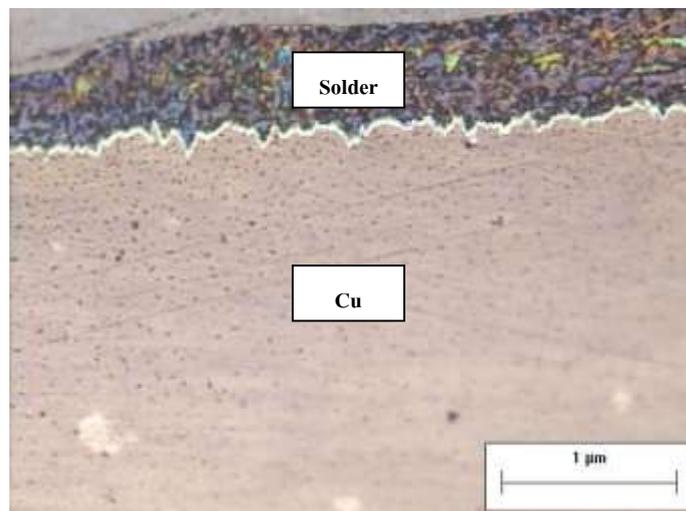


## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

#### 4.1 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

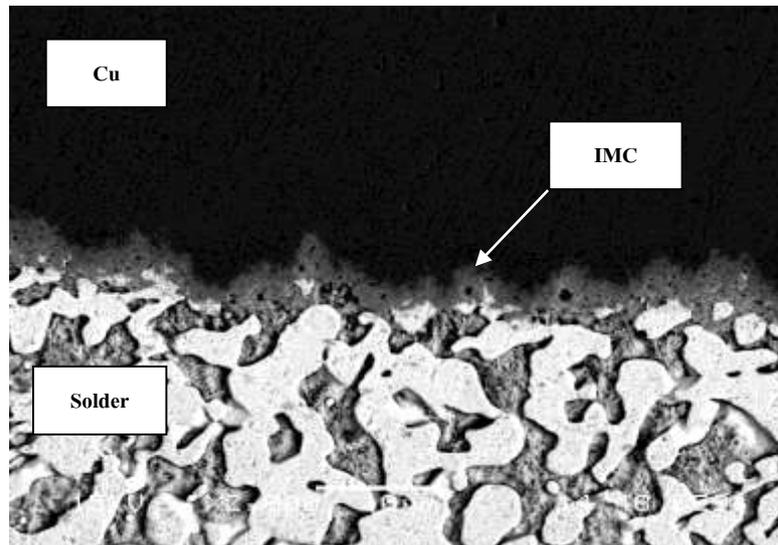
จากการตรวจสอบลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของการบัดกรีด้วยวิธีการจุ่มของโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับโลหะพื้นรองทองแดงโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงแสดงได้ดังภาพที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคที่ กำลังขยาย 500 เท่า ของการบัดกรีที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลา 5 วินาที หลังการบัดกรี ปรากฏชั้น สารประกอบเชิงโลหะระหว่างทองแดงและโลหะบัดกรี โดยชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ปรากฏจากการ บัดกรีมีชั้นความหนาอย่างน้อยก็มองเห็นไม่ชัดเจน เนื่องจากเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่มีความหนา ในระดับไมโครเมตร เมื่อนำตัวอย่างที่ผ่านการบัดกรีมาทำการตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่ อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ชั้นสารประกอบเชิง โลหะระหว่างพื้นผิวปรากฏขึ้นชัดเจนมากขึ้น



ภาพที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรีแบบจุ่มที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลา 5 วินาที

#### 4.2 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

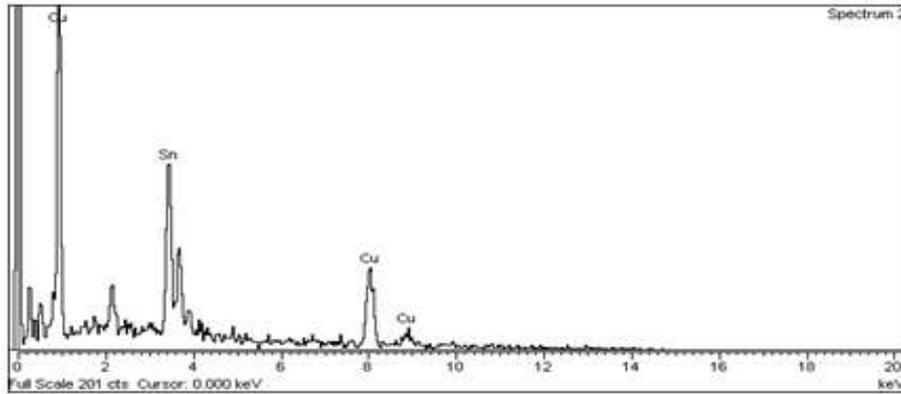
จากการตรวจสอบลักษณะของรอยต่อบัดกรีและโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดยี่ห้อ JEOL- JSM6380LV ตรวจสอบชิ้นตัวอย่างหลังการบัดกรีแบบจุ่มที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน ได้โครงสร้างจุลภาคของบริเวณรอยบัดกรีดังแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคหลังการบัดกรี วิเคราะห์โดยใช้รูปแบบ Backscatter

ภาพที่ 4.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 2,000 เท่าของรอยต่อบัดกรี Sn-58Bi กับโลหะพื้นรองทองแดง บัดกรีโดยวิธีการจุ่มที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลา 25 วินาที ในการบัดกรีด้วยวิธีการจุ่มทองแดงลงในโลหะบัดกรีเหลวที่มีจุดหลอมเหลวประมาณ 138°C เมื่อทองแดงสัมผัสกับโลหะบัดกรีเหลว ทำให้เกิดการแพร่ของอะตอมอย่างรวดเร็ว และเกิดการรวมตัวเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

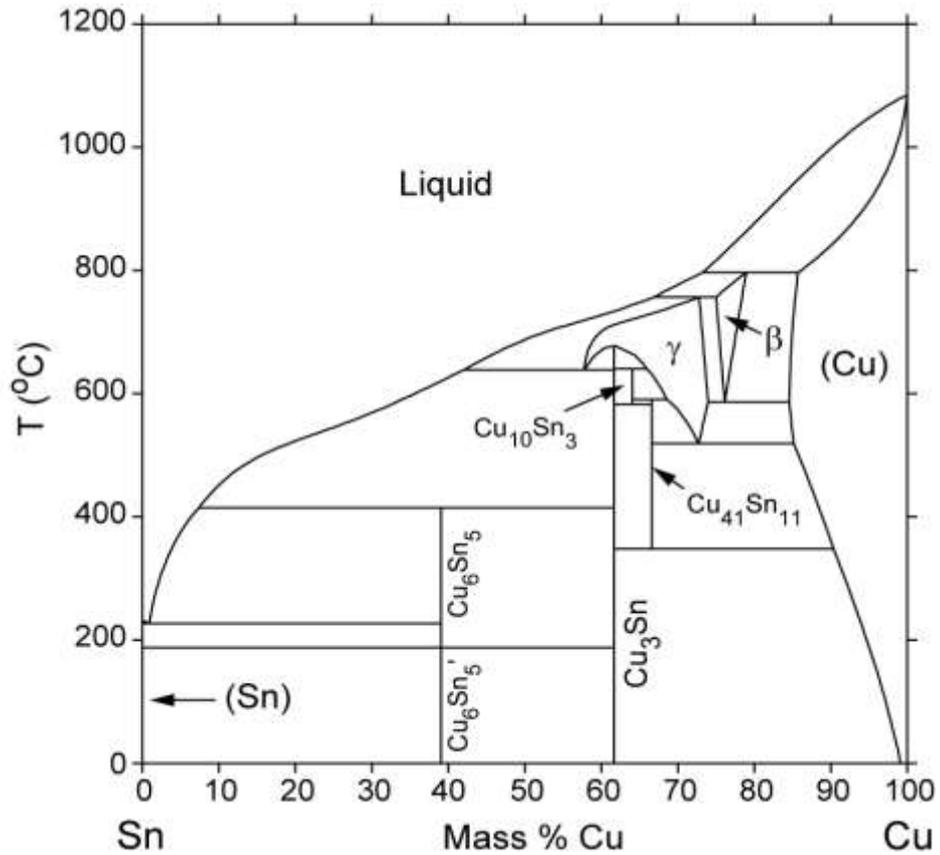
โดยพื้นที่ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะบัดกรีและโลหะพื้นจะปรากฏเป็นส่วนที่ตรวจสอบจากด้านบน (Top View) ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะแสดงได้ดังภาพที่ 4.3 ได้จากการตรวจสอบโดยใช้รูปแบบ Backscatter จากการตรวจสอบจากด้านบน ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ EDX เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีสำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะในภาพที่ 4.3 มีปริมาณ 57.29 wt% Cu และ 42.71 wt% Sn ดังแสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDX ของชั้น  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$

#### 4.3 ชาติและเฟสของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

จากการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดด้วยวิธี Backscatter ที่กำลังขยาย 6,000 เท่า และทำการสำรวจบริเวณรอยต่อบัดกรี ด้วยวิธีการบัดกรีแบบจุ่มที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ และทำการใช้ฟังก์ชัน EDX ทำให้ค้นพบชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เป็นสารประกอบของ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  หรือที่เรียกว่า  $\eta$ -Phase (Eta Phase) โดยดังแสดงจากเฟสไดอะแกรมในภาพที่ 4.4 เกิดที่ระหว่างพื้นผิวโลหะบัดกรีและโลหะพื้นทองแดง (Solder/ $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ /Cu)



ภาพที่ 4.4 เฟสไดอะแกรม ของ Cu-Sn

#### 4.4 ค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

จากการศึกษาและการเก็บข้อมูลจากชิ้นตัวอย่างจากการบัดกรีแบบจุ่ม ด้วยโลหะบัดกรี Sn-58Bi กับโลหะ พื้นรองทองแดง ที่อุณหภูมิ 170°C, 190°C และ 210°C แต่ละอุณหภูมิใช้เวลาในการจุ่ม 5, 15 และ 25 วินาทีตามลำดับ

โดยได้ผลการทดลองเป็นความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นสารเชิงประกอบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

| Factor                      |            | Thickness ( $\mu\text{m}$ ) |             | Phase                    |
|-----------------------------|------------|-----------------------------|-------------|--------------------------|
| Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Time (sec) | Replicate 1                 | Replicate 2 |                          |
| 170                         | 5          | 0.211                       | 0.219       | $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ |
| 170                         | 15         | 0.248                       | 0.249       | $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ |
| 170                         | 25         | 0.277                       | 0.272       | $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ |
| 190                         | 5          | 0.344                       | 0.351       | $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ |
| 190                         | 15         | 0.375                       | 0.379       | $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ |
| 190                         | 25         | 0.416                       | 0.417       | $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ |
| 210                         | 5          | 0.426                       | 0.434       | $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ |
| 210                         | 15         | 0.473                       | 0.471       | $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ |
| 210                         | 25         | 0.519                       | 0.516       | $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ |

#### 4.5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเชิงถดถอย

ทำการสร้างสมการถดถอยโดยใช้ โปรแกรม Minitab 16 โดยใช้การออกแบบ แบบสามระดับ โดยใช้คำสั่ง Analyze Response Surface Design โดยเลือกแบบทอมแบบ Full Quadratic สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ

| Term       | Coef      | SE Coef  | T       | P-Value |
|------------|-----------|----------|---------|---------|
| Constant   | 0.029500  | 0.011210 | 2.632   | 0.022   |
| Temp       | 0.182583  | 0.008341 | 21.889  | 0.000   |
| Time       | 0.018000  | 0.008341 | 2.158   | 0.049   |
| Temp* Temp | -0.020750 | 0.001948 | -10.651 | 0.000   |
| Time* Time | 0.001000  | 0.001948 | 0.513   | 0.617   |
| Temp* Time | 0.007000  | 0.001378 | 5.082   | 0.000   |

โดยมีสมการความถดถอยที่ได้มีค่า  $R\text{-Sq} = 99.89\%$  และ  $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 99.85\%$  จากตารางที่ 4.2 พบว่า ปัจจัยหลัก (Main Effect) มีผลต่อค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะอย่างมีนัยสำคัญ ( $P\text{-Value} < 0.05$ ) และเมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วม 2 ปัจจัยในตารางที่ 4.2 พบว่าอิทธิพลร่วมของอุณหภูมิและเวลาในการบัดกรีมีผลต่อค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะอย่างมี

นัยสำคัญ แต่พจน์ของเวลายกกำลังสอง ไม่มีผลต่อค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ เนื่องจากค่า P-Value >0.05 ดังนั้นจึงทำการตัดพจน์ของเวลายกกำลังสองออกจากสมการ ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนใหม่อีกครั้ง โดยการเลือกรูปแบบเทอมแบบ Full Quadratic โดยตัดพจน์ของเวลายกกำลังสองออกจากสมการได้ผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ

| Term       | Coef      | SE Coef  | T       | P-Value |
|------------|-----------|----------|---------|---------|
| Constant   | 0.026167  | 0.008875 | 2.948   | 0.011   |
| Temp       | 0.182583  | 0.008102 | 22.537  | <0.001  |
| Time       | 0.022000  | 0.002890 | 7.612   | <0.001  |
| Temp* Temp | -0.020750 | 0.001892 | -10.967 | <0.001  |
| Temp* Time | 0.007000  | 0.001338 | 5.232   | <0.001  |

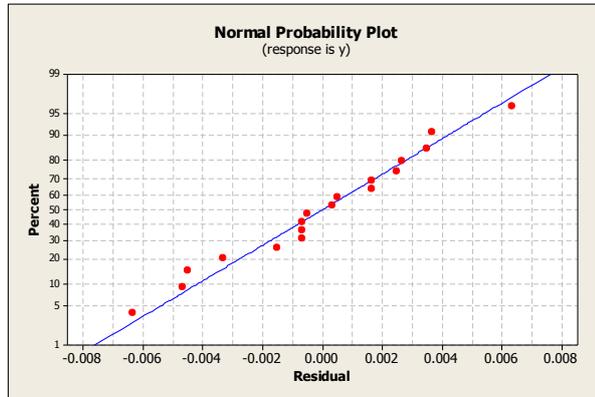
โดยมีความสัมพันธ์ของสมการความถดถอย R-Sq = 99.89% และ R-Sq (adj) = 99.86% จากตารางที่ 4.3 พบว่าหลังจากตัดพจน์ของยกเวลายกกำลังสองออกจากสมการ ค่าของ P-Value ของแต่ละพจน์มีค่าลดลง และมีผลต่อค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ทุกพจน์ สามารถเขียนแบบจำลองสมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้ดังนี้

$$y = 0.026167 + 0.182583x_1 + 0.022000x_2 - 0.020750x_1^2 + 0.007000x_1x_2$$

เมื่อ  $y$  คือ ค่าความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ( $\mu\text{m}$ )  $x_1$  คือ อุณหภูมิในการบัดกรี ( $^{\circ}\text{C}$ )  $x_2$  คือ เวลาในการบัดกรี (s) และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-sq และ R-sq(adj)) ซึ่งเป็นค่าวัดความเหมาะสมของสมการพบว่ามีค่า R-sq (adj) เท่ากับ 99.86% หมายความว่าสมการถดถอยที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูล จากนั้นทำการตรวจสอบ การแจกแจงข้อมูลว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ เป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ ซึ่งจะใช้วิธีการตรวจสอบค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ดังนี้

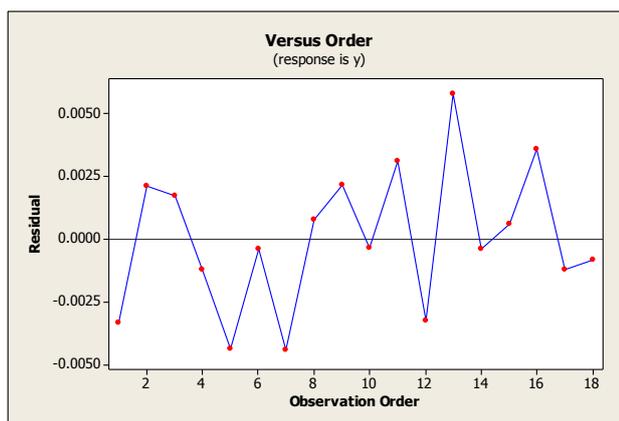
1. การตรวจสอบการกระจายตัวปกติ (Normal Distribution) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) จากการพิจารณา การกระจายของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ซึ่งใช้ในการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) โดยการนำข้อมูลจากตารางที่ 4.1 มาสร้างแผนภูมิดังภาพที่ 4.5 ค่าส่วนตกค้าง

(Residuals) มีการกระจายตัวเป็นเส้นตรงทำให้ประมาณได้ว่า ค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีการแจกแจงปกติ



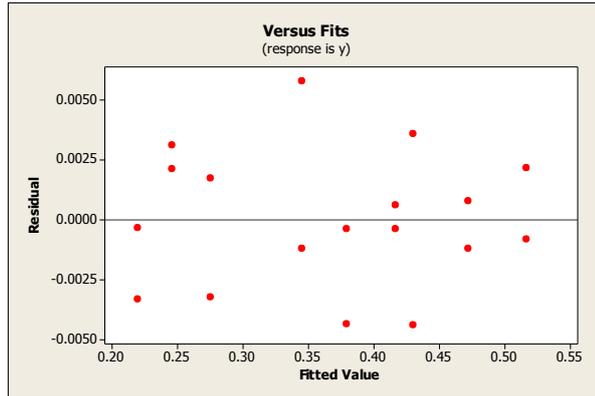
ภาพที่ 4.5 การกระจายแบบปกติของค่า Residual ( $3^k$  Factorial Design)

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) สามารถพิจารณาโดยการสร้างแผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) จากตารางที่ 4.1 สร้างแผนภูมิดังภาพที่ 4.6 โดยการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ที่มีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้แสดงว่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent)



ภาพที่ 4.6 การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เทียบกับ Observation ( $3^k$  Factorial Design)

3. การตรวจสอบความเสถียรของ  $\sigma^2$  (Variance Stability) สามารถพิจารณาจากแผนภูมิการกระจาย โดยการนำข้อมูลจากตารางที่ 4.1 มาสร้างแผนภูมิดังภาพที่ 4.7 เป็นแผนภูมิการกระจายของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับ Fitted Value  $\sigma^2$  ของค่าส่วนตกค้าง  $\sigma^2$  มีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่งและไม่พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของค่าเส้นตกค้าง (Residuals) มีลักษณะเป็นแนวโน้มจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



ภาพที่ 4.7 การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เทียบกับ Fitted Value ( $3^k$  Factorial Design)

หลังจากตรวจสอบเงื่อนไขเบื้องต้นของการแจกแจงของข้อมูลพบว่า จากกราฟ Normal Probability Plot, Versus Fits และ Versus Order ค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติทั้งหมด และเพื่อเป็นการทดสอบความแม่นยำในการทำนายของแบบจำลองสมการถดถอย จึงทำการบัดกรีที่อุณหภูมิ  $180^{\circ}\text{C}$  และ  $200^{\circ}\text{C}$  ด้วยเวลา 5, 15 และ 25 วินาที มาทดสอบแบบจำลอง และได้ผลการทดสอบแบบจำลองสมการถดถอยดังแสดงในตารางที่ 4.4 จากผลการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองสมการถดถอยที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ พบว่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนในการทำนายมีค่าเท่ากับ 1.83% แสดงว่าสมการที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำในการทำนายเป็นอย่างดี

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแบบจำลองสมการถดถอย

| ปัจจัย                       |            | Thickness ( $\mu\text{m}$ ) |       |        |
|------------------------------|------------|-----------------------------|-------|--------|
| Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Time (sec) | ทดลอง                       | ทำนาย | %Error |
| 180                          | 5          | 0.292                       | 0.286 | 2.05   |
| 180                          | 15         | 0.325                       | 0.318 | 2.15   |
| 180                          | 25         | 0.357                       | 0.351 | 1.68   |
| 200                          | 5          | 0.385                       | 0.392 | 1.82   |
| 200                          | 15         | 0.441                       | 0.432 | 2.04   |
| 200                          | 25         | 0.477                       | 0.471 | 1.26   |