่าความสูงสูงกว่าการบ่มด้วยอุณหภูมิ 200°C

(3) อิทธิพลร่วมระหว่างเวลาและอุณหภูมิบ่มส่งผลต่อค่าความแข็งหลังการอบชุบในลักษณะเชิงเส้นตรง โดยการอบละลายด้วยอุณหภูมิสูงและบ่มเป็นเวลานานจะให้ค่าความแข็งสูงกว่าการอบละลายด้วยอุณหภูมิต่ำและใช้เวลาบ่มน้อย แต่การใช้เวลาบ่มเป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิในการบ่ม 175°C จะให้ค่าความแข็งสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 200°C

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรทำศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างจุลภาคที่มีต่อค่าความแข็งหลังการอบชุบด้วยวิธีการตกผลึกของโลหะผสมอะลูมิเนียมในเกรดอื่นๆที่อุตสาหกรรมยานยนต์ใช้อยู่ในปัจจุบันด้วย

บรรณานุกรม

บุญชม ศรีสะอาด. 2547. **วิธีการทางสถิติสำหรับการวิจัย**. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร : สุวีริยาสาส์น.

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. **การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัท สำนักพิมพ์ท้อป จำกัด.

ปารเมศ ชุติมา. 2545. **การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรมศาสตร์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มนัส สถิรจินดา. 2543. **โลหะนอกกลุ่มเหล็ก.** พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : สานักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รัตนาภรณ์ วงษ์ทอง. 2554. **การทดลองเพื่อประเมินอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อ Artificial aging ของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061**. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์. 2548. **วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัท สำนักพิมพ์ท้อป จำกัด.

American Society for Testing and Material. 1998. **Annual book of ASTM standards Vol 02.02**. Philadelphia. PA : ASTM.

ASTM International. 2013. **Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials[1].** Designation E10 – 12 : 19428-2959.

Cole, G.S., and Sherman, A.M. 1995. Light Materials fot Automotive Applications. **Materrials Characterzation.** 35 (1) : 3-9.

Demir, H., and Gunduz, S. 2009. The effects of aging on machinability of 6061 aluminium alloy. **Materials & Design.** 30 : 1480-1483.

Fathi Habashi. 1998. **Alloys : preparation, properties, applications.** New York : Wiley-VCH.

Halil Demir and suleyman Gunduz. 2008. **The effects aging on machinability of 6061 aluminium alloy**. Materials & Design. Volume 30. pp. 1480-1483.

Harry Chandler. 1996. **Heat treater's guide : practices and procedures for nonferrous alloys.** OH: ASM International.

Mahadevan, K., Raghukandan, K., Senthilvelan, T., Pai, B. C., and Pillai, U. T. S. (2005). Studies on the effect of delayed aging on the mechanical behaviour of AA 6061 SiCp composite. **Materials Science and Engineering.** 39 (1) : 188-193.

Meyveci, A., Karacan, I., Çallgülü, U., and Durmus, H. (2010). Pin-on-disc characterization of 2xxx and 6xxx aluminium alloys aged by precipitation age hardening. **Journal of Alloys and Compounds.** 491 (1) : 278-283.

Montgomery, D.C. 2001. **Design and Analysis of Experiments.** 5th ed. New York : John Wiley& Sons.

Ozturk, F., Sisman, A., Toros, S., Kilic, S., and Picu, R. C. (2010). Influence of aging treatment on mechanical properties of 6061 aluminum alloy. **Materials & Design.** 31 (2) : 972-975.

Remesh, C.S., Keshavamurthy, R., Channabasappa, B.H. and Pramod, S. (2009). Influence of heat treatment on slurry erosive wear resistance of Al6061 alloy. **Materials & Design.** 30 (9) : 3713-3722.

_____. 2557. **การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)**. แหล่งที่มา : http://e-book.ram.edu/e-book/m/MY318(51)/MY318-7.pdf**, 1**2 มีนาคม 2557.

_____. 2557. **Aluminum 6061-O**. แหล่งที่มา : http://www.matweb.com/**, 1**2 มีนาคม 2557.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุ Aluminum 6061-O

al Properties	Metric	English
Density	2.70 g/cc	0.0975 lb/in³
Mechanical Properties	**Metric**	**English**
Hardness, Brinell	30	30
Tensile Strength, Ultimate	124 MPa	18000 psi
Tensile Strength, Yield	55.2 MPa	8000 psi
Elongation at Break	25 %	25 %
	@Thickness 1.59 mm	@Thickness 0.0625 in
	30 %	30 %
	@Diameter 12.7 mm	@Diameter 0.500 in
Modulus of Elasticity	68.9 GPa	10000 ksi
Ultimate Bearing Strength	228 MPa	33100 psi
Bearing Yield Strength	103 MPa	14900 psi
Poissons Ratio	0.33	0.33
Fatigue Strength	62.1 MPa	9000 psi
	@# of Cycles 5.00e+8	@# of Cycles 5.00e+8
Machinability	30 %	30 %
Shear Modulus	26.0 GPa	3770 ksi
Shear Strength	82.7 MPa	12000 psi
Electrical Properties	**Metric**	**English**
Electrical Resistivity	0.00000366 ohm-cm	0.00000366 ohm-cm
	@Temperature 20.0 °C	@Temperature 68.0 °F
Thermal Properties	**Metric**	**English**
CTE, linear	23.6 µm/m-°C	13.1 µin/in-°F
	@Temperature 20.0 - 100 °C	@Temperature 68.0 - 212 °F
	25.2 µm/m-°C	14.0 µin/in-°F
	@Temperature 20.0 - 300 °C	@Temperature 68.0 - 572 °F
Specific Heat Capacity	0.896 J/g-°C	0.214 BTU/lb-°F
Thermal Conductivity	180 W/m-K	1250 BTU-in/hr-ft²-°F
Melting Point	582 - 651.7 °C	1080 - 1205 °F
Solidus	582 °C	1080 °F
Liquidus	651.7 °C	1205 °F

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุ Aluminum 6061-O (ต่อ)

Processing Properties	Metric	English
Solution Temperature	529 °C	985 °F
Aging Temperature	160 °C	320 °F
	177 °C	350 °F
Component Elements Properties	**Metric**	**English**
Aluminum, Al	95.8 - 98.6 %	95.8 - 98.6 %
Chromium, Cr	0.040 - 0.35 %	0.040 - 0.35 %
Copper, Cu	0.15 - 0.40 %	0.15 - 0.40 %
Iron, Fe	<= 0.70 %	<= 0.70 %
Magnesium, Mg	0.80 - 1.2 %	0.80 - 1.2 %
Manganese, Mn	<= 0.15 %	<= 0.15 %
Other, each	<= 0.050 %	<= 0.050 %
Other, total	<= 0.15 %	<= 0.15 %
Silicon, Si	0.40 - 0.80 %	0.40 - 0.80 %
Titanium, Ti	<= 0.15 %	<= 0.15 %
Zinc, Zn	<= 0.25 %	

ที่มา : http://www.matweb.com/

ภาคผนวก ข

รูปภาพการดำเนินงาน

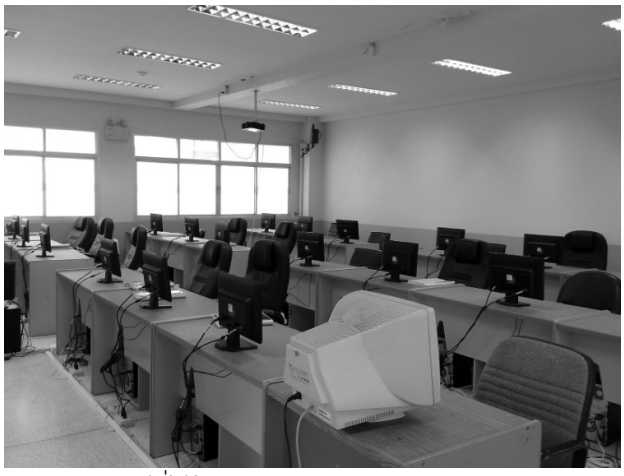
ภาพที่ ข.1 แสดงภาพห้องโลหะวิทยาและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ภาพที่ ข.2 แสดงภาพเครื่องขัดและเครื่องตัดชิ้นงานสำหรับงานทดสอบ

ภาพที่ ข.3 แสดงเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนลและการทดสอบ

ภาพที่ ข.4 ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทดลอง

ภาพที่ ข.5 แสดงกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอไมโครสโคป



ภาพที่ ข.6 แสดงห้องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณทางสถิติ

ประวัตินักวิจัย

อาจารย์ธรรม์ณชาติ วันแต่ง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ประวัติการศึกษา

- ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.)
  สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.)
  สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
- ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพ
  ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุมในประเทศไทย (กว.) ภาคีวิศวกร เลขที่ ภอ.23477 สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ สภาวิศวกร
  ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพครู (กค.) เลขที่ 53209000487381 คุรุสภา

งานในหน้าที่

- กรรมการสภาคณาจารย์และข้าราชการ (2554-ปัจจุบัน)
- กรรมการบริหารคณะฯ (2555-ปัจจุบัน)
- ประธานสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต (2555-ปัจจุบัน)
- คณะกรรมการพิจารณาทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภททั่วไป มหาวิทยาลัยฯ (2556-ปัจจุบัน)
- คณะกรรมการพิจารณาทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภทโครงงานนักศึกษา (2555-ปัจจุบัน)
- คณะกรรมการฝ่ายงานวิจัย/พี่เลี้ยงนักวิจัย คณะฯ (2555-ปัจจุบัน)

รายวิชาที่สอน

- กลศาสตร์ของวัสดุ
- ความแข็งแรงของวัสดุ
- วัสดุวิศวกรรม
- งานเครื่องมือกล
- เทคโนโลยีแม่พิมพ์ปั๊มโลหะ

งานวิจัย

- โครงการวิจัย เรื่อง การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ปั๊มโลหะเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตสินค้าของที่ระลึก สินค้าหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ กลุ่มสตรีก้าวหน้า ต.สักหลง อ.หล่มสัก จ.เพชรบูรณ์ (2557)
- โครงการวิจัย เรื่อง การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้วัสดุงานประดับยนต์สำหรับทำเสื้อเกราะกันกระสุนป้องกันภัยคุกคามระดับ 3A–3. (2556)
- ผู้ร่วมโครงการวิจัย เรื่อง การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อการบ่มเทียมโลหะผสมอลูมิเนียม เกรด 6061 โดยการทดลองแบบแฟกทอเรียล (2556)
- โครงการวิจัย เรื่อง เครื่องบรรจุดินใส่ถุงเพาะชำกล้ายางพารา (2554)
- โครงการวิจัย เรื่อง การศึกษาการใช้แผ่นคาร์บอน - เคฟล่าในงานประดับยนต์เพื่อใช้ทำเสื้อเกราะกันกระสุน ระดับ 2 (2553)

- โครงการวิจัย เรื่อง การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการการทำงานเป็นกลุ่มในการสร้างแม่พิมพ์โลหะให้สำเร็จ (2553)
- โครงการวิจัย เรื่อง การเพิ่มประสิทธิภาพความแข็งแรงของแผ่นเหล็กในเสื้อเกราะกันกระสุนโดยทำการเคลือบผิวฟิล์มแข็ง (2552)
- โครงการวิจัย เรื่อง การออกแบบและพัฒนาเครื่องคั่วข้าวใหม่ม้งแบบระบายความชื้นด้วยลมร้อนผสมกับกลิ่นกาแฟ (2552)

งานตีพิมพ์และการเผยแพร่ผลงานวิจัย

- การออกแบบและสร้างเครื่องทำขนมผิง. ใน: เอกสารการประชุมวิชาการพะเยาวิจัย ครั้งที่ 3 วันที่ 23–24 มกราคม 2557; กองบริหารงานวิจัยและประกันคุณภาพการศึกษา มหาวิทยาลัยพะเยา. พะเยา: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยพะเยา; 2557.
- การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการใช้วัสดุในงานประดับยนต์สำหรับทำแผ่นเกราะกันกระสุนระดับ 2 โดยออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^2 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%. วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร 2556; 21(1): 1-8. (2556)
- การออกแบบและสร้างเครื่องกรอกดินใส่ถุงเพาะชำกล้ายางพารา. วารสารราชภัฏเพชรบูรณ์สาร 2556; 15(2): 30-37. (2556)
- มรภ.เพชรบูรณ์ทำเสื้อเกราะ. ไทยรัฐ 3 กันยายน 2556; หน้า 15. (2556)
- เสื้อเกราะกันกระสุนอินทนิล. ในงาน: มหกรรมการนำเสนอผลงานวิจัยแห่งชาติ 2556; สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.). ศูนย์ประชุมบางกอกคอนเวนชันเซ็นเตอร์ เซ็นทรัลเวิลด์ กรุงเทพฯ: 2556. (2556)
- เครื่องกรอกดินใส่ถุงเพาะชำกล้ายางพารา. ในงาน: การนำเสนอผลงานวิจัยแห่งชาติ 2555; สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.). ศูนย์ประชุมบางกอกคอนเวนชันเซ็นเตอร์ เซ็นทรัลเวิลด์ กรุงเทพฯ: 2555. (2555)
- การศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุฟิล์มแข็งเคลือบผิวในการเพิ่มความแข็งแรงของแผ่นเหล็กในเสื้อเกราะกันกระสุน. ราชภัฏเพชรบูรณ์สาร ปีที่ 13 ฉบับที่ 1. หน้า 40 – 45. (2554)
- การออกแบบและพัฒนาเครื่องคั่วข้าวใหม่ม้งแบบระบายความชื้นด้วยลมร้อนผสมกับกลิ่นกาแฟ, การรวบรวมผลงานโครงงานที่ได้รับทุนโครงการ IRPUS สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ประจำปี 2552
- อิทธิพลของฟิล์มแข็งเคลือบผิวแม่พิมพ์ของกรรมวิธีดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม, ใน: เอกสารการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, 2003

เกียรติคุณหรือรางวัลต่างๆ

- <u>รางวัลเชิดชูเกียรติ นักวิจัยดีเด่น</u> มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ประจำปี พ.ศ. 2556
- <u>นักวิจัยดีเด่น</u> ด้านการตีพิมพ์และเผยแพร่ผลงานวิจัย คณะเทคโนโลยีการเกษตรฯ ประจำปี พ.ศ. 2556
- <u>เกียรติบัตร</u> นักวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ระดับชาติ/นานาชาติ ในงานราชภัฏวิชาการ 2556 มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

ประวัตินักวิจัย

อาจารย์กนกพร บุญจูบุตร อาจารย์ประจำโปรแกรมวิชาการจัดการอุตสาหกรรม
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
E-mail : knp_stw@hotmail.com

ประวัติการศึกษา

- ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.)
  สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.)
  สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไม้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รายวิชาที่สอน

- การวิจัยการดำเนินงาน
- การจัดการนวัตกรรมเทคโนโลยี

งานวิจัย

- กนกพร บุญจูบุตร และกิตติศักดิ์ มีพา. ใน : การประเมินความเสี่ยงด้วยการยศาสตร์ของพนักงานทำดอกไม้กระดาษ. เอกสารการประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ 2556 (IE-Network 2013) 16 - 18 ตุลาคม 2556 ; โรงแรมเอวัน เดอะ รอยัล ครูซ พัทยา จ.ชลบุรี.
- Jongkol, P., and Sangtawan, K. (2008). An Investigation of Shoulder and Back Pain in Mail Sorting Operators. The 9th Southeast Asian Ergonomics Society Conference 2008 (SAES 2008). 22 - 24 October, Grand Mercure Fortune Bangkok, Thailand.
- กนกพร แสงตะวัน และพรศิริ จงกล. (2552). การออกแบบสถานีงานคัดแยกจดหมายโดยหลักการยศาสตร์. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ 2552. 21-22 ตุลาคม. โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชา ออร์คิด จังหวัดขอนแก่น.
- จารุพงษ์ บรรเทา กนกพร แสงตะวัน และคณะ. (2552).การจัดสรรบุคลากรจุดจ่ายยาด้วยการประยุกต์ใช้การจำลองสถานการณ์กรณีโรงพยาบาลชุมชน.การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ 2552. 21-22 ตุลาคม. โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชา ออร์คิด จังหวัดขอนแก่น.
- การปรับปรุงสถานีงานคัดแยกจดหมายโดยหลักการยศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2554