

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

จะเลือกแบบจำลองที่มีกำลังสูงสุด และมีค่า P-value หรือ Prob > F ที่มีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญที่กำหนดไว้ คือ 0.05 เมื่อพิจารณาแบบจำลองจะพบว่า แบบจำลองที่มีกำลังสูงสุด คือ Mean

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	
Linear	2.559483	0.763177	0.726743	0.678247	115.7036	Suggested
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		+	
Special Quartic	2.240562	0.902279	0.790598	-0.57937	567.9482	Suggested
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 คือ แบบจำลองแบบ Special Quartic

4.3.4 การวิเคราะห์ Model ในโปรแกรม Design Expert

เลือกรูปแบบของสมการตามที่โปรแกรม Design Expert ได้ทำการแนะนำไว้ใน Fit Summary โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้รูปแบบสมการ Special Quartic

4.3.5 การวิเคราะห์ ANOVA ในโปรแกรม Design Expert

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

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

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

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

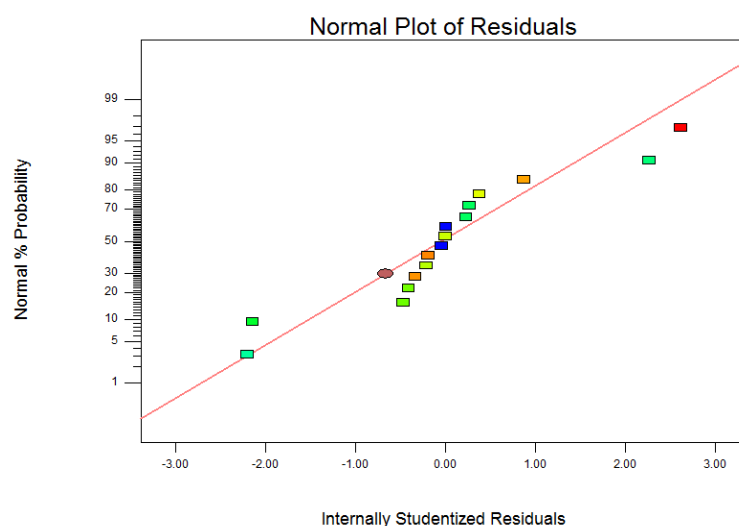
Std. Dev.	0.30	R-Squared	0.82
Mean	0.54	Adj R-Squared	0.56
C.V. %	56.09	Pred R-Squared	N/A
PRESS	N/A	Adeq Precision	7.32

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์เพื่อหาสมการทำนายค่าความแข็ง

Component	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI		VIF
				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

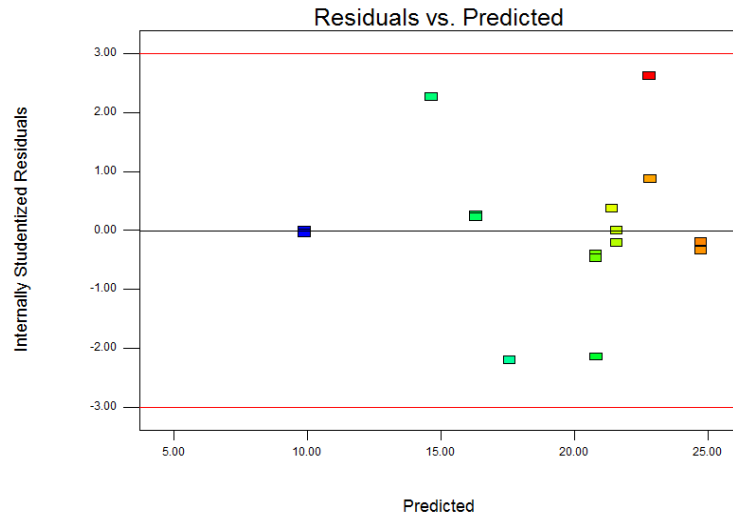
4.3.6 การวิเคราะห์ Diagnostics ในโปรแกรม Design Expert

1. Normal Plot of Residuals กราฟมีลักษณะการเรียงตัวเป็นเส้นตรงดังภาพที่ 4.1 แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ จากกราฟมีการเกาะกลุ่มอยู่บนเส้นตรงแสดงถึงความเหมาะสมของข้อมูลที่จะนำไปสร้างสมการทำนายผล



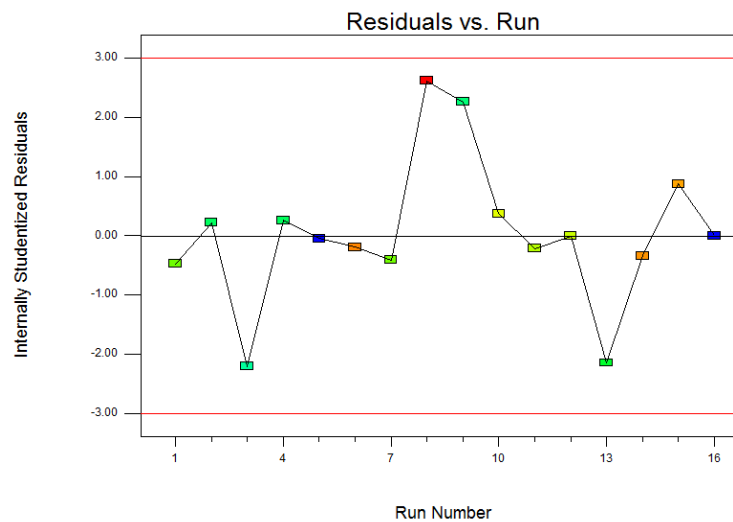
ภาพที่ 4.1 การวิเคราะห์ Normal Plot of Residuals ของสมการ Special Quartic (Hardness)

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



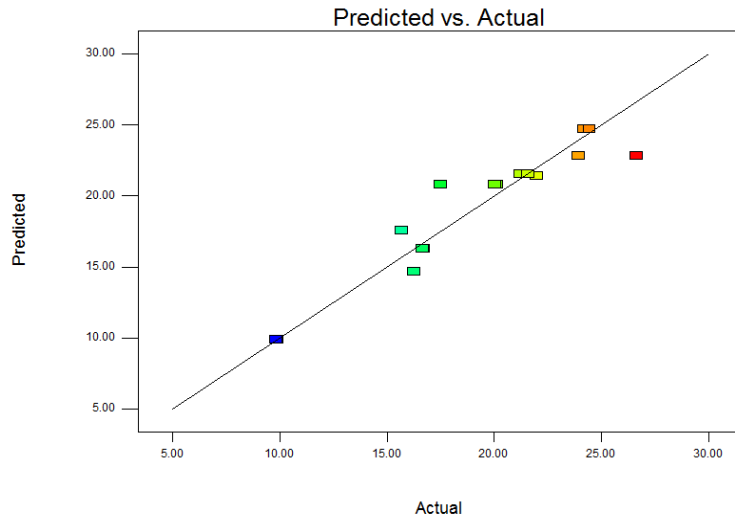
ภาพที่ 4.2 การวิเคราะห์ Residuals vs. Predicted ของสมการ Special Quartic (Hardness)

3. Residuals vs. Run มีการกระจายตัวของข้อมูลแบบสุ่ม คือไม่มีแนวโน้มดังภาพที่ 4.3 ซึ่งถือว่าเป็นลักษณะกราฟที่ดี แสดงถึงความเหมาะสมของข้อมูล



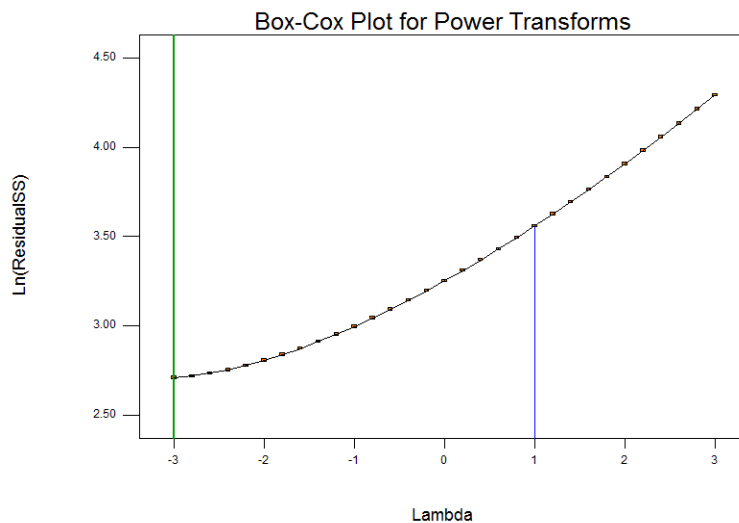
ภาพที่ 4.3 การวิเคราะห์ Residuals vs. Run ของสมการ Special Quartic (Hardness)

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



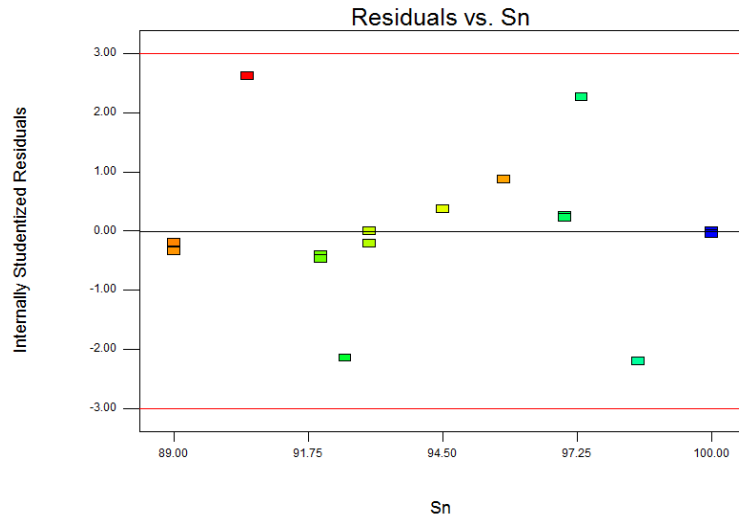
ภาพที่ 4.4 การวิเคราะห์ Predicted vs. Actual ของสมการ Special Quartic (Hardness)

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



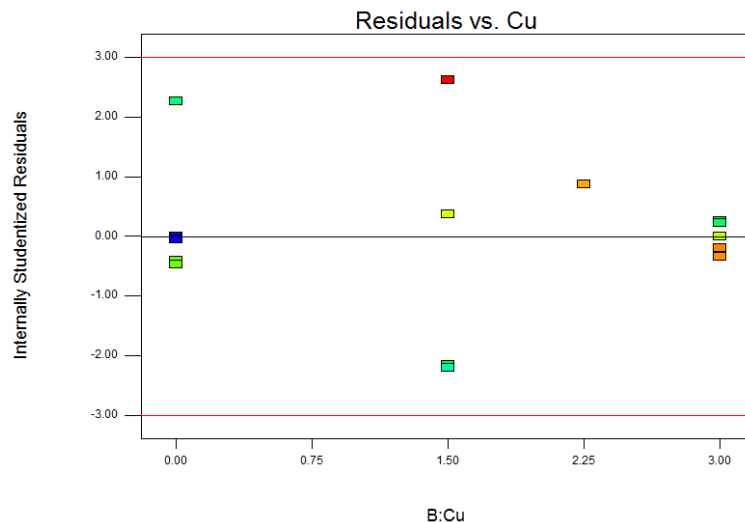
ภาพที่ 4.5 การวิเคราะห์ Box-Cox Plot for Power Transforms ของสมการ Special Quartic (Hardness)

6. Residuals vs. Sn มีการกระจายตัวของข้อมูลแบบสุ่ม ดังภาพที่ 4.6 ซึ่งถือว่าเป็นลักษณะกราฟที่ดี เมื่อนำไปใช้ในการสร้างสมการทำนายผลจะทำให้มีความถูกต้อง



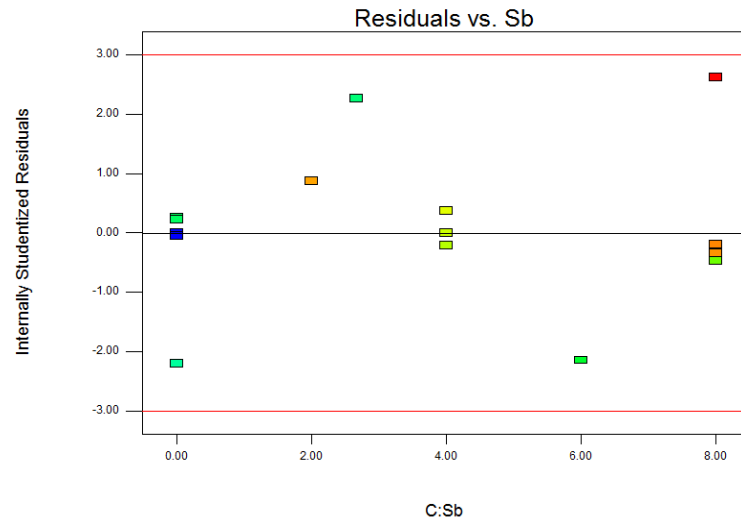
ภาพที่ 4.6 การวิเคราะห์ Residuals vs. Sn ของสมการ Special Quartic (Hardness)

7. Residuals vs. Cu มีการกระจายตัวของข้อมูลในลักษณะเกาะกลุ่มกันเป็นช่วงดังภาพที่ 4.7 ซึ่งไม่ส่งผลดีต่อสมการทำนายผลซึ่งทำให้เกิดความผิดพลาดมาก



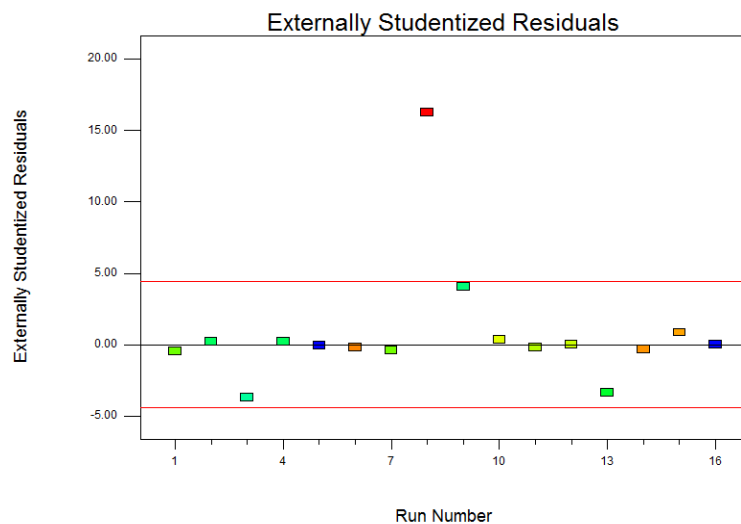
ภาพที่ 4.7 การวิเคราะห์ Residuals vs. Cu ของสมการ Special Quartic (Hardness)

8. Residuals vs. Sb มีการกระจายตัวของข้อมูลในลักษณะเกาะกลุ่มกันเป็นช่วงดังภาพที่ 4.8 ซึ่งไม่ส่งผลดีต่อสมการทำนายผล คือเมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างสมการจะทำให้เกิดความผิดพลาดของสมการทำนายผลที่ค่อนข้างสูง



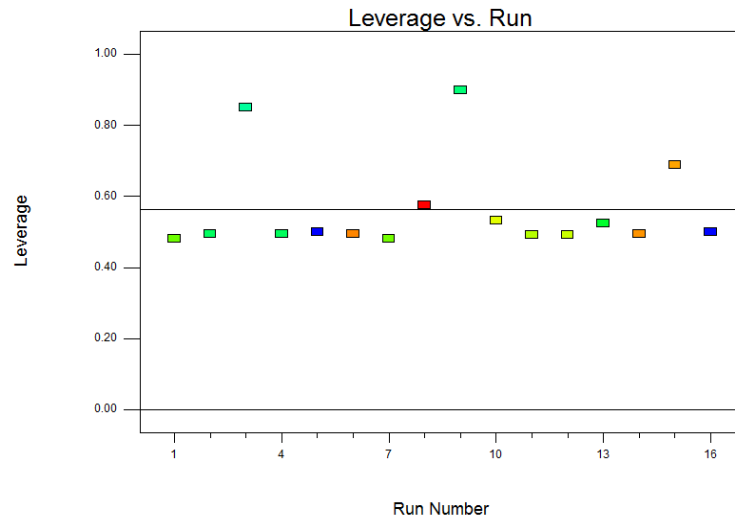
ภาพที่ 4.8 การวิเคราะห์ Residuals vs. Sb ของสมการ Special Quartic (Hardness)

9. Externally Studentized Residuals จากภาพที่ 4.9 มีจุดอยู่นอกขอบเขตซึ่งจะเป็นตัวบ่งบอกว่าจุดที่ใช้ในการทดลองนั้นไม่มีความเหมาะสมที่จะนำไปสร้างสมการทำนายผล



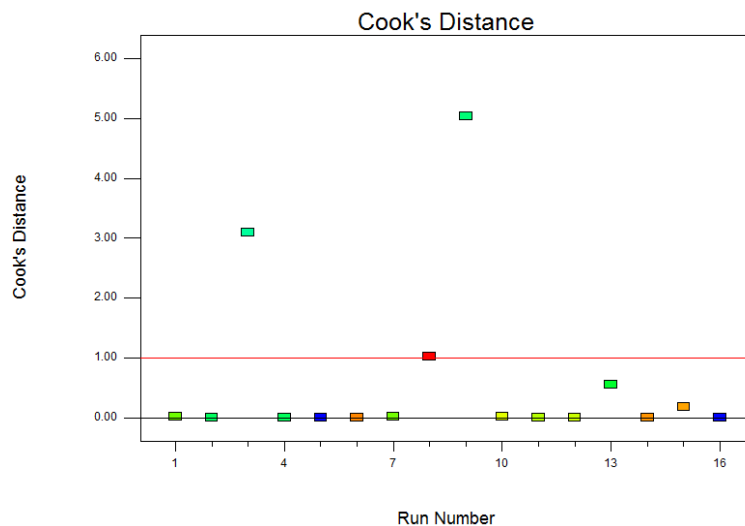
ภาพที่ 4.9 การวิเคราะห์ Externally Studentized Residuals ของสมการ Special Quartic (Hardness)

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)

จากตารางที่ 4.8 เป็นตารางเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายของสมการกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง ซึ่งทำการหาค่าความแตกต่างออกมาเป็นค่า Residual ได้กราฟออกมดั่งภาพที่ 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

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

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนายและการทดสอบความแข็ง

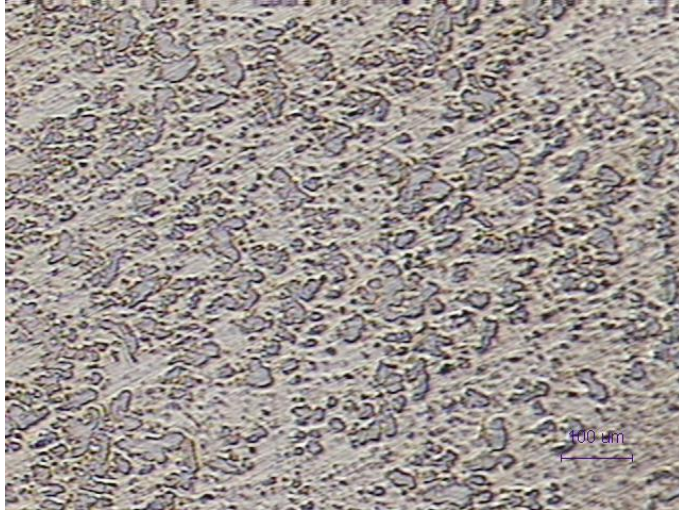
No.	Hardness (ทำนาย)	Hardness (จริง)	% Error
1	18.2	18.1	0.55
2	22.1	22	0.45
3	22.7	22.3	1.79
4	23.9	24.1	0.83
5	20.1	21.4	6.07

4.2 โครงสร้างจุลภาค

ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงของโลหะผสมพิวเตอร์ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.12-4.15 โดยพบว่า ขนาดเกรนของดีบุกบริสุทธิ์มีขนาดใหญ่ที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบค่าความแข็ง ที่ดีบุกบริสุทธิ์มีความแข็งน้อยที่สุด และการเติมทองแดงหรือพลวงลงไปทำให้ขนาดเกรนของพิวเตอร์เล็กลง ส่งผลให้ความแข็งของพิวเตอร์มีค่ามากขึ้น นอกจากนี้ การเติมทองแดงและพลวงพร้อมกันจะทำให้ความแข็งของพิวเตอร์เพิ่มขึ้นมากกว่าการเติมธาตุใดธาตุหนึ่งเพียงอย่างเดียว ซึ่งสอดคล้องกับผลทางโครงสร้างจุลภาคที่พบว่าพิวเตอร์ที่มีส่วนผสมของธาตุทั้งสามชนิดมีขนาดเกรนที่เล็กที่สุด



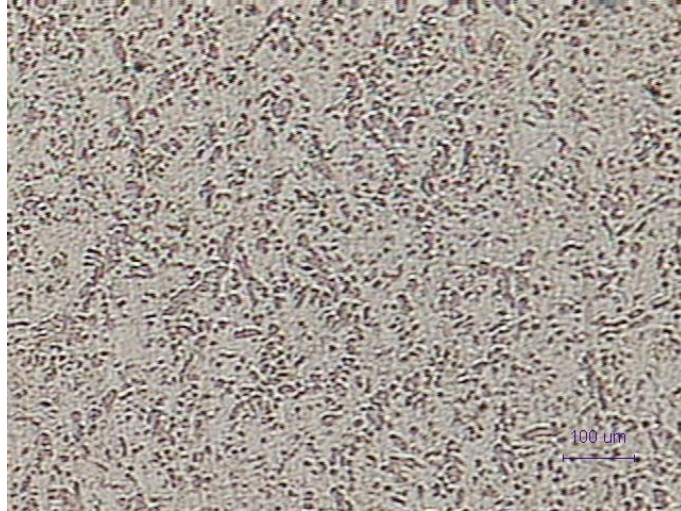
ภาพที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของพิวเตอร์ชนิด 100Sn



ภาพที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของพิวเตอร์ชนิด 97Sn-3Cu



ภาพที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของพิวเตอร์ชนิด 92Sn-8Sb



ภาพที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของพิวเตอร์ชนิด 89Sn-3Cu-8Sb