



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของพิวเตอร์ไร้สารตะกั่วกับส่วนผสม
และโครงสร้างจุลภาค

A study on relationship between hardness of lead-free pewter and composition
and microstructure

นายกรรณชัย กัลยาศิริ

RCH
ก141ก
2556

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 137698
รับเดือน.ปี 17 ก.ค. 2558

b. 12697777
i.

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของพิวเตอร์ไร้สารตะกั่วกับส่วนผสม
และโครงสร้างจุลภาค

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 80,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี

ตั้งแต่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2555 ถึง 30 กันยายน พ.ศ. 2556

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

นายกรรณชัย กัลยาศิริ

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของพิวเตอร์กับส่วนผสมของพิวเตอร์ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของพิวเตอร์กับโครงสร้างจุลภาคของพิวเตอร์ รวมทั้งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมของพิวเตอร์กับโครงสร้างจุลภาคของพิวเตอร์ โดยทำการศึกษาพิวเตอร์แบบไร้สารตะกั่วที่มีส่วนผสมระหว่างดีบุก ทองแดง และพลวง เท่านั้น โดยจะทำการศึกษาในช่วงความเข้มข้นของดีบุกระหว่าง 89-100% โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของทองแดงระหว่าง 0-3% โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นของพลวงระหว่าง 0-8% โดยน้ำหนัก ในการทดสอบความแข็งของพิวเตอร์ทำโดยใช้วิธี Vickers microhardness ผลการศึกษาพบว่าส่วนผสมของพิวเตอร์มีอิทธิพลต่อโครงสร้างจุลภาคของพิวเตอร์ ซึ่งส่งผลต่อไปยังความแข็งของพิวเตอร์ โดยความแข็งของพิวเตอร์แปรผันโดยตรงกับปริมาณของทองแดงและพลวง โดยการเติมทองแดงและพลวงในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้ความแข็งของพิวเตอร์เพิ่มขึ้น และการเติมทองแดงและพลวงพร้อมกันจะทำให้ความแข็งของพิวเตอร์เพิ่มขึ้นมากกว่าการเติมธาตุใดธาตุหนึ่งเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นสามารถใช้ทำนายค่าความแข็งของพิวเตอร์ได้เป็นอย่างดี โดยมีค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดในการทำนายเท่ากับ 1.94%

คำสำคัญ : พิวเตอร์แบบไร้สารตะกั่ว ความแข็ง โครงสร้างจุลภาค

Research Title: A study on relationship between hardness of lead-free pewter and composition and microstructure

Researcher: Kannachai Kanlayasiri

Faculty: Engineering

Department: Industrial Engineering

ABSTRACT

This research project was aimed to develop a mathematical model to explain the relationship between hardness of pewter and its composition, and to relate hardness of pewter to its microstructure. In addition, effect of composition on microstructure of pewter was studied in this project. Lead-free pewter composed of tin, copper, and antimony with a concentration of 89-100 wt%, 0-3 wt%, and 0-8 wt%, respectively, was investigated in this research. Vickers microhardness was utilized to measure hardness of specimens. Results showed that composition of pewter affects to its microstructure and hardness. Hardness of pewter was dependent on concentration of copper and antimony. As either concentration of copper or antimony was increased, hardness of lead-free pewter was increased. The addition of both copper and antimony at the same time increased hardness of pewter at a higher degree than the hardness when only one element was added. In addition, mathematical model developed in this study could be used to predict hardness of pewter with high accuracy. The average prediction error was only 1.94%.

Keywords : Lead-free pewter, Hardness, Microstructure

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
จากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556.

กรรณชัย กัลยาศิริ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|--|-----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ | IV |
| สารบัญตาราง | VI |
| สารบัญภาพ | VII |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย | 3 |
| 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย | 3 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 4 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 5 |
| 2.1 คุณสมบัติของธาตุที่เป็นส่วนผสมของพิวเตอร์..... | 5 |
| 2.2 โลหะผสมพิวเตอร์..... | 9 |
| 2.3 แผนภูมิเฟส..... | 10 |
| 2.4 การออกแบบการทดลอง..... | 30 |
| 2.5 การทดสอบความแข็ง..... | 35 |
| 2.6 Regression | 39 |
| 2.7 ANOVA | 45 |
| 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 49 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย | 51 |
| 3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ..... | 51 |
| 3.2 การออกแบบการทดลองด้วย Design Expert Software | 51 |
| 3.3 ชิ้นงานทดสอบ | 52 |
| 3.4 การทดสอบความแข็งและโครงสร้างจุลภาค | 52 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 4 ผลการวิจัย | 54 |
| 4.1 ผลการทดสอบความแข็ง | 54 |
| 4.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและส่วนผสม | 54 |
| 4.3 โครงสร้างจุลภาค..... | 67 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | 70 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย..... | 70 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 70 |
| บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย | 71 |
| 6.1 ผลผลิตที่คาดว่าจะได้รับของโครงการวิจัย..... | 71 |
| 6.2 ผลผลิตที่อยู่ระหว่างการดำเนินการ..... | 71 |
| เอกสารอ้างอิง | 72 |
| ภาคผนวก | 75 |
| ภาคผนวก ก | 76 |
| ประวัตินักวิจัย | 78 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ตัวอย่างการสร้างตัวแปรหุ่นของตัวแปรสถานภาพสมรส | 41 |
| 2.2 ตัวอย่างการสร้างตัวแปรหุ่นของตัวแปรระดับการศึกษา | 42 |
| 2.3 สูตรความแปรปรวนทางเดียว | 47 |
| 2.4 สูตรสูตรความแปรปรวนทางเดียว | 48 |
| 3.1 คุณสมบัติของดีบุก (Sn) ทองแดง (Cu) และพลวง (Sb)..... | 51 |
| 3.2 จุดการทดลองของแต่ละการทดลอง | 52 |
| 4.1 ผลการทดสอบความแข็งด้วยวิธี Vickers Micro Hardness ของชิ้นงานทดสอบ | 54 |
| 4.2 ผลการวิเคราะห์ Sequential Model Sum of Squares ของความแข็ง (HV) | 55 |
| 4.3 ผลการวิเคราะห์ Lack of Fit ของ Hardness | 56 |
| 4.4 ผลการวิเคราะห์ Model Summary Statistics ของ Hardness | 57 |
| 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของ Hardness | 58 |
| 4.6 ค่าทางสถิติของสมการทำนายผลของ Hardness | 58 |
| 4.7 การวิเคราะห์เพื่อหาสมการทำนายค่า Hardness | 59 |
| 4.8 ข้อมูลทางสถิติที่ได้จาก Diagnostics (Hardness) | 65 |
| 4.9 ข้อมูลทางสถิติที่แสดงขอบเขตของแต่ละจุดในการทดลอง..... | 66 |
| 4.10 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนายและการทดสอบความแข็ง | 67 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 1.1 ผลิตภัณฑ์ต่างๆจากพิวเตอร์..... | 1 |
| 2.1 ลักษณะของดีบุก (Sn)..... | 5 |
| 2.2 ลักษณะของทองแดง (Cu)..... | 7 |
| 2.3 ลักษณะของพลวง (Sb)..... | 8 |
| 2.4 กราฟการแข็งตัวและการเปลี่ยนแปลงเฟสของเหล็กบริสุทธิ์..... | 13 |
| 2.5 สารละลายของแข็งชนิดแทนที่..... | 14 |
| 2.6 สารละลายของแข็งชนิดแทรกตัว..... | 14 |
| 2.7 เส้นของแข็งและเส้นของเหลว..... | 15 |
| 2.8 แผนภาพสมดุลของ MgO กับ NiO..... | 16 |
| 2.9 กลไกการแพร่แบบแทนที่ช่องว่าง..... | 16 |
| 2.10 กลไกการแพร่แบบแทรกตัวระหว่างอะตอม..... | 16 |
| 2.11 กลไกการแพร่แบบสลับกันสองอะตอม..... | 17 |
| 2.12 กลไกการแพร่แบบสลับกันสี่อะตอม..... | 17 |
| 2.13 แผนภาพสมดุลของ Cd-Bi..... | 18 |
| 2.14 ลักษณะเฟสบนแผนภาพสมดุลระบบยูเทคติก..... | 18 |
| 2.15 โครงสร้างยูเทคติก..... | 19 |
| 2.16 แผนภาพสมดุลเฟสระบบผสมระหว่างระบบสารละลายของแข็งกับระบบยูเทคติก..... | 19 |
| 2.17 แผนภาพสมดุลเฟสระบบเพอริเทคติก..... | 20 |
| 2.18 ลักษณะเฟสบนแผนภาพสมดุล..... | 21 |
| 2.19 แผนภาพสมดุลเฟสของระบบสารประกอบ Mg-Si..... | 21 |
| 2.20 แผนภาพสมดุลของสารประกอบ โลหะที่มีระบบเพอริเทคติกและระบบยูเทคติกซ้อนกันอยู่..... | 22 |
| 2.21 แผนภาพสมดุลระบบโมโนเทคติก..... | 23 |
| 2.22 แสดงลักษณะเฟสบนแผนภาพสมดุลระบบโมโนเทคติก..... | 24 |
| 2.23 แผนภาพสมดุลเฟสทองแดง - ตะกั่ว..... | 25 |
| 2.24 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุกและทองแดง..... | 25 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.25 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุกและพลวง | 26 |
| 2.26 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมทองแดงและพลวง | 26 |
| 2.27 แสดงแผนภาพสมดุลเฟสของระบบ 3 ธาตุ..... | 27 |
| 2.28 แผนภาพสมดุลที่ตัดในแนวระดับได้ Concentration Triangle..... | 28 |
| 2.29 แผนภาพสมดุลเฟสระบบ 3 ธาตุของระบบสารละลายของแข็ง..... | 29 |
| 2.30 แผนภาพระบบยูเทคติก..... | 29 |
| 2.31 แผนภาพระบบสารละลายของแข็งกับยูเทคติก | 30 |
| 2.32 ความสัมพันธ์ของส่วนผสมในแผนการทดลองที่มีส่วนผสม 3 ชนิด..... | 33 |
| 2.33 จุดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง | 34 |
| 2.34 Vickers Micro Hardness..... | 39 |
| 2.35 Linear Regression..... | 40 |
| 3.1 เครื่องทดสอบความแข็ง..... | 53 |
| 3.2 ลักษณะของรอยกด | 53 |
| 4.1 การวิเคราะห์ Normal Plot of Residuals ของสมการ Special Quartic (Hardness) | 59 |
| 4.2 การวิเคราะห์ Residuals vs. Predicted ของสมการ Special Quartic (Hardness)..... | 60 |
| 4.3 การวิเคราะห์ Residuals vs. Run ของสมการ Special Quartic (Hardness)..... | 60 |
| 4.4 การวิเคราะห์ Predicted vs. Actual ของสมการ Special Quartic (Hardness) | 61 |
| 4.5 การวิเคราะห์ Box-Cox Plot for Power Transforms ของสมการ Special Quartic (Hardness) | 61 |
| 4.6 การวิเคราะห์ Residuals vs. Sn ของสมการ Special Quartic (Hardness) | 62 |
| 4.7 การวิเคราะห์ Residuals vs. Cu ของสมการ Special Quartic (Hardness) | 62 |
| 4.8 การวิเคราะห์ Residuals vs. Sb ของสมการ Special Quartic (Hardness) | 63 |
| 4.9 การวิเคราะห์ Externally Studentized Residuals ของสมการ Special Quartic (Hardness)..... | 63 |
| 4.10 การวิเคราะห์ Leverage vs. Run ของสมการ Special Quartic (Hardness)..... | 64 |
| 4.11 การวิเคราะห์ Cook's Distance ของสมการ Special Quartic (Hardness)..... | 64 |
| 4.12 โครงสร้างจุลภาคของพิวเตอร์ชนิด 100Sn | 67 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.13 โครงสร้างจุลภาคของพิวเตอร์ชนิด 97Sn-3Cu | 68 |
| 4.14 โครงสร้างจุลภาคของพิวเตอร์ชนิด 92Sn-8Sb..... | 68 |
| 4.15 โครงสร้างจุลภาคของพิวเตอร์ชนิด 89Sn-3Cu-8Sb..... | 69 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พิวเตอร์ (Pewters) เป็นโลหะผสม (Alloys) ที่มีดีบุก (Sn) เป็นส่วนผสมหลัก และใช้ธาตุอื่นๆ เช่น ทองแดง (Cu) พลวง (Sb) บิสมัท (Bi) และตะกั่ว (Pb) เป็นธาตุเจือ (Alloying elements) พิวเตอร์เป็นโลหะที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆมาเป็นเวลานาน เช่น เครื่องประดับ เครื่องใช้ และสินค้าที่ระลึก เนื่องจากเป็นโลหะที่มีความสวยงามเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว [1, 2] ภาพที่ 1.1 แสดงผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ทำมาจากพิวเตอร์ ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพิวเตอร์ถือว่าเป็นสินค้าที่สำคัญในการส่งเสริมการท่องเที่ยวสำหรับประเทศไทย รวมทั้งประเทศต่างๆในกลุ่มอาเซียน และเป็นสินค้าของประเทศไทยที่ส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศอีกด้วย โดยมีคู่แข่งที่สำคัญในตลาดโลกในการส่งออกพิวเตอร์ คือ ประเทศมาเลเซีย และประเทศบราซิล [3] มูลค่าการส่งออกผลิตภัณฑ์จากพิวเตอร์ในแต่ละปีของประเทศไทยขยายตัวอย่างต่อเนื่อง โดยมีอัตราการขยายตัวร้อยละ 10-20 ซึ่งมูลค่าการส่งออกรวมในปี 2554 คาดว่าจะมีมากกว่า 1,200 ล้านบาท [4] สำหรับในประเทศไทยพบว่ามีการใช้ดีบุกสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตพิวเตอร์ไม่น้อยกว่า 500 ตันต่อปี และมีแนวโน้มมากขึ้นเรื่อยๆตามการขยายตัวของอุตสาหกรรมการท่องเที่ยว [5]



ภาพที่ 1.1 ผลิตภัณฑ์ต่างๆจากพิวเตอร์

เนื่องจากธาตุเจือชนิดหนึ่งที่นิยมเติมลงในพิวเตอร์ คือ ตะกั่ว ซึ่งใช้เพื่อลดจุดหลอมเหลวของพิวเตอร์ [1] แต่เป็นที่ทราบกันดีว่า ตะกั่วเป็นธาตุที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม และเนื่องจากรูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพิวเตอร์ คือ ภาชนะบรรจุอาหาร ซึ่งมีรายงานว่าพบการปนเปื้อนของตะกั่วลงไป ในอาหารจากภาชนะบรรจุอาหารที่ทำมาจากพิวเตอร์ที่มีตะกั่วเป็นธาตุเจือ นอกจากนี้ตะกั่วที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ จากพิวเตอร์เมื่อถูกทิ้งเป็นขยะสามารถถูกน้ำฝนชะล้างลงไปในดินและก่อให้เกิดพิษต่อ สิ่งแวดล้อม [6, 7] ตามมาตรฐานและข้อบังคับของสหรัฐอเมริกา สหราชอาณาจักร และสหภาพยุโรปจึงไม่ อนุญาตให้ผสมตะกั่วเป็นธาตุเจือในพิวเตอร์ โดยอนุญาตให้ผสมได้เฉพาะทองแดงและพลวงเป็นธาตุเจือ เท่านั้น [8-10] และจากข้อบังคับทางสิ่งแวดล้อมของประเทศต่างๆ ทำให้ผู้ผลิตสินค้าจากพิวเตอร์ไม่สามารถ ใช้ตะกั่วเป็นธาตุเจือในพิวเตอร์ได้อีกต่อไป และจำเป็นต้องปรับกระบวนการผลิตให้เหมาะสมกับส่วนผสม แบบใหม่ของพิวเตอร์ เพื่อที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์ของตนเองสามารถส่งไปจำหน่ายในต่างประเทศได้ รวมทั้งทำ ให้ผลิตภัณฑ์ของตนเองมีภาพลักษณ์ที่ดีในความรู้สึกของลูกค้าหรือนักท่องเที่ยว [3] สำหรับในประเทศไทย การผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆจากพิวเตอร์มักเป็นการผลิตในอุตสาหกรรมขนาดเล็กถึงขนาดกลาง (SME) ซึ่งยัง ขาดเทคโนโลยีการผลิต และต้องพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของข้อบังคับ ทางสิ่งแวดล้อม [4] ดังนั้นการวิจัยเกี่ยวกับการผลิตพิวเตอร์ไร้สารตะกั่ว (Lead-free pewters) จึงมีความ ความจำเป็นต่อการพัฒนาขีดความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์จากพิวเตอร์ ของประเทศไทย

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆจากพิวเตอร์ คุณสมบัติที่สำคัญของพิวเตอร์ในการขึ้นรูป คือ ความแข็ง (Hardness) [1, 2] เนื่องจากเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการกำหนดความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) ของพิวเตอร์หรือโลหะชนิดต่างๆ โดยทั่วไปแล้วพิวเตอร์ที่มีความแข็งสูงจะขึ้นรูปได้ยากและมีโอกาสเกิด การแตกร้าวได้ง่ายกว่าพิวเตอร์ที่มีความแข็งต่ำ แต่ในขณะเดียวกันพิวเตอร์ที่มีความแข็งสูงจะสามารถทนต่อ การสึกหรอ หรือทนต่อการขีดขูดได้ดีกว่าพิวเตอร์ที่มีความแข็งต่ำ [11] ทำให้มีความทนทานในการใช้งาน ดีกว่า ซึ่งสำหรับวัสดุในกลุ่มโลหะ ความแข็งเป็นคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับส่วนผสมและโครงสร้างจุลภาคของ โลหะ [12-14] ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับส่วนผสมและ โครงสร้างจุลภาคของพิวเตอร์แบบไร้สารตะกั่ว โดยส่วนผสมของพิวเตอร์ที่จะทำการศึกษาประกอบด้วย ดีบุก ทองแดง และพลวง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของพิวเตอร์กับส่วนผสม ของพิวเตอร์
- 2) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของพิวเตอร์กับโครงสร้างจุลภาคของพิวเตอร์
- 3) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมของพิวเตอร์กับโครงสร้างจุลภาคของพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในโครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาพิวเตอร์แบบไร้สารตะกั่วที่มีส่วนผสมระหว่างดีบุก ทองแดง และพลวง เท่านั้น โดยจะทำการศึกษาในช่วงความเข้มข้นของดีบุกระหว่าง 89-100% โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของทองแดงระหว่าง 0-3% โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นของพลวงระหว่าง 0-8% โดยน้ำหนัก ซึ่งครอบคลุมส่วนผสมทั้งหมดของพิวเตอร์ไร้สารตะกั่วตามข้อกำหนด ASTM B560-00(2010) Standard Specification for Modern Pewter Alloys [10]

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

สำหรับในโครงการวิจัยนี้ ขั้นตอนแรกของการศึกษาจะใช้การทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมและโครงสร้างจุลภาคของพิวเตอร์แบบไร้สารตะกั่วกับความแข็ง โดยใช้วิธีการออกแบบของผสมช่วยในการออกแบบการทดลอง ซึ่งส่วนผสมของพิวเตอร์ที่จะทำการศึกษาประกอบด้วยดีบุก ทองแดง และพลวง และจะทำการศึกษาในช่วงความเข้มข้นของดีบุกระหว่าง 89-100% โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของทองแดงระหว่าง 0-3% โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นของพลวงระหว่าง 0-8% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นช่วงส่วนผสมที่ครอบคลุมส่วนผสมทั้งหมดของพิวเตอร์ตามข้อกำหนด ASTM B560-00(2010) Standard Specification for Modern Pewter Alloys [10] โดยจะทำการหลอมดีบุก ทองแดง และพลวง เข้าด้วยกันตามสูตรส่วนผสมที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการออกแบบของผสม และตรวจสอบปริมาณของส่วนผสมแต่ละชนิดโดยใช้ Spark optical emission spectrometer จากนั้นจึงนำพิวเตอร์ที่มีส่วนผสมต่างๆไปตรวจสอบคุณสมบัติที่ต้องการศึกษา การทดสอบความแข็งของพิวเตอร์จะทำการทดสอบโดยวิธี Vickers microhardness ส่วนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของพิวเตอร์จะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM), Energy dispersive spectroscopy (EDS) และ X-ray diffractometer (XRD) ช่วยในการตรวจสอบ

สำหรับในขั้นตอนต่อไปของโครงการวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบความแข็งมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแผนภาพ Contour plot เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับส่วนผสมของพิวเตอร์ และทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นด้วยการนำผลการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง (ในส่วนผสมใหม่ที่ไม่เคยใช้ในการสร้างแบบจำลอง แต่เป็นส่วนผสมที่ยังอยู่ในช่วงของส่วนผสมที่ได้กำหนดไว้) ทราบความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสม และสี กับความแข็งของโลหะผสมพิวเตอร์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลการวิจัยที่ได้คาดว่าจะสามารถตีพิมพ์เผยแพร่เป็นบทความฉบับเต็ม (Full paper) ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่อยู่ในระบบฐานข้อมูลของ ISI หรือ SJR ได้ รวมทั้งผลการวิจัยที่ได้จะเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญทางด้านการผลิตพิวเตอร์แบบไร้สารตะกั่วและโลหะวิทยาของพิวเตอร์แบบไร้สารตะกั่ว และเป็นองค์ความรู้ที่ภาคอุตสาหกรรมสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติของธาตุที่เป็นส่วนผสมของพิวเตอร์

พิวเตอร์เป็นโลหะผสม (Alloy) ที่มี ดีบุก (Sn) เป็นส่วนประกอบพื้นฐาน และมีการเติมธาตุอื่นๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการทำงาน เช่น ทองแดง (Cu) และพลวง (Sb)

2.1.1 ดีบุก (Tin)

2.1.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

| | |
|---------------|--|
| สัญลักษณ์ธาตุ | Sn (มาจากคำในภาษาละตินว่า Stannum) |
| เลขอะตอม | 50 |
| น้ำหนักอะตอม | 118.7 amu |
| จุดหลอมเหลว | 231.97 องศาเซลเซียส (505.08 K) |
| จุดเดือด | 2270 องศาเซลเซียส (2875 K) |
| ความหนาแน่น | 7.31 g/cm ³ ที่ 20 องศาเซลเซียส |
| โครงสร้างผลึก | Tetragonal |
| ความแข็ง | 7 – 9 kg/mm ² |
| สถานะ | ของแข็ง ณ อุณหภูมิห้อง |
| อนุกรมเคมี | โลหะหลังทรานซิชัน |
| สี | เทาเงิน มีความแวววาว เป็นมัน |



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของดีบุก (Sn)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.2 การใช้ประโยชน์

1. ใช้ทำแผ่นดีบุก(tinplate) ซึ่งเป็นแผ่นเหล็กกล้าบาง มีปริมาณคาร์บอนต่ำ เคลือบด้วยผิวดีบุก โดยกระบวนการ Electro deposition ปริมาณกึ่งหนึ่งของดีบุกที่ผลิตได้นำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตแผ่นดีบุกนี้ แผ่นดีบุกใช้ทำกระป๋องและภาชนะต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระป๋องและภาชนะบรรจุอาหาร
2. ใช้ทำโลหะเชื่อมกับโลหะอื่น เช่น เชื่อมกับตะกั่วเกิดโลหะเชื่อมที่นิยมเรียกว่า soft solders เชื่อมกับทองแดงเรียกว่า tin-bronzes เชื่อมกับพลวงและทองแดงใช้ทำ Pewterware เป็นต้น
3. ใช้เคลือบผิวโลหะอื่นๆ
4. ใช้เตรียมสารประกอบต่างๆของดีบุก

2.1.1.3 ความเป็นพิษของดีบุก

ดีบุกเป็นธาตุที่พบได้ตามธรรมชาติ แต่จะพบดีบุกในดินและอาหารต่างๆในปริมาณน้อย ดีบุกใช้ในการผลิตกระป๋อง ตะกั่วขัดสี เหล็ก ท่อทองแดง ตัวดีบุกเองไม่มีพิษร้ายแรงต่อร่างกายมนุษย์แต่สารอินทรีย์ของดีบุกจะมีพิษร้ายแรง เช่น DIMETHYL TIN, DIALKYL TIN AND TRIPHENYL TIN

2.1.2 ทองแดง (Copper)

2.1.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

| | |
|---------------|--|
| สัญลักษณ์ธาตุ | Cu |
| เลขอะตอม | 29 |
| น้ำหนักอะตอม | 63.546 amu |
| จุดหลอมเหลว | 1084 องศาเซลเซียส (1357.77 K) |
| จุดเดือด | 3562 องศาเซลเซียส (2835 K) |
| ความหนาแน่น | 8.92 g/cm ³ ที่ 20 องศาเซลเซียส |
| โครงสร้างผลึก | Isometric : Cubic face centered (FCC) |
| ความแข็ง (HV) | 77 – 99 kg/mm ² |
| สถานะ | ของแข็ง ณ อุณหภูมิห้อง |
| อนุกรมเคมี | โลหะทรานซิชัน |
| สี | สีน้ำตาล |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.2 ลักษณะของทองแดง (Cu)

2.1.2.2 การใช้ประโยชน์

1. มีความแข็งแรงในช่วงที่ทอใช้งานได้ ทั้งยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลได้หลายระดับ(ขึ้นกับชนิดของทองแดง และกรรมวิธีการผลิต)
2. ความเหนียวของทองแดงสูงมาก สามารถขึ้นรูปโดยไม่เสี่ยงต่อการแตกหัก
3. เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีมาก
4. เป็นตัวนำความร้อนที่ดีมาก
5. กลึงไสขึ้นรูปได้ง่าย เมื่อผสมธาตุบางตัวเข้าไป
6. ต้านทานความล้าได้ดีพอสมควร
7. ไม่เป็นสารแม่เหล็ก
8. ทนทานต่อการกัดกร่อน โดยเฉพาะเมื่อใช้กับกรดและน้ำทะเล
9. ทนทานต่อการสึกกร่อนได้ดีพอสมควร

โดยทั่วไปเราเรียกว่า ทองแดงบริสุทธิ์ เมื่อทองแดงมีธาตุหรือสิ่งแปลกปลอมอื่นๆปนอยู่ไม่เกิน 0.5% โดยน้ำหนัก ส่วนทองแดงผสม คือ มีทองแดงผสมอยู่ระหว่าง 40-99% โดยน้ำหนัก

2.1.2.3 ความเป็นพิษของทองแดง

การเกิดพิษขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับเข้าไป ช่องทางที่ได้รับและสภาพร่างกายของแต่ละบุคคล ทองแดงถูกดูดซึมได้ดีในกระเพาะอาหารและลำไส้ส่วนบน โดยซึมผ่านเข้าผนังลำไส้ไปที่ตับ จากนั้นจะรวมตัวกับน้ำดี แล้วถูกหลั่งออกมาบริเวณลำไส้ ขับออกไปกับอุจจาระ หรืออาจถูกดูดกลับเข้าสู่ร่างกายได้ 30% โดยไปสะสมที่กระดูก กล้ามเนื้อ ตับ สมอง การสะสมจะมากที่ตับและสมอง

เมื่อได้รับทองแดงในปริมาณมากจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกาย คือ คลื่นเหียนอาเจียน เกิดการอักเสบในช่องท้องและกล้ามเนื้อ ท้องเสีย การทำงานของหัวใจผิดปกติ ภาวะระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายและอาจส่งผลให้เกิดความผิดปกติทางจิต ส่วนอาการเรื้อรังจากการได้รับติดต่อกันเป็นเวลานาน และดับทำหน้าที่ยับยั้ง ไม่สามารถขับทองแดงออกจากร่างกายได้ตามปกติ จึงทำให้มีการสะสมอยู่ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่างกายเป็นปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดความผิดปกติของร่างกาย หรือกลุ่มอาการ Wilson' Diseases ก็คือร่างกายสั้นเทาอยู่ตลอดเวลา กล้ามเนื้อแข็งเกร็ง มีน้ำมูกน้ำลายไหล ความคุมการพูดลำบาก

ส่วนมากพบทั้งในรูปไอ และเกลือของทองแดง เนื่องจากการหลอมโลหะทองแดง ทองเหลือง การเชื่อมและบัดกรีโลหะโดยใช้โลหะผสมของทองแดง ซึ่งโทษ ทำให้เกิดการระคายเคืองและอักเสบที่ตา ระบบหายใจ ระบบ ทางเดินอาหารและประสาทสัมผัสเสีย ถ้าร่างกายได้รับไอทองแดงมาก ๆ จะทำให้เกิด การคลื่นไส้ อาเจียน เป็น ไข้ (metal fume fever) อาจทำให้ผิวหนังและผมเปลี่ยน สีได้ ถ้าได้รับในปริมาณมาก ทำให้เนื้อเยื่อจมูกอักเสบ และเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดโรคโลหิตจาง

2.1.3 พลวง (Antimony)

2.1.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

| | |
|---------------|---|
| สัญลักษณ์ธาตุ | Sb (มาจากคำในภาษาละตินว่า Stibinum) |
| เลขอะตอม | 51 |
| น้ำหนักอะตอม | 127.76 amu |
| จุดหลอมเหลว | 630.63 องศาเซลเซียส (903.78 K) |
| จุดเดือด | 1587 องศาเซลเซียส (1860 K) |
| ความหนาแน่น | 6.697 g/cm ³ ที่ 20 องศาเซลเซียส |
| โครงสร้างผลึก | Rhombohedral หรือ Trigonal |
| ความแข็ง (HV) | 50 – 69 kg/mm ² |
| สถานะ | ของแข็ง ณ อุณหภูมิห้อง |
| อนุกรมเคมี | กึ่งโลหะ |
| สี | พลวงที่เสถียรจะเป็น โลหะสีฟ้าและสโลหะที่ไม่เสถียรจะมีสีเหลืองหรือสีดำ |



ภาพที่ 2.3 ลักษณะของพลวง (Sb)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.2 การใช้ประโยชน์

1. พลวงผสมตะกั่วทำแผ่นธาตุแบตเตอรี่รถยนต์
2. ผสมตะกั่วและดีบุกในการทำตะกั่วตัวพิมพ์
3. ใช้ในการเป็นส่วนประกอบของกระสุนปืนใช้ในอุตสาหกรรมไม้ขีดไฟทาข้างกล่องไม้ขีด
4. อุตสาหกรรมทำยางพีวีซีหุ้มสายไฟฟ้า และทำผ้าทนไฟ วัสดุทนไฟ เล็กกันไฟ และในอุตสาหกรรมเครื่องเคลือบเป็นต้น

2.1.3.3 ความเป็นพิษของพลวง

โทษแร่พลวงและโลหะพลวงทุกชนิดเป็นพิษ มีผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์เช่นเดียวกับ สารหนู กระตุ้นประสาททั้งภายในและภายนอกร่างกาย มีผลกระทบต่อหัวใจ การหายใจและระบบประสาท

2.2 โลหะผสมพิวเตอร์ (Pewter)

เดิมเป็นชื่อเรียกโลหะผสมดีบุกและตะกั่ว ซึ่งใช้ทำภาชนะและเครื่องประดับต่างๆ มีประวัติการนำมาใช้ประโยชน์เป็นเวลายาวนาน โดยเริ่มพบพิวเตอร์อยู่ในผ้าพันศพมัมมี่ของอียิปต์โบราณ การผลิตพิวเตอร์ในลักษณะ อุตสาหกรรม คาดว่าเริ่มมีมาตั้งแต่สมัยโรมันและแพร่หลายไปในหลายประเทศของยุโรป โดยผลิตเป็นชุดเครื่องใช้ในบ้าน สำหรับชนชั้นกลาง ในขณะที่พวกขุนนางและชนชั้นสูงอื่นๆ นิยมใช้เครื่องเงินเป็นหลัก พิวเตอร์ในสมัยโบราณจะมีดีบุกเป็นส่วนประกอบหลักถึง 70% และมีตะกั่วเพียง 30% นอกจากนี้ยังมีเหล็กและแร่ธาตุอื่นๆ เจือปนอยู่บ้างเล็กน้อย ในสมัยศตวรรษที่ 16 ใช้ส่วนประกอบของดีบุกสูงถึง 90% และพิวเตอร์ของอังกฤษซึ่งมีความแข็งแรงมาก จะมีส่วนประกอบของดีบุก 91% และพลวง 9% เป็นต้น เหตุที่ไม่ใช้ดีบุกล้วนๆ เนื่องจากดีบุกขาดคุณสมบัติบางประการ จึงจำเป็นต้องผสมโลหะอื่นๆ ลงไปด้วยเพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการนำมาใช้ประโยชน์ ต่อมามีการใช้โลหะผสมที่มีตะกั่วและพลวงมากขึ้นในการทำพิวเตอร์และมีส่วนประกอบของดีบุกน้อยลง การผสมพลวงลงไปจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและทนต่อการกัดได้ดี นอกจากนี้ยังมีการผสมทองแดง และบิสมัทเพื่อให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และขึ้นรูปประดิษฐ์ได้ง่าย เมื่ออัตราส่วนของดีบุกลดลงน้อยกว่า 65% โลหะผสมนี้จะไม่เหมาะสำหรับการทำภาชนะเพื่อใช้ในการบริโภค เนื่องจากจะมีความเป็นพิษของสารตะกั่วและพลวง

2.2.1 คุณสมบัติทั่วไป

| | |
|--------------|--|
| มาตรฐาน ASTM | B560-94 |
| ส่วนประกอบ | ดีบุก (Sn) ทองแดง (Cu) พลวง (Sb) |
| จุดหลอมเหลว | 244-295 องศาเซลเซียส |
| ความหนาแน่น | 7.25 g/cm ³ ที่ 20 องศาเซลเซียส |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การใช้ประโยชน์

1. ใช้ทำอุปกรณ์เครื่องเรือน อุปกรณ์ตกแต่งบ้าน
2. ใช้แทนเงินเนื่องจากมีความมันวาว ใช้ทำเครื่องประดับ

2.3 แผนภูมิเฟส (Phase Diagram)

เฟส (phase) คือส่วนของระบบที่เป็นเนื้อเดียวและมีลักษณะทางกายภาพและเคมีที่สม่ำเสมอ ยกตัวอย่างของระบบที่มีหนึ่งเฟส เช่น ธาตุบริสุทธิ์ และสารละลาย (solution) ที่เป็นเนื้อเดียวกัน ในกรณีที่มีระบบมีหลายเฟส แต่ละเฟสจะแยกจากกันด้วยขอบเขตเฟส (phase boundary) เราเรียกระบบที่มีเฟสเดียวเรียกว่า 'homogeneous system' และระบบที่มีหลายเฟสเรียกว่า 'heterogeneous system' หรือของผสม (mixture) แผนภาพที่แสดงถึงเฟสต่างๆที่มีอยู่ในวัสดุ ณ สถานะหนึ่งๆ เรียกว่า แผนภาพเฟสที่สถานะสมดุล (phase equilibrium diagram) หรือแผนภาพเฟส (phase diagram) ซึ่งมีประโยชน์ในการบอกข้อมูลต่างๆ ดังนี้

1. คุณสมบัติของสาร / โลหะ/วัสดุ
2. Heat Treatment โลหะ
3. โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดังต่อไปนี้
4. อุณหภูมิ (Temperature)
5. ส่วนผสม (Composition)
6. ความดัน (Pressure)
7. เฟส (Phase)

อุณหภูมิ (Temperature) เป็นตัวแปรที่สำคัญมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสาร เช่น ทำให้เปลี่ยนแปลงสถานะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มหรือลดลง จะทำให้สารเปลี่ยนคุณสมบัติต่างๆไปซึ่งรวมทั้งเฟสด้วย ดังนั้นในการปรับปรุงคุณสมบัติต่างของสารหรือโลหะมักจะใช้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (การใช้ความร้อนเป็นหลัก)

ส่วนผสม (Composition) หมายถึง ส่วนผสมของสารหรือโลหะต่างๆการที่สารผสมกันในอัตราส่วนที่แตกต่างกันจะทำให้คุณสมบัติต่างๆรวมทั้งเฟสของสารนั้นเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนผสมนั้นเสมอ ดังนั้นการนำสารมาใช้จำเป็นต้องทราบปริมาณและอัตราส่วนผสมต่างๆ เพื่อจะสามารถทราบถึงการทำงานที่เหมาะสม

ความดัน (Pressure) คือ ความดันเป็นตัวแปรที่มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสาร เช่น ทำให้เปลี่ยนแปลงสถานะเป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ เช่นเดียวกับอุณหภูมิทุกประการ ดังนั้นเมื่อเราเปลี่ยนแปลงความดัน เช่น การเก็บก๊าซในถังจำเป็นต้องเพิ่มความดันทำให้ก๊าซเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นของเหลวและมีปริมาตรลดลง (ในขณะที่อุณหภูมิเท่าเดิม) ซึ่งเป็นไปตามกฎของบอย (Boys' Law) ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจกล่าวได้ว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันของสารที่อุณหภูมิคงที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเทียบได้กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารที่ความดันคงที่

2.3.1 กฎของกิบบส์ (Gibbs' Phase Rule)

จากกฎทางเทอร์โมไดนามิกส์ทำให้สามารถทราบความสัมพันธ์ระหว่างเฟส (P) ที่สามารถมีได้ที่สภาวะสมดุลในระบบ จำนวนที่ต่ำที่สุดของตัวผสม (C) ซึ่งสามารถทำให้เกิดระบบที่ว่ำนั้น และระดับของความอิสระ (F) ความสัมพันธ์ทั้ง 3 อย่างนี้สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$P + F = C + 2 \quad (2.1)$$

P คือ จำนวนเฟส

F คือ degree of freedom หรือจำนวนตัวแปร

C คือ จำนวนส่วนประกอบของระบบ

ในสมการนี้ระดับความอิสระก็คือ จำนวนตัวแปรอุณหภูมิความดัน และส่วนผสมที่เปลี่ยนแปลงโดยไม่เปลี่ยนจำนวนเฟสในสภาวะสมดุล โดยทั่วไปความดันจะคงที่ที่ 1 atm จึงเหลือตัวแปรภายนอกเพียงตัวเดียวจะได้สมการดังนี้

$$P + F = C + 1 \quad (2.2)$$

กรณีที่พิจารณาบริเวณที่มีหนึ่งเฟส ตัวแปรของสภาวะแวดล้อมจะมีได้ 2 ตัว คือ อุณหภูมิและองค์ประกอบ หมายความว่าทั้งอุณหภูมิ และองค์ประกอบสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยยังคงเฟสเดิมหนึ่งเฟสนี้ไว้ได้ นั่นคือมี $F = 2$

กรณีที่พิจารณาบริเวณที่มีสองเฟส ตัวแปรของสภาวะแวดล้อมจะมีได้หนึ่งตัวคือ หมายความว่าถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง องค์ประกอบต้องคงที่ หรือถ้าองค์ประกอบเปลี่ยน อุณหภูมิต้องคงที่เพื่อที่จะคงเฟสสองเฟสเดิมเอาไว้ นั่นคือมี $F = 1$

สุดท้ายคือกรณีพิจารณาบริเวณที่มีสามเฟส จะต้องมีสภาวะแวดล้อมคงที่ เปลี่ยนแปลงค่าใดค่าหนึ่งไม่ได้ นั่นคือ $F = 0$

2.3.2 Unary Phase Diagram

แผนภาพสมดุลของระบบสารเดี่ยว คือแผนภาพที่แสดงเฟสของสารเดี่ยวหรือสารบริสุทธิ์นั่นเอง ซึ่งอาจเป็นธาตุเดี่ยว 1 ธาตุ เช่นทองแดงหรือสารประกอบเพียงสารเดี่ยว เช่น น้ำ จะเห็นได้ว่าในระบบสารเดี่ยว จะไม่มีตัวแปรส่วนผสมหรืออาจจะกล่าวได้ว่าส่วนผสมเท่ากับหนึ่งนั่นเอง ดังนั้นตัวแปรในระบบสารเดี่ยวจึงมีแค่ 2 ตัวแปร คือ

1. อุณหภูมิ มักจะแสดงในแผนภาพเป็นแกนตั้ง (แกน Y)
2. ความดัน มักจะแสดงในแผนภาพเป็นแกนนอน (แกน X)

2.3.2.1 การเกิดสมดุลสองเฟส

การเกิดสมดุลสองเฟส หมายถึง การที่สารสามารถแสดง เฟสได้สมดุลกันสองภาคพร้อมกัน ดังนั้นถ้าต้องการให้เกิดสมดุล 2 เฟส เปลี่ยนได้ก็ตัวแปร จากกฎของกิบส์ ถ้า $P = 2, C = 1$ ได้ $F = 1$ แสดงว่าถ้าต้องการให้เกิดเฟสสมดุลกันจะสามารถเปลี่ยนตัวแปรได้เพียง 1 อีก 1 ต้องคงที่ เช่น เปลี่ยนแปลงตัวแปรอุณหภูมิโดย ให้ความดันคงที่หรือเปลี่ยนแปลงตัวแปรความดันจะให้อุณหภูมิกงที่

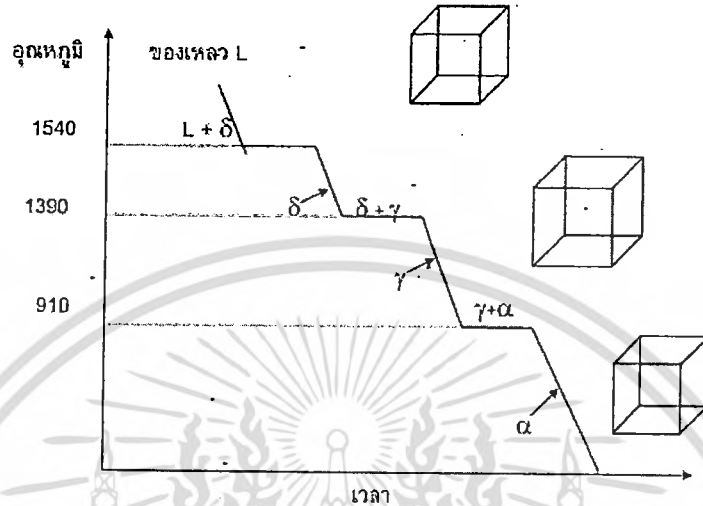
2.3.2.2 การเกิดสมดุลสามเฟส

การเกิดสมดุลสามเฟส หมายถึง สารสามารถมีสามเฟสสมดุลกันอยู่ได้พร้อมกัน ดังนั้นถ้าต้องการให้เกิดสมดุล 3 เฟส จะสามารถเปลี่ยนได้ก็ตัวแปร จากกฎของกิบส์ ถ้า $P = 3, C = 1$ ได้ $F = 0$ แสดงว่าไม่สามารถเปลี่ยนตัวแปรได้โดย ทั้งอุณหภูมิ และความดัน ต้องคงที่จึงจะเกิดจุดที่สามเฟสสมดุลกัน เรียกจุดสมดุลสามเฟส หรือ Triple Point จุดสมดุลสามภาค หมายถึง จุดที่สารมี 3 เฟสเกิดขึ้นพร้อมกัน ซึ่งถ้าเราจะเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความดันเพียงเล็กน้อย การเกิดสมดุลเฟสก็จะหมดไป วัสดุหลายชนิดขอบเขตสองจุดสองเฟสอยู่ในแนวระดับ เช่น เหล็ก ดังนั้นเมื่อพิจารณาเหล็กบริสุทธิ์จุดหลอมเหลวไม่ขึ้นกับความดัน แต่การกลายเป็นไอหรือก๊าซของเหล็กกลับขึ้นกับความดัน เมื่อพิจารณาจุดจะเห็นว่าเหล็กบริสุทธิ์มี 5 เฟส คือ

1. เฟสก๊าซ
2. เฟสของเหลว
3. เฟสของแข็ง แบ่งเป็น 3 เฟส คือ
 - δ Fe เฟสโครงสร้าง B.C.C
 - α Fe เฟสโครงสร้าง F.C.C
 - γ Fe เฟสโครงสร้าง B.C.C

ดังนั้นเกิด Triple Point 3 จุด ถ้าปล่อยให้เหล็กบริสุทธิ์ที่หลอมละลาย (เฟสของเหลว) ที่ $2200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ปล่อยให้เย็นตัวลงที่ความดันบรรยากาศเมื่อถึง $1540\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะเกิดการแข็งตัวเป็นของแข็งเฟส δ ที่มีโครงสร้างผลึกเป็น BCC ถ้าปล่อยให้เย็นตัวลงมาถึง $1390\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะแข็งตัวเป็นเฟสของแกมมา γ ที่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างผลึกเป็น FCC จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงมาอีก $910\text{ }^{\circ}\text{C}$ เหล็กจะเปลี่ยนแปลงเฟสเป็นเฟสแอลฟา α ที่มีโครงสร้างผลึกเป็น BCC ดังภาพที่ 2.4

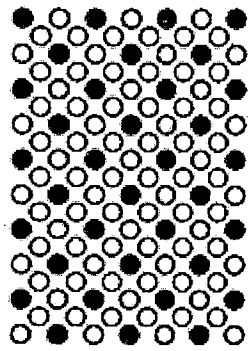


ภาพที่ 2.4 กราฟการแข็งตัวและการเปลี่ยนแปลงเฟสของเหล็กบริสุทธิ์

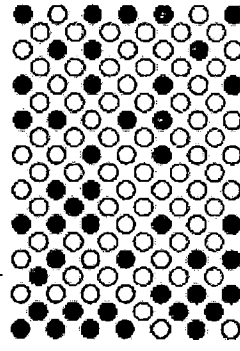
2.3.3 Binary Phase Diagram

แผนภาพสมดุลเฟสระบบ 2 ธาตุ เป็นแผนภาพจากสมดุลเฟสที่ใช้กับระบบธาตุหรือสารละลายรวมกัน 2 ชนิด เช่น ธาตุกับธาตุ ได้แก่ เหล็กผสมกับคาร์บอน หรือสารประกอบผสมกับสารประกอบ เช่น เกลือผสมกับน้ำ นิกเกิลออกไซด์กับแมกนีเซียมออกไซด์ เป็นต้น ธาตุหรือสารประกอบนั้นอาจจะละลายกันได้ทั้งในสภาพของเหลวหรือของแข็ง โดยถ้าสารละลายในสถานะของแข็ง เราเรียกว่า สารละลายของแข็ง (Solid Solution) การละลายในสภาพของแข็ง เช่น นิกเกิลกับทองแดงสามารถละลายรวมกันได้ทุกส่วนผสม ทั้งสภาพของแข็งและของเหลว อาจเรียกว่ามีความสามารถในการละลายในสภาพของแข็งได้ดี การละลายในสภาพของแข็งมีอยู่ 2 ชนิดคือ

1) สารละลายของแข็งชนิดแทนที่ หรือ Substitutional Solid Solution หมายถึง การที่ธาตุทั้งสองธาตุมีขนาดอะตอมใกล้เคียงกัน ผสมกันโดยการแทนที่อะตอมของกันและกัน ซึ่งการละลายชนิดแทนที่นั้นอาจมีทั้งแบบเป็นระเบียบละแบบไม่เป็นระเบียบดังภาพที่ 2.5 จะเป็นได้ว่าการละลายชนิดแบบเป็นระเบียบอะตอมของธาตุจะสลับตำแหน่งกันอย่างเป็นระเบียบหรือการเรียงตัวของอะตอมทั้งสองธาตุวางตำแหน่งของอะตอมแบบกระจายตัวกันทั่ว สำหรับการละลายชนิดแทนที่ไม่เป็นระเบียบจะมีการเรียงตัวของอะตอมสลับกันไม่เป็นระเบียบ



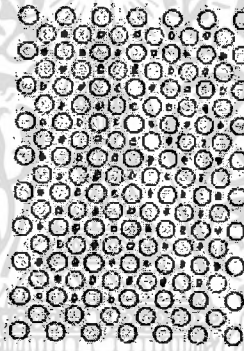
ก. แบบเป็นระเบียบ



ข. แบบไม่เป็นระเบียบ

ภาพที่ 2.5 สารละลายของแข็งชนิดแทนที่

2) สารละลายของแข็งชนิดแทรกตัว หรือ Interstitial Solid Solution



ภาพที่ 2.6 สารละลายของแข็งชนิดแทรกตัว

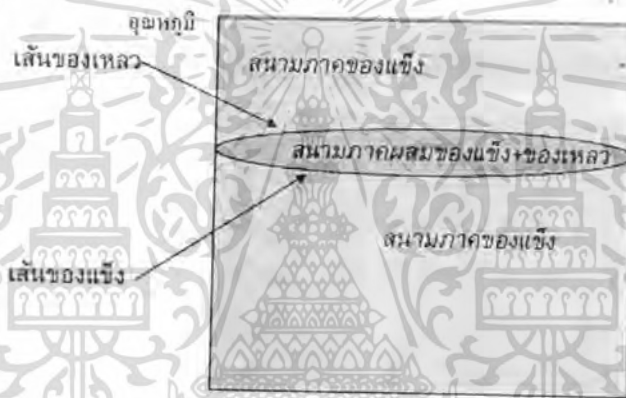
เมื่อธาตุหรือสารผสมกันจะเกิดความสัมพันธ์ที่ความดันและอุณหภูมิหนึ่ง มักกำหนดให้ความดันคงที่ ณ ความดันบรรยากาศเสมอ ดังนั้นสูตรของกิ๊บส์จะมีการเปลี่ยนแปลงไปดังนี้

$$P + F = C + 1 \quad (2.3)$$

ในระบบนี้ ค่า $C = 2$ เสมอ (เนื่องจากการผสมระหว่างสองสารเท่านั้น) ดังนั้นถ้าต้องการสมดุลหนึ่งเฟส ($P = 1$) การเปลี่ยนแปลงเฟสจะเกิดขึ้นกับตัวแปรได้ $F = 2$ ก็คือ อุณหภูมิและส่วนผสมนั่นเอง

2.3.3.1 การเกิดสมดุลสองเฟส

ถ้าต้องการสมดุลสองเฟส ($P=2$) การเปลี่ยนแปลงสมดุลสองเฟสจะขึ้นกับตัวแปรได้หนึ่งตัวแปร ($F=1$) ซึ่งก็คืออุณหภูมิคงที่หรือส่วนผสมอย่างใดอย่างหนึ่ง หมายความว่า ถ้ากำหนดอุณหภูมิคงที่ การเปลี่ยนแปลงสองเฟสจะเกิดขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงได้เพียงส่วนผสมเท่านั้น หรือกำหนดส่วนผสมคงที่ไว้ การเปลี่ยนแปลงสองเฟสจะเกิดขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท่านั้น การเกิดสมดุลสองเฟสจะเกิดโดยชนาบด้วยเส้น 2 เส้นที่เป็นสมดุลของอุณหภูมิและความดันคงที่ ซึ่งทำให้เกิดความสมดุลของสองเฟสขึ้น เรียกเส้นบนว่า เส้นของเหลว และเรียกเส้นล่างว่า เส้นของแข็ง ดังภาพที่ 2.7 การเกิดสมดุลสองเฟสจะเกิดบริเวณที่เรียกว่า สนามภาค หรือ Phase Field ดังนั้น Phase Field คือ บริเวณที่ธาตุหรือสารผสมนั้นมีเฟสเดียวกัน แม้ส่วนผสมจะต่างกันก็ตาม เช่น มีเฟสของแข็ง หรือภาคของเหลว หรือภาคของแข็งผสมของเหลว ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 เส้นของแข็งและเส้นของเหลว

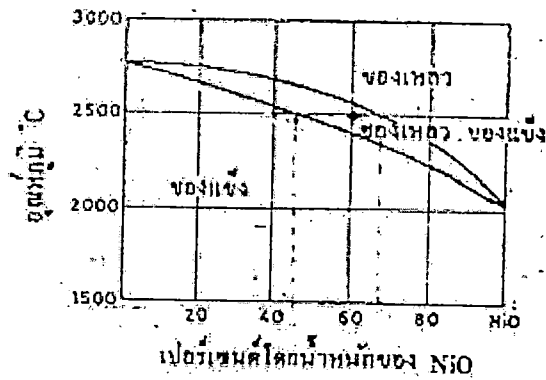
ความหมายของเส้นของเหลว คือ เป็นเส้นที่เกิดการสมดุลของของเหลวโดย สารจะเกิดการหลอมละลายกลายเป็นของเหลวหมดเมื่อให้ความร้อนหรือเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่าเส้นของเหลวนี้ ความหมายของเส้นของแข็ง คือ เป็นเส้นที่เกิดการสมดุลของสองเฟส ที่สารจะแข็งตัวเป็นของแข็งหมดเมื่อสารเย็นตัวหรือให้อุณหภูมิต่ำกว่าเส้นของแข็ง

2.3.3.2 ระบบสมดุลเฟสของระบบ 2 ธาตุ

1. ระบบสารละลายของแข็ง (Solid Solution System)

เป็นระบบสาร 2 ชนิด สามารถละลายเข้ากันได้หมดทุกส่วนผสม ทั้งในสภาพของเหลวและของแข็ง ดังภาพที่ 2.8 แสดงแผนภาพสมดุลของ MgO กับ NiO ซึ่งทั้งสองชนิดสามารถละลายเข้ากันได้หมดทั้งสภาพของแข็งและของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

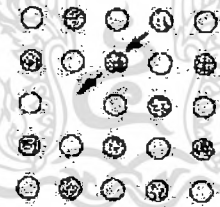


ภาพที่ 2.8 แผนภาพสมดุลของ MgO กับ NiO

แผนภาพของระบบสารละลายของแข็ง มักประกอบด้วย 3 Phase Field คือ สนามภาคของเหลว (L Phase) สนามภาคของเหลว + ของแข็ง (L+S Phase) และสนามภาคของแข็ง (S Phase) โดยแบ่ง Phase Field ด้วยเส้นของเหลว (Liquidus) และเส้นของแข็ง (Solidus) ทั้งสองเส้นไม่มีโอกาสมาพบกันยกเว้นจุดปลายเท่านั้น การแข็งตัวของโลหะผสมในระบบสารละลายความแข็ง โลหะจะเป็นตัวโครงสร้างกิ่งไม้ (Dendrites) เกรนกิ่งไม้จะใหญ่หรือเล็กขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวของโลหะผสมนั้น ในขณะที่โลหะผสมสารละลายของแข็งเกิดการแข็งตัว โลหะทั้งสองชนิดจะละลายเข้ากันด้วยการแพร่ (Diffusion)

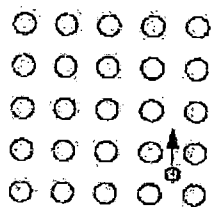
กลไกการแพร่ในสารละลายของแข็ง สามารถแบ่งได้เป็น 4 ลักษณะใหญ่คือ

1. กลไกการแพร่แบบแทนที่ช่องว่างของอะตอม (Vacancy Atomic Site Mechanism)



ภาพที่ 2.9 กลไกการแพร่แบบแทนที่ช่องว่าง

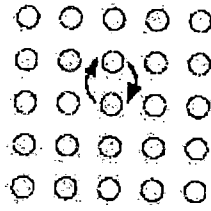
2. กลไกการแพร่แบบแทรกตัวระหว่างอะตอม (Interstitial Atomic Mechanism)



ภาพที่ 2.10 กลไกการแพร่แบบแทรกตัวระหว่างอะตอม

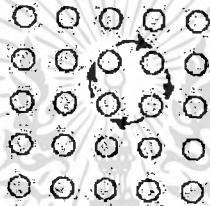
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กลไกการแพร่แบบสลับกันสองอะตอม (Two Atom Interchange Mechanism)



ภาพที่ 2.11 กลไกการแพร่แบบสลับกันสองอะตอม

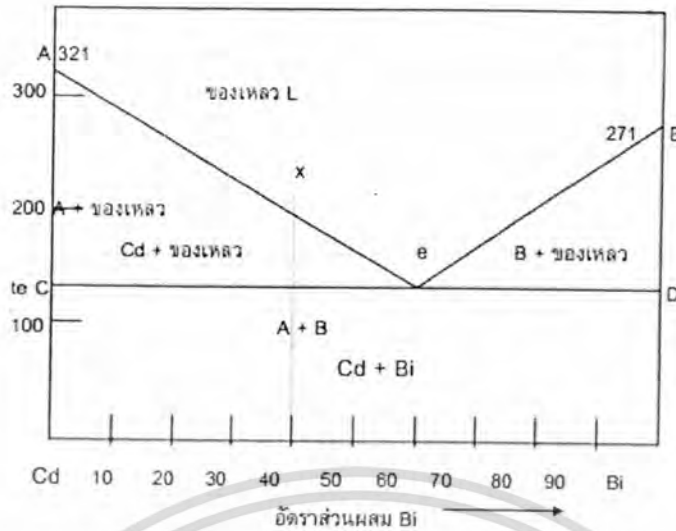
4. กลไกการแพร่แบบสลับกันสี่อะตอม (Four Atom Interchange Mechanism)



ภาพที่ 2.12 กลไกการแพร่แบบสลับกันสี่อะตอม

2. ระบบยูเทคติก (Eutectic System)

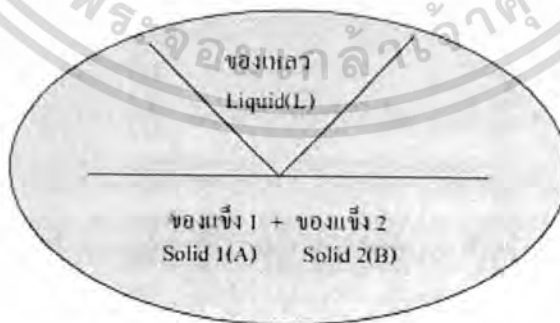
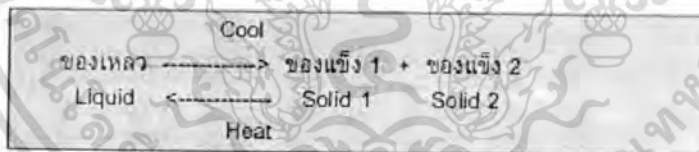
ในระบบนี้โลหะหรือสารละลายต่างละลายได้ดีในสภาพของเหลวแต่แยกตัวอย่างเด็ดขาดในสภาพของแข็ง จากภาพที่ 2.13 จะเห็นว่าอุณหภูมิแข็งตัวของธาตุทั้งสองจะลดลง เมื่อมีธาตุหรือสารอื่นเพิ่มขึ้นเป็นไปตามเส้น Ae สำหรับธาตุ A และเส้น Be สำหรับธาตุ B ทั้งสองเส้นจะมาบรรจบกันที่ e โดยจุด e เป็นจุดที่อุณหภูมิแข็งตัว (หลอมละลาย) ของสารผสมนั้นต่ำสุด เรียกว่า จุดยูเทคติก (Eutectic Point) และอุณหภูมิดังกล่าวจะมีแต่อุณหภูมิเดียว เรียกว่า อุณหภูมิยูเทคติก สารผสมจะแข็งตัวพร้อมกันที่อุณหภูมินี้ โลหะผสมยูเทคติกจะแสดงคุณสมบัติเหมือนธาตุบริสุทธิ์ การแข็งตัวของสาร A จะแข็งตัวหมดเมื่อสาร A เย็นตัวถึงเส้น AeD ส่วนการแข็งตัวของสาร B เป็นไปตามเส้น BeC โดยแข็งตัวหมดเมื่อเย็นตัวต่ำกว่าเส้นดังกล่าว แผนภาพสมดุลของระบบยูเทคติกสามารถแบ่งได้เป็น 4 Phase Field คือ (1) ของเหลว (2) ของเหลว + ของแข็ง A (3) ของแข็ง และ (4) ของแข็ง + ของแข็ง B



ภาพที่ 2.13 แผนภาพสมดุลของ Cd-Bi

2.1 ปฏิกิริยาอุเทคติก (Eutectic Reaction)

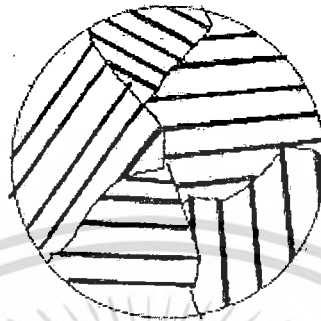
ปฏิกิริยาอุเทคติกโดยทั่วไป คือ ปฏิกิริยาที่สารผสมที่ละลายกันอย่างสมบูรณ์ในสภาพของเหลว เมื่อเย็นตัวลงแล้วสารผสมทั้งสองแยกตัวออกจากกันเนื่องจากไม่สามารถละลายเข้ากันได้ในสภาพของแข็ง เกิดเป็นสารสองชนิดซึ่งต่างกัน ปฏิกิริยานี้เกิดเมื่ออุณหภูมิลดลง ดังสมการของปฏิกิริยาอุเทคติก แบบทั่วไป



ภาพที่ 2.14 ลักษณะเฟสบนแผนภาพสมดุลระบบยูเทคติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

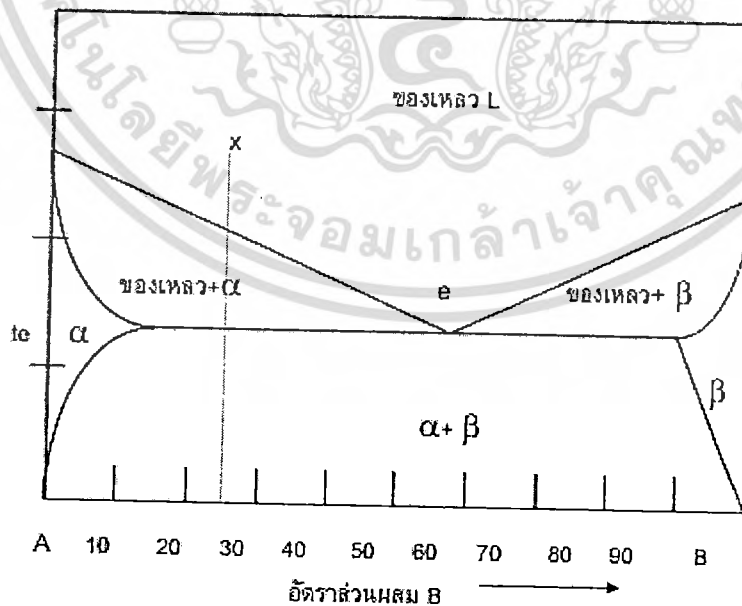
เมื่อสารผสมทั้งสองเย็นตัวลงแล้วเกิดปฏิกิริยายูเทคติก จะทำให้ของแข็งที่เกิดขึ้นมีโครงสร้างพิเศษ เรียกว่า โครงสร้างยูเทคติก ซึ่งคือโครงสร้างผลึกสลับกันระหว่างโครงสร้างผลึก A และโครงสร้างผลึก B ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 โครงสร้างยูเทคติก

3. ระบบผสมระหว่างระบบสารละลายของแข็งกับระบบยูเทคติก

เกิดขึ้นเมื่อสารละลายเข้ากันได้บ้างบางส่วนในของแข็ง และละลายได้หมดในของเหลว สภาวะที่ปรากฏในแผนภาพสมดุลของระบบนี้มี 6 Phase Field คือ (1) ของเหลว (2) ของเหลว + ของแข็ง α (3) ของแข็ง β (4) ของเหลว + ของแข็ง β (5) ของแข็ง α และ (6) ของเหลว + ของแข็ง α + ของแข็ง β และเมื่อแข็งตัวจะประกอบด้วยโครงสร้าง (1) ของแข็ง α (2) ของแข็ง β และ (3) ของแข็ง α + ของแข็ง β

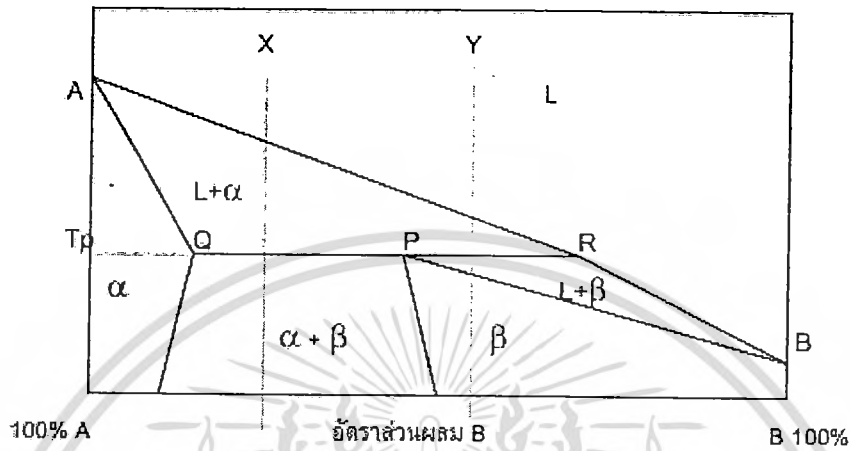


ภาพที่ 2.16 แผนภาพสมดุลเฟสระบบผสมระหว่างระบบสารละลายของแข็งกับระบบยูเทคติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ระบบเพอริเทคติก (Peritectic System)

เกิดขึ้นเมื่อโลหะสองชนิด มีความแตกต่างของอุณหภูมิหลอมละลายมากๆ ปฏิกริยาเพอริเทคติก คือ การที่สารละลายของแข็งที่มีส่วนผสมคงที่ทำปฏิกริยากับเฟสของเหลวที่มีส่วนผสมคงที่



ภาพที่ 2.17 แผนภาพสมดุลเฟสระบบเพอริเทคติก

สนามเฟสที่ปรากฏในแผนภาพสมดุลของระบบนี้มี 6 Phase Field คือ

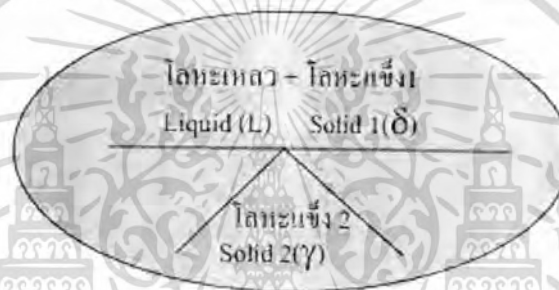
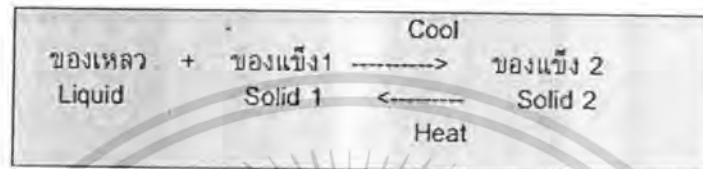
1. ของเหลว
2. ของแข็ง α
3. ของแข็ง β
4. ของเหลว + ของแข็ง α
5. ของเหลว + ของแข็ง β
6. ของแข็ง $\alpha + \beta$

เมื่อแข็งตัวจะประกอบด้วยโครงสร้าง

1. ของแข็ง α
2. ของแข็ง β
3. ของแข็ง $\alpha + \beta$

4.1 ปฏิกริยาเพอริเทคติก (Peritectic Reaction)

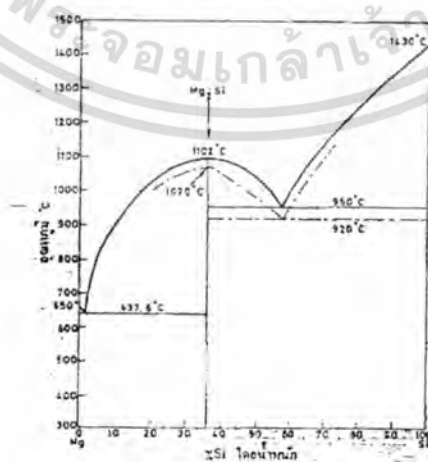
ปฏิกริยาเพอริเทคติก คือ การที่สารละลายที่มีสภาพของเหลวกับสารของแข็ง เกิดปฏิกริยา รวมตัวเป็นสารของแข็งชนิดใหม่เมื่ออุณหภูมิลดลง สมการของปฏิกริยาเพอริเทคติกแบบทั่วไปแสดงดัง ภาพที่ 2.18 ในทางกลับกันเราสามารถเพิ่มอุณหภูมิแล้วทำให้ของแข็ง 2 ชนิด หลอมละลายกลายเป็น ของเหลวบางส่วน และบางส่วนกลายเป็นของแข็ง (โลหะแข็ง 1) แผนภาพแสดงสมดุลของระบบเพอริ เทคติกดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 ลักษณะเฟสบนแผนภาพสมดุล

5. ระบบสารประกอบโลหะ (Intermetallic Compound)

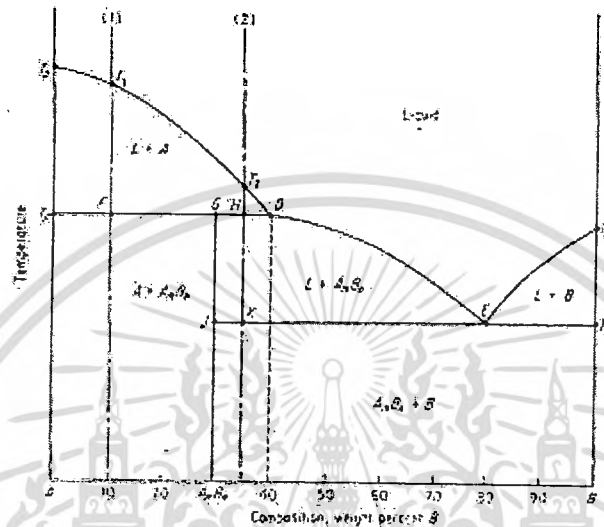
โลหะผสมบางตัวจะเกิดสารประกอบขึ้น ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายโลหะบริสุทธิ์ตัวหนึ่งในระบบ คือ มีอุณหภูมิหลอมละลายกึ่งที่ ทำให้สมดุลผิดไปจากเดิมเกิดระบบซ้อนกัน ดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 แผนภาพสมดุลเฟสของระบบสารประกอบ Mg-Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะเห็นได้ว่า โลหะผสม Mg-Si จะเกิดสารประกอบโลหะ Mg_2Si ที่ส่วนผสม Mg 63% Si 37% มีจุดหลอมละลายคงที่ ณ $1102\text{ }^{\circ}\text{C}$ และทำตัวคล้ายสารบริสุทธิ์แบ่งแผนภาพเป็นระบบยูเทคติกได้ 2 ระบบ คือ Mg- Mg_2Si และ Mg_2Si -Si บางกรณีเกิดเป็นระบบอื่นขึ้นในระบบสารประกอบโลหะ เช่น ระบบเพอริเทคติกผสมกับระบบยูเทคติกซ้อนขึ้นมาในระบบสารประกอบดังกล่าวที่ 2.20



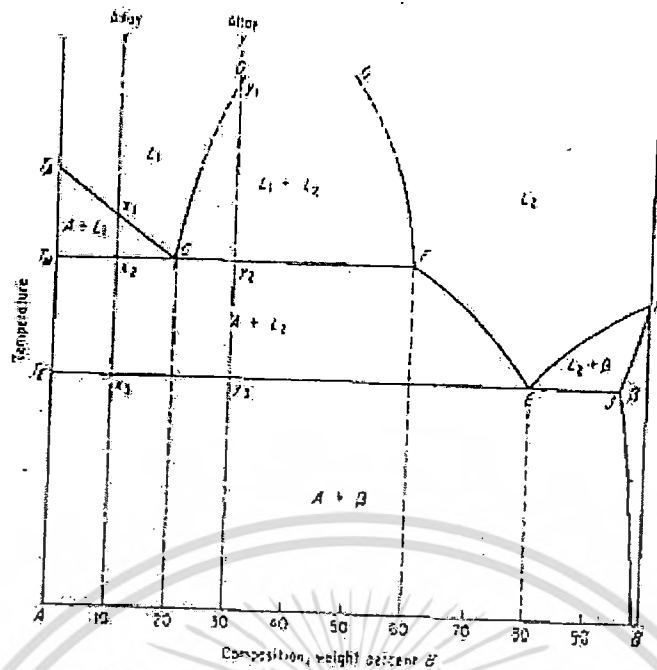
ภาพที่ 2.20 แผนภาพสมดุลของสารประกอบโลหะที่มีระบบเพอริเทคติกและระบบยูเทคติกซ้อนกันอยู่

จากภาพที่ 2.20 จะเห็นได้ว่าระบบสารประกอบโลหะถูกแบ่งเป็นระบบเพอริเทคติก และระบบยูเทคติกที่ส่วนผสม A 70% B 30% ซึ่งที่ส่วนผสมนี้เกิดเป็นสารประกอบโลหะที่มีจุดหลอมละลาย T_p เมื่อโลหะผสมแข็งตัว ในช่วงระบบเพอริเทคติกก็จะเกิดปฏิกิริยาเพอริเทคติกได้ของแข็งผสมระหว่างธาตุ A กับสารประกอบโลหะ (AB) หรือ $A + (AB)$ โดยธาตุ A จะแข็งตัวก่อน และเมื่อถึงอุณหภูมิ T_p โลหะเหลวจะเกิดปฏิกิริยาเพอริเทคติกได้สารประกอบโลหะ AB แต่ถ้าโลหะผสมนั้นมีส่วนผสมของ B มากกว่า 30% เมื่อโลหะแข็งตัวจะเกิดปฏิกิริยายูเทคติกที่อุณหภูมิ T_E ทำให้โลหะที่แข็งมีส่วนผสมของสารประกอบโลหะกับธาตุ B หรือ $(AB+B) + AB$ โดยสารประกอบ AB จะแข็งตัวก่อน และโลหะเหลวที่เหลือจะแข็งตัวที่อุณหภูมิ T_E กลายเป็นโครงสร้างของแข็งยูเทคติก หรือ $(AB+B)$ นั่นเอง

6. ระบบโมโนเทคติก (Monotectic System)

แผนภาพสมดุลระบบโมโนเทคติก หมายถึง แผนภาพของระบบที่สารผสมสองสารสามารถละลายเข้ากันได้บ้างในสภาพของเหลว แต่จะแยกตัวออกจากกันเมื่อแข็งตัวเป็นสภาพของแข็ง ดังภาพที่ 2.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

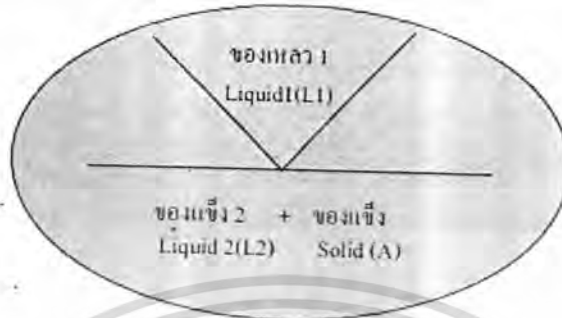
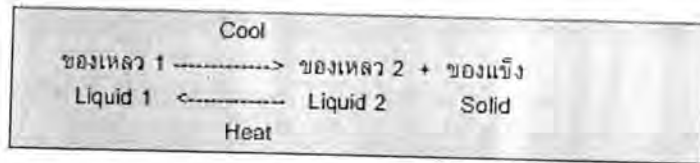


ภาพที่ 2.21 แผนภาพสมดุลระบบโมโนเทคติก

จากแผนภาพสมดุลของโมโนเทคติกในภาพที่ 2.21 แสดงให้เห็นว่าสารสองสารนี้มีบางส่วนผสมจะสามารถละลายเข้าด้วยกัน เป็นของเหลว 1 (L_1) หรือเป็นของเหลว 2 (L_2) และมีบางส่วนผสมที่ของเหลวทั้งสองแยกตัวกันอยู่ในรูปของเหลว 1 และของเหลว 2 (L_1+L_2) เมื่อสารผสมนี้เย็นตัว จะได้ของแข็งผสมระหว่าง A และของแข็ง β ($A + \beta$) ที่ไม่สามารถละลายเข้าด้วยกันในสภาพของแข็ง เมื่อให้ของเหลว 1 เย็นตัวลงสามารถเกิดปฏิกิริยาอย่างหนึ่งเรียกว่า ปฏิกิริยาโมโนเทคติก

6.1 ปฏิกิริยาโมโนเทคติก (Monotectic Reaction)

ปฏิกิริยาโมโนเทคติกโดยทั่วไป คือ ปฏิกิริยาที่สารผสมในสภาพของเหลวเย็นตัวลงแล้วสารผสมตัวหนึ่งแยกตัวออกจากอีกตัวหนึ่ง เนื่องจากสารตัวหนึ่งแยกออกแล้วเกิดการแข็งตัว ในขณะที่อีกสารหนึ่งยังหลอมละลายอยู่ เกิดปฏิกิริยาเมื่ออุณหภูมิลดลง ดังสมการของปฏิกิริยาโมโนเทคติกแบบทั่วไป ดังภาพที่ 2.22



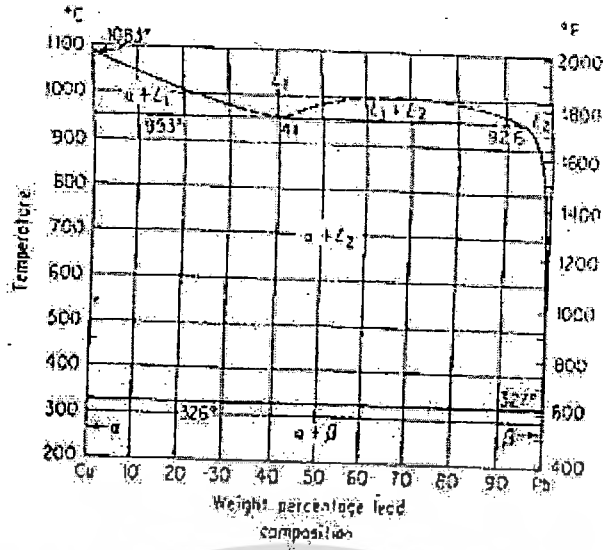
ภาพที่ 2.22 แสดงลักษณะเฟสบนแผนภาพสมดุลระบบโมโนเทคติก

จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาโมโนเทคติกจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่งๆเสมอ อุณหภูมินี้เรียกว่า อุณหภูมิโมโนเทคติก หรือ TM

7. ระบบสารที่ไม่ละลายทั้งในของเหลวและของแข็ง (Insoluble in Liquid and Solid State System)

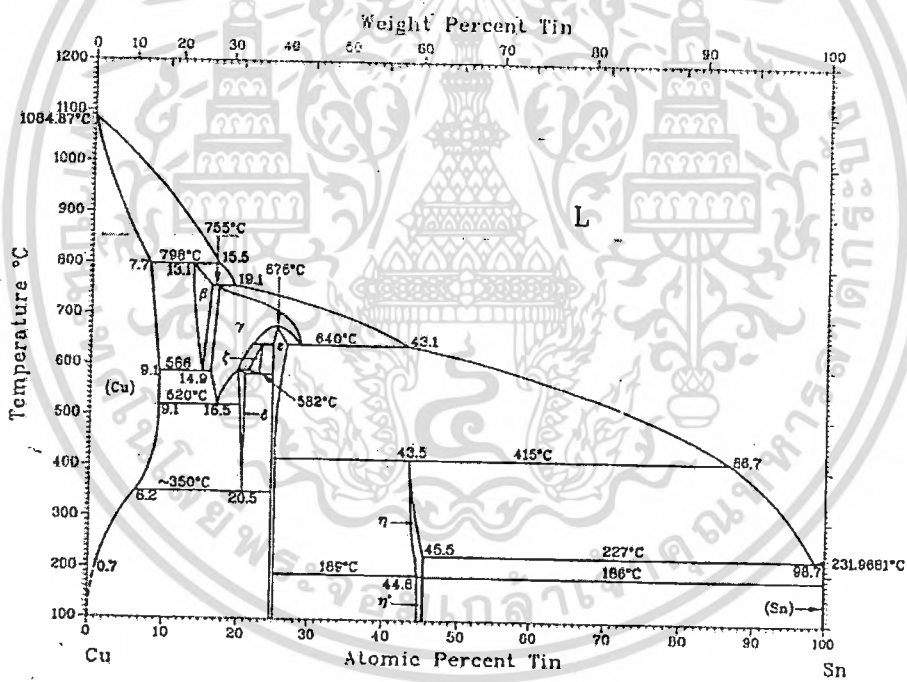
แผนภาพสมดุลระบบสารที่ไม่ละลาย หมายถึง แผนภาพของระบบที่สารผสมสองสารไม่สามารถละลายเข้ากันได้เลยทั้งในสภาพของเหลว และสภาพของแข็ง กล่าวคือ เมื่อสารผสมกันจะแยกตัวในสภาพของเหลวแล้ว จะแยกตัวออกจากกันเมื่อแข็งตัวเป็นสภาพของแข็ง ซึ่งหมายความว่าไม่มีกลไกการแพร่เกิดขึ้นเลย ดังภาพที่ 2.23 เป็นโลหะผสมทองแดงกับตะกั่ว ซึ่งเป็นโลหะผสมที่มีระบบใกล้เคียงกับระบบสารที่ไม่ละลาย ภาพที่ 2.23 แสดงให้เห็นว่าโลหะผสมทองแดง-ตะกั่ว มีบริเวณที่เกิดของเหลว 2 เกิดขึ้นคือ L1 และ L2 และแผนภาพสมดุลจะแสดงปฏิกิริยาโมโนเทคติก ที่ระดับอุณหภูมิ 926-953°C ดังนั้นเมื่อโลหะผสมเย็นตัวลงถึงระดับดังกล่าว ของเหลว 1 จะเกิดปฏิกิริยาโมโนเทคติก กลายเป็นของแข็ง α ผสมกับของเหลว 2 (L2) เมื่อเย็นตัวมาจนถึงระดับอุณหภูมิ 326 °C จะเกิดปฏิกิริยายูเทคติก โดยของเหลว 2 (L2) จะเกิดปฏิกิริยากลายมาเป็นของแข็ง α และของแข็ง β ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดที่อุณหภูมิต่ำเนื่องจากจุดหลอมละลายของตะกั่วที่ต่ำกว่าอยู่ที่ 326 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.23 แผนภาพสมดุลเฟสทองแดง - ตะกั่ว

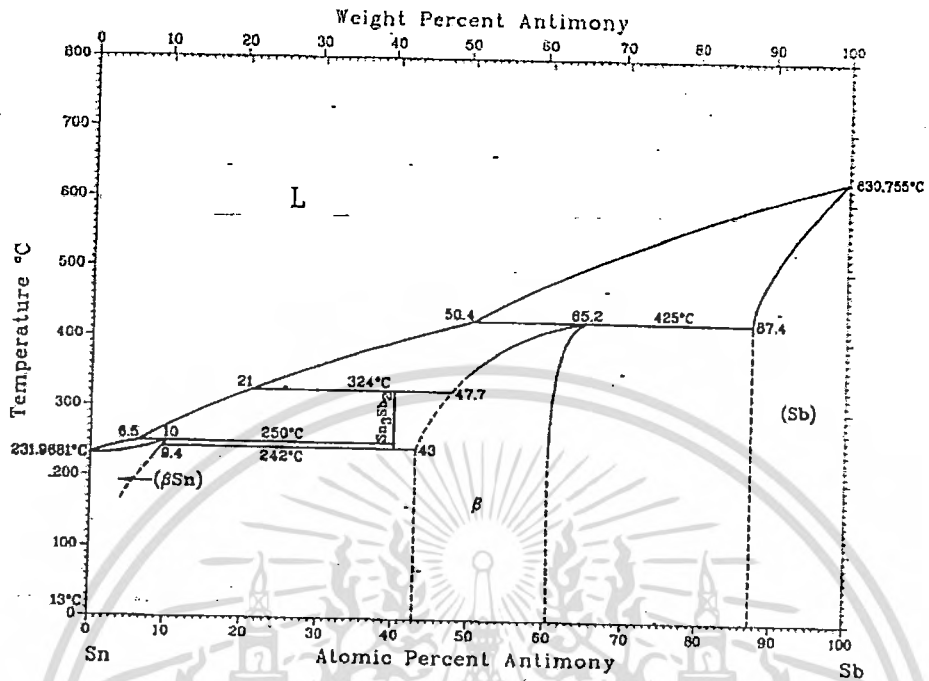
2.3.3.3 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุกและทองแดง



ภาพที่ 2.24 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุกและทองแดง

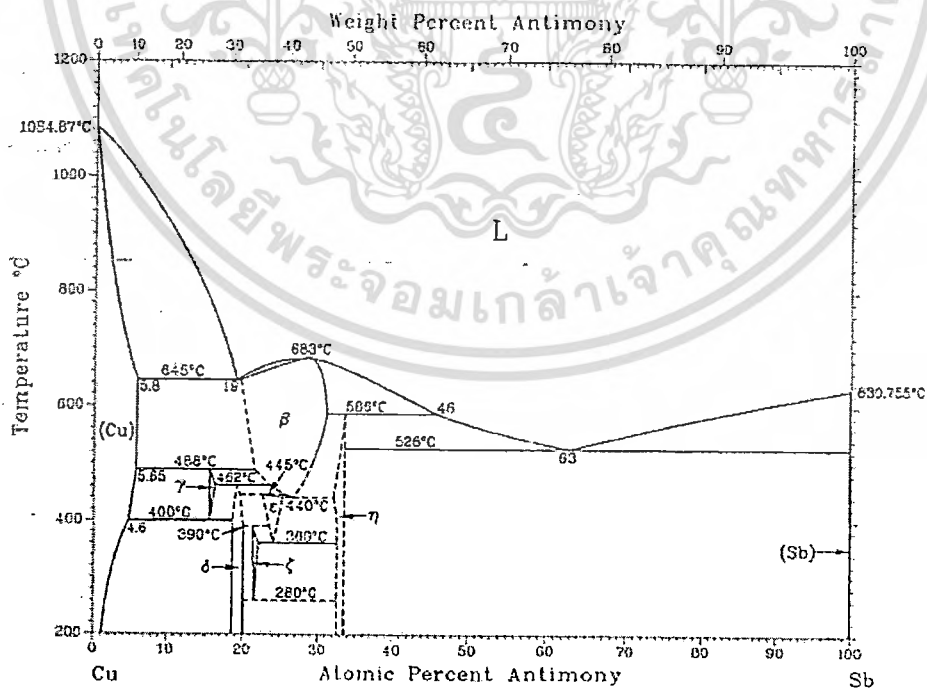
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.4 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุกและพลวง



ภาพที่ 2.25 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุกและพลวง

2.3.3.5 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมทองแดงและพลวง

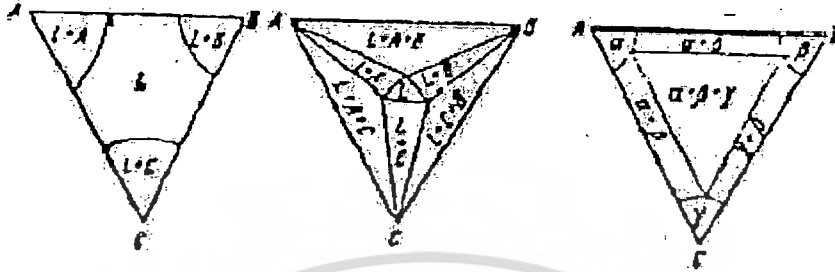


ภาพที่ 2.26 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมทองแดงและพลวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ระบบผสมสารละลายของแข็งกับยูเทคติก

เกิดเมื่อส่วนผสมละลายได้ทุกสถานะที่บางส่วนผสมเท่านั้น ทำให้เกิดจุด Ternary Eutectic ดังภาพที่ 2.31



ภาพที่ 2.31 แผนภาพระบบสารละลายของแข็งกับยูเทคติก

ดังนั้น โครงสร้างที่เกิดขึ้นมีทั้ง ผลึก โคค A,B,C ผลึก โครงสร้าง Binary Eutectic (A+B),(A+C),(B+C) และ ผลึกโครงสร้าง Ternary Eutectic (A+B+C)

2.4 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments: DOE)

การออกแบบการทดลอง Design of Experiments เป็นเครื่องมือคุณภาพที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรม นานพอสมควรแล้ว มีจุดประสงค์ที่จะควบคุมการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอิสระซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่า ปัจจัย ของกระบวนการใดกระบวนการหนึ่ง แล้วดูผลที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตอบสนองของกระบวนการนั้น ในทางปฏิบัติทางอุตสาหกรรม การทดลองที่ได้รับการออกแบบการทดลองมาจะมีการทำงานอย่างเป็น ระบบในการสืบค้นในตัวแปรในกระบวนการหรือตัวแปรของผลิตภัณฑ์ หลังจากที่ทำกำหนัด เงื่อนไขของกระบวนการ หรือองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์และมีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ จึงจะสามารถ ทำการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิต ความน่าเชื่อถือ คุณภาพ และประสิทธิภาพ เนื่องด้วย ทรัพยากรที่มีจำนวนจำกัด ดังนั้นการทดลองแต่ละครั้งจะต้องให้สาระข้อมูลที่สำคัญที่สุด ซึ่งการทดลอง ที่มีการวางแผนที่ดีจะทำให้ได้สาระข้อมูลที่สำคัญและมีคุณภาพมากกว่าทางทดลองที่เกิดขึ้นจากงานที่ ไม่ได้มีการวางแผนมาก่อน โดยเฉพาะการทดลองตามแผนที่วางไว้จะสามารถวิเคราะห์เกี่ยวกับอิทธิพล ของปัจจัยที่ต้องการศึกษาได้ดีกว่า

2.4.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

การทดลองที่ได้รับการออกแบบมาโดยมากจะมี 4 ขั้นตอนคือ การวางแผน (Planning) การ คัดเลือก (Screening) การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) และการทวนสอบ (Verification)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.1 การวางแผน

การวางแผนที่ดีจะช่วยทำให้เกิดปัญหาระหว่างการทดลองน้อยลง ตัวอย่างเช่น บุคลากร อุปกรณ์ ที่ทำการทดลอง เงินทุน และกรรมวิธีการผลิต ซึ่งอาจส่งผลให้ไม่สามารถทำการทดลองได้ครบสมบูรณ์ ถ้าโครงการที่ทำการทดลองนี้มีความสำคัญอันดับรองลงมาอีกโครงการหนึ่ง ซึ่งทำให้ต้องมีการแบ่งใช้ทรัพยากรบางส่วนไป การแบ่งการทดลองเป็นส่วนๆ ทำให้ผลการทดลองที่ได้มานั้นยังไม่สามารถใช้ได้ และเมื่อทรัพยากรที่ถูกแบ่งไปใช้นั้นกลับคืนมาก็สามารถทำการทดลองได้เหมือนเดิมและดำเนินต่อจากตอนที่หยุดไว้ก่อนหน้า การเตรียมการทดลองขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาที่กำลังเจอและนี่เป็นขั้นตอนที่อาจจะต้องทำการ

1. กำหนดปัญหา ซึ่งปัญหาที่มีขอบเขตชัดเจนจะช่วยทำให้การกำหนดตัวแปรที่ถูกต้อง เพื่อให้สามารถตอบคำถามได้ตามต้องการ
2. กำหนดวัตถุประสงค์ ซึ่งวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนจะมั่นใจได้ว่าการทดลองที่จะทำนั้นสามารถตอบสนองคำถามได้ตรง และสาระของข้อมูลที่จะได้มานี้ใช้ได้จริง
3. การสร้างแผนการทดลองเพื่อให้ได้สาระข้อมูลที่ต้องการ ในขั้นตอนนี้ควรมีการทบทวนถึงสิ่งต่างที่มีความเกี่ยวข้องกัน
4. กระบวนการและการวัดจะต้องอยู่ภายใต้การควบคุม โดยหลักทางทฤษฎีทั้งกระบวนการและระบบการวัดควรอยู่ภายใต้การควบคุมทางสถิติด้วยการใช้หลักการทางการควบคุมกระบวนการทางสถิติ ในกรณีที่กระบวนการไม่ได้อยู่ภายใต้การควบคุมแบบสมบูรณ์ แต่อย่างน้อยกระบวนการนั้นๆ ก็ควรจะสามารถทำซ้ำและให้ค่ากระบวนการแบบเดิม รวมทั้งต้องมีการวัดความแปรปรวนของกระบวนการ ซึ่งถ้าความแปรปรวนของกระบวนการนี้ที่ได้มามีค่ามากกว่าความแตกต่างหรืออิทธิพลที่กำลังพิจารณา ผลการทดลองที่ได้นี้อาจไม่ได้ประโยชน์มากนัก

2.4.1.2 การคัดเลือก

ในงานการพัฒนากระบวนการและงานการผลิตส่วนมาก มีตัวแปรจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะมีส่วนในการปรับปรุง การคัดเลือกเป็นการลดจำนวนตัวแปรเหล่านี้ให้มีจำนวนน้อยลง โดยคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การลดจำนวนตัวแปรนี้ทำให้สามารถจะพิจารณาเฉพาะที่ตัวแปรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเท่านั้นได้ หรือพิจารณาตามหลักการความสำคัญจำนวนน้อย การคัดเลือกอาจจะสามารถทำได้ถึงการหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรนั้นๆ รวมทั้งบอกด้วยว่าค่าตอบสนองมีสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.3 การคัดเลือกการหาค่าที่ดีที่สุด

หลังจากการที่มีการคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญจำนวนน้อย ต้องการที่จะทำการหาค่าที่ดีที่สุดของปัจจัยเหล่านี้ ซึ่งค่าปัจจัยที่ดีที่สุดจะเป็นค่าอะไร ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทดลองด้วย

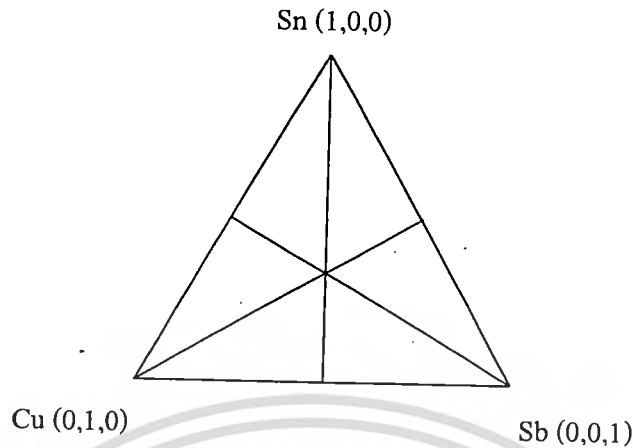
1. ในหัวข้อภาพรวม Fractional Design เป็นการอธิบายถึงวิธีการออกแบบและการวิเคราะห์ตัวแบบของ Two-Level Fractional, Plackett-Burman และ General Full Factorial
2. ในหัวข้อภาพรวม Response Surface Design เป็นการอธิบายถึงวิธีการออกแบบและการวิเคราะห์ตัวแบบของ Central Composite Design และ Box-Behnken
3. ในหัวข้อ Response Optimization เป็นการอธิบายถึงวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดในกรณีที่มีคำตอบสนองมากกว่าหนึ่งค่า (Multiple Response) และมีหลายวิธีที่ใช้การหาค่าที่ดีที่สุดเพื่อเป็นเงื่อนไขของการเกิดคำตอบสนองหลายๆค่าไปพร้อมกัน

2.4.1.4 การทวนสอบ

การทวนสอบเป็นการทดลองซ้ำเพื่อดูว่าค่าที่วิเคราะห์มาเป็นค่าที่ดีที่สุดนั้น ยังคงให้ผลลัพธ์ที่ดีจริงหรือไม่ เช่น การทำการทดลองที่มีเงื่อนไขตามที่มาจากการหาค่าที่ดีที่สุด เพื่อหาขนาดของช่วงความเชื่อมั่นของค่าเฉลี่ยของคำตอบสนอง

2.4.3 การออกแบบส่วนผสม (Mixture Design)

แผนการทดลองแบบผสมเป็นเทคนิคซึ่งเหมาะสมสำหรับการพัฒนาสูตร เนื่องจากการทดลองแบบแฟกทอเรียลไม่เหมาะสมเมื่อมีส่วนผสมมากกว่า 1 ชนิด แผนการทดลองแบบผสมอาศัยหลักการที่ว่าเมื่อส่วนผสมส่วนใดส่วนหนึ่งเปลี่ยน ส่วนประกอบที่เหลือในสูตรจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงด้วย โดยที่ผลรวมของส่วนประกอบทั้งหมดรวมกันเท่ากับ 1.0 หรือ 100% และผลตอบสนองขึ้นกับสัดส่วนของส่วนผสม ความสัมพันธ์ของส่วนผสมในแผนการทดลองที่มีส่วนผสม 3 ชนิด สามารถแสดงโดยใช้ระบบแกนเส้นตรง 3 เส้น ดังแสดงในภาพที่ 2.32 โดยที่จุดยอดของแต่ละแกนจะมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 100% ส่วนปลายที่ตั้งฉากกับฐานจะมีค่าเท่ากับ 0



ภาพที่ 2.32 ความสัมพันธ์ของส่วนผสมในแผนการทดลองที่มีส่วนผสม 3 ชนิด

รูปแบบของการออกแบบส่วนผสม Mixture Design สามารถแบ่งได้ ดังนี้

1. Simplex Lattice ส่วนประกอบทั้งหมดในการทดลอง จะต้องมีสัดส่วนอยู่ในช่วงเดียวกัน และมีการออกแบบการทดลองที่จุดพิคที่อยู่บนแนวแกนในแต่ละด้านของการออกแบบ
2. Simplex Centroid ส่วนประกอบทั้งหมดในการทดลอง จะต้องมีสัดส่วนอยู่ในช่วงเดียวกัน และมีการออกแบบการทดลองที่จุดพิคที่อยู่บนแนวแกนในแต่ละด้านของการออกแบบ และจุดกึ่งกลาง
3. Extreme Vertice สัดส่วนของแต่ละปัจจัยไม่จำเป็นต้องอยู่ในช่วง 0 – 100 % และเป็นารออกแบบการทดลองที่มีข้อจำกัดสัดส่วนหรือมีข้อจำกัดในการทดลอง
4. D-optimal ส่วนประกอบทั้งหมดในการทดลอง มีสัดส่วนที่ต่างกัน เป็นการเลือกค่าที่ดีที่สุดสามารถใช้ในกรณีที่พื้นที่ในการออกแบบมีข้อจำกัดหลายจุดที่สามารถเป็นไปได้การเลือกพิคในการทดลอง จะใช้อัลกอริทึมที่ค่าพิคจะไปตามจุดหลักๆ ใน Design Spec เพื่อหาค่าแนวโน้มของค่าดีเทอร์มิแนนท์ของ $x'x$ ที่มากที่สุด เมื่อได้ครบตามรอบที่กำหนดจะหยุดการสุ่ม แล้วนำ Candidate point ที่ได้มาสร้างเป็นการทดลอง

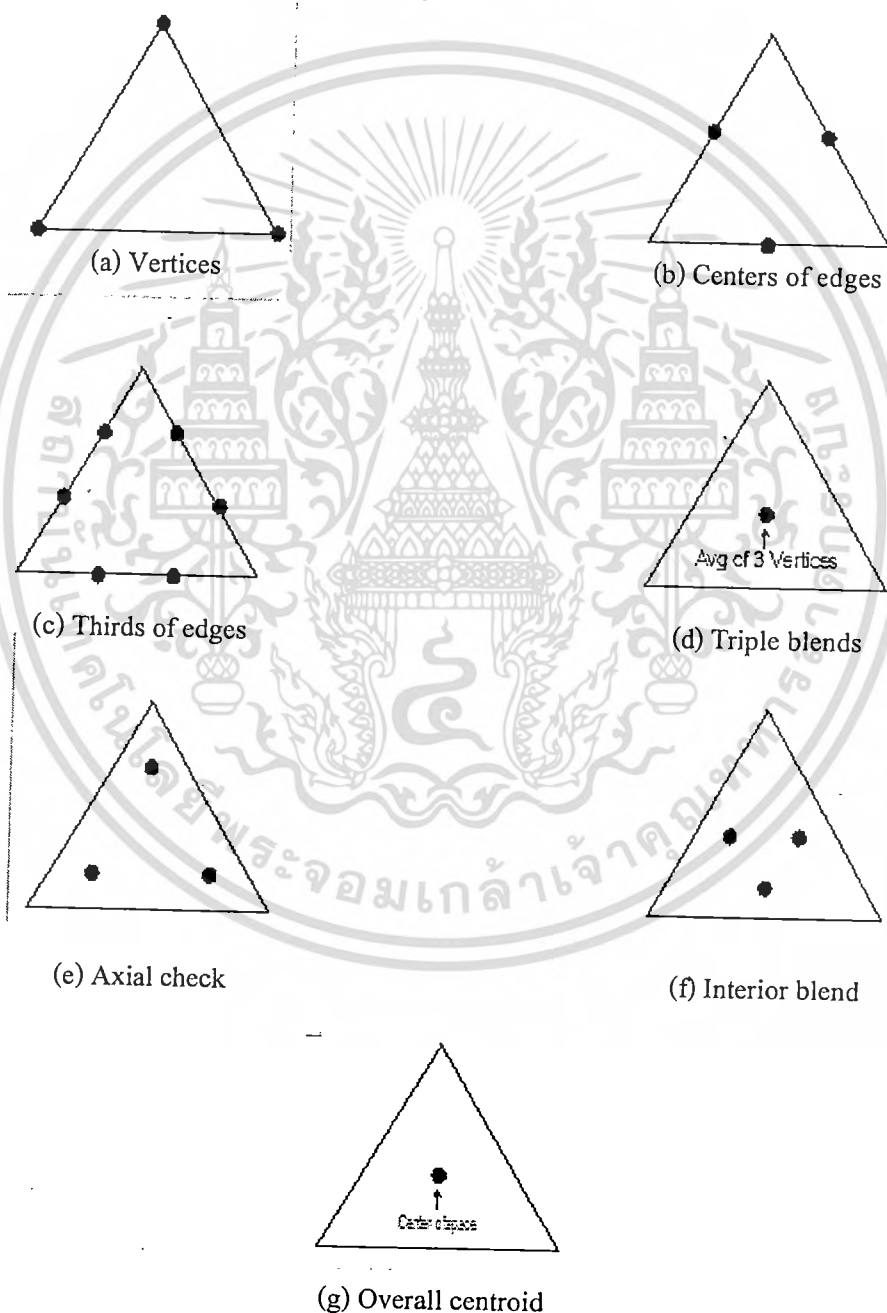
แผนการทดลองแบบผสมสามารถสร้างได้ 2 วิธี คือ

1. แผนอย่างง่ายโดยพิจารณาข้อจำกัดในส่วนประกอบว่ามีข้อกำหนดสูงต่ำเท่าไร แล้วนำมาสร้างพื้นที่ที่เป็นไปได้สำหรับข้อกำหนดของส่วนประกอบทุกตัว หลังจากนั้นจะกำหนดสิ่งทดลองโดยนิยามกำหนดสูตรที่ใช้ส่วนประกอบที่น้อยและมากที่สุดจะอยู่บริเวณมุมของพื้นที่ที่เป็นไปได้ และมักเลือกสูตรที่มีส่วนประกอบทุกตัวในปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งมักอยู่ตรงกลางของพื้นที่ที่เป็นไปได้

2. จากแผนการทดลองมาตรฐาน ซึ่งมักนิยามกำหนดสิ่งทดลองให้เป็นไปตามรูปร่างที่สมมาตรของรูปทรงเรขาคณิต เช่น แผนการทดลองแบบซิมเพลค (simplex design) ซึ่งกำหนดที่จุดยอดของสามเหลี่ยมและจุดมัธยฐาน

2.4.4 จุดอ้างอิงในการทดลอง

ในการเลือกจุดที่จะใช้ในการทดลองนั้นจะเป็นการเลือกจุดจาก Candidate set ที่เป็นไปได้ ซึ่ง Candidate set นั้นสามารถแบ่งเป็นประเภทได้ดังนี้



ภาพที่ 2.33 จุดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การทดสอบความแข็ง

ความแข็ง คือ คุณสมบัติที่สามารถต้านทานหรือทนต่อการเสียรูปแบบพลาสติก โดยปกติเกิดจากการทำให้เป็นรอยจากการกด อย่างไรก็ตามความแข็งอาจรวมถึงความต้านทานการตัด การขีดการขีด และการตัด การทดสอบความแข็งของวัสดุมีหลายวิธี และการทดสอบความแข็งเพียงวิธีเดียวไม่สามารถตอบเกี่ยวกับสมบัติที่แท้จริงของวัตถุได้อย่างสมบูรณ์ บางครั้งอาจจะต้องนำผลการทดสอบความแข็งที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบความแข็งวิธีอื่น โดยใช้ชิ้นงานทดสอบเดียวกัน การทดสอบความแข็งแต่ละวิธีจะมีจุดประสงค์ของการทดสอบความแข็งแตกต่างกันไป เช่น การทดสอบบางวิธีผลการทดสอบบอกถึงความยาก-ง่ายในการแปรรูปวัสดุนั้นๆ หรืออาจบอกถึงความต้านทานการสึกหรอ ความต้านทานต่อการนำไปตกแต่งด้วยเครื่องจักร หรือสมบัติในการที่จะนำไปทำขดลวดสปริง ซึ่งจะเห็นว่าการทดสอบความแข็งให้ความหมายได้กว้างหลายประการ และยังไม่มีการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการทดสอบความแข็งแต่ละวิธีไว้ เพียงแต่มีข้อกำหนดเกี่ยวกับขีดจำกัดของการทดสอบแต่ละวิธีไว้เท่านั้น

2.5.1 วิธีการทดสอบความแข็ง

หากแบ่งประเภทของการทดสอบความแข็ง ตามลักษณะการทดสอบอาจแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

1. การทดสอบความแข็งโดยการขูดขีด ขัดสี (Scratching)
2. การทดสอบความแข็งจากการใช้แรงกดให้เกิดรอยที่ผิว (Indentation)

ซึ่งลักษณะการทดสอบทั้งสองแบบนี้ สามารถจำแนกออกเป็น 5 วิธีแตกต่างกันตามจุดประสงค์ของการใช้งาน หรือปัจจัยที่จะมีผลกระทบต่อวัสดุนั้นๆเมื่อใช้งาน ซึ่งมีวิธีการทดสอบ ดังนี้คือ

1. การวัดความต้านทานต่อการตัดหรือเจาะ (Resistance to cutting or drilling)
2. การวัดความต้านทานต่อการเสียดสี (Resistance to abrasion)
3. การวัดความต้านทานต่อการกดให้เกิดรอยบุ๋มถาวร (Resistance to permanent indentation)
4. การวัดการสะสมพลังงานภายใต้แรงกระแทก (Energy absorption under impact loads)
5. การวัดความต้านทานต่อการขีดข่วน (Resistance to scratching)

2.5.1.1 การวัดความต้านทานต่อการตัดหรือเจาะ

การทดสอบความสามารถในการนำไปตกแต่งด้วยเครื่องจักร (Machinability) เป็นการทดสอบความแข็งโดยการพิจารณาจากความง่ายของการนำไปตัดหรือเจาะด้วยเครื่องจักร ซึ่งเป็นวิธีที่อาศัยประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานกับเครื่องจักร แล้วสรุปว่าวัสดุใดแข็งหรืออ่อนกว่ากันเท่านั้น แต่ไม่สามารถระบุค่าความแข็งเป็นตัวเลขได้ จึงไม่เป็นวิธีการทดสอบความแข็งที่ได้มาตรฐาน

2.5.1.2 การวัดความต้านทานต่อการเสียดสี

การทดสอบการเสียดสี (wear hardness test) เป็นวิธีการทดสอบความแข็งที่พิจารณาจากการสึกหรอของผิววัสดุเมื่อใช้งานที่ต้องเสียดสีกัน ถ้าวัสดุอ่อนกว่าก็จะถูกเสียดสีทำให้เกิดการสึกหรอมากกว่า การทดสอบโดยการเสียดสีนี้อาจจะใช้ตะไบทดสอบได้ (File test) คือ ทำการตะไบที่ผิวงานทดสอบ ถ้าผิวงานแข็งก็จะตะไบไม่เข้าผิวงานสึกหรอน้อย แต่ถ้าผิวงานอ่อนก็จะสามารถตะไบได้ลึก ผิวงานสึกหรอมาก ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าเป็นวิธีตรวจสอบที่ง่าย สะดวกรวดเร็ว แต่ไม่สามารถระบุค่าความแข็งของผิวทดสอบได้และผลการทดสอบก็ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ตรวจสอบด้วย การทดสอบโดยการเสียดสีนี้สามารถระบุได้เพียงว่าวัสดุใดแข็งหรืออ่อนกว่ากันเท่านั้น จึงไม่ใช่วิธีการทดสอบความแข็งที่ได้มาตรฐานเช่นเดียวกัน

2.5.1.3 การวัดความต้านทานต่อการขีดข่วน

การทดสอบการขีดข่วน (Scratch hardness test) เป็นวิธีการทดสอบความแข็งที่ได้รับความสนใจและนิยมใช้ของนักธรณีวิทยาที่ใช้ในการทดสอบความแข็งของหินแร่ การทดสอบการขีดข่วนเป็นวิธีการทดสอบที่สะดวกรวดเร็ว เพราะอาศัยหลักการที่ว่าวัสดุที่แข็งกว่าจะสามารถขีดข่วนให้วัสดุที่อ่อนกว่าเป็นรอยได้ แต่วัสดุที่อ่อนกว่าจะไม่สามารถขีดข่วนให้วัสดุที่แข็งกว่าเป็นรอยได้

2.5.1.4 การวัดการสะสมพลังงานภายใต้แรงกระแทก

การวัดการสะสมพลังงานภายใต้แรงกระแทกจะทดสอบโดยใช้ลูกตุ้มกระทบผิวแล้วสะท้อนกลับ (Rebound hardness test) เป็นวิธีการทดสอบความแข็งโดยการปล่อยลูกตุ้มให้กระทบผิวชิ้นงานทดสอบแล้วพิจารณาค่าความสูงของการสะท้อนกลับของลูกตุ้มหลังการตกกระทบ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าเป็นวิธีการทดสอบความแข็งที่ใช้แรงเคลื่อนที่กระทบผิววัสดุ ดังนั้นบางครั้งจึงเรียกวินิจฉัยการทดสอบความแข็งแบบนี้ว่า การทดสอบความแข็งทางพลวัต (Dynamic hardness test) และเป็นวิธีที่นิยมใช้ทดสอบความแข็งโลหะที่อุณหภูมิสูง เพราะลูกตุ้มจะไม่ได้รับผลกระทบของความร้อน เนื่องจากระยะเวลาที่ตกกระทบและสัมผัสผิวชิ้นงานทดสอบนั้นน้อยมาก จากหลักการทดสอบดังกล่าวนี้ ถูกนำไปสร้างอุปกรณ์ทดสอบความแข็งที่นิยมใช้เรียกว่า ชอร์สเคลิส โรสโคป (Shore-scleroscope) จึงเรียกรูปแบบการทดสอบความแข็งด้วยชอร์สเคลิส โรสโคป

2.5.1.5 การวัดความต้านทานต่อการกดให้เกิดรอยบุ๋มถาวร

การทดสอบโดยการกดให้เกิดรอยบุ๋ม (Indentation hardness test) เป็นวิธีการทดสอบความแข็งที่นิยมใช้ในงานวิศวกรรม เพราะเป็นวิธีการทดสอบที่ได้มาตรฐาน ให้ผลการทดสอบที่ถูกต้องแน่นอนและสามารถระบุค่าความแข็งได้เนื่องจากใช้เครื่องทดสอบที่เป็นมาตรฐาน ในการทดสอบสำหรับหลักการของการทดสอบความแข็งโดยวิธีนี้คือใช้เครื่องทดสอบกดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบ ทำให้เกิดรอยบุ๋ม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถาวร (Permanent indentation) แล้ววัดขนาดความโตหรือความลึกของรอยบุ๋ม ถ้าทดสอบกับวัสดุอ่อนก็จะทำให้เกิดรอยบุ๋มขนาดใหญ่หรือลึกมาก แต่ถ้าทดสอบกับวัสดุแข็งก็จะทำให้เกิดรอยบุ๋มขนาดเล็กหรือตื้นน้อย จากหลักการดังกล่าวถูกนำไปใช้สร้างเครื่องทดสอบมาตรฐานและวิธีการทดสอบที่เป็นมาตรฐาน

2.5.2 การทวนสอบเครื่องทดสอบความแข็ง (Verification of hardness testing machine)

เครื่องทดสอบความแข็งเมื่อถูกใช้งานไปนานๆค่าพิกัดต่างๆของเครื่อง เช่น แรงกด หัวกด อาจมีความคลาดเคลื่อนไปจากเดิมทำให้ค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบผิดพลาดไป จึงต้องมีการทวนสอบเพื่อปรับปรุงสภาพของเครื่องให้อยู่ในพิกัด การทวนสอบเครื่องทดสอบความแข็งสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

2.5.2.1 การทวนสอบทางตรง

การทวนสอบทางตรงเป็นการตรวจสอบพิกัดการทำงานของอุปกรณ์ของเครื่องทดสอบความแข็ง ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนคือ

1. การทวนสอบแรงหัวกด

สำหรับเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนลล์และวิกเกอร์ส จะใช้เครื่องมือวัดขนาดแรงกด (Elastic proving device) ซึ่งในแต่ละเครื่องจะมีแรงกดหลายขนาด ทำการวัดแต่ละขนาดของแรงกดจำนวน 3 ครั้ง เกณฑ์กำหนดความคลาดเคลื่อนของขนาดแรงกดอยู่ในช่วง $\pm 0.2\%$ ตามมาตรฐาน ISO 156 และ 146 สำหรับเครื่องวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ทำการทดสอบเช่นเดียวกันเพียงแต่แรงกดแบ่งออกเป็นแรงกดนำ และแรงกดรวมตามมาตรฐาน ISO 716 เกณฑ์กำหนดความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\pm 0.2\%$ เช่นเดียวกัน

2. การทวนสอบหัวกด

สำหรับหัวกดแบบทรงกลมของเครื่องทดสอบแบบบริเนลล์และร็อคเวลล์ หัวกดต้องเป็นเงาวาวและปราศจากรอยตำหนิ สำหรับหัวกดเพชรรูปพีระมิดและรูปกรวยของเครื่องทดสอบแบบวิกเกอร์และร็อค-เวลล์ ด้านข้างของพีระมิดและกรวยจะต้องเป็นเงาวาว ปราศจากรอยตำหนิ หัวกดของเครื่องทดสอบทั้ง 3 ชนิด จะต้องถูกนำมาวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางมุมของยอดแหลมและวัดความแข็ง ค่าทั้งหมดนี้จะต้องอยู่ในเกณฑ์กำหนดความคลาดเคลื่อนตามมาตรฐาน ISO 156, 146, และ 716 มิฉะนั้นจะไม่ผ่านการทวนสอบ

3. การทวนสอบเครื่องมือวัด

สำหรับเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนลล์และวิกเกอร์ส เครื่องมือวัดความแข็งเป็นแบบไมโครมิเตอร์สำหรับวัดเส้นผ่านศูนย์กลางและเส้นทแยงมุมของรอยกด หลังจากนั้นนำค่าที่ได้มาเทียบกับตารางเพื่อหาค่าความแข็ง เกณฑ์กำหนดความคลาดเคลื่อนตามมาตรฐาน ISO 156 และ 146 กำหนดอยู่ในช่วง $\pm 0.5\%$ สำหรับเครื่องวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ เครื่องมือวัดจะเป็นแบบเครื่องวัดความลึกของรอยกดแล้วอ่านค่าความแข็งได้โดยตรงจากนาฬิกาวัดความแข็ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกณฑ์กำหนดความคลาดเคลื่อนตามมาตรฐาน ISO 716 กำหนดไม่มีค่า $\pm 0.001\%$ หรือประมาณ $\pm 0.5\%$ ของแต่ละหน่วยสเกลที่ใช้วัด

2.5.2.2 การทวนสอบทางอ้อม

การทวนสอบทางอ้อม คือ การใช้แผ่นความแข็งมาตรฐานในการทวนสอบเครื่องทดสอบความแข็งทั้ง 3 ชนิด โดยทดสอบแต่ละขนาดของแรงกดและหัวกด เพื่อตรวจสอบค่าความแข็งที่ได้มาเทียบกับค่าความแข็งของแผ่นความแข็งมาตรฐาน ตามมาตรฐาน ISO

2.5.3 การสอบเทียบแผ่นความแข็งมาตรฐาน (Calibration of standardized block)

แผ่นความแข็งมาตรฐานเมื่อเก็บไว้นานๆ ค่าความแข็งอาจจะเปลี่ยนแปลงได้จึงจำเป็นต้องตรวจสอบและทำการสอบเทียบว่าอยู่ในมาตรฐานหรือไม่ การตรวจสอบแผ่นความแข็งมาตรฐานมีวิธีดังนี้

1. การตรวจสอบด้วยตาเปล่า แผ่นความแข็งต้องเป็นเนื้อเดียวกันตลอดและสม่ำเสมอ มีผิวที่เรียบ
2. แผ่นความแข็งมาตรฐานจะต้องไม่เป็นแม่เหล็ก
3. จะต้องมีความราบสองด้านขนานกัน
4. ผิวราบจะต้องไม่มีรอยขีดข่วน

ขั้นตอนการสอบเทียบแผ่นความแข็งมาตรฐาน

1. เครื่องทดสอบความแข็งที่จะใช้สอบเทียบแผ่นความแข็งมาตรฐานจะต้องผ่านการรับรองในหัวข้อที่กล่าวมาแล้ว การทดสอบจะทำที่อุณหภูมิ 23 ± 5 °C
2. เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ เวลาที่ใช้กดอยู่ระหว่าง 6-8 วินาที เวลากดค้างอยู่บนผิวอยู่ระหว่าง 10-15 วินาที
3. เครื่องทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส เวลาที่ใช้กดอยู่ระหว่าง 6-8 วินาที ความเร็วอยู่ระหว่าง 0.05-1 มม./วินาที
4. เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ เวลาที่ใช้กดอยู่ระหว่าง 1-10 วินาที เวลาที่ใช้กดแรงกดรวมอยู่ระหว่าง 3-5 วินาที
5. ทำการทดสอบหาค่าความแข็ง (Non-uniformity) ซึ่งได้จากการนำค่าความแข็งสูงสุดลดต่ำสุด กำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนไว้ในมาตรฐาน ISO 726, 640 และ 674 ซึ่งเป็นการพิสูจน์ว่าแผ่นความแข็งมาตรฐานอยู่ในเกณฑ์ที่ใช้ได้หรือไม่

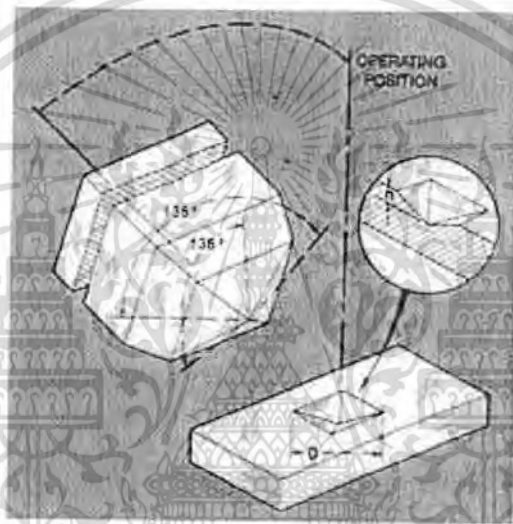
2.5.1 Vickers Micro Hardness

Vickers Micro Hardness คือ การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ซึ่งเป็นการวัดความแข็งในระดับจุลภาค โดยใช้แรงกดขนาดน้อยๆ ตั้งแต่ 50 – 1000 กรัมแรง (gf) หรือ 0.4903 – 9.807 นิวตัน โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถหาค่าความแข็งได้จากสูตรความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงกดหัวเพชรรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมมุมระหว่างด้านประกอบมุมยอดที่อยู่ตรงข้ามเท่ากับ 136° กับพื้นที่ของรอยกดที่เกิดขึ้นผิวของชิ้นงานทดสอบ คือ

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{(2F \sin 136^\circ / 2)}{d^2} = 1.8544 \left(\frac{F}{d^2} \right) \quad (2.4)$$

โดย HV คือ ความแข็งวิกเกอร์ F คือ แรงกด (กรัมแรง) S คือ พื้นที่ของรอยกด (mm^2) และ d คือ ค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นทแยงมุม (mm)



ภาพที่ 2.34 Vickers Micro Hardness

หน่วยที่ใช้วัด คือ Vickers (HV) หรือ Diamond Pyramid Hardness เนื่องจากหัวกดเป็นเพชรรูปพีระมิดทำมุม 136° โดยใช้เวลาในการกด 10-15 วินาที รอยกดที่เกิดขึ้นจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส และความลึกของรอยกดจะมีค่าอยู่ที่ $1/7$ ของความยาวเส้นทแยงมุม

โดยปกติแล้วชิ้นงานที่จะทดสอบต้องมีการเตรียมพื้นผิว หากชิ้นงานมีขนาดเล็ก ยังต้องการความเรียบผิวมาก และในการวัดรอยกดจะใช้กล้องจุลทรรศน์ ที่มีกำลังขยายประมาณ 500 เท่า มีค่าความถูกต้อง ± 0.5 ไมครอน นอกจากนี้ผู้วัดที่แตกต่างกันก็ยังมีค่าความถูกต้องอยู่ที่ ± 0.2 ไมครอน ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการเพิ่มความระมัดระวังให้มากขึ้นและขึ้นกับประสบการณ์ของผู้วัดด้วย

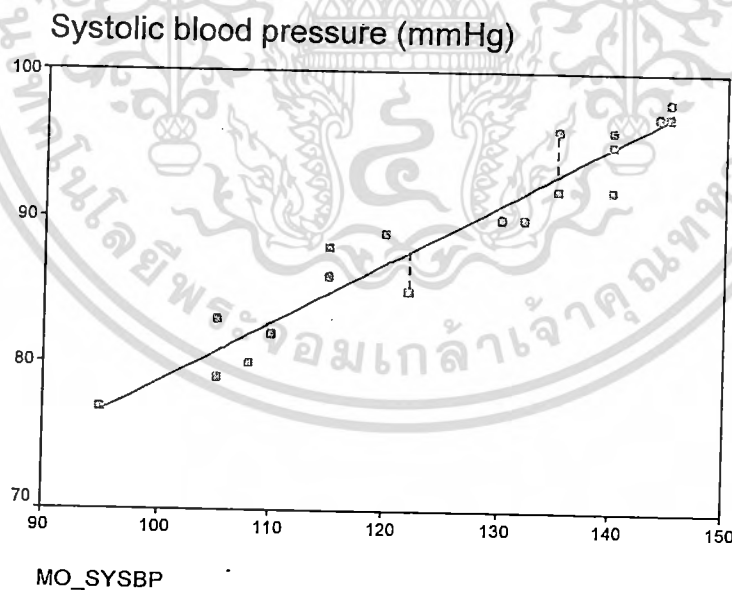
2.6 Regression

การวิเคราะห์การถดถอย เป็นวิธีการทางสถิติอย่างหนึ่งที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป โดยแบ่งเป็นตัวแปรอิสระ (Independent variable) และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปรตาม (Dependent variable) ผลของการศึกษาจะให้ทราบถึง ขนาดของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระที่มีต่อตัวแปรตาม และแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม ในการวิเคราะห์การถดถอย มักเรียกตัวแปรอิสระว่า ตัวทำนาย (Predictor) หรือตัวแปรกระตุ้น (Stimulus variable) ส่วนตัวแปรตาม มักเรียกว่า ตัวแปรตอบสนอง (Response variable) หรือตัวแปรเกณฑ์ (Criterion variable)

2.6.1 Linear Regression

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis) เป็นการวิเคราะห์การถดถอยที่ตัวแปรอิสระส่วนใหญ่เป็นตัวแปรเชิงปริมาณ ส่วนตัวแปรตามเป็นจะต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณเท่านั้น รูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม สามารถแทนได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น (Linear model) ในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (กรณีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย) จะเป็นการนำข้อมูลจากตัวแปรที่ทำการศึกษา มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ที่สามารถบอกแนวโน้มของความสัมพันธ์โดยใช้แผนภาพเส้นตรงแทนได้ และจะทำการหาเส้นตรงที่ดีที่สุดเพื่อเป็นตัวแทนของรูปแบบความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ศึกษา เส้นตรงที่ดีที่สุดจะมีเพียงเส้นเดียว โดยถือหลักการว่าจะต้องมีผลรวมของระยะห่างกำลังสองจากเส้นกราฟถึงทุกๆจุดนั้นมีค่าน้อยที่สุด เรียกหลักการนี้ว่า วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Method of Least Squares)



ภาพที่ 2.35 Linear Regression

จากเส้นตรงดังกล่าวใช้กระบวนการทางสถิติเพื่อหาค่าคงที่และสัมประสิทธิ์สมการ สร้างเป็นแบบจำลองในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ เรียกว่า สมการถดถอยเชิงเส้น หรือสมการพยากรณ์ หลังจากได้แบบจำลองแล้วจึงทำการตรวจสอบความสอดคล้องของแบบจำลอง เพื่อดูว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้น มีความสอดคล้องและเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ โดยมีการทดสอบทางสถิติดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นว่าเป็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ทดสอบความเหมาะสมของโมเดล (เป็นการตรวจสอบว่าตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกันหรือไม่) จะใช้สถิติทดสอบ ANOVA
2. ทดสอบค่าคงที่ และค่าสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอย ทีละตัวโดยใช้สถิติทดสอบ t
3. พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบพหุ (Multiple R) และค่าความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ (Standard Error of Estimate)

กระบวนการดังกล่าวทั้งหมดตั้งแต่เริ่มต้นจนจบจะใช้การคำนวณและการทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ ด้วยการคำนวณตัวเลขเอง หรือสามารถใช้โปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติทำการวิเคราะห์ให้ก็ได้ ข้อตกลงเบื้องต้นในการใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น

1. ตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม มีมาตรวัดเป็น Interval ขึ้นไป (อนุญาตให้ตัวแปรอิสระบางตัว มีมาตรวัดเป็น Norminal หรือ Ordinal ได้บ้าง โดยจะต้องทำการเปลี่ยนตัวแปรอิสระที่มีมาตรวัดเป็น Norminal หรือ Ordinal เหล่านั้น เป็นตัวแปรหุ่น แล้วจึงทำการวิเคราะห์การถดถอย โดยใช้ตัวแปรหุ่นที่เกิดขึ้นแทนตัวแปรเดิมที่มี)
2. ข้อมูลของตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม จะต้องสุ่มมาจากประชากรที่มีการแจกแจงแบบปกติ
3. ตัวแปรอิสระจะต้องไม่มีความสัมพันธ์กันเอง (การเกิดความสัมพันธ์กันเองของตัวแปรอิสระ เรียกว่า การเกิด Multicollinearity เฉพาะในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ)
4. ข้อมูลจะต้องไม่มีความสัมพันธ์ภายในตัวเอง
5. ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการพยากรณ์ จะต้อง
 - 5.1 มีการแจกแจงแบบปกติ (Assumption of Normality)
 - 5.2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0
 - 5.3 มีความแปรปรวนคงที่ (Homogeneity of Variance)
 - 5.4 ความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระกัน (Assumption of Autocorrelation)

ตัวแปรหุ่น (Dummy variable) เป็นการสร้างตัวแปรใหม่ขึ้นใช้แทนตัวแปรเดิม โดยอาศัยชุดตัวเลข 0 และ 1 เรียงประกอบกันเพื่อใช้แทนลักษณะต่างๆ ของข้อมูลในตัวแปรนั้น ซึ่งตัวแปรที่จะนำมาสร้างตัวแปรหุ่น จะต้องเป็นตัวแปรที่บรรจุข้อมูลเชิงคุณภาพ (มาตรวัดเป็นนามบัญญัติ หรืออันดับ)

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการสร้างตัวแปรหุ่น ของตัวแปร “สถานภาพสมรส”

| สถานภาพสมรส (STATUS) | ค่าเดิมของข้อมูล (เป็นรหัส) | ตัวแปรหุ่น | |
|-------------------------|-----------------------------|------------|-------|
| | | STAT1 | STAT2 |
| โสด | 1 | 1 | 0 |
| แต่งงาน | 2 | 0 | 1 |
| อื่นๆ | 3 | 0 | 0 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการสร้างตัวแปรหุ่น ของตัวแปร “ระดับการศึกษา”

| ระดับการศึกษา | ค่าเดิมของข้อมูล | ตัวแปรหุ่น | | | |
|-------------------|------------------|------------|------|------|------|
| | | EDU1 | EDU2 | EDU3 | EDU4 |
| ไม่ได้รับการศึกษา | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| ประถมศึกษา | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| มัธยมศึกษา | 3 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| อาชีวศึกษา | 4 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| อุดมศึกษา | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 |

2.6.1.1 Simple Linear Regression

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย จะประกอบด้วยตัวแปรตาม 1 ตัว และตัวแปรอิสระเพียง 1 ตัว การวิเคราะห์เป็นการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสอง และสร้างรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เป็นการพยากรณ์ค่าของตัวแปรตาม เช่น

- การพยากรณ์ระดับ Carbon monoxide ในผู้สูบบุหรี่ เมื่อทราบปริมาณการสูบบุหรี่ต่อวัน
- การพยากรณ์น้ำหนักของทารก เมื่อทราบอายุของมารดา
- การพยากรณ์ผลการสอบปลายภาค เมื่อทราบผลการสอบกลางภาค เป็นต้น

1. แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (2.5)$$

$$Y' = b_0 + b_1 X \quad (2.6)$$

$$Z'_y = B_1 Z_x \quad (2.7)$$

| | |
|-------------------------|--|
| โดย X, Z_x | คือ ค่าของตัวแปรอิสระในรูปคะแนนดิบ และคะแนนมาตรฐาน |
| Y | คือ ค่าของตัวแปรตาม |
| Y', Z'_y | คือ ค่าพยากรณ์ของตัวแปรตามในรูปคะแนนดิบ และคะแนนมาตรฐาน |
| β_0 และ β_1 | คือ ค่าคงที่ และสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรอิสระในสมการ (ประชากร) |
| b_0 และ b_1 | คือ ค่าคงที่ และสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรอิสระในสมการ (กลุ่มตัวอย่าง) |
| B_1 | คือ สัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรอิสระในสมการ (คะแนนมาตรฐาน) |
| ε | คือ ค่าความคลาดเคลื่อน |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย สมการที่ 2.5 แสดงสมการถดถอยของประชากร สมการที่ 2.6 แสดงสมการถดถอยของกลุ่มตัวอย่าง และสมการที่ 2.7 แสดงสมการถดถอยของกลุ่มตัวอย่าง ในรูปคะแนนมาตรฐาน

2. การหาค่าคงที่ และสัมประสิทธิ์ในสมการ

$$Y' = b_0 + b_1X \quad (2.8)$$

โดย สมการที่ 2.8 แสดงสมการถดถอยของกลุ่มตัวอย่าง สามารถหาค่าของ b_0 และ b_1 ได้จาก สูตร

$$b_0 = \bar{Y} - b_1\bar{X} \quad (2.9)$$

$$b_1 = r_{xy} \frac{S_y}{S_x} \quad (2.10)$$

โดย \bar{Y}, \bar{X} คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปร Y และ X
 r_{xy} คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร X กับ Y

สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11

$$r_{xy} = \frac{N\sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[N\sum X^2 - (\sum X)^2][N\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (2.11)$$

โดย S_y, S_x คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปร Y และ X

3. การหาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการพยากรณ์ (Standard Error of Estimation) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.12 หรือสมการที่ 2.13

$$S_{y.x} = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}{n-2}} \quad (2.12)$$

$$S_{y.x} = S_y \sqrt{\frac{(1-r^2)(n-1)}{n-2}} \quad (2.13)$$

4. การทดสอบความมีนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์การถดถอย มีสมมติฐานของการทดสอบ $H_0: \beta = 0$ และ $H_1: \beta \neq 0$ โดยสถิติทดสอบ เป็นการทดสอบแบบสองทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t = \frac{b - \beta}{\sqrt{\frac{S_{Y.X}^2}{(n-1)S_X^2}}} \quad (2.14)$$

$$df = n-2 \quad (2.15)$$

5. อาณาเขตวิกฤตและการสรุปผล จะปฏิเสธ H_0 เมื่อค่า t ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่า $t_{\alpha, n-2}$ ที่เปิดจากตาราง หรือ t ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่า $-t_{\alpha, n-2}$
6. ช่วงความเชื่อมั่น $(1-\alpha)100\%$ ของการประมาณค่า Y จากสมการที่ 2.8 สามารถใช้ค่า Y' มาประมาณค่า Y ที่จะเกิดขึ้นได้ เมื่อ $X=X_i$ ดังนี้

ช่วงความเชื่อมั่น $(1-\alpha)100\%$ ของ Y

$$Y = Y' \pm t_{\frac{\alpha}{2}, n-2} \cdot S_{Y.X} \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n}\right) + \frac{(X_i - \bar{X})^2}{(n-1)S_X^2}} \quad (2.16)$$

2.6.1.2 Multiple Linear Regressions

จะประกอบด้วยตัวแปรตาม 1 ตัว และ ตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป การวิเคราะห์เป็นการหาขนาดของความสัมพันธ์ และสร้างรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เป็นการพยากรณ์ค่าของตัวแปรตาม โดยใช้ตัวแปรอิสระที่ศึกษา เช่น ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอายุ เพศ ปัญหาในการทำงาน ความขัดแย้งในครอบครัว กับความรู้สึกรบกวนของผู้ป่วยในโรงพยาบาลแห่งหนึ่ง เป็นต้น

1. แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (2.17)$$

$$Y' = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n \quad (2.18)$$

$$Z'_Y = B_1 Z_{X_1} + B_2 Z_{X_2} + \dots + B_n Z_{X_n} \quad (2.19)$$

โดยสมการที่ 2.17 แสดงสมการถดถอยของประชากร สมการที่ 2.18 แสดงสมการถดถอยของกลุ่มตัวอย่าง และสมการที่ 2.19 แสดงสมการถดถอยของกลุ่มตัวอย่างในรูปคะแนนมาตรฐาน การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบเชิงเส้นระหว่างตัวแปรอิสระหลาย ๆ ตัว กับตัวแปรตาม ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองสมการพยากรณ์ จะพิจารณาจากการมีตัวแปรอยู่ในระบบสมการ ซึ่งเรียกว่า การนำตัวแปรเข้าระบบสมการที่นิยม มีทั้งหมด 4 วิธี คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. All Enter ตัวแปรอิสระทุกตัวมีอิทธิพลต่อตัวแปรตามจึงนำตัวแปรอิสระทุกตัวเข้าระบบสมการพร้อมๆกันในทีเดียว
 2. Forward กำหนดให้เริ่มต้นสร้างสมการยังไม่มีตัวแปรใดอยู่ในระบบสมการ จากนั้นให้เริ่มทำการสร้างระบบสมการ โดยนำตัวแปรอิสระที่มีขนาดของอิทธิพลสูงสุด (โดยพิจารณาจากค่า Partial F ไม่ได้ดูจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์) เข้าไปสร้างสมการกับตัวแปรตามก่อน จากนั้นจึงนำตัวแปรอิสระที่เหลือที่มีขนาดของอิทธิพลรองลงไปเข้าทีละตัว และจะหยุดการนำตัวแปรอิสระเข้าระบบสมการหากพบว่าตัวแปรนั้นมีขนาดของอิทธิพลน้อย (ไม่มีนัยสำคัญ) หรือไม่มีอิทธิพลเลย
 3. Backward กำหนดให้เมื่อเริ่มสร้างสมการมีตัวแปรอิสระทุกตัวอยู่ครบในระบบสมการ จากนั้นให้ทำการดึงตัวแปรอิสระที่มีขนาดของอิทธิพลน้อยที่สุด (ไม่มีนัยสำคัญ) ออกจากสมการทีละตัว (โดยพิจารณาจากค่า Partial F) จนกระทั่งเหลือตัวแปรในระบบสมการเฉพาะที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม
 4. Stepwise นำตัวแปรอิสระเข้าสมการทีละตัวเช่นเดียวกับ Forward และเมื่อตัวแปรนั้นเข้าไปอยู่ในระบบสมการแล้ว จะทำการตรวจสอบย้อนกลับโดยวิธี Backward อีกทีหนึ่ง ในทุกครั้งที่มีการนำตัวแปรอิสระเข้าสมการ
- สำหรับการประมาณค่าคงที่ และสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ จะใช้วิธีการประมาณที่เรียกว่า การประมาณโดยวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimation: MLE) โดยวิธีดังกล่าวนี้สามารถประมาณค่าคงที่ และสัมประสิทธิ์ในสมการได้ทั้งในกรณีที่ตัวแปรอิสระมีจำนวน 1 ตัว หรือมากกว่า 1 ตัว โดยมีข้อกำหนดเพิ่มเติมสำหรับตัวแปรอิสระแต่ละตัว คือ ตัวแปรอิสระจะต้องไม่มีความสัมพันธ์กันเอง (Intercollinearity หรือเกิด Multicollinearity) การหาค่าคงที่ และสัมประสิทธิ์ในสมการ จะใช้วิธีการคำนวณโดยรูปแบบเมตริกซ์ ซึ่งในที่นี้จะไม่ขอกล่าวถึง

2.7 ANOVA

เป็นวิธีการทดสอบสมมติฐานทางสถิติเพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย (Mean) ของประชากรที่มีตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป

2.7.1 จุดเด่นของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) เป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ทดสอบความแตกต่างระหว่าง ค่าเฉลี่ย (Mean) ของกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป อันเกิดจากการจัดกระทำที่ต่างกัน จุดเด่นของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

1. ใช้ในการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยจากกลุ่มตัวอย่างมากกว่า 2 กลุ่มขึ้นไป
 2. ใช้วิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการวิจัยที่ออกแบบซับซ้อนหรือมีตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัวได้
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สามารถทดสอบได้ว่าตัวแปรอิสระสองตัวหรือมากกว่ามีปฏิสัมพันธ์ (interaction) กันหรือไม่

2.7.2 ข้อตกลงเบื้องต้น

เนื่องจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนใช้ F เป็นสถิติทดสอบ โดยที่ F เป็นอัตราส่วนระหว่างความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Mean Square Between) กับความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Mean Square Within) การวิเคราะห์ความแปรปรวนจึงมีข้อตกลงเบื้องต้นเกี่ยวกับลักษณะข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ดังนี้

1. กลุ่มตัวอย่างได้มาโดยสุ่มจากประชากร (Random Sampling) และหากกลุ่มตัวอย่างเลือกมาโดยการสุ่มจากประชากรที่มีการกระจายเป็นโค้งปกติ ในการคำนวณค่า F ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Mean Square Between) และความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Mean Square Within) จะเป็นอิสระจากกัน

2. ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์จะต้องได้มาจากประชากรที่มีความแปรปรวนเท่ากันทุกกลุ่ม (Variance Homogeneity)

3. ความเป็นปกติ (Normality) ตัวอย่างแต่ละกลุ่มสุ่มมาจากประชากรที่มีการแจกแจงปกติ หากจำเป็นต้องแปลงข้อมูล (Transformation) ให้มีการแจกแจงแบบโค้งปกติก่อน หรือเพิ่มตัวอย่างให้มีขนาดมากขึ้น และใช้กลุ่มตัวอย่างที่มีขนาดเท่าๆ กันในแต่ละกลุ่มจะหลีกเลี่ยงการละเมิดข้อตกลงข้อนี้ได้

4. ข้อมูลของตัวแปรตามที่จะนำมาวิเคราะห์ต้องอยู่ในมาตราอันดับหรืออัตราส่วน ส่วนตัวแปรอิสระเป็นตัวแปรประเภทพหุวิภาค (Polytomous)

2.7.3 หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ความแปรปรวนของข้อมูลหรือคะแนน หรือค่าการวัดนั้น พิจารณาจากแหล่งที่มา แบ่งได้เป็น 3 แหล่ง คือ

1. ความแปรปรวนรวม (Total group Variance หรือ mean square total: MS_T) เป็นความแปรปรวนอันเกิดจากคะแนนแต่ละตัวเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยของกลุ่มรวม

2. ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between-Treatment Variance หรือ mean square between group: MS_B) เป็นความแปรปรวนของค่าตัวแปรตามระหว่างตัวแปรต้นแต่ละกลุ่ม ซึ่งความแปรปรวนที่เกิดขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากอิทธิพลของตัวแปรต้น หรืออาจเกิดจากอิทธิพลของตัวแปรต้นเกิดขึ้นอย่างสุ่ม (Chance) ที่เนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างตัวอย่างหรือเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการทดลอง เช่น ใช้การวัดที่แตกต่างกัน

3. ความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within Treatment Variance หรือ mean square within group: MS_W) เป็นความแปรปรวนอันเกิดจากคะแนนแต่ละตัวในแต่ละกลุ่มเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่ม ซึ่งความแปรปรวนชนิดนี้ คือ ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ความแปรปรวน เป็นการนำความแปรปรวนของตัวแปรหรือปรากฏการณ์มาแบ่งเป็นส่วน ๆ ตามความต้องการของผู้วิจัย แล้วนำความแปรปรวนแต่ละส่วนมาเปรียบเทียบกับตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย กล่าวคือ การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการเปรียบเทียบความแปรปรวนอันเกิดจากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่ม ซึ่งเป็นผลของตัวแปรอิสระกับความแปรปรวนภายในกลุ่มหรือความคลาดเคลื่อนว่าตัวใดมีค่ามากกว่ากัน ในการทดสอบสมมติฐานจึงใช้อัตราส่วนของความแปรปรวนอันเกิดจากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่ม (Between-group Variance) กับความแปรปรวนภายในกลุ่ม อันเกิดจากความคลาดเคลื่อน (Within-group หรือ Error Variance) เป็นหลักในการตัดสินใจ และเรียกอัตราส่วนนี้ว่า F-ratio

2.7.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

2.7.4.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว

การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว หรือ One-way ANOVA เป็นวิธีการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นตัวเดียวกับตัวแปรตามเพียงตัวเดียว โดยที่ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอาจมีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพ (Qualitative Variable) ที่จำแนกออกเป็นระดับหรือประเภทต่าง ๆ เช่น เก่ง-ปานกลาง-อ่อน ดีมาก-ดี-พอใช้-แย่มาก เป็นต้น ส่วนตัวแปรตามอาจมีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ (Quantitative Variable) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นว่าจะส่งผลอย่างไรกับตัวแปรตาม ตามสมมติฐานการวิจัยที่กำหนดไว้ สูตรและตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สูตรความแปรปรวนทางเดียว

| Source of Variation | Sum of Squares | Degree of freedom | Mean square | F-statistic |
|----------------------------|--|-------------------|-------------------------|-----------------------|
| Between groups (Treatment) | $SSB = \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n_i} - \frac{T^2}{n}$ | k-1 | $MSB = \frac{SSB}{k-1}$ | $F = \frac{MSB}{MSW}$ |
| Within groups (Error) | $SSW = SST - SSB$ | n-k | $MSW = \frac{SSW}{n-k}$ | |
| Total | $SST = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}^2 - \frac{T^2}{n}$ | n-1 | | |

โดย $SST = SSB + SSW$ จากตารางที่ 2.3 สามารถเขียนโดยสรุปได้ดังตารางที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 สรุปสูตรความแปรปรวนทางเดียว

| Source of Variance | df | Sum Square (SS) | Mean Square (MS) | F-ratio |
|--------------------|-----|-----------------|------------------|-----------------------|
| Between Groups | k-1 | SSB | MSB | $f = \frac{MSB}{MSW}$ |
| Within Groups | n-k | SSW | MSW | |
| Total | n-1 | SST | | |

2.7.4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง หรือ Two-way ANOVA เป็นวิธีการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นซึ่งเป็นสิ่งทดลองจำนวน 2 ตัวกับตัวแปรตามเพียงตัวเดียว โดยที่ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอาจมีลักษณะเชิงคุณภาพที่จำแนกออกเป็นระดับหรือประเภทต่างๆ ส่วนตัวแปรตามมีลักษณะเชิงปริมาณ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นว่าจะส่งผลอย่างไรกับตัวแปรตาม ตามสมมติฐานการวิจัยที่กำหนดไว้โดยที่การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง นอกจากจะสามารถศึกษาผลของตัวแปรทั้งสองตัวไปพร้อมๆ กันแล้ว ยังสามารถศึกษาผลร่วม (Interaction) ระหว่างตัวแปรทั้งสองตัวด้วยว่าตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นตัวหนึ่งนอกจากจะส่งผลต่อตัวแปรตามแล้ว ยังส่งผลใดๆต่อตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอีกตัวแปรหนึ่งหรือไม่

2.7.5 การทดสอบเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple comparisons)

ในการทดสอบ F-test จะเห็นว่าเป็นการทดสอบโดยรวม (Over all test) ซึ่งเป็นการทดสอบว่าจะมีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันหรือไม่ ถ้าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Significant) ก็จะบอกเพียงว่ามีค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 1 คู่ที่มีค่าแตกต่างกันแต่จะไม่บอกว่าเป็นคู่ใด ซึ่งจะต้องทำการทดสอบหลังการวิเคราะห์ (Post-hoc test or postetior) โดยวิธีการเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple comparisons) ซึ่งมีหลายวิธีในโปรแกรม SPSS ที่นิยมใช้ โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

- 1) การเปรียบเทียบรายคู่ เมื่อค่าความแปรปรวนแต่ละกลุ่มไม่แตกต่างกัน ได้แก่ LSD (Least-significant), Bonferroni, Sidak, Shceffer, RE-D-WF, R-E-G-WQ, S-N-K (Student-Nbewman-Keuls), Turkey, Turkey's-b, Duncan, Hochberg's GT2, Gabriel, Waller-Duncan, Dunett
- 2) การเปรียบเทียบรายคู่ เมื่อค่าความแปรปรวนแต่ละกลุ่มแตกต่างกัน ได้แก่ Tamhane's t2, Dunnett's t3, Gamea-Howell, Dunnett's C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากการผลิตผลิตภัณฑ์จากพิวเตอร์เป็นการผลิตในอุตสาหกรรมขนาดเล็กถึงขนาดกลาง และการผลิตส่วนใหญ่อยู่ในประเทศบราซิล และประเทศกลุ่มอาเซียนโดยเฉพาะประเทศไทยและมาเลเซีย [3, 4] การวิจัยเกี่ยวกับโลหะชนิดนี้จึงอาจจะอยู่ในวงจำกัด ซึ่งจากการสำรวจผลงานวิจัยที่ปรากฏมาก่อน ยังไม่พบผลการศึกษาเกี่ยวกับพิวเตอร์ที่เผยแพร่ในเอกสารทางวิชาการใดๆ ทั้งในระดับชาติและระดับนานาชาติ แต่พบว่ามีการศึกษาเกี่ยวกับอัลลอยระหว่างดีบุก ทองแดง และพลวง ในการทำเป็นโลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่ว (Lead-free solders) ที่ใช้กับอุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นอัลลอยที่มีส่วนผสมจากธาตุชนิดเดียวกันกับพิวเตอร์แบบไร้สารตะกั่ว แต่ในการศึกษาดังกล่าวเป็นการศึกษาในเรื่องของจุดหลอมเหลวของอัลลอย [15-18]

ความแข็งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการขึ้นรูปโลหะ โดยทั่วไปแล้วโลหะที่มีความแข็งสูงจะขึ้นรูปได้ยากและมีโอกาสเกิดการแตกร้าวได้ง่ายกว่าโลหะที่มีความแข็งต่ำ นอกจากนี้โลหะที่มีความแข็งสูงจะสามารถทนต่อการสึกหรอ หรือทนต่อการขีดขีดได้ดีกว่าโลหะที่มีความแข็งต่ำ [11, 19] ถึงแม้เป็นที่ทราบกันดีว่า ส่วนผสมและโครงสร้างจุลภาคมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับความแข็งของโลหะ [11] แต่ยังไม่พบเอกสารทางวิชาการเกี่ยวกับการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมหรือโครงสร้างจุลภาคกับความแข็งของพิวเตอร์โดยตรง ซึ่งจากการสำรวจผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ได้มีบทความวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของโลหะชนิดต่างๆ กับส่วนผสมและโครงสร้างจุลภาค ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า สำหรับวัสดุในกลุ่มโลหะความแข็งเป็นคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับส่วนผสมและโครงสร้างจุลภาคของโลหะ โดยโลหะแต่ละชนิดจะมีความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับส่วนผสมและโครงสร้างจุลภาคของโลหะในรูปแบบที่แตกต่างกันไป [12-14, 20-26] และพบว่าได้มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับส่วนผสมอีกด้วย [22]

สำหรับวิธีการออกแบบของผสม เป็นวิธีการทางสถิติที่เรียกว่า วิธีพื้นผิวผลตอบ (Response surface method) ชนิดหนึ่ง ที่สามารถใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติที่ต้องการศึกษาของของผสมกับสัดส่วนขององค์ประกอบแต่ละชนิดในของผสมนั้น โดยการศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าวจะทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และแผนภาพ Contour plot ที่ได้จากแบบจำลองดังกล่าว ซึ่งวิธีการออกแบบของผสมมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น Simplex lattice design, Simplex centroid design, Extreme vertice design และ D-optimal design นอกจากนี้การใช้วิธีการออกแบบของผสมยังช่วยลดจำนวนการทดลองลงได้เป็นจำนวนมาก เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทดลองแบบลองผิดลองถูก (Trial and error) ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า การประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบของผสมสามารถใช้ได้ดีกับการวิจัยด้านต่างๆ หลายด้าน เช่น วัสดุศาสตร์ อาหาร และยา [27-30]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ดีบุก (Sn) ซึ่งเป็นส่วนประกอบพื้นฐานของโลหะผสมพิวเตอร์ และจะทำการเติม ทองแดง (Cu) และพลวง (Sb) ลงไปในสัดส่วนต่างๆ ตารางที่ 3.1 แสดงจุดหลอมเหลวและความแข็งของธาตุแต่ละชนิดที่ใช้เป็นส่วนผสมของพิวเตอร์

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของดีบุก (Sn) ทองแดง (Cu) และพลวง (Sb)

| ธาตุ | จุดหลอมเหลว (°C) | ความแข็ง (kg/mm ²) |
|-------------|------------------|--------------------------------|
| ดีบุก (Sn) | 231.97 | 7 - 9 |
| ทองแดง (Cu) | 1084 | 77 - 99 |
| พลวง (Sb) | 630.63 | 50 - 69 |

3.2 การออกแบบการทดลองด้วย Design Expert Software

- 1) เลือกการทดลองแบบ Mixture D-optimal Design ใน Design Expert Software Version 8.0.4 เนื่องจากการทดสอบที่มีข้อจำกัดของแต่ละธาตุ และเมื่อปริมาณส่วนผสมตัวใดตัวหนึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ปริมาณส่วนประกอบที่เหลือเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วย
- 2) กำหนดจำนวนธาตุ ผลรวมของแต่ละส่วนผสม หน่วยของปริมาณธาตุ และขอบเขตของธาตุในการทดลอง ในการกำหนดขอบเขตของแต่ละธาตุจะพิจารณาจากปริมาณส่วนผสมของแต่ละธาตุในโลหะผสมพิวเตอร์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน และตามมาตรฐาน ASTM โดยมีการกำหนดค่าขอบเขตดังนี้ ดีบุก (Sn) 89-100 % ทองแดง (Cu) 0-3 % และพลวง (Sb) 0-8 % โดยมีผลรวมของส่วนผสมทั้งหมด คือ 100 %
- 3) กำหนดจุด (Candidate Points) ที่จะทำการทดลอง โดยโปรแกรม Design Expert จะทำการแนะนำส่วนผสมในการทดลองให้จากทฤษฎีการเลือกจุดในการทดลอง และจากจุดที่เกิดการทดสอบบ่อยๆ ซึ่งในการศึกษานี้ได้เลือกใช้ทุกจุดในการทดลองตามที่โปรแกรม Design Expert แนะนำให้ ทั้งหมด 16 การทดลอง
- 4) เลือกจำนวนผลตอบสนอง (Response) ที่ต้องการศึกษา ทำการกำหนดชื่อ และหน่วยของผลตอบสนองที่สนใจ สำหรับการทดสอบความแข็ง คือ Hardness มีหน่วยเป็น HV
- 5) โปรแกรม Design Expert จะทำการออกแบบส่วนผสมในการทดลองให้ ว่าควรมีจำนวนการทดลองเท่าไร และในแต่ละการทดลองควรใช้ส่วนผสมใด สำหรับในงานวิจัยนี้มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 16 การทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 จุดการทดลอง (Candidate Point) ของแต่ละการทดลอง

| No. | wt%Sn | wt%Cu | wt%Sb |
|-----|-------|-------|-------|
| 1 | 92 | 0 | 8 |
| 2 | 97 | 3 | 0 |
| 3 | 98.5 | 1.5 | 0 |
| 4 | 97 | 3 | 0 |
| 5 | 100 | 0 | 0 |
| 6 | 89 | 3 | 8 |
| 7 | 92 | 0 | 8 |
| 8 | 90.5 | 1.5 | 8 |
| 9 | 97.33 | 0 | 2.67 |
| 10 | 94.5 | 1.5 | 4 |
| 11 | 93 | 3 | 4 |
| 12 | 93 | 3 | 4 |
| 13 | 92.5 | 1.5 | 6 |
| 14 | 89 | 3 | 8 |
| 15 | 95.75 | 2.25 | 2 |
| 16 | 100 | 0 | 0 |

3.3 ชิ้นงานทดสอบ

ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ จะทำการหลอมส่วนผสมต่างๆตามที่ได้ออกแบบส่วนผสมไว้ในเบ้าหลอมกราไฟต์ แล้วเทลงในแม่พิมพ์ที่ทำมาจากทองแดง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศลงสู่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการตรวจสอบส่วนผสมของชิ้นงานทดสอบด้วยวิธี Spark-OES โดยใช้ Spectrometer ยี่ห้อ Spectro รุ่น Spectro lab M-8

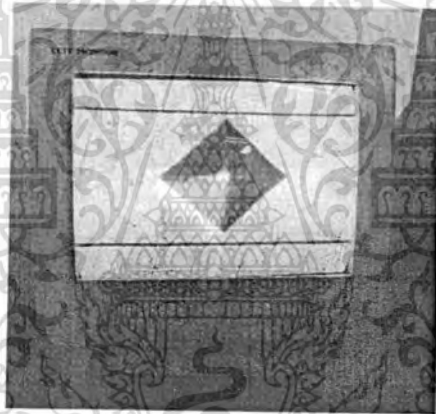
3.4 การทดสอบความแข็งและโครงสร้างจุลภาค

ทำการทดสอบความแข็งของชิ้นงานทดสอบด้วยวิธี Vickers Micro Hardness โดยเครื่อง Hardness Testing Machine ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น HM-113 ดังแสดงในภาพที่ 3.1 ซึ่งเป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรที่มีลักษณะเป็นพีระมิดฐานสี่เหลี่ยม ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา กดลงบนชิ้นงานด้วยแรงขนาด 0.025 kgf เป็นเวลา 10 วินาที รอยกดที่เกิดขึ้นจะเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังแสดงในภาพที่ 3.2 โดยในการวัดค่าความแข็งนี้จะทำการวัด 3 ครั้งต่อ 1 ชิ้นงาน แล้วหาค่าเฉลี่ยของความแข็งออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.1 เครื่องทดสอบความแข็ง



ภาพที่ 3.2 ลักษณะของรอยกด

ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบ จะทำการกัดชิ้นงานด้วยด้วยสารละลาย HCl ผสมกับ Ethanol แล้วส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงเพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างจุลภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบความแข็ง

ผลการทดสอบความแข็งด้วยวิธี Vickers Micro Hardness ของชิ้นงานทดสอบที่มีส่วนผสมต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความแข็งด้วยวิธี Vickers Micro Hardness ของชิ้นงานทดสอบ

| Run | Sn | Cu | Sb | HV |
|-----|--------|------|------|-------|
| 1 | 92.00 | 0.00 | 8.00 | 20.03 |
| 2 | 97.00 | 3.00 | 0.00 | 16.67 |
| 3 | 98.50 | 1.50 | 0.00 | 15.67 |
| 4 | 97.00 | 3.00 | 0.00 | 16.73 |
| 5 | 100.00 | 0.00 | 0.00 | 9.83 |
| 6 | 89.00 | 3.00 | 8.00 | 24.43 |
| 7 | 92.00 | 0.00 | 8.00 | 20.13 |
| 8 | 90.50 | 1.50 | 8.00 | 26.63 |
| 9 | 97.33 | 0.00 | 2.67 | 16.27 |
| 10 | 94.50 | 1.50 | 4.00 | 21.97 |
| 11 | 93.00 | 3.00 | 4.00 | 21.23 |
| 12 | 93.00 | 3.00 | 4.00 | 21.57 |
| 13 | 92.50 | 1.50 | 6.00 | 17.5 |
| 14 | 89.00 | 3.00 | 8.00 | 24.2 |
| 15 | 95.75 | 2.25 | 2.00 | 23.93 |
| 16 | 100.00 | 0.00 | 0.00 | 9.9 |

4.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและส่วนผสม

1. Sequential Model Sum of Squares

จะเลือกแบบจำลองที่มีกำลังสูงที่สุด และมีค่า P-value หรือ Prob > F ที่มีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 เมื่อพิจารณาแบบจำลองจะพบว่า แบบจำลองที่มีกำลังสูงที่สุด คือ Mean เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ 5878.672 และแบบจำลองที่มีค่า P-Value > F ที่น้อยที่สุด นั่นคือ แบบ Linear และ Cubic มีค่า P-Value > F น้อยกว่า 0.001 ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ Sequential Model Sum of Squares ของความแข็ง (HV)

| Sequential Model Sum of Squares | | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|--------------------|------------------|
| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F | |
| Mean vs Total | 5878.672 | 1 | 5878.672 | | | |
| <u>Linear vs Mean</u> | <u>274.441</u> | <u>2</u> | <u>137.2205</u> | <u>20.94664</u> | <u>< 0.0001</u> | <u>Suggested</u> |
| Quadratic vs Linear | 27.63968 | 3 | 9.213227 | 1.601667 | 0.2503 | |
| Sp Cubic vs Quadratic | 0.985983 | 1 | 0.985983 | 0.156957 | 0.7012 | |
| Cubic vs Sp Cubic | 55.359 | 3 | 18.453 | 94.00811 | < 0.0001 | |
| Quartic vs Cubic | 1.08425 | 1 | 1.08425 | 57.98126 | 0.0006 | Aliased |
| Residual | 0.0935 | 5 | 0.0187 | | | |
| <u>Sp Quartic vs Quadratic</u> | <u>22.38191</u> | <u>3</u> | <u>7.460638</u> | <u>1.486148</u> | <u>0.2991</u> | <u>Suggested</u> |
| Quartic vs Sp Quartic | 35.04732 | 2 | 17.52366 | 937.0942 | < 0.0001 | Aliased |
| Residual | 0.0935 | 5 | 0.0187 | | | |
| Total | 6238.276 | 16 | 389.8922 | | | |

2. Lack of Fit Tests

จะเลือกแบบจำลองที่มีค่า ค่า P-Value หรือ Prob > F มากกว่าค่านัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 เมื่อพิจารณาแบบจำลองจะพบว่าแบบจำลอง ที่มี P-Value หรือ Prob > F ที่มากกว่าค่านัยสำคัญ 0.05 ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมาะสม นั่นคือ แบบ Cubic มีค่า P-Value > F มากที่สุดเท่ากับ 0.0006 ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ Lack of Fit ของ Hardness

| Lack of Fit Tests | | | | | | |
|-------------------|----------------|----|-------------|----------|------------------|-----------|
| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F | |
| Linear | 85.06892 | 8 | 10.63361 | 568.6425 | < 0.0001 | Suggested |
| Quadratic | 57.42924 | 5 | 11.48585 | 614.2164 | < 0.0001 | |
| Special Cubic | 56.44325 | 4 | 14.11081 | 754.5889 | < 0.0001 | |
| Cubic | 1.08425 | 1 | 1.08425 | 57.98126 | 0.0006 | |
| Special Quartic | 35.04732 | 2 | 17.52366 | 937.0942 | < 0.0001 | Suggested |
| Quartic | 0 | 0 | | | | Aliased |
| Pure Error | 0.0935 | 5 | 0.0187 | | | |

3. Model Summary Statistics

จะเลือกแบบจำลองที่มี Standard Deviation หรือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีค่าน้อยๆ ค่า R-Squared, Adjusted R-Squared และ Predicted R-Squared ควรมีค่าเข้าใกล้ 1 และ PRESS (Predicted Residual Error Sum of Square) ควรจะมีค่าน้อยๆ เมื่อพิจารณาแบบจำลองจะพบว่าแบบจำลองที่มี

- Standard Deviation น้อยที่สุดคือ Quartic มีค่าเท่ากับ 0.136748
- ค่า R-Squared ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุด คือ Quartic มีค่าเท่ากับ 0.99974
- Adjusted R-Squared ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุด คือ Quartic มีค่าเท่ากับ 0.99922
- Predicted R-Squared ที่มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด คือ 0.692945 มีค่าเท่ากับ 0.692945
- PRESS น้อยที่สุดคือ Quadratic มีค่าเท่ากับ 110.418

เมื่อพิจารณาค่าทางสถิติของแต่ละแบบจำลอง พบว่าแบบจำลองที่มีความเหมาะสมมากที่สุด คือ Special Quartic ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ Model Summary Statistics ของ Hardness

| Model Summary Statistics | | | | | | |
|--------------------------|-----------------|-----------------|--------------------|---------------------|-----------------|------------------|
| Source | Std. Dev. | R-Squared | Adjusted R-Squared | Predicted R-Squared | PRESS | |
| <u>Linear</u> | <u>2.559483</u> | <u>0.763177</u> | <u>0.726743</u> | <u>0.678247</u> | <u>115.7036</u> | <u>Suggested</u> |
| Quadratic | 2.39839 | 0.840038 | 0.760058 | 0.692945 | 110.418 | |
| Special Cubic | 2.506364 | 0.84278 | 0.737967 | 0.635407 | 131.1091 | |
| Cubic | 0.443048 | 0.996725 | 0.991812 | | + | |
| <u>Special Quartic</u> | <u>2.240562</u> | <u>0.902279</u> | <u>0.790598</u> | <u>-0.57937</u> | <u>567.9482</u> | <u>Suggested</u> |
| Quartic | 0.136748 | 0.99974 | 0.99922 | | + | Aliased |

4. แบบจำลองที่เหมาะสม

เมื่อพิจารณา Sequential Model Sum of Squares, Lack of Fit Tests และ Model Summary Statistics จะพบว่าแบบจำลองที่มีความเหมาะสมมากที่สุด สำหรับการวิเคราะห์ Fit Summary คือแบบจำลองแบบ Special Quartic

4.3.4 การวิเคราะห์ Model ใน โปรแกรม Design Expert

เลือกรูปแบบของสมการตามที่โปรแกรม Design Expert ได้ทำการแนะนำไว้ใน Fit Summary โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้รูปแบบสมการ Special Quartic

4.3.5 การวิเคราะห์ ANOVA ใน โปรแกรม Design Expert

โปรแกรม Design Expert จะทำการวิเคราะห์รูปแบบสมการที่เลือก และคำนวณสมการสำหรับการทำนายผลตอบสนอง ดังแสดงในตารางที่ 4.5-4.7 รูปแบบของสมการทำนายคือ Special Quartic โปรแกรม Design Expert จะทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการ ก่อนจะคำนวณสมการทำนาย ซึ่งสมการทำนายค่าความแข็ง คือ

$$\begin{aligned} \text{Hardness} = & 9.89A - 141.41B + 22.26C + 240.39AB + 9.60AC + 237.55BC + 57.53A^2BC + \\ & 686.51AB^2C - 589.24ABC^2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

เมื่อ A คือ ปริมาณของดีบุก (Sn) B คือ ปริมาณของทองแดง (Cu) และ C คือ ปริมาณของพลวง (Sb)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความแข็ง

| Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III] | | | | | | |
|--|----------------|----|-------------|----------|------------------|-------------|
| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F | |
| Model | 324.46262 | 8 | 40.55783 | 8.079059 | 0.0062 | significant |
| Linear Mixture | 274.44103 | 2 | 137.2205 | 27.33412 | 0.0005 | |
| AB | 18.533332 | 1 | 18.53333 | 3.691812 | 0.0961 | |
| AC | 1.1119734 | 1 | 1.111973 | 0.221503 | 0.6522 | |
| BC | 15.996267 | 1 | 15.99627 | 3.186433 | 0.1174 | |
| A ² BC | 0.1344986 | 1 | 0.134499 | 0.026792 | 0.8746 | |
| AB ² C | 4.544672 | 1 | 4.544672 | 0.905292 | 0.3731 | |
| ABC ² | 17.080171 | 1 | 17.08017 | 3.402345 | 0.1076 | |
| Residual | 35.140822 | 7 | 5.020117 | | | |
| Lack of Fit | 35.047322 | 2 | 17.52366 | 937.0942 | < 0.0001 | significant |
| Pure Error | 0.0935 | 5 | 0.0187 | | | |
| Cor Total | 359.60344 | 15 | | | | |

ตารางที่ 4.6 ค่าทางสถิติของสมการทำนายผลของความแข็ง

| | | | |
|-----------|-------|----------------|------|
| Std. Dev. | 0.30 | R-Squared | 0.82 |
| Mean | 0.54 | Adj R-Squared | 0.56 |
| C.V. % | 56.09 | Pred R-Squared | N/A |
| PRESS | N/A | Adeq Precision | 7.32 |

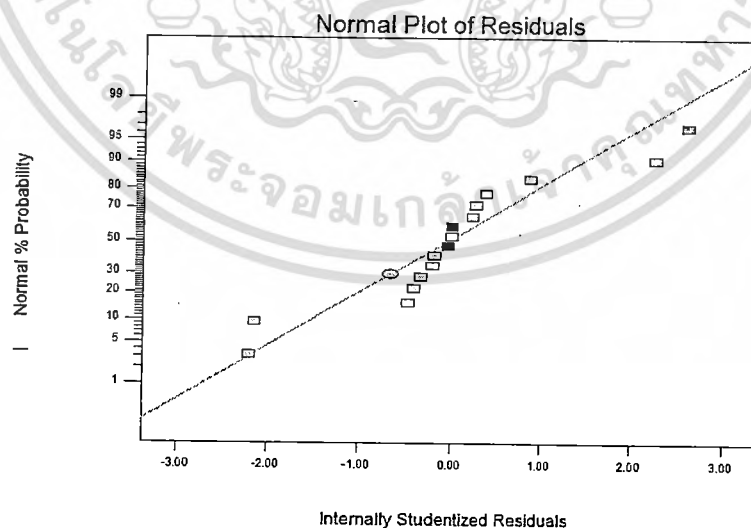
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์เพื่อหาสมการทำนายค่าความแข็ง

| Component | Coefficient | df | Standard Error | 95% CI | | VIF |
|-------------------|-------------|----|----------------|----------|---------|--------|
| | Estimate | | | Low | High | |
| A-Sn | 9.89 | 1 | 1.58 | 6.15 | 13.64 | 2.77 |
| B-Cu | -141.41 | 1 | 91.61 | -358.04 | 75.22 | 940.44 |
| C-Sb | 22.26 | 1 | 6.07 | 7.91 | 36.60 | 25.14 |
| AB | 240.39 | 1 | 125.11 | -55.45 | 536.22 | 420.46 |
| AC | 9.60 | 1 | 20.41 | -38.65 | 57.86 | 19.32 |
| BC | 237.55 | 1 | 133.08 | -77.13 | 552.23 | 414.73 |
| A ² BC | 57.53 | 1 | 351.47 | -773.58 | 888.64 | 18.55 |
| AB ² C | 686.51 | 1 | 721.53 | -1019.63 | 2392.65 | 24.94 |
| ABC ² | -589.24 | 1 | 319.45 | -1344.63 | 166.14 | 14.35 |

4.3.6 การวิเคราะห์ Diagnostics ในโปรแกรม Design Expert

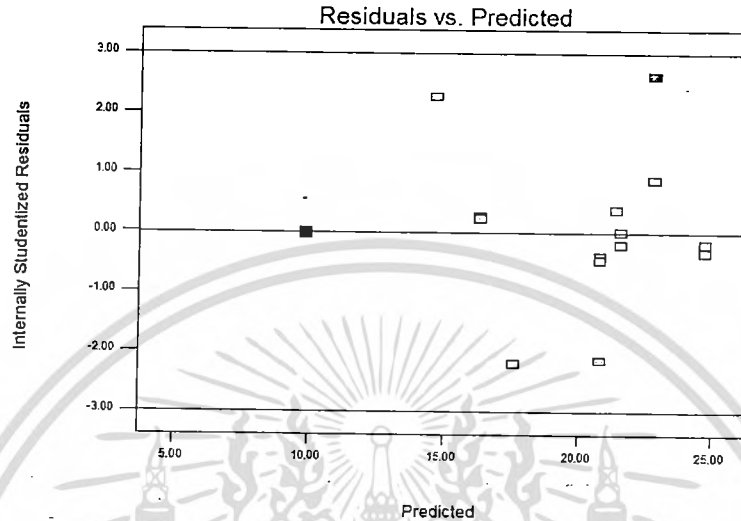
1. Normal Plot of Residuals กราฟมีลักษณะการเรียงตัวเป็นเส้นตรงดังภาพที่ 4.1 แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ จากกราฟมีการเกาะกลุ่มอยู่บนเส้นตรงแสดงถึงความเหมาะสมของข้อมูลที่จะนำไปสร้างสมการทำนายผล



ภาพที่ 4.1 การวิเคราะห์ Normal Plot of Residuals ของสมการ Special Quartic (Hardness)

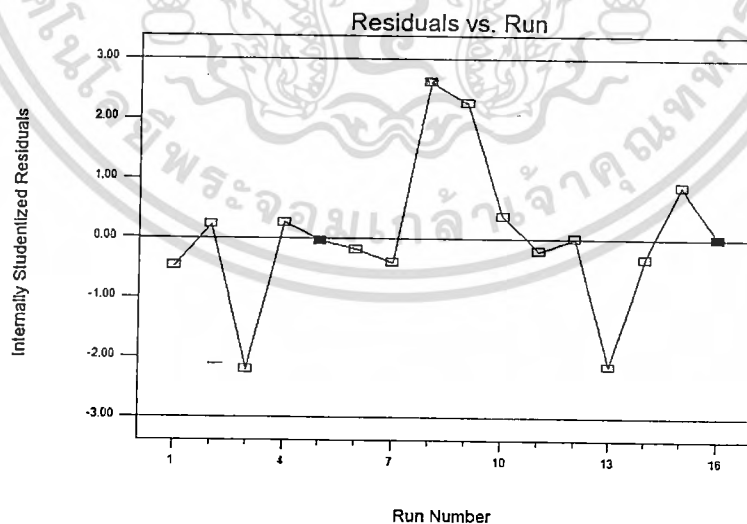
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Residuals vs. Predicted ข้อมูลระหว่างเศษเหลือ (Residual) กับผลตอบสนอง มีการกระจายตัวแบบสุ่มดังภาพที่ 4.2 ซึ่งถือว่าเป็นลักษณะกราฟที่ดีแสดงถึงความเหมาะสมของข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการสร้างสมการทำนายผล



ภาพที่ 4.2 การวิเคราะห์ Residuals vs. Predicted ของสมการ Special Quartic (Hardness)

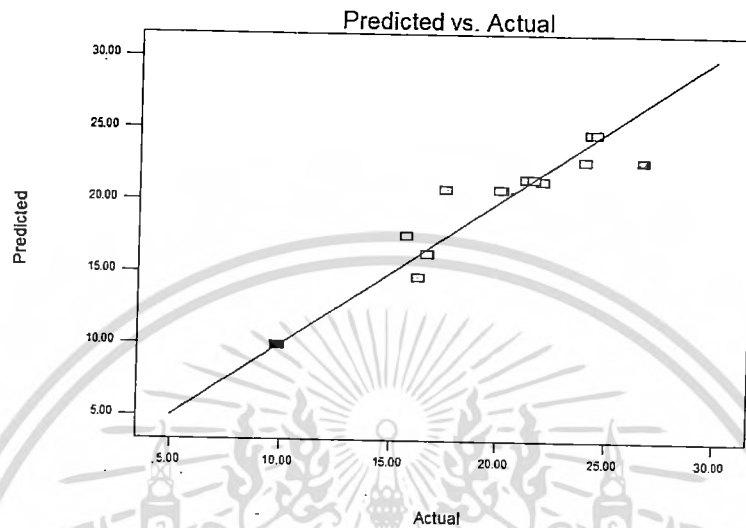
3. Residuals vs. Run มีการกระจายตัวของข้อมูลแบบสุ่ม คือไม่มีแนวโน้มดังภาพที่ 4.3 ซึ่งถือว่าเป็นลักษณะกราฟที่ดี แสดงถึงความเหมาะสมของข้อมูล



ภาพที่ 4.3 การวิเคราะห์ Residuals vs. Run ของสมการ Special Quartic (Hardness)

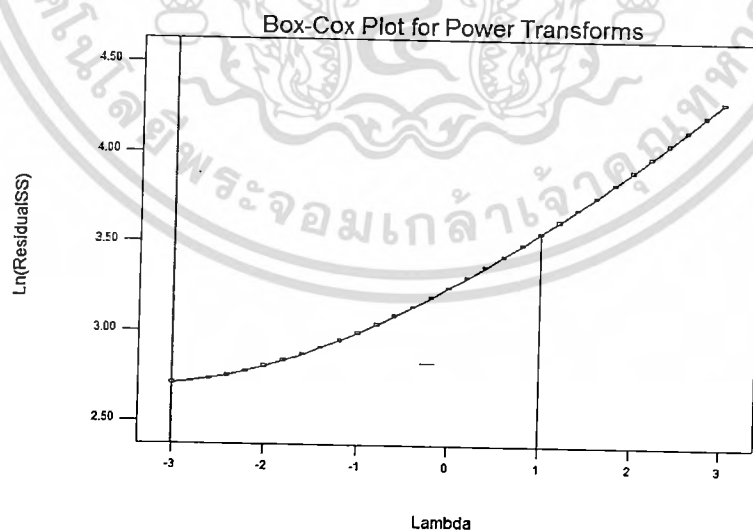
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Predicted vs. Actual เป็นการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนายกับค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งทั้งสองค่าใกล้เคียงกัน จากภาพที่ 4.4 จะมีส่วนของปลายเส้นที่มีค่าจากการทดลองแตกต่างกับค่าที่ได้จากสมการทำนายผล ซึ่งจะทำให้เกิดค่าความผิดพลาดมาก



ภาพที่ 4.4 การวิเคราะห์ Predicted vs. Actual ของสมการ Special Quartic (Hardness)

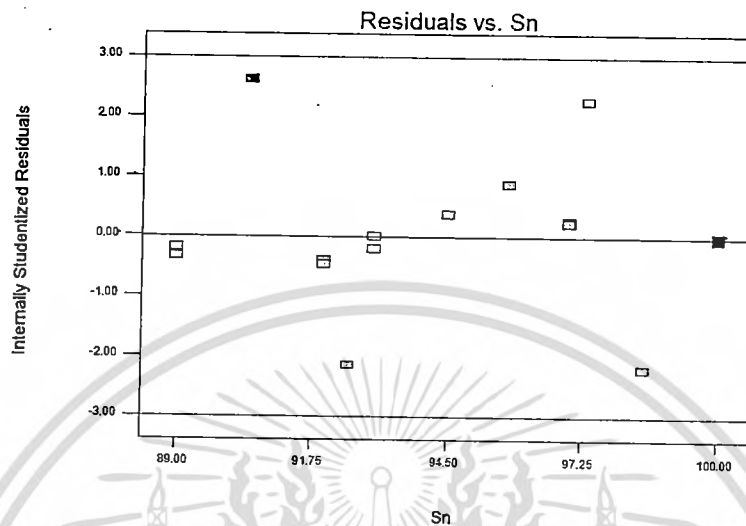
5. Box-Cox Plot For Power Transforms ค่า Lambda ไม่เข้าใกล้ 1 ดังภาพที่ 4.5 ซึ่งถือว่าเป็นลักษณะกราฟที่ไม่ดี คือมีค่าความเชื่อมั่นที่ต่ำ แสดงให้เห็นว่าสมการทำนายผลมีความเหมาะสม



ภาพที่ 4.5 การวิเคราะห์ Box-Cox Plot for Power Transforms ของสมการ Special Quartic (Hardness)

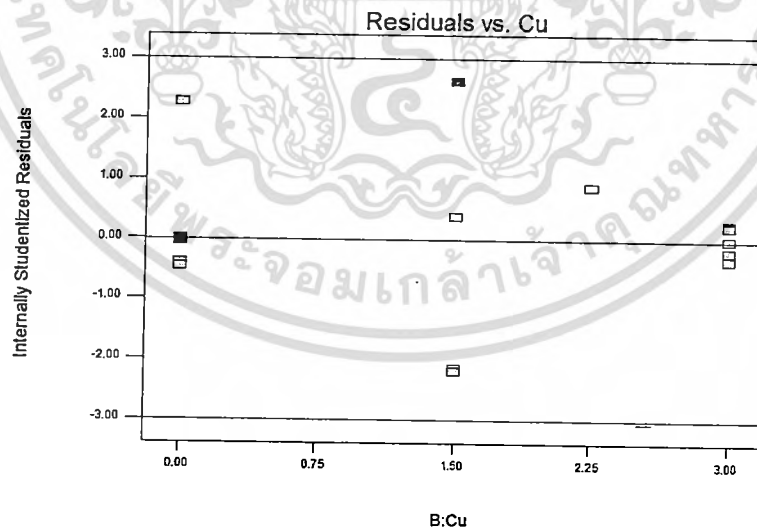
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. Residuals vs. Sn มีการกระจายตัวของข้อมูลแบบสุ่ม ดังภาพที่ 4.6 ซึ่งถือว่าเป็นลักษณะกราฟที่ดี เมื่อนำไปใช้ในการสร้างสมการทำนายผลจะทำให้มีความถูกต้อง



ภาพที่ 4.6 การวิเคราะห์ Residuals vs. Sn ของสมการ Special Quartic (Hardness)

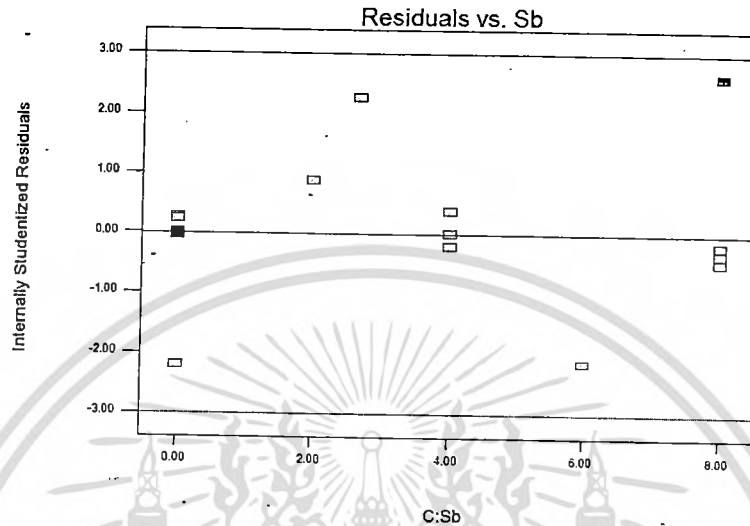
7. Residuals vs. Cu มีการกระจายตัวของข้อมูลในลักษณะเกาะกลุ่มกันเป็นช่วงดังภาพที่ 4.7 ซึ่งไม่ส่งผลดีต่อสมการทำนายผลซึ่งจำทำให้เกิดความผิดพลาดมาก



ภาพที่ 4.7 การวิเคราะห์ Residuals vs. Cu ของสมการ Special Quartic (Hardness)

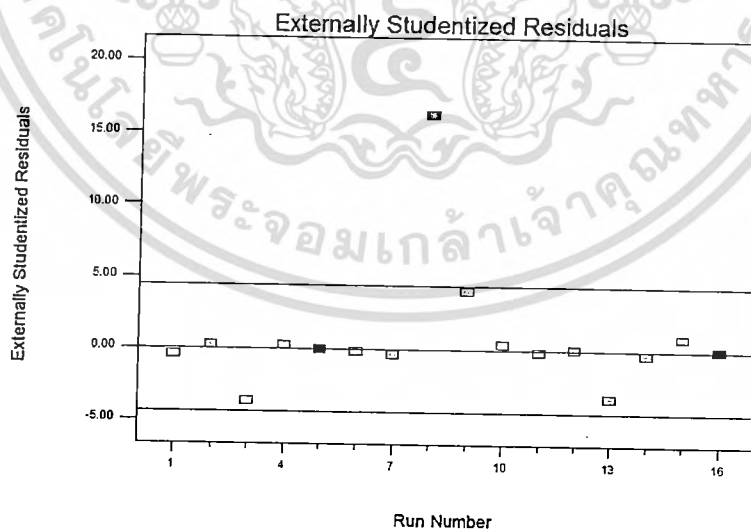
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. Residuals vs. Sb มีการกระจายตัวของข้อมูลในลักษณะเกาะกลุ่มกันเป็นช่วงดังภาพที่ 4.8 ซึ่งไม่ส่งผลดีต่อสมการทำนายผล คือเมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างสมการจะทำให้เกิดความผิดพลาดของสมการทำนายผลที่ค่อนข้างสูง



ภาพที่ 4.8 การวิเคราะห์ Residuals vs. Sb ของสมการ Special Quartic (Hardness)

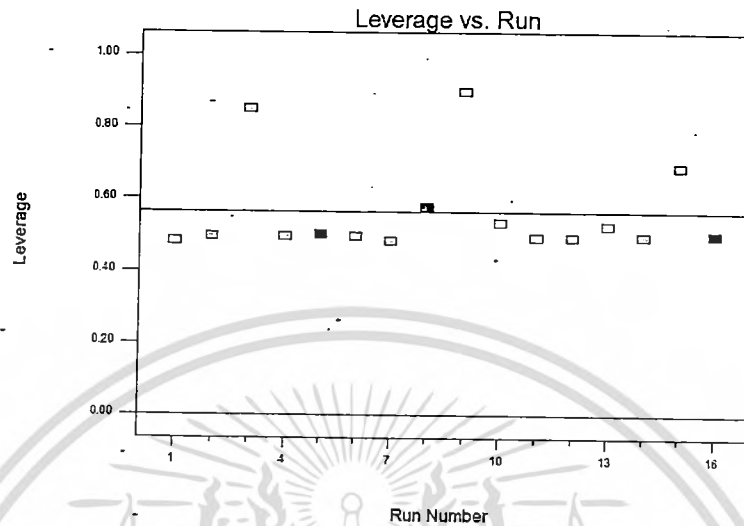
9. Externally Studentized Residuals จากภาพที่ 4.9 มีจุดอยู่นอกขอบเขตซึ่งจะเป็นตัวบ่งบอกว่าจุดที่ใช้ในการทดลองนั้นไม่มีความเหมาะสมที่จะนำไปสร้างสมการทำนายผล



ภาพที่ 4.9 การวิเคราะห์ Externally Studentized Residuals ของสมการ Special Quartic (Hardness)

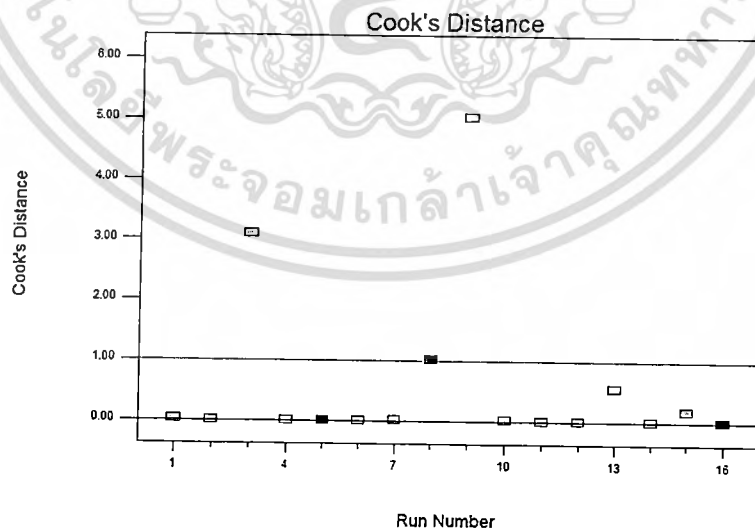
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. Leverage vs. Run ค่าของข้อมูลส่วนใหญ่ไม่เข้าใกล้ 1 ดังภาพที่ 4.10 ถือว่าเป็นลักษณะกราฟที่ดี แสดงว่าสมการทำนายไม่แปรตามการทดลองใดการทดลองหนึ่งเพียงการทดลองเดียว



ภาพที่ 4.10 การวิเคราะห์ Leverage vs. Run ของสมการ Special Quartic (Hardness)

11. Cook's Distance เป็นกราฟที่ใช้ดูผลกระทบของจุดที่ทำการทดลองที่มีต่อสมการทำนายผล โดยลักษณะที่ดีจุดควรอยู่เกาะกลุ่มกันไม่ควรมีจุดใดโดดออกมา กราฟที่ได้นั้นมีลักษณะที่ค่อนข้างเกาะกลุ่มกัน ดังภาพที่ 4.11 จะมีในส่วนของ ชิ้นงานที่ 3, 8 และ 9 ที่มีการกระโดดออกจากกลุ่มซึ่งเป็นชิ้นงานที่ส่งผลกระทบต่อสมการทำนายผล



ภาพที่ 4.11 การวิเคราะห์ Cook's Distance ของสมการ Special Quartic (Hardness)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.8 เป็นตารางเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายของสมการกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง ซึ่งทำการหาค่าความแตกต่างออกมาเป็นค่า Residual ได้กราฟออกมาดังภาพที่ 4.1-4.3 ส่วนค่าของ Leverage ส่วนใหญ่หากไม่เข้าใกล้ 1 ถือว่าเป็นลักษณะกราฟที่ดี แสดงว่าสมการทำนายไม่แปรตามการทดลองใดการทดลองหนึ่งเพียงการทดลองเดียว สามารถดูได้จากภาพที่ 4.10

ตารางที่ 4.8 ข้อมูลทางสถิติที่ได้จาก Diagnostics (Hardness)

| Diagnostics Case Statistics | | | | | |
|-----------------------------|--------------|-----------------|----------|----------|-----------|
| Standard Order | Actual Value | Predicted Value | Residual | Leverage | Run Order |
| 1 | 21.97 | 21.39 | 0.58 | 0.53 | 10 |
| 2 | 20.13 | 20.79 | -0.66 | 0.48 | 7 |
| 3 | 9.9 | 9.89 | 0.01 | 0.50 | 16 |
| 4 | 21.23 | 21.57 | -0.34 | 0.49 | 11 |
| 5 | 16.73 | 16.31 | 0.42 | 0.50 | 4 |
| 6 | 24.2 | 24.74 | -0.54 | 0.49 | 14 |
| 7 | 16.27 | 14.66 | 1.61 | 0.9 | 9 |
| 8 | 17.5 | 20.81 | -3.31 | 0.52 | 13 |
| 9 | 23.93 | 22.84 | 1.09 | 0.69 | 15 |
| 10 | 15.67 | 17.57 | -1.90 | 0.85 | 3 |
| 11 | 26.63 | 22.81 | 3.82 | 0.58 | 8 |
| 12 | 21.57 | 21.57 | 0.00 | 0.49 | 12 |
| 13 | 20.03 | 20.79 | -0.76 | 0.48 | 1 |
| 14 | 24.43 | 24.74 | -0.31 | 0.49 | 6 |
| 15 | 16.67 | 16.31 | 0.36 | 0.50 | 2 |
| 16 | 9.83 | 9.89 | -0.06 | 0.50 | 5 |

ตารางที่ 4.9 เป็นตารางที่แสดงขอบเขตของแต่ละจุดในการทดลองซึ่งค่าที่ได้นั้นต้องห้ามเกินขอบเขตของ Internally Studentized Residual กับ Externally Studentized Residual การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการการทำนายกับการทดสอบชิ้นงานทดสอบอีก 5 ชิ้น ที่มีปริมาณของส่วนผสมอยู่ในขอบเขตการศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ข้อมูลทางสถิติที่แสดงขอบเขตของแต่ละจุดในการทดลอง

| Diagnostics Case Statistics | | | | |
|---|---------------------------------|---------------------|-----------------|-----------|
| Internally Studentized Residual | Externally Studentized Residual | Influence on | | Run Order |
| | | Fitted Value DFFITS | Cook's Distance | |
| 0.38 | 0.35 | 0.37 | 0.02 | 10 |
| -0.41 | -0.38 | -0.37 | 0.02 | 7 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 16 |
| -0.21 | -0.20 | -0.20 | 0.00 | 11 |
| 0.26 | 0.25 | 0.24 | 0.01 | 4 |
| -0.34 | -0.31 | -0.31 | 0.01 | 14 |
| 2.26 | 4.04 | *12.03 | *5.04 | 9 |
| -2.14 | -3.39 | *-3.55 | 0.56 | 13 |
| 0.87 | 0.86 | 1.28 | 0.19 | 15 |
| -2.20 | -3.69 | *-8.85 | *3.10 | 3 |
| 2.62 | **16.27 | *18.93 | *1.03 | 8 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 12 |
| -0.47 | -0.44 | -0.43 | 0.02 | 1 |
| -0.19 | -0.18 | -0.18 | 0.00 | 6 |
| 0.23 | 0.21 | 0.21 | 0.01 | 2 |
| -0.04 | -0.04 | -0.04 | 0.00 | 5 |
| ** Case(s) with External Stud. Residuals > 4.00 | | | | |
| * Exceeds limits | | | | |

ในตารางที่ 4.10 แสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่ได้จากสมการทำนายและการทดสอบ พบว่าความคลาดเคลื่อนของค่าความแข็งมีค่าน้อย โดยมีค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน 1.94% ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าสมการทำนายค่าความแข็งที่ได้สร้างขึ้นสามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของส่วนผสมของพิวเตอร์กับค่าความแข็งของพิวเตอร์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนายและการทดสอบความแข็ง

| No. | Hardness (ทำนาย) | Hardness (จริง) | % Error |
|-----|------------------|-----------------|---------|
| 1 | 18.2 | 18.1 | 0.55 |
| 2 | 22.1 | 22 | 0.45 |
| 3 | 22.7 | 22.3 | 1.79 |
| 4 | 23.9 | 24.1 | 0.83 |
| 5 | 20.1 | 21.4 | 6.07 |

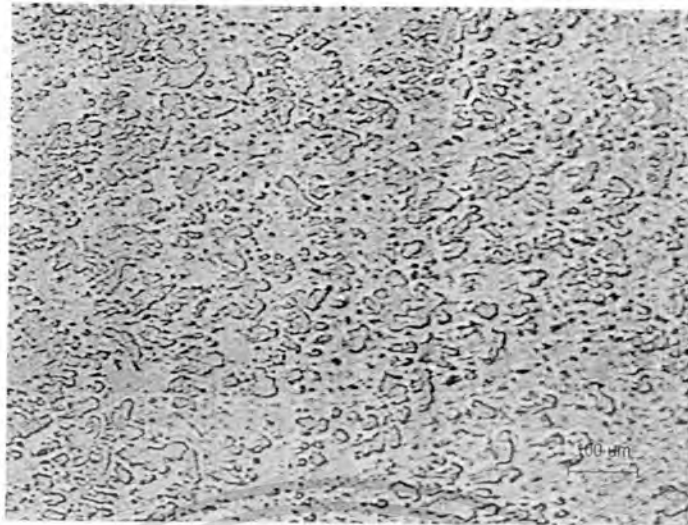
4.2 โครงสร้างจุลภาค

ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงของโลหะผสมพิวเตอร์ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.12-4.15 โดยพบว่าขนาดเกรนของดีบุกบริสุทธิ์มีขนาดใหญ่ที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบค่าความแข็ง ที่ดีบุกบริสุทธิ์มีความแข็งน้อยที่สุด และการเติมทองแดงหรือพลวงลงไปทำให้ขนาดเกรนของพิวเตอร์เล็กลง ส่งผลให้ความแข็งของพิวเตอร์มีค่ามากขึ้น นอกจากนี้การเติมทองแดงและพลวงพร้อมกันจะทำให้ความแข็งของพิวเตอร์เพิ่มขึ้นมากกว่าการเติมธาตุใดธาตุหนึ่งเพียงอย่างเดียว ซึ่งสอดคล้องกับผลทางโครงสร้างจุลภาคที่พบว่าพิวเตอร์ที่มีส่วนผสมของธาตุทั้งสามชนิดมีขนาดเกรนที่เล็กที่สุด



ภาพที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของพิวเตอร์ชนิด 100Sn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

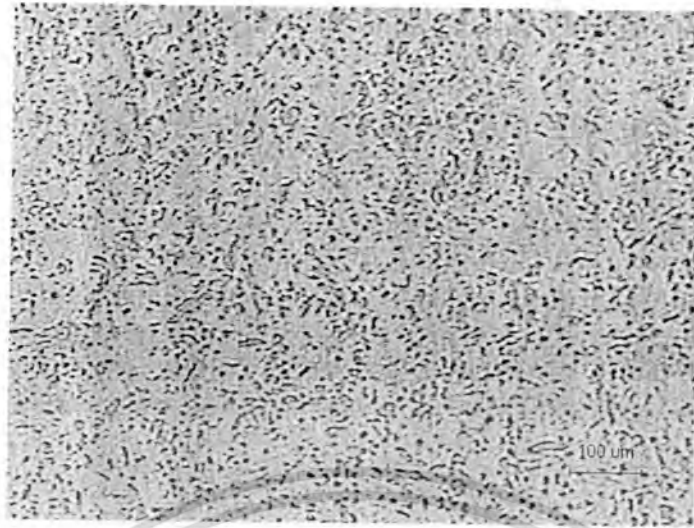


ภาพที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของพิวเตอร์ชนิด 97Sn-3Cu



ภาพที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของพิวเตอร์ชนิด 92Sn-8Sb

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของพิวเตอร์ชนิด 89Sn-3Cu-8Sb



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในโครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของพิวเตอร์ไร้สารตะกั่วกับส่วนผสมและโครงสร้างจุลภาค ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ว่า ส่วนผสมของพิวเตอร์มีอิทธิพลต่อโครงสร้างจุลภาคของพิวเตอร์ การเติมทองแดงหรือพลวงลงไปในตัวจะทำให้ได้พิวเตอร์ที่มีขนาดเกรนเล็กลง ซึ่งส่งผลต่อไปยังความแข็งของพิวเตอร์ โดยความแข็งของพิวเตอร์แปรผกผันกับขนาดเกรนของพิวเตอร์ หรือแปรผันโดยตรงกับปริมาณของทองแดงและพลวง โดยการเติมทองแดงและพลวงในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้ความแข็งของพิวเตอร์เพิ่มขึ้น และการเติมทองแดงและพลวงพร้อมกันจะทำให้ความแข็งของพิวเตอร์เพิ่มขึ้นมากกว่าการเติมธาตุใดธาตุหนึ่งเพียงอย่างเดียว สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของพิวเตอร์กับส่วนผสมของพิวเตอร์ สามารถใช้ทำนายค่าความแข็งของพิวเตอร์ได้เป็นอย่างดี โดยมีค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดในการทำนายเท่ากับ 1.94%

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้พบว่า สีของพิวเตอร์เป็นคุณลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่งของพิวเตอร์ และสีของพิวเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไปตามส่วนผสม ดังนั้นจากงานวิจัยนี้จึงอาจจะทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างสีของพิวเตอร์ไร้สารตะกั่วกับส่วนผสม เพื่อให้สามารถกำหนดสีของพิวเตอร์ที่จะเกิดขึ้นได้จากการกำหนดส่วนผสมของพิวเตอร์

บทที่ 6

สรุปผลผลิตงานวิจัย

6.1 ผลผลิตที่คาดว่าจะได้รับของโครงการวิจัย

ผลผลิตที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัย คือ คาดว่าสามารถตีพิมพ์เผยแพร่ผลการวิจัยเป็นบทความฉบับเต็ม (Full paper) ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่อยู่ในระบบฐานข้อมูลของ ISI หรือ SJR ได้ รวมทั้งผลการวิจัยที่ได้จะเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญทางด้านการผลิตพิวเตอร์แบบไร้สารตะกั่วและโลหะวิทยาของพิวเตอร์แบบไร้สารตะกั่ว และเป็นองค์ความรู้ที่ภาคอุตสาหกรรมสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

6.2 ผลผลิตที่อยู่ระหว่างการดำเนินการ

ผลผลิตงานวิจัยของโครงการวิจัยนี้ที่อยู่ระหว่างการดำเนินการ คือ การเขียนต้นฉบับ (Manuscript) ของบทความวิจัยที่จะนำเสนอผลการวิจัยที่ได้ ซึ่งคาดว่าจะส่งไปตีพิมพ์เผยแพร่เป็นบทความฉบับเต็ม (Full paper) ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่อยู่ในระบบฐานข้อมูลของ ISI หรือ SJR เช่น Materials & Design หรือ Journal of Alloys and Compounds

เอกสารอ้างอิง

- [1] Barry, B.T.K., and Thwaites, C.J., 1983, Tin and Its Alloys and Compounds, Ellis Horwood Ltd.
- [2] Osburn, B.N., and Wilber, G.O., 1950, Pewter-Working: Instructions and Projects, Dover Publications.
- [3] หนังสือพิมพ์บ้านเมือง, Sivesis พิวเตอร์ดีไซน์ เจาะตลาดไฮโซ โภจเงิน, 22 ตุลาคม 2553.
- [4] กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, <http://library.dip.go.th>.
- [5] ณรงค์ ชื่นนิรันดร์, อุตสาหกรรมดีบุกไทย...ทางรอดจากความลำบาก, <http://narongthai.com/deebook.html>.
- [6] Dessuy, M.B., Vale, M.G.R., Welz, B., Borges, A.R., Silva, M.M., and Martelli, P.B., 2001, "Determination of cadmium and lead in beverages after leaching from pewter cups using graphite furnace atomic absorption spectrometry," *Talanta*, Vol.85, pp:681-686.
- [7] Krachler, M., and Shoty, W., 2009, "Trace and ultratrace metals in bottled waters: survey of sources worldwide and comparison with refillable metal bottles," *Science of the Total Environment*, Vol.407, pp:1089-1096.
- [8] นางพญา จิตรกร, พิวเตอร์, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, <http://www.tistr.or.th>.
- [9] Pewter, <http://en.wikipedia.org/wiki/Pewter>.
- [10] ASTM B560-00(2010) Standard Specification for Modern Pewter Alloys.
- [11] Callister, W.D., and Rethwisch, D. G., 2011, *Materials Science and Engineering*, 8th Edition, John Wiley & Sons.
- [12] Hero, H., and Jorgensen, R.B., 1983, "Tarnishing of a low-gold dental alloy in different structural state," *Journal of Dental Research*, Vol.62, pp:371-376.
- [13] Lynn, A., O'Brien, R., German, M., 1988, "Tarnish and corrosion behavior of palladium-silver alloy," *Journal of Materials Science*, Vol.23, pp:3563-3571.
- [14] Takuma, Y., Shiraishi, T., Fujita, T., and Hisatsune, K., 2010, "Tarnish resistance evaluation of experimental Pd-free Ag-Au-Pt-Cu dental alloys," *Dental Materials Journal*, Vol.29, pp:330-335.
- [15] Sebo, P., Svec, P., Janickovic, D., Illekova, E., and Plevachuk, Y., 2011, "Interface between Sn-Sb-Cu solder and copper substrate," *Materials Science and Engineering A*, Vol.528, pp:5955-5960.
- [16] Zeng, Q., Guo, J., Gu, X., and Zhao X., 2008, "Liquid-state interfacial reaction of Sn-10Sb-5Cu high temperature lead-free solder and Cu substrate," *International Conference on Electronic Packaging & High Density Packaging*.
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [17] Lee, C., Lin, C.Y., and Yen, Y.W., 2007, "The 260°C phase equilibria of the Sn-Sb-Cu ternary system and interfacial reactions at the Sn-Sb/Cu joints," *Intermetallics*, Vol.15, pp:1027-1037.
- [18] Lee, J.J., Kim, B.J., and Min, W.S., 1993, "Calorimetric investigations of liquid Cu-Sb, Cu-Sn and Cu-Sn-Sb alloys," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.202, pp:237-242.
- [19] Groover, M.P., 2011, *Principles of Modern Manufacturing*, 4th Edition, John Wiley & Sons.
- [20] Polakova, H., Musil, J., Vlcek J., Allaart J., and Mitterer, C., 2003, "Structure-hardness relations in sputtered Ti-Al-V-N films," *Thin Solid Films*, Vol.444, pp:189-198.
- [21] Gioka, C., Bourauel, C., Zinelis, S., Eliades, T., Silikas, N., and Eliades, G., 2004, "Titanium orthodontic brackets: structure, composition, hardness and ionic release," *Dental Materials*, Vol.20, pp:693-700.
- [22] Ren, F., Case, E.D., Timm, E.J., and Schock, H.J., 2008, "Hardness as a function of composition for n-type LAST thermoelectric material," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.455, pp:340-345.
- [23] Liu, R., Xi, S.Q., Kapoor, S., and Wu, X.J., 2010, "Effects of chemical composition on solidification, microstructure and hardness of Co-Cr-W-Ni and Co-Cr-Mo-Ni alloy systems," *IJRRAS*, Vol.5, pp:110-122.
- [24] Kaczmarek, D., Wojcieszak, D., Domaradzki, J., Prociow, E., Placido, F., Lapp, S., and Dylewicz, R., 2011, "Influence of nanocrystalline structure and composition on hardness of thin film based on TiO₂," *Central European Journal of Physics*, Vol.9, pp:349-353.
- [25] Ucar, Y., Brantley, W.A., Johnston, W.M., Iijima, M., Han, D.S., and Dasgupta, T., 2011, "Microstructure, elemental composition, hardness and crystal structure study of the interface between a noble implant component and cast noble alloys," *The Journal of Prosthetic Dentistry*, Vol.106, pp:170-178.
- [26] Suarez, M.A., Esquivel, R., Alcantara, J., Dorantes, H., and Chavez, J.F., "Effect of chemical composition on the microstructure and hardness of Al-Cu-Fe alloy," 2011, *Materials Characterization*, Vol.62, pp:917-923.
- [27] Cornell, J.A., 2002, *Experiments with Mixtures: Designs, Models, and the Analysis of Mixture Data*, 3rd Edition, John Wiley & Sons.
- [28] Asiaban, S., and Moradian, S., 2011, "Investigation of tensile properties and dyeing behavior of various polypropylene/polyamide 6 blends using a mixture experimental design," *Dyes and Pigments*, Vol.92, pp:642-653.

- [29] Karaman, S., Yilmaz, M.T., and Kayacier, A., 2011, "Simplex lattice mixture design approach on the rheological behavior of glucomannan based salep-honey drink mixtures: an optimization study based on the sensory properties," *Food Hydrocolloids*, Vol.25, pp:1319-1326.
- [30] Mura, P., Furlanetto, S., Cirri, M., Maestrelli, F., Marras, A.M., and Pinzauti, S., 2005, "Optimization of glibenclamide tablet composition through the combined use of differential scanning calorimetry and D-optimal mixture experimental design," *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, Vol.37, pp:65-71.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 3 รอบ 12 เดือน ประจำปีงบประมาณ

แหล่งงบประมาณแผ่นดิน (แบบปกติ) แหล่งเงินรายได้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของพิวเตอร์ไร้สารตะกั่วกับส่วนผสมและโครงสร้างจุลภาค
(ภาษาอังกฤษ) A study on relationship between hardness of lead-free pewter and composition and microstructure

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน/ผู้วิจัย (อ./ดร./ผศ./รศ./ศ.) รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2555 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2556

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2555 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2556

ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

1. การเบิกจ่ายงบประมาณ (กรณีการจ่ายเงินถ้าจ่ายงวดเดียวให้ลบข้อที่ไม่เกี่ยวข้องออก)

งวดที่ 1 80,000 บาท 100 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ต/ว) 8/11/2555

งวดที่ 2 บาท % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ต/ว)

2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน (จำแนกตามหมวดค่าใช้จ่าย)

| หมวดค่าใช้จ่าย | งบประมาณรวมทั้งโครงการ | ค่าใช้จ่าย (บาท) | คงเหลือ (หรือเกิน) |
|-----------------------------|------------------------|------------------|--------------------|
| งบบุคลากร : ค่าจ้างชั่วคราว | | | - |
| งบดำเนินงาน | | | |
| ค่าตอบแทน | | | - |
| ค่าใช้จ่าย | 30,000 | 30,000 | 0 |
| ค่าวัสดุ | 50,000 | 50,000 | 0 |
| ค่าสาธารณูปโภค | | | - |
| งบลงทุน : ค่าครุภัณฑ์ | | | - |
| รวม | 80,000 | 80,000 | 0 |

(รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ)

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

30 / ก.ย. / 2556

(.....)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น สงวนเจ้าหน้าที่การเงิน/เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง สงวนไว้เพื่อ

ประวัตินักวิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล - กรรณชัย กัลยาศิริ

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

| วุฒิการศึกษา | สาขาวิชา | สถาบัน | ปีที่สำเร็จ |
|--------------|--|--|-------------|
| Ph.D. | Industrial Engineering Major: Manufacturing Engineering Minor: Materials Science | Oregon State University, USA. | 2546 |
| M.Eng | Industrial Engineering | Lehigh University, USA. | 2541 |
| วศบ. | วิศวกรรมเครื่องกล | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง | 2536 |

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

- 1) Joining of Materials (Soldering and Brazing)
- 2) Electric-Discharge Machining

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

| ปี พ.ศ. | ชื่อรางวัล | สถาบันที่ให้ |
|---------|--|---|
| 2555 | รางวัลชมเชย ผลงานวิจัยสาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 2552 | รางวัลชนะเลิศ บทความดีเด่น ประเภทการวิจัยพื้นฐาน | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

| ปี พ.ศ. | ทุนการศึกษาและทุนวิจัย | สถาบันที่ให้ |
|---------|--|---------------------------------------|
| 2555 | ทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 | สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) |
| 2554 | ทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554 | สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) |
| 2553 | ทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2553 | สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) |
| 2552 | ทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2552 | สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) |
| 2551 | ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของ อาจารย์รุ่นใหม่ | สกอ. และ สกว. |
| 2539 | ทุนพัฒนาอาจารย์เพื่อศึกษาต่อในระดับปริญญาโท-เอก ในต่างประเทศ | ทบวงมหาวิทยาลัย |

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

Kanlayasiri K, Jattakul P. Simultaneous optimization of dimensional accuracy and surface roughness for finishing cut of wire-EDMed K460 tool steel. *Precision Engineering*. 2013; 37: 556-561.

Mookam N, Kanlayasiri K. Evolution of the intermetallic compounds found between Sn-0.3Ag-0.7Cu low-silver, lead-free solder and Cu substrate during thermal aging. *Journal of Materials Science & Technology*. 2012; 28: 53-59.

Mookam N, Kanlayasiri K. Effect of soldering condition on formation of intermetallic phases developed between Sn-0.3Ag-0.7Cu low-silver lead-free solder and Cu substrate. *Journal of Alloys and Compounds*. 2011; 509: 6276-6279.

Kanlayasiri K, Ariga T. Influence of thermal aging on microhardness and microstructure of Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn lead-free solders. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010; 504: L5-L9.

Kanlayasiri K, Mongkolwongroj M, Ariga T. Influence of indium addition on characteristics of Sn-0.3Ag-0.7Cu solder alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009; 485: 225-230.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Kanlayasiri K, Boonmung S. Effects of wire-EDM machining variables on surface roughness of newly developed DC53 die steel: Design of experiments and regression model. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007; 192-193: 459-464.

Boonmung S, Chomtee B, Kanlayasiri K. Evaluation of artificial neural networks for pineapple grading. *Journal of Texture Studies*. 2006; 37: 568-579.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้