

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

การดำเนินการสำหรับงานวิจัยนี้ ได้ถูกกำหนดให้เป็นไปตามขั้นตอนที่ได้ระบุไว้ในบทที่ 3 กล่าวคือ ได้ทำการเตรียมผงโลหะผสมขึ้นจากส่วนผสมของผงโลหะที่แตกต่างกัน ตามแผนการทดลองในตารางที่ 3.1 แล้วนำชิ้นงานของผงโลหะผสมที่เตรียมได้มาทดสอบ เพื่อหาค่าคุณสมบัติทางกายภาพ และ คุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) การเปลี่ยนแปลงขนาด(dimension change) ค่าแรงค้ำชนิด 2 แกน (biaxial bending strength) โมดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elastic) และ ความแข็ง (hardness) ของชิ้นงาน

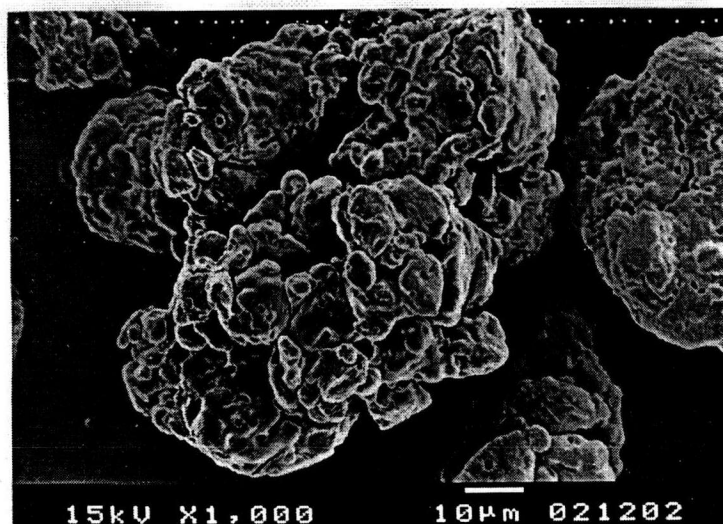
ดังที่กล่าวมาแล้ว ในงานวิจัยนี้ ได้แบ่งผลการทดลอง และการวิเคราะห์ออกเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

1. ผลการตรวจสอบรูปทรง ของผงเหล็ก ผงทองแดง และแกรไฟต์
2. ผลการทดลองส่วนผสมระหว่าง เหล็ก ทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา
  - 2.1) ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกล
  - 2.2) การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ
3. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ
4. สรุปผลตารางการทดลอง

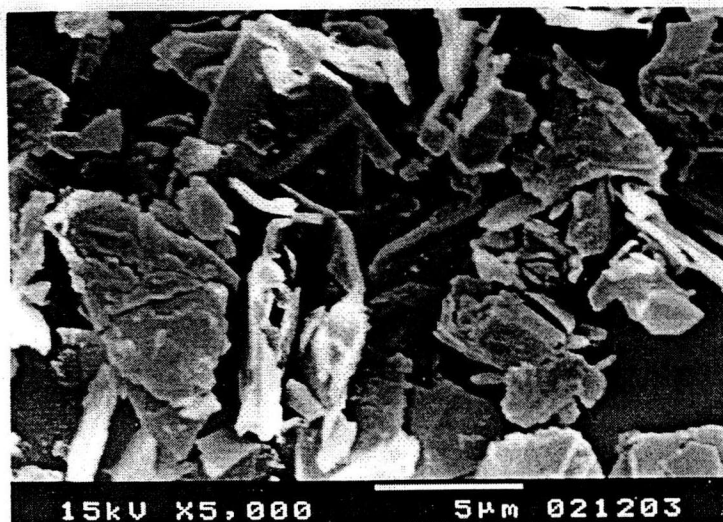
## 4.1 ผลการตรวจสอบรูปทรง และลักษณะของผงเหล็ก ผงทองแดง และ แกรไฟต์

### 4.1.1 รูปทรงผงวัสดุ

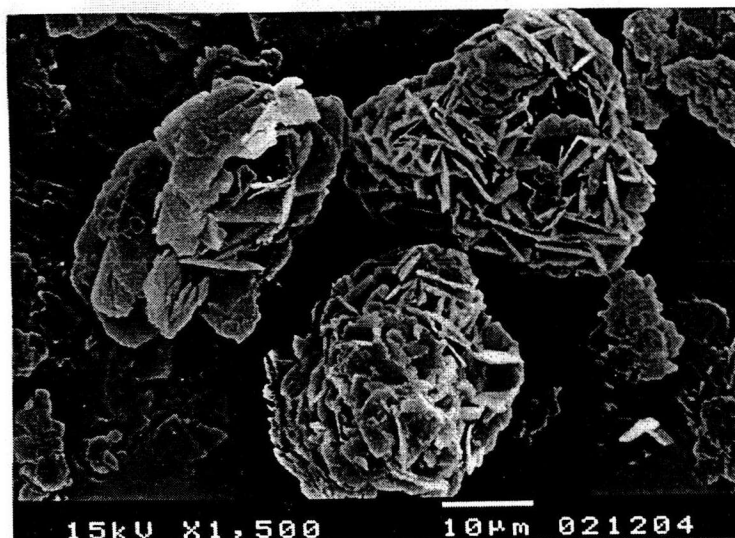
จากภาพถ่ายของผงเหล็ก ชนิด NC 100.24 ใน รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายของผงทองแดง ใน รูป 4.2 และภาพถ่ายของแกรไฟต์ ในรูปที่ 4.3 ตามลำดับ ซึ่งถ่ายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope(SEM) ด้วยกำลังขยาย 1000 1500 และ 750 เท่า ตามลำดับ ทำให้ทราบรายละเอียดของผงเหล็ก ผงทองแดง และ แกรไฟต์ โดยพบว่า ผงเหล็กมีลักษณะเป็นรูปทรงกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยประมาณ 120 ไมโครเมตร ผงทองแดง มีลักษณะรูปทรงไม่แน่นอน โดยมีขนาดระหว่าง 1-5 ไมโครเมตร ส่วนแกรไฟต์ มีลักษณะรูปทรงกลม ภายในมีรูปทรงไม่แน่นอน และมีขนาดของผงโดยประมาณ 30 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายของผงเหล็ก กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายของผงทองแดง กำลังขยาย 5000 เท่า



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายของผงแกรไฟต์ กำลังขยาย 1500 เท่า

## 4.2 ผลการทดลองส่วนผสมระหว่าง เหล็ก ทองแดง และ แกรไฟต์

### 4.2.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นส่วนภายหลังการเผา มีดังนี้ คือ

1. อัตราส่วนผสมในผงโลหะผสม
2. ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)
3. การเปลี่ยนแปลงขนาด (dimension change)

#### 4.2.1.1) ผลการตรวจอัตราส่วนผสมในผงโลหะผสมหลังการเผา

จากการตรวจอัตราส่วนผสมของเหล็ก ทองแดง และ แกรไฟต์ในผงโลหะผสมหลังการเผา ซึ่งวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมของเครื่อง Scanning Electron Microscope(SEM) ของชิ้นงานที่ปริมาณทองแดง 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แกรไฟต์ 0.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิการเผา 1120 °C 950 °C และ 880 °C (ส่วนผสมที่ 16 40 และ 64 ตามลำดับ) และ ที่ปริมาณทองแดง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แกรไฟต์ 1.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิการเผา 1120 °C 950 °C และ 880 °C (ส่วนผสมที่ 24 48 และ 72 ตามลำดับ) ได้ผลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชิ้นงานก่อนและหลังเผา ปรากฏดังแสดงในตารางที่ 4.1 (ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.1 ผลการตรวจสอบอัตราส่วนผสมในผงโลหะผสมหลังการเผา

ตัวอย่าง ที่	เหล็ก(กรัม)			ทองแดง(กรัม)			แกรไฟต์(กรัม)		
	ก่อน เผา	หลัง เผา	เปลี่ยน แปลง(%)	ก่อน เผา	หลัง เผา	เปลี่ยน แปลง(%)	ก่อน เผา	หลัง เผา	เปลี่ยน แปลง(%)
16	5.592	5.443	-2.74	0.36	0.348	-3.45	0.048	0.046	-4.35
24	5.328	5.181	-2.84	0.6	0.582	-3.09	0.072	0.069	-4.34
40	5.592	5.387	-3.81	0.36	0.345	-4.35	0.048	0.047	-2.13
48	5.328	5.172	-3.02	0.6	0.589	-1.87	0.072	0.068	-5.88
64	5.592	5.408	-3.40	0.36	0.347	-3.75	0.048	0.046	-4.34
72	5.328	5.271	-1.08	0.6	0.578	-3.81	0.072	0.069	-4.35

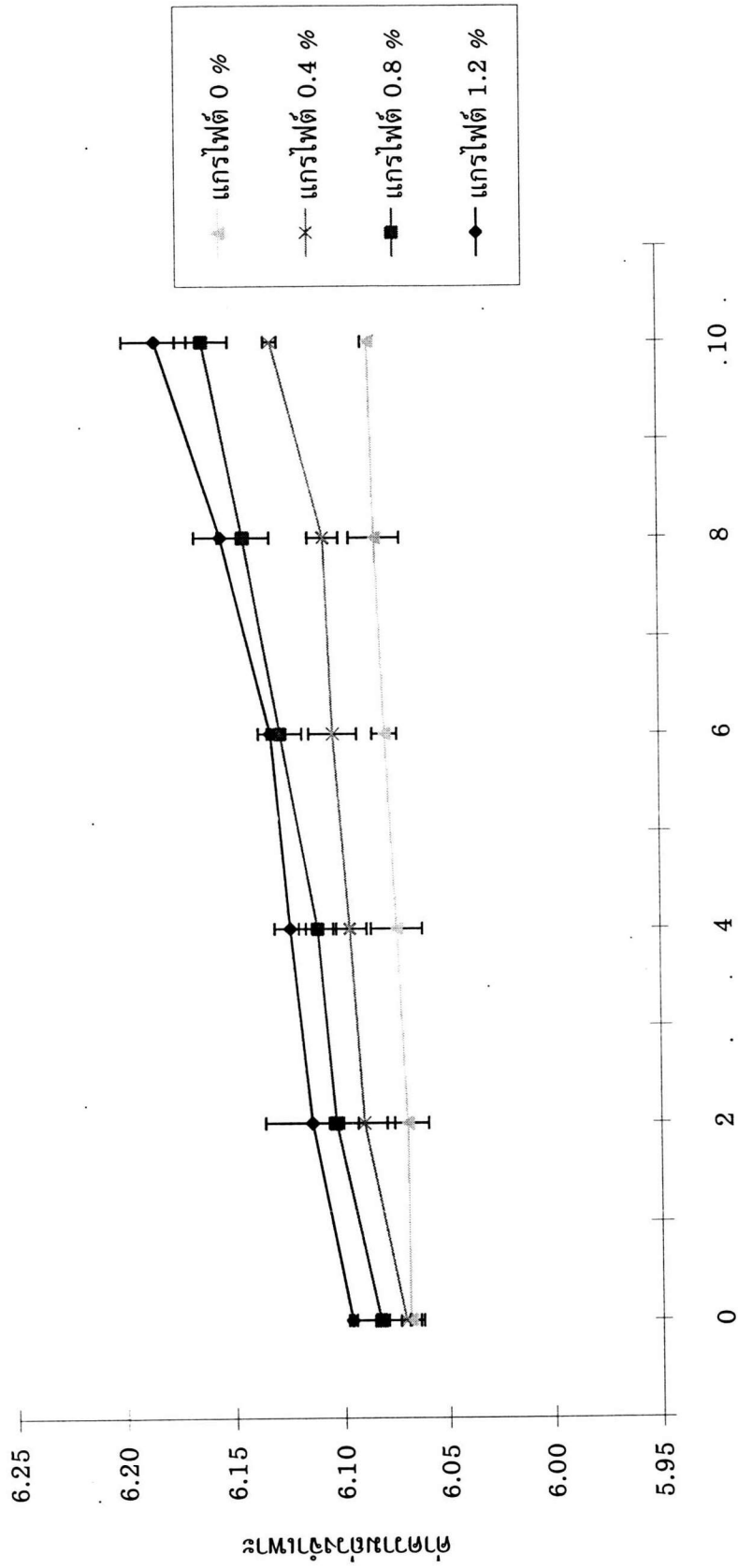
จากตารางที่ 4.1 จะพบว่า ปริมาณของ เหล็ก ทองแดง และ แกรไฟต์ ก่อนการเผา และ หลังการเผา มีปริมาณการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก คือปริมาณการเปลี่ยนแปลงประมาณ 1 – 5 เปอร์เซ็นต์ และเปอร์เซ็นต์ที่มวลของเหล็ก ทองแดง และ แกรไฟต์ ที่หายไปนั้น มีปริมาณใกล้เคียงกัน จึงทำให้ยอมรับได้ว่าปริมาณของเหล็ก ทองแดง และ แกรไฟต์ ยังทำการทดสอบต่อไปตามปริมาณเปอร์เซ็นต์ของปัจจัยการทดลอง

#### 4.2.1.2) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

จากการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของชิ้นงานผงโลหะผสม จำนวน 360 ชิ้น ที่เตรียมขึ้นจากปริมาณของผงเหล็ก ระหว่าง 88.8-100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผงทองแดง ระหว่าง 0-10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และแกรไฟต์ ระหว่าง 0-1.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเผา 3 ระดับ คือ 1120 °C 950 °C และ 880 °C ตามแผนการทดลองในตารางที่ 3.1 โดยได้ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ได้ผลปรากฏดังแสดงในตารางที่ 4.2 ถึง 4.4 จากตารางที่ 4.2 ถึง 4.4 และ กราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.4 ถึง รูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของ ทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา มีแนวโน้มที่ส่งผล ต่อค่าความถ่วงจำเพาะของชิ้นงานผงโลหะผสม นั่นคือเมื่อปริมาณของทองแดงเพิ่มขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะของผงโลหะผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนแกรไฟต์ นั้นพบว่า เมื่อปริมาณของแกรไฟต์มากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะของผงโลหะผสมมีค่าเพิ่มขึ้น และ อุณหภูมิการเผา เมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะของผงโลหะ จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยจะได้นำผลกระทบของ ทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา ที่มีต่อค่าความถ่วงจำเพาะของผงโลหะผสมนี้ไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญในเชิงสถิติต่อไป

ตารางที่ 4.2 ผลของค่าความถ่วงจำเพาะของ ปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส

แกรไฟต์ (% โดยน้ำหนัก)	การทดลอง ครั้งที่	ทองแดง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)							
		0	2	4	6	8	10		
0.0	1	6.0699	6.0846	6.0793	6.0873	6.0920	6.0970		
	2	6.0673	6.0542	6.0691	6.0653	6.0662	6.0760		
	ค่าเฉลี่ย	6.0686	6.0694	6.0742	6.0763	6.0791	6.0865		
	SD	0.0018	0.0215	0.0072	0.0156	0.0182	0.0148		
0.4	1	6.0611	6.0924	6.0903	6.1104	6.1250	6.1400		
	2	6.0805	6.0878	6.1025	6.1122	6.1232	6.1228		
	ค่าเฉลี่ย	6.0708	6.0901	6.0964	6.1113	6.1241	6.1314		
	SD	0.0137	0.0033	0.0086	0.0034	0.0009	0.0122		
0.8	1	6.0769	6.1134	6.1059	6.1278	6.1423	6.1651		
	2	6.0889	6.0932	6.1169	6.1277	6.1417	6.1609		
	ค่าเฉลี่ย	6.0829	6.1033	6.1114	6.1277	6.1420	6.1630		
	SD	0.0085	0.0143	0.0078	0.0095	0.0091	0.0030		
1.2	1	6.0998	6.1074	6.1154	6.1231	6.1309	6.1868		
	2	6.0930	6.1216	6.1328	6.1556	6.1755	6.1826		
	ค่าเฉลี่ย	6.0964	6.1145	6.1241	6.1394	6.1532	6.1847		
	SD	0.0048	0.0100	0.0123	0.0165	0.0203	0.0030		



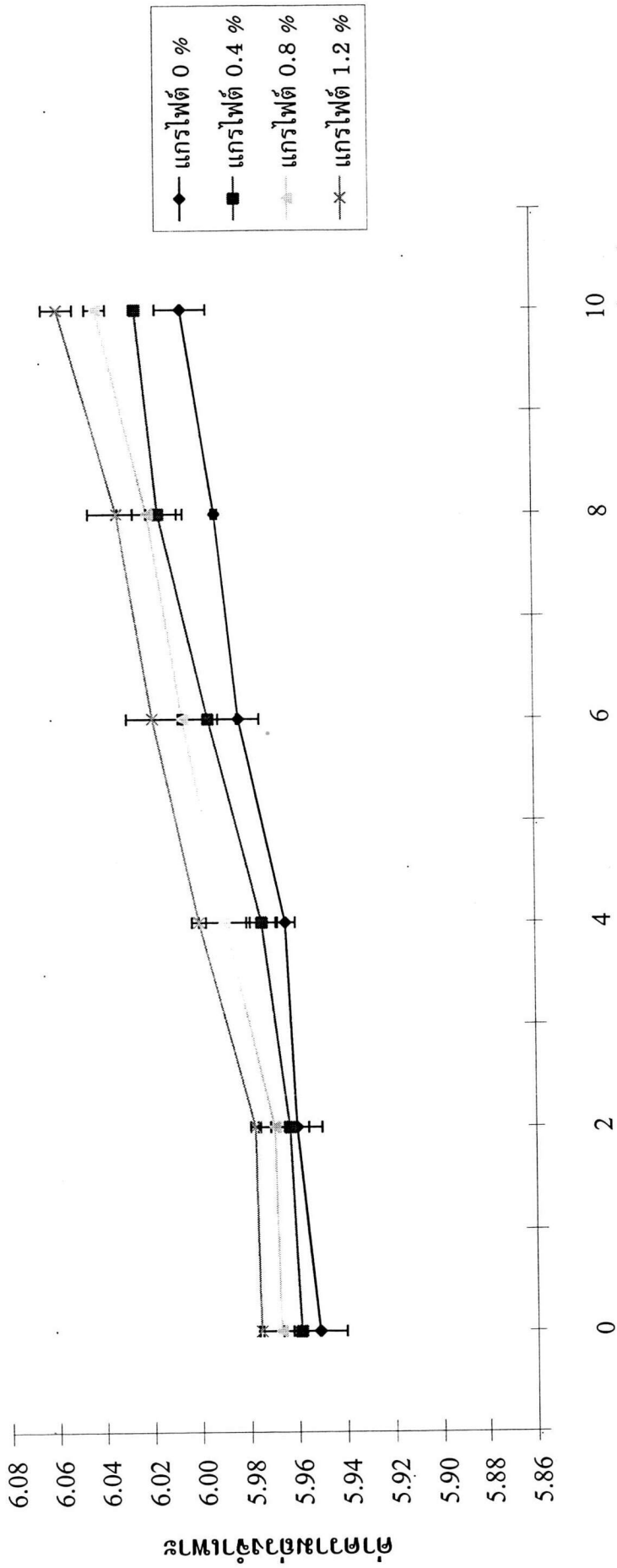
ปริมาณทองแดง(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถ่วงจำเพาะ กับ ปริมาณทองแดงและแกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.3 ผลของค่าความถ่วงจำเพาะของ ปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส

แกรไฟต์ (% โดยน้ำหนัก)	การทดลอง ครั้งที่	ทองแดง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)									
		0	2	4	6	8	10				
0.0	1	5.9434	5.9566	5.9614	5.9718	5.9808	5.9984				
	2	5.9590	5.9634	5.9670	5.9711	5.9751	6.0134				
	ค่าเฉลี่ย	5.9512	5.9600	5.9642	5.9715	5.9780	6.0059				
0.4	SD	0.0110	0.0048	0.0040	-0.0005	-0.0040	0.0106				
	1	5.9641	5.9536	5.9695	5.9678	5.9705	6.0233				
	2	5.9535	5.9722	5.9787	5.9933	6.0059	6.0263				
0.8	ค่าเฉลี่ย	5.9588	5.9629	5.9741	5.9806	5.9882	6.0248				
	SD	0.0075	0.0132	0.0065	0.0081	0.0076	0.0021				
	1	5.9738	5.9705	5.9970	6.0036	6.0152	6.0448				
1.2	2	5.9604	5.9681	5.9822	5.9920	6.0029	6.0384				
	ค่าเฉลี่ย	5.9671	5.9693	5.9896	5.9978	6.0091	6.0416				
	SD	0.0095	0.0017	0.0105	0.0082	0.0087	0.0045				
1.2	1	5.9762	5.9789	6.0021	6.0116	6.0246	6.0530				
	2	5.9750	5.9759	5.9979	6.0058	6.0173	6.0624				
	ค่าเฉลี่ย	5.9756	5.9774	6.0000	6.0087	6.0209	6.0577				
1.2	SD	0.0008	0.0021	0.0030	0.0041	0.0052	0.0066				



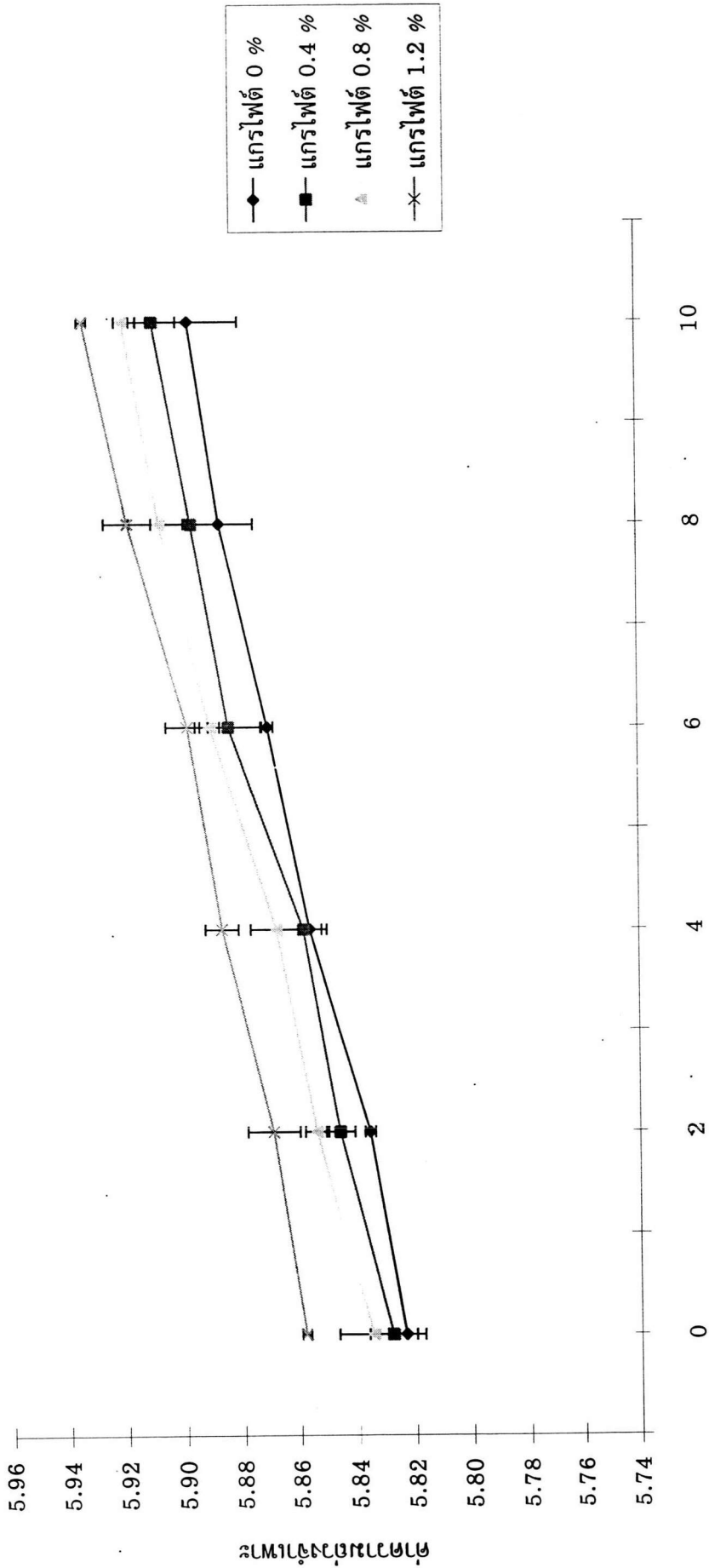


ปริมาณทองแดง(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถ่วงจำเพาะ กับ ปริมาณทองแดงและแกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.4 ผลของค่าความถ่วงจำเพาะของ ปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 880 องศาเซลเซียส

แกรไฟต์ (% โดยน้ำหนัก)	การทดลอง ครั้งที่	ทองแดง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)								
		0	2	4	6	8	10			
0.0	1	5.8281	5.8368	5.8527	5.8638	5.8761	5.9098			
	2	5.8187	5.8342	5.8585	5.8770	5.8969	5.8850			
	ค่าเฉลี่ย	5.8234	5.8355	5.8556	5.8704	5.8865	5.8974			
	SD	0.0066	0.0018	0.0041	0.0016	0.0004	0.0175			
0.4	1	5.8222	5.8490	5.8637	5.8865	5.9072	5.9037			
	2	5.8340	5.8422	5.8521	5.8609	5.8699	5.9151			
	ค่าเฉลี่ย	5.8281	5.8456	5.8579	5.8737	5.8885	5.9094			
	SD	0.0083	0.0048	0.0082	0.0070	0.0069	0.0081			
0.8	1	5.8431	5.8565	5.8740	5.8888	5.9043	5.9180			
	2	5.8267	5.8507	5.8610	5.8805	5.8976	5.9214			
	ค่าเฉลี่ย	5.8349	5.8536	5.8675	5.8846	5.9009	5.9197			
	SD	0.0116	0.0041	0.0092	0.0059	0.0047	0.0024			
1.2	1	5.8568	5.8624	5.8828	5.8933	5.9063	5.9346			
	2	5.8590	5.8756	5.8910	5.9072	5.9232	5.9322			
	ค่าเฉลี่ย	5.8579	5.8690	5.8869	5.9002	5.9147	5.9334			
	SD	0.0016	0.0093	0.0058	0.0098	0.0119	0.0017			



ปริมาณทองแดง(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถ่วงจำเพาะ กับ ปริมาณทองแดงและกระแสไฟ  
ที่อุณหภูมิการเผา 880 องศาเซลเซียส

#### 4.2.1.3) การเปลี่ยนแปลงขนาด (dimension change)

จากการทดสอบหาการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานผงโลหะผสมจำนวน 1440 ชิ้น ที่เตรียมขึ้นจากปริมาณของผงเหล็ก ระหว่าง 88.8-100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผงทองแดง ระหว่าง 0-10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และแกรไฟต์ ระหว่าง 0-1.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเผา 3 ระดับ คือ 1120 °C 950 °C และ 880 °C ตามแผนการทดลองในตารางที่ 3.1 โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ได้ผลปรากฏดังแสดงในตารางที่ 4.5 ถึง 4.7 จากตารางที่ 4.5 ถึง 4.7 และ กราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.7 ถึง 4.9 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา มีแนวโน้มที่ส่งผล ต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของผงโลหะผสม นั่นคือ ที่อุณหภูมิการเผาทั้ง 3 ระดับ เมื่อปริมาณของทองแดงมากขึ้น ในขณะที่ ปริมาณแกรไฟต์คงที่การเปลี่ยนแปลงขนาด จะมีค่าเพิ่มขึ้น และ ที่อุณหภูมิการเผาทั้ง 3 ระดับ เมื่อปริมาณแกรไฟต์ เพิ่มขึ้น ในขณะที่ ปริมาณทองแดงมีค่าที่ การเปลี่ยนแปลงขนาดจะลดลง และ ที่อุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงขนาด จะมีค่าเพิ่มขึ้น และจะได้นำผลของ ทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผาที่มีต่อค่าการเปลี่ยนแปลงขนาด ไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญในเชิงสถิติต่อไป

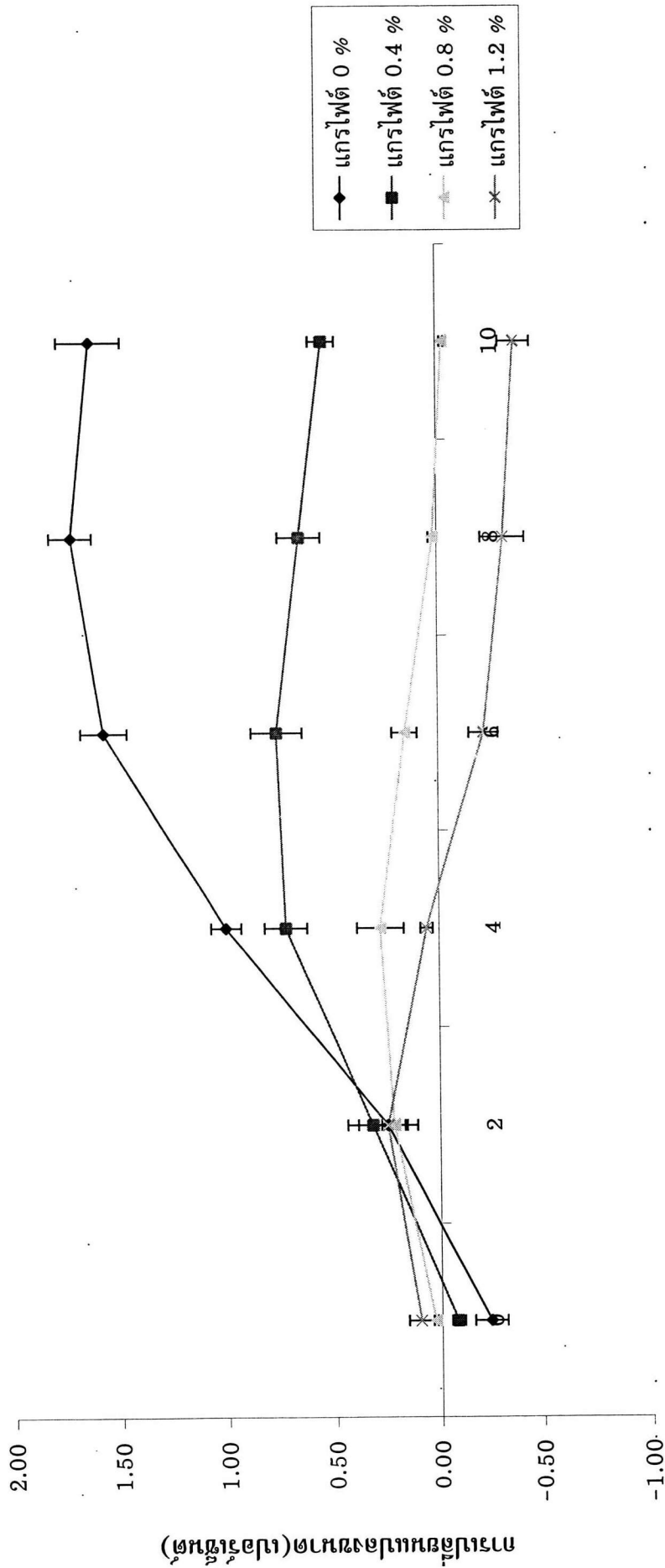
ตารางที่ 4.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดของ ปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 1120 เซลเซียสเซลเซียส

หน่วย : เปอร์เซ็นต์

แกรไฟต์ (% โดยน้ำหนัก)	การทดลอง ครั้งที่	ทองแดง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)							
		0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0		
0.0	1	-0.18	0.16	1.04	1.64	1.65	1.75		
	2	-0.30	0.35	0.95	1.49	1.79	1.53		
	ค่าเฉลี่ย	-0.24	0.25	1.00	1.57	1.72	1.63		
	SD	0.08	0.14	0.07	0.11	0.10	0.15		
0.4	1	-0.10	0.41	0.65	0.84	0.58	0.59		
	2	-0.05	0.24	0.80	0.67	0.72	0.49		
	ค่าเฉลี่ย	-0.08	0.32	0.72	0.76	0.65	0.54		
	SD	0.03	0.12	0.10	0.12	0.10	0.06		
0.8	1	0.03	0.17	0.36	0.21	0.04	-0.04		
	2	0.04	0.27	0.21	0.11	0.01	-0.02		
	ค่าเฉลี่ย	0.03	0.22	0.28	0.16	0.02	-0.03		
	SD	0.01	0.06	0.11	0.06	0.02	0.01		
1.2	1	0.15	0.19	0.04	-0.27	-0.24	-0.44		
	2	0.06	0.31	0.08	-0.17	-0.40	-0.32		
	ค่าเฉลี่ย	0.10	0.25	0.06	-0.22	-0.32	-0.38		
	SD	0.06	0.08	0.03	0.07	0.11	0.08		

หมายเหตุ : เครื่องหมาย (+) หมายถึง ขึ้นจากขนาดตัวของแม่พิมพ์

เครื่องหมาย (-) หมายถึง ขึ้นจากขนาดตัวของแม่พิมพ์



ปริมาณของแดง(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง การเปลี่ยนแปลงขนาด กับ ปริมาณของแดงและแกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส

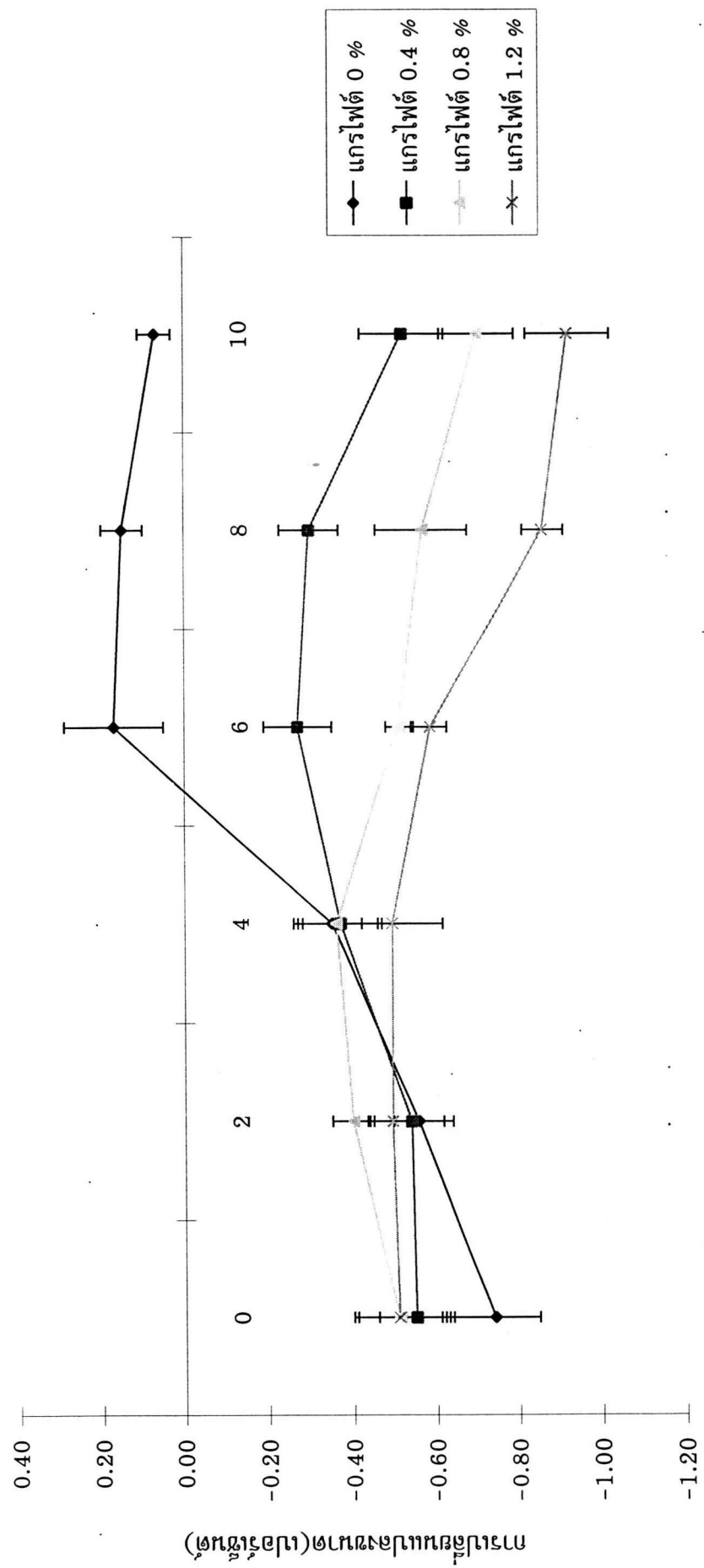
ตารางที่ 4.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดของ ปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 950 เซลเซียสเซลเซียส

หน่วย : เปอร์เซ็นต์

แกรไฟต์ (% โดยน้ำหนัก)	การทดลอง ครั้งที่	ทองแดง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)							
		0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0		
0.0	1	-0.66	-0.51	-0.40	0.26	0.19	0.04		
	2	-0.82	-0.61	-0.30	0.09	0.11	0.10		
	ค่าเฉลี่ย	-0.74	-0.56	-0.35	0.17	0.15	0.07		
	SD	0.11	0.06	0.07	0.12	0.05	0.04		
0.4	1	-0.61	-0.47	-0.30	-0.21	-0.25	-0.45		
	2	-0.49	-0.61	-0.45	-0.33	-0.35	-0.59		
	ค่าเฉลี่ย	-0.55	-0.54	-0.37	-0.27	-0.30	-0.52		
	SD	0.09	0.10	0.10	0.08	0.07	0.10		
0.8	1	-0.57	-0.37	-0.29	-0.54	-0.65	-0.77		
	2	-0.42	-0.44	-0.44	-0.49	-0.50	-0.64		
	ค่าเฉลี่ย	-0.49	-0.40	-0.36	-0.51	-0.57	-0.70		
	SD	0.11	0.05	0.10	0.03	0.11	0.09		
1.2	1	-0.34	-0.52	-0.37	-0.62	-0.83	-0.84		
	2	-0.48	-0.44	-0.53	-0.56	-0.90	-0.99		
	ค่าเฉลี่ย	-0.41	-0.48	-0.45	-0.59	-0.86	-0.92		
	SD	0.10	0.06	0.12	0.04	0.05	0.10		

หมายเหตุ : เครื่องหมาย (+) หมายถึง ชีงงานขยายตัวจากขนาดของแม่พิมพ์

เครื่องหมาย (-) หมายถึง ชีงงานหดตัวจากขนาดของแม่พิมพ์



ปริมาณทองแดง(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง การเปลี่ยนแปลงขนาด กับ ปริมาณทองแดงและแกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส



ตารางที่ 4.7

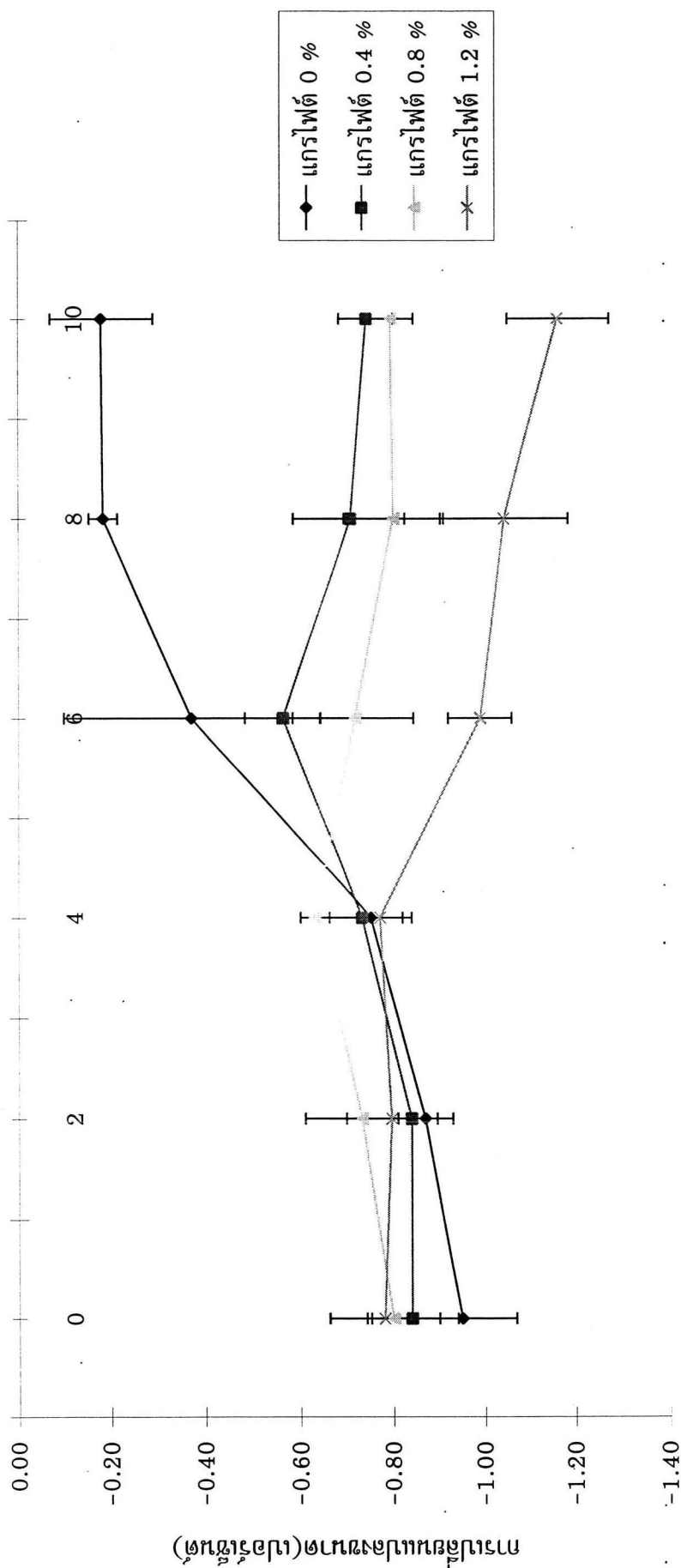
ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดของ ปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 880 เซลเซียสเซลเซียส

หน่วย : เปอร์เซ็นต์

แกรไฟต์ (% โดยน้ำหนัก)	การทดลอง ครั้งที่	ทองแดง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)								
		0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0			
0.0	1	-1.07	-0.89	-0.81	-0.18	-0.16	-0.10			
	2	-0.90	-0.98	-0.69	-0.56	-0.20	-0.25			
	ค่าเฉลี่ย	-0.99	-0.93	-0.75	-0.37	-0.18	-0.18			
	SD	0.12	0.06	0.09	0.27	0.03	0.11			
0.4	1	-0.86	-0.84	-0.67	-0.50	-0.62	-0.78			
	2	-0.71	-0.80	-0.79	-0.62	-0.79	-0.70			
	ค่าเฉลี่ย	-0.78	-0.82	-0.73	-0.56	-0.71	-0.74			
	SD	0.10	0.03	0.09	0.08	0.12	0.06			
0.8	1	-0.73	-0.67	-0.65	-0.80	-0.89	-0.83			
	2	-0.80	-0.83	-0.61	-0.62	-0.73	-0.75			
	ค่าเฉลี่ย	-0.77	-0.75	-0.63	-0.71	-0.80	-0.79			
	SD	0.05	0.12	0.03	0.13	0.11	0.05			
1.2	1	-0.70	-0.87	-0.81	-0.94	-0.94	-1.09			
	2	-0.86	-0.73	-0.73	-1.04	-1.13	-1.23			
	ค่าเฉลี่ย	-0.78	-0.80	-0.77	-0.99	-1.04	-1.16			
	SD	0.12	0.10	0.05	0.07	0.14	0.11			

หมายเหตุ : เครื่องหมาย (+) หมายถึง ขึ้นงานขยายตัวจากขนาดของแม่พิมพ์

เครื่องหมาย (-) หมายถึง ขึ้นงานหดตัวจากขนาดของแม่พิมพ์



ปริมาณทองแดง(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาด กับ ปริมาณทองแดงและแกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 880 องศาเซลเซียส

#### 4.2.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นส่วนภายหลังการเผา มีดังนี้ คือ

1. แรงคัดชนิด 2 แกน (Biaxial bending Strength)
2. โมดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elastic)
3. ความแข็ง (hardness)
4. ผลการตรวจสอบลักษณะเกรนของผงโลหะผสม หลังการคัดชนิด 2 แกน
5. ผลการตรวจสอบการกระจายของผงโลหะผสม หลังการคัดชนิด 2 แกน

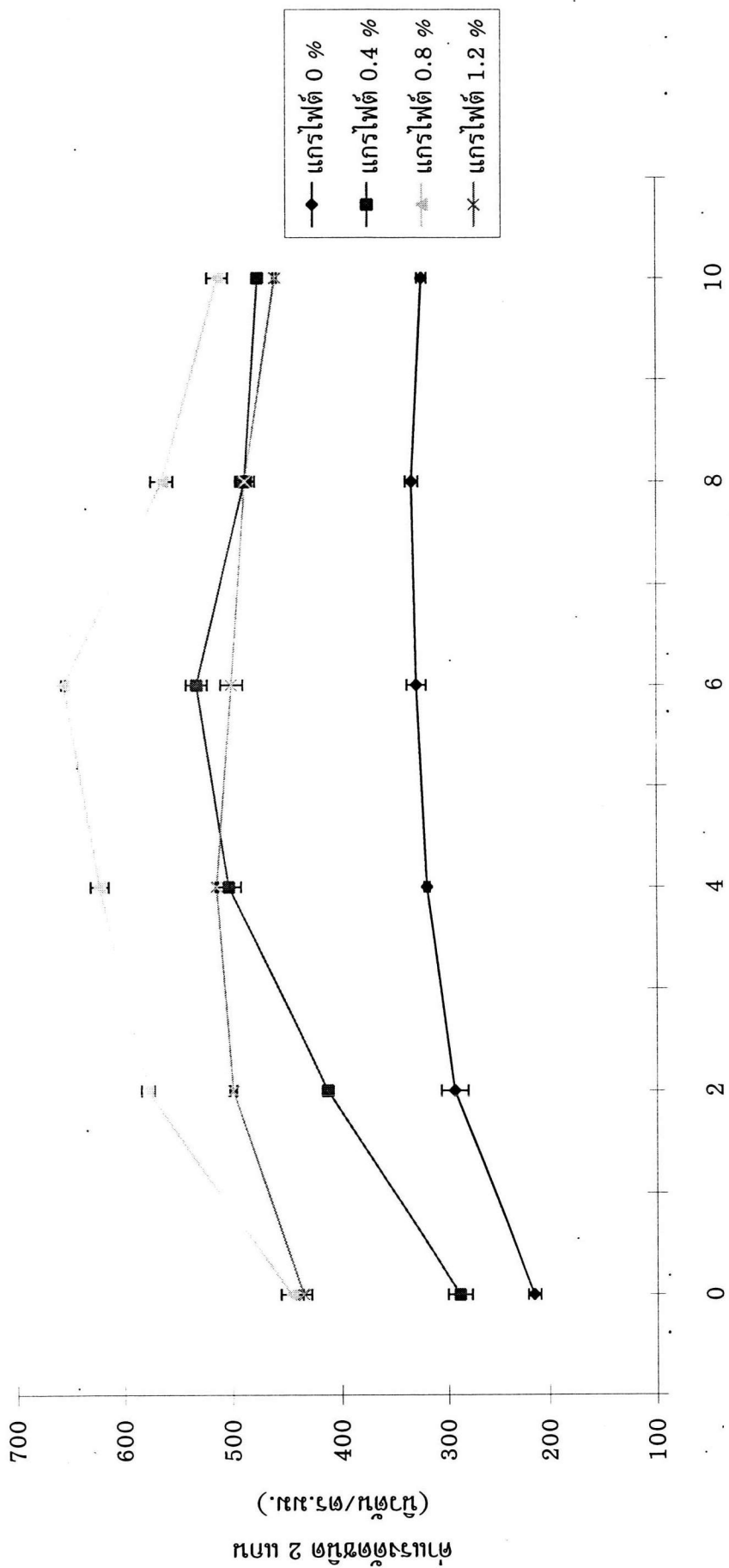
##### 4.2.2.1) แรงคัดชนิด 2 แกน (Biaxial bending Strength)

จากการทดสอบหาค่าแรงคัดชนิด 2 แกนของชิ้นงานผงโลหะผสมจำนวน 1440 ชิ้น ที่เตรียมขึ้นจากปริมาณของผงเหล็ก ระหว่าง 88.8 - 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผงทองแดงระหว่าง 0-10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และแกรไฟต์ ระหว่าง 0-1.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเผา 3 ระดับ คือ 1120 °C 950 °C และ 880 °C ตามแผนการทดลองในตารางที่ 3.1 โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ได้ผลปรากฏดังแสดงในตารางที่ 4.8 ถึง 4.10 จากตารางที่ 4.8 ถึง 4.10 และ กราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.10 ถึง 4.12 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา มีแนวโน้มที่ส่งผล ต่อค่าแรงคัดชนิด 2 แกนของผงโลหะผสม นั่นคือ ที่อุณหภูมิการเผาทั้ง 3 ระดับ เมื่อปริมาณของ ทองแดง มากขึ้น ในขณะที่ ปริมาณแกรไฟต์คงที่ ค่าแรงคัดชนิด 2 แกน จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณทองแดงที่ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าแรงคัดชนิด 2 แกน มีค่าลดลงเล็กน้อย และ ที่อุณหภูมิการเผาทั้ง 3 ระดับ เมื่อปริมาณแกรไฟต์ เพิ่มขึ้น ในขณะที่ ปริมาณทองแดงคงที่ ค่าแรงคัดชนิด 2 แกน จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณแกรไฟต์ ที่ 0.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าแรงคัดชนิด 2 แกน มีค่าลดลงเล็กน้อย และ เมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น จะมีผลให้ ค่าแรงคัดชนิด 2 แกน มีค่าเพิ่มขึ้น และจะได้นำผลของ ทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผาที่มี ต่อค่าแรงคัดชนิด 2 แกน ไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญในเชิงสถิติต่อไป

ตารางที่ 4.8 ผลของค่าแรงตัดชนิด 2 เกนของ ปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส

หน่วย : นิวตันต่อตร.มม.

แกรไฟต์ (% โดยน้ำหนัก)	การทดลอง ครั้งที่	ทองแดง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)							
		0	2	4	6	8	10		
0.0	1	210.52	302.76	323.02	323.38	329.92	321.33		
	2	219.52	284.40	317.08	336.08	338.24	327.69		
	ค่าเฉลี่ย	215.02	293.58	320.05	329.73	334.08	324.51		
	SD	6.36	12.98	4.19	8.98	5.88	4.50		
0.4	1	280.69	414.77	495.14	525.49	492.55	473.02		
	2	296.99	409.99	510.59	539.40	483.59	478.77		
	ค่าเฉลี่ย	288.84	412.38	502.86	532.44	488.07	475.89		
	SD	11.53	3.38	10.93	9.84	6.34	4.06		
0.8	1	439.16	574.40	628.90	652.78	557.01	505.62		
	2	453.47	582.70	616.95	659.53	571.51	519.24		
	ค่าเฉลี่ย	446.31	578.55	622.92	656.15	564.26	512.43		
	SD	10.12	5.88	8.45	4.78	10.26	9.64		
1.2	1	440.62	497.23	509.35	493.09	493.89	461.38		
	2	430.32	501.54	518.98	507.40	481.54	459.07		
	ค่าเฉลี่ย	435.47	499.38	514.17	500.25	487.72	460.23		
	SD	7.29	3.05	6.81	10.12	8.73	1.63		



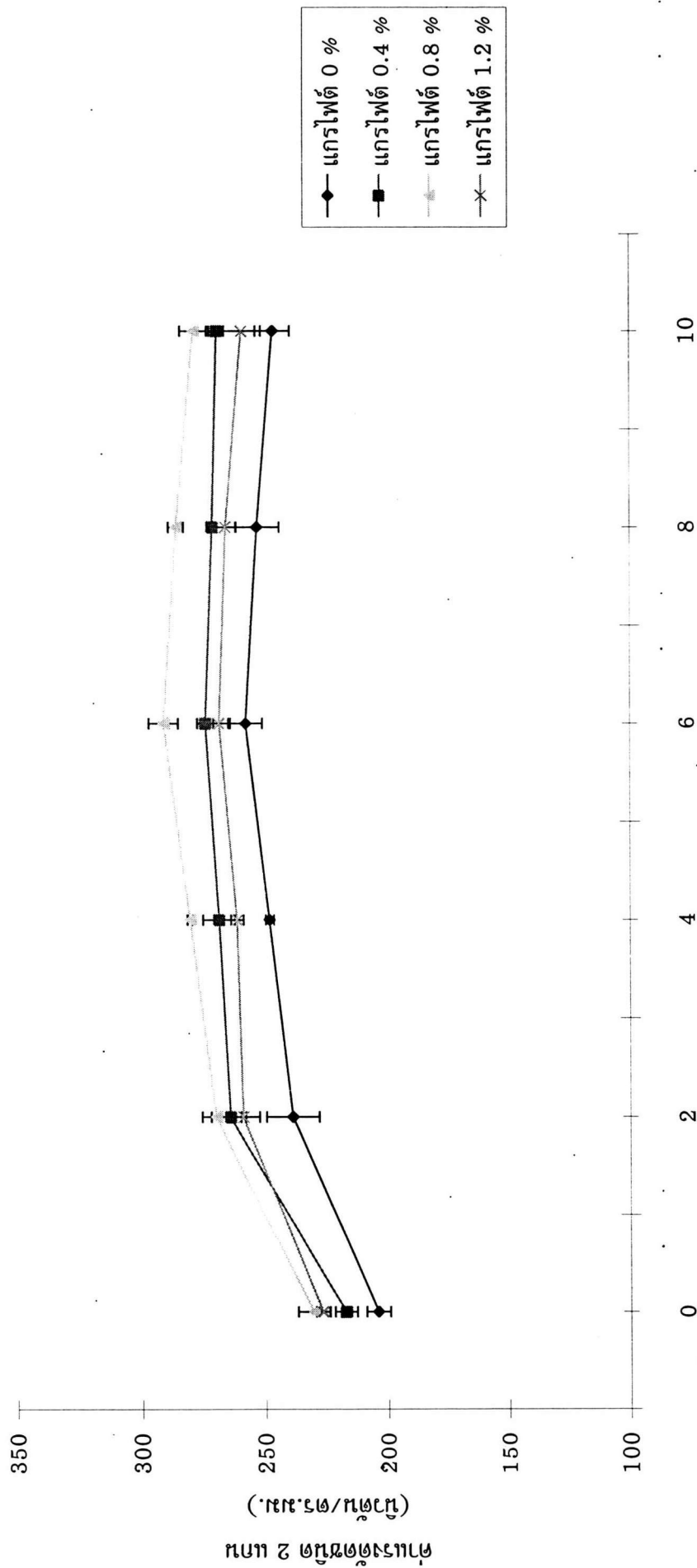
ปริมาณของแอมโมเนียมไนโตรเจน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ค่าแรงตัดชนิด 2 แกน กับ ปริมาณของแอมโมเนียมไนโตรเจน 1120 องค์ประกอบธาตุ

ตารางที่ 4.9 ผลของค่าแรงตัดชนิด 2 แกนของ ปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส

หน่วย : นิวตันต่อตร.มม.

แกรไฟต์ (% โดยน้ำหนัก)	การทดลอง ครั้งที่	ทองแดง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)							
		0	2	4	6	8	10		
0.0	1	207.84	246.51	250.36	252.91	259.15	241.91		
	2	200.68	231.61	245.97	262.05	246.79	251.57		
	ค่าเฉลี่ย	204.26	239.06	248.16	257.48	252.97	246.74		
	SD	5.06	10.54	3.10	6.47	8.74	6.83		
0.4	1	214.56	255.87	273.38	271.83	274.28	267.31		
	2	220.93	272.43	264.19	276.45	268.34	271.63		
	ค่าเฉลี่ย	217.75	264.15	268.79	274.14	271.31	269.47		
	SD	4.51	11.72	6.50	3.27	4.24	3.05		
0.8	1	235.38	266.68	284.22	286.82	283.70	282.56		
	2	226.24	273.59	276.63	295.09	288.01	275.07		
	ค่าเฉลี่ย	230.81	270.14	280.42	290.95	285.86	278.82		
	SD	6.46	4.88	5.37	5.85	3.05	5.30		
1.2	1	230.06	253.14	265.10	265.95	269.06	264.63		
	2	224.17	264.60	257.39	271.36	262.70	253.67		
	ค่าเฉลี่ย	227.12	258.87	261.24	268.66	265.88	259.15		
	SD	4.16	8.10	5.45	3.82	4.49	7.75		



ปริมาณของแดง(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

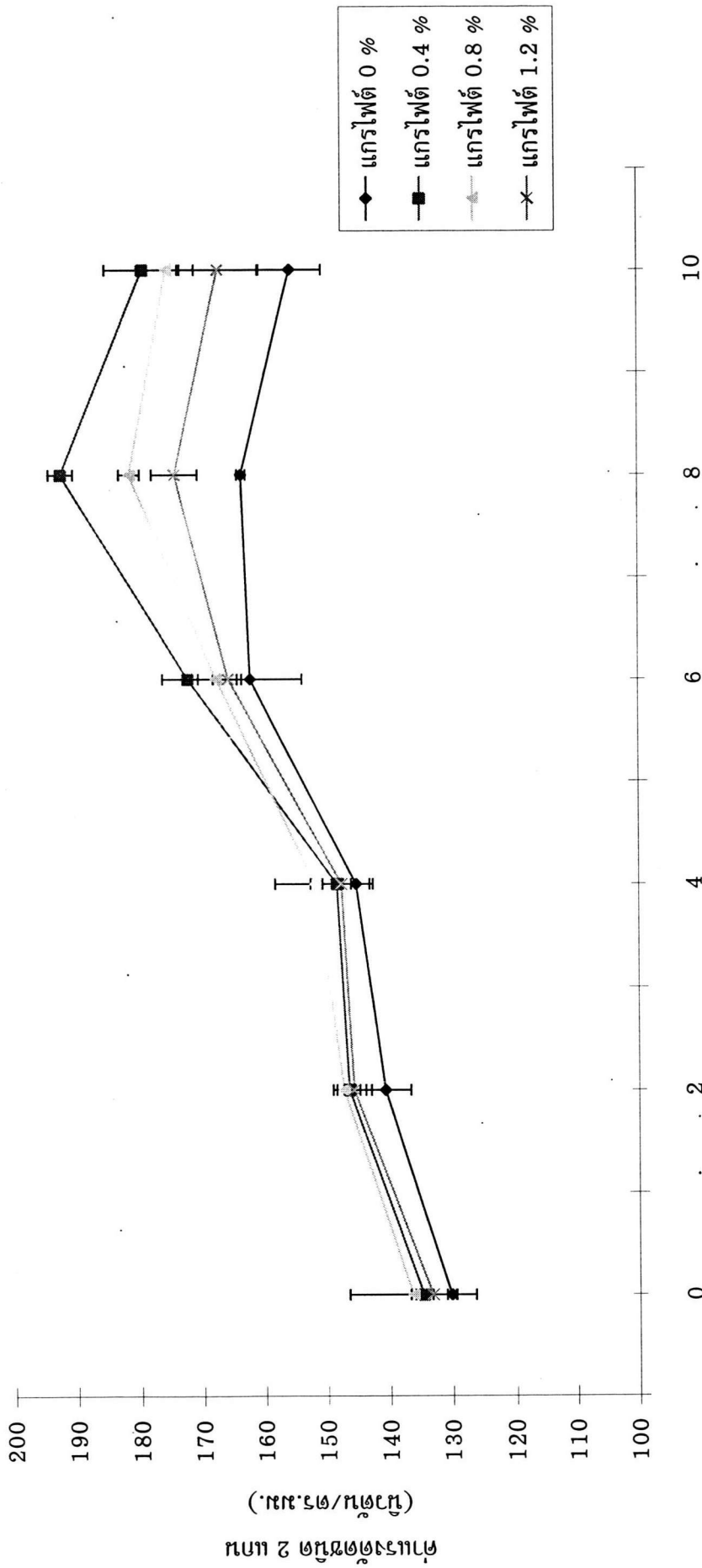
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ค่าแรงตัดชนิด 2 แกน กับ ปริมาณของแดงและแกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.10 ผลของค่าแรงตัดชนิด 2 แกนของ ปริมาณของแดง และ แกรไฟต์ ที่หมักการเผา 880 องศาเซลเซียส

หน่วย : นิวตันต่อตร.มม.

แกรไฟต์ (% โดยน้ำหนัก)	การทดลอง ครั้งที่	ทองแดง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)							
		0	2	4	6	8	10		
0.0	1	134.75	143.51	142.69	156.20	160.03	151.88		
	2	125.66	137.77	147.66	168.05	167.00	159.03		
	ค่าเฉลี่ย	130.20	140.64	145.18	162.12	163.52	155.46		
	SD	6.43	4.06	7.35	8.38	4.93	5.06		
0.4	1	129.65	151.22	151.86	169.31	188.77	174.97		
	2	139.60	141.52	144.68	175.06	195.52	183.34		
	ค่าเฉลี่ย	134.63	146.37	148.27	172.18	192.15	179.16		
	SD	7.03	6.86	5.08	4.07	4.77	5.92		
0.8	1	143.52	140.98	156.27	164.76	186.52	178.58		
	2	129.22	153.49	147.16	170.53	176.20	172.26		
	ค่าเฉลี่ย	136.37	147.23	151.72	167.64	181.36	175.42		
	SD	10.11	8.54	6.44	4.08	7.30	4.47		
1.2	1	130.60	147.59	151.04	159.71	176.77	171.73		
	2	135.71	143.70	144.01	171.64	171.59	162.58		
	ค่าเฉลี่ย	133.15	145.64	147.53	165.67	174.18	167.15		
	SD	3.61	2.75	4.97	8.43	3.66	6.47		





รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ค่าแรงตดชนิด 2 แกน กับ ปริมาณทองแดงและแกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 880 องศาเซลเซียส

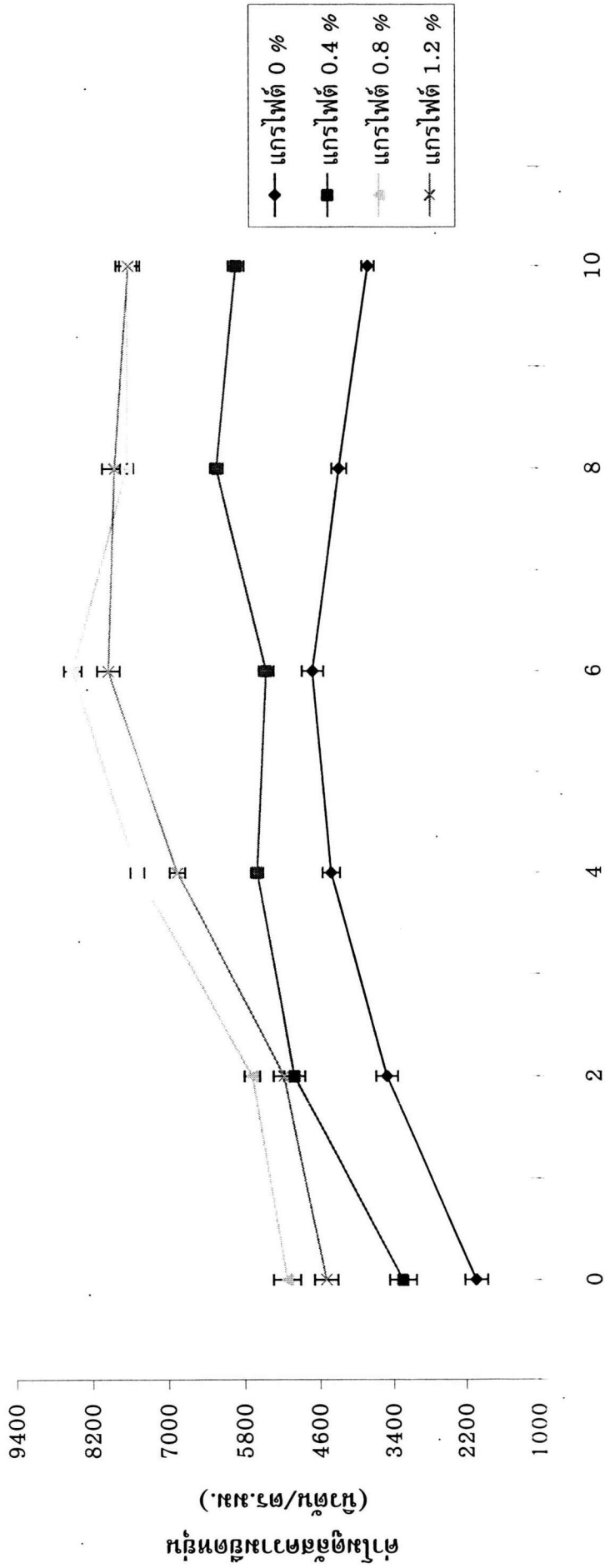
#### 4.2.2.2) โมดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity)

จากการทดสอบหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชิ้นงานผงโลหะผสม จำนวน 1440 ชิ้น ที่เตรียมขึ้นจากปริมาณของผงเหล็ก ระหว่าง 88.8 - 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผงทองแดงระหว่าง 0-10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และแกรไฟต์ ระหว่าง 0-1.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเผา 3 ระดับ คือ 1120 °C 950 °C และ 880 °C ตามแผนการทดลองในตารางที่ 3.1 โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ได้ผลปรากฏดังแสดงในตารางที่ 4.11 ถึง 4.13 จากตารางที่ 4.11 ถึง 4.13 และ กราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.13 ถึง 4.15 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของทองแดง แกรไฟต์ และอุณหภูมิการเผา มีแนวโน้มที่ส่งผล ต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของผงโลหะผสม นั่นคือ ที่อุณหภูมิการเผาทั้ง 3 ระดับ เมื่อปริมาณของ ทองแดง มากขึ้น ในขณะที่ ปริมาณแกรไฟต์ลดลง ที่ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณทองแดงที่ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น มีค่าลดลงเล็กน้อย และ ที่อุณหภูมิการเผาทั้ง 3 ระดับ เมื่อปริมาณแกรไฟต์ เพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณทองแดงคงที่ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณแกรไฟต์ ที่ 0.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โมดูลัสความยืดหยุ่น มีค่าลดลงเล็กน้อย และ เมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น จะมีผลให้ โมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้น และจะได้นำผลของ ทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผาที่มีต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญในเชิงสถิติต่อไป

ตารางที่ 4.11 ผลของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของ ปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส

หน่วย : N/mm<sup>2</sup>

แกรไฟต์ (% โดยน้ำหนัก)	การทดลอง ครั้งที่	ทองแดง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)							
		0	2	4	6	8	10		
0.0	1	2106.64	3368.49	4491.50	4562.19	4338.49	3701.83		
	2	2367.54	3617.97	4294.42	4802.61	4167.33	3845.11		
	ค่าเฉลี่ย	2237.09	3493.23	4392.96	4682.40	4252.91	3773.47		
	SD	184.48	176.41	139.36	170.00	121.03	101.31		
0.4	1	3398.78	4874.36	5513.91	5711.60	6129.04	5973.23		
	2	3088.90	5115.32	5649.79	5542.14	6277.32	5799.91		
	ค่าเฉลี่ย	3243.84	4994.84	5581.85	5626.87	6203.18	5886.57		
	SD	219.12	170.38	96.08	119.83	104.85	122.56		
0.8	1	4970.73	5758.03	7547.31	8575.90	7547.36	7460.87		
	2	5282.48	5585.07	7390.95	8383.02	7690.70	7729.05		
	ค่าเฉลี่ย	5126.61	5671.55	7469.13	8479.46	7619.03	7594.96		
	SD	220.44	122.30	110.56	136.38	101.36	189.63		
1.2	1	4363.67	5283.09	6925.35	8041.37	7668.13	7492.40		
	2	4627.24	5042.55	6754.22	7790.07	7946.73	7686.51		
	ค่าเฉลี่ย	4495.45	5162.82	6839.79	7915.72	7807.43	7589.46		
	SD	186.38	170.09	121.01	177.70	197.00	137.25		



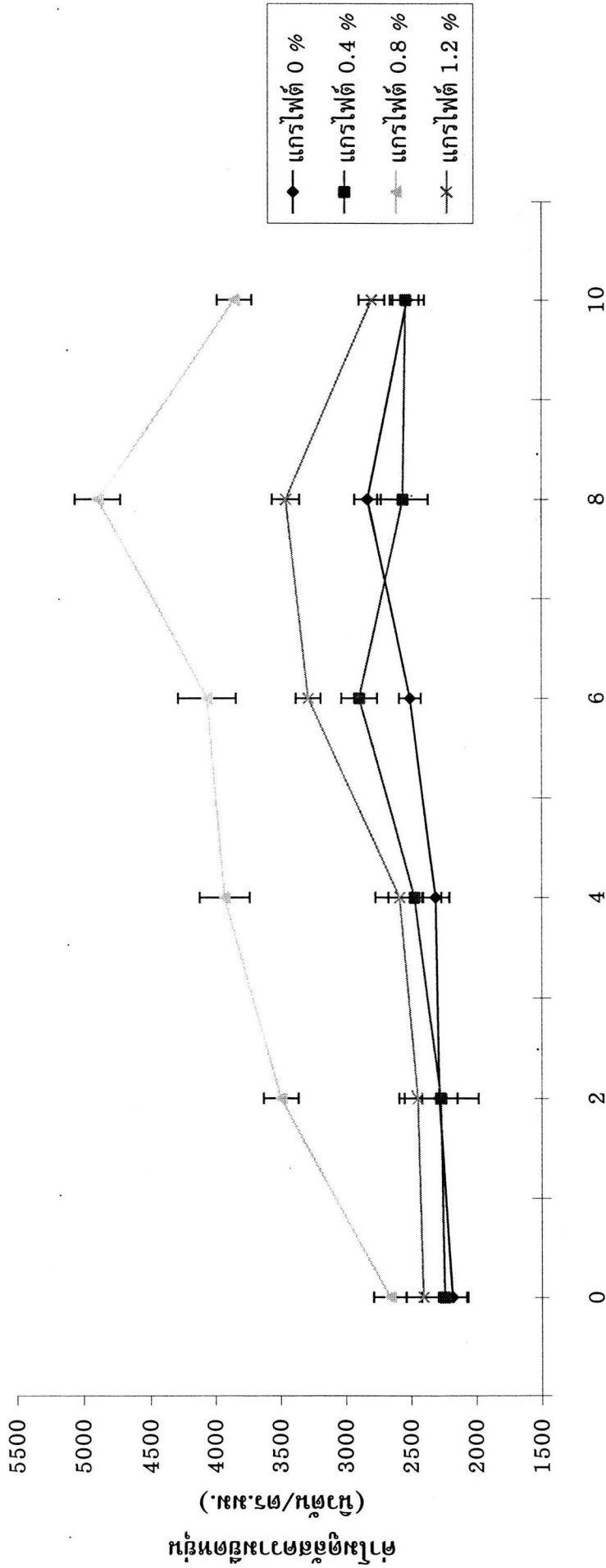
ปริมาณทองแดง(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น กับ ปริมาณทองแดงและแกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.12 ผลของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของ ปริมาณทองแดง และ แกร ไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส

หน่วย : N/mm<sup>2</sup>

แกร ไฟต์ (% โดยน้ำหนัก)	การทดลอง ครั้งที่	ทองแดง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)						
		0	2	4	6	8	10	
0.0	1	2255.97	2183.80	2376.91	2475.21	2756.40	2429.17	
	2	2107.63	2372.22	2231.89	2353.97	2898.18	2617.75	
	ค่าเฉลี่ย	2181.80	2278.01	2304.40	2415.09	2827.29	2523.46	
	SD	104.89	133.23	102.55	85.73	100.25	133.35	
0.4	1	2117.48	2066.26	2612.24	2978.06	2417.49	2606.92	
	2	2364.94	2466.47	2321.22	2785.32	2696.47	2461.03	
	ค่าเฉลี่ย	2240.71	2266.36	2466.73	2881.69	2556.98	2533.97	
	SD	174.98	283.00	205.78	136.29	197.27	103.16	
0.8	1	2574.40	3589.06	4061.04	3900.37	4764.95	3939.72	
	2	2753.28	3399.82	3788.06	4216.31	5003.05	3752.50	
	ค่าเฉลี่ย	2663.34	3494.44	3924.55	4058.34	4884.00	3846.11	
	SD	126.49	133.81	193.03	223.40	168.36	132.38	
1.2	1	2498.17	2547.58	2453.24	3348.47	3378.57	2726.24	
	2	2306.24	2338.50	2717.00	3214.83	3526.68	2864.79	
	ค่าเฉลี่ย	2402.20	2443.04	2585.12	3281.65	3452.63	2795.52	
	SD	135.71	147.84	186.51	94.50	104.73	97.96	



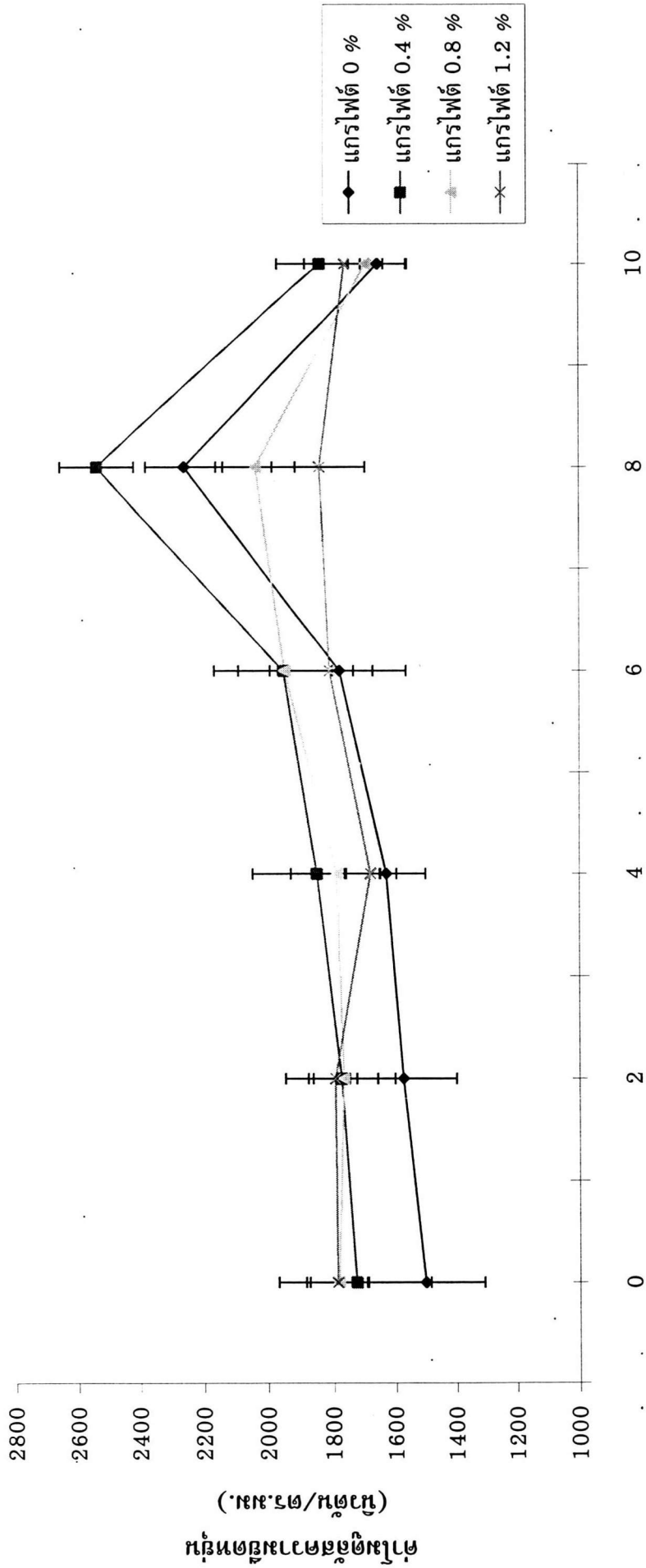
ปริมาณของแดง(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น กับ ปริมาณของแดงและแกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.13 ผลของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของ ปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 880 องศาเซลเซียส

หน่วย : N/mm<sup>2</sup>

แกรไฟต์ (%โดยน้ำหนัก)	การทดลอง ครั้งที่	ทองแดง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)							
		0	2	4	6	8	10		
0.0	1	1635.15	1450.99	1538.09	1928.75	2344.74	1719.31		
	2	1365.49	1697.11	1719.73	1627.19	2173.51	1590.59		
	ค่าเฉลี่ย	1500.32	1574.05	1628.91	1777.97	2259.13	1654.95		
	SD	190.68	174.03	128.44	213.24	121.08	91.02		
0.4	1	1897.10	1651.54	1989.37	2102.58	2452.64	1746.28		
	2	1555.30	1894.78	1708.61	1796.82	2621.58	1929.42		
	ค่าเฉลี่ย	1726.20	1773.16	1848.99	1949.70	2537.11	1837.85		
	SD	241.69	171.99	198.53	216.20	119.46	129.50		
0.8	1	1718.88	1689.12	1688.85	2048.92	2123.66	1599.73		
	2	1846.52	1844.02	1886.55	1843.77	1948.66	1789.34		
	ค่าเฉลี่ย	1782.70	1766.57	1787.70	1946.34	2036.16	1694.04		
	SD	90.26	109.53	139.79	145.06	123.74	134.07		
1.2	1	1718.16	1841.35	1620.89	1712.10	1941.35	1846.68		
	2	1855.94	1744.73	1737.83	1907.11	1738.09	1673.20		
	ค่าเฉลี่ย	1787.05	1793.04	1679.36	1809.61	1839.72	1759.94		
	SD	97.43	68.32	82.69	137.89	143.73	122.67		



ปริมาณของแดง(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น กับ ปริมาณของแดงและแกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 880 องศาเซลเซียส



#### 4.2.2.3) ความแข็ง (Hardness)

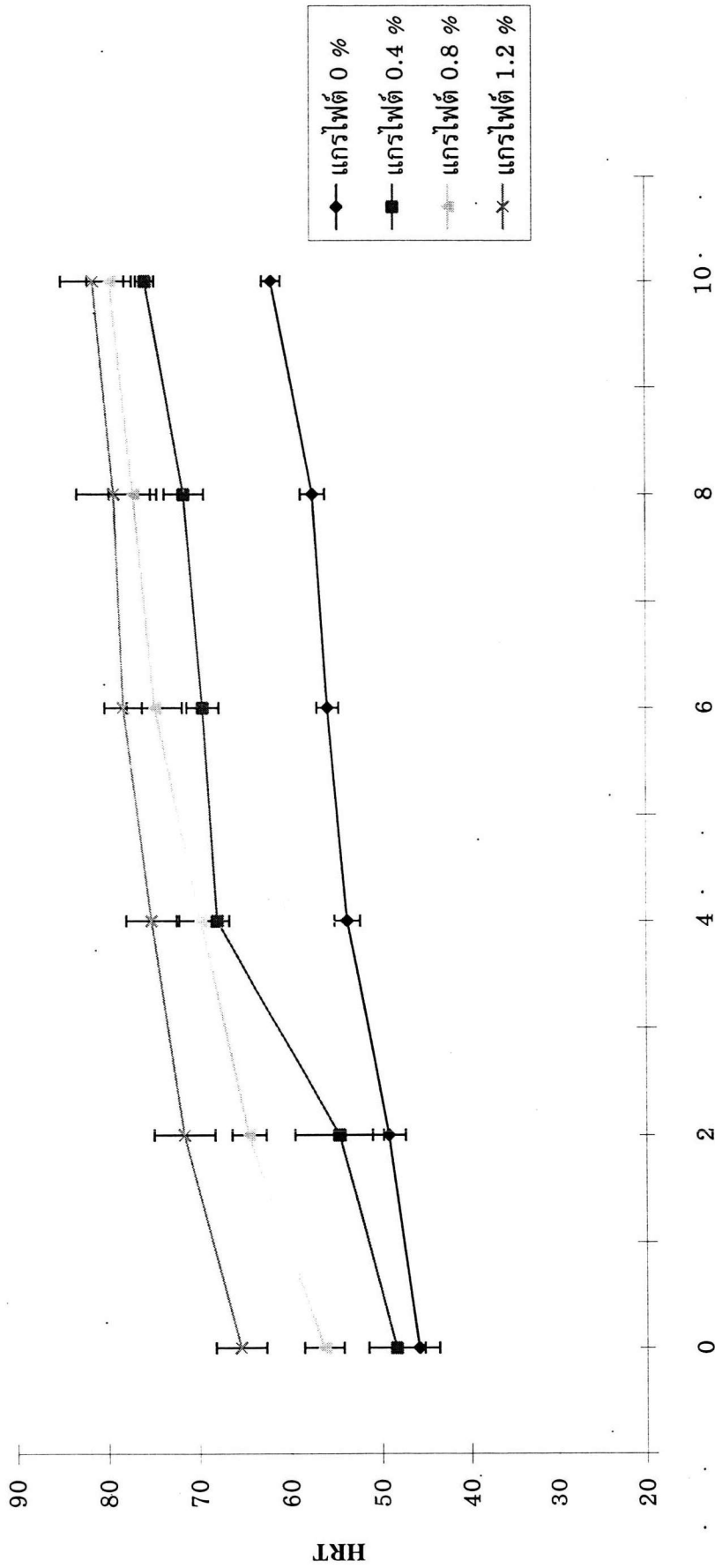
จากการทดสอบหาค่าความแข็งของชิ้นงานผงโลหะผสมจำนวน 1440 ชิ้น ที่เตรียมขึ้นจากปริมาณของผงเหล็ก ระหว่าง 88.8 - 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผงทองแดงระหว่าง 0 - 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และแกรไฟต์ ระหว่าง 0 - 1.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเผา 3 ระดับ คือ 1120 °C 950 °C และ 880 °C ตามแผนการทดลองในตารางที่ 3.1 โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ได้ผลปรากฏดังแสดงในตารางที่ 4.14 ถึง 4.16 จากตารางที่ 4.14 ถึง 4.16 และกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.16 ถึง 4.18 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของ ทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา มีแนวโน้มที่ส่งผล ต่อค่าความแข็งของผงโลหะผสม นั่นคือ ที่อุณหภูมิการเผาทั้ง 3 ระดับ เมื่อปริมาณของทองแดง มากขึ้น ในขณะที่ ปริมาณแกรไฟต์คงที่ ค่าความแข็ง จะมีค่าเพิ่มขึ้น และ ที่อุณหภูมิการเผาทั้ง 3 ระดับ เมื่อปริมาณแกรไฟต์เพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณทองแดงคงที่ ค่าความแข็ง จะมีค่าเพิ่มขึ้น และ ที่อุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น ค่าความแข็ง จะมีค่าเพิ่มขึ้น และจะได้นำผลของทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผาที่มีต่อค่าแรงดัดชนิด 2 แกน ไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญในเชิงสถิติต่อไป

ตารางที่ 4.14

ผลของค่าความแข็งของ ปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส

หน่วย : HRT

แกรไฟต์ (% โดยน้ำหนัก)	การทดลอง ครั้งที่	ทองแดง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)							
		0	2	4	6	8	10		
0.0	1	47.35	50.49	52.78	56.71	56.54	62.62		
	2	44.26	47.84	54.72	55.02	58.43	61.19		
	ค่าเฉลี่ย	45.80	49.17	53.75	55.87	57.48	61.90		
	SD	2.19	1.87	1.37	1.20	1.34	1.01		
0.4	1	46.13	58.10	67.04	68.29	70.03	76.52		
	2	50.61	51.23	68.94	70.79	73.10	75.09		
	ค่าเฉลี่ย	48.37	54.67	67.98	69.54	71.56	75.80		
	SD	3.17	4.86	1.34	1.76	2.17	1.01		
0.8	1	57.97	65.85	68.11	72.68	79.00	81.39		
	2	54.88	63.16	71.46	76.99	75.31	77.96		
	ค่าเฉลี่ย	56.42	64.51	69.78	74.83	77.15	79.67		
	SD	2.19	1.90	2.37	3.05	2.61	2.43		
1.2	1	67.42	69.26	73.24	76.82	82.11	83.93		
	2	63.48	74.02	77.17	79.69	76.42	79.07		
	ค่าเฉลี่ย	65.45	71.64	75.20	78.25	79.27	81.50		
	SD	2.79	3.36	2.78	2.03	4.02	3.44		



ปริมาณของแคง(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

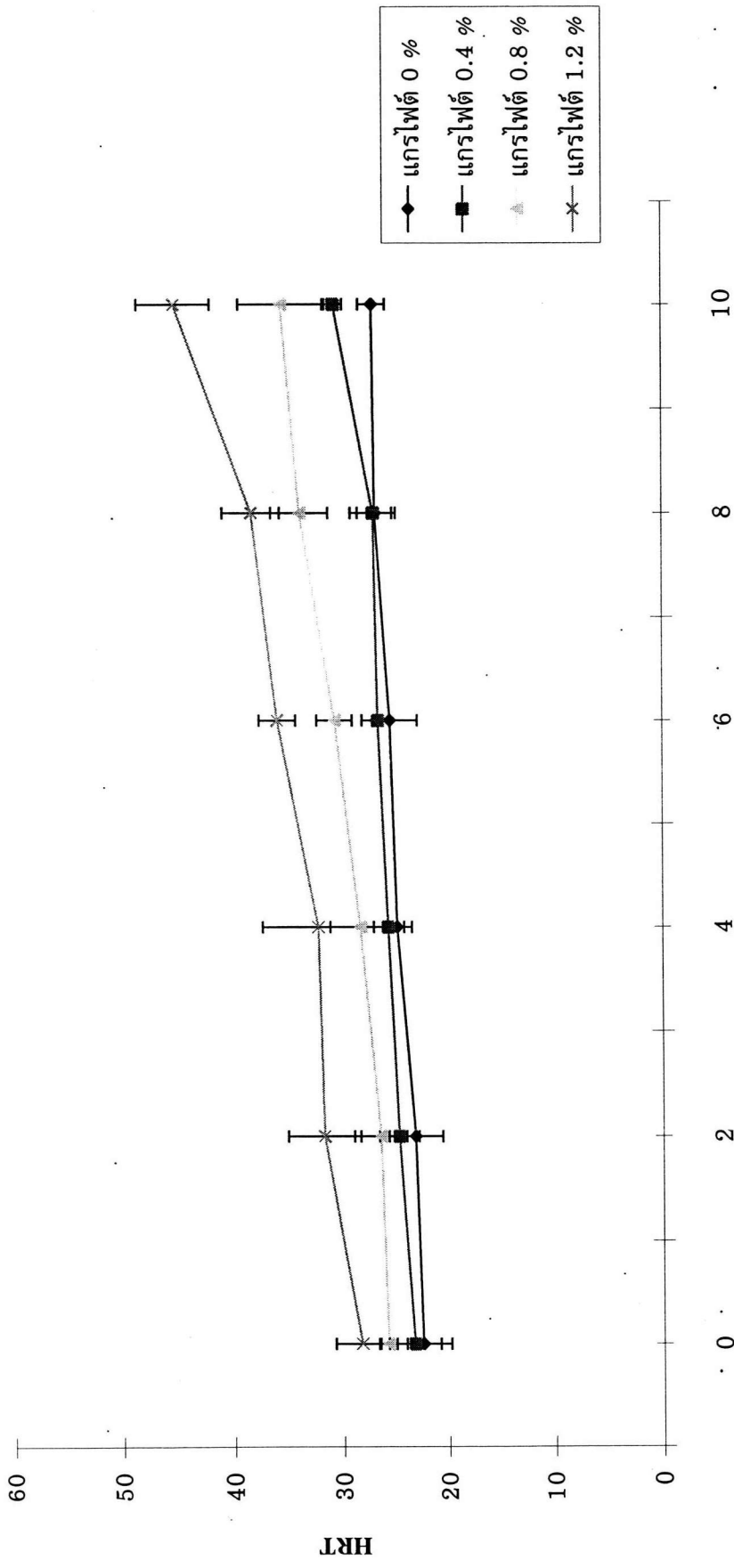
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความแข็ง กับปริมาณของแคงและแกรไฟต์  
ที่อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.15

ผลของค่าความแข็งของ ปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส

หน่วย : HRT

แกรไฟต์ (% โดยน้ำหนัก)	การทดลอง ครั้งที่	ทองแดง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)									
		0	2	4	6	8	10				
0.0	1	23.62	21.33	24.41	27.36	28.02	27.99				
	2	21.32	24.96	25.34	23.67	25.76	26.25				
	ค่าเฉลี่ย	22.47	23.15	24.87	25.51	26.89	27.12				
	SD	1.63	2.57	0.66	2.61	1.60	1.23				
0.4	1	20.84	26.08	27.30	26.40	25.57	30.10				
	2	25.75	23.39	24.14	26.90	28.53	31.24				
	ค่าเฉลี่ย	23.29	24.73	25.72	26.65	27.05	30.67				
	SD	3.47	1.90	2.24	0.35	2.10	0.81				
0.8	1	25.30	28.21	30.30	29.52	35.68	38.23				
	2	26.39	24.75	26.36	31.83	31.99	32.80				
	ค่าเฉลี่ย	25.84	26.48	28.33	30.67	33.83	35.52				
	SD	0.77	2.45	2.78	1.64	2.61	3.84				
1.2	1	30.02	34.06	28.59	34.74	36.42	47.53				
	2	26.52	29.34	35.82	37.12	40.12	42.88				
	ค่าเฉลี่ย	28.27	31.70	32.20	35.93	38.27	45.20				
	SD	2.47	3.33	5.11	1.68	2.61	3.29				



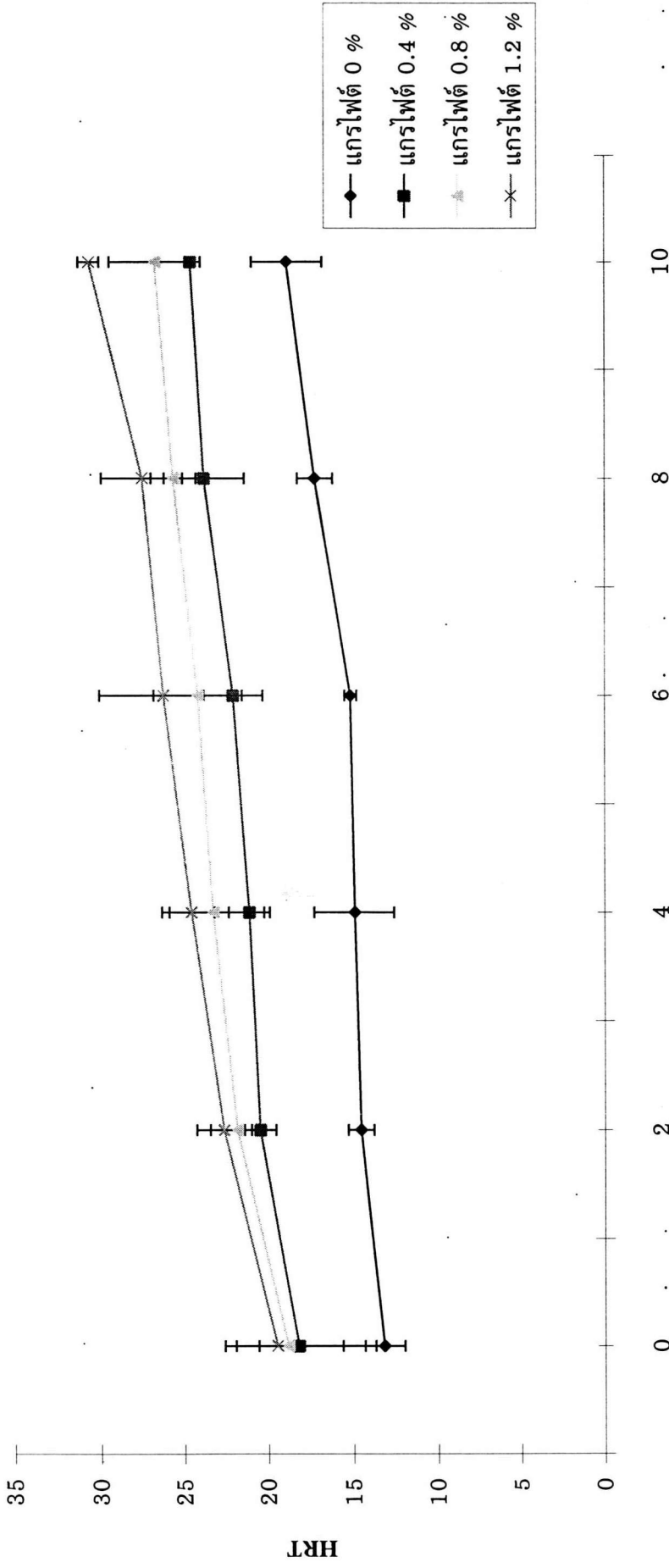
ปริมาณทองแดง(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความแข็ง กับปริมาณทองแดงและแกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.16 ผลของค่าความเร่งของ ปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 880 องศาเซลเซียส

หน่วย : HRT

แกรไฟต์ (% โดยน้ำหนัก)	การทดลอง ครั้งที่	ทองแดง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)							
		0	2	4	6	8	10		
0.0	1	13.97	15.09	16.54	15.39	16.47	17.36		
	2	12.32	14.00	13.25	14.89	17.91	20.33		
	ค่าเฉลี่ย	13.15	14.54	14.89	15.14	17.19	18.85		
	SD	1.17	0.77	2.33	0.35	1.02	2.10		
0.4	1	21.30	21.15	20.24	23.31	22.10	24.73		
	2	14.99	19.81	21.99	20.82	25.46	24.43		
	ค่าเฉลี่ย	18.15	20.48	21.12	22.07	23.78	24.58		
	SD	4.47	0.95	1.23	1.76	2.38	0.22		
0.8	1	21.03	22.99	25.43	22.31	26.56	28.62		
	2	16.57	20.69	21.13	26.04	24.66	24.78		
	ค่าเฉลี่ย	18.80	21.84	23.28	24.17	25.61	26.70		
	SD	3.16	1.63	3.05	2.63	1.34	2.72		
1.2	1	18.64	23.80	23.59	28.93	29.20	31.08		
	2	20.26	21.50	25.49	23.49	25.76	30.20		
	ค่าเฉลี่ย	19.45	22.65	24.54	26.21	27.48	30.64		
	SD	1.15	1.63	1.34	3.84	2.43	0.62		



ปริมาณของแดง(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความแข็ง กับปริมาณของแดงและแกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 880 องศาเซลเซียส

#### 4.2.2.4) ผลการตรวจสอบลักษณะเกรนของผงโลหะผสม หลังการตัดชนิด 2 แกน

หลังจากที่ได้ทำการทดสอบหาค่าแรงตัดชนิด 2 แกนของผงโลหะผสม ด้วยเครื่องทดสอบแรงตัดชนิด 2 แกนแล้ว นำผงโลหะผสมส่วนที่ถูกตัดจนแตก ไปส่องดูด้วย กล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 500 เท่า จะ ได้ภาพซึ่งแสดงให้เห็นถึงขนาดและลักษณะของเกรนที่แตก ต่างกันของผงโลหะผสม เมื่อมี ปริมาณทองแดง แกรไฟต์ผสมอยู่ในส่วนผสมที่แตกต่างกัน และ อุณหภูมิการเผาที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.19 - 4.24

รูปที่ 4.19 เป็นภาพของชิ้นงานผงโลหะผสมที่มีปริมาณทองแดง 6 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก ปริมาณแกรไฟต์ 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิการเผา 1120 °C จากภาพ แสดง ให้เห็นว่า มีภายในผงโลหะมีพื้นที่สีขาว เป็นลักษณะของโครงสร้างเฟอร์ไรต์ มีโครงสร้างในการ รับแรงได้น้อย

รูปที่ 4.20 เป็นภาพของชิ้นงานผงโลหะผสมที่มีปริมาณทองแดง 6 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก ปริมาณแกรไฟต์ 0.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิการเผา 1120 °C จากภาพ แสดง ให้เห็นว่า ภายในผงโลหะมีเส้นสีดำสลับกับสีขาว เป็นลักษณะของโครงสร้างเพอร์ไลต์ ที่มีโครง สร้างแข็งแรงในการรับแรง

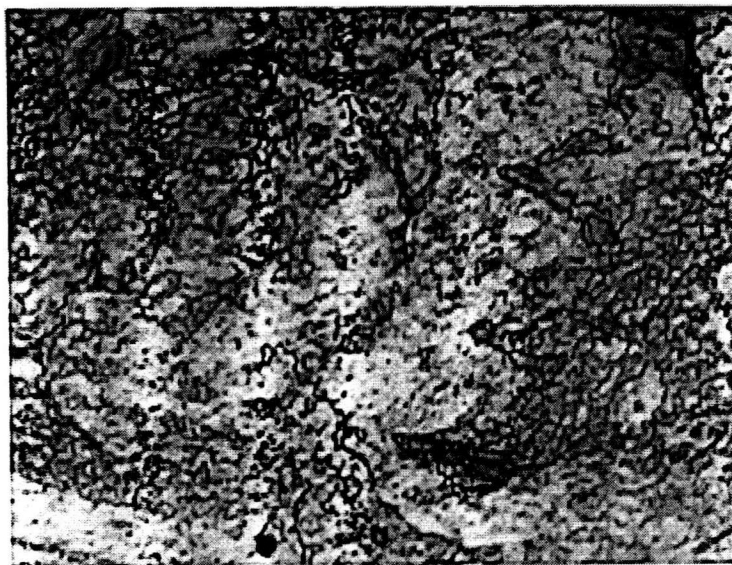
รูปที่ 4.21 เป็นภาพของชิ้นงานผงโลหะผสมที่มีปริมาณทองแดง 6 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก ปริมาณแกรไฟต์ 1.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิการเผา 1120 °C จากภาพ แสดง ให้เห็นว่า ภายในผงโลหะมีสีดำ เป็นลักษณะของโครงสร้างซีเมนต์ไต์ต์ เป็นโครงสร้างของผลึก เหล็กคาร์ไบด์ สลับกับโครงสร้างเพอร์ไลต์ ซึ่งมีความแข็งแรงมากแต่

รูปที่ 4.22 เป็นภาพของชิ้นงานผงโลหะผสมที่มีปริมาณทองแดง 6 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก ปริมาณแกรไฟต์ 1.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิการเผา 950 °C จากภาพ แสดง ให้เห็นว่า เกรนผงโลหะมีเชื่อมติดกันมาก ทำการการรับแรงได้มาก และมีโครงสร้างซีเมนต์ไต์ต์

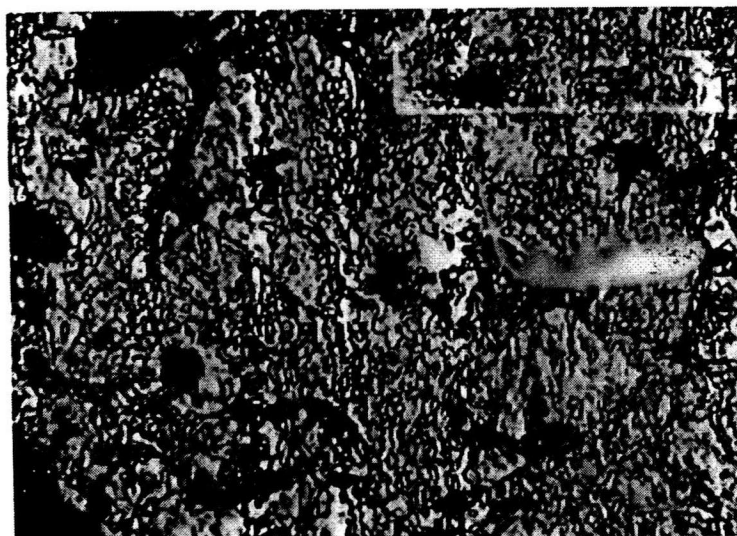
รูปที่ 4.23 เป็นภาพของชิ้นงานผงโลหะผสมที่มีปริมาณทองแดง 6 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก ปริมาณแกรไฟต์ 1.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิการเผา 880 °C จากภาพ แสดง ให้เห็นว่า เกรนผงโลหะมีการเชื่อมติดกันน้อยกว่า รูปที่ 4.56 ทำให้การรับแรงได้ลดลง

รูปที่ 4.24 เป็นภาพของชิ้นงานผงโลหะผสมที่มีปริมาณทองแดง 6 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก ปริมาณแกรไฟต์ 0.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิการเผา 880 °C จากภาพ แสดง ให้เห็นว่า เกรนผงโลหะมีโครงสร้างของเพอร์ไลต์

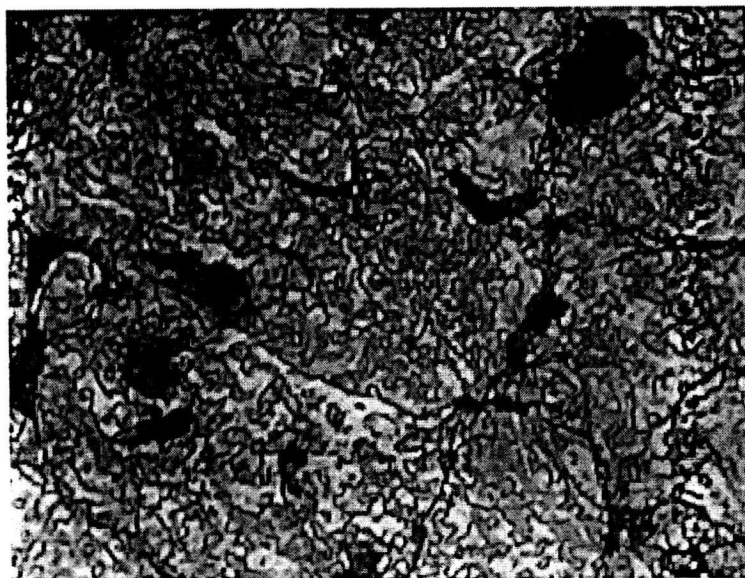




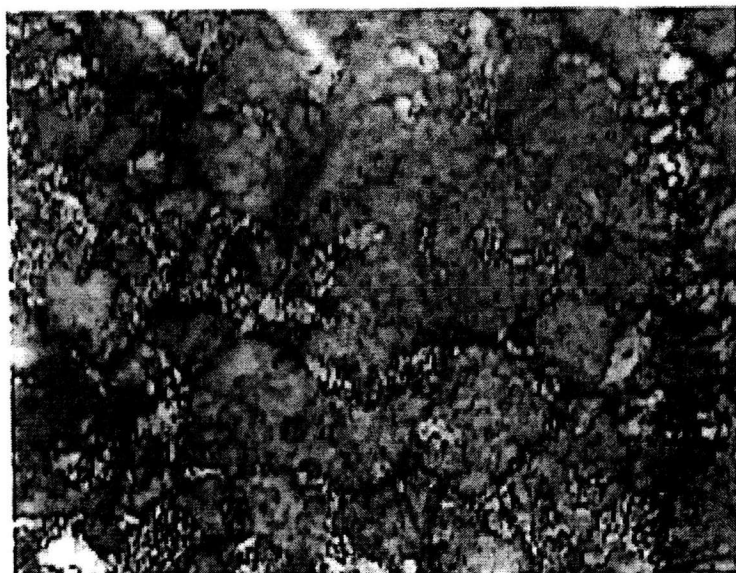
รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายเกรนของ ผงโลหะผสม ที่มี ทองแดง 6 เปอร์เซ็นต์  
แกรไฟต์ 0.4 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส  
ที่กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายเกรนของ ผงโลหะผสม ที่มี ทองแดง 6 เปอร์เซ็นต์  
แกรไฟต์ 0.8 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส  
ที่กำลังขยาย 500 เท่า



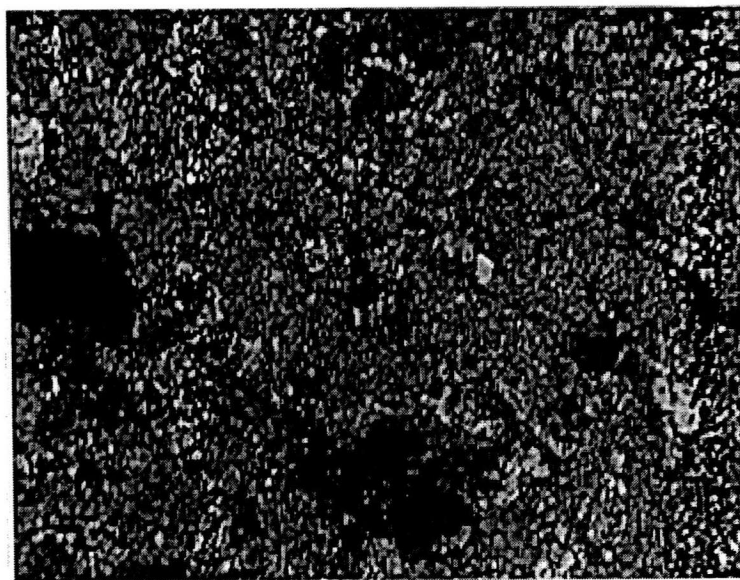
รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายเกรนของ ผงโลหะผสม ที่มี ทองแดง 6 เปอร์เซ็นต์  
แกรไฟต์ 1.2 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส  
ที่กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายเกรนของ ผงโลหะผสม ที่มี ทองแดง 6 เปอร์เซ็นต์  
แกรไฟต์ 0.4 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส  
ที่กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายเกรนของ ผงโลหะผสม ที่มี ทองแดง 6 เปอร์เซ็นต์  
แกรไฟต์ 0.4 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเผา 880 องศาเซลเซียส  
ที่กำลังขยาย 500 เท่า

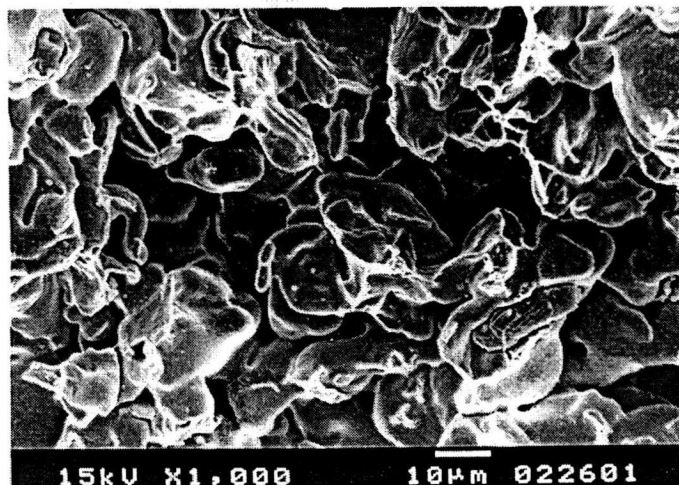


รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายเกรนของ ผงโลหะผสม ที่มี ทองแดง 6 เปอร์เซ็นต์  
แกรไฟต์ 0.8 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเผา 880 องศาเซลเซียส  
ที่กำลังขยาย 500 เท่า

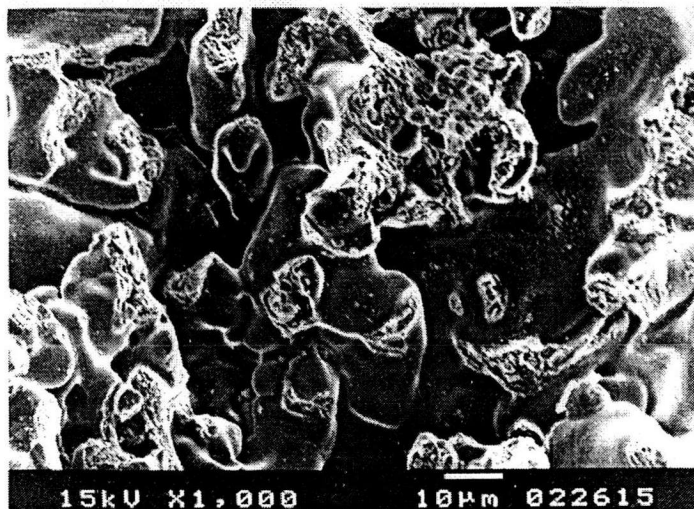
#### 4.2.2.5) ผลการตรวจสอบการกระจายของผงโลหะผสม หลังการตัดชนิด 2 แกน

หลังจากที่ได้ทำการทดสอบหาค่าแรงตัดชนิด 2 แกนของผงโลหะผสม ด้วยเครื่องทดสอบแรงตัดชนิด 2 แกนแล้ว นำผงโลหะผสมส่วนที่ถูกตัดจนแตก บริเวณที่เป็นพื้นที่ผิวหน้าตัดของรอยแตกที่เกิดจากการตัด ไปส่องดูด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) กำลังขยาย 1,000 เท่า จะได้ภาพซึ่งแสดงให้เห็นถึง ลักษณะที่แตกต่างกันของโครงสร้างของผงโลหะผสม เมื่อ มีปริมาณทองแดง แกรไฟต์ผสมอยู่ในส่วนผสมที่แตกต่างกัน และอุณหภูมิการเผาที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.25 - 4.29

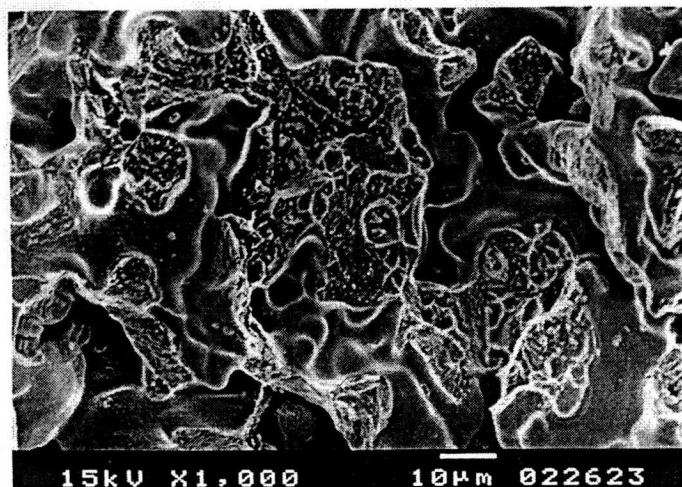
รูปที่ 4.25 ถึง 4.27 เป็นภาพถ่ายของผงโลหะผสมที่มีแกรไฟต์ผสมอยู่ในปริมาณ 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิการเผาที่ 1120 °C ที่มีปริมาณทองแดง 0 4 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากภาพได้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของลักษณะของโครงสร้างของผงโลหะผสม ที่มีทองแดงผสมอยู่ในส่วนผสมที่แตกต่างกัน เห็นได้ชัดว่า การเชื่อมติดกันของผงโลหะมีการเชื่อมกันมากขึ้นตามปริมาณของทองแดงที่มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ผงโลหะผสมมีความแข็งแรงมากขึ้น สำหรับรูปที่ 4.25 4.28 และ 4.29 นั้น เป็นภาพของชิ้นงานผงโลหะผสมที่มีปริมาณทองแดง 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณแกรไฟต์ 0.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเผา 1120 °C 950 °C และ 880 °C ตามลำดับ จากภาพ แสดงให้เห็นว่า มีการเชื่อมติดเป็นเนื้อเดียวกันลดลง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ผงโลหะผสมมีความแข็งแรงลดน้อยลง



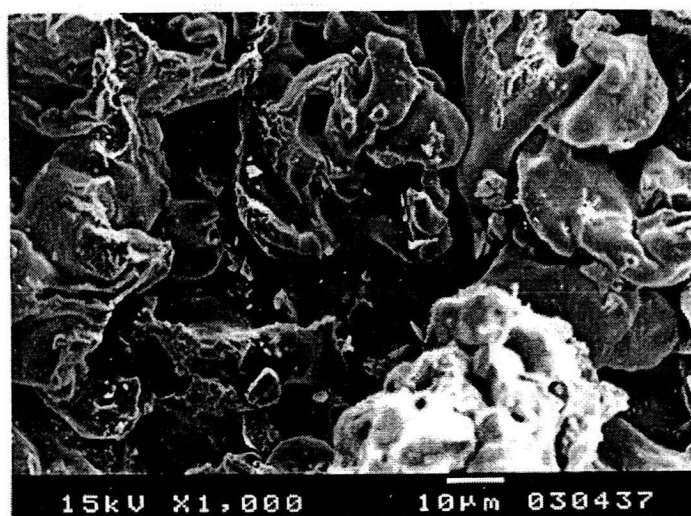
รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดรอยหักของชิ้นส่วนผงโลหะผสม  
ที่เป็นผงเหล็ก 100 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส  
ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดรอยหักของชิ้นส่วนผงโลหะผสม  
ที่เป็น ทองแดง 4 เปอร์เซ็นต์ แกรไฟต์ 0 เปอร์เซ็นต์  
และอุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส  
ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4.27 ภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดรอยหักของชิ้นส่วนโลหะผสม  
ที่เป็น ทองแดง 8 เปอร์เซ็นต์ แกรไฟต์ 0 เปอร์เซ็นต์  
และอุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส  
ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดรอยหักของ ชิ้นส่วนโลหะผสม  
ที่เป็น ผงเหล็ก 100 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส  
ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดรอยหักของ ชิ้นส่วนผงโลหะผสม  
ที่เป็น ผงเหล็ก 100 เปอร์เซ็นต์ และอนุกรมการเผา 880 องศาเซลเซียส  
ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

### 4.2.3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

#### 4.2.3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล

เมื่อนำผลทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลของผงโลหะผสมที่วัดได้ มาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ชื่อ SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) ช่วยในการวิเคราะห์ จะได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

#### 1) การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)

เมื่อนำผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะในตารางที่ 4.2 ถึง 4.4 มาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.17 จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน แสดงให้เห็นว่า ปริมาณ ทองแดง แกรไฟต์ และอุณหภูมิการเผา ส่งผลต่อค่าความถ่วงจำเพาะของผงโลหะผสมอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ในขณะที่ ปฏิสัมพันธ์ร่วม (interaction) ระหว่างปริมาณการใช้ ผงทองแดง และ แกรไฟต์ และอุณหภูมิการเผา ก็ส่งผลต่อ ค่าความถ่วงจำเพาะของผงโลหะผสมอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เช่นกัน

จากกราฟ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถ่วงจำเพาะ กับปริมาณ ทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา ในรูปที่ 4.4 ถึง 4.6 และผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในตารางที่ 4.17 สามารถอธิบายได้ถึงลักษณะของผลกระทบของ ทองแดง และแกรไฟต์ ที่มีต่อค่าความถ่วงจำเพาะของผงโลหะผสมได้ดังนี้คือ เมื่อปริมาณทองแดง มีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะของผงโลหะผสมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และปริมาณแกรไฟต์มากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะของผงโลหะผสมมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนอุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะของผงโลหะผสมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ



ตารางที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความถ่วงจำเพาะ

Dependent variable : Gravity

Source of variation	Sum of Sq.	DF	Mean Sq.	F Value
Main effects	1.432	10	0.143	1218.118 <sup>S1</sup>
X1	0.077	5	0.015	131.242 <sup>S1</sup>
X2	0.036	3	0.012	101.121 <sup>S1</sup>
X3	1.319	2	0.659	5610.802 <sup>S1</sup>
2-Way Interactions	0.009	31	0.000	2.522 <sup>S1</sup>
X1 * X2	0.003	15	0.000	1.577 <sup>S1</sup>
X1 * X3	0.002	10	0.001	2.087 <sup>S1</sup>
X2 * X3	0.004	6	0.000	5.610 <sup>S1</sup>
3-way Interactions	0.002	30	0.000	0.636 <sup>S2</sup>
X1 * X2 * X3	0.002	30	0.000	0.636 <sup>S2</sup>
Explained	1.443	71	0.020	172.936 <sup>S1</sup>
Residual	0.008	72	0.000	
Total	1.451	143	0.010	

Multiple R Squared = 0.986

Multiple R = 0.993

หมายเหตุ X1 = ปริมาณทองแดง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

X2 = ปริมาณแกรไฟต์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

X3 = อุณหภูมิการเผา(องศาเซลเซียส)

- S1 = มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99.9 %

- S2 = มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 90 %

2) การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล การเปลี่ยนแปลงขนาด  
(dimension change)

เมื่อนำผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาด ในตารางที่ 4.5 ถึง 4.7 มาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.18 จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงให้เห็นว่า ปริมาณ ทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของผงโลหะผสม อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ในขณะที่ ปฏิสัมพันธ์ร่วม (interaction) ระหว่างปริมาณ ทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา ก็ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของผงโลหะผสมอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เช่นกัน

จากกราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาด กับ ปริมาณ ทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา ในรูปที่ 4.7 ถึง 4.9 และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในตารางที่ 4.18 สามารถอธิบายได้ถึงลักษณะของผลกระทบของปริมาณ ทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของ ชิ้นงานผงโลหะผสม ได้ดังนี้คือ เมื่อปริมาณ ทองแดง มากขึ้น จะส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานผงโลหะผสมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และสำหรับปริมาณแกรไฟต์ มีค่ามากขึ้น ได้ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงขนาดของผงโลหะผสมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญด้วย ส่วนอุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานผงโลหะผสมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการเปลี่ยนแปลงขนาด

Dependent variable : dimen

Source of variation	Sum of Sq.	DF	Mean Sq.	F Value
Main effects	41.312	10	4.131	471.836 <sup>S1</sup>
X1	1.923	5	0.385	43.936 <sup>S1</sup>
X2	7.366	3	2.455	280.414 <sup>S1</sup>
X3	32.023	2	16.011	1828.719 <sup>S1</sup>
2-Way Interactions	11.921	31	0.385	43.921 <sup>S1</sup>
X1 * X2	8.621	15	0.575	65.639 <sup>S1</sup>
X1 * X3	0.805	10	0.081	9.195 <sup>S1</sup>
X2 * X3	2.496	6	0.416	47.504 <sup>S1</sup>
3-way Interactions	1.252	30	0.042	4.765 <sup>S1</sup>
X1 * X2 * X3	1.252	30	0.042	4.765 <sup>S1</sup>
Explained	54.485	71	0.767	87.646 <sup>S1</sup>
Residual	0.630	72	0.009	
Total	55.115	143	0.385	

Multiple R Squared = 0.750

Multiple R = 0.866

- หมายเหตุ X1 = ปริมาณทองแดง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)  
 X2 = ปริมาณแกรไฟต์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)  
 X3 = อุณหภูมิการเผา(องศาเซลเซียส)  
 -<sup>S1</sup> = มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99.9 %

### 3) การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลแรงดัดชนิด 2 แกน (biaxial bending strength)

เมื่อนำผลการทดสอบหาค่าแรงดัดชนิด 2 แกน ในตารางที่ 4.8 ถึง 4.10 มาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดง ในตารางที่ 4.19 จากตารางที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณทองแดง ปริมาณแกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา ส่งผลต่อค่าแรงดัดชนิด 2 แกนของผงโลหะผสมอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ในขณะที่ปฏิสัมพันธ์ร่วม (interaction) ระหว่างปริมาณทองแดง ปริมาณแกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา ก็ส่งผลต่อค่าแรงดัดชนิด 2 แกนของผงโลหะผสมอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เช่นกัน

และจากกราฟ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัดชนิด 2 แกน กับ ปริมาณทองแดง ปริมาณแกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผาในรูปที่ 4.10 ถึง 4.12 และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในตารางที่ 4.19 จะสามารถอธิบายได้ถึงลักษณะของผลกระทบของ ทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผาที่มีต่อค่าแรงดัดชนิด 2 แกนของผงโลหะผสม ได้ดังนี้คือ ที่อุณหภูมิการเผาทั้ง 3 ระดับ เมื่อปริมาณของ ทองแดง มากขึ้น ในขณะที่ ปริมาณ ปริมาณแกรไฟต์คงที่ ค่าแรงดัดชนิด 2 แกน จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณทองแดงที่ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าแรงดัดชนิด 2 แกน มีค่าลดลงเล็กน้อยอย่างมีนัยสำคัญ และ ที่อุณหภูมิการเผาทั้ง 3 ระดับ เมื่อปริมาณแกรไฟต์เพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณทองแดงคงที่ ค่าแรงดัดชนิด 2 แกน จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณแกรไฟต์ที่ 0.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าแรงดัดชนิด 2 แกน มีค่าลดลงเล็กน้อยอย่างมีนัยสำคัญ และ เมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น จะมีผลให้ ค่าแรงดัดชนิด 2 แกน มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลแรงคัดชนิด 2 แกน

Dependent variable : Bending

Source of variation	Sum of Sq.	DF	Mean Sq.	F Value
Main effects	2417265.326	10	241726.533	6555.806 <sup>S1</sup>
X1	100990.631	5	20198.126	547.788 <sup>S1</sup>
X2	190052.254	3	63350.751	1718.120 <sup>S1</sup>
X3	2126222.441	2	1063111.211	28832.377 <sup>S1</sup>
2-Way Interactions	310641.868	31	10020.705	217.769 <sup>S1</sup>
X1 * X2	14948.475	15	996.565	27.028 <sup>S1</sup>
X1 * X3	51285.697	10	5128.570	139.091 <sup>S1</sup>
X2 * X3	244407.696	6	40734.616	1104.753 <sup>S1</sup>
3-way Interactions	25106.682	30	836.889	22.697 <sup>S1</sup>
X1 * X2 * X3	25106.682	30	836.889	22.697 <sup>S1</sup>
Explained	2753013.876	71	38774.843	1051.603 <sup>S1</sup>
Residual	2654.794	72	36.872	
Total	2755668.669	143	19270.410	

Multiple R Squared = 0.877

Multiple R = 0.937

หมายเหตุ X1 = ปริมาณทองแดง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

X2 = ปริมาณแกรไฟต์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

X3 = อุณหภูมิการเผา(องศาเซลเซียส)

- <sup>S1</sup> = มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99.9 %

4) การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น  
(modulus of elasticity)

เมื่อนำผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ในตารางที่ 4.11 ถึง 4.13 มาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.20 จากตารางที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณทองแดง ปริมาณแกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา ส่งผลต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของผงโลหะผสม อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในขณะที่ ปฏิสัมพันธ์ร่วม (interaction) ระหว่างปริมาณทองแดง ปริมาณแกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา ก็ส่งผลต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของผงโลหะผสมอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เช่นกัน

และจากกราฟ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นกับ ปริมาณทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผาในรูปที่ 4.13 ถึง 4.15 และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในตารางที่ 4.20 จะสามารถอธิบายได้ถึงลักษณะของผลกระทบของ ทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผาที่มีต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของผงโลหะผสม ได้ดังนี้คือ ที่อุณหภูมิการเผา ทั้ง 3 ระดับ เมื่อปริมาณของ ทองแดง มากขึ้น ในขณะที่ ปริมาณ ปริมาณแกรไฟต์คงที่ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณทองแดงที่ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าลดลงเล็กน้อยอย่างมีนัยสำคัญ และ ที่อุณหภูมิการเผาทั้ง 3 ระดับ เมื่อปริมาณแกรไฟต์เพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณทองแดงคงที่ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณแกรไฟต์ที่ 0.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าลดลงเล็กน้อยอย่างมีนัยสำคัญ และ เมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น จะมีผลให้ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโมดูลัสความยืดหยุ่น

Dependent variable : modulus

Source of variation	Sum of Sq.	DF	Mean Sq.	F Value
Main effects	462121034	10	46212103.394	1996.212 <sup>S1</sup>
X1	34068678	5	6813735.575	294.331 <sup>S1</sup>
X2	48730432	3	16243477.423	701.665 <sup>S1</sup>
X3	379321924	2	189660961.898	8192.735 <sup>S1</sup>
2-Way Interactions	68860074	31	2221292.713	95.953 <sup>S1</sup>
X1 * X2	2421435	15	161428.983	6.973 <sup>S1</sup>
X1 * X3	24103169	10	2410316.871	104.118 <sup>S1</sup>
X2 * X3	42335471	6	7055911.772	304.792 <sup>S1</sup>
3-way Interactions	25106.682	30	836.889	22.697 <sup>S1</sup>
X1 * X2 * X3	25106.682	30	836.889	22.697 <sup>S1</sup>
Explained	537887489	71	7575880.129	327.253 <sup>S1</sup>
Residual	1666792	72	23149.895	
Total	539554282	143	3773106.864	

Multiple R Squared = 0.856

Multiple R = 0.925

หมายเหตุ X1 = ปริมาณทองแดง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

X2 = ปริมาณแกรไฟต์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

X3 = อุณหภูมิการเผา(องศาเซลเซียส)

-<sup>S1</sup> = มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99.9 %

#### 5) การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็ง (hardness)

เมื่อนำผลการทดสอบค่าความแข็ง ในตารางที่ 4.14 ถึง 4.16 มาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.21 จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ได้แสดงให้เห็นว่า ปริมาณทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา ส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานผงโลหะผสมอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในขณะที่ปฏิสัมพันธ์ร่วม (interaction) ระหว่างปริมาณ ทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา ก็ส่งผลต่อค่าความแข็งของผงโลหะผสมอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เช่นกัน

จากกราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง กับ ปริมาณทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผาในรูปที่ 4.16 ถึง 4.18 และผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในตาราง ที่ 4.21 จะสามารถอธิบายได้ถึงลักษณะของผลกระทบของ ปริมาณทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา ที่มีต่อค่าความแข็งของผงโลหะผสม ได้ดังนี้คือ เมื่อปริมาณทองแดง มีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความแข็งของชิ้นงานผงโลหะผสมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ปริมาณ แกรไฟต์มากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความแข็งของผงโลหะผสมมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ และ ส่วน อุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความแข็งของผงโลหะผสมมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ



ตารางที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความแข็ง

Dependent variable : Hardness

Source of variation	Sum of Sq.	DF	Mean Sq.	F Value
Main effects	60662.330	10	6066.233	1074.318 <sup>S1</sup>
X1	2585.008	5	517.002	91.560 <sup>S1</sup>
X2	3700.998	3	1233.666	218.480 <sup>S1</sup>
X3	54376.324	2	27188.162	4814.971 <sup>S1</sup>
2-Way Interactions	1521.405	31	49.078	8.692 <sup>S1</sup>
X1 * X2	95.658	15	6.377	1.129 <sup>S2</sup>
X1 * X3	672.754	10	67.275	11.914 <sup>S1</sup>
X2 * X3	752.992	6	125.499	22.226 <sup>S1</sup>
3-way Interactions	232.890	30	7.763	1.375 <sup>S3</sup>
X1 * X2 * X3	232.890	30	7.763	1.375 <sup>S3</sup>
Explained	62416.625	71	879.107	155.688 <sup>S1</sup>
Residual	406.554	72	5.647	
Total	62823.179	143	439.323	

Multiple R Squared = 0.966

Multiple R = 0.983

หมายเหตุ X1 = ปริมาณทองแดง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

X2 = ปริมาณแกรไฟต์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

X3 = อุณหภูมิการเผา(องศาเซลเซียส)

- S<sup>1</sup> = มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99.9 %

- S<sup>2</sup> = มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

- S<sup>3</sup> = มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 97.5 %

#### 4.2.3.2 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ของข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพ และ คุณสมบัติเชิงกล

เมื่อนำข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกลของผงโลหะผสมที่วัดได้ มาทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ชื่อ SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) ช่วยในการวิเคราะห์ และใช้วิธี stepwise เป็นวิธีการในการเลือกตัวแปรนำเข้า จะได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

##### 1) การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

เมื่อนำข้อมูลค่าความถ่วงจำเพาะที่วัดได้ในตารางที่ 4.2 ถึง 4.4 มาทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.22

จากตารางที่ 4.22 จะสามารถสรุปรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับ ปริมาณทองแดง แกรไฟต์ และอุณหภูมิการเผา ได้เป็นสมการถดถอย ดังนี้

$$Y_1 = 1.2024 + 0.0099 X_1 - 0.7425X_2 + 0.0086X_3 + 0.0026X_1X_2 \quad (4.1)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} Y_1 &= \text{ค่าความถ่วงจำเพาะของผงโลหะผสม} \\ X_1 &= \text{ปริมาณทองแดง(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)} \\ X_2 &= \text{ปริมาณแกรไฟต์(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)} \\ X_3 &= \text{อุณหภูมิการเผา (องศาเซลเซียส)} \end{aligned}$$

สมการถดถอยสมการที่ (4.1) นี้ จะสามารถใช้ทำนายค่าเฉลี่ยของค่าความถ่วงจำเพาะของผงโลหะผสมได้ ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการคำนวณ (R Square,  $R^2$ ) เท่ากับ 99.01% และค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ (Standard Error) เท่ากับ 0.01030

ตารางที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความถ่วงจำเพาะ

Dependent Variable : GRAVITY					
Multiple R	0.99505				
R Square	0.99012				
Adjusted R Square	0.98954				
Standard Error	0.01030				
Analysis of Variance					
	DF	Sum of Square	Mean Square		
Regression <sup>1</sup>	8	1.43710	0.17964		
Residual	135	0.01433	0.00011		
F = 1691.76906 <sup>S1</sup>					
Variable	B	SE B	Beta	T	Sig T
X1	0.009923	0.002634	0.337590	3.768	0.0000
X2	-0.074249	0.019043	-0.330743	-3.899	0.0000
X3	0.008648	0.000317	8.680221	27.237	0.0000
X7	0.002626	0.000562	0.088827	4.671	0.0000
(Constant)	1.202424	0.158936		7.565	0.0000

หมายเหตุ X1 = ปริมาณทองแดง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

X2 = ปริมาณแกรไฟต์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

X3 = อุณหภูมิการเผา (องศาเซลเซียส)

X7 =  $X1 \cdot X2$

<sup>S1</sup> = มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99.9 %

2) การวิเคราะห์การถดถอยของค่าการเปลี่ยนแปลงขนาด  
(dimension change)

เมื่อนำข้อมูลค่าการเปลี่ยนแปลงขนาด ที่วัดได้ ในตารางที่ 4.5 ถึง 4.7 มาทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 4.23

จากตารางที่ 4.23 จะสามารถสรุปรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น กับ ปริมาณทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา ได้เป็นสมการถดถอย ดังนี้

$$Y_2 = -3.1995 + 2.6952X_2 - 0.0077X_1^2 + 0.2023X_2^2 - 0.1480X_1X_2 + 0.0001X_1X_3 - 0.0027X_2X_3 \quad (4.2)$$

เมื่อ

- $Y_2$  = ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาด (เปอร์เซ็นต์)
- $X_1$  = ปริมาณทองแดง(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
- $X_2$  = ปริมาณแกรไฟต์(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
- $X_3$  = อุณหภูมิการเผา (องศาเซลเซียส)

สมการถดถอยสมการที่ (4.2) นี้ จะสามารถใช้ทำนายค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงขนาดของผงโลหะผสมได้ ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการคำนวณ (R Square ,  $R^2$ ) เท่ากับ 92.98% และค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ (Standard Error) เท่ากับ 0.1687



3) การวิเคราะห์การถดถอยของค่าแรงค้ำชนิด 2 แกน  
(biaxial bending strength)

เมื่อนำข้อมูลค่าแรงค้ำชนิด 2 แกนที่วัดได้ ในตารางที่ 4.8 ถึง 4.10 มาทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.24

จากตารางที่ 4.24 จะสามารถสรุปรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงค้ำชนิด 2 แกน กับ ปริมาณทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผาได้เป็นสมการถดถอย ดังนี้

$$Y_3 = -1800.4393 - 455.8946X_2 + 3.3274X_3 - 1.8217X_1^2 - 146.0074X_2^2 - 0.0013X_3^2 + 0.0239X_1X_3 + 0.7034X_2X_3 \quad (4.3)$$

เมื่อ

$Y_3$  = ค่าแรงค้ำชนิด 2 แกน (นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร)

$X_1$  = ปริมาณทองแดง(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

$X_2$  = ปริมาณแกรไฟต์(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

$X_3$  = อุณหภูมิการเผา (องศาเซลเซียส)

สมการถดถอยสมการที่ (4.3) นี้ จะสามารถใช้ทำนายค่าเฉลี่ยแรงค้ำชนิด 2 แกน ของผงโลหะผสมได้ด้วย ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการคำนวณ (R Square,  $R^2$ ) เท่ากับ 93.04 % และค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ (Standard Error) เท่ากับ 37.8361



4) การวิเคราะห์การถดถอยของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น  
(modulus of elasticity)

เมื่อนำข้อมูลค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่วัดได้ ในตารางที่ 4.11 ถึง 4.13 มาทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตาราง ที่ 4.25

จากตารางที่ 4.25 จะสามารถสรุปรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น กับ ปริมาณทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผาได้เป็นสมการถดถอย ดังนี้

$$Y_4 = -540.7799 - 613.7712X_1 - 7824.2981X_2 - 25.2703X_1^2 - 1632.5230X_2^2 + 0.0024X_3^2 + 57.3648X_1X_2 + 0.9666X_1X_3 + 10.7413X_2X_3 \quad (4.4)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} Y_4 &= \text{ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร)} \\ X_1 &= \text{ปริมาณทองแดง(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)} \\ X_2 &= \text{ปริมาณแกรไฟต์(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)} \\ X_3 &= \text{อุณหภูมิการเผา (องศาเซลเซียส)} \end{aligned}$$

สมการถดถอยสมการที่ (4.4) นี้ จะสามารถใช้ทำนายค่าเฉลี่ยโมดูลัสความยืดหยุ่น ของผงโลหะผสมได้ด้วย ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการคำนวณ ( R Square, R<sup>2</sup>) เท่ากับ 93.85 % และค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ ( Standard Error) เท่ากับ 502.39





### 5) การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็ง (hardness)

เมื่อนำข้อมูลค่าความแข็งที่วัดได้ ในตารางที่ 4.14 ถึง 4.16 มาทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล จะได้ผลของการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.26

จากตารางที่ 4.26 จะสามารถสรุปรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง กับ ปริมาณทองแดง แกรไฟต์ และอุณหภูมิ ได้เป็นสมการถดถอย ดังนี้

$$Y_5 = 336.2910 - 4.539X_1 - 29.2486X_2 - 0.7556X_3 - 3.434896X_1^2 + 0.0004X_2^2 + 0.3632X_1X_2 + 0.0056X_1X_3 + 0.0435X_2X_3 \quad (4.5)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} Y_5 &= \text{ค่าความแข็ง (HRT)} \\ X_1 &= \text{ปริมาณทองแดง(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)} \\ X_2 &= \text{ปริมาณแกรไฟต์(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)} \\ X_3 &= \text{อุณหภูมิการเผา (องศาเซลเซียส)} \end{aligned}$$

สมการถดถอยสมการที่ (4.5) นี้ จะสามารถใช้ทำนายค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งของผงโลหะผสมได้ ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการคำนวณ (R Square,  $R^2$ ) เท่ากับ 98.30% และค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ (Standard Error) เท่ากับ 2.81332



### 4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของผงโลหะผสม

#### 4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติกายภาพ

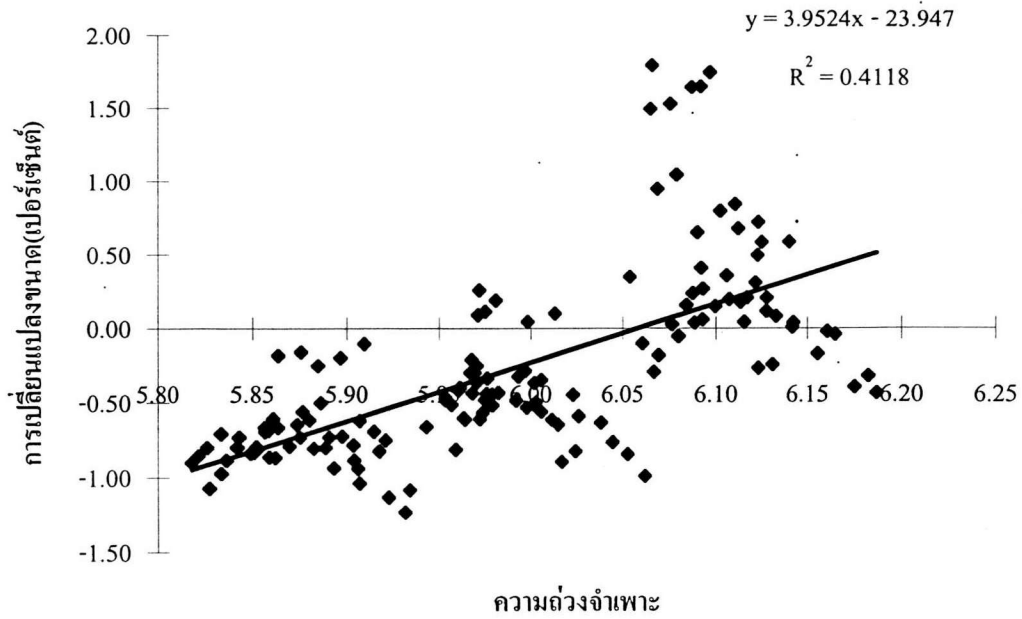
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติกายภาพ ซึ่งแสดงถึง แนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ โดยการประมาณรูปแบบความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง และโพลีโนเมียลดีกรี 2

กราฟความสัมพันธ์แบบเส้นตรงและและโพลีโนเมียลดีกรี 2 ระหว่าง ความถ่วงจำเพาะ กับ ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาด ดังแสดงในรูปที่ 4.30 และ 4.31 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติทั้งสองนี้ มีแนวโน้มที่จะมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกต่อกัน กล่าวคือ เมื่อความถ่วงจำเพาะ ของผงโลหะผสมมากขึ้น ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาด ก็มีแนวโน้มที่จะมีค่ามากขึ้น

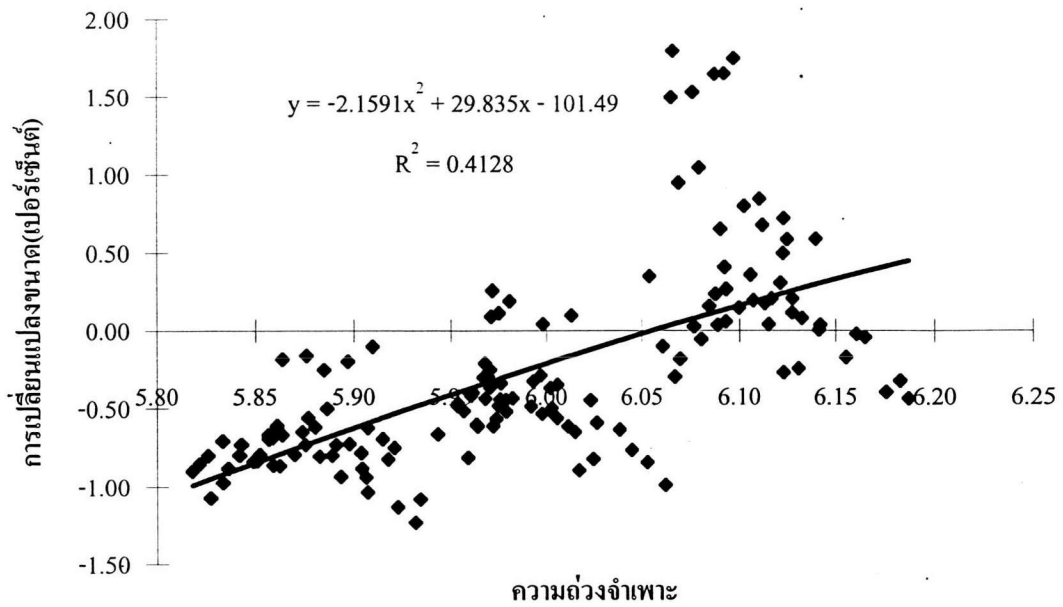
#### 4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะ กับ คุณสมบัติเชิงกล

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับคุณสมบัติเชิงกลด้านต่าง ๆ คือ แรงคัดชนิด 2 แกน โมดูลัสความยืดหยุ่น และ ค่าความแข็ง แสดงไว้ในรูปที่ 4.32 ถึง 4.37 ตามลำดับ เป็นการแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ โดยการประมาณรูปแบบของความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง และโพลีโนเมียลดีกรี 2

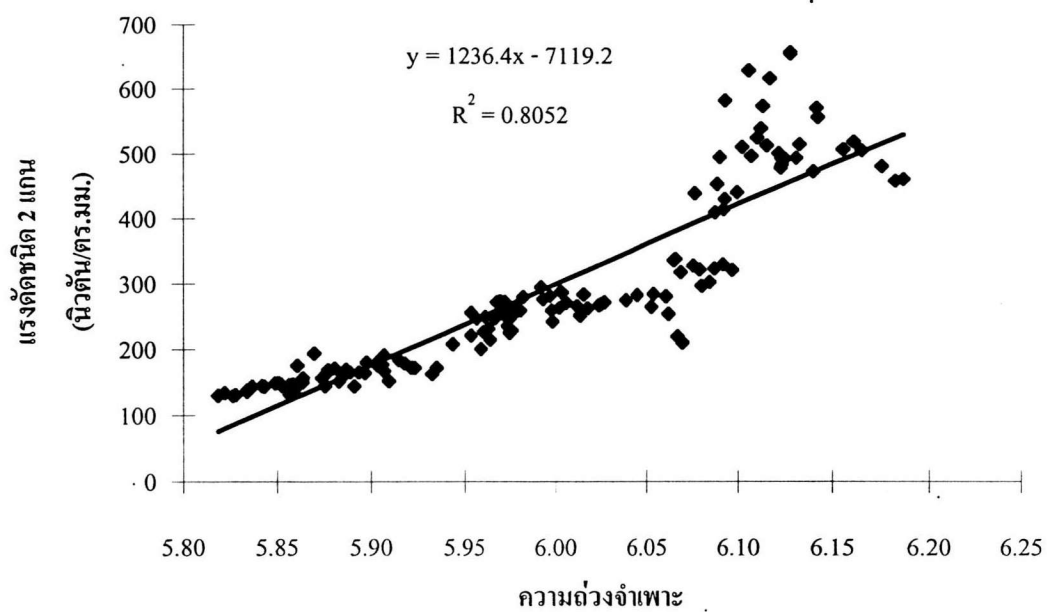
กราฟรูปที่ 4.32 ถึง 4.37 ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มของความสัมพันธ์แบบเส้นตรงและและโพลีโนเมียลดีกรี 2 ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับ แรงคัดชนิด 2 แกน โมดูลัสความยืดหยุ่น และ ค่าความแข็ง แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติเชิงกล มีแนวโน้มที่จะมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกต่อกัน กล่าวคือ เมื่อค่าความถ่วงจำเพาะของผงโลหะผสมมีค่ามากขึ้น ค่าแรงคัดชนิด 2 แกน โมดูลัสความยืดหยุ่น และ ค่าความแข็ง ก็มีแนวโน้มที่จะมีค่ามากขึ้น



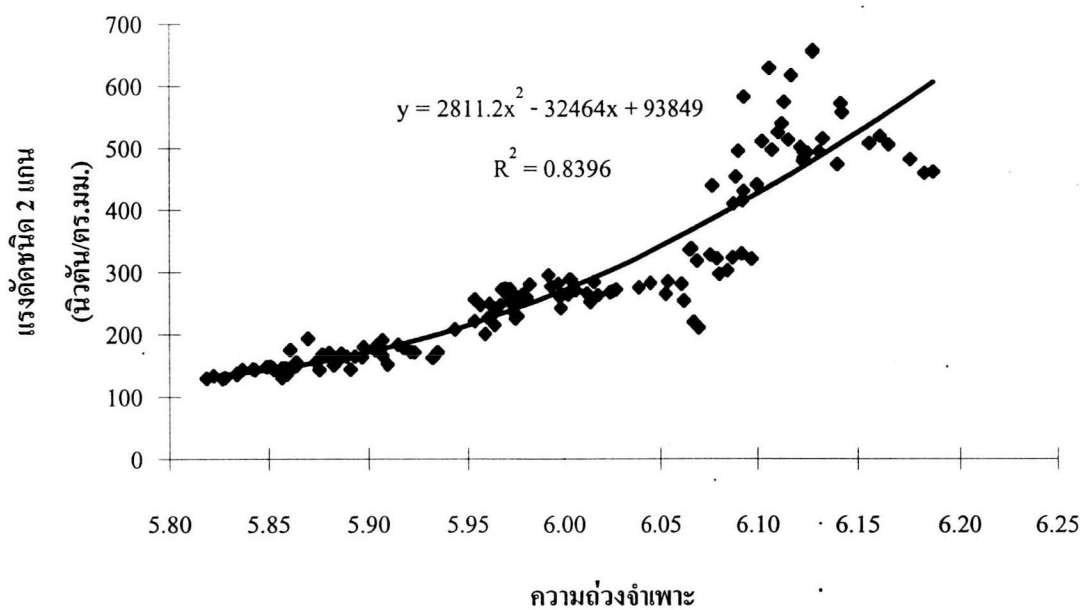
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่างค่าความถี่จำเพาะ กับ การเปลี่ยนแปลงขนาด



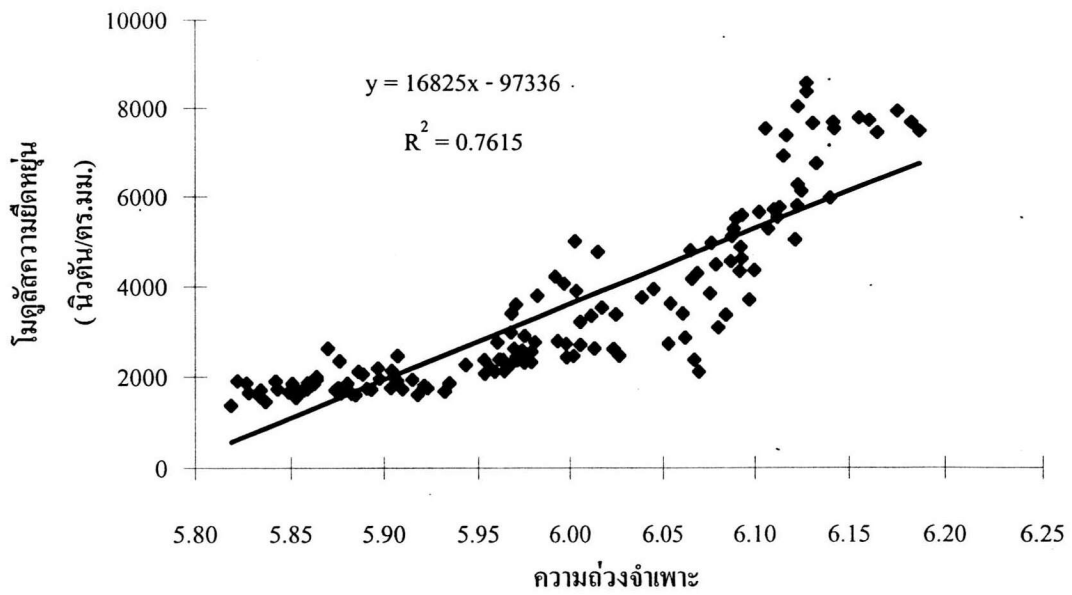
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์แบบพหุนามดีกรี 2 ระหว่างความถี่จำเพาะ กับ การเปลี่ยนแปลงขนาด



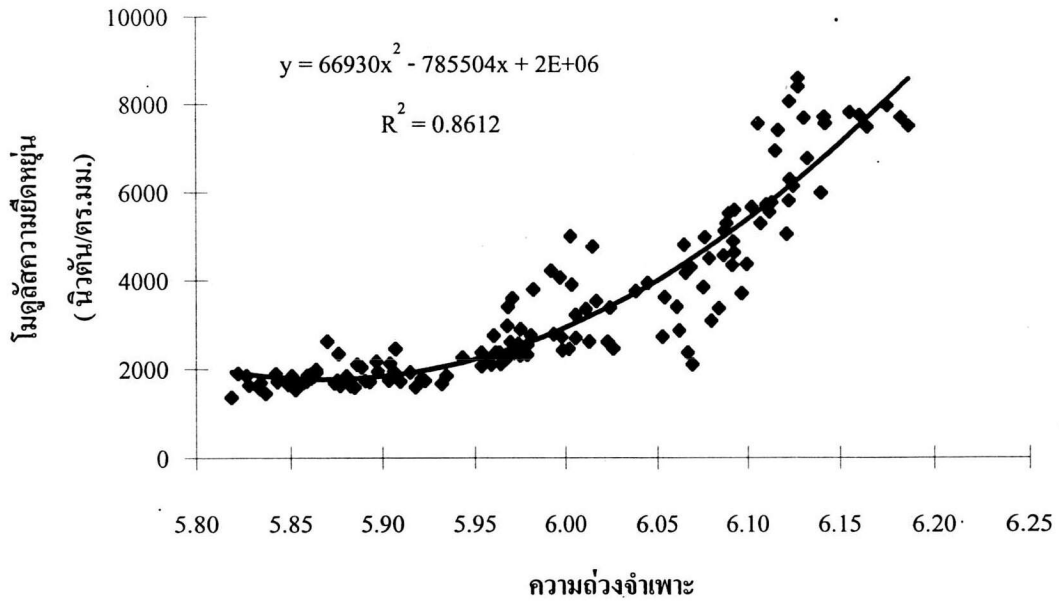
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับ แรงดัดชนิด 2 แกน



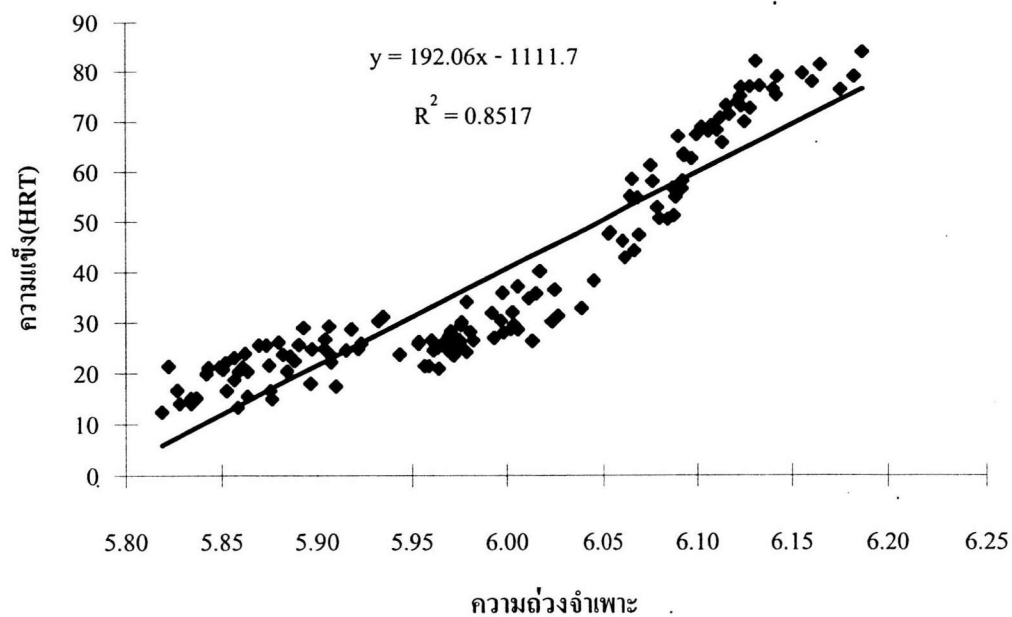
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์แบบพหุนามกำลังสอง ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับ แรงดัดชนิด 2 แกน



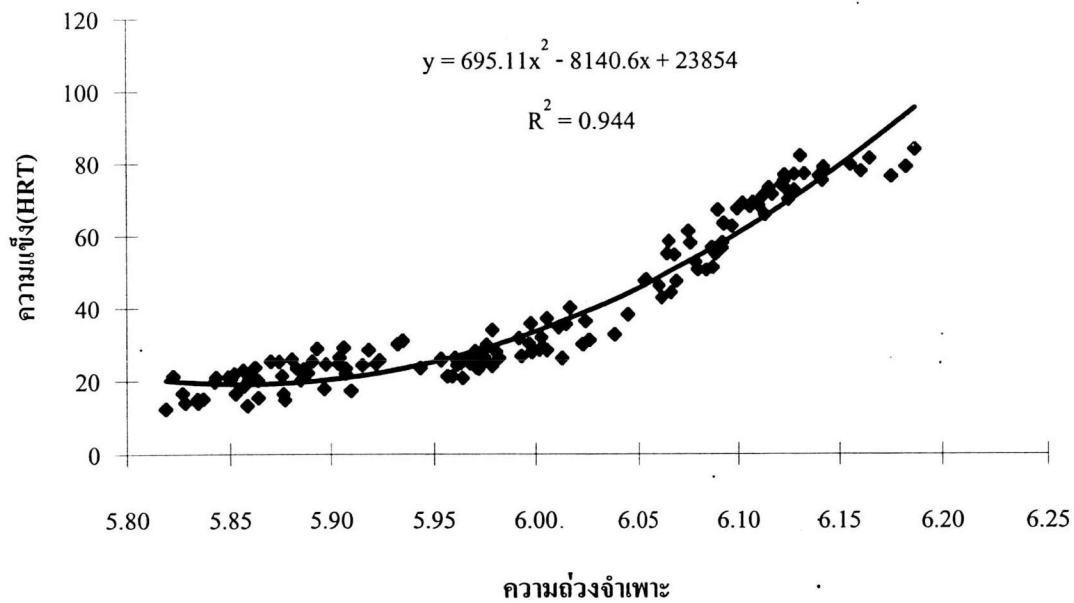
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับ โมดูลัสความยืดหยุ่น



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์แบบพหุนามดีกรี 2 ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับ โมดูลัสความยืดหยุ่น



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่างค่าความถี่จำเพาะ กับ ความแข็ง



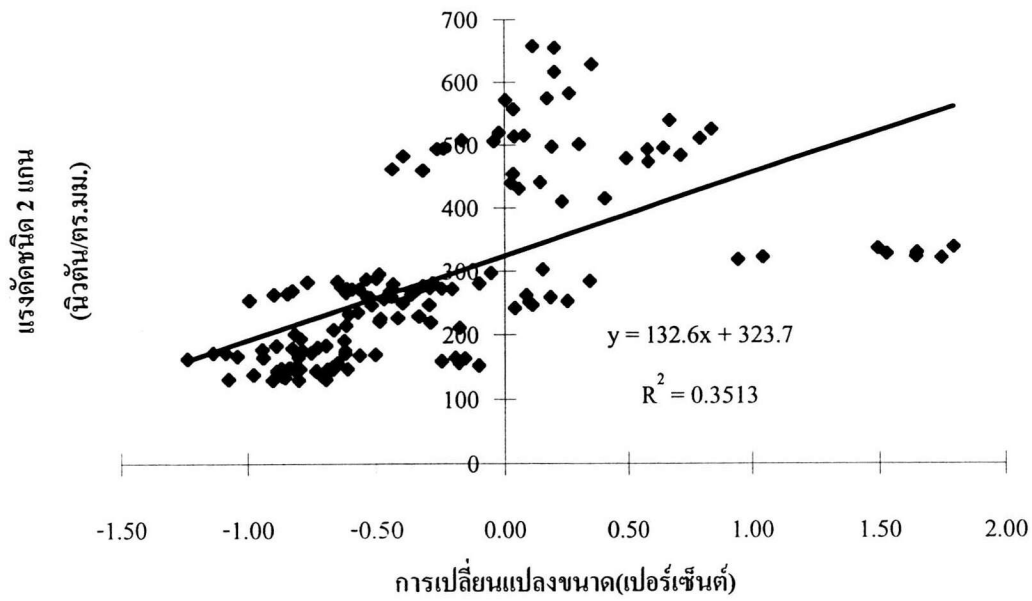
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์แบบพหุนามดีกรี 2 ระหว่างค่าความถี่จำเพาะ กับ ความแข็ง



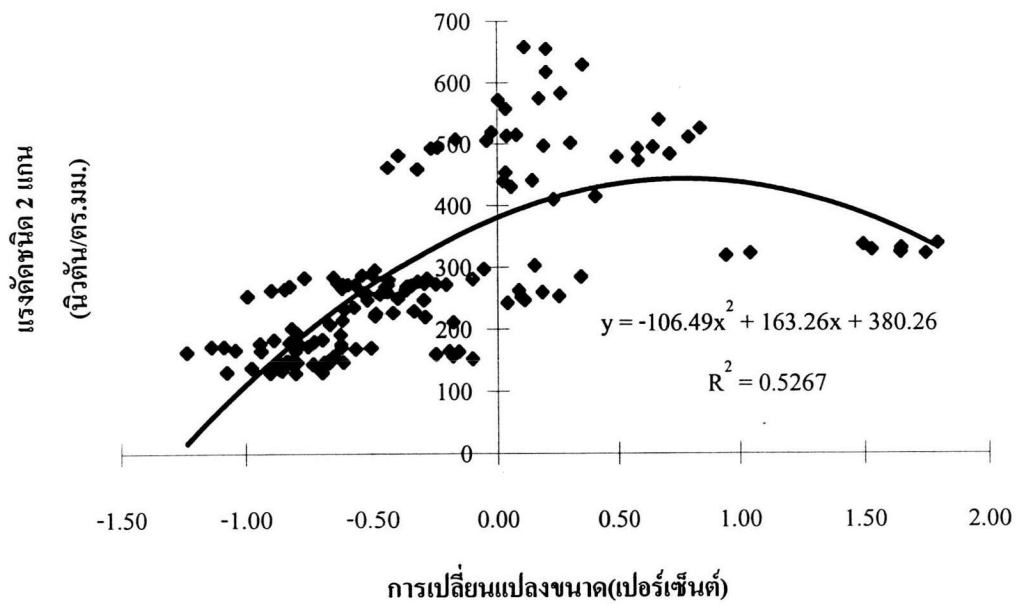
#### 4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลง กับ คุณสมบัติเชิงกล

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับคุณสมบัติเชิงกลด้านต่าง ๆ คือ แรงคัดชนิด 2 แกน โมดูลัสความยืดหยุ่น และ ค่าความแข็ง แสดงไว้ในรูปที่ 4.38 ถึง 4.43 ตามลำดับ เป็นการแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ โดยการประมาณรูปแบบของความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง และโพลีโนเมียลดีกรี 2

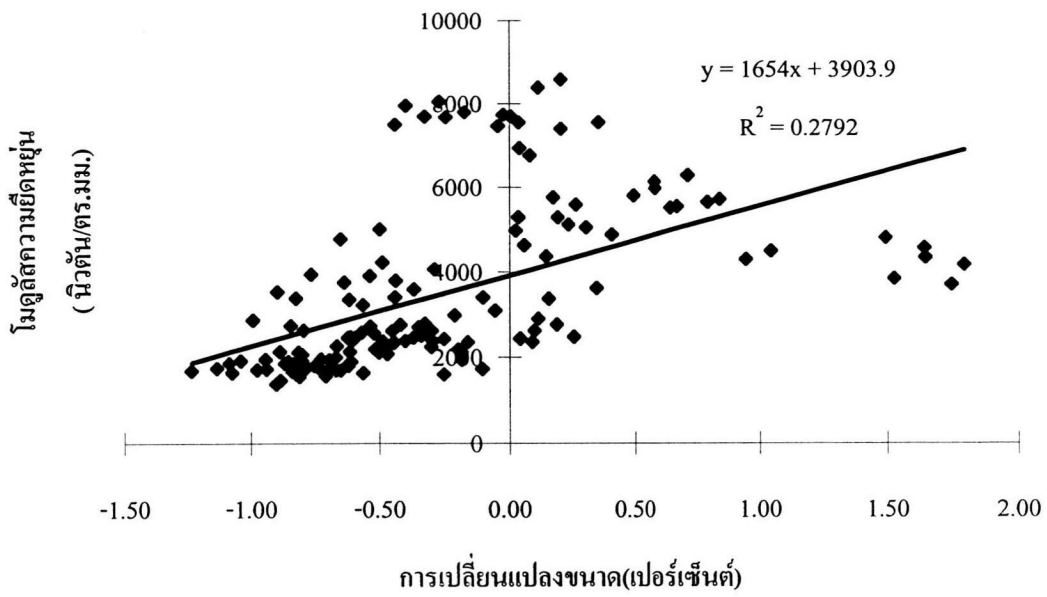
กราฟรูปที่ 4.38 ถึง 4.43 ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มของความสัมพันธ์แบบเส้นตรงและโพลีโนเมียลดีกรี 2 ระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลง กับ แรงคัดชนิด 2 แกน โมดูลัสความยืดหยุ่น และ ค่าความแข็ง แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติเชิงกล มีแนวโน้มที่จะมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกต่อกัน กล่าวคือ เมื่อค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของผงโลหะผสมมีค่ามากขึ้น แรงคัดชนิด 2 แกน โมดูลัสความยืดหยุ่นและ ค่าความแข็ง ก็มีแนวโน้มที่จะมีค่ามากขึ้น



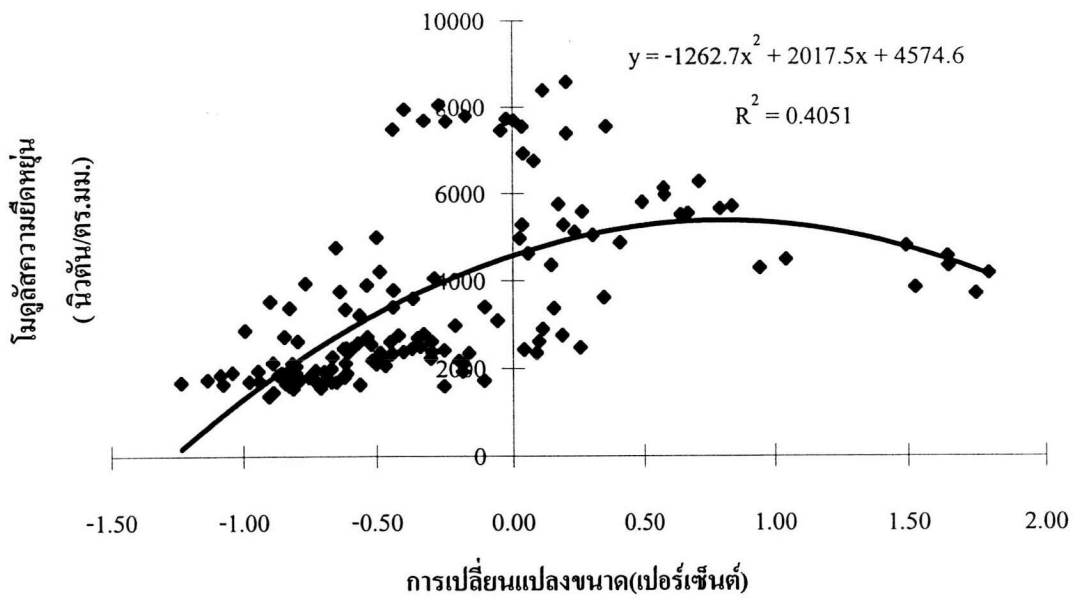
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาด กับ แรงดัดชนิด 2 แกน



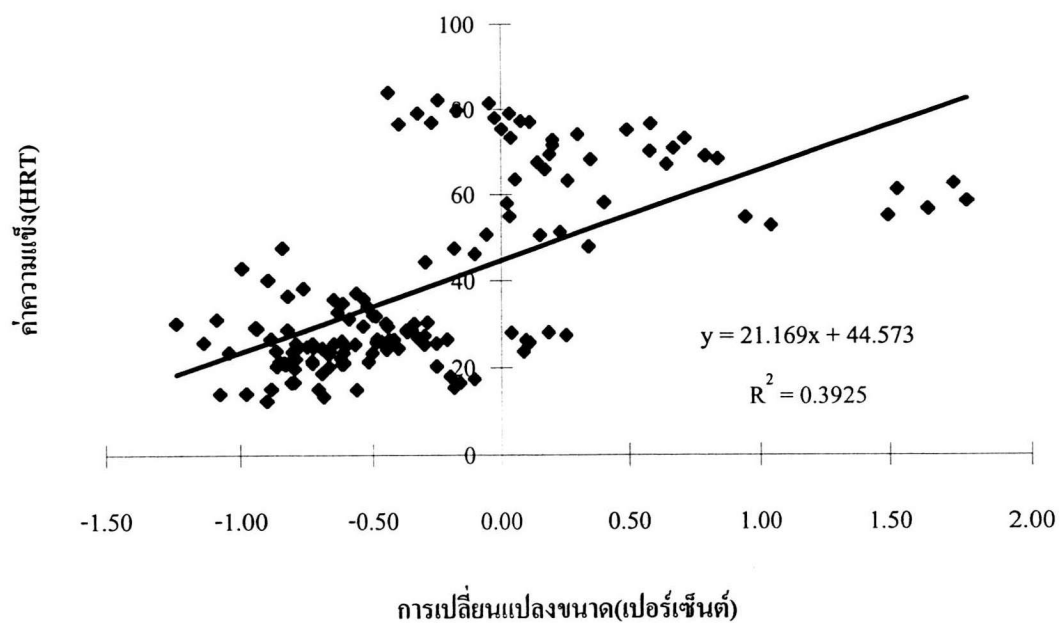
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์แบบพหุนามดีกรี 2 ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาด กับ แรงดัดชนิด 2 แกน



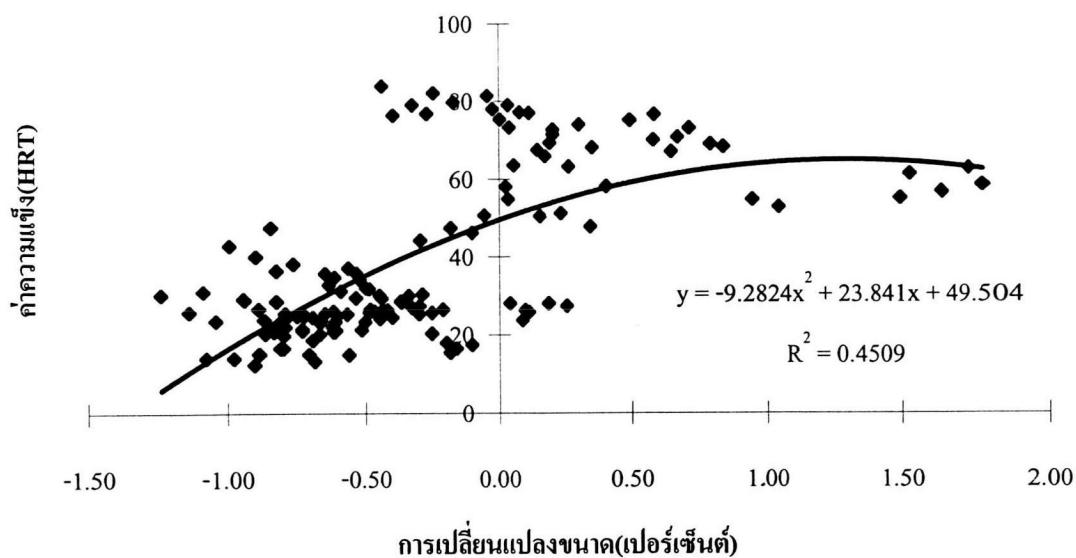
รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาด กับ ไมคูล์สความยืดหยุ่น



รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์แบบพอลิโนเมียลดีกรี 2 ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาดกับ ไมคูล์สความยืดหยุ่น



รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาด กับค่าความแข็ง



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์แบบพหุนามดีกรี 2 ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาด กับค่าความแข็ง

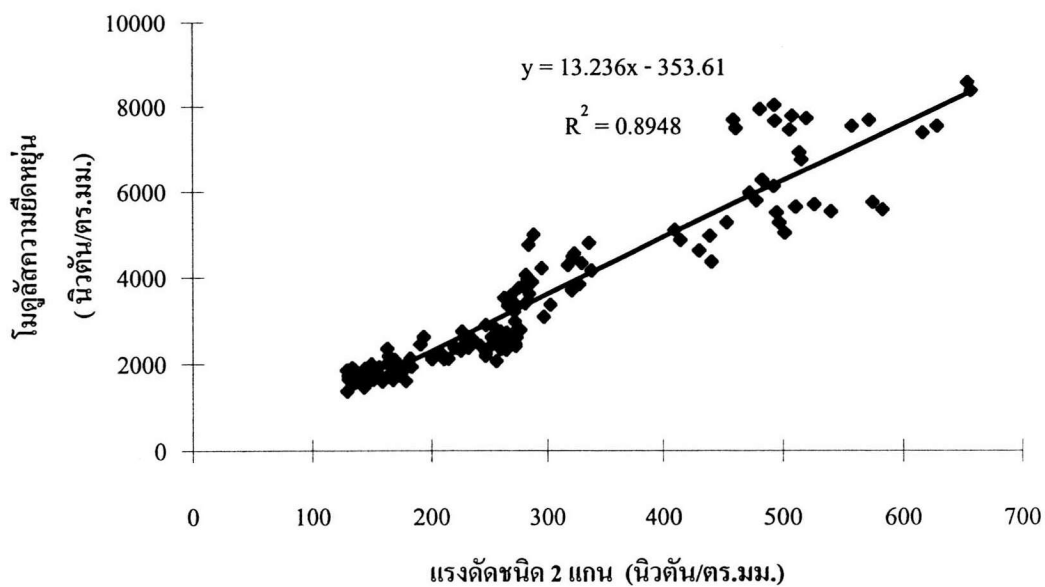
#### 4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกล

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลด้านต่างๆ ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ โดยการประมาณรูปแบบความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง และโพลีโนเมียลดีกรี 2 มีดังต่อไปนี้

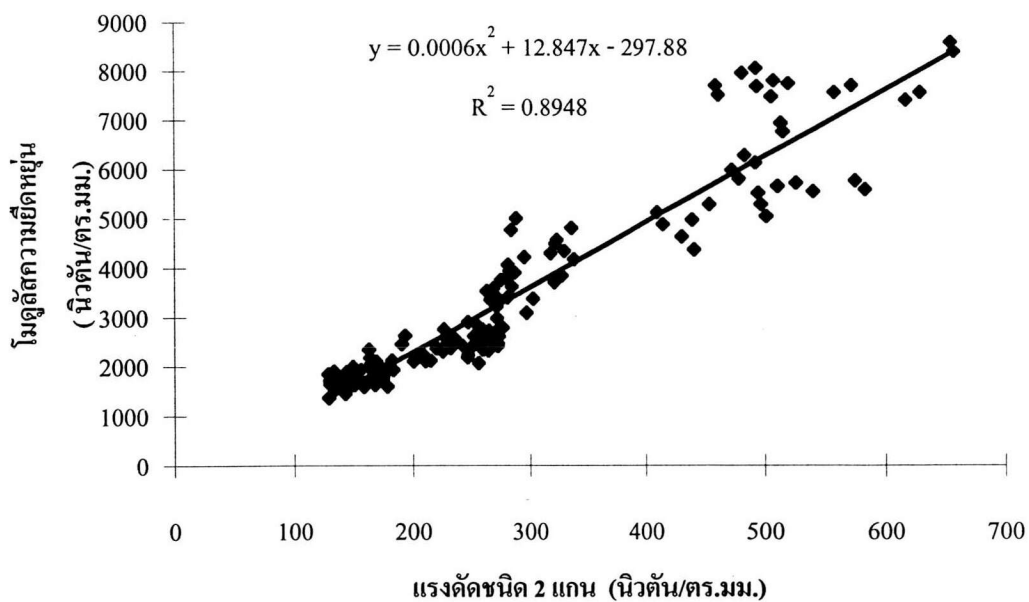
4.3.4.1) กราฟความสัมพันธ์แบบเส้นตรงและโพลีโนเมียลดีกรี 2 ระหว่าง ค่าแรงดัดชนิด 2 แกน กับ โมดูลัสความยืดหยุ่น ดังแสดงในรูปที่ 4.44 และ 4.45 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติทั้งสองนี้ มีแนวโน้มที่จะมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกต่อกัน กล่าวคือ เมื่อค่าแรงดัดชนิด 2 แกน ของผงโลหะผสมมากขึ้น โมดูลัสความยืดหยุ่น ก็มีแนวโน้มที่จะมีค่ามากขึ้นด้วย

4.3.4.2) กราฟความสัมพันธ์แบบเส้นตรงและโพลีโนเมียลดีกรี 2 ระหว่าง ค่าความแข็ง กับ ค่าแรงดัดชนิด 2 แกนของผงโลหะผสม ดังแสดงในรูปที่ 4.46 และ 4.47 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติทั้งสองนี้ มีแนวโน้มที่จะมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกต่อกัน กล่าวคือ เมื่อค่าความแข็งของผงโลหะผสมมีค่ามากขึ้น ค่าแรงดัดชนิด 2 แกนก็มีแนวโน้มที่จะมีค่ามากขึ้นด้วย

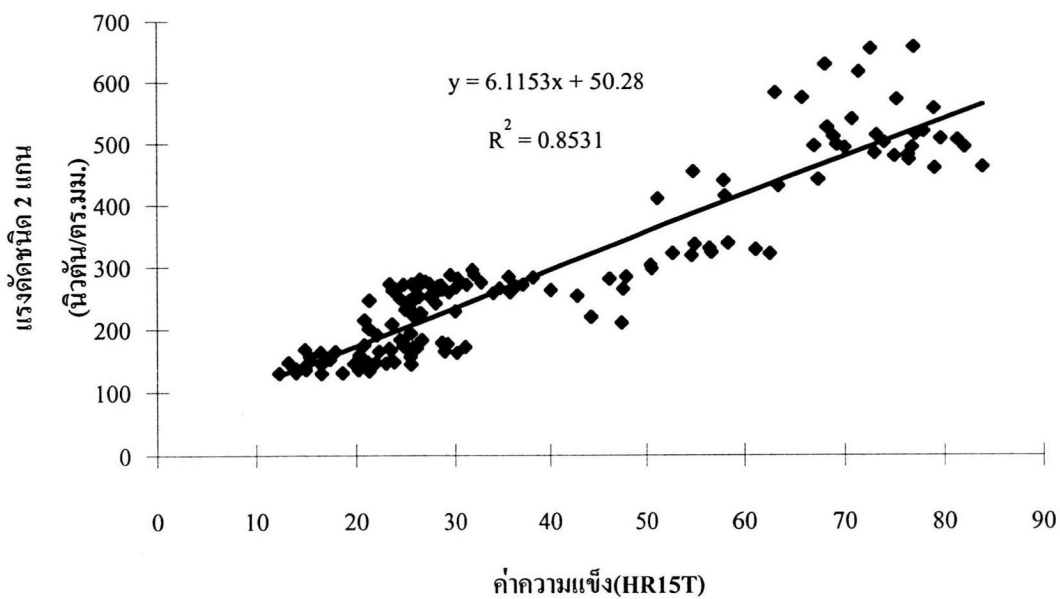
4.3.4.3) กราฟความสัมพันธ์แบบเส้นตรงและโพลีโนเมียลดีกรี 2 ระหว่าง ค่าความแข็ง กับโมดูลัสความยืดหยุ่น ดังแสดงในรูปที่ 4.48 และ 4.49 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติทั้งสองนี้ มีแนวโน้มที่จะมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกต่อกัน กล่าวคือ เมื่อค่าความแข็งของผงโลหะผสมมีค่ามากขึ้น โมดูลัสความยืดหยุ่น ก็มีแนวโน้มที่จะมีค่ามากขึ้นด้วย



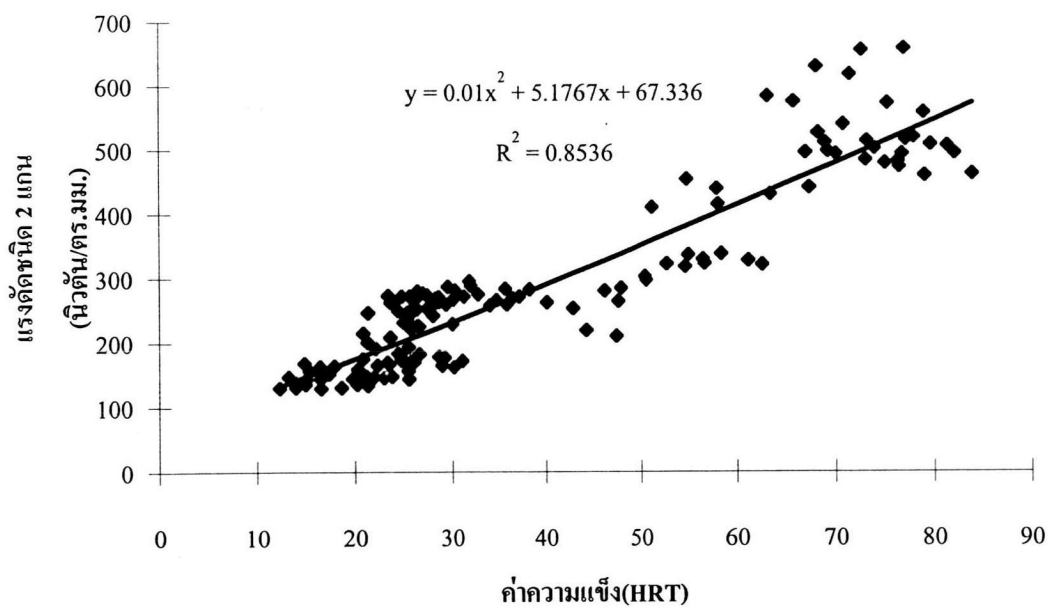
รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่างค่าแรงดัดชนิด 2 แกน กับ โมดูลัสความยืดหยุ่น



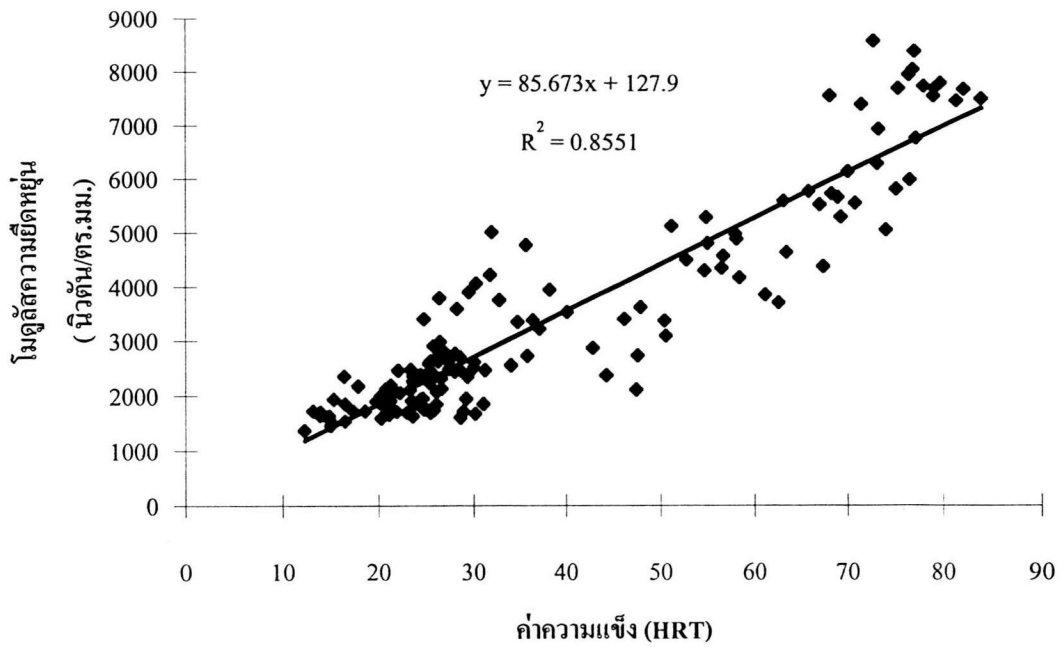
รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์แบบพหุนามดีกรี 2 ระหว่างค่าแรงดัดชนิด 2 แกน กับ โมดูลัสความยืดหยุ่น



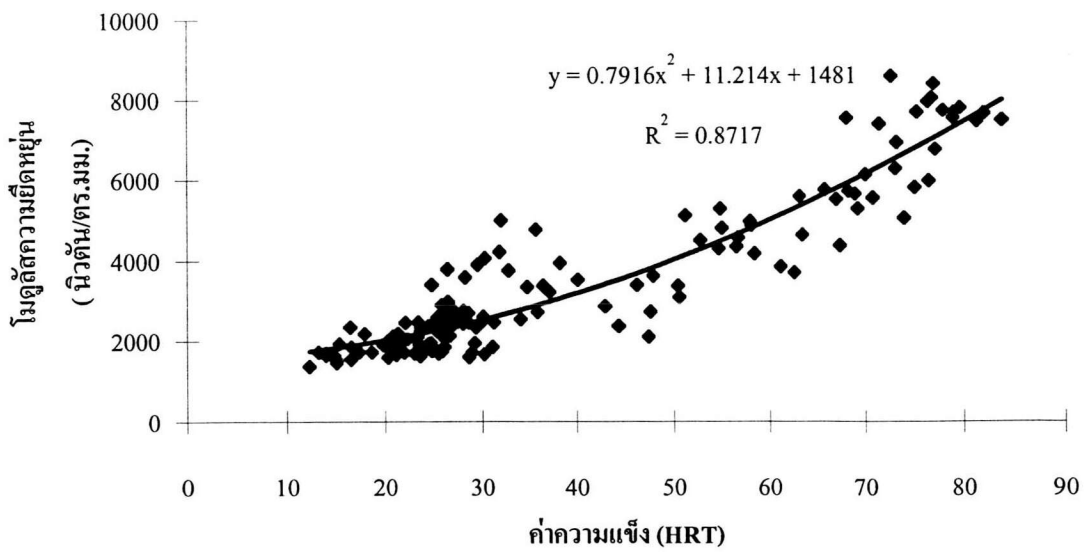
รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่างค่าความแข็ง กับ แรงดัดชนิด 2 แกน



รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์แบบพหุนามดีกรี 2 ระหว่างค่าความแข็ง กับ แรงดัดชนิด 2 แกน



รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่างค่าความแข็ง กับ โมดูลัสความยึดหยุ่น



รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์แบบพหุนามดีกรี 2 ระหว่างค่าความแข็ง กับ โมดูลัสความยึดหยุ่น



## 4.4 สรุปผลตารางการทดลอง

จากการทดลองทั้งหมดที่ได้กระทำมาในงานวิจัยนี้ สามารถนำมาสรุปเป็นตารางผลการทดลอง ได้ดังนี้

### 4.4.1 ผลสรุปการทดลองส่วนผสม ระหว่าง ทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา

หลังจากที่ได้ดำเนินการทดลอง ผ่านขั้นตอนของการเตรียมผงโลหะผสม การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกล ซึ่งได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ การเปลี่ยนแปลงขนาดค่าแรงค้ำชนิด 2 แกน โมดูลัสความยืดหยุ่น และ ความแข็ง ของผงโลหะผสม รวมไปถึงการวิเคราะห์ผลทางสถิติแล้ว สามารถนำผลทั้งหมดที่ได้จากการดำเนินการวิจัย มาสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 4.27 สรุปผลค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกล

ตารางที่ 4.28 สรุปสมการความสัมพันธ์ ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล กับ ส่วนผสมของทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา

### 4.4.2 ผลสรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของผงโลหะผสม

เมื่อนำผลการทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลของผงโลหะผสมที่วัดได้ มาทำการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ โดยการประมาณรูปแบบของความ สัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง และ โพลีโนเมียลดีกรี 2 จะได้ผลสรุปของสมการความสัมพันธ์ระหว่าง คุณสมบัติทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 4.29

ตารางที่ 4.27 สรุปผลค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติทางกายภาพ และ คุณสมบัติเชิงกล ของ ส่วนผสม ระหว่าง ทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา

ทองแดง (%)	แกรไฟต์ (%)	อุณหภูมิการเผา (°C)	ความถ่วงจำเพาะ	การเปลี่ยนแปลงขนาด (%)	แรงค้ำ ชนิด 2 แกน (N/mm <sup>2</sup> )	โมดูลัสความยืดหยุ่น (N/mm <sup>2</sup> )	ความแข็ง (HRT)
0	0	1120	6.0686	-0.24	215.02	2237.09	45.80
2	0	1120	6.0694	0.25	293.58	3493.23	49.17
4	0	1120	6.0742	1.00	320.05	4392.96	53.75
6	0	1120	6.0794	1.57	329.73	4682.40	55.87
8	0	1120	6.0837	1.72	334.08	4252.91	57.48
10	0	1120	6.0865	1.63	324.51	3773.47	61.90
0	0.4	1120	6.0708	-0.08	288.84	3243.84	48.37
2	0.4	1120	6.0901	-0.32	412.38	4994.84	54.67
4	0.4	1120	6.0964	0.72	502.86	5581.85	67.98
6	0.4	1120	6.1038	0.76	532.44	5626.87	69.54
8	0.4	1120	6.1077	0.65	488.07	6203.18	71.56
10	0.4	1120	6.1314	0.54	475.89	5886.57	75.80
0	0.8	1120	6.0829	0.03	446.31	5126.61	56.42
2	0.8	1120	6.1033	0.22	578.55	5671.55	64.51
4	0.8	1120	6.1114	0.28	622.92	7469.13	69.78
6	0.8	1120	6.1281	0.16	656.15	8479.46	74.83
8	0.8	1120	6.1444	0.02	564.26	7619.03	77.15
10	0.8	1120	6.1630	-0.03	512.43	7594.96	79.67
0	1.2	1120	6.0964	0.10	432.47	4495.45	65.45
2	1.2	1120	6.1145	0.25	499.38	5162.82	71.64
4	1.2	1120	6.1241	0.06	514.17	6839.79	75.20
6	1.2	1120	6.1324	-0.22	500.25	7915.72	78.25
8	1.2	1120	6.1548	-0.32	487.72	7807.43	79.27
10	1.2	1120	6.1847	-0.38	460.23	7589.46	81.50

ตารางที่ 4.27(ต่อ) สรุปผลค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติทางกายภาพ และ คุณสมบัติเชิงกล ของ ส่วนผสม ระหว่าง ทองแดง แกรไฟต์ และอุณหภูมิการเผา

ทองแดง (%)	แกรไฟต์ (%)	อุณหภูมิการเผา (°C)	ความถ่วงจำเพาะ	การเปลี่ยนแปลงขนาด (%)	แรงคัดชนิด 2 แกน (N/mm <sup>2</sup> )	โมดูลัสความยืดหยุ่น (N/mm <sup>2</sup> )	ความแข็งแรง (HRT)
0	0	950	5.9512	-0.74	204.36	2181.80	22.47
2	0	950	5.9600	-0.56	239.06	2278.01	23.15
4	0	950	5.9642	-0.35	248.16	2304.40	24.87
6	0	950	5.9831	0.17	257.48	2415.09	25.51
8	0	950	5.9925	0.15	252.97	2827.29	26.89
10	0	950	6.0059	0.07	246.74	2523.46	27.12
0	0.4	950	5.9588	-0.55	217.75	2240.71	23.29
2	0.4	950	5.9629	-0.54	264.15	2266.36	24.73
4	0.4	950	5.9741	-0.37	268.79	2466.73	25.72
6	0.4	950	5.9957	-0.27	274.14	2881.69	26.65
8	0.4	950	6.0159	-0.30	271.31	2556.98	27.05
10	0.4	950	6.0248	-0.52	269.47	2533.97	30.67
0	0.8	950	5.9671	-0.49	230.81	2663.34	25.84
2	0.8	950	5.9693	-0.40	270.14	3494.44	26.48
4	0.8	950	5.9896	-0.36	280.42	3924.55	28.33
6	0.8	950	6.0064	-0.51	290.95	4058.34	30.67
8	0.8	950	6.0204	-0.57	285.86	4884.00	33.83
10	0.8	950	6.0416	-0.70	278.82	3846.11	35.52
0	1.2	950	5.9756	-0.41	227.12	2663.34	28.27
2	1.2	950	5.9774	-0.48	258.87	3494.44	31.70
4	1.2	950	6.0000	-0.45	261.24	3924.55	32.20
6	1.2	950	6.0189	-0.59	268.66	4058.34	35.93
8	1.2	950	6.0331	-0.86	265.88	4884.00	38.27
10	1.2	950	6.0577	-0.92	259.15	3846.11	45.20

ตารางที่ 4.27(ต่อ) สรุปผลค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติทางกายภาพ และ คุณสมบัติเชิงกล ของ ส่วนผสม ระหว่าง ทองแดง แกรไฟต์ และอุณหภูมิการเผา

ทองแดง (%)	แกรไฟต์ (%)	อุณหภูมิการเผา (°C)	ความถ่วงจำเพาะ	การเปลี่ยนแปลงขนาด (%)	แรงคัตชนิด 2 แกน (N/mm <sup>2</sup> )	โมดูลัสความยืดหยุ่น(N/mm <sup>2</sup> )	ความแข็งแรง (HRT)
0	0	880	5.8234	-0.99	130.20	1500.32	13.15
2	0	880	5.8355	-0.93	140.64	1574.05	14.54
4	0	880	5.8556	-0.75	145.18	1628.91	14.89
6	0	880	5.8702	-0.37	162.12	1777.97	15.14
8	0	880	5.8871	-0.18	163.52	2259.13	17.19
10	0	880	5.8974	-0.18	155.46	1654.95	18.35
0	0.4	880	5.8281	-0.78	134.63	1726.20	18.15
2	0.4	880	5.8456	-0.82	146.37	1773.16	20.48
4	0.4	880	5.8579	-0.73	148.27	1848.99	21.12
6	0.4	880	5.8842	-0.56	172.18	1949.70	22.07
8	0.4	880	5.8968	-0.71	192.15	2537.11	23.78
10	0.4	880	5.9094	-0.74	179.16	1837.85	24.58
0	0.8	880	5.8349	-0.77	136.37	1782.70	18.80
2	0.8	880	5.8536	-0.75	147.23	1766.57	21.84
4	0.8	880	5.8675	-0.63	151.72	1787.70	23.28
6	0.8	880	5.8908	-0.71	167.64	1946.34	24.17
8	0.8	880	5.9075	-0.80	181.36	2036.16	25.61
10	0.8	880	5.9197	-0.79	175.42	1694.04	26.70
0	1.2	880	5.8579	-0.78	133.15	1787.05	19.45
2	1.2	880	5.8690	-0.80	145.53	1793.04	22.65
4	1.2	880	5.8869	-0.77	147.53	1679.36	24.54
6	1.2	880	5.8984	-0.99	165.67	1809.61	26.21
8	1.2	880	5.9182	-1.04	174.18	1839.72	27.48
10	1.2	880	5.9334	-1.16	167.15	1759.94	30.64

ตารางที่ 4.28 สรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกล กับ ส่วนผสม ทองแดง , แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา

Y	หน่วย	สมการความสัมพันธ์	R <sup>2</sup>
1. ความถ่วงจำเพาะ	-	$Y = 1.2024 + 0.0099X_1 - 0.74255X_2 + 0.0086X_3 + 0.0026X_1X_2$	0.9901
2. การเปลี่ยนแปลงขนาด	เปอร์เซ็นต์	$Y = -3.1995 + 2.6952X_2 - 0.0077X_1^2 + 0.2023X_2^2 - 0.1480X_1X_2 + 0.0001X_1X_3 - 0.0027X_2X_3$	0.9298
3. แรงดัดชนิด 2 แกน	นิวตัน/ตร.มม.	$Y = -1800.4393 - 455.8946X_2 + 3.3274X_3 - 1.8217X_1^2 - 146.0074X_2^2 + 0.0013X_3^2 + 0.0239X_1X_3 + 0.7034X_2X_3$	0.9304
4. โมดูลัสความยืดหยุ่น	นิวตัน/ตร.มม.	$Y = -540.7799 - 613.7712X_1 - 7824.2981X_2 - 25.2703X_1^2 - 1632.5230X_2^2 + 0.0024X_3^2 + 57.3648X_1X_2 + 0.9666X_1X_3 + 10.7413X_2X_3$	0.9385
5. ความแข็ง	HRT	$Y = 336.2910 - 4.539X_1 - 29.2486X_2 - 0.7556X_3 - 3.434896X_1^2 + 0.0004X_2^2 + 0.3632X_1X_2 + 0.0056X_1X_3 + 0.0435X_2X_3$	0.9830

หมายเหตุ :  $X_1$  = ปริมาณทองแดง(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

$X_2$  = ปริมาณแกรไฟต์(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

$X_3$  = อุณหภูมิการเผา(องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 4.29 สรุปผลการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของชิ้นงานผง โกละผสม

ลำดับที่	X		Y		ประมาณความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง		ประมาณความสัมพันธ์เป็นแบบพหุนามดีกรี 2	
	คุณสมบัติ	หน่วย	คุณสมบัติ	หน่วย	สมการ	R <sup>2</sup>	สมการ	R <sup>2</sup>
1	ความกว้างจำเพาะ	-	การเปลี่ยนแปลงขนาด	เปอร์เซ็นต์	$y = 3.952x - 23.947$	0.4118	$y = -2.1591x^2 + 29.835x - 101.49$	0.4128
2	ความถ่วงจำเพาะ	-	แรงดัดชนิด 2 แกน	นิวตัน/ตร.มม.	$y = 1236.4x - 7119.2$	0.8052	$y = 2811.2x^2 - 32464x + 93849$	0.8396
3	ความถ่วงจำเพาะ	-	โมดูลัสความยืดหยุ่น	นิวตัน/ตร.มม.	$y = 16825x - 97336$	0.7615	$y = 66930x^2 - 785504x + 0.000001$	0.8612
4	ความถ่วงจำเพาะ	-	ความแข็ง	HRT	$y = 192.06x - 1111.7$	0.8517	$y = 695.11x^2 - 8140.6x + 23854$	0.9440
5	การเปลี่ยนแปลงขนาด	เปอร์เซ็นต์	แรงดัดชนิด 2 แกน	นิวตัน/ตร.มม.	$y = 132.6x + 323.7$	0.3513	$y = -106.49x^2 + 163.26x + 380.26$	0.5267
6	การเปลี่ยนแปลงขนาด	เปอร์เซ็นต์	โมดูลัสความยืดหยุ่น	นิวตัน/ตร.มม.	$y = 1654x + 3903.9$	0.2792	$y = -1262.7x^2 + 2017.5x - 4574.6$	0.0451
7	การเปลี่ยนแปลงขนาด	เปอร์เซ็นต์	ความแข็ง	HRT	$y = 21.169x + 44.573$	0.3925	$y = -9.2824x^2 + 23.841x + 49.504$	0.4509
8	แรงดัดชนิด 2 แกน	นิวตัน/ตร.มม.	โมดูลัสความยืดหยุ่น	นิวตัน/ตร.มม.	$y = 13.236x - 353.61$	0.8948	$y = 0.0006x^2 + 12.847x - 297.88$	0.8948
9	ความแข็ง	HRT	แรงดัดชนิด 2 แกน	นิวตัน/ตร.มม.	$y = 6.1153x + 50.28$	0.8531	$y = 0.01x^2 + 5.1767x + 67.336$	0.8536
10	ความแข็ง	HRT	โมดูลัสความยืดหยุ่น	นิวตัน/ตร.มม.	$y = 85.673x + 127.9$	0.8551	$y = 0.7916x^2 + 11.214x + 1481$	0.8717