

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ผลการหลอมและหล่อโลหะผสมเงิน 940-ทองแดง-สังกะสี-ซิลิคอน

ชิ้นงานที่ได้จากการหลอมและหล่อโลหะผสมเงินเกรด 940 ทั้ง 10 ชุด โดยส่วนผสมก่อนการหลอมและหล่อดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 บทที่ 3 ด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง โดยมีการควบคุมบรรยากาศด้วยไนโตรเจน การหลอมและหล่อแต่ละชุดๆ ละ 300 กรัม ทั้ง 10 ชุด ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส สำหรับโลหะผสมเงินเกรด 940 ที่ไม่ได้เติมซิลิคอน และ 920 องศาเซลเซียส สำหรับโลหะผสมเงินเกรด 940 ที่เติมซิลิคอน อุณหภูมิแม่พิมพ์ 700 °C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึงประมาณ 500 °C เทส่วนผสมที่เตรียมไว้ลงไปหลอมและหล่อ ได้ชิ้นงานเป็นเส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 มิลลิเมตร (Wire drawing) เมื่อสังเกตและตรวจสอบชิ้นงานด้วยตาเปล่า พบว่า ชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดงสูงกว่าปริมาณสังกะสี (กลุ่มอัลลอยที่มีทองแดงเป็นธาตุผสมหลัก) จะมีผิวคล้ำ ส่วนชิ้นงานที่มีการเติมสังกะสีมากขึ้นจะมีสีผิวขาวแกมเหลือง (กลุ่มอัลลอยที่มีสังกะสีเป็นธาตุผสมหลัก) และเติมซิลิคอนในปริมาณเล็กน้อยผิวจะมีสีขาว แต่ถ้ามีปริมาณซิลิคอนสูงขึ้นไปจะมีผิวสีขาวมากขึ้น

ในการรายงานผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง จะขอแบ่งกลุ่มชิ้นงานตามปริมาณส่วนผสมทางเคมี (แบ่งด้วยธาตุผสมหลังหล่อ) สภาพหล่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 มิลลิเมตร ออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

กลุ่มที่ 1 โลหะผสมเงิน 940-ทองแดง-สังกะสี (กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน):

โลหะผสมชุดที่ 1-4

กลุ่มที่ 2 โลหะผสมเงิน 940-ทองแดง-สังกะสี-ซิลิคอน (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอน 0.02

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก): โลหะผสมชุดที่ 5-7

กลุ่มที่ 3 โลหะผสมเงิน 940-ทองแดง-สังกะสี-ซิลิคอน (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอน 0.036-

0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก): โลหะผสมชุดที่ 8-10

ทั้ง 3 กลุ่มที่แบ่งโดยใช้ปริมาณส่วนผสมทางเคมี ซึ่งในแต่ละกลุ่มจะแบ่งกลุ่มอัลลอยออกเป็น 2 กลุ่มย่อย คือ กลุ่มที่มีการเติมทองแดงเป็นธาตุผสมหลัก และกลุ่มที่มีการเติมสังกะสีเป็นธาตุผสมหลัก

หลังจากนั้นแบ่งชิ้นงานสภาพหล่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 มิลลิเมตร ซึ่งในที่รายงานเล่มนี้จะใช้ชื่อเรียกโลหะผสมกลุ่มที่ 1, กลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 ที่ได้กล่าวมาข้างต้นว่าเป็นโลหะผสมเงินเกรด 940 ซึ่งปริมาณส่วนผสมทางเคมีจะแตกต่างกันออกไปดังแสดงในตารางที่ 4.1 และในการทดลองยังแบ่งออกเป็น 3 ประเภท โดยอาศัยกระบวนการทางความร้อน คือ ประเภท

แรกเป็นชิ้นงานสภาพหล่อ ประเภทที่สองนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อน คือ ผ่านการอบไฮโดรเจนในเซิร์นที่ 750 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และประเภทที่สามคือ ชิ้นงานที่ผ่านการอบไฮโดรเจนในเซิร์นที่ 750 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที โดยชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการด้วยความร้อนจะปล่อยให้เย็นในอากาศ จากนั้นนำชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่มนี้ ไปลดขนาดเป็นเส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหลือ 1.8 มิลลิเมตร (อัตราการลดขนาด 89 เปอร์เซ็นต์) และลดขนาดเป็นเส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสุดท้ายเหลือ 0.68 มิลลิเมตร (อัตราการลดขนาด 99 เปอร์เซ็นต์) จากนั้นนำไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส นาน 30, 45 และ 60 นาที เพื่อศึกษาถึงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมเครื่องประดับโดยเน้นในเรื่องความสามารถในการแปรรูปได้ในอัตราที่ค่อนข้างสูงและมีการกันหมองค่อนข้างดี ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนที่ได้ทำการศึกษาในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 4.1 ภาพแสดงชิ้นงานหลังหล่อด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องของโลหะผสมเงินเกรด 940 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 มิลลิเมตร

4.2 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงิน 940-ทองแดง-สังกะสี-ซิลิคอน

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเงิน ทองแดง สังกะสี และซิลิคอน จากการตรวจสอบด้วยวิธี ICP แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงิน 940-ทองแดง-สังกะสี-ซิลิคอน ก่อนและหลังการหล่อ

โลหะผสมชุดที่	ปริมาณส่วนผสมก่อนการหล่อ (wt.%)				ปริมาณส่วนผสมหลังการหล่อ (wt.%)			
	Ag	Cu	Zn	Si	Ag	Cu	Zn	Si
1	94	4.73	1.17	-	balance	4.95	1.18	-
2	94	4	2	-	balance	4.12	1.96	-
3	94	3	3	-	balance	3.18	3.01	-
4	94	2	4	-	balance	2.10	3.97	-
5	94	3.95	2	0.05	balance	3.87	1.93	0.02
6	94	2.95	3	0.05	balance	3.13	2.93	0.02
7	94	1.95	4	0.05	balance	2.01	4.11	0.02
8	94	3.90	2	0.1	balance	3.77	1.66	0.040
9	94	2.90	3	0.1	balance	2.93	2.65	0.065
10	94	1.90	4	0.1	balance	2.30	3.23	0.036

หมายเหตุ : ธาตุ Ag, Cu, Zn และ Si ทดสอบปริมาณส่วนผสมที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของปริมาณสังกะสีและซิลิคอนที่ใช้ในการหล่อ ปริมาณสังกะสีและซิลิคอนที่มีอยู่จริง และที่สูญเสียในขณะทำการหล่อ

โลหะผสม ชุดที่	ปริมาณสังกะสี(wt.%)			ปริมาณซิลิคอน(wt.%)		
	ที่ใช้ในการ หล่อ	ที่มีอยู่จริง	ที่สูญเสีย	ที่ใช้ในการ หล่อ	ที่มีอยู่จริง	ที่สูญเสีย
1	1.17	1.18	0.01	-	-	-
2	2	1.96	0.04	-	-	-
3	3	3.01	0.01	-	-	-
4	4	3.97	0.03	-	-	-
5	2	1.93	0.07	0.05	0.02	0.03
6	3	2.93	0.07	0.05	0.02	0.03
7	4	4.11	0.11	0.05	0.02	0.03
8	2	1.66	0.34	0.1	0.040	0.06
9	3	2.65	0.25	0.1	0.065	0.035
10	4	3.23	0.77	0.1	0.036	0.064

ผลจากการตรวจสอบส่วนผสมหลังการหล่อ พบว่ามีปริมาณสังกะสีเหลือเพียง 1.18-4.11 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณซิลิคอนเหลือ 0.02-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คิดเป็นปริมาณการสูญเสียของสังกะสีและซิลิคอนมีค่าตั้งแต่ 0.75-19.25 และ 35-64 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณที่ใช้ในการหล่อ ตามลำดับ จากตารางที่ 4.2 พบว่า มีการสูญเสียของธาตุผสมเกิดขึ้นขณะหลอมและหล่อ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการสูญเสียของธาตุสังกะสีและซิลิคอน กล่าวคือ ทั้งสังกะสีและซิลิคอนมีสมบัติเป็นตัวลดออกซิเจน (deoxidizer) เมื่อพิจารณาจาก Ellingham Diagram (เอกสารอ้างอิงหมายเลข 21) พบว่า ค่าพลังงานอิสระกิบส์ (Gibbs free energy) ของปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนกับสังกะสีและซิลิคอนมีค่าต่ำกว่าเงินและทองแดง นั่นแสดงว่าสังกะสีและซิลิคอนสามารถรวมตัวกับออกซิเจนได้ดีกว่าธาตุเงินและทองแดง เกิดเป็นสังกะสีออกไซด์และซิลิคอนออกไซด์อยู่ที่ผิวของชิ้นงาน

จากส่วนผสมทั้ง 10 ชุด มีปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในการหล่อและส่วนผสมที่มีอยู่จริงไม่เท่ากันนั้น แต่แนวโน้มส่วนผสมที่มีอยู่จริงเป็นไปในทิศทางเดียวกันเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ใช้ในการหล่อ จึงสามารถนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ เพื่อศึกษาและนำมาเปรียบเทียบได้

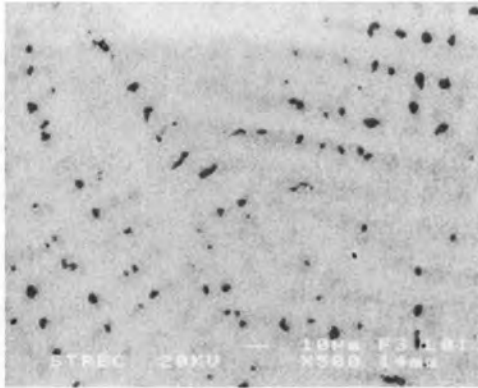
4.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคก่อนกัดกรดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) แสดงดังรูปที่ 4.2 และผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วย EDX ที่บริเวณเนื้อพื้น (Matrix) และโครงสร้างยูเทคติก (Eutectic structure) ของโลหะผสมเงินเกรด 940 ทั้ง 10 ชุด สภาพหล่อ แสดงในตารางที่ 4.3 ส่วนภาพโครงสร้างจุลภาคหลังกัดกรดของโลหะผสมเงินเกรด 940 แสดงดังรูปที่ 4.3 ที่กำลังขยาย 200 เท่าและภาคผนวก ก

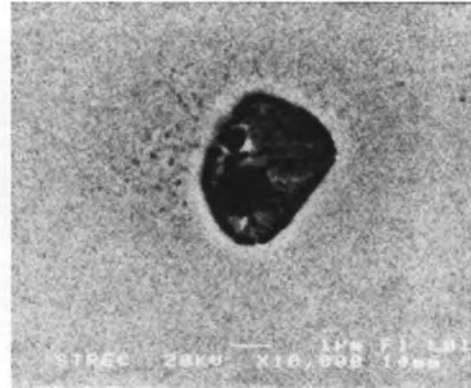
ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของโลหะผสมเงิน 940-ทองแดง-สังกะสี - ซิลิคอน ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM)

โลหะผสมชุดที่	ส่วนผสมทางเคมี (wt%) โดย balance of Ag	ส่วนผสมทางเคมีที่ตรวจสอบด้วย EDX* (wt%)							
		Matrix				Eutectic structure			
		Ag	Cu	Zn	Si	Ag	Cu	Zn	Si
1	1.18%Zn -4.95%Cu	95.90	3.20	0.90	-	95.28	3.22	1.50	-
2	1.96%Zn -4.12%Cu	95.10	3.11	1.79	-	73.46	21.46	5.08	-
3	3.01%Zn -3.18%Cu	95.33	2.15	2.52	-	70.94	20.89	16.35	-
4	3.97%Zn -2.10%Cu	94.25	1.77	3.98	-	86.61	5.34	8.06	-
5	0.02%Si-1.93%Zn -3.97%Cu	96.65	1.79	1.38	0.20	35.74	56.01	5.26	2.99
6	0.02%Si-2.93%Zn -3.13%Cu	96.13	1.56	2.21	0.10	18.13	71.42	5.94	4.51
7	0.02%Si-4.11%Zn -2.01%Cu	95.50	1.29	3.07	0.14	22.14	67.08	4.59	6.19
8	0.04%Si-1.66%Zn -3.77%Cu	94.75	3.46	1.78	0.01	88.01	4.38	2.30	5.31
9	0.065%Si-2.65%Zn -2.93%Cu	96.02	1.97	1.97	0.04	76.47	17.15	6.17	0.21
10	0.036%Si-3.23%Zn -2.30%Cu	94.56	2.10	3.30	0.04	ND			

หมายเหตุ : ND=Not Determine

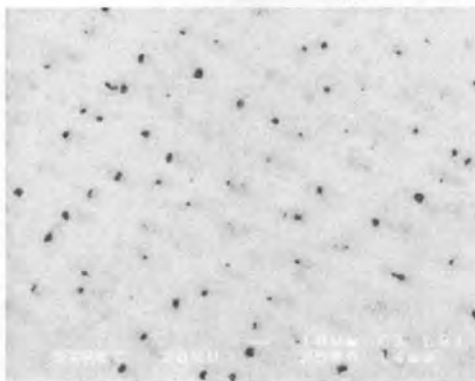


4.2 (ก)

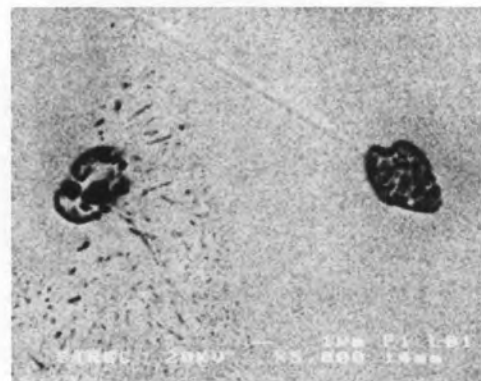


4.2 (ข)

โลหะผสมชุดที่ 1 : 1.18%Zn -4.95%Cu-balance of Ag

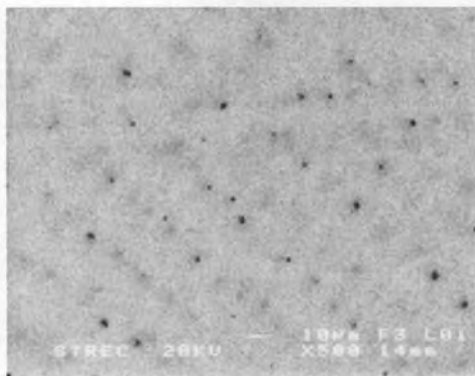


4.2 (ค)



4.2 (ง)

โลหะผสมชุดที่ 2 : 1.96%Zn -4.12%Cu-balance of Ag



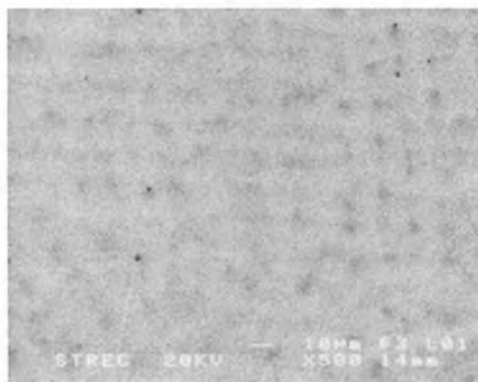
4.2 (จ)



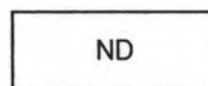
4.2 (ฉ)

โลหะผสมชุดที่ 3 : 3.01%Zn -3.18%Cu-balance of Ag

รูปที่ 4.2 ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 940-ทองแดง -สังกะสี -ซิลิคอน สภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด(SEM)

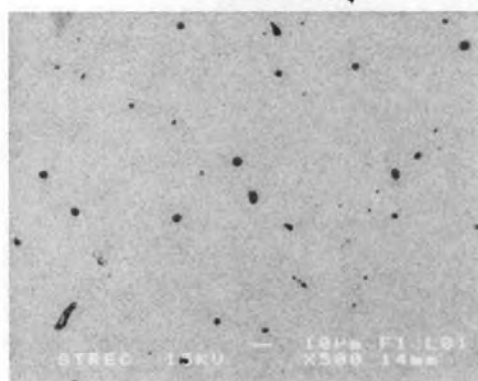


4.2 (ข)

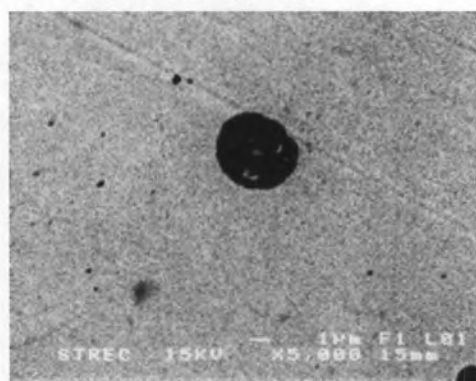


4.2 (ข)

โลหะผสมชุดที่ 4 : 3.97%Zn -2.10%Cu-balance of Ag



4.2 (ค)

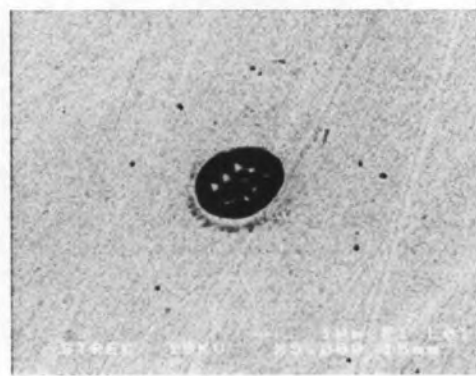


4.2 (ง)

โลหะผสมชุดที่ 5 : 0.02%Si-1.93%Zn -3.97%Cu-balance of Ag



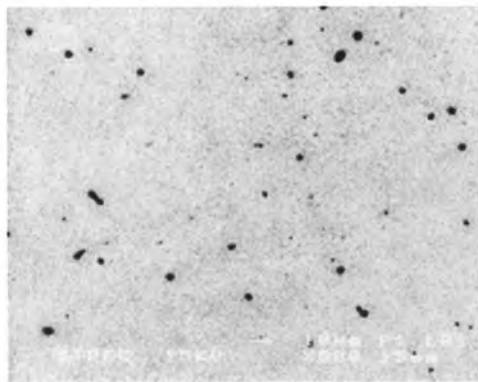
4.2 (จ)



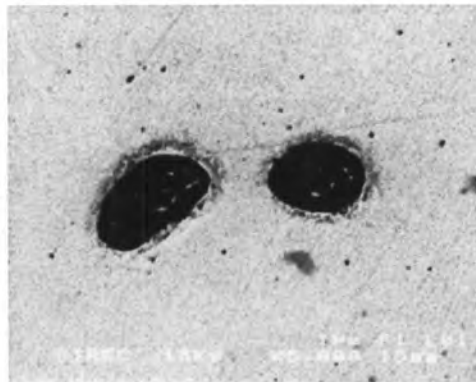
4.2 (ฉ)

โลหะผสมชุดที่ 6 : 0.02%Si-2.93%Zn -3.13%Cu-balance of Ag

รูปที่ 4.2(ต่อ) ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 940-ทองแดง-สังกะสี -
ซิลิคอน สภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด(SEM)

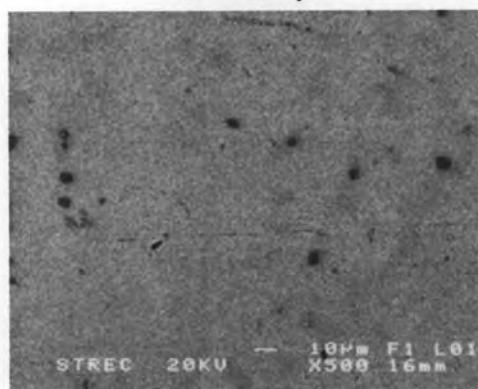


4.1 (จ)

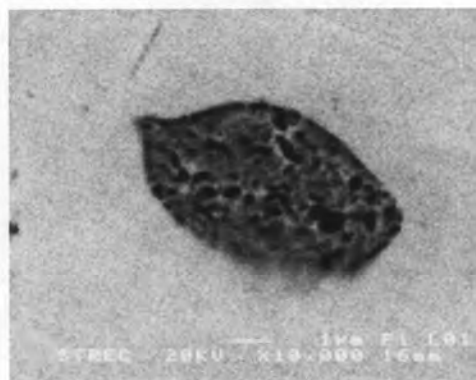


4.1 (ข)

โลหะผสมชุดที่ 7 : 0.02%Si-4.11%Zn -2.01%Cu-balance of Ag

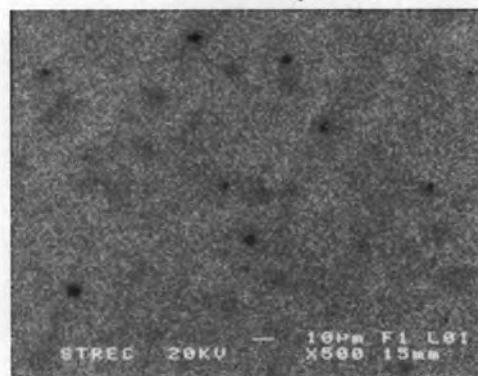


4.2 (ค)

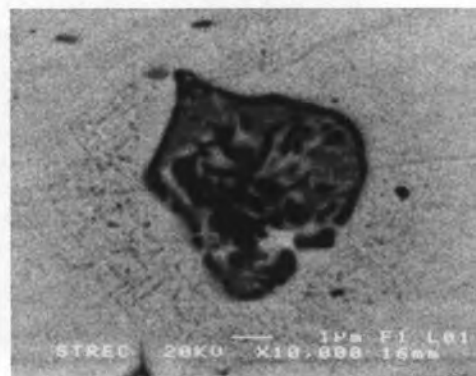


4.2 (ง)

โลหะผสมชุดที่ 8 : 0.04%Si-1.66%Zn -3.77%Cu-balance of Ag



4.2 (ด)



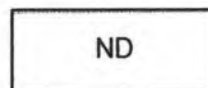
4.2 (ต)

โลหะผสมชุดที่ 9 : 0.065%Si-2.65%Zn -2.93%Cu-balance of Ag

รูปที่ 4.2(ต่อ) ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 940-ทองแดง -สังกะสี -
ซิลิคอน สภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด(SEM)

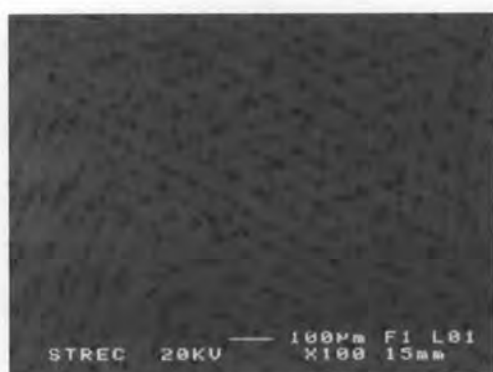


4.2 (ก)

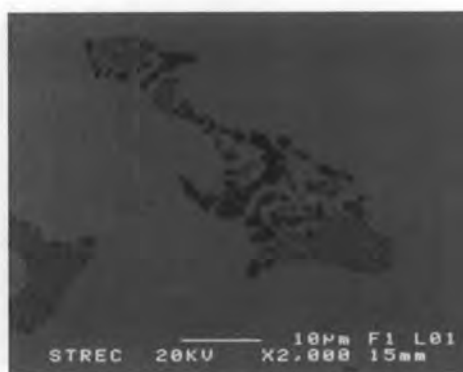


4.2 (ข)

โลหะผสมชุดที่ 10 : 0.036%Si-3.23%Zn -2.30%Cu-balance of Ag



4.2 (ค)



4.2 (ง)

โลหะผสมชุดที่ 11 : 7.65%Cu – balance of Ag[15]

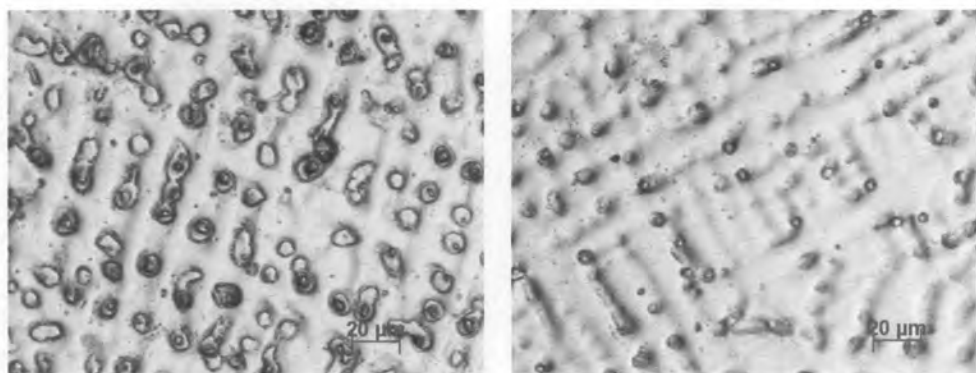
หมายเหตุ: โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน-แมงกานีส ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด(SEM) [15]

รูปที่ 4.2(ต่อ) ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 940-ทองแดง -สังกะสี -ซิลิคอน สภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด(SEM)

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินเกรด 940 ทั้ง 10 ชุด ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) ดังรูปที่ 4.3 เห็นเป็นโครงสร้างแบบเดนไดรต์ (Dendrite structure) ลักษณะคล้ายกิ่งไม้ซึ่งเป็นบริเวณที่มีเงินเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่ค่อนข้างสูง (Ag-rich solid solution) และระหว่างกิ่งเดนไดรต์ (Dendrite arm) เป็นบริเวณที่มีทองแดงละลายอยู่ในสัดส่วนที่สูง (Cu-rich solid solution) เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) Mode backscatter electron ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จะเห็น 2 บริเวณที่มีสีแตกต่างกัน คือ บริเวณที่เป็นสีขาวจะเป็นโครงสร้างเนื้อพื้น (Matrix) และบริเวณที่เห็นเป็นสีดำหรือดำเข้มจะ

เป็นโครงสร้างยูเทคติก (Eutectic structure) ซึ่งมีลักษณะรูปร่างแตกต่างกันจะขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุที่เติมลงไปโลหะผสมเงินเกรด 940 ที่ทำการทดลอง เมื่อพิจารณาโลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 1-4 (กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน) ดังรูปที่ 4.2(ก)-(ข) พบว่า ปริมาณและการกระจายตัวของโครงสร้างยูเทคติกลดลงตามปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้น(ปริมาณทองแดงที่ลดลง) จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนในโลหะผสมชุดที่ 1(1.18%Zn-4.95%Cu-balance of Ag) เทียบกับโลหะผสมชุดที่ 4 (3.97%Zn-2.10%Cu-balance of Ag) ส่วนในโลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 5-7 (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคองที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ดังรูปที่ 4.2(ฉ)-(ซ) พบว่า จะเกิดโครงสร้างยูเทคติกมีสีดำเข้ม แต่ปริมาณและการกระจายตัวของโครงสร้างยูเทคติกที่เกิดขึ้น จะลดลงตามปริมาณของสังกะสีที่เพิ่มขึ้นและทองแดงที่ลดลง เช่นเดียวกับโลหะผสมเงินกลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน นั้น แสดงว่า การเติมซิลิคอนในปริมาณ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่ได้ส่งเสริมปริมาณและการกระจายตัวของโครงสร้างยูเทคติกที่เกิดขึ้น หากพิจารณาโลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 8-10 (กลุ่มที่มีเติมซิลิคอนตั้งแต่ 0.036 - 0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ดังรูปที่ 4.2(ฅ)-(ถ) พบว่า โครงสร้างยูเทคติกที่เกิดขึ้นมีรูปร่างแตกต่างจากโครงสร้างยูเทคติกทั้ง 2 กลุ่ม ที่กล่าวมาข้างต้น ลักษณะที่เห็นจะเป็นเหลี่ยมหรือมีมุมแหลมอย่างชัดเจน จากผลการตรวจสอบส่วนผสมด้วย EDX ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า โครงสร้างยูเทคติกที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมหรือมีมุมแหลมจะมีปริมาณซิลิคอนละลายอยู่มากกว่าโครงสร้างยูเทคติกที่มีลักษณะกลม ทั้งสังกะสีและซิลิคอนละลายอยู่ในโครงสร้างยูเทคติกมากกว่าโครงสร้างเนื้อพื้น จากข้างต้นที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้น(ปริมาณทองแดงที่ลดลง) มีแนวโน้มทำให้ปริมาณและการกระจายตัวของโครงสร้างยูเทคติกลดลง ขณะเดียวกันสังกะสียังส่งผลให้โครงสร้างยูเทคติกมีรูปร่างค่อนข้างกลมเทียบกับโลหะผสมเงิน : 7.65%Cu-balance of Ag ดังแสดงในรูปที่ 4.2(ธ)-(น) เมื่อมีการเติมปริมาณซิลิคอนคองที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มทำให้โครงสร้างยูเทคติกสั้นลงและมีแนวโน้มเป็นเหลี่ยมหรือมีมุมแหลมแต่ไม่เด่นชัดมากนัก ในทำนองเดียวกันถ้าเพิ่มปริมาณซิลิคอนตั้งแต่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะทำให้โครงสร้างยูเทคติกมีแนวโน้มเป็นเหลี่ยมหรือมีมุมแหลมที่ชัดเจนมากขึ้น





4.3 (ก)

4.3 (ข)

ก) โลหะผสมชุดที่ 1 : 1.18%Zn -4.95%Cu-balance of Ag

ข) โลหะผสมชุดที่ 4 : 3.97%Zn -2.10%Cu-balance of Ag

รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 940 - ทองแดง - สังกะสี - ซีลีคอน ในสภาพหล่อ หลังกัดกรด ($50\%NH_4OH+25\%H_2O_2+25\%H_2O$) ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 200 เท่า

4.4 ผลจากการทดสอบสมบัติทางกล สภาพหล่อ (As - cast)

4.4.1 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

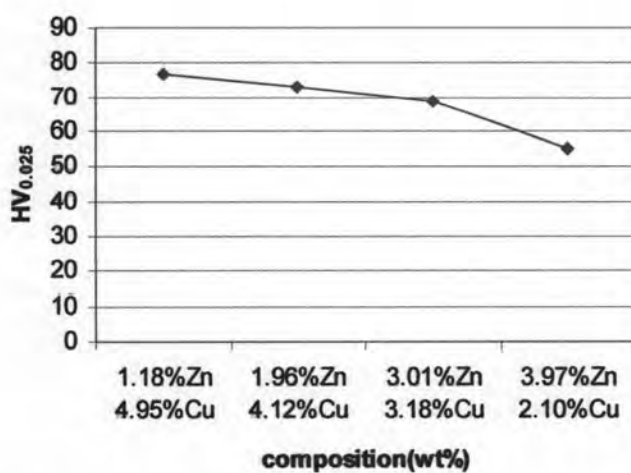
เมื่อวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ตามมาตรฐาน ASTM E 92-82 ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ระบบดิจิทัล รุ่น MVK-H1/H2/H3 กดด้วยน้ำหนัก 25 กรัม เป็นเวลา 10 วินาที วัดความยาวเส้นทแยงมุมทั้งสองด้าน (d_1 และ d_2) แล้วคำนวณค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ ($HV_{0.025}$) โลหะผสมแต่ละชุดกดวัดความแข็ง 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย และนำค่าความแข็งเฉลี่ยเปรียบเทียบกับปริมาณส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงินเกรด 940 แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 และภาคผนวก ค

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยแบบวิกเกอร์ ($HV_{0.025}$) สภาพหล่อ เปรียบเทียบกับปริมาณ ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงิน 940-ทองแดง-สังกะสี-ซิลิคอน (ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 5.5 มิลลิเมตร)

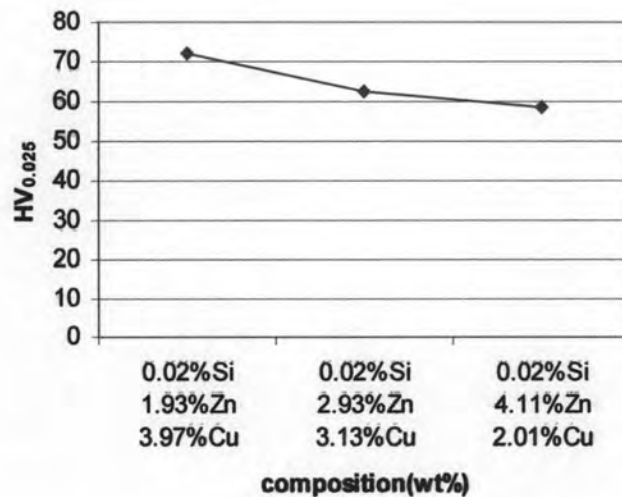
โลหะผสมชุด ที่	ส่วนผสมทางเคมี (%wt) โดย balance of Ag	ค่าความแข็งเฉลี่ย* (HV)
1	1.18%Zn-4.95%Cu	76.9
2	1.96%Zn-4.12%Cu	72.9
3	3.01%Zn-3.18%Cu	68.9
4	3.97%Zn-2.10%Cu	55.3
5	0.02%Si-1.93%Zn-3.97%Cu	72.1
6	0.02%Si-2.93%Zn-3.13%Cu	62.5
7	0.02%Si-4.11%Zn-2.01%Cu	58.3
8	0.04%Si-1.66%Zn-3.77%Cu	70.5
9	0.065%Si-2.65%Zn-2.93%Cu	59.9
10	0.036%Si-3.23%Zn-2.30%Cu	58.6
11**	7.65%Cu	66.8

หมายเหตุ: * เป็นค่าเฉลี่ยของชิ้นงานทั้งหมดแสดงไว้ในภาคผนวก (ตาราง ค-1)

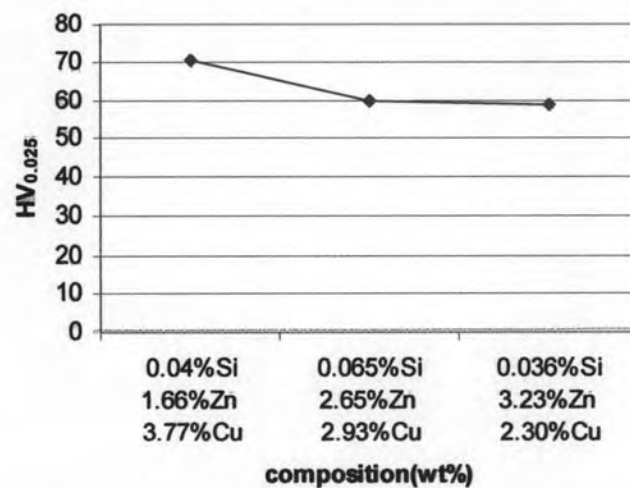
** เป็นค่าความแข็งเฉลี่ยของโลหะเงินสเตอร์ลิงหล่อแบบสูญญากาศ ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ระบบดิจิทัล โดยกดด้วยน้ำหนัก 1 กิโลกรัม เป็นเวลา 10 วินาที [15]



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสังกะสีและทองแดงกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์(กลุ่มที่ไม่มีสารเติมซิลิคอน)



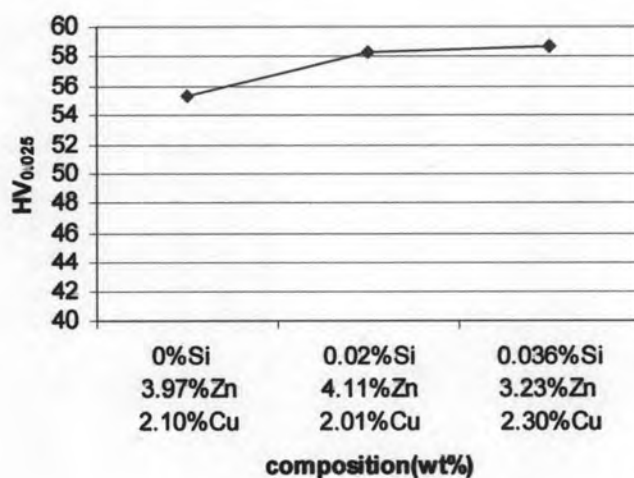
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิลิคอน สังกะสีและทองแดงกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์(กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคงที่ที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิลิคอน สังกะสีและทองแดงกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์(กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนตั้งแต่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

โลหะผสมเงินเกรด 940 ทั้ง 10 ชุด มีค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ ดังตารางที่ 4.4 และนำค่าที่ได้ไปวาดกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมกับค่าความแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 4.4-4.6 เมื่อพิจารณาจากกลุ่มของโลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 1-4 (กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน) มีค่าตั้งแต่ 55.3-76.9 HV_{0.025} โลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 5-7 (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคงที่ที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) มีค่าตั้งแต่ 58.3-72.1 HV_{0.025} และโลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 8-10

(กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนตั้งแต่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) มีค่าตั้งแต่ 58.6-70.5 $HV_{0.025}$ จะเห็นได้ว่าโลหะผสมทั้ง 3 กลุ่ม มีแนวโน้มของค่าความแข็งลดลงตามปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้น(ปริมาณทองแดงที่ลดลง) สาเหตุน่าจะเกิดจากปริมาณและการกระจายตัวของโครงสร้างยูเทคติกลดลงตามปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้น(ปริมาณทองแดงที่ลดลง) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.3 และสังกะสีบางส่วนเข้าไปละลายอยู่ในเนื้อพื้นในลักษณะสารละลายของแข็งแบบแทนที่ (Substitutional Solid Solution) ซึ่งขนาดอะตอมของสังกะสีและเงินไม่แตกต่างกันมากนักประมาณ 5.11 เปอร์เซ็นต์(โดยขนาดรัศมีของสังกะสีและเงินเท่ากับ 0.137 และ 0.144 นาโนเมตรตามลำดับ) จึงไม่ทำให้โครงสร้างผลึกเกิดการบิดเบี้ยวหรือเสียรูป(Distortion of the lattice) ส่วนรูปที่ 4.7 แสดงถึงค่าความแข็งของโลหะผสมเงินเกรด 940 ที่มีปริมาณซิลิคอนแตกต่างกัน โดยพิจารณาที่ส่วนผสมทางเคมีของปริมาณเงิน-ทองแดง-สังกะสี ใกล้เคียงกัน เพื่อศึกษาอิทธิพลของซิลิคอนต่อโลหะผสม พบว่า ปริมาณซิลิคอนทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณไม่เกิน 6 % นั้นแสดงว่า ค่าความแข็งขึ้นอยู่กับปริมาณของทองแดง ซึ่งธาตุผสมทองแดงส่งเสริมปริมาณและความหนาแน่นของโครงสร้างยูเทคติกที่เกิดขึ้น กล่าวคือ โครงสร้างยูเทคติกจะเป็นส่วนที่ช่วยในการเพิ่มความแข็งให้กับโลหะผสมเงินเกรด 940



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิลิคอนกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์

4.4.2 ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

ทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E 8M – 96 โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงระบบอัตโนมัติขนาด 50 kN ด้วยความเร็วแรงดึง 1 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength; UTS) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (percent elongation; %EI) แสดงดังตารางที่ 4.5 เมื่อนำมาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ต่าง ๆ จะได้กราฟดังรูปที่ 4.8-4.10

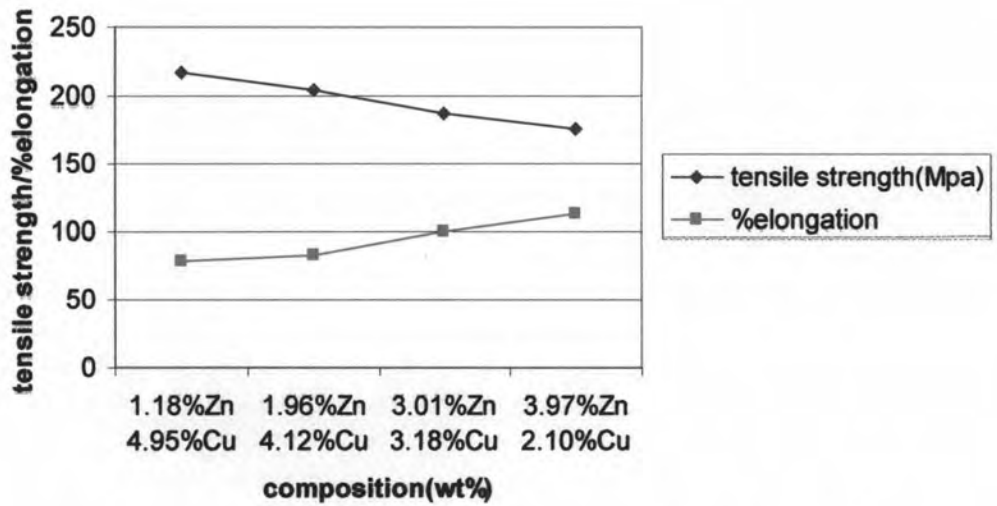
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแรงดึงโลหะผสมเงิน 940-ทองแดง-สังกะสี-ซิลิคอน (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 มิลลิเมตร) สภาพหล่อ

โลหะผสม ชุดที่	ส่วนผสมทางเคมี (wt.%) โดย balance of Ag	ความต้านทานแรง ดึงสูงสุด*(MPa)	เปอร์เซ็นต์ การยืดตัว* (%EI)
1	1.18%Zn -4.95%Cu	217.8	78.7
2	1.96%Zn -4.12%Cu	204.1	82.5
3	3.01%Zn -3.18%Cu	187.3	99.6
4	3.97%Zn -2.10%Cu	175.4	112.3
5	0.02%Si-1.93%Zn -3.97%Cu	201.3	60.7
6	0.02%Si-2.93%Zn -3.13%Cu	184.1	61.4
7	0.02%Si-4.11%Zn -2.01%Cu	175.7	67.7
8	0.04%Si-1.66%Zn -3.77%Cu	195.1	67.5
9	0.065%Si-2.65%Zn -2.93%Cu	166.8	70.7
10	0.036%Si-3.23%Zn -2.30%Cu	161.9	115.1

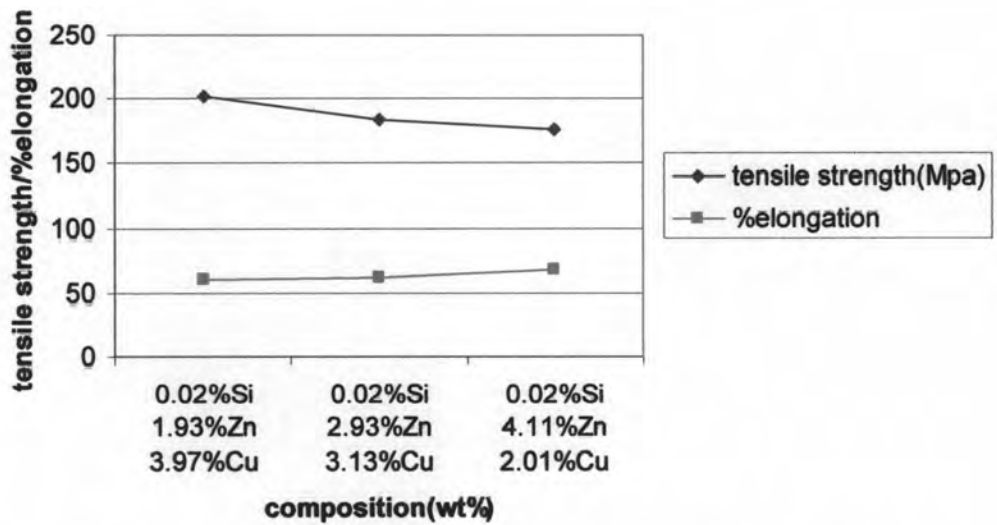
หมายเหตุ: * เป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength; UTS) และอัตราการยืดตัว (percent elongation; %EI) ของชิ้นงานทั้งหมด แสดงไว้ในภาคผนวก ง (ตาราง ง-3)

จากผลการทดสอบแรงดึงของโลหะผสมเงินเกรด 940 ทั้ง 10 ชุด ดังแสดงในตารางที่ 4.5 เมื่อพิจารณาที่โลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 1-4(กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีค่าตั้งแต่ 175.4-217.8 MPa และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าตั้งแต่ 78.7-112.3 เปอร์เซ็นต์ โลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 5-7(กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคงที่ที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีค่าตั้งแต่ 175.7-201.3 MPa และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าตั้งแต่ 60.7-67.7 เปอร์เซ็นต์ และโลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 8-10

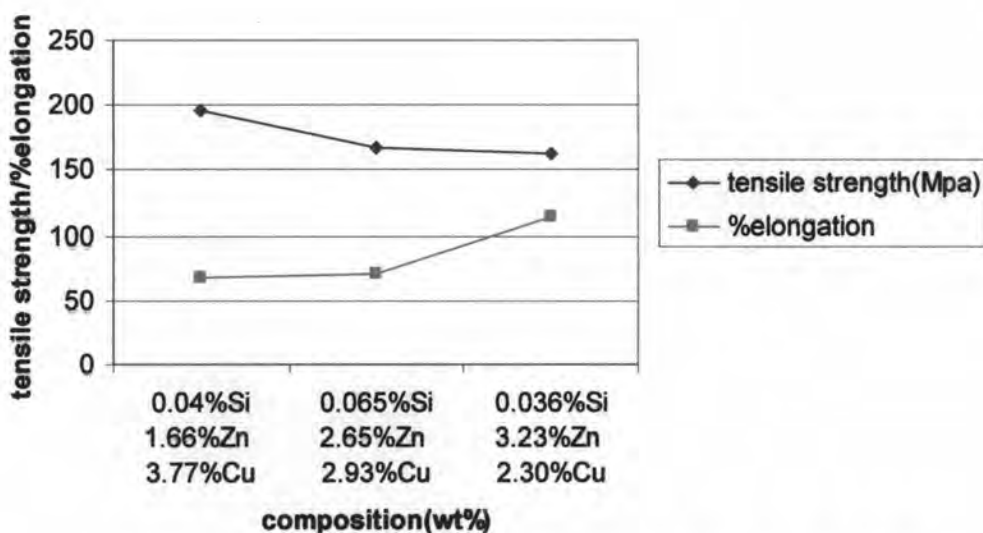
(กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนตั้งแต่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ค่าความต้านทานแรงสูงสุดมีค่าตั้งแต่ 161.9-195.1 MPa และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าตั้งแต่ 67.5-115.1 เปอร์เซ็นต์ จากค่าที่ได้กล่าวมาแล้วว่าจะเห็นได้ว่า โลหะผสมทั้ง 3 กลุ่ม มีแนวโน้มของสมบัติเชิงกลไปทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 - 4.10 โดยค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ในทางกลับกันค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้น(ปริมาณทองแดงที่ลดลง) เหตุผลเช่นเดียวกับที่ได้อธิบายแล้วในค่าความแข็ง ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองมีค่าสอดคล้องกับผลของเอกสารอ้างอิงหมายเลข 13 กล่าวคือ ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของโลหะเงินสเตอร์ลิงเมื่อเติมสังกะสี 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีค่าอยู่ประมาณ 190 MPa แต่ในการทดลองมีการเติมสังกะสี 3.97 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีค่าอยู่ประมาณ 175.4 MPa ถือว่าเป็นค่าที่ใกล้เคียงและยอมรับได้ เมื่อทำการเปรียบเทียบโลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 4 (3.97%Zn -2.10%Cu-balance of Ag)และโลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 10 (0.036%Si-3.23%Zn-2.30%Cu-balance of Ag) ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเท่ากับ 112.3 และ 115.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า มีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากอัลลอยที่เติมมีสังกะสีเป็นธาตุผสมหลัก ซึ่งขนาดอะตอมของสังกะสีมีค่าใกล้เคียงกันกับธาตุเงินจึงไม่ทำให้โครงสร้างผลึกบิดเบี้ยวหรือเสียรูป และสังกะสีสามารถละลายได้ดีในเงินโดยไม่ทำให้เกิดการแยกตัวของธาตุผสม(Segregation) หรือเกิดเฟสใหม่(new phase)ตามขอบเกรนเกรน จึงส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวดีขึ้นเมื่อเทียบกับอัลลอยกลุ่มที่มีทองแดงเป็นธาตุผสมหลัก จากความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแบบวิกเกอร์กับปริมาณธาตุผสมต่างๆ ดังเอกสารอ้างอิงหมายเลข 13



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลกับปริมาณสังกะสีและทองแดงของโลหะผสมเงินเกรด 940 (กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน) สภาพหล่อ



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลกับปริมาณซิลิคอน สังกะสีและทองแดงของโลหะผสมเงินเกรด 940 (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคงที่ที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) สภาพหล่อ



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลกับปริมาณซิลิคอน สังกะสีและทองแดงของโลหะผสมเงินเกรด 940 (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนตั้งแต่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) สภาพหล่อ

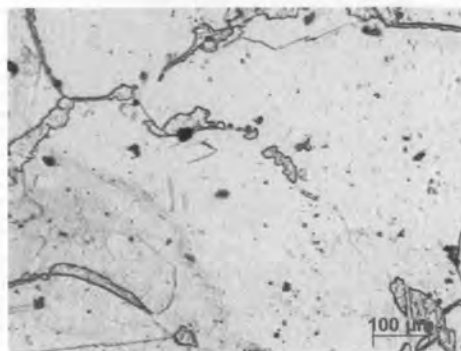
4.5 ผลการอบไฮโมจิโนเซชัน

4.5.1 ผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาค หลังการอบไฮโมจิโนเซชัน

งานวิจัยนี้ใช้อุณหภูมิการอบไฮโมจิโนเซชันที่ 750 องศาเซลเซียส นาน 30 และ 60 นาที เมื่อตรวจสอบดูโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังกัดกรดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของโลหะผสมเงินเกรด 940 ทั้ง 10 ชุด พบว่า โครงสร้างเดนไดรท์ที่พบในชิ้นงานสภาพหล่อจะถูกขจัดหมดไป แต่จะเห็นโครงสร้างของโลหะเกิดการก่อตัวเป็นเกรนขึ้นแทนและขยายใหญ่ (Coarse grain) ขึ้นแปรผันตามเวลาที่อบ เกิดชั้นหรือแถบสีดำ (layer) ที่ผิว เกิดเฟสใหม่ตามขอบเกรน จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนในกลุ่มอัลลอยที่มีทองแดงเป็นธาตุผสมหลัก (Major alloying elements) ส่วนในกลุ่มอัลลอยที่มีสังกะสีเป็นธาตุผสมหลักจะไม่สังเกตเห็น แต่ถ้ามีการเติมซิลิคอนทั้งในกลุ่มอัลลอยที่มีทองแดงหรือกลุ่มอัลลอยที่มีสังกะสีเป็นธาตุผสมหลัก ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และภาคผนวก ก (ก-1) พบว่า ปริมาณของเฟสใหม่ที่เกิดขึ้นตามขอบเกรนจะน้อยลงดังแสดงให้เห็นในโลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 5-7 (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคั้งที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และโลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 8-10 (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคั้งที่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) เทียบกับโลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 1-4 (กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน) เหตุผลน่าจะมาจากทองแดงรวมตัวกับซิลิคอนได้ดี ซึ่งซิลิคอนนี้เองที่เป็นตัวดึงทองแดงไว้ไม่ให้ไปอยู่ตามขอบเกรน (พิจารณาจาก Phase diagram ที่แสดงไว้ในบทที่ 2 และค่าอัตราการแพร่ (Diffusivity))

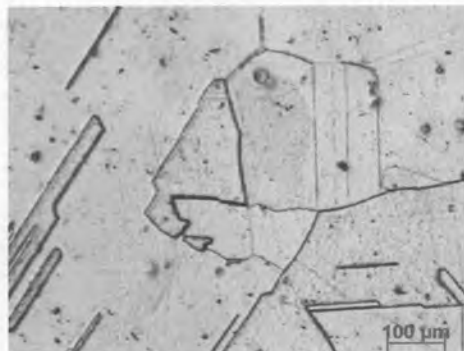
เมื่อตรวจสอบดูโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนกัดกรดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด(SEM) Mode backscatter electron ที่กำลังขยาย 5000 เท่า จะสังเกตเห็นอนุภาคขนาดเล็กกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และภาคผนวก ก-2 ทั้งในชิ้นงานที่ผ่านการอบไฮโดรเจนในเซชัน 750 องศาเซลเซียส นาน 30 และ 60 นาที อนุภาคขนาดเล็กน่าจะเป็นโครงสร้างยูเทคติกที่สลายตัวยังไม่หมดและ/หรืออะตอมที่เป็น substitutional solid solution เช่น ทองแดง สังกะสี และซิลิคอน และ/หรืออะตอมเงิน(Parent crystals) เกิดการแพร่มารวมตัวกัน เกิดเป็นอนุภาคขนาดเล็ก โดยชิ้นงานที่ผ่านการอบไฮโดรเจนในเซชันนาน 30 นาที อนุภาคขนาดเล็กที่สังเกตเห็นจะมีขนาดประมาณ 0.1-0.5 ไมครอน ขนาดเฉลี่ยประมาณ 0.3 ไมครอน ซึ่งกระจายตัวหนาแน่นกว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบไฮโดรเจนในเซชันนาน 60 นาที อนุภาคขนาดเล็กที่สังเกตเห็นจะมีขนาดประมาณ 0.1-0.7 ไมครอน ขนาดเฉลี่ยประมาณ 0.5 ไมครอน (ไม่สามารถวิเคราะห์สัดส่วนที่บริเวณนี้ได้ เพราะอนุภาคมีขนาดเล็กมาก จึงทำการวิเคราะห์สัดส่วนด้วย EDX บริเวณเนื้อพื้นและพื้นที่โดยรวมของอนุภาคแทน ดังแสดงในภาคผนวก ข ตาราง ข-2 และ ข-3)

อบ 750 °C 30 นาที



18%Zn-4.95%Cu-balance of Ag

อบ 750 °C 60 นาที



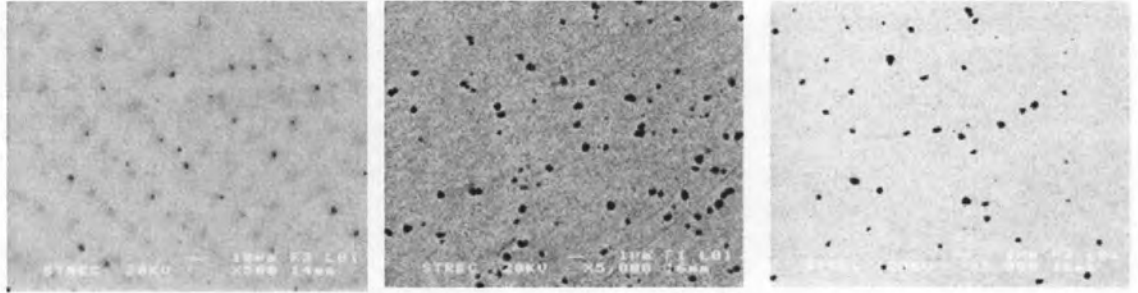
3.97%Zn-2.10%Cu-balance of Ag

รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 940 -ทองแดง-สังกะสี-ซิลิคอน ในสภาพผ่านการอบไฮโดรเจนในเซชันที่ 750 องศาเซลเซียส ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 50 เท่า หลังกัดกรด($50\%NH_4OH+25\%H_2O_2+25\%H_2O$)

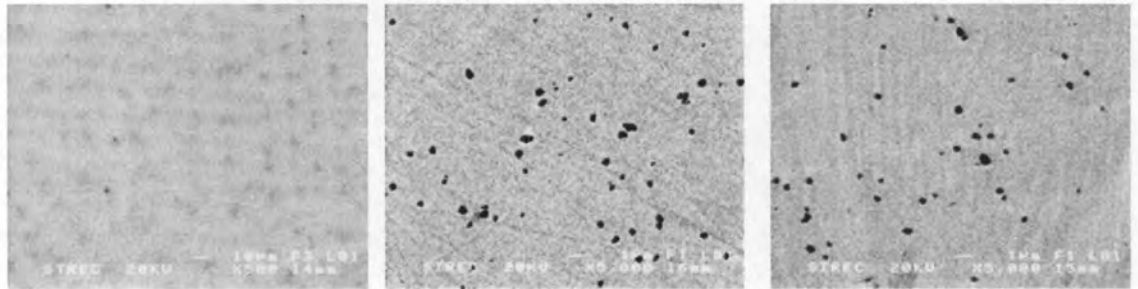
หลังหลอม

อบ 750 °C 30 นาที

อบ 750 °C 60 นาที



โลหะผสมชุดที่ 3 : 3.01%Zn -3.18%Cu-balance of Ag

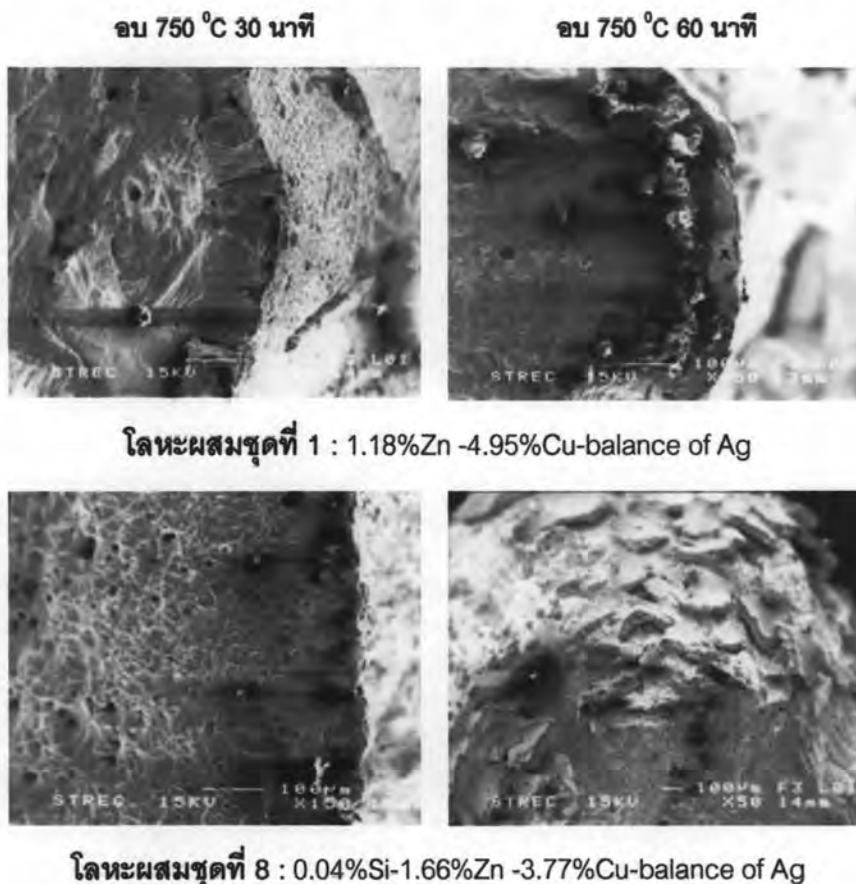


โลหะผสมชุดที่ 4 : 3.97%Zn -2.10%Cu-balance of Ag

รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 940-ทองแดง-สังกะสี-ซิลิคอน ในสภาพ

ผ่านการอบไฮโมจิโนเซชันที่ 750 องศาเซลเซียส นาน 30 และ 60 นาที

ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด กำลังขยาย 5000 เท่า



รูปที่ 4.13 ภาพแสดงรอยแตกและผิวของโลหะผสมเงินเกรด 940 ก่อตั้งจุลทรรศน์แบบส่องกวาด

จากรูปที่ 4.13 เมื่อตรวจสอบผิวชิ้นงานที่ผ่านการอบไฮโมจิในเซชันด้วย SEM พบว่าผิวของชิ้นงานจะมีชั้นหรือแถบเกิดขึ้น ขณะเดียวกันผิวจะหยาบเมื่อเวลาอบนานขึ้น ทำให้ไม่เหมาะสมในการลดขนาดและนำไปผลิตเป็นเส้นลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.68 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการทอสร้อยด้วยเครื่องจักรหรืองานขึ้นมือ จากนั้นทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีโดย EDX ดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่า ตรงบริเวณชั้นหรือแถบสีดำจะประกอบด้วยทองแดงเป็นองค์ประกอบหลัก สังกะสี และซิลิคอน ตามลำดับ โดยพิจารณาที่ธาตุผสมเติมลงไปโลหะผสมเงินเกรด 940 เหตุผลที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากค่าอัตราการแพร่(Diffusivity) ของทองแดงมีค่าสูงสุดตามด้วยสังกะสีและซิลิคอน เมื่อพิจารณาที่ Ellingham Diagram จะพบว่าซึ่งธาตุทั้ง 3 ตัวนี้มีโอกาสเกิดเป็นออกไซด์ได้ เนื่องจากมีความสามารถดึงออกซิเจนได้ดี(Affinity to oxygen) กว่าธาตุเงิน

ตารางที่ 4.6 ปริมาณธาตุผสมในชั้นสารประกอบหลังการอบไฮโมจิในเซชันที่ 750 องศาเซลเซียส นาน 30 และ 60 นาที ของโลหะผสมเงิน 940-ทองแดง-สังกะสี-ซิลิคอน ตรวจจสอบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด(SEM)

โลหะผสมชุดที่	การอบไฮโมจิในเซชันที่ 750 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที	การอบไฮโมจิในเซชันที่ 750 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที
1) matrix (Ag:Cu:Zn)	94.61 : 4.27 : 1.12	94.39 : 2.90 : 2.71
1) layer (Ag:Cu:Zn)	65.35 : 25.90 : 8.75	93.67 : 5.61 : 0.72
8) matrix (Ag:Cu:Zn:Si)	ND	95.16 : 3.12 : 1.68 : 0.05
8) layer (Ag:Cu:Zn:Si)	ND	95.36 : 3.14 : 1.13 : 0.37

4.5.2 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ หลังการอบไฮโมจิในเซชัน

โลหะผสมเงินเกรด 940 ทั้ง 10 ชุด หลังการอบไฮโมจิในเซชันที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส นาน 30 และ 60 นาที แล้วทำการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์(HV_{0.025}) ของชิ้นงาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 มิลลิเมตร ค่าที่ได้แสดงในตารางที่ 4.7 จากนั้นนำไปวาดกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุผสมกับค่าความแข็ง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.14-4.16 เมื่อพิจารณารูปที่ 4.14 จะเห็นว่า ค่าความแข็งสภาพหล่อ ชิ้นงานผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่ 750 องศาเซลเซียส นาน 30 และ 60 นาที มีค่าเท่ากับ 55.3-76.9 HV_{0.025} , 68.4-106.2 HV_{0.025} และ 57.7-93.1 HV_{0.025} ตามลำดับ จากรูปที่ 4.15 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิลิคอน สังกะสีและทองแดงกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ มีการเปรียบเทียบเช่นเดียวกับรูปที่ 4.14 จะเห็นว่า ในโลหะผสมกลุ่มนี้มีการเติมซิลิคอนคงที่ที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าความแข็งเท่ากับ 58.3-72.1 HV_{0.025} , 65.7-86.4 HV_{0.025} และ 58.5-75.9 HV_{0.025} ตามลำดับ และรูปที่ 4.16 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิลิคอน สังกะสีและทองแดงกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ แต่มีการเติมซิลิคอนตั้งแต่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีการเปรียบเทียบเช่นเดียวกับสองกลุ่มแรก จะเห็นว่า มีค่าความแข็งเท่ากับ 58.6-70.5 HV_{0.025} , 64.5-83.1 HV_{0.025} และ 62.0-71.9 HV_{0.025} ตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่า ค่าความแข็งของโลหะผสมเงินเกรด 940 ทั้ง 10 ชุด หลังการอบไฮโมจิในเซชันมีแนวโน้มของค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นงานสภาพหล่อ โดยพิจารณาที่ชิ้นงานผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับสภาพหล่อ เหตุที่เป็นเช่นนี้สาเหตุน่าจะ

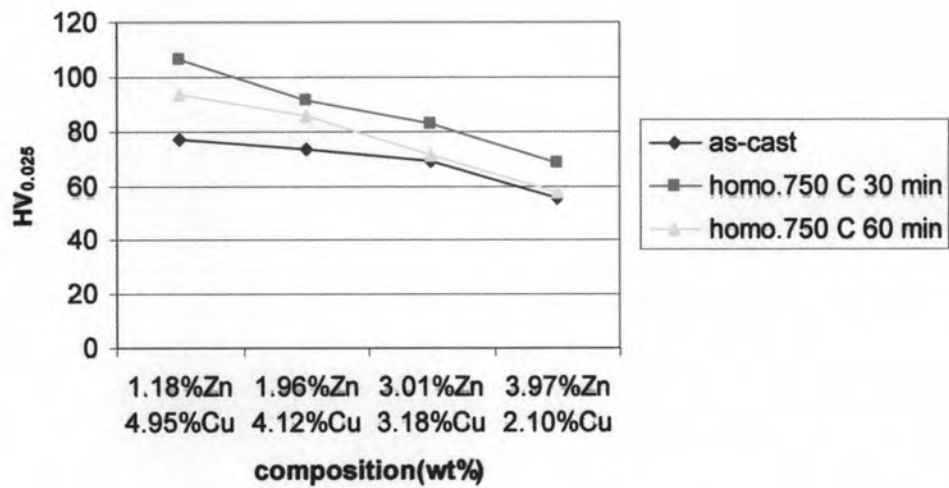
มาจากอนุภาคขนาดเล็ก ขนาดเฉลี่ย 0.3 ไมครอน ที่เกิดขึ้นกระจุกกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ จึงน่าจะส่งผลต่อค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่ชิ้นงานผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที จะเห็นว่าค่าความแข็งลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับชิ้นงานชิ้นงานผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที สาเหตุน่าจะเกิดจากอนุภาคขนาดเล็กบางส่วนเกิดการสลายตัวกลับเข้าไปละลายในเนื้อพื้น พิจารณาจากผล EDX ดังแสดงในภาคผนวก ข ตาราง ข-2 และ ข-3 เพราะยังเป็นเฟสที่ไม่เสถียร(Stable) และอนุภาคขนาดเล็กบางส่วนเกิดการขยายตัวต่อทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ขนาดเฉลี่ย 0.5 ไมครอน ขณะทำการกัดวัดความแข็งจึงกัดเจอบริเวณเนื้อพื้น ทำให้ค่าความแข็งที่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกับสภาพหล่อ

ตารางที่ 4.7 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์หลังจากการอบไฮโมจิในเซชันที่ 750 องศาเซลเซียส นาน 30 และ 60 นาที

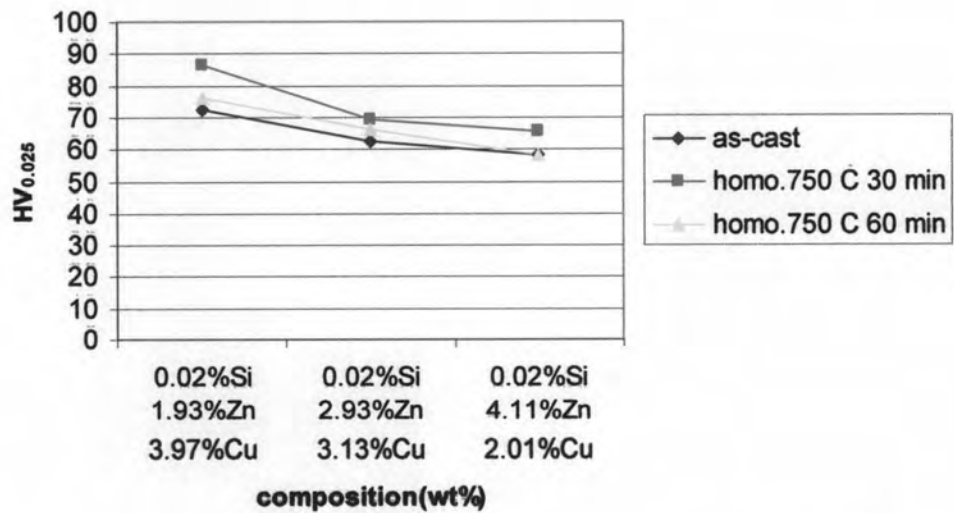
โลหะผสม ชุดที่	ส่วนผสมทางเคมี (%wt) โดย balance of Ag	ค่าความแข็งเฉลี่ย* (HV)		
		หลังหล่อ	อบ 30 นาที	อบ 60 นาที
1	1.18%Zn -4.95%Cu	76.97	106.2	93.17
2	1.96%Zn -4.12%Cu	72.97	91.10	85.53
3	3.01%Zn -3.18%Cu	68.95	82.67	70.87
4	3.97%Zn -2.10%Cu	55.33	68.40	57.77
5	0.02%Si-1.93%Zn -3.97%Cu	72.13	86.40	75.90
6	0.02%Si-2.93%Zn -3.13%Cu	62.50	69.03	66.23
7	0.02%Si-4.11%Zn -2.01%Cu	58.33	65.70	58.57
8	0.04%Si-1.66%Zn -3.77%Cu	70.50	83.13	71.90
9	0.065%Si-2.65%Zn -2.93%Cu	59.95	71.37	64.30
10	0.036%Si-3.23%Zn -2.30%Cu	58.67	64.50	62.07

หมายเหตุ : * เป็นค่าเฉลี่ย ของชิ้นงานทั้งหมด แสดงไว้ในภาคผนวก ค (ตาราง ค-1 – ค-3)

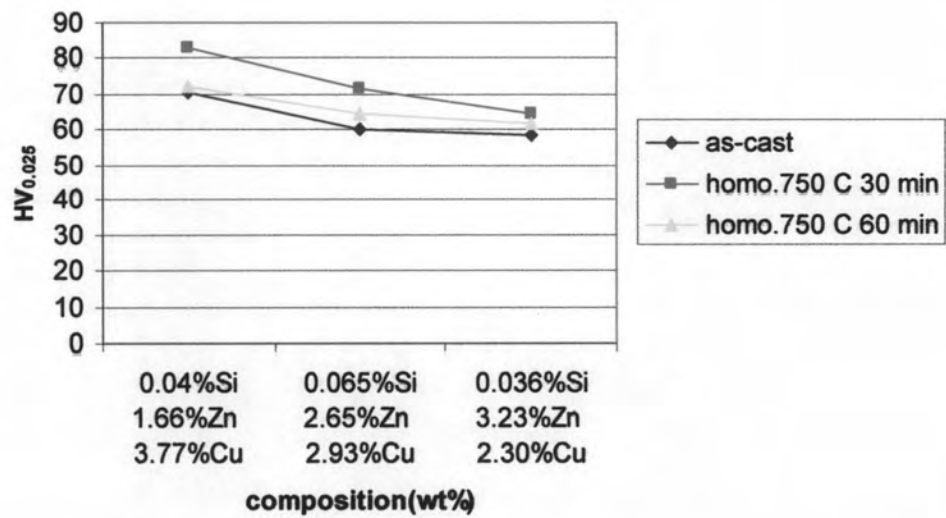
เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.7 มาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ต่าง ๆ จะได้กราฟดังรูปที่ 4.14-4.16



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสังกะสีและทองแดงกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน)



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิลิคอน สังกะสี และทองแดงกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคงที่ที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิลิคอน สังกะสี และทองแดง กับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนตั้งแต่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

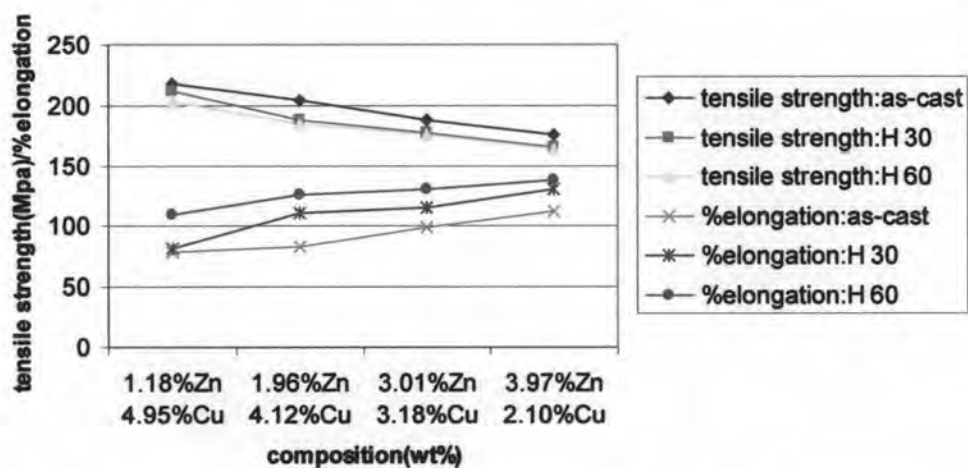
4.5.3 ผลการทดสอบแรงดึง หลังการอบไฮโมจิโนเซชัน

ผลจากการทดสอบแรงดึงแสดงดังตารางที่ 4.8 และนำข้อมูล มาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ต่าง ๆ จะได้กราฟดังรูปที่ 4.17-4.19

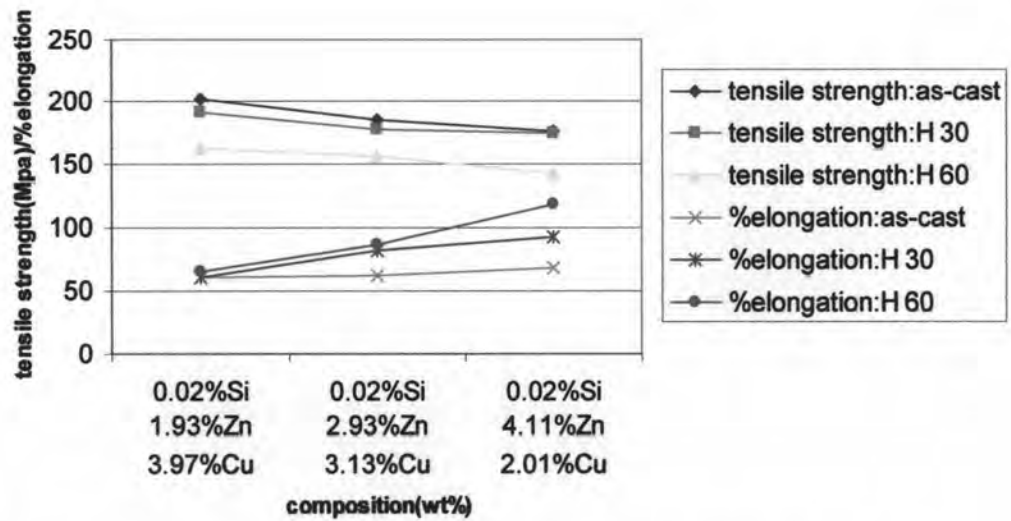
ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบแรงดึงโลหะผสมเงินเกรด 940 (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 มิลลิเมตร) ในสภาพผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่ 750 องศาเซลเซียส นาน 30 และ 60 นาที

โลหะผสม ชุดที่	ส่วนผสมทางเคมี (%wt) โดย balance of Ag	ความต้านทานแรงดึง สูงสุด*(MPa)		เปอร์เซ็นต์การยืดตัว* (%)	
		30 นาที	60 นาที	30 นาที	60 นาที
1	1.18%Zn -4.95%Cu	212.15	202.1	80.85	109.8
2	1.96%Zn -4.12%Cu	187.35	184.75	110.8	126.3
3	3.01%Zn -3.18%Cu	177.15	175.9	115.8	130.15
4	3.97%Zn -2.10%Cu	166.35	163.75	129.5	138.0
5	0.02%Si-1.93%Zn -3.97%Cu	191.10	162.8	61.05	65.2
6	0.02%Si-2.93%Zn -3.13%Cu	177.7	156.1	81.55	86.6
7	0.02%Si-4.11%Zn -2.01%Cu	175.0	142.0	92.75	117.6
8	0.04%Si-1.66%Zn -3.77%Cu	168.9	158.95	70.95	79.2
9	0.065%Si-2.65%Zn -2.93%Cu	158.35	146.85	77.5	80.25
10	0.036%Si-3.23%Zn -2.30%Cu	144.0	138.5	93.25	94.95

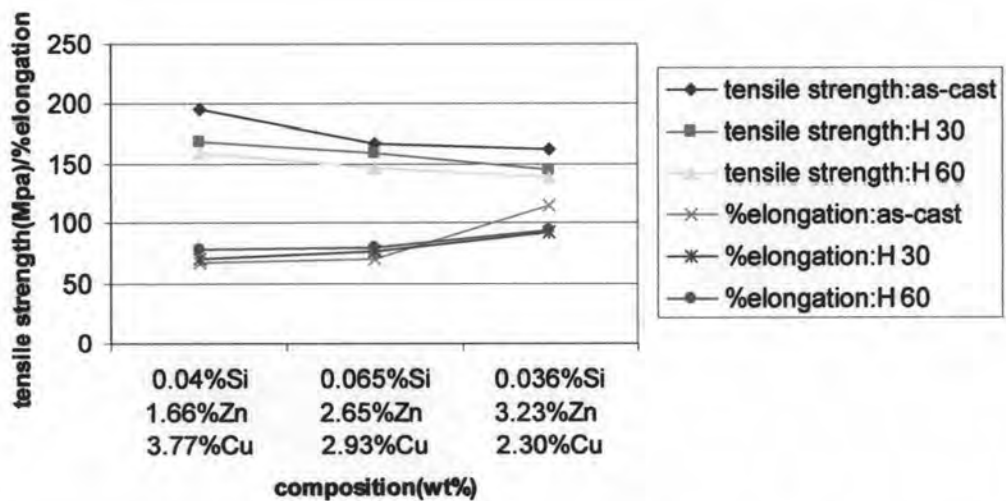
หมายเหตุ: * เป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength; UTS) และอัตราการยืดตัว (percent elongation; %El) ของชิ้นงานทั้งหมด แสดงไว้ในภาคผนวก ง (ตาราง ง-4 และ ง-5)



รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลกับปริมาณสังกะสีและทองแดงของโลหะผสมเงินเกรด 940 (กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน) สภาพหล่อเทียบกับการอบไฮโมจิในเซชัน



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลกับปริมาณซิลิคอน สังกะสีและทองแดงของโลหะผสมเงินเกรด 940 (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคงที่ที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) สภาพหล่อเทียบกับการอบไฮโมจิโนเซชัน



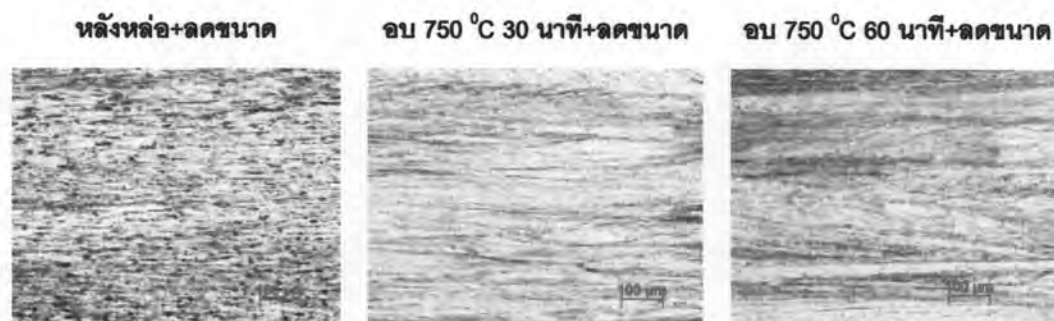
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลกับปริมาณซิลิคอน สังกะสีและทองแดงของโลหะผสมเงินเกรด 940 (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคงตั้งแต่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) สภาพหล่อเทียบกับการอบไฮโมจิโนเซชัน

จากผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานผ่านการอบไฮโมจิโนเซชันกับสภาพหล่อ พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดลดลงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณสังกะสีที่

เพิ่มขึ้น(ปริมาณทองแดงที่ลดลง) มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับชิ้นงานสภาพหล่อ เมื่อพิจารณาที่โลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 1-4(กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน) ดังรูปที่ 4.17 พบว่า ค่าความต้านทานแรงสูงสุดของชิ้นงานสภาพหล่อมีค่าสูงกว่าชิ้นงานผ่านการอบไฮโมจิในเซชันนาน 30 นาที และ 60 นาที ตามลำดับ สาเหตุน่าจะเกิดจากชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนจะเกิดขึ้นออกไซด์ที่ผิว ซึ่งความหนาของชั้นจะหนาขึ้นตามเวลาที่ใช้อบ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 แสดงรอยแตกและผิวของโลหะผสมเงินเกรด 940 ที่ผ่านกระบวนการอบชุบทางความร้อน ด้วยกลิ้งจลทรรศน์แบบส่องกวาด ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดลดลง แต่ในทางตรงกันข้ามค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเพิ่มขึ้น โดยชิ้นงานผ่านการอบไฮโมจิในเซชัน 60 นาที มีค่าสูงสุด ตามด้วย 30 นาที และชิ้นงานสภาพหล่อ ตามลำดับ สาเหตุน่าจะมาจากชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบชุบทางความร้อนที่อุณหภูมิสูงและเวลาเหมาะสม จะสลายโครงสร้างเดนไดรต์ ลด coring และมีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน จึงสามารถยืดตัวได้สูงกว่าชิ้นงานสภาพหล่อ และอีกสาเหตุที่ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดลดลงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเพิ่มขึ้น คือ ปริมาณและการกระจายตัวของโครงสร้างยูเทคติกที่ลดลงตามปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้น(ปริมาณทองแดงที่ลดลง) ดังที่ได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อที่ 4.5.1 ผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาค และหัวข้อที่ 4.5.2 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ หลังการอบไฮโมจิในเซชัน ส่วนโลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 5-7(กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคองที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ดังรูปที่ 4.18 และโลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 8-10 (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนตั้งแต่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ดังรูปที่ 4.19 พบว่า มีแนวโน้มเช่นเดียวกับโลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 1-4 (กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน)

4.6 ผลการลดขนาด

จากนั้นนำชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่ม คือ สภาพหล่อ ผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่ 750 องศาเซลเซียส นาน 30 และ 60 นาที ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 มิลลิเมตร แล้วนำมาลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหลือ 1.8 มิลลิเมตร(อัตราการลดขนาด 89 เปอร์เซ็นต์) เมื่อตรวจสอบดูโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังจากกัดกรด พบว่า โครงสร้างจุลภาคเหมือนกันคือ เห็นเป็นเกรนลักษณะเรียวยาวตามแนวดึง(Elongated grain) ดังรูปที่ 4.20 ซึ่งส่งผลต่อค่าสมบัติเชิงกลดังแสดงในตารางที่ 4.9 และ 4.10 พบว่า เมื่อชิ้นงานผ่านการลดขนาดหรือการแปรรูปเย็น(Cold working) พบว่า ค่าความแข็งและค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าสูงขึ้น แต่ขณะเดียวกันค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวลดต่ำลง



โลหะผสมชุดที่ 1 : 1.18%Zn -4.95%Cu-balance of Ag

รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 940-ทองแดง-สังกะสี-ซิลิคอน

ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 50 เท่า หลังกัดกรด

(50%NH₄OH+25%H₂O₂+25%H₂O)

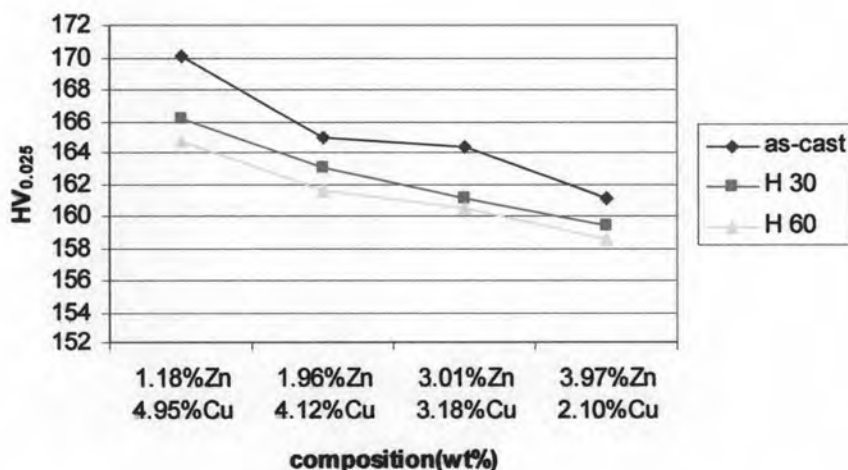
ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยแบบวิกเกอร์(HV_{0.025}) สภาพหล่อ เปรียบเทียบกับ ปริมาณ ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงิน 940-ทองแดง-สังกะสี-ซิลิคอน ขนาดเส้น ผ่าน ศูนย์กลาง 1.8 มิลลิเมตร (อัตราการลดขนาด 89 เปอร์เซ็นต์)

โลหะผสมชุดที่	ส่วนผสมทางเคมี (%wt) โดย balance of Ag	ค่าความแข็งเฉลี่ย* (HV)		
		As-cast	H30	H60
1	1.18%Zn -4.95%Cu	170.0	166.2	164.7
2	1.96%Zn -4.12%Cu	165.0	163.0	161.6
3	3.01%Zn -3.18%Cu	164.4	161.1	160.5
4	3.97%Zn -2.10%Cu	161.1	159.4	158.5
5	0.02%Si-1.93%Zn -3.97%Cu	176.5	168.7	163.5
6	0.02%Si-2.93%Zn -3.13%Cu	168.2	160.9	156.8
7	0.02%Si-4.11%Zn -2.01%Cu	161.4	157.2	152.8
8	0.04%Si-1.66%Zn -3.77%Cu	169.4	155.8	154.9
9	0.065%Si-2.65%Zn -2.93%Cu	157.1	152.3	147.3
10	0.036%Si-3.23%Zn -2.30%Cu	154.6	151.8	143.6

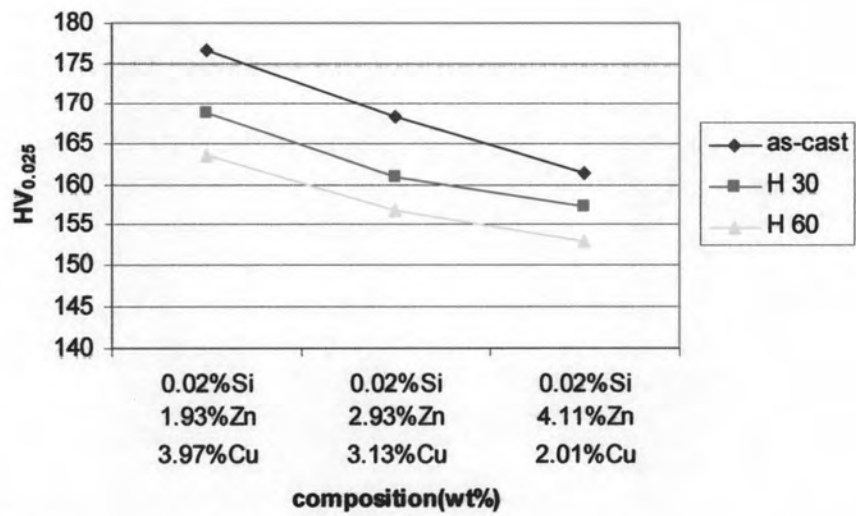
หมายเหตุ : H30=ผ่านการอบไฮโดรเจนในเซิร์นที่ 750 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที

H60=ผ่านการอบไฮโดรเจนในเซิร์นที่ 750 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที

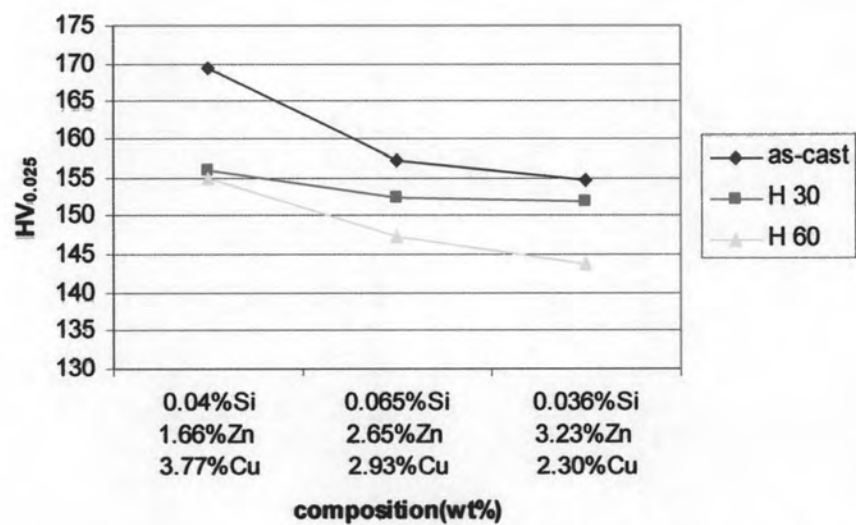
นำค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ในตารางที่ 4.9 มาวาดกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและปริมาณส่วนผสม ดังรูปที่ 4.21-4.23 จะเห็นได้ว่า โลหะผสมเงินเกรด 940 ทั้ง 10 ชุด หลังลดขนาดด้วยอัตราการลดขนาด 89 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ค่าความแข็งมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจน มีค่าตั้งแต่ 143.6-176.5 HV_{0.025} เมื่อเทียบกับชิ้นงานสภาพหล่อ ชิ้นงานผ่านการอบไฮโมจิโนเซชันที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส นาน 30 และ 60 นาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าความแข็งตั้งแต่ 55.3-106.2 HV_{0.025} ดังแสดงในตารางที่ 4.7 สาเหตุที่ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นน่าจะมาจากการแปรรูปอย่างรุนแรงส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของ dislocation และอีกสาเหตุน่าจะมาจากการขึ้นงานที่ผ่านการแปรรูปทำให้โครงสร้างผลึกเกิดการเสียรูปส่งผลให้เกิดการสะสมความเครียด (strain energy หรือ store energy) ไว้ภายใน ดังเอกสารอ้างอิงหมายเลข 12 และแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกับผลของค่าความแข็งของชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 มิลลิเมตร คือ ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้น (ปริมาณทองแดงที่ลดลง) และชิ้นงานสภาพหล้อมีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบไฮโมจิโนเซชันที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และ 60 นาที



รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับปริมาณสังกะสีและทองแดงของโลหะผสมเงินเกรด 940 (กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน) อัตราการลดขนาด 89 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับปริมาณซิลิคอน สังกะสีและทองแดงของโลหะผสมเงินเกรด 940 (กลุ่มที่มีเติมซิลิคอนคงที่ที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) อัตราการลดขนาด 89 เปอร์เซ็นต์

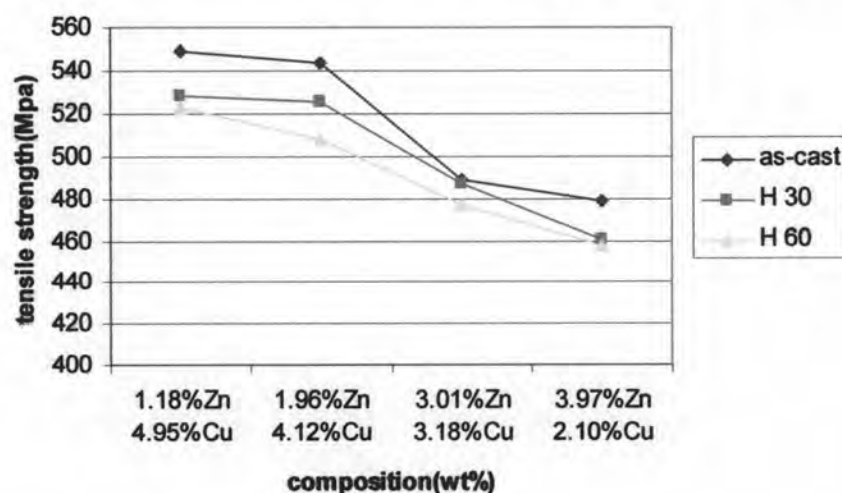


รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับปริมาณซิลิคอน สังกะสีและทองแดงของโลหะผสมเงินเกรด 940 (กลุ่มที่มีเติมซิลิคอนตั้งแต่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) อัตราการลดขนาด 89 เปอร์เซ็นต์

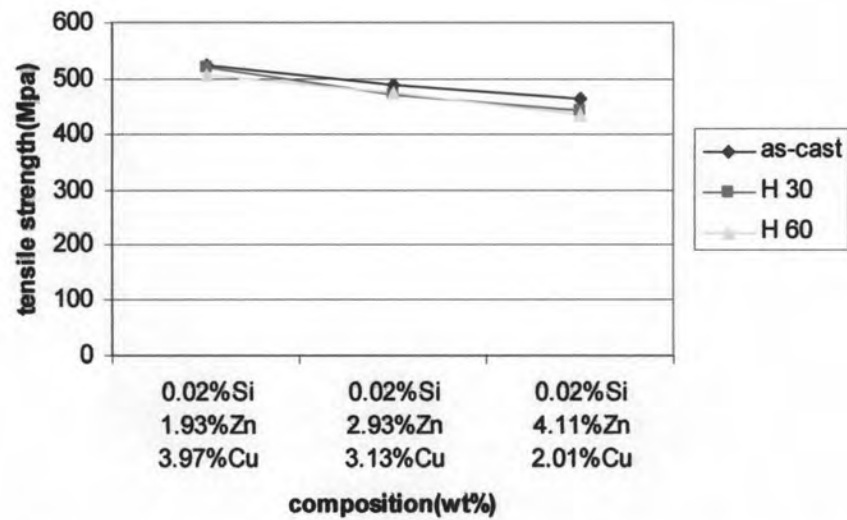
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบแรงดึงโลหะผสมเงิน 940-ทองแดง-สังกะสี-ซิลิคอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.8 มิลลิเมตร (อัตราการลดขนาด 89 เปอร์เซ็นต์)

โลหะผสมชุดที่	ส่วนผสมทางเคมี (%wt) โดย balance of Ag	As-cast		H30		H60	
		UTS(MPa)	%EI	UTS(MPa)	%EI	UTS(MPa)	%EI
1	1.18%Zn -4.95%Cu	549.0	4.7	528.5	4.9	523.0	4.9
2	1.96%Zn -4.12%Cu	544.0	5.5	525.5	5.5	508.0	5.3
3	3.01%Zn -3.18%Cu	489.4	6.0	487.5	5.7	477.5	6.2
4	3.97%Zn -2.10%Cu	479.4	6.6	461.2	6.4	458.0	6.3
5	0.02%Si-1.93%Zn -3.97%Cu	521.6	4.9	518.5	5.0	506.1	5.5
6	0.02%Si-2.93%Zn -3.13%Cu	487.3	6.0	471.8	5.3	473.0	5.9
7	0.02%Si-4.11%Zn -2.01%Cu	462.5	6.5	443.8	6.0	434.2	6.1
8	0.04%Si-1.66%Zn -3.77%Cu	513.3	5.8	488.0	5.2	483.3	5.5
9	0.065%Si-2.65%Zn -2.93%Cu	471.5	6.47	465.2	6.5	464.7	5.7
10	0.036%Si-3.23%Zn -2.30%Cu	466.4	7.0	462.6	6.8	432.8	7.2

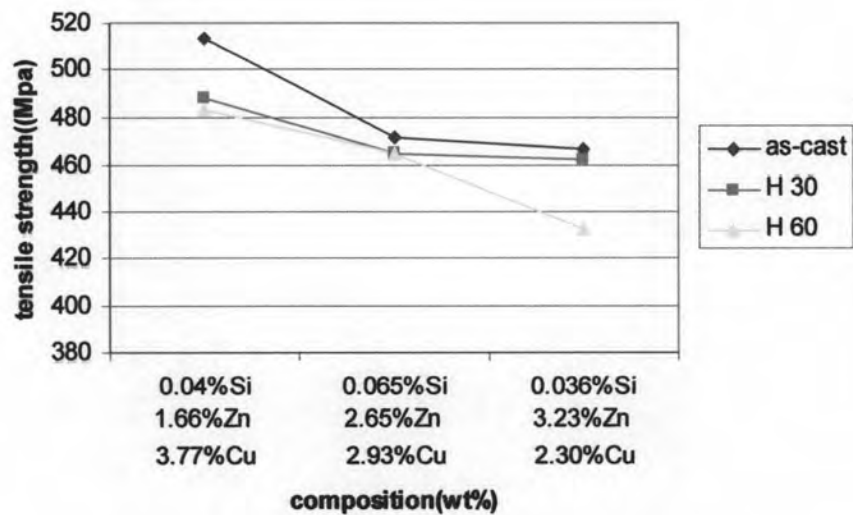
หมายเหตุ: * เป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength; UTS) และอัตราการยืดตัว (percent elongation; %EI) ของชิ้นงานทั้งหมด แสดงไว้ในภาคผนวก ง (ตาราง ง-6 - ง-8)



รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงกับปริมาณสังกะสีและทองแดงของโลหะผสมเงินเกรด 940 (กลุ่มที่ไม่มีคาร์บอน) อัตราการลดขนาด 89 เปอร์เซ็นต์



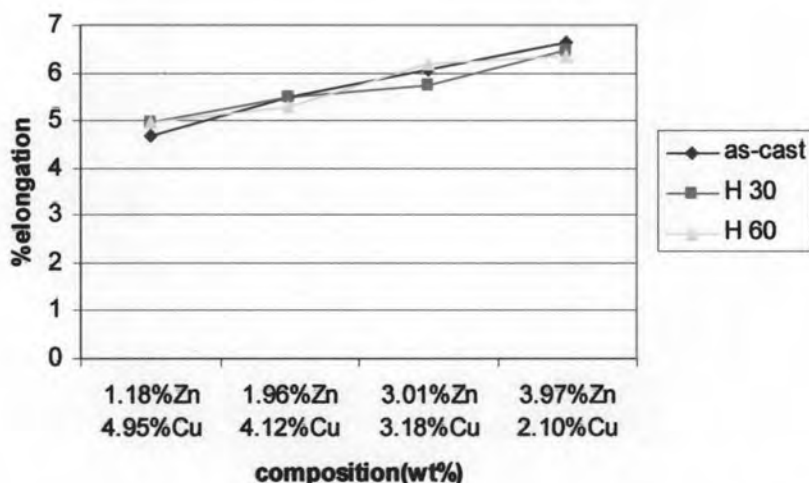
รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงกับปริมาณสังกะสี ทองแดงและซิลิคอน ของโลหะผสมเงินเกรด 940 (กลุ่มที่มีเติมซิลิคอนคงที่ที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก) อัตราการลดขนาด 89 เปอร์เซ็นต์



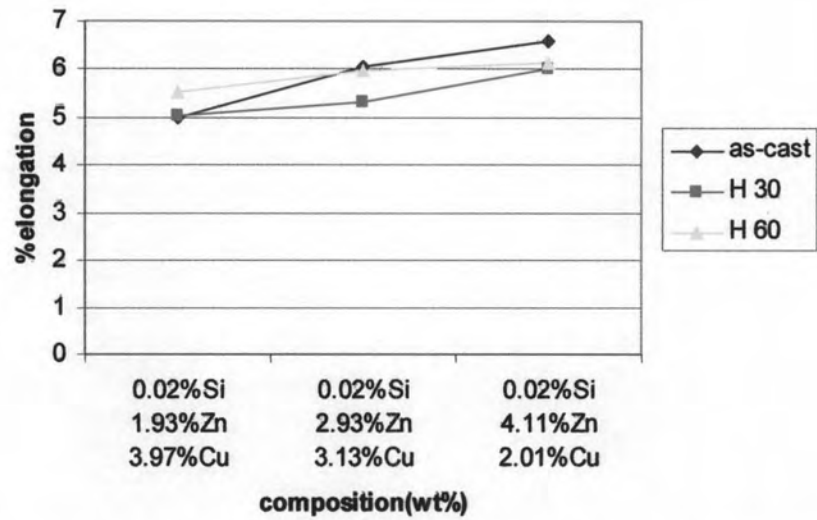
รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงกับปริมาณสังกะสี ทองแดงและซิลิคอน ของโลหะผสมเงินเกรด 940 (กลุ่มที่มีเติมซิลิคอนตั้งแต่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) อัตราการลดขนาด 89 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 4.24-4.26 แสดงถึงค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดกับปริมาณธาตุผสมของโลหะผสมเงินเกรด 940 ทั้ง 10 ชุด ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม โดยผ่านการลดขนาดที่อัตราการลดขนาดเดียวกันพบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้น

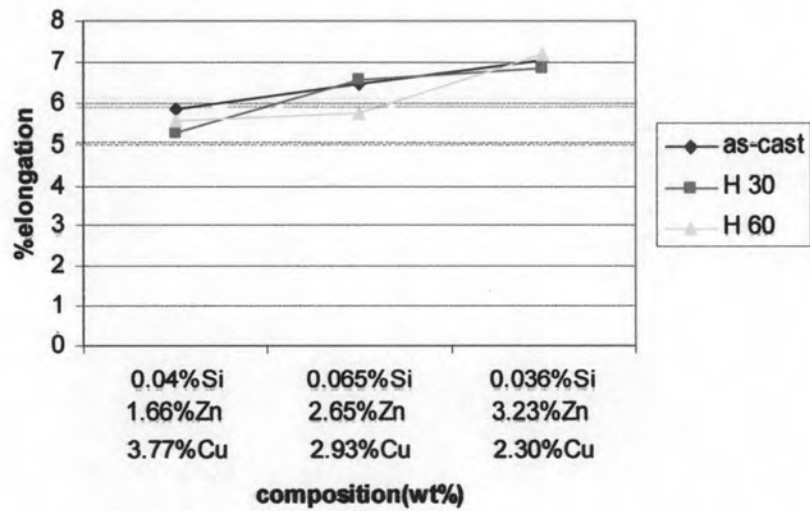
(ปริมาณทองแดงที่ลดลง) มีค่าตั้งแต่ 432.8-549.0 MPa แต่เมื่อเทียบกับชิ้นงานสภาพหล่อ ชิ้นงานที่ผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่ 750 องศาเซลเซียส นาน 30 และ 60 นาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 มิลลิเมตร มีค่าตั้งแต่ 138.5-217.8 MPa ซึ่งจะเห็นได้ว่า ชิ้นงานที่ผ่านการแปรรูปหรือลดขนาดจะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนตามอัตราการลดขนาดนั้น เนื่องจากโครงสร้างผลึกเกิดการเสียรูปจึงเกิดการสะสมพลังงานไว้ภายในและการเพิ่มขึ้นของ dislocation แต่ในขณะเดียวกันค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวกลับมีแนวโน้มลดต่ำลง ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 4.7-7.2 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับชิ้นงานสภาพหล่อ ชิ้นงานที่ผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่ 750 องศาเซลเซียส นาน 30 และ 60 นาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 มิลลิเมตร มีค่าตั้งแต่ 60.7-138.0เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.27-4.29 จะสังเกตเห็นว่า ที่อัตราการลดขนาดเดียวกัน ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้น(ปริมาณทองแดงที่ลดลง)



รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวกับปริมาณสังกะสีและทองแดงของโลหะผสมเงินเกรด 940 (กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน) อัตราการลดขนาด 89 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวกับปริมาณซิลิคอน สังกะสี ทองแดง ของโลหะผสมเงินเกรด 940 (กลุ่มที่มีเติมซิลิคอนคงที่ที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก) อัตราการลดขนาด 89 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวกับปริมาณซิลิคอน สังกะสี และ ทองแดงของโลหะผสมเงินเกรด 940 (กลุ่มที่มีเติมซิลิคอนคงตั้งแต่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก) อัตราการลดขนาด 89 เปอร์เซ็นต์

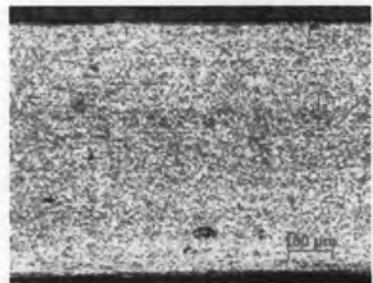
4.7 ผลการอบอ่อน

4.7.1 ผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาค หลังการอบอ่อน

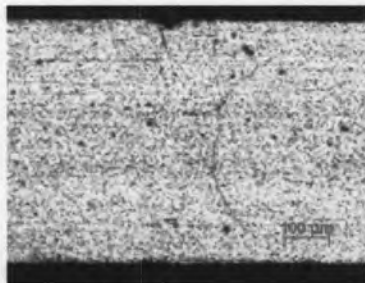
จากนั้นนำชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่ม คือ สภาพล่อ ผ่านการอบไฮโมจิโนเซชันที่ 750 องศาเซลเซียส นาน 30 และ 60 นาที เส้นลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 มิลลิเมตร แล้วนำมาลดขนาดเป็นเส้นลวดเส้นผ่านศูนย์กลางเหลือ 1.8 มิลลิเมตร (อัตราการลดขนาด 89 เปอร์เซ็นต์) จากนั้นนำไปลดขนาดเป็นเส้นลวดเส้นผ่านศูนย์กลางเหลือ 0.68 มิลลิเมตร (อัตราการลดขนาด 99 เปอร์เซ็นต์) โดยงานวิจัยนี้ใช้อุณหภูมิการอบอ่อน 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส นาน 30, 45 และ 60 นาที เมื่อตรวจสอบดูโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังกัดกรดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของโลหะผสมเงินเกรด 940 ทั้ง 10 ชุด พบว่า เกรนลักษณะเรียวยาวตามแนวดิ่ง (Elongated grain) ถูกขจัดหายไป จะเกิดเกรนใหม่แทน (New grain) ดังแสดงในรูปที่ 4.30 ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 50 เท่า เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิเท่ากัน แต่เวลาต่างกันนั้น เช่น อบอ่อนที่ 500 องศาเซลเซียส นาน 30, 45 และ 60 นาที พบว่า ขนาดเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นแต่ไม่เปลี่ยนแปลงให้เห็นอย่างเด่นชัด ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาที่เวลาเท่ากัน แต่อุณหภูมิต่างกัน เช่น อบอ่อนที่ 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที พบว่า ขนาดเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังนั้นจึงแสดงได้ว่า ทั้งอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนมีผลต่อขนาดเกรน แต่อุณหภูมิมิมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนมากกว่าเวลา นั่นก็หมายความว่า เมื่อเราใช้ อุณหภูมิและเวลาในการอบอ่อนสูง จะทำให้ขนาดเกรนใหญ่หรือหยาบขึ้นเมื่อเทียบกับการอบอ่อนที่ใช้ อุณหภูมิและเวลาดำกว่า และขนาดเกรนที่ได้จะมีผลต่อค่าความแข็งหลังการอบอ่อนดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



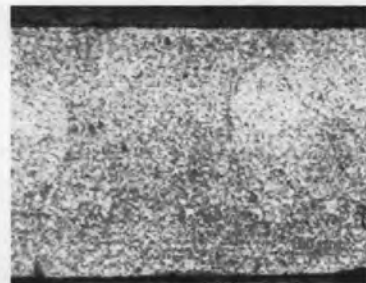
ก)



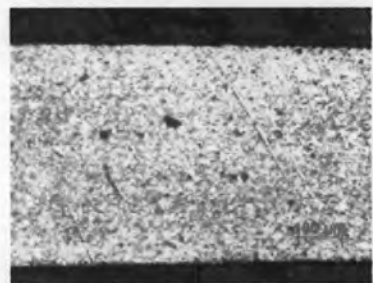
500 °C 30 นาที



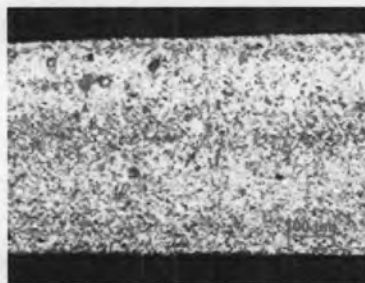
500 °C 45 นาที



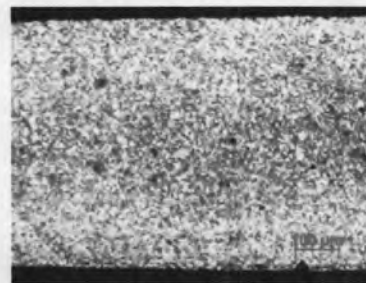
500 °C 60 นาที



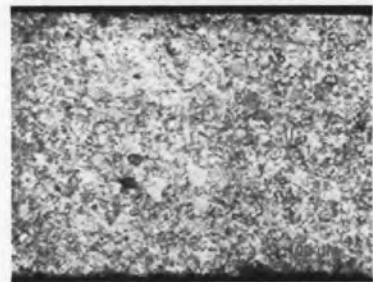
550 °C 30 นาที



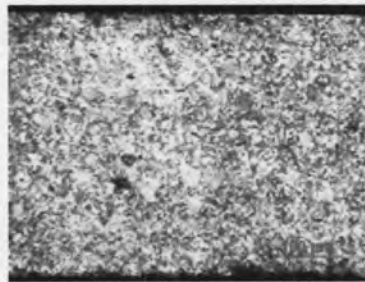
550 °C 45 นาที



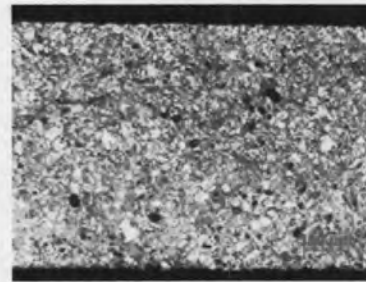
550 °C 60 นาที



600 °C 30 นาที

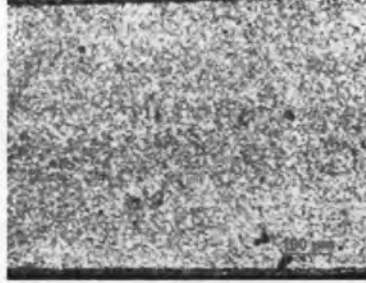


600 °C 45 นาที



600 °C 60 นาที

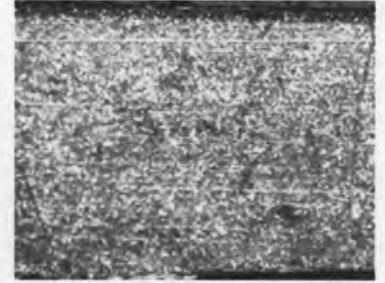
๗)



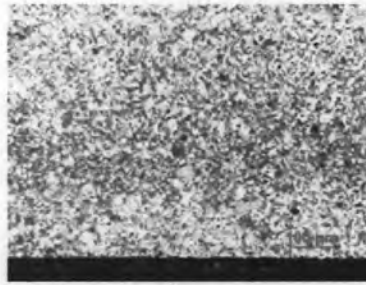
500 °C 30 นาที



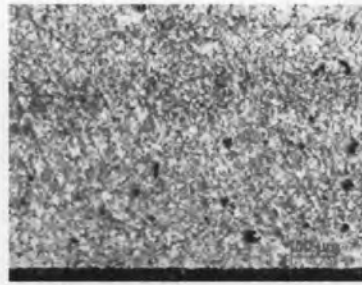
500 °C 45 นาที



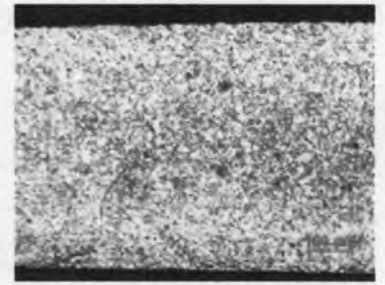
500 °C 60 นาที



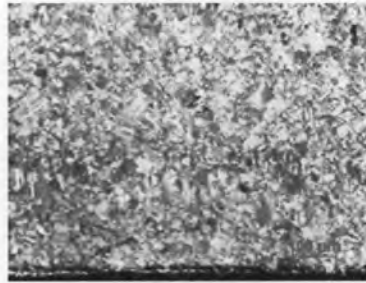
550 °C 30 นาที



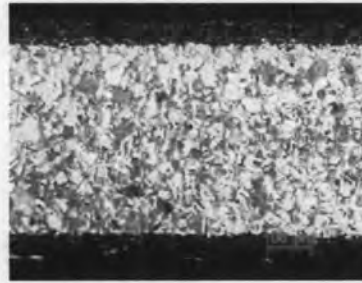
550 °C 45 นาที



550 °C 60 นาที



600 °C 30 นาที



600 °C 45 นาที

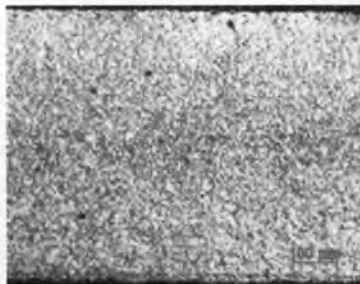


600 °C 60 นาที

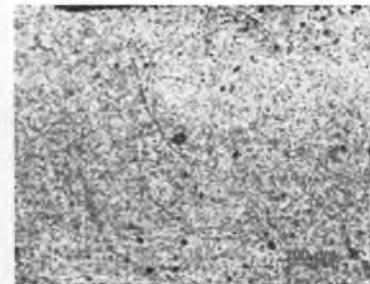
ค)



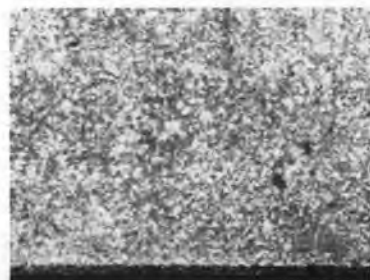
500 °C 30 นาที



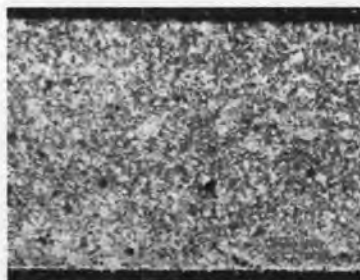
500 °C 45 นาที



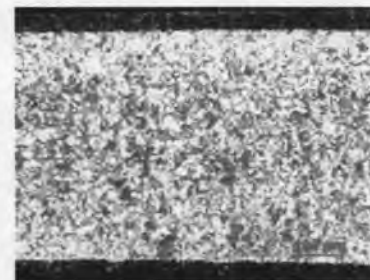
500 °C 60 นาที



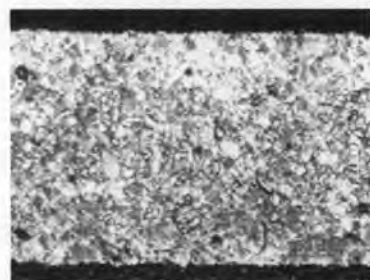
550 °C 30 นาที



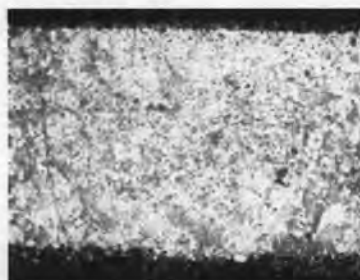
550 °C 45 นาที



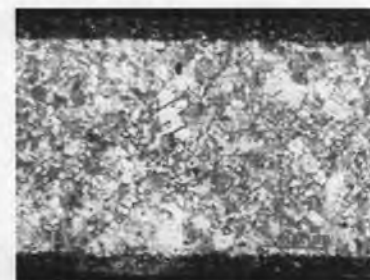
550 °C 60 นาที



600 °C 30 นาที



600 °C 45 นาที



600 °C 60 นาที

รูปที่ 4.30 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 10: 0.036%Si-3.23%Zn-2.30%Cu-balance of Ag หลังการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส นาน 30, 45 และ 60 นาที

- ก) สภาพหล่อ ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหลือ 0.68 มิลลิเมตร อบอ่อน
- ข) ผ่านการอบโฮโมจิไนเซชัน 750 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหลือ 0.68 มิลลิเมตร อบอ่อน
- ค) ผ่านการอบโฮโมจิไนเซชัน 750 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหลือ 0.68 มิลลิเมตร อบอ่อน

จากรูปที่ 4.30 จะเห็นได้ว่า ชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่ม คือ กลุ่มชิ้นงาน ก), ข) และ ค) สังเกตเห็นว่า กลุ่มชิ้นงาน ก) จะไม่สังเกตเห็นแถบหรือชั้นสีดำ(layer) ให้เห็น แต่ชิ้นงานในกลุ่ม ข)

และ ค) จะเห็นได้ชัดเจน ซึ่งความหนาของแถบหรือชั้นสีดำจะหนาขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้อบอ่อนสูงขึ้น เหตุที่เป็นเช่นนี้ น่าจะเกิดจากแถบหรือชั้นสีดำเกิดตั้งแต่นำชิ้นงานขึ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 มิลลิเมตร ผ่านการอบไฮโมจิในเซชัน 750 องศาเซลเซียส นาน 30 และ 60 นาที ดังอธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.5.1 และดังรูปที่ 4.30

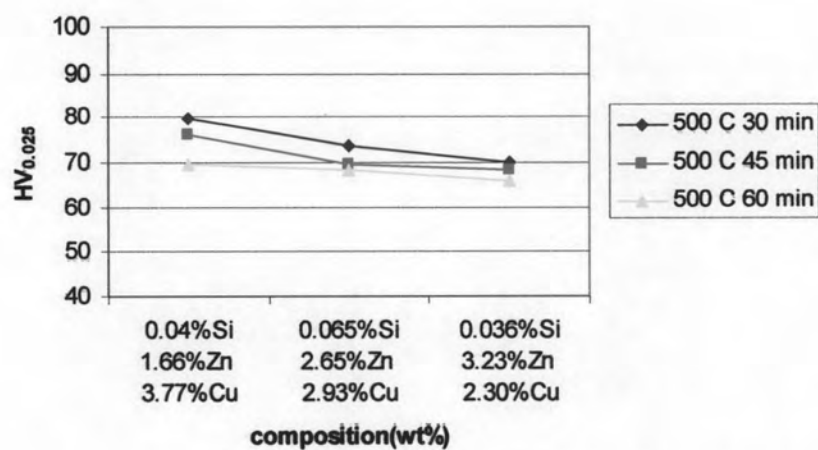
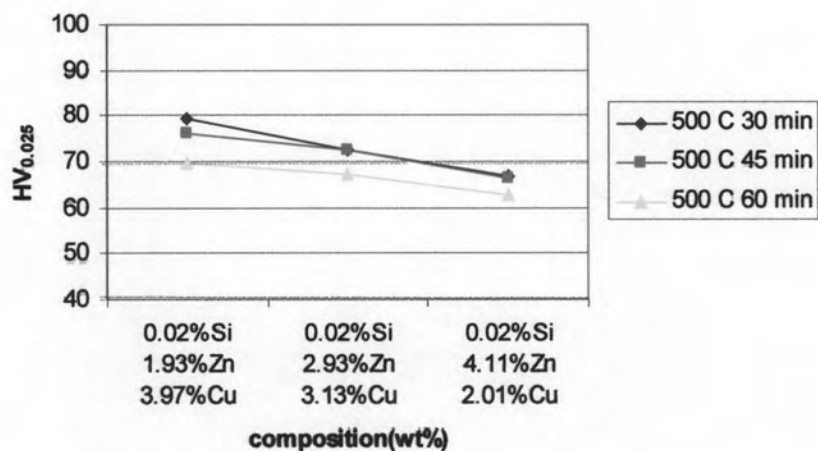
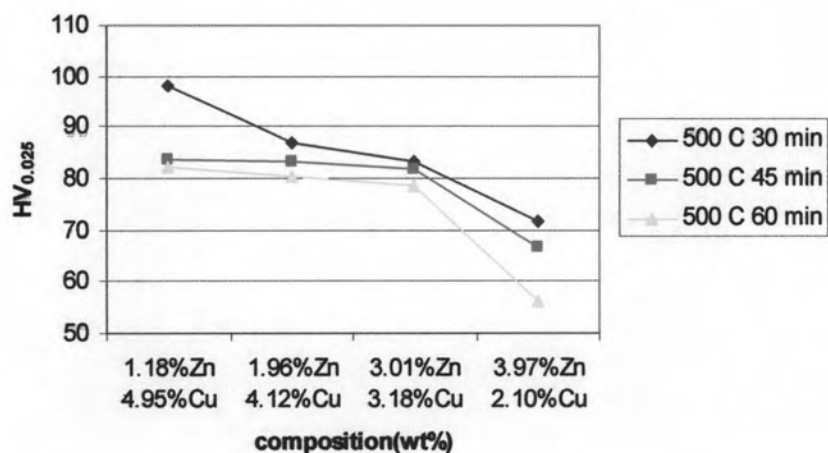
4.7.2 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ หลังการอบอ่อน

4.7.2.1 จากสภาพหล่อ

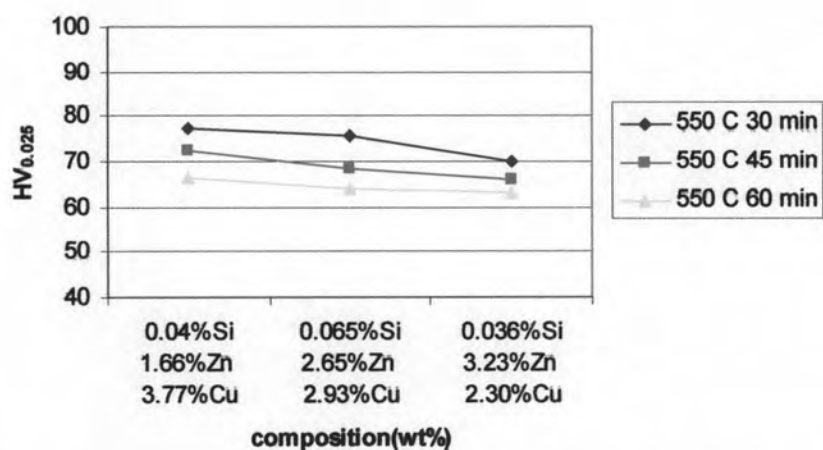
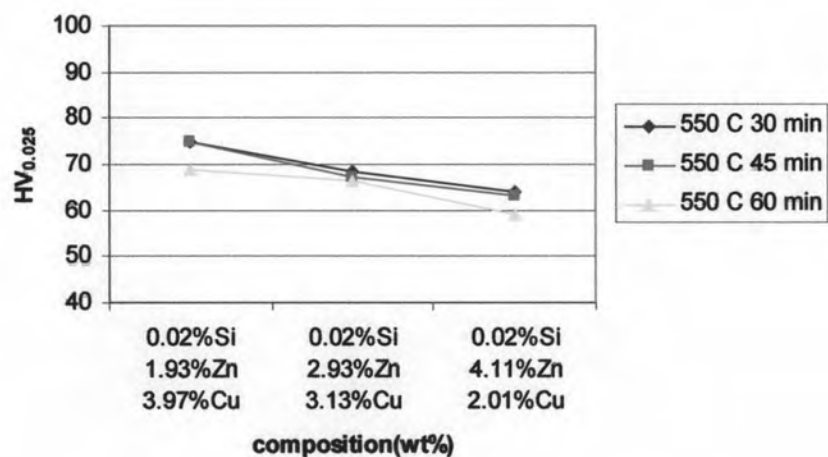
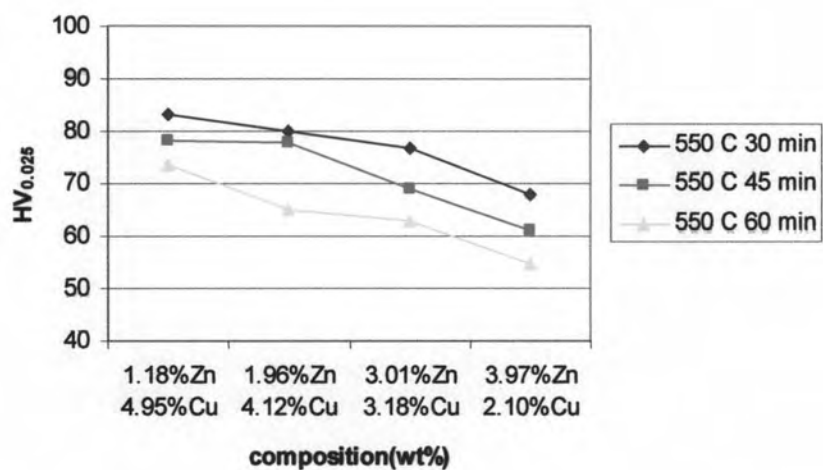
เมื่อนำชิ้นงานสภาพหล่อเป็นเส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 มิลลิเมตร ลดขนาดเป็นเส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.68 มิลลิเมตร แล้วอบอ่อนที่อุณหภูมิ 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส นาน 30, 45 และ 60 นาที คลุมด้วยก๊าซไนโตรเจน จากนั้นเตรียมชิ้นงานตามยาวเพื่อวัดความแข็งนำชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E 92-82 ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ระบบดิจิทัล รุ่น MVK-H1/H2/H3 กดด้วยน้ำหนัก 25 กรัม เป็นเวลา 10 วินาที วัดความยาวเส้นทแยงมุมทั้งสองด้าน (d_1 และ d_2) แล้วคำนวณค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ ($HV_{0.025}$) ของโลหะผสมแต่ละชุดกดวัดความแข็ง 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย ข้อมูลที่ได้ดังแสดงในตารางภาคผนวก ค ตาราง ค-4 มาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณส่วนผสมทางเคมีกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.31-4.33 พบว่า โลหะผสมทั้ง 3 กลุ่ม คือ โลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 1-4 (กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน) โลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 5-7 (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคงที่ที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และโลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 1-4 (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนตั้งแต่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) มีแนวโน้มของค่าความแข็งลดลงตามปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้น (ปริมาณทองแดงที่ลดลง) และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิในการใช้อบอ่อนที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยใช้เวลาต่างกัน คือ 30, 45 และ 60 นาทีนั้น พบว่า ค่าความแข็งทั้ง 10 ชุด ที่ผ่านการอบอ่อนที่ 500 องศาเซลเซียส มีค่าตั้งแต่ 55.9-98.2 $HV_{0.025}$ อบอ่อนที่ 550 องศาเซลเซียส มีค่าตั้งแต่ 54.5-83.2 $HV_{0.025}$ และอบอ่อนที่ 600 องศาเซลเซียส มีค่าตั้งแต่ 52.8-78.4 $HV_{0.025}$ จะเห็นได้ว่า ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่ 600 องศาเซลเซียส จะมีค่าความแข็งต่ำสุด และค่าสูงสุดคือชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่ 500 องศาเซลเซียส จากนั้นพิจารณารูปที่ 4.34-4.36 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณส่วนผสมทางเคมีและค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ โดยพิจารณาเวลาที่ใช้อบอ่อนเท่ากัน แต่อุณหภูมิต่างกัน คือ 500, 500 และ 600 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าความแข็งทั้ง 10 ชุด ใช้เวลาในการอบอ่อน 30 นาที มีค่าตั้งแต่ 61.0-98.2 $HV_{0.025}$ ใช้เวลาในการอบอ่อน 45 นาที มีค่าตั้งแต่ 55.8-83.7 $HV_{0.025}$ และใช้เวลาในการอบอ่อน 60 นาที มีค่าตั้งแต่ 52.8-82.2 $HV_{0.025}$ จะเห็นได้ว่า ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนเวลาเท่ากัน ที่อุณหภูมิสูงกว่ามีค่าความ

แข็งลดลง จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเห็นได้ชัดเจนว่า ค่าความแข็งของชิ้นงานสภาพหล่อ ที่ผ่านการลดเหลือขนาด 0.68 มิลลิเมตร แล้วอบอ่อน ค่าความแข็งจะต่ำลงเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการอบอ่อนสูงขึ้น เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อพิจารณาที่โครงสร้างจุลภาคหลังกัดกรดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 50 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.30 ก) นั้นพบว่า ขนาดเกรนจะใหญ่หรือหยาบขึ้นเมื่อใช้เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการอบอ่อนสูงขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนในกลุ่มเดียวกัน คือ กลุ่ม ก) และค่าความแข็งที่ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการลดขนาดอย่างรุนแรงที่อัตราการลดขนาด 89 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าความแข็งมีค่าตั้งแต่ 154.6-176.5 $HV_{0.025}$ จากตารางที่ 4.9 เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากพิจารณารูปที่ 4.20 แสดงถึงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการลดขนาด พบว่าลักษณะเกรนจะรียาวไปตามแนวดึง ซึ่งเกรนมีการเสียรูปอย่างรุนแรงทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของ dislocations ตามอัตราการลดขนาด จึงส่งผลทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเรานำชิ้นงานที่ผ่านการลดขนาดหรือแปรรูปมาอบอ่อน จะทำให้เกิดเกรนใหม่ นั่นก็แสดง การอบอ่อนเป็นการลดการสะสมพลังงานที่เกิดจากผลึกเกิดการเสียรูป และสามารถลด dislocations ให้น้อยลง จึงทำให้ค่าความแข็งลดลงนั่นเอง

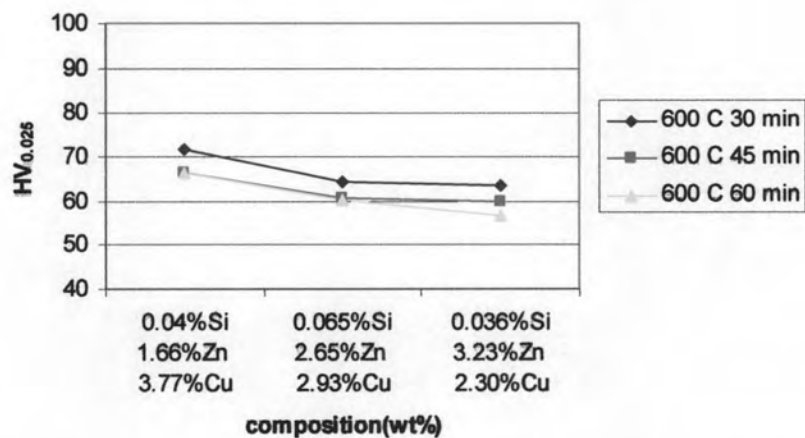
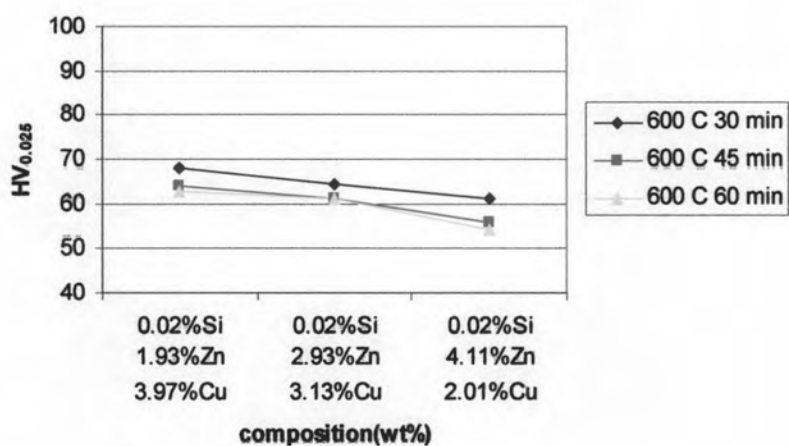
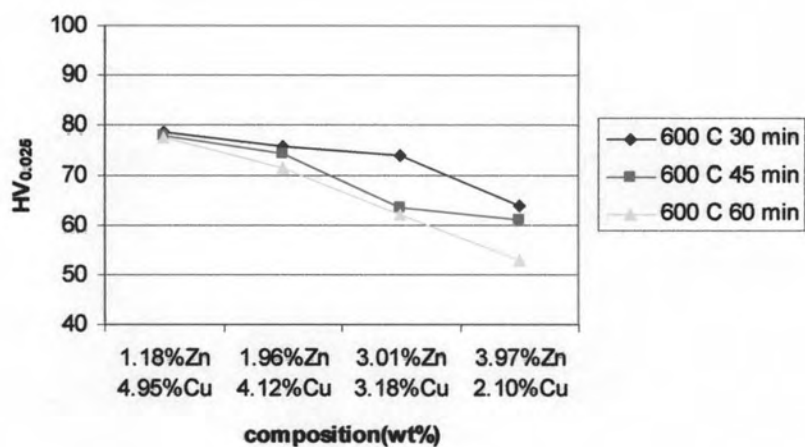




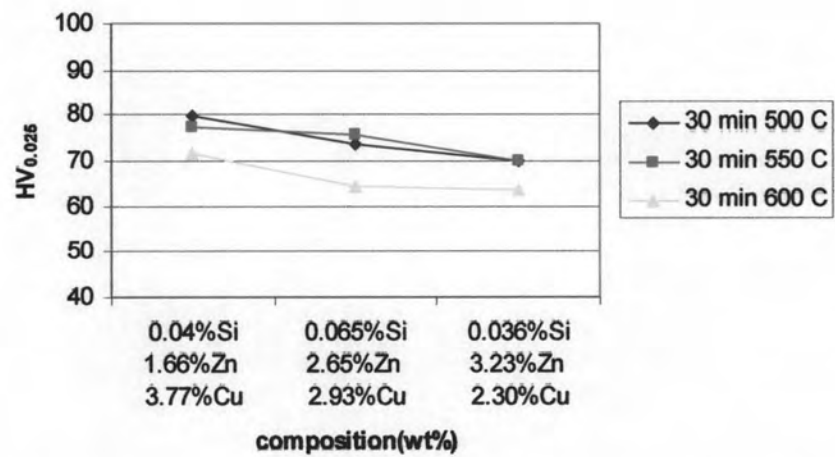
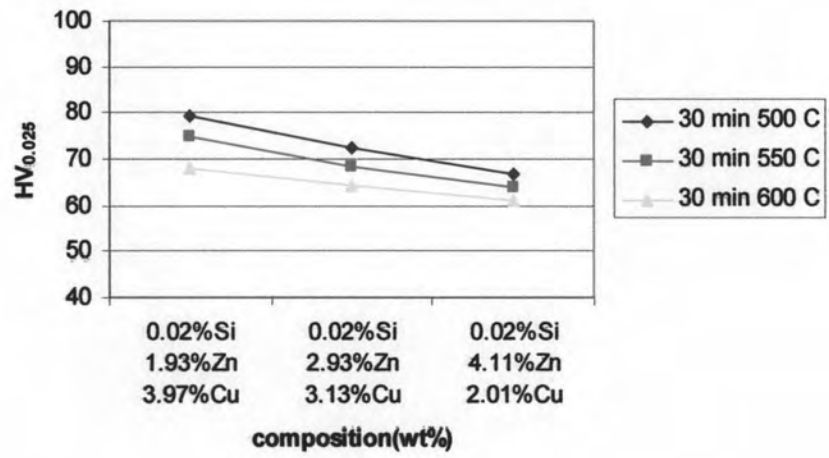
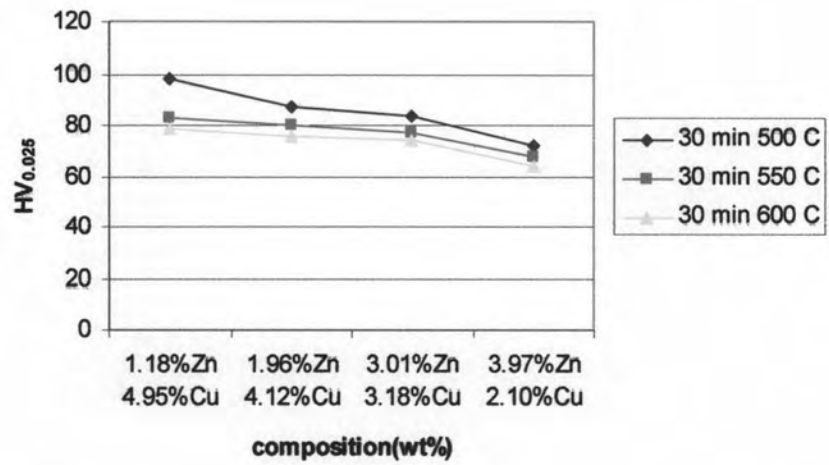
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้อบอ่อน ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสกับ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์



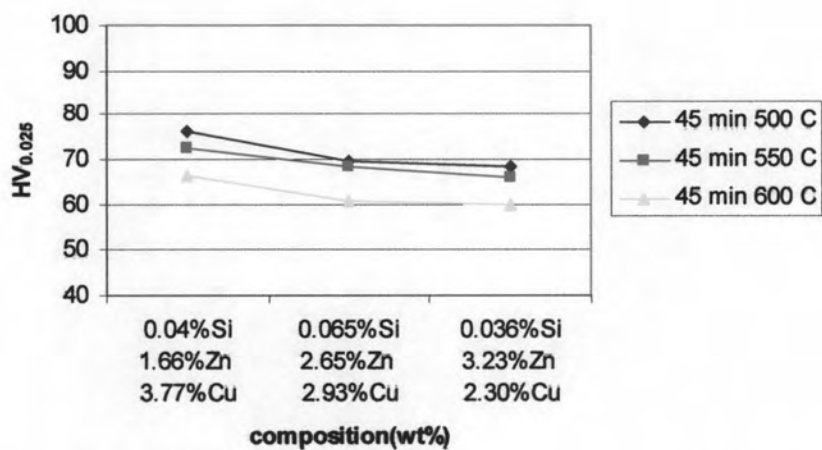
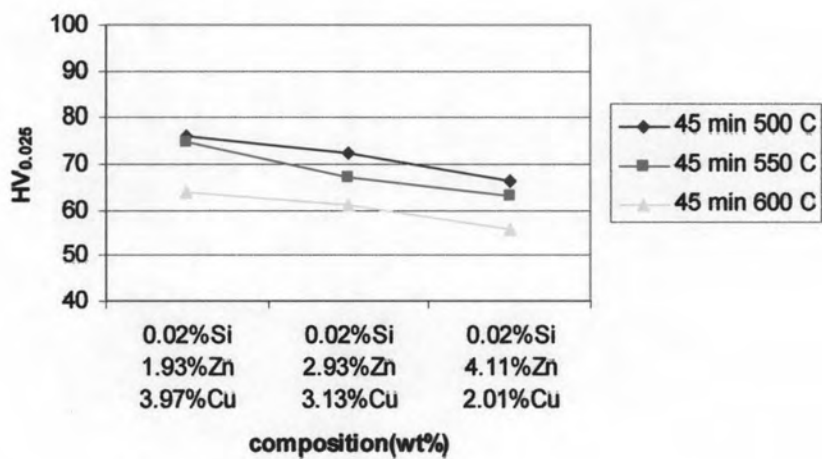
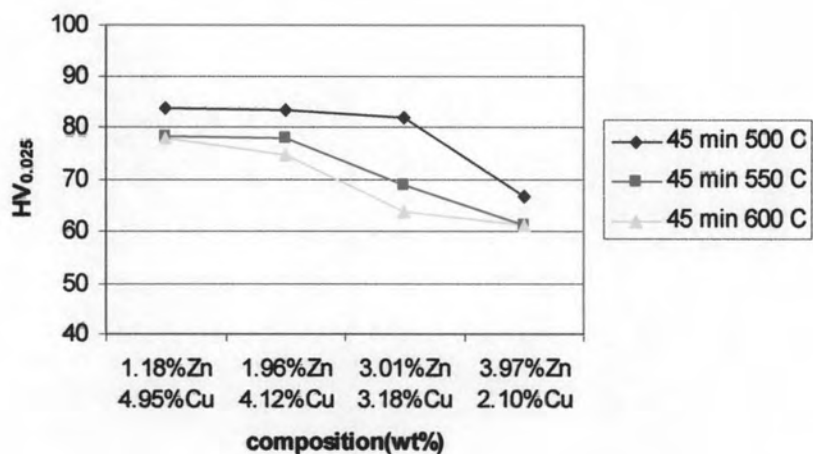
รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้อบอ่อน ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้อบร้อน ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์

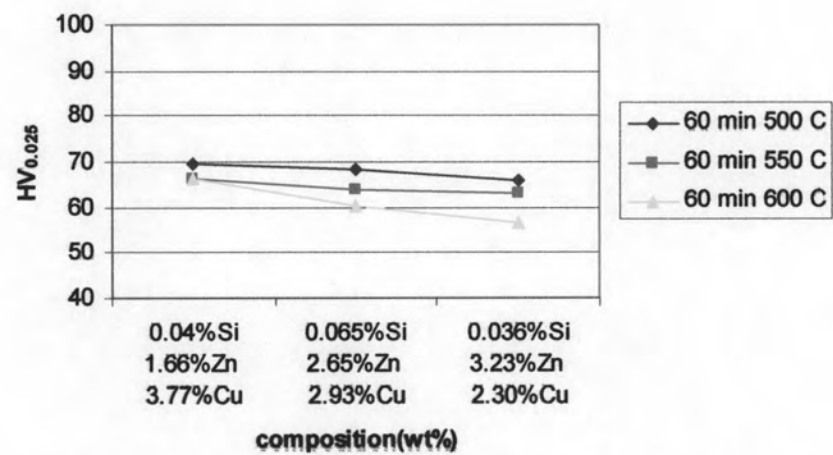
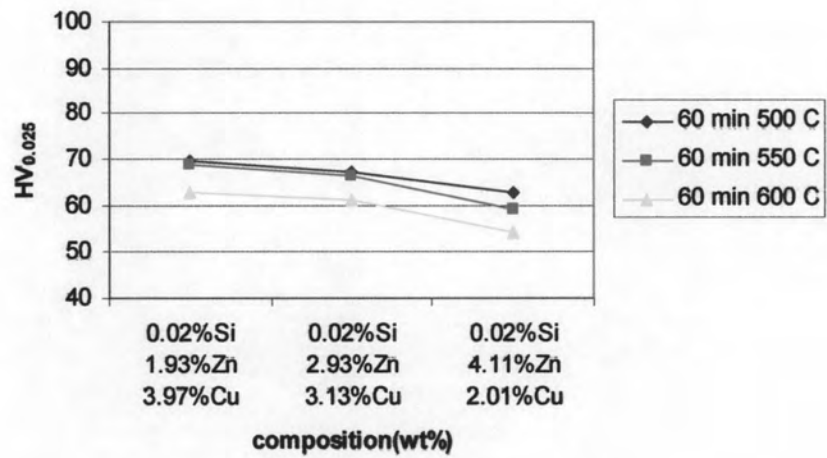
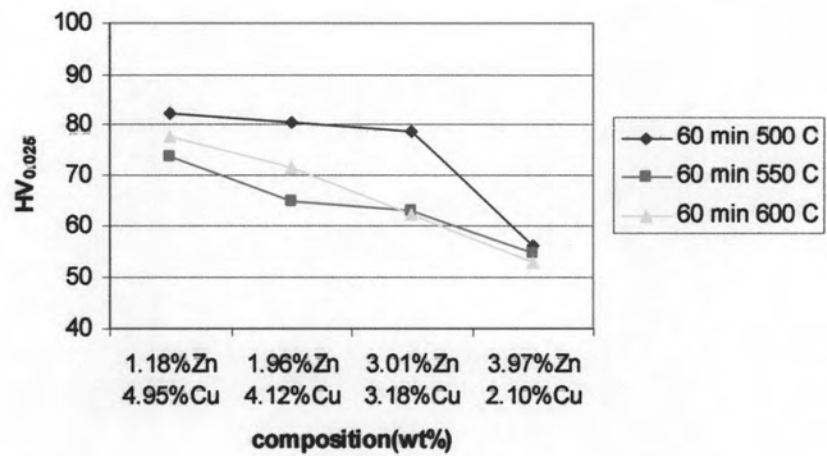


รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้อบร้อน 30 นาที กับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้อบอ่อน 45 นาที กับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์

เกอร์

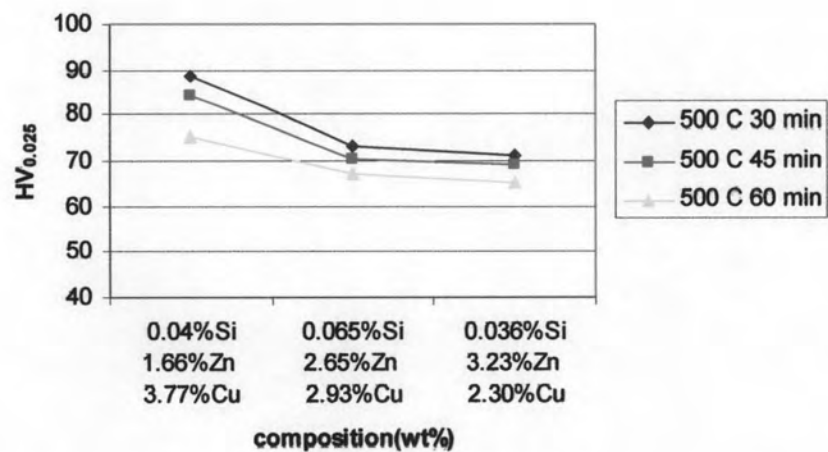
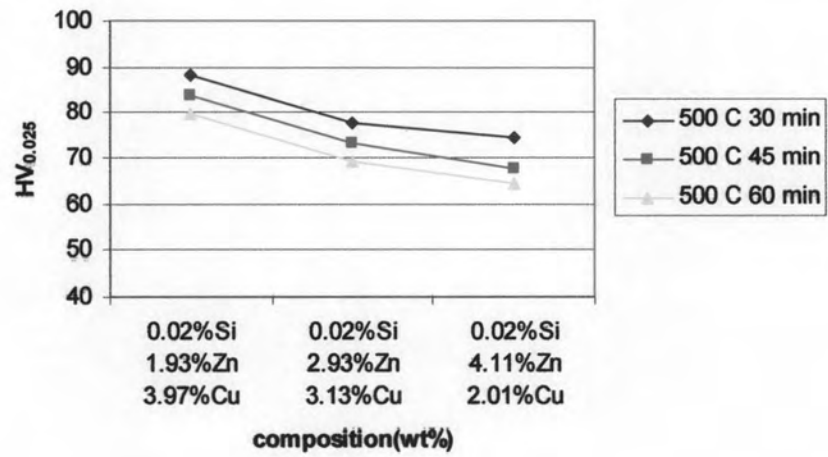
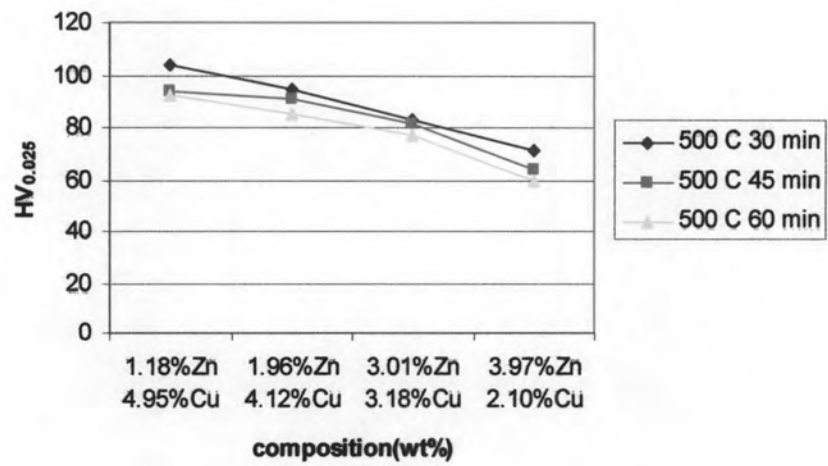


รูปที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้อบร้อน 60 นาที กับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์

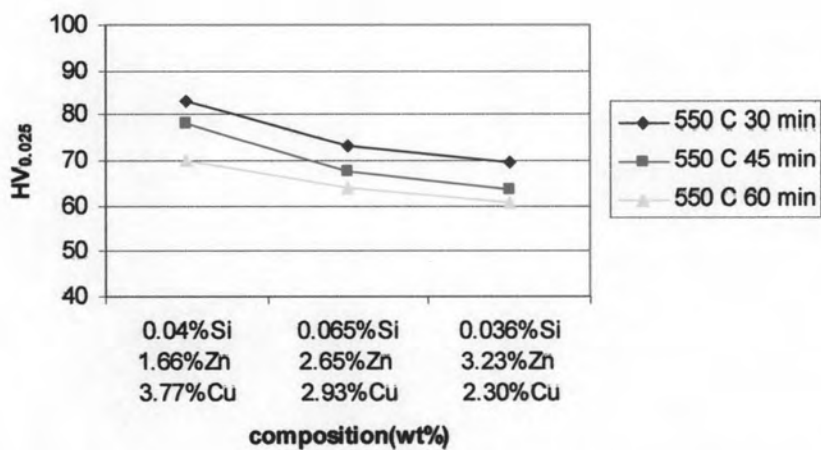
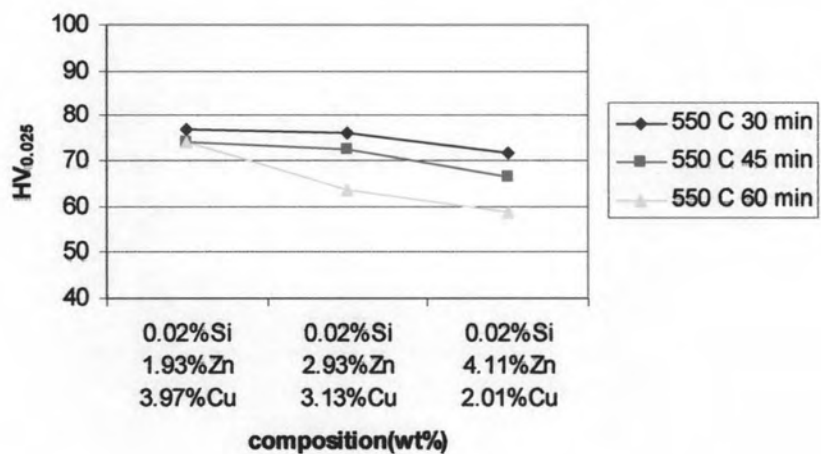
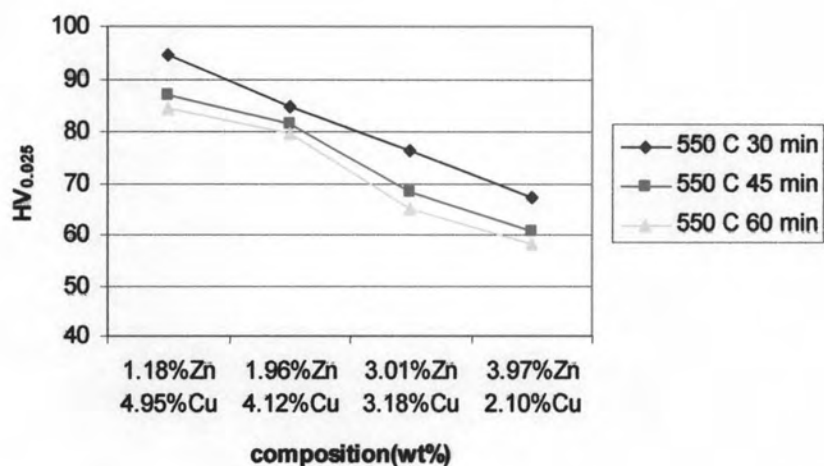
เกอร์

4.7.2.2 จากสภาพผ่านการอบไฮโมจิโนเซชันที่ 750 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที

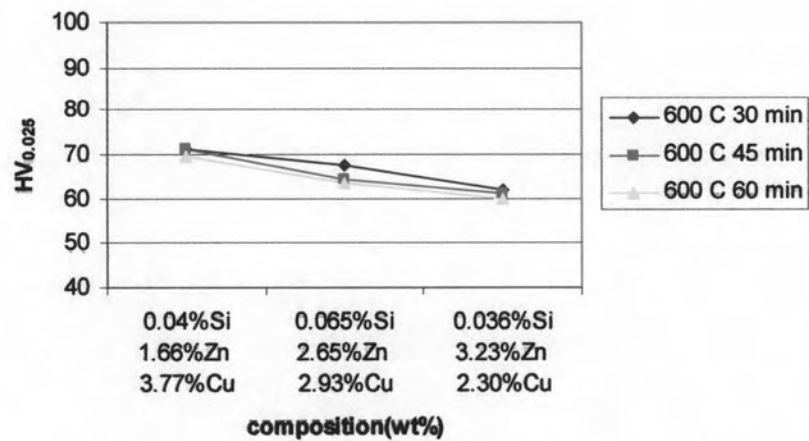
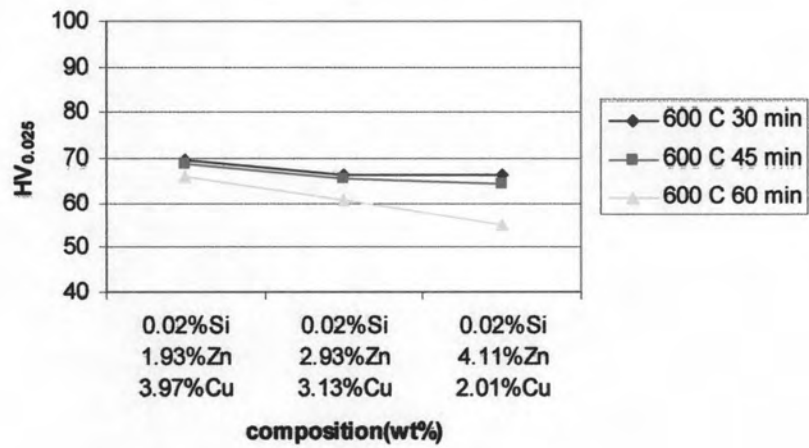
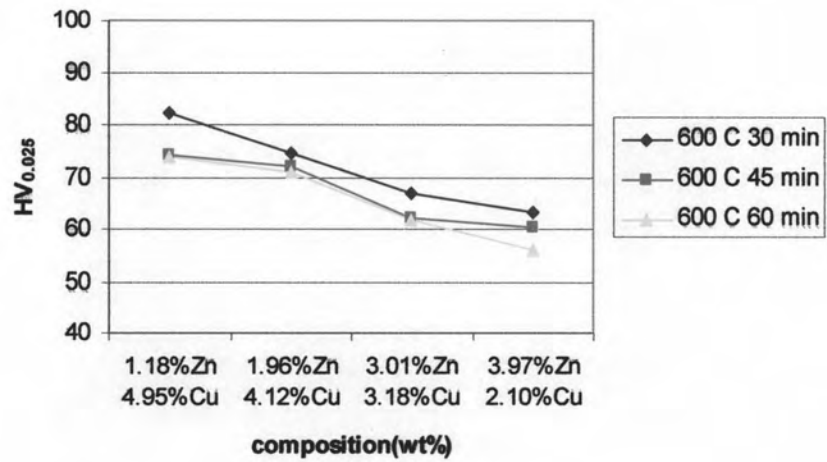
นำชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.68 มิลลิเมตร อบอุ่นที่อุณหภูมิ 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส นาน 30, 45 และ 60 นาทีคลุมด้วยก๊าซไนโตรเจน จากนั้นเตรียมชิ้นงานตามยาวเพื่อวัดความแข็งนำชิ้นงาน ข้อมูลที่ได้ดังแสดงใน ภาคผนวก ค ตาราง ค-5 มาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณส่วนผสมทางเคมีกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.37-4.39 พบว่า โลหะผสมทั้ง 3 กลุ่ม คือ โลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 1-4 (กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน) โลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 5-7 (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคงที่ที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และโลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 1-4 (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนตั้งแต่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) มีแนวโน้มของค่าความแข็งลดลงตามปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้น(ปริมาณทองแดงที่ลดลง) เช่นเดียวกับชิ้นงานสภาพหล่อที่ผ่านการลดขนาดเหลือ 0.68 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิในการใช้อบอุ่นที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยใช้เวลาต่างกัน คือ 30, 45 และ 60 นาทีนั้น พบว่า ค่าความแข็งทั้ง 10 ชุด ที่ผ่านการอบอุ่นที่ 500 องศาเซลเซียส มีค่าตั้งแต่ 59.6-103.9 HV_{0.025} อบอุ่นที่ 550 องศาเซลเซียส มีค่าตั้งแต่ 58.0-94.6 HV_{0.025} และอบอุ่นที่ 600 องศาเซลเซียส มีค่าตั้งแต่ 54.8-82.3 HV_{0.025} จะเห็นได้ว่า ชิ้นงานที่ผ่านการอบอุ่นที่ 600 องศาเซลเซียส จะมีค่าต่ำสุด และค่าสูงสุดคือชิ้นงานที่ผ่านการอบอุ่นที่ 500 องศาเซลเซียส จากนั้นพิจารณารูปที่ 4.40-4.42 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณส่วนผสมทางเคมีและค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ โดยพิจารณาเวลาที่ใช้ออบอุ่นเท่ากัน แต่อุณหภูมิต่างกัน คือ 500, 500 และ 600 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าความแข็งทั้ง 10 ชุด ใช้เวลาในการอบอุ่น 30 นาที มีค่าตั้งแต่ 61.8-103.9 HV_{0.025} ใช้เวลาในการอบอุ่น 45 นาที มีค่าตั้งแต่ 60.5-93.9 HV_{0.025} และใช้เวลาในการอบอุ่น 60 นาที มีค่าตั้งแต่ 56.1-92.3 HV_{0.025} จะเห็นได้ว่า ชิ้นงานที่ผ่านการอบอุ่นเวลาเท่ากัน ที่อุณหภูมิสูงกว่ามีค่าความแข็งลดลง เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็ดังได้อธิบายแล้วในหัวข้อ 4.7.2.1 และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.30 ข) จะเห็นได้ชัดเจนว่า ภายหลังจากอบไฮโมจิโนเซชัน 750 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จะเกิดแถบหรือชั้นสีดำที่ขอบของชิ้นงานอย่างชัดเจน เมื่อชิ้นงานผ่านการลดขนาดหรือแปรรูปจะเห็นแถบหรือชั้นสีดำนี้ติดอยู่ที่ขอบหรือผิวนอกสุดของชิ้นงาน ดังนั้นเมื่อนำชิ้นงานกลุ่มนี้มาอบอุ่น แถบหรือชั้นสีดำที่ว่านี้ก็จะสังเกตเห็นได้ชัดเจน และจะส่งผลกระทบต่อเส้นลวดที่จะนำไปใช้งาน กล่าวคือ เมื่อเรานำชิ้นงานไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ โดยส่วนใหญ่จะนำไปขึ้นรูปเป็นสร้อยคอหรือว่าสร้อยข้อมือด้วยการขึ้นรูปด้วยมือหรือว่าขึ้นรูปด้วยการเครื่องทอสร้อยอัตโนมัติ พบว่าชิ้นงานจะมีผิวเป็นริ้ว แตกกลายกา ดังนั้น เส้นลวดที่ผ่านการอบอุ่นในกลุ่มนี้จึงไม่เหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป



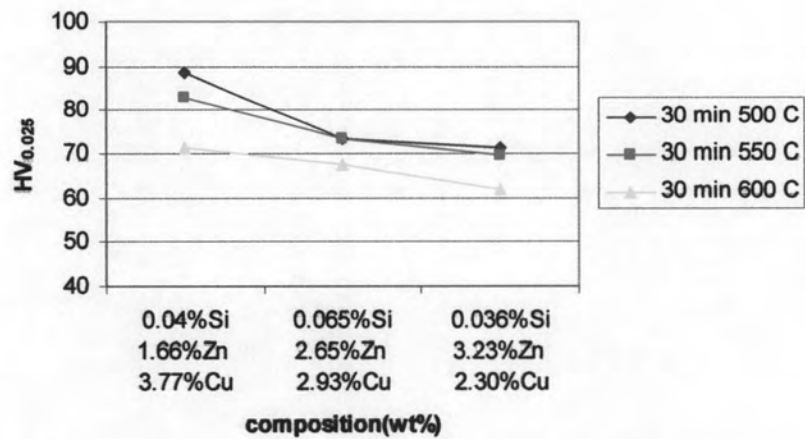
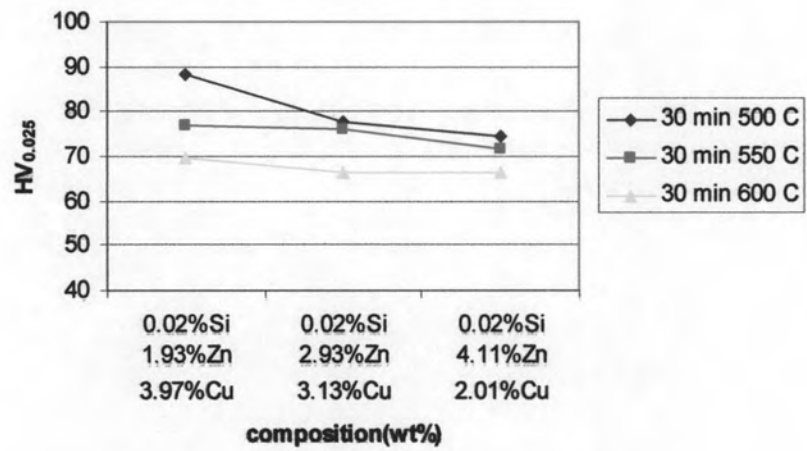
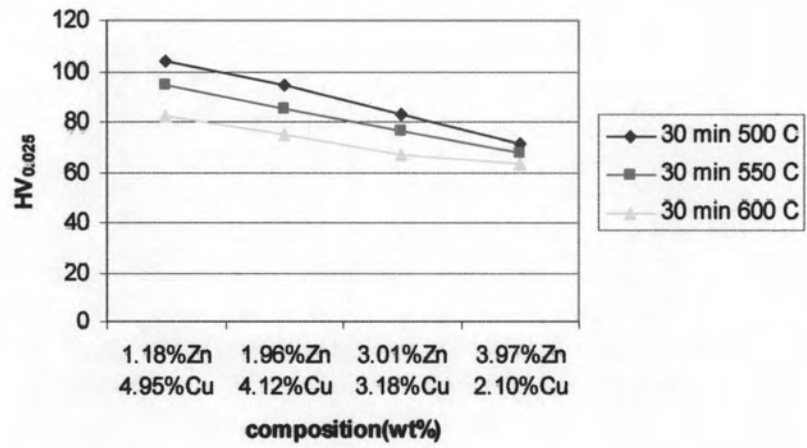
รูปที่ 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้อบอ่อน ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสกับ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้อบอ่อน ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์

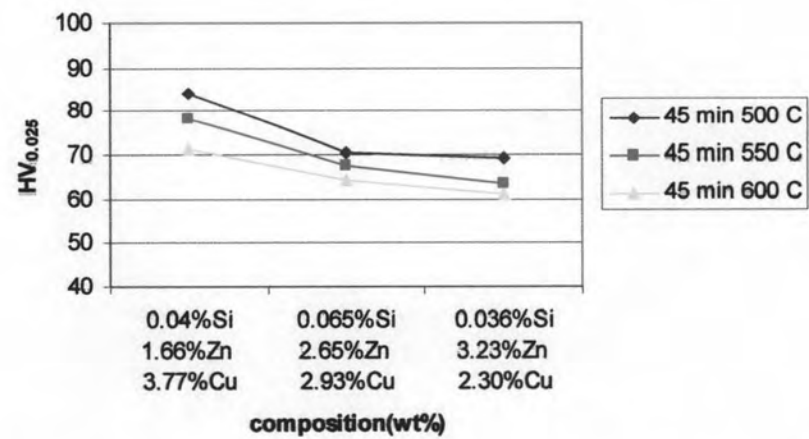
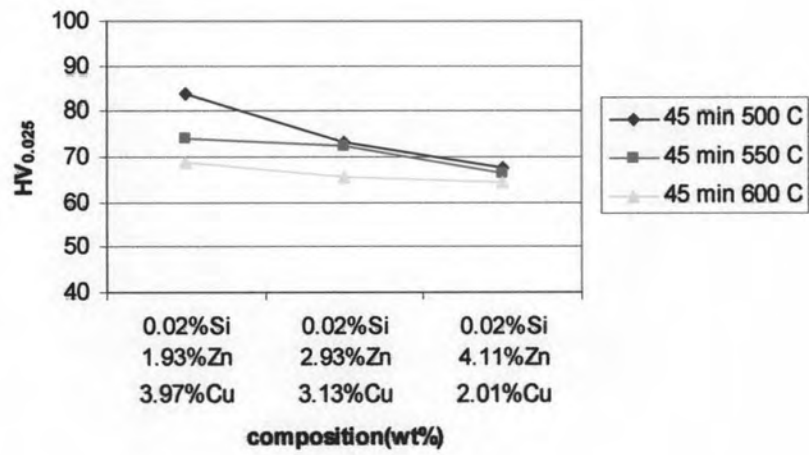
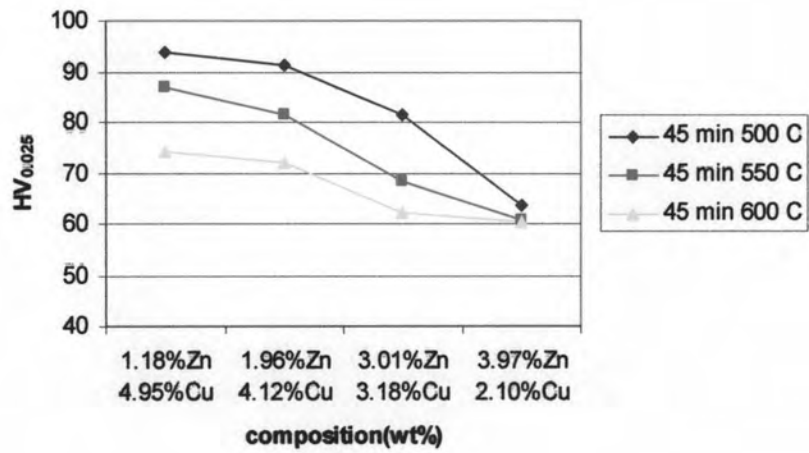


รูปที่ 4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้อบร้อน ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์

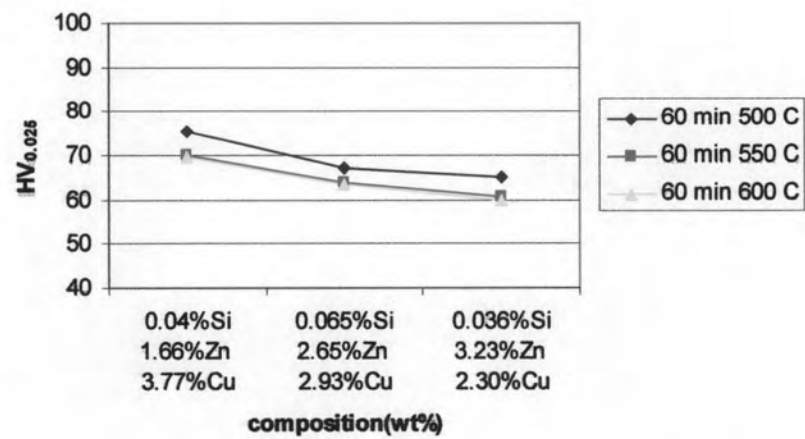
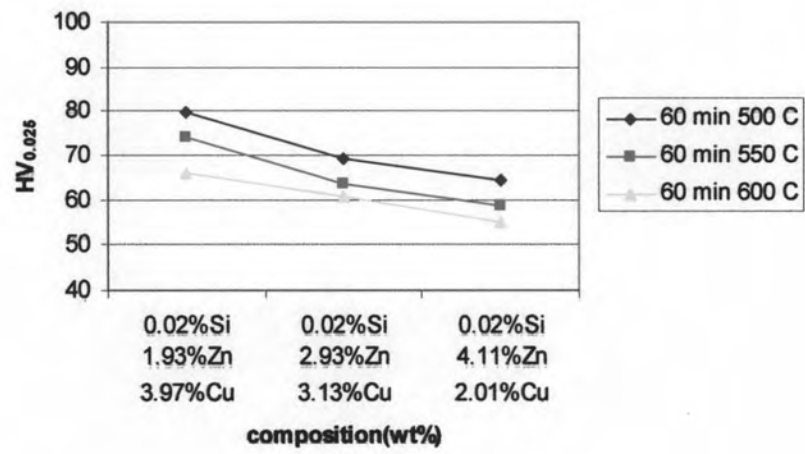
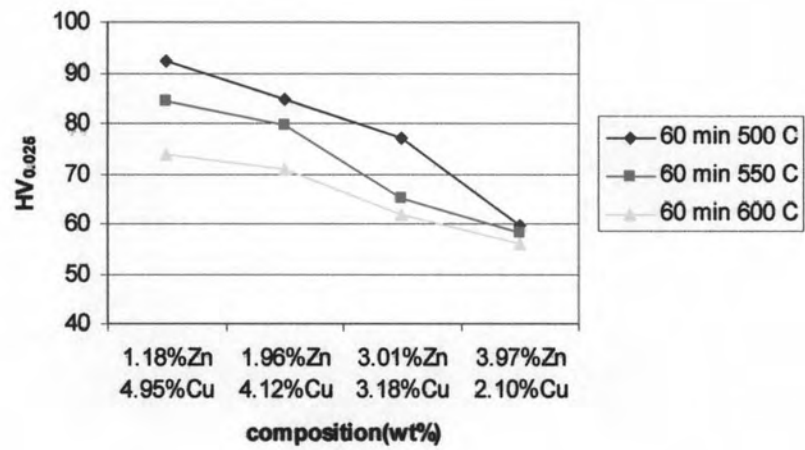


รูปที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้อบร้อน 30 นาที กับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์

เกอร์



รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้อบร้อน 45 นาที กับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์

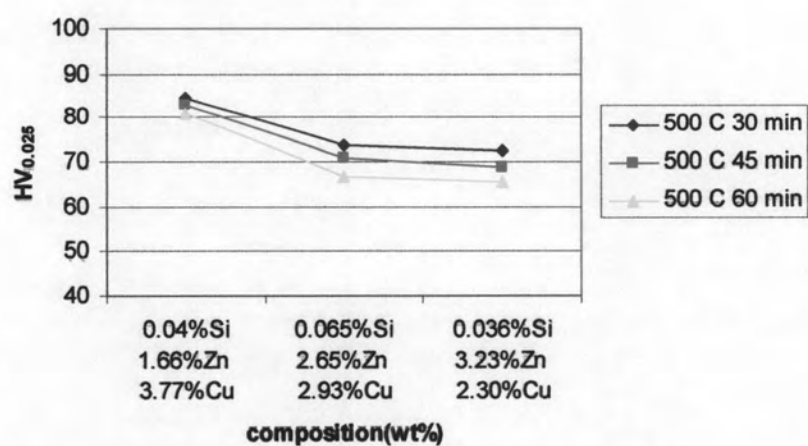
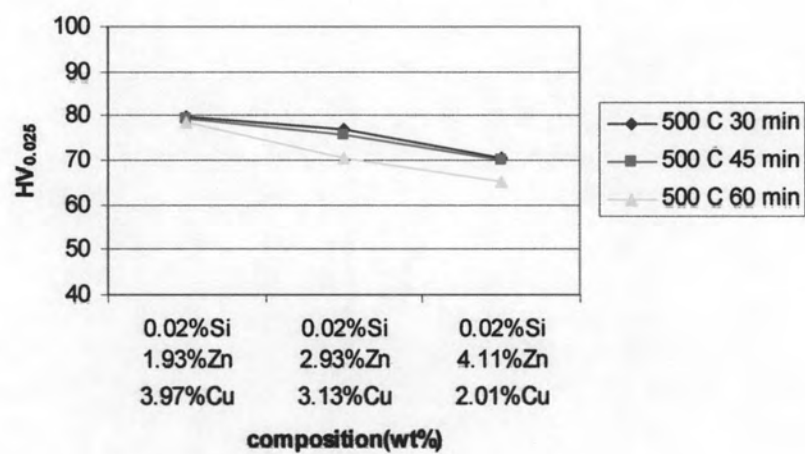
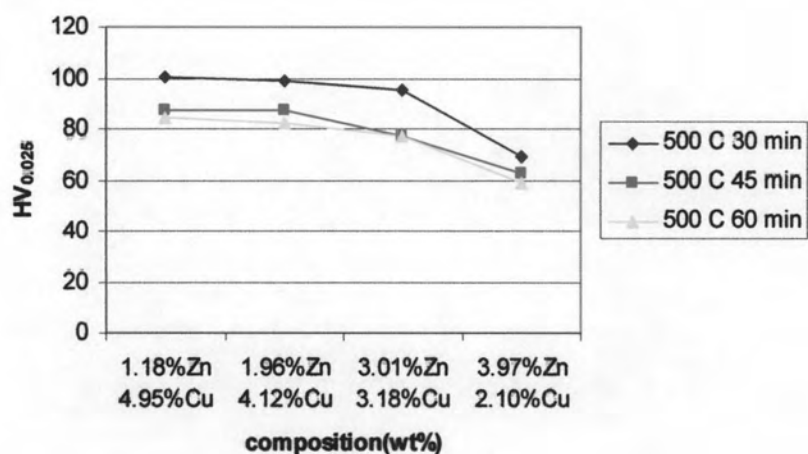


รูปที่ 4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้อบร้อน 60 นาที กับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์

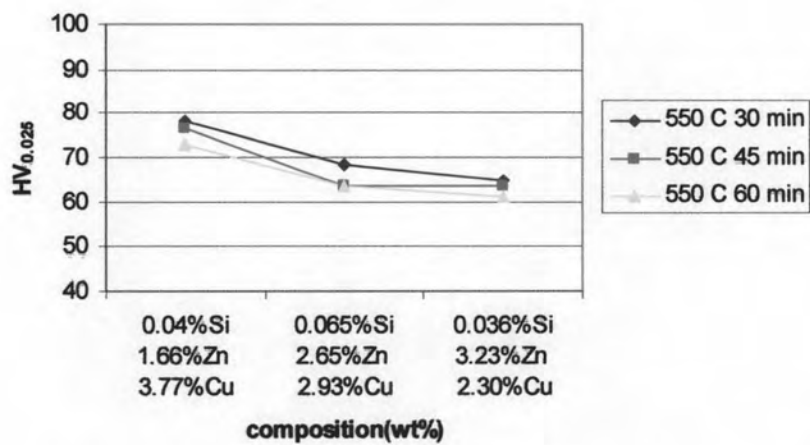
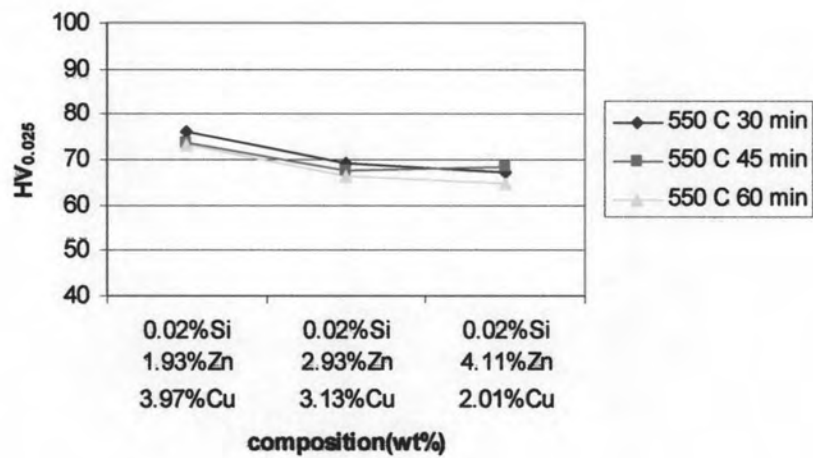
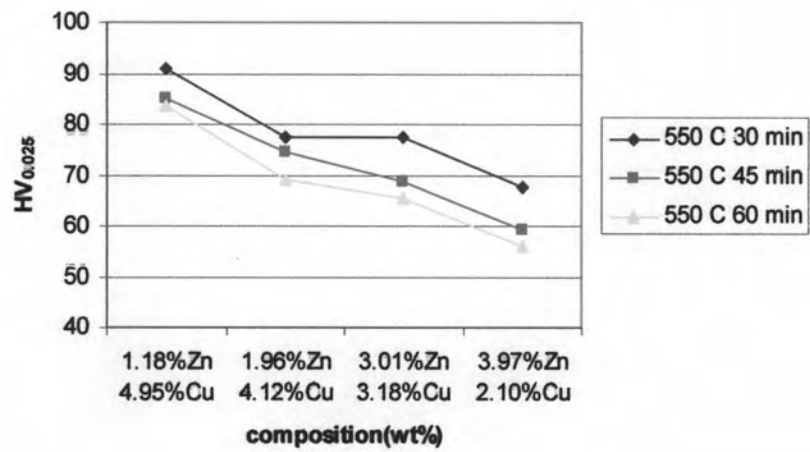
เกอร์

4.7.2.3 จากสภาพผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่ 750 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที

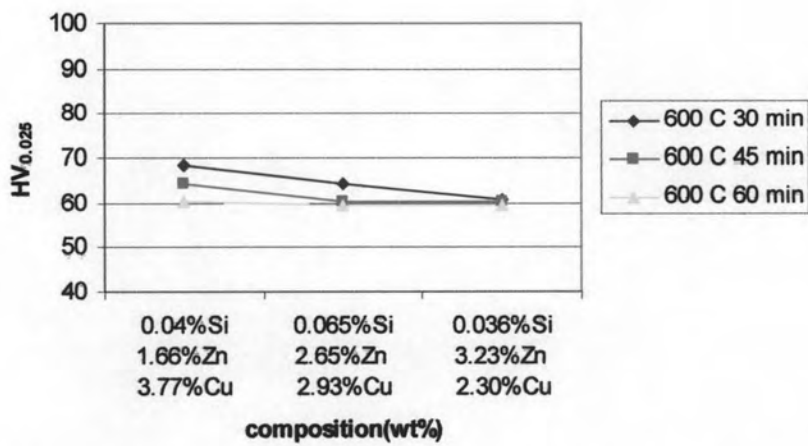
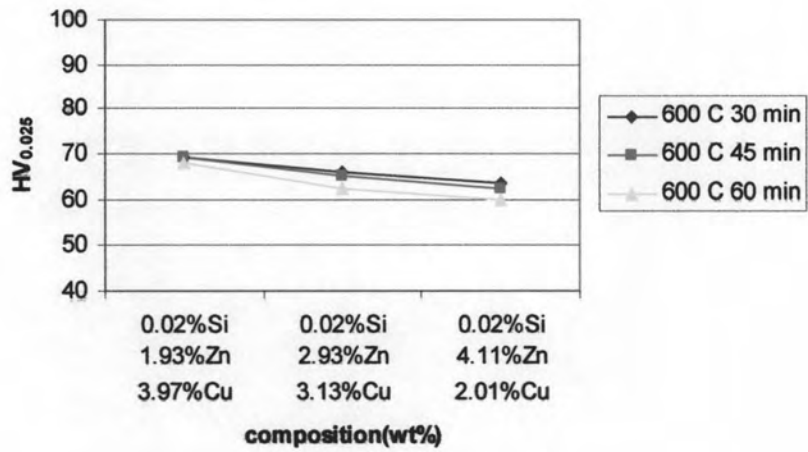
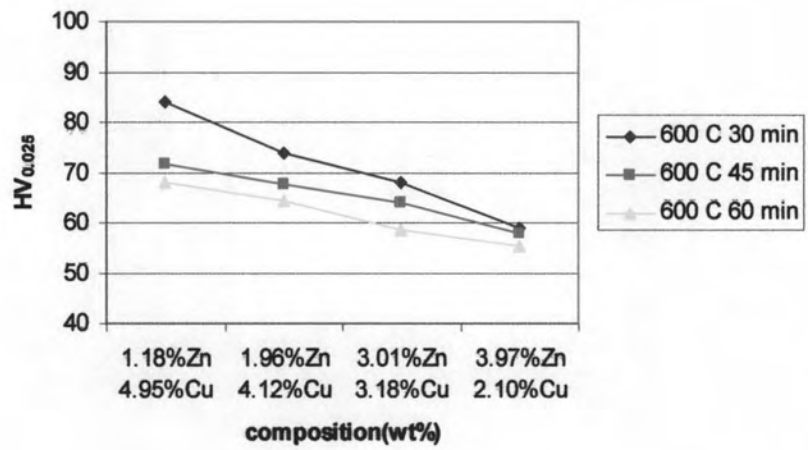
นำชิ้นงานขนาด 0.68 มิลลิเมตร แล้วอบอ่อนที่อุณหภูมิ 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส นาน 30, 45 และ 60 นาทีคลุมด้วยก๊าซไนโตรเจน จากนั้นเตรียมชิ้นงานตามยาวเพื่อวัดความแข็งนำชิ้นงาน ข้อมูลที่ได้ดังแสดงในตาราง ค-6 ภาคผนวก ค มาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณส่วนผสมทางเคมีกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.43-4.45 พบว่า โลหะผสมทั้ง 3 กลุ่ม คือ โลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 1-4 (กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน) โลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 5-7 (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคั้งที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และ โลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 1-4 (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนตั้งแต่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) มีแนวโน้มของค่าความแข็งลดลงตามปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้น (ปริมาณทองแดงที่ลดลง) เช่นเดียวกับชิ้นงานสภาพหล่อที่ผ่านการลดขนาดเหลือ 0.68 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิในการใช้อบอ่อนที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยใช้เวลาต่างกัน คือ 30, 45 และ 60 นาทีนั้น พบว่า ค่าความแข็งทั้ง 10 ชุด ที่ผ่านการอบอ่อนที่ 500 องศาเซลเซียส มีค่าตั้งแต่ 58.8-100.6 HV_{0.025} อบอ่อนที่ 550 องศาเซลเซียส มีค่าตั้งแต่ 56.1-91.0 HV_{0.025} และอบอ่อนที่ 600 องศาเซลเซียส มีค่าตั้งแต่ 55.3-83.8 HV_{0.025} จะเห็นได้ว่า ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่ 600 องศาเซลเซียส จะมีค่าต่ำสุด และค่าสูงสุดคือชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่ 500 องศาเซลเซียส จากนั้นพิจารณารูปที่ 4.46-4.48 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณส่วนผสมทางเคมีและค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ โดยพิจารณาเวลาที่ใช้ออบอ่อนเท่ากัน แต่อุณหภูมิต่างกัน คือ 500, 500 และ 600 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าความแข็งทั้ง 10 ชุด ใช้เวลาในการอบอ่อน 30 นาที มีค่าตั้งแต่ 58.9-100.6 HV_{0.025} ใช้เวลาในการอบอ่อน 45 นาที มีค่าตั้งแต่ 57.7-87.3 HV_{0.025} และใช้เวลาในการอบอ่อน 60 นาที มีค่าตั้งแต่ 55.3-84.5 HV_{0.025} จะเห็นได้ว่า ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนเวลาเท่ากัน ที่อุณหภูมิสูงกว่ามีค่าความแข็งลดลง เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็ดังได้อธิบายแล้วในหัวข้อ 4.7.2.1 และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.30 ค) จะเห็นได้ชัดเจนว่า ภายหลังจากการอบไฮโมจิในเซชัน 750 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที จะเกิดแถบหรือชั้นสีดำที่ขอบของชิ้นงานอย่างชัดเจนและมีความหนากว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่อุณหภูมิเดียวกัน นาน 30 นาที เมื่อชิ้นงานผ่านการลดขนาดหรือแปรรูปจะเห็นแถบหรือชั้นสีดำนี้ติดอยู่ที่ขอบหรือผิวนอกสุดของชิ้นงาน ดังนั้นเมื่อนำชิ้นงานกลุ่มนี้มาอบอ่อน แถบหรือชั้นสีดำที่ว่ นี้ก็จะสังเกตเห็นได้ชัดเจน และจะส่งผลต่อการผลิตเส้นลวดต่อไป



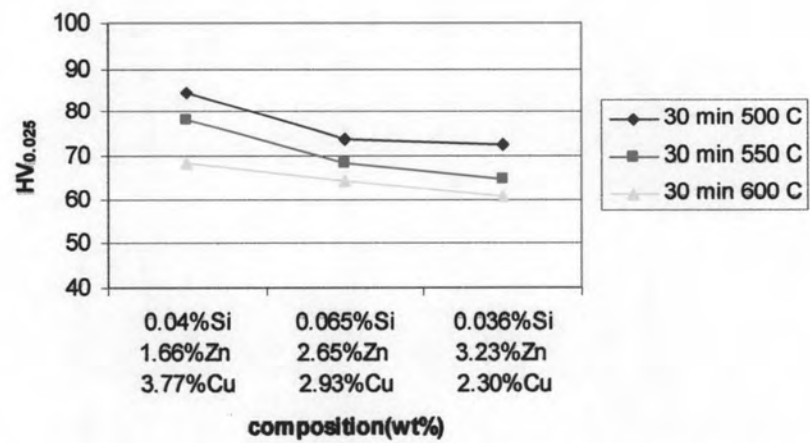
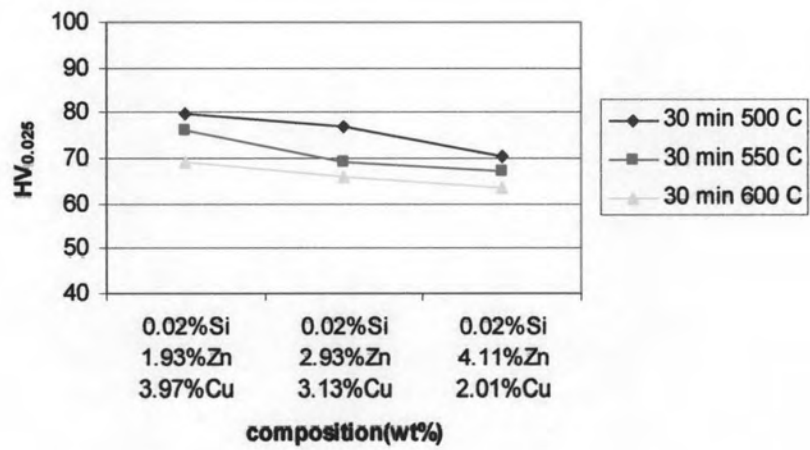
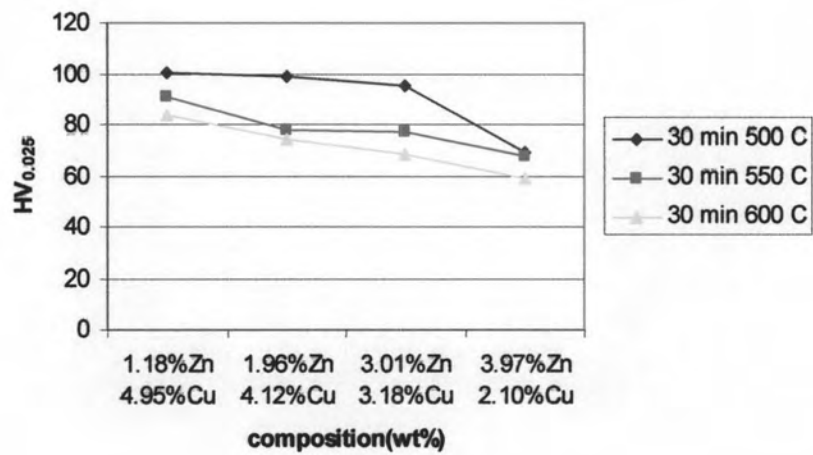
รูปที่ 4.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้อบร้อน ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสกับ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์



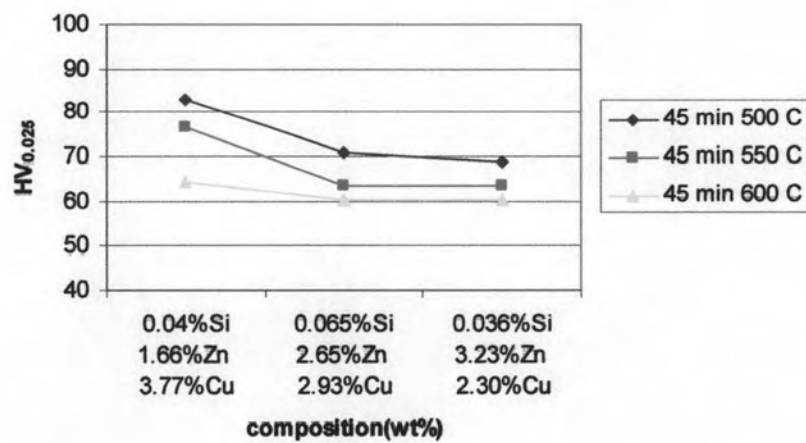
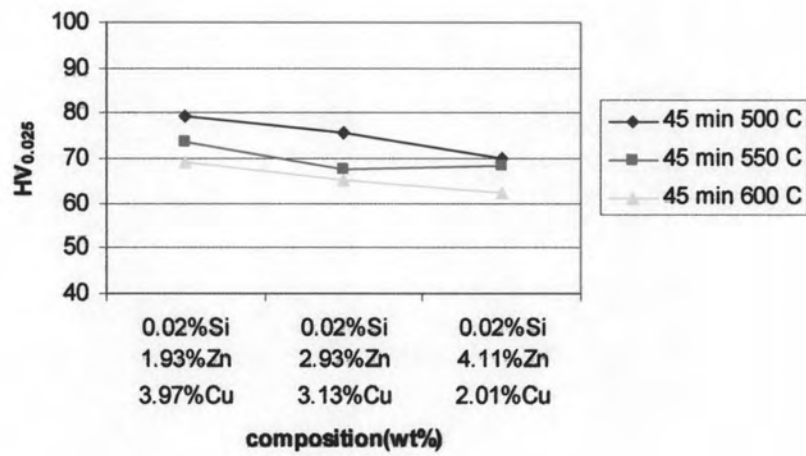
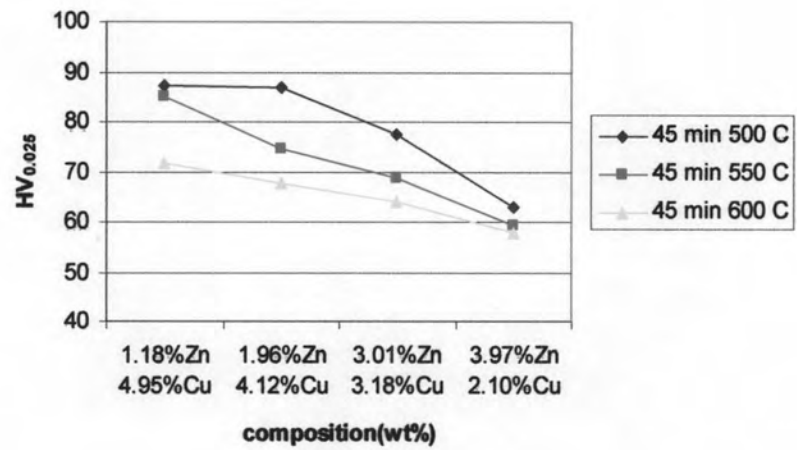
รูปที่ 4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้อบอ่อน ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสกับ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์



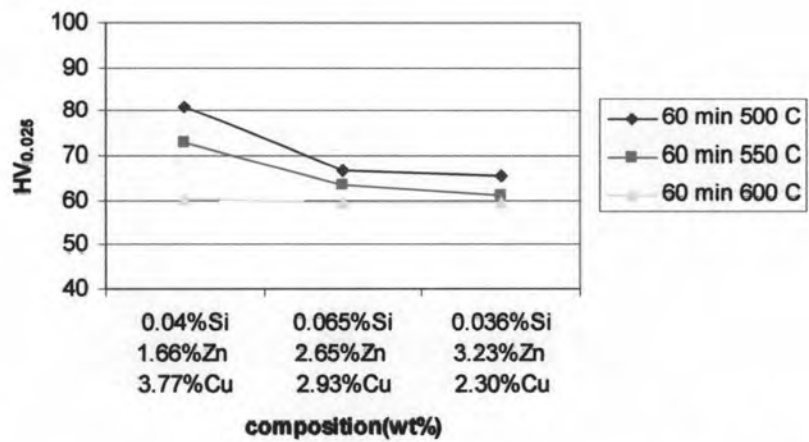
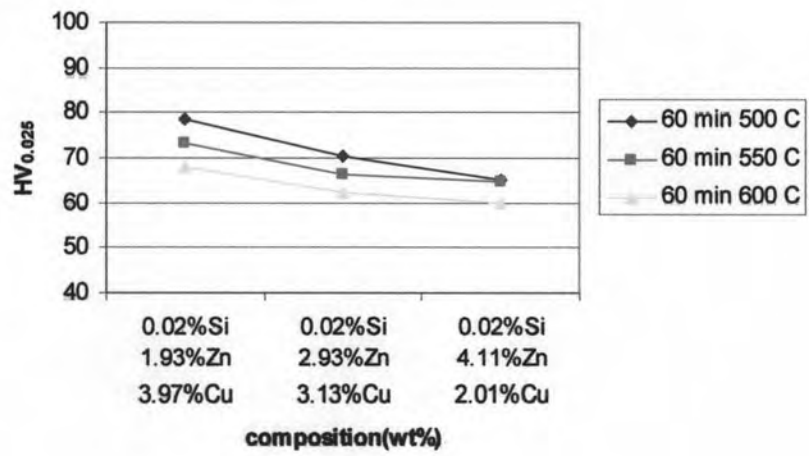
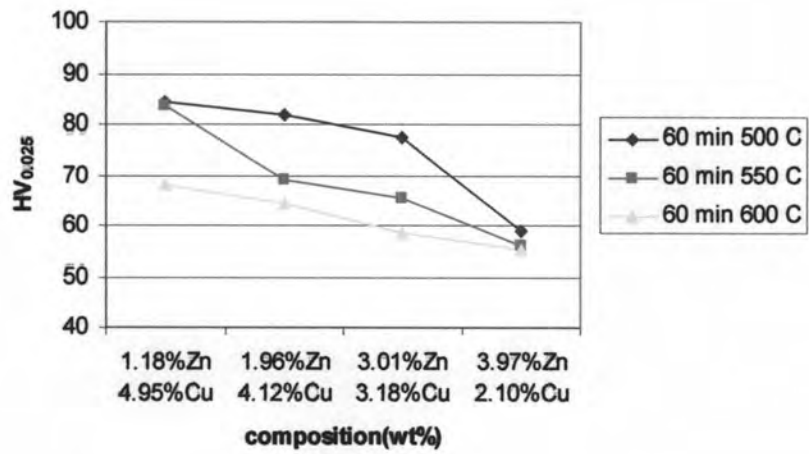
รูปที่ 4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้อบร้อน ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสกับ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์



รูปที่ 4.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้อบร้อน 30 นาที กับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์



รูปที่ 4.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้อบร้อน 45 นาที กับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์

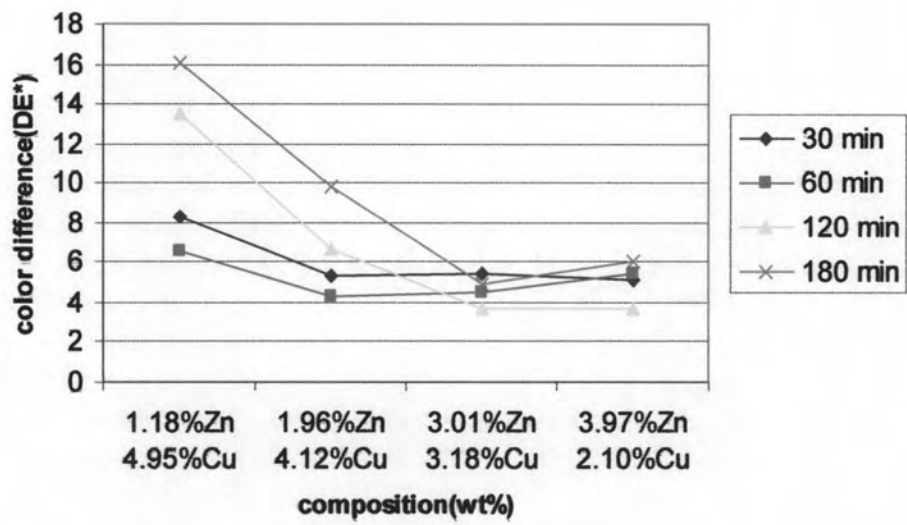


รูปที่ 4.48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้อบร้อน 60 นาที กับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์

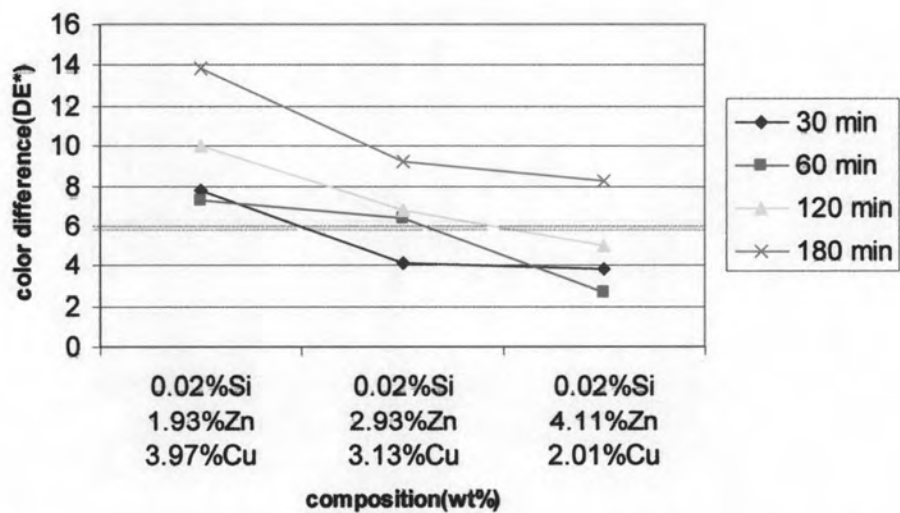
จากค่าความแข็งของชิ้นงานทั้ง 10 ชุด ที่แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกคือชิ้นงานสภาพหล่อ กลุ่มที่สองคือชิ้นงานที่ผ่านการอบไฮโมจิโนเซชัน 750 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และกลุ่มที่สามคือชิ้นงานที่ผ่านการอบไฮโมจิโนเซชัน 750 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที แล้วนำชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่มนี้ไปลดขนาดเหลือ 0.68 มิลลิเมตร อบอ่อนที่อุณหภูมิ 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส นาน 30, 45 และ 60 นาที ของโลหะผสมทั้ง 3 กลุ่ม พบว่า ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการอบอ่อนสูงขึ้น ดังค่าที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่ถ้าพิจารณาที่อุณหภูมิเดียวกันและ/หรือเวลาที่ใช้อบเท่ากัน ของชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่ม ยังพบอีกว่า ค่าความแข็งทั้ง 3 กลุ่ม มีค่าใกล้เคียงกัน ตัวอย่างเช่น อบอ่อนชิ้นงานที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งของชิ้นงานกลุ่มแรก กลุ่มที่สอง และกลุ่มที่สาม มีค่าความแข็งคือ 55.9-98.2 HV_{0.025} , 59.6-103.9 HV_{0.025} และ 58.8-100.6 HV_{0.025} ตามลำดับ หรืออบอ่อนชิ้นงานที่เวลาเท่ากันที่ 30 นาที ค่าความแข็งของชิ้นงานกลุ่มแรก กลุ่มที่สอง และกลุ่มที่สาม มีค่าความแข็งคือ 61.0-98.2 HV_{0.025} , 61.8-103.9 HV_{0.025} และ 58.9-100.6 HV_{0.025} ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าความแข็งแทบจะไม่แตกต่างกันเลย ดังนั้นถ้าต้องการนำเส้นลวดไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น สร้อยคอ หรือสร้อยข้อมือ ควรเลือกชิ้นงานสภาพหล่อแล้วลดขนาดเหลือ 0.68 มิลลิเมตร อบอ่อนที่ 500 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที เนื่องจากมีผิวสวยงาม สะดวกทั้งการผลิต ลดต้นทุนเนื่องจากไม่ต้องอบไฮโมจิโนเซชันและไม่ต้องอบอ่อนที่อุณหภูมิสูง

4.8 ผลการทดสอบความต้านทานการหมอง (Tarnish Resistance)

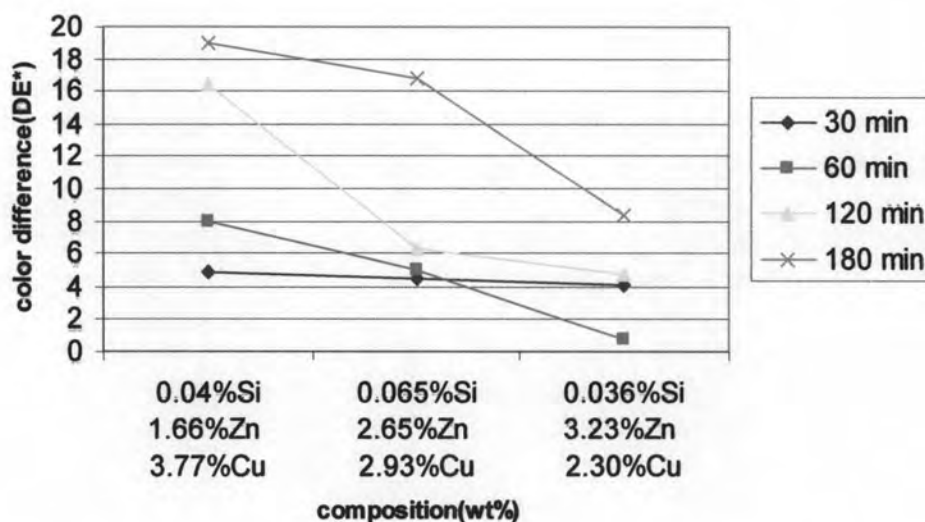
ผลการทดสอบความต้านทานการหมองของชิ้นงานทั้ง 10 ชุด ในบรรยากาศที่อิมมิดด้วยไอซัลเฟอร์ ที่ได้จากการละลายสารประกอบโซเดียมซัลไฟด์นาโนไฮเดรตในน้ำในภาชนะปิด (หยดกรดซัลฟิวริกประมาณ 1 มิลลิลิตร) โดยแขวนชิ้นงานทดสอบเป็นเวลาต่างๆ กัน คือ 30, 60, 120, และ 180 นาที ค่าความสว่าง L*, ค่าสี a*, b* และค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิว (Color difference; DE*) ที่ได้จากการตรวจสอบสีที่เปลี่ยนไปด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ แสดงไว้ในภาคผนวก ข นำค่า DE* ที่คำนวณได้มาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทองแดง สังกะสีและซิลิคอนกับค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิว ได้ดังรูปที่ 4.49-4.51



รูปที่ 4.49 กราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิวของโลหะผสมเงิน 940-ทองแดง-สังกะสี (กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน)



รูปที่ 4.50 กราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิวของโลหะผสมเงิน 940-ทองแดง-สังกะสี-ซิลิคอน (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคงที่ที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)



รูปที่ 4.51 กราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิวของโลหะผสมเงิน 940-ทองแดง-สังกะสี-ซิลิคอน (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนตั้งแต่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีผิวที่เกิดความหมองด้วยตาเปล่า ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจน รูปที่ 4.49-4.51 แสดงผลของปริมาณธาตุสังกะสีและซิลิคอนที่มีต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิวของโลหะผสมเงินเกรด 940 โดยผิวชิ้นงานทำปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ในบรรยากาศเกิดความหมองขึ้น พิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงสีผิว (DE^*) ในการทดสอบความหมองเป็นเวลาต่างๆ กัน พบว่าโลหะผสมที่ทิ้งไว้ในบรรยากาศอิมิตัวด้วยไอของซัลเฟอร์ สรุปได้ว่าโลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 1-4 (กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน) จะมีค่า DE^* ต่ำลงตามปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้น(ปริมาณทองแดงที่ลดลง) โลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 5-7 (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคงที่ที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) จะมีค่า DE^* ต่ำลงกว่ากลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน ส่วนโลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 8-10 (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนตั้งแต่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) จะมีค่า DE^* ต่ำกว่า 2 กลุ่มแรก นั้นหมายถึงผลการต้านทานความหมองดีกว่า แต่เมื่อเทียบภายในกลุ่มเดียวกัน พบว่า ค่า DE^* ต่ำลงแปรผกผันกับปริมาณซิลิคอนที่มีอยู่จริง

4.9 ผลการทดสอบการกัดกร่อนด้วยกระบวนทางเคมีไฟฟ้า โดยวิธีโพเทนชิโอสแตติก

หลังจากเตรียมชิ้นงานที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อนจำนวน 2 ชุด ชุดละ 10 ส่วนผสม โดยชุดแรกทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และชุดที่ 2 ทดสอบในสารละลายชนิดเดียวกัน แต่ปล่อยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เพื่อให้สารละลายอิ่มตัวด้วยบรรยากาศซัลเฟอร์ ซึ่งทั้ง 2 ชุด ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นต่อเซลล์ไฟฟ้าโดยชิ้นงานทดสอบอยู่ที่ขั้วไฟฟ้าโลหะทดสอบ (WE) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (RE) เป็น Ag/AgCl และขั้วไฟฟ้าวัดกระแส (CE) เป็นแท่งแพลตตินัม ทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก ซึ่งอาศัยการวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของโลหะทดสอบในสารละลาย โดยเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้ชิ้นงานทดสอบด้วยอัตราการสแกน 0.1 มิลลิโวลต์ต่อวินาที แล้ววัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า (E) และกระแสไฟฟ้า (I) เรียกกราฟนี้ว่าเส้นโพลาริเซชัน (แสดงในภาคผนวก จ) หาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{cor}) ศักย์ไฟฟ้าพาสซีเวชันปรมูมิ (E_{pp}) ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (E_p) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มพาสซีฟ (I_p) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{cor}) จากเส้นโพลาริเซชัน แล้วนำค่า I_{cor} ไปคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate) จากสูตรในสมการที่ (3.1) หรือคำนวณได้โดยตรงจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณที่ต่อกับเครื่องโพเทนชิโอสแตท ได้ค่าดังตารางที่ 4.11 และตารางที่ 4.12 เพื่อนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะทดสอบต่อไป



ตารางที่ 4.11 แสดงค่า E_{corr} , E_{pp} , E_p , I_{corr} , I_p และ Corrosion Rate ที่วัดได้จากเส้นโพลาริเซชัน
ของชิ้นงานทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

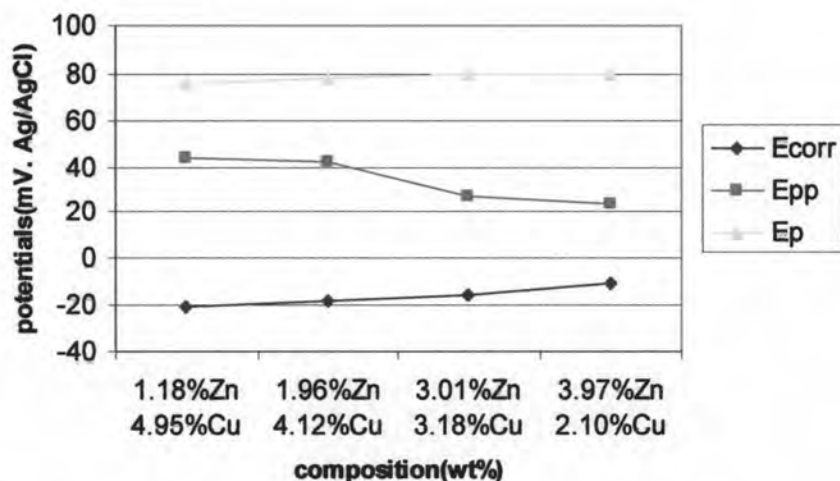
ส่วนผสมทางเคมี (wt.%) โดย balance of Ag	E_{corr} (mV)	E_{pp} (mV)	E_p (mV)	I_p ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Corrosion Rate ($\times 10^{-2} \text{mm}/\text{year}$)
1) 1.18%Zn-4.95%Cu	-21	44	76	3.252	2.210	0.7448
2) 1.96%Zn-4.12%Cu	-18	42	78	2.311	1.438	0.4847
3) 3.01%Zn-3.18%Cu	-16	27	80	1.8	0.5337	0.1799
4) 3.97%Zn-2.10%Cu	-11	24	80	1.158	0.3342	0.1127
5) 0.02%Si-1.93%Zn-3.97%Cu	-61	-10	74	5.190	2.131	3.691
6) 0.02%Si-2.93%Zn-3.13%Cu	-59	-12	77	3.494	1.095	2.033
7) 0.02%Si-4.11%Zn-2.01%Cu	-53	-33	79	2.931	0.7704	0.7184
8) 0.04%Si-1.66%Zn-3.77%Cu	-50	-3	72	4.955	1.1070	3.733
9) 0.065%Si-2.65%Zn - 2.93%Cu	-36	-8	77	1.2	0.5426	1.829
10) 0.036%Si-3.23%Zn - 2.30%Cu	-31	-17	78	1.095	0.3110	1.048

ตารางที่ 4.12 แสดงค่า E_{corr} , E_{pp} , E_p , I_{corr} , I_p และ Corrosion Rate ที่วัดได้จากเส้นโพลาริเซชันของชิ้นทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอิมมิตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

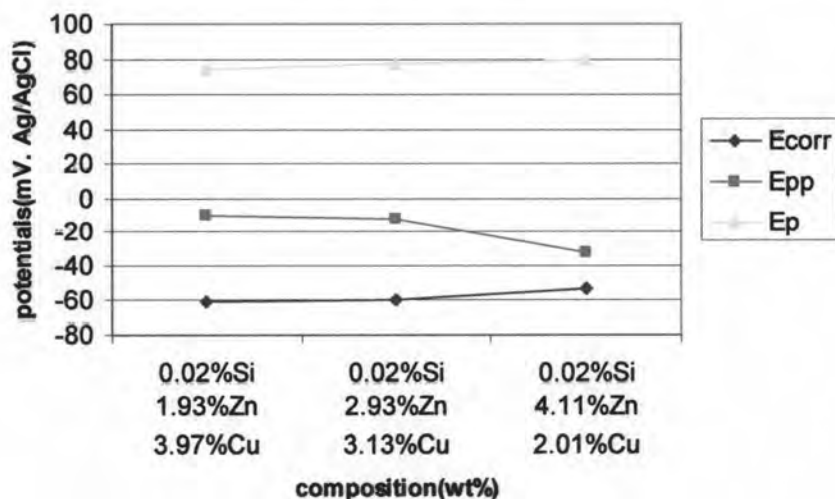
ส่วนผสมทางเคมี (wt.%) โดย balance of Ag	E_{corr} (mV)	E_{pp} (mV)	E_p (mV)	I_p ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Corrosion Rate ($\times 10^{-2}$ mm/year)
1) 1.18%Zn -4.95%Cu	-485	-	-	-	5.010	16.89
2) 1.96%Zn -4.12%Cu	-480	-	-	-	4.891	16.03
3) 3.01%Zn -3.18%Cu	-477	-	-	-	4.109	12.88
4) 3.97%Zn -2.10%Cu	-474	-	-	-	3.551	11.97
5) 0.02%Si-1.93%Zn -3.97%Cu	-490	-	-	-	4.754	16.49
6) 0.02%Si-2.93%Zn -3.13%Cu	-486	-	-	-	3.642	12.28
7) 0.02%Si-4.11%Zn -2.01%Cu	-477	-	-	-	3.018	10.57
8) 0.04%Si-1.66%Zn -3.77%Cu	-487	-	-	-	3.821	13.85
9) 0.065%Si-2.65%Zn - 2.93%Cu	-480	-	-	-	3.134	10.17
10) 0.036%Si-3.23%Zn - 2.30%Cu	-473	-	-	-	2.871	9.678

ค่าต่างๆ ได้จากเส้นโพลาริเซชันของการกัดกร่อนของโลหะทดสอบ โดยชุดแรกทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส หาค่า E_{corr} , E_{pp} , E_p , I_{corr} , I_p ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.11 และชุดที่ 2 ทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิมมิตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส หาค่า E_{corr} , I_{corr} ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.12 แต่ไม่สามารถหาค่า E_{pp} , E_p , I_p ได้ เนื่องจากโลหะทดสอบไม่เกิดฟิล์มขึ้นที่ผิว สาเหตุน่าจะเกิดจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งเป็นสารประกอบซัลเฟอร์มีผลยับยั้งการเกิดฟิล์มของโลหะผสมทั้ง 10 ชุด

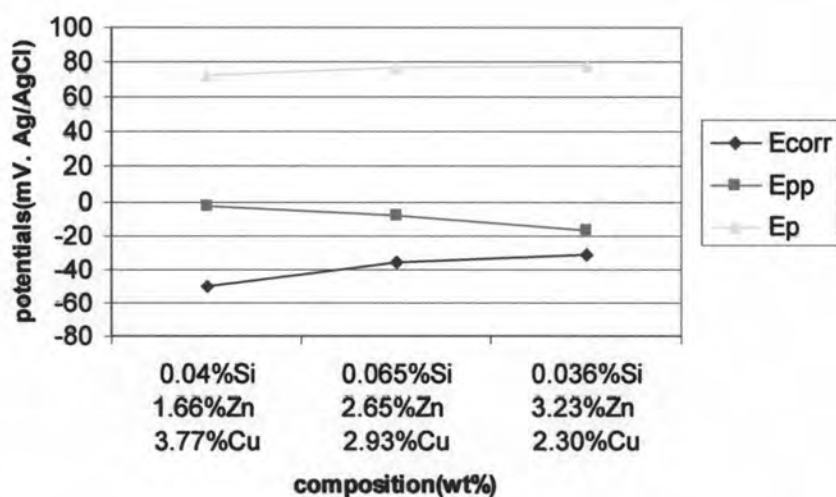
จากนั้นนำค่าที่ได้ ไปเขียนกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าต่างๆ กับปริมาณซิลิคอน สังกะสี และทองแดง ส่วนภาพลักษณะชิ้นงานและเส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด รวมถึงวิธีการหาค่าต่างๆ แสดงไว้ในภาคผนวก จ



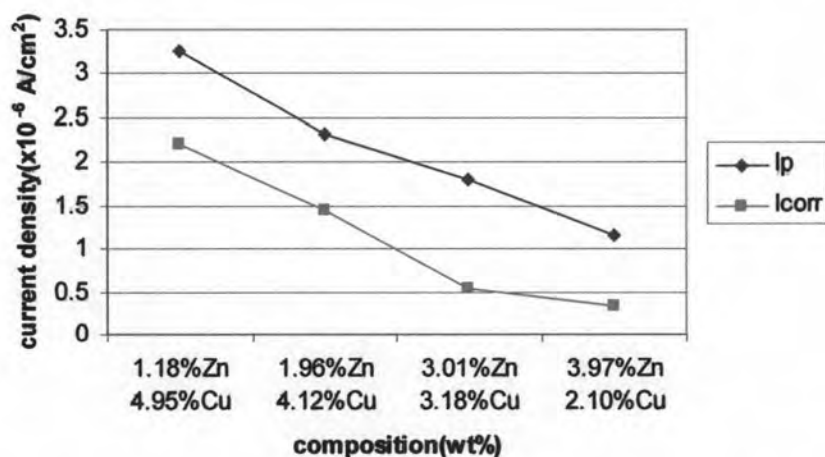
รูปที่ 4.52 ผลของธาตุสังกะสีและทองแดงในโลหะผสมเงินเกรด 940 ต่อค่า E_{corr} , E_{pp} และ E_p ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส(กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน)



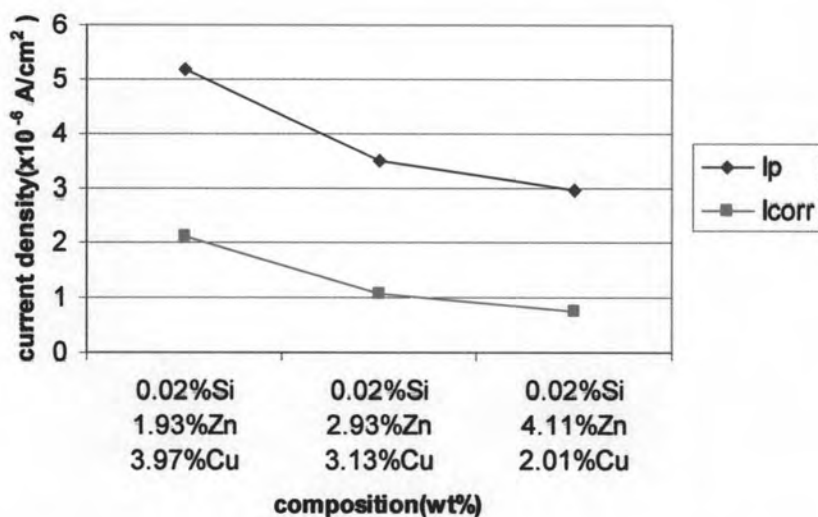
รูปที่ 4.53 ผลของธาตุซิลิคอน สังกะสีและทองแดงในโลหะผสมเงินเกรด 940 ต่อค่า E_{corr} , E_{pp} และ E_p ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส(กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคงที่ที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)



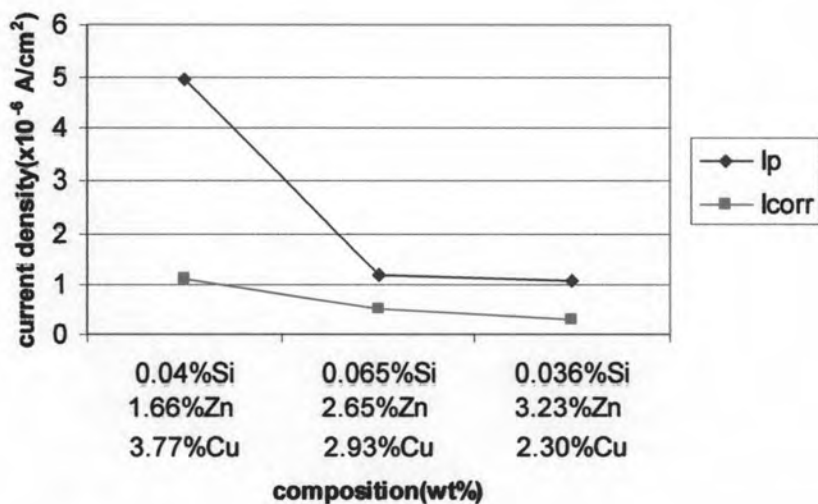
รูปที่ 4.54 ผลของธาตุซิลิคอน สังกะสีและทองแดงในโลหะผสมเงินเกรด 940 ต่อค่า E_{corr} , E_{pp} และ E_p ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนตั้งแต่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)



รูปที่ 4.55 ผลของธาตุสังกะสีและทองแดงในโลหะผสมเงินเกรด 940 ต่อค่า I_p และ I_{corr} ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (กลุ่มที่ไม่มีเติมซิลิคอน)



รูปที่ 4.56 ผลของธาตุซิลิคอน สังกะสีและทองแดงในโลหะผสมเงินเกรด 940 ต่อค่า I_p และ I_{corr} ใน สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคงที่ที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

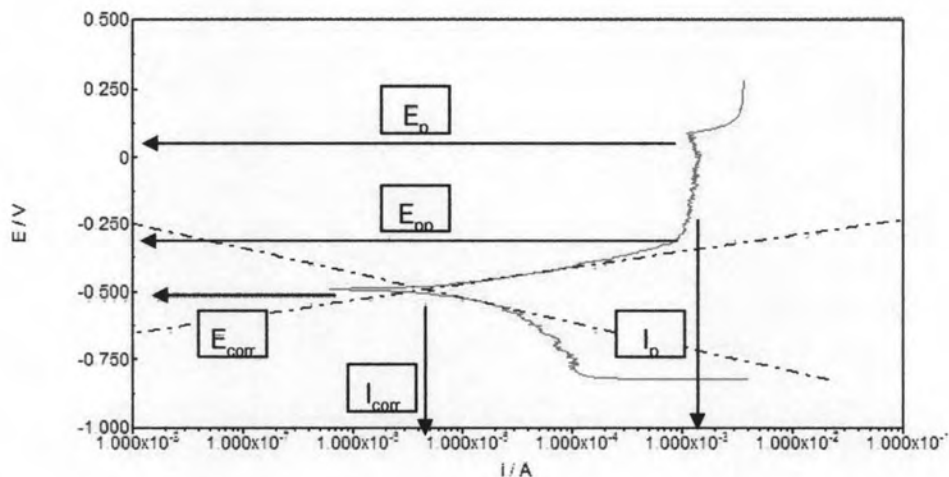


รูปที่ 4.57 ผลของธาตุซิลิคอน สังกะสีและทองแดง ในโลหะผสมเงินเกรด 940 ต่อค่า I_p และ I_{corr} ใน สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอน 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

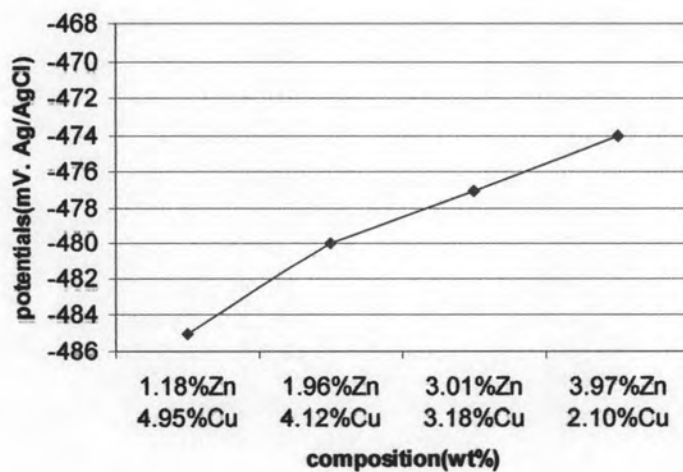
จากรูปที่ 4.52-4.57 ทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า โลหะผสมเงินเกรด 940 (กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน) เมื่อปริมาณสังกะสีเพิ่มขึ้นทำให้ค่า E_{corr} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่ไม่ชัดเจนมากนัก ค่า E_p ค่อนข้างคงที่ และค่า E_{pp} มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน แสดงว่าปริมาณสังกะสีที่เติมลงในโลหะผสมเงินเกรด 940 มีผลในการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของฟิล์มที่เกิดขึ้น โดยโลหะผสมเงินเกรด 940 ที่มีปริมาณสังกะสี 3.97 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่า $E_{corr} = -11$ mV ซึ่งสูงกว่าในโลหะผสมที่มีปริมาณสังกะสี 1.18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ($E_{corr} = -21$ mV) และค่า E_p ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแล้วคงที่นั้น แสดงว่าปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการต้านทานการแตกตัวของฟิล์มป้องกัน โดยโลหะผสมที่มีค่า E_{corr} และ E_p สูง จะต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี ส่วนค่า E_{pp} ที่มีแนวโน้มลดลงนั้น นั้นแสดงว่าความสามารถในการสร้างหรือการเกิดฟิล์มได้ดีซึ่งแปรผันตามปริมาณสังกะสีที่เติมลงไป ส่วนโลหะผสมเงินเกรด 940 (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคงที่ที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) พบว่า เมื่อมีปริมาณสังกะสีเพิ่มขึ้นทำให้ค่า E_{corr} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่า E_{pp} มีแนวโน้มลดลง และ E_p เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อนำค่า E_{corr} , E_{pp} และ E_p เปรียบเทียบกับโลหะผสมเงินเกรด 940 (กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน) พบว่า ค่า E_{corr} มีค่าต่ำกว่า แสดงว่า โลหะผสมเงินกลุ่มนี้เกิดการกัดกร่อนได้ดีกว่าโลหะผสมเงินเกรด 940 (กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน) แต่เมื่อพิจารณาที่ค่า E_{pp} และ E_p พบว่า มีค่าต่ำกว่า นั้นแสดงว่า โลหะผสมเงินกลุ่มนี้สามารถเกิดพาสซีเวชันปฐมภูมิได้เร็วกว่า ทำให้สามารถต้านทานการแตกตัวของฟิล์มป้องกันได้ดีกว่า และเมื่อพิจารณาที่กลุ่มโลหะผสมเงินเกรด 940 (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนตั้งแต่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) พบว่า ค่า E_{corr} มีค่าสูงกว่าโลหะผสมเงินเกรด 940 (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคงที่ที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) แต่มีค่าต่ำกว่าโลหะผสมเงินเกรด 940 (กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน) นั้นแสดงว่า ปริมาณซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นมีผลในการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของฟิล์มที่เกิดขึ้น และค่า E_p มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ประมาณ 72-78 mV และ E_{pp} มีค่าต่ำสุด ประมาณ (-17) – (-3) mV นั้นแสดงว่า โลหะผสมกลุ่มนี้สามารถเกิดพาสซีเวชันปฐมภูมิได้เร็วและต้านทานการกัดกร่อนได้ดีที่สุด

เมื่อพิจารณาที่ค่า I_p ของโลหะผสมเงินเกรด 940 ทั้ง 10 ชุด พบว่า โลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 5 โดยมีส่วนผสมทางเคมี 0.02%Si-1.93%Zn -3.97%Cu-Balance of Ag มีค่า I_p สูงสุด คือ $5.190 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ และค่า I_p ของโลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 10 โดยมีส่วนผสมทางเคมี 0.036%Si -3.23%Zn -2.30%Cu -Balance of Ag มีค่าลดลงเหลือเพียง $1.095 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ นั้นแสดงว่า โลหะผสมชุดที่มีปริมาณสังกะสีและซิลิคอนอยู่ในปริมาณที่สูงสามารถปกป้องและ / หรือความแข็งแรงของฟิล์มสูงกว่าโลหะผสมชุดอื่น ส่วนค่า I_{corr} หาได้จากความชันของเส้นโค้งระหว่างเส้นโค้งคาโทดิกและอโนดิก จากนั้นนำค่า I_{corr} ไปคำนวณเพื่อหาค่าอัตราการกัดกร่อนโดยใช้

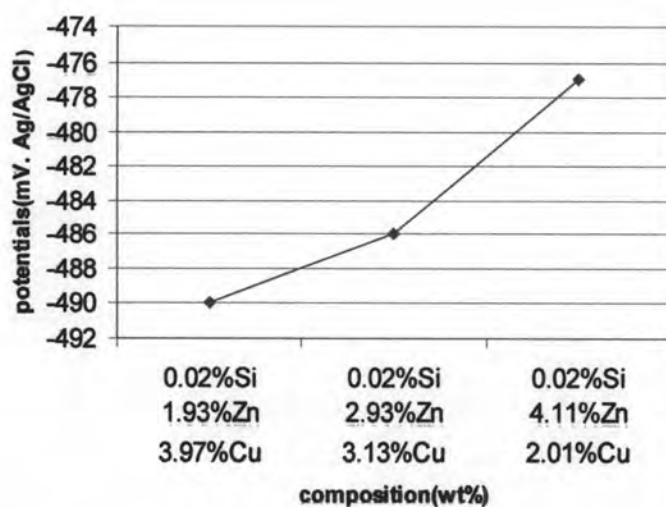
โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับเครื่องโพเทนชิโอสแตท หรือนำค่า I_{corr} ที่หาได้ ไปคำนวณโดยใช้สูตรจากสมการที่ (3.1) ผลการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 4.11



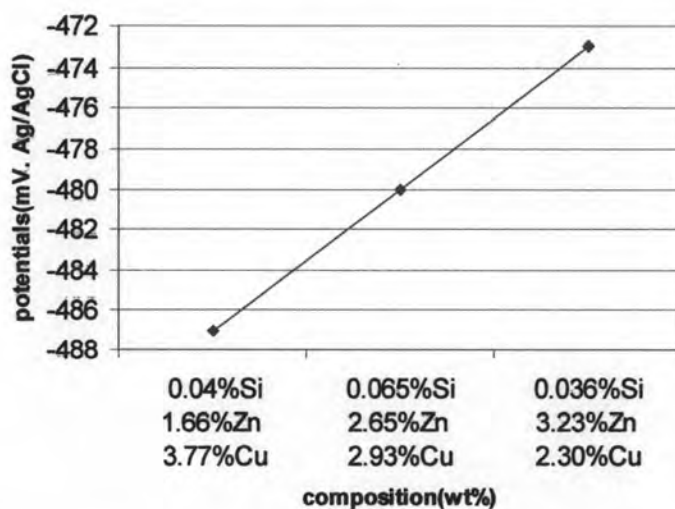
รูปที่ 4.58 แสดงการหาค่า E_{corr} , E_{pp} , E_p , I_p และ I_{corr} จากจุดตัดระหว่างเส้นโค้งคาโทดิก และเส้นโค้งแอโนดิก



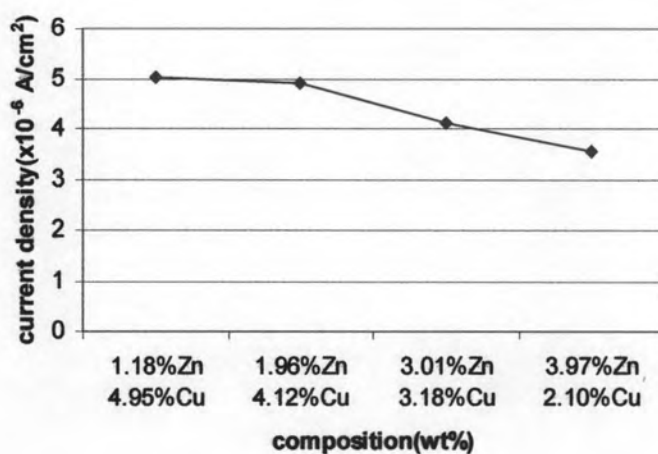
รูปที่ 4.59 ผลของธาตุสังกะสีและทองแดงในโลหะผสมเงินเกรด 940 ต่อค่า E_{corr}
ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิมิตด้วยก๊าซ
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส(กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน)



รูปที่ 4.60 ผลของธาตุซิลิคอน สังกะสีและทองแดงในโลหะผสมเงินเกรด 940 ต่อค่า E_{corr} ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส(กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคงที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)



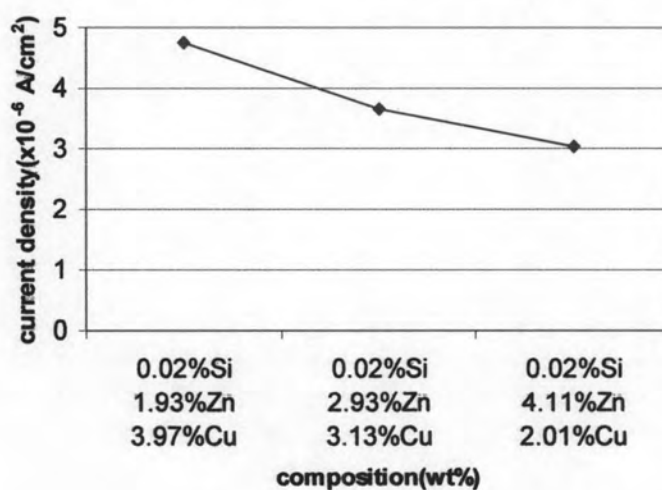
รูปที่ 4.61 ผลของธาตุซิลิคอน สังกะสีและทองแดงในโลหะผสมเงินเกรด 940 ต่อค่า E_{corr} ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส(กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอน 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)



รูปที่ 4.62 ผลของธาตุสังกะสีและทองแดงในโลหะผสมเงินเกรด 940 ต่อค่า I_{corr}

ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิมมิตด้วยก๊าซ

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน)

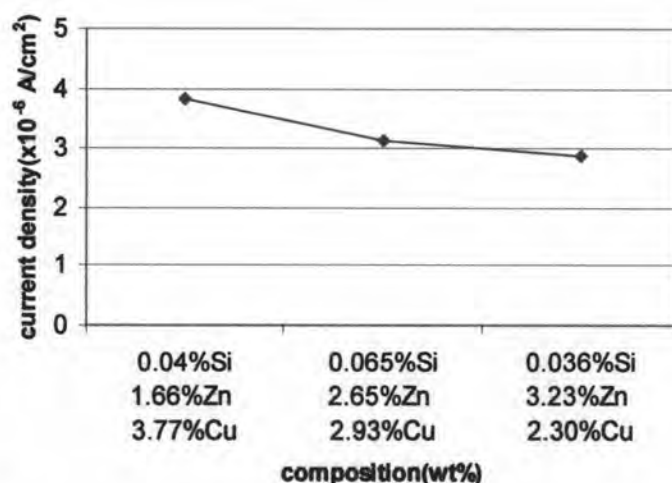


รูปที่ 4.63 ผลของธาตุซิลิคอน สังกะสีและทองแดง ในโลหะผสมเงินเกรด 940 ต่อค่า

I_{corr} ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิมมิตด้วยก๊าซ

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอน

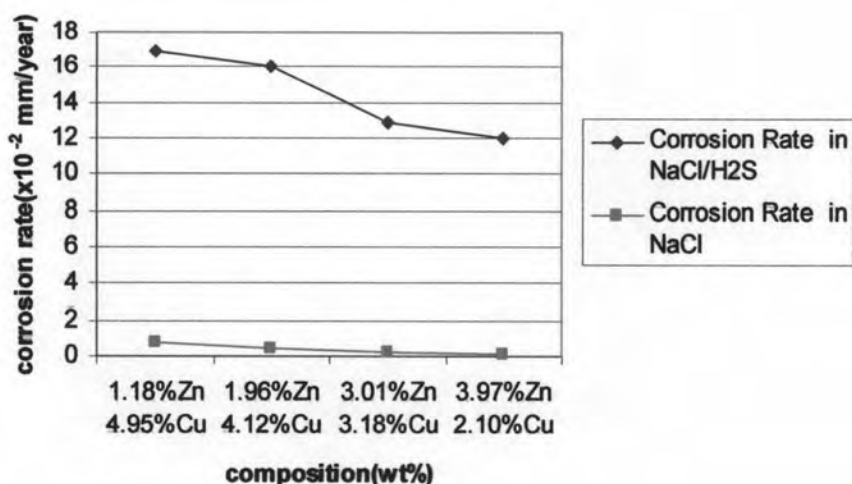
คงที่ที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)



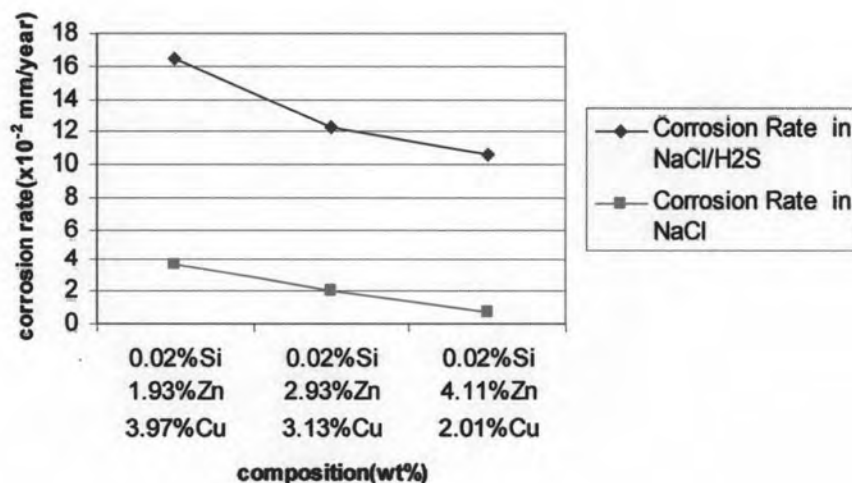
รูปที่ 4.64 ผลของธาตุซิลิคอน สังกะสีและทองแดงในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง ต่อค่า I_{corr} ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิมิตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอน 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

จากรูปที่ 4.59-4.64 ทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิมิตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ของโลหะผสมเงินเกรด 940 ทั้ง 10 ชุด โดยการอภิปรายจะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม พบว่า โลหะผสมเงินเกรด 940 กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคงที่ที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และกลุ่มที่มีการเติมซิลิคอน ตั้งแต่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มเหมือนกัน กล่าวคือ เมื่อปริมาณสังกะสีมากขึ้น มีผลในการเพิ่มค่า E_{corr} แต่ไม่ชัดเจนมากนัก ขณะเดียวกันค่า I_{corr} มีแนวโน้มลดลง นั่นแสดงว่า ปริมาณสังกะสีในโลหะผสมที่เพิ่มขึ้น ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมได้ เมื่อพิจารณา 2 กลุ่มๆ ที่มีการเติมซิลิคอนในปริมาณแตกต่างกัน พบว่า กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนจะมี ค่า E_{corr} สูงกว่าและ I_{corr} ต่ำกว่ากลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน นั่นก็แสดงว่า ปริมาณซิลิคอนในโลหะผสมช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมได้เช่นกัน

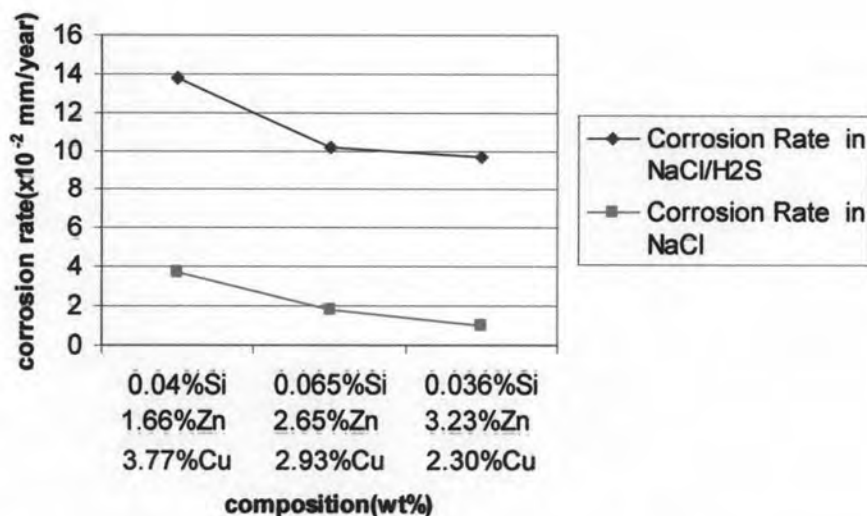




รูปที่ 4.65 ผลของการเติมทั้งธาตุสังกะสีและทองแดงในโลหะผสมเงินเกรด 940 ต่อค่าใน อัตราการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจน ซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.66 ผลของการเติมทั้งธาตุซิลิคอน สังกะสี และทองแดงในโลหะผสมเงินเกรด 940 ต่อค่าอัตราการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.67 ผลของการเติมทั้งธาตุซิลิคอน สังกะสี และทองแดงในโลหะผสมเงินเกรด 940 ต่อค่าอัตราการกัดกร่อนในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

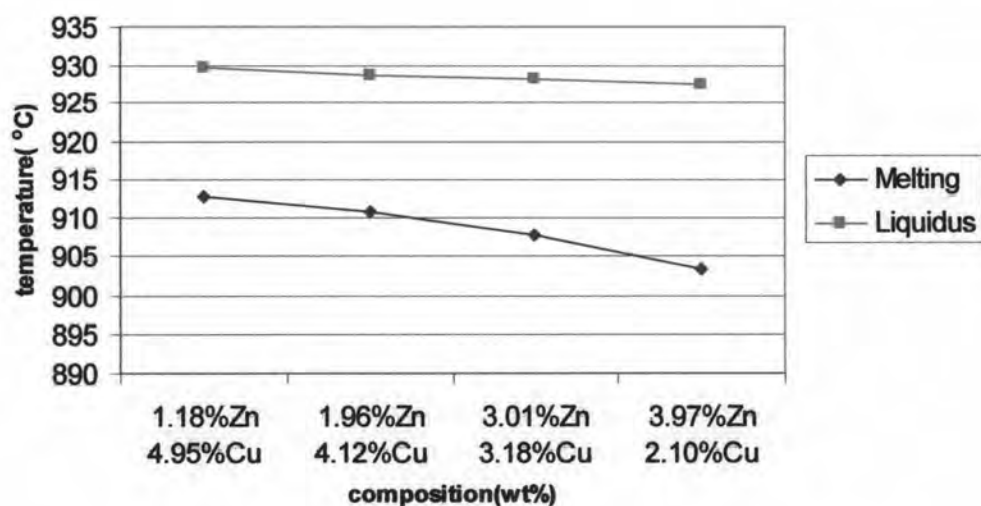
จากรูปที่ 4.65-4.67 ค่าอัตราการกัดกร่อนหรืออัตราการสูญเสียเนื้อโลหะ (mm/year) คำนวณได้จากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน หรือ i_{cor} ที่ได้จากเส้นโพลาริเซชัน ในการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะผสมเงินเกรด 940 ทั้ง 10 ชุด จะเห็นได้ว่าเมื่อโลหะผสมเงินเกรด 940 ทั้ง 3 กลุ่ม มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือ อัตราการกัดกร่อนที่คำนวณได้มีค่าลดลงตามปริมาณสังกะสีและซิลิคอนที่เพิ่มขึ้น กล่าวอีกนัยหนึ่งคือโลหะผสมที่มีปริมาณสังกะสีและซิลิคอนสูงสามารถต้านทานการกัดกร่อนและด้านการหมองได้ดีกว่า สังเกตได้จากกราฟรูปที่ 4.66 และ 4.67 พบว่าเมื่อเติมซิลิคอนคงที่ที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับเติมซิลิคอนตั้งแต่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าอัตราการกัดกร่อนจะลดลงแปรตามปริมาณสังกะสีและซิลิคอนที่เพิ่มขึ้น ส่วนกลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน พบว่า อัตราการกัดกร่อนจะลดลงเมื่อปริมาณสังกะสีเพิ่มขึ้น แสดงว่าทำให้โลหะเกิดการกัดกร่อนได้ยากขึ้น

4.10 ผลการตรวจสอบช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว

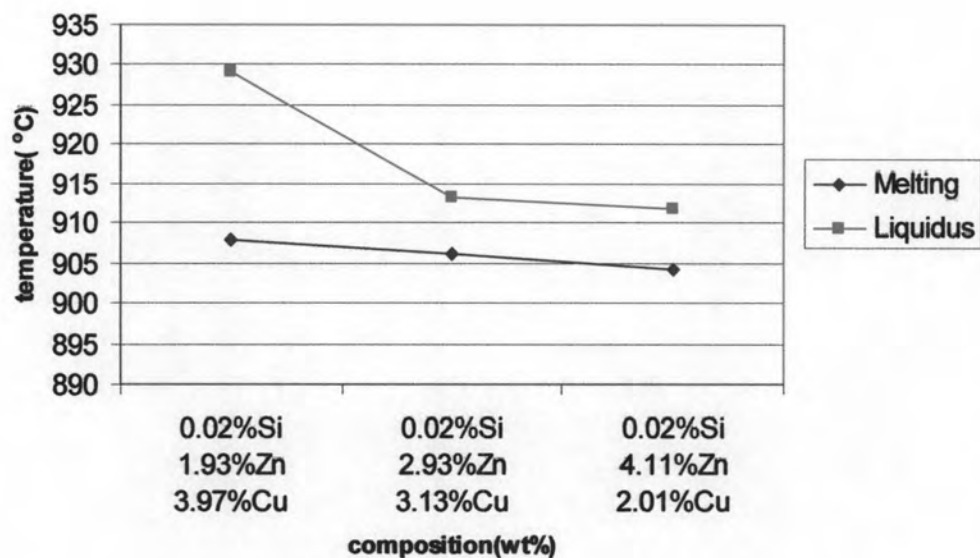
ทดสอบวัดช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวด้วยเครื่อง DTA (Differential Thermal Analysis) ซึ่งผลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.68-4.73

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการทดสอบช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว

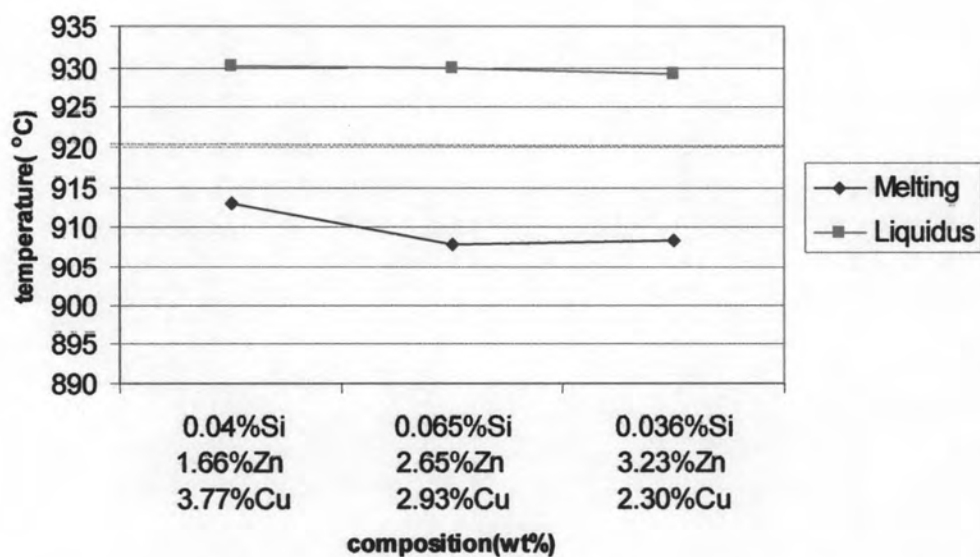
โลหะผสม ชุดที่	ส่วนผสมทางเคมี (%wt) โดย balance of Ag	อุณหภูมิหลอมเหลว (melting) (°C)	อุณหภูมิหลอมเหลว สมบูรณ์ (Liquidus) (°C)
1	1.18%Zn -4.95%Cu	912.8	929.8
2	1.96%Zn -4.12%Cu	910.8	928.9
3	3.01%Zn -3.18%Cu	907.9	928.4
4	3.97%Zn -2.10%Cu	903.4	927.7
5	0.02%Si-1.93%Zn -3.97%Cu	907.8	929.1
6	0.02%Si-2.93%Zn -3.13%Cu	906.1	913.3
7	0.02%Si-4.11%Zn -2.01%Cu	904.2	911.8
8	0.04%Si-1.66%Zn -3.77%Cu	913.0	930.1
9	0.065%Si-2.65%Zn -2.93%Cu	908.0	929.9
10	0.036%Si-3.23%Zn -2.30%Cu	908.3	929.2



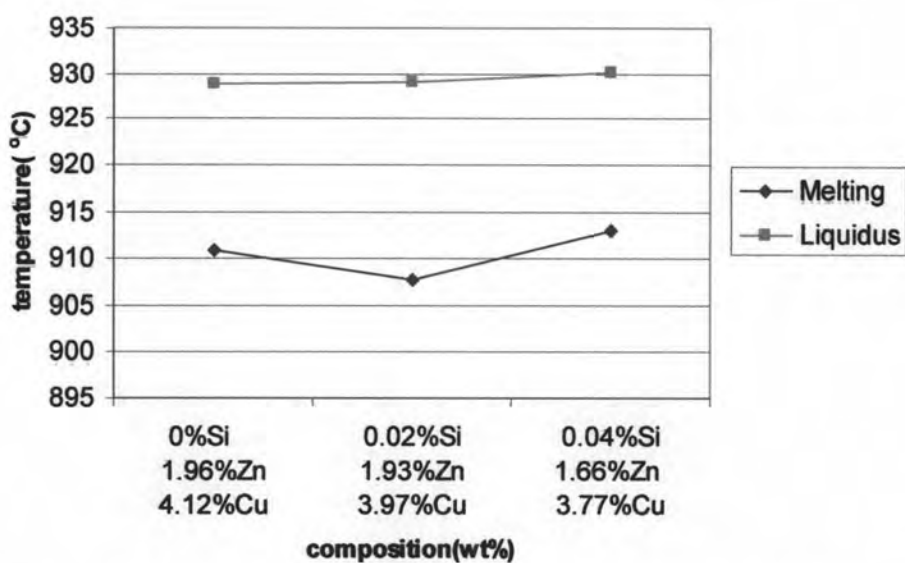
รูปที่ 4.68 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสังกะสีและทองแดงกับช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน)



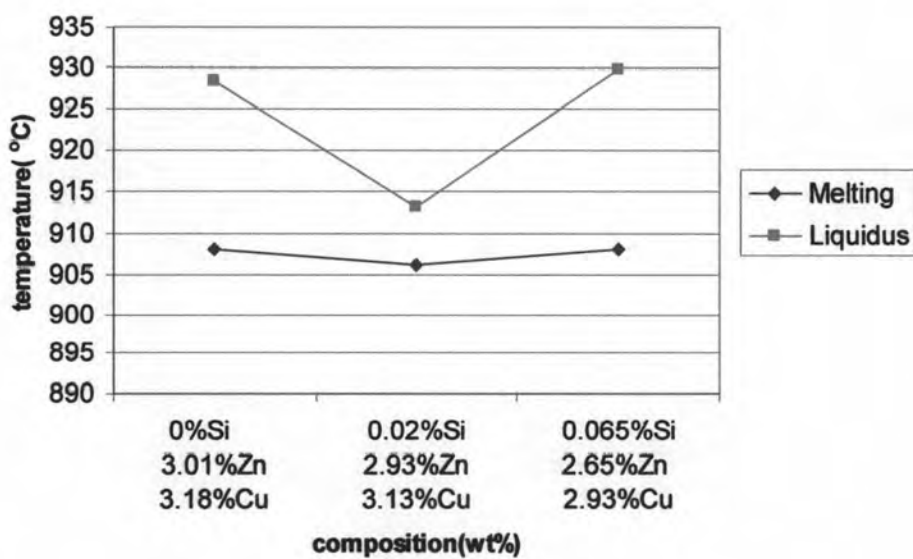
รูปที่ 4.69 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิลิคอน สังกะสีและทองแดงกับช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคงที่ที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)



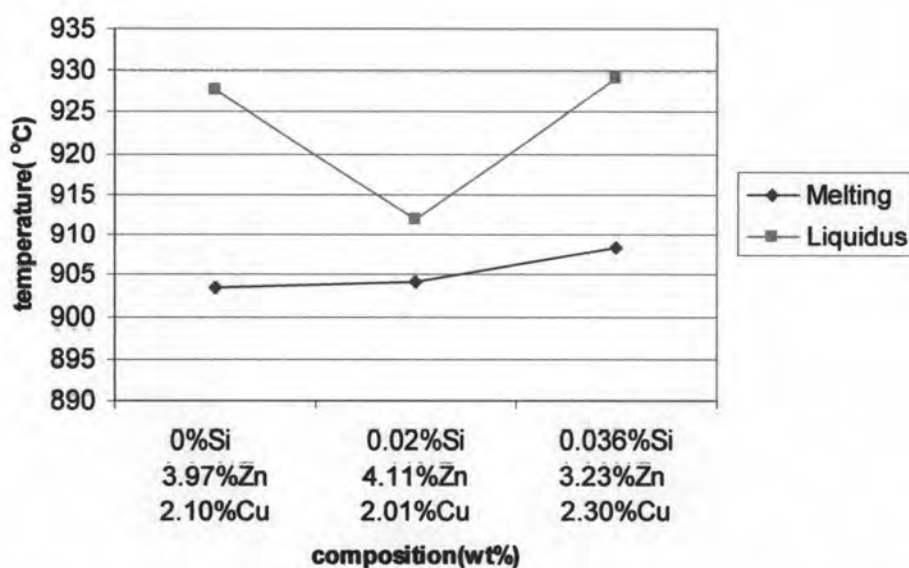
รูปที่ 4.70 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิลิคอน ทองแดง และสังกะสีกับช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนตั้งแต่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)



รูปที่ 4.71 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิลิคอน สังกะสี และ ทองแดง ที่ใกล้เคียงกัน กับช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (โลหะผสมชุดที่ 2, 5 และ 8 ตามลำดับ)



รูปที่ 4.72 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิลิคอน สังกะสี และ ทองแดง ที่ใกล้เคียงกัน กับช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (โลหะผสมชุดที่ 3, 6 และ 9 ตามลำดับ)

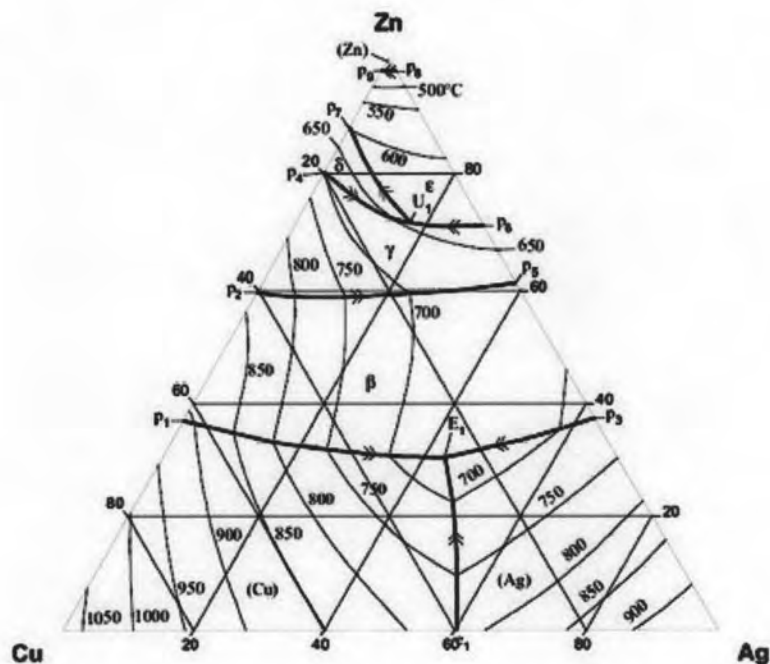


รูปที่ 4.73 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิลิคอน สังกะสีและทองแดงที่ใกล้เคียงกัน กับช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (โลหะผสมชุดที่ 4, 7 และ 10 ตามลำดับ)

จากตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.68-4.70 พบว่า พิจารณาที่โลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 1-4 (กลุ่มที่ไม่มีการเติมซิลิคอน) จะมีอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting) ในช่วง 903.4-912.8 °C และอุณหภูมิ ณ จุดที่มีการหลอมเหลวสมบูรณ์ (Liquidus) ในช่วง 927.7-929.8 °C ส่วนโลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 5-7 (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนคั้งที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) จะมีอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting) ในช่วง 904.2-907.8 °C และอุณหภูมิ ณ จุดที่มีการหลอมเหลวสมบูรณ์ (Liquidus) ในช่วง 911.8-929.1 °C และพิจารณาที่โลหะผสมเงินเกรด 940 ชุดที่ 8-10 (กลุ่มที่มีการเติมซิลิคอนตั้งแต่ 0.036-0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) จะมีอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting) ในช่วง 908.0-913.0 °C และอุณหภูมิ ณ จุดที่มีการหลอมเหลวสมบูรณ์ (Liquidus) ในช่วง 929.2-930.1 °C

เมื่อพิจารณาค่าที่ได้จากการทดสอบช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวดังตารางที่ 4.13 จะเห็นว่า ทั้งอุณหภูมิหลอมเหลวและจุดหลอมเหลวสมบูรณ์ของโลหะผสมเงินเกรด 940 ทั้ง 3 กลุ่ม มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้น (ปริมาณทองแดงที่ลดลง) ดังแสดงในรูปที่ 4.68-4.70 โดยมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จาก Ternary Phase Diagram ของ Ag-Cu-Zn ดังรูปที่ 4.74 จะเห็นว่าโลหะผสมเงินเกรด 940 ทั้ง 10 ชุด มีอุณหภูมิ ณ จุดที่มีการหลอมเหลวสมบูรณ์ (Liquidus) ประมาณ 940 °C ซึ่งมีค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการทดลองดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าสังกะสีมีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลวและจุด Liquidus สังเกตได้จากชุดโลหะผสมที่มีการเติม

ปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้นทำให้เส้น Melting และเส้น Liquidus มีแนวโน้มลดลง และเมื่อพิจารณาที่ส่วนผสมของปริมาณทองแดงและปริมาณสังกะสีที่ใกล้เคียงกัน และนำข้อมูลดังตารางที่ 4.13 นำมาวาดกราฟดังรูปที่ 4.71-4.73 เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของซิลิคอนจะมีผลต่อช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวหรือไม่นั้น พบว่า เมื่อเติมปริมาณซิลิคอนที่ 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะทำให้จุด Melting และ Liquidus ของโลหะผสมเงินเกรด 940 มีแนวโน้มลดลง แต่ถ้าเติมปริมาณซิลิคอนสูงกว่า 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้จุด Melting และ Liquidus มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น จึงเป็นไปได้ว่าซิลิคอนมีผลต่อจุด Melting และจุด Liquidus เมื่อพิจารณาตามรูปที่ 4.68-4.70 เทียบกับรูปที่ 4.71-4.73 จะเห็นว่า ธาตุผสมที่ทำให้ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัดน่าจะเป็นผลจากการเติมปริมาณสังกะสีมากกว่าซิลิคอน ดังนั้นแสดงว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสังกะสีทำให้ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวลดต่ำลงทั้งจุด Melting และจุด Liquidus



รูปที่ 4.74 Ternary Phase Diagram ของ Ag-Cu-Zn