b 00005576

การศึกษาแผนภาพสมดุลด้วยวิธีการวิเคราะห์ความร้อน

THE STUDY EQUILIBRIUM DIAGRAMS BY THERMAL ANALYSIS

ผู้ช่วยศาสตราจารย์เดช เหมือนขาว

นายยงยุทธ ดุลยกุล

นายสรายุทธ ศรีเมือง

นายพิรุณ ณรงค์รัตน์

นายรัฐวรรธน์ ทองนิล

064596

536.1

ด 837

2554

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการพัฒนาโครงงาน/สิ่งประดิษฐ์นักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์

งบประมาณประจำปี 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

หัวข้อปริญญานิพนธ์ การศึกษาแผนภาพสมดุลด้วยวิธีการวิเคราะห์ความร้อน

นักศึกษา นายสรายุทธ ศรีเมือง รหัสนักศึกษา 435164050014-9
นายพิรุณ ณรงค์รัตน์ รหัสนักศึกษา 435164050032-1
นายรัฐวรรธน์ ทองนิล รหัสนักศึกษา 435164050035-4

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์เดช เหมือนขาว
อาจารย์ยงยุทธ ดุลยกุล

ปีการศึกษา 2553

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเย็นตัวของโลหะบริสุทธิ์ และโลหะผสมที่มีปริมาณธาตุผสมที่แตกต่างกันเพื่อสร้างแผนภาพสมดุลของโลหะและโลหะผสมด้วยวิธีการวิเคราะห์ความร้อนและศึกษาต่อถึงโครงสร้างจุลภาคของโลหะและโลหะผสมที่มีธาตุผสมที่แตกต่างกัน การศึกษาแผนภาพสมดุลด้วยวิธีการวิเคราะห์ความร้อนดำเนินการเพื่อสร้างแผนภาพสมดุลของโลหะและโลหะผสมระหว่างตะกั่วกับดีบุก ซึ่งดำเนินการสร้างชุดวิเคราะห์ความร้อน ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ชุดวิเคราะห์ความร้อน ให้อุณหภูมิสูงสุด 1000 องศาเซลเซียส และชุดเก็บข้อมูลอุณหภูมิ ในขั้นตอนแรกของการสร้างแผนภาพสมดุลจะดำเนินการทดลองเพื่อหาเส้นโค้งการเย็นตัวของโลหะตะกั่วบริสุทธิ์ ดีบุกบริสุทธิ์ และตะกั่วผสมดีบุก โดยหลอมวัสดุในบรรยากาศอุณหภูมิห้อง และปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ ภายในชุดวิเคราะห์ความร้อน พร้อมกับวัดอุณหภูมิที่ลดลงโดยได้กราฟเส้นโค้งการเย็นตัวทั้งหมด 11 กราฟ นำเอาเส้นโค้งการเย็นตัวของวัสดุมาเขียนแผนภาพสมดุลได้แผนภาพสมดุลแบบยูเทคติก

คำสำคัญ : แผนภาพสมดุลด้วยวิธีการวิเคราะห์ความร้อน ตะกั่วผสมดีบุก

TITLE	THE STUDY EQUILIBRIUM DIAGRAMS BY THERMAL ANALYSIS	
STUDENTS	MR. SARAYUT SRIMUANG	Code 435164050014-9
	MR. PIRUN NARONGRAT	Code 435164050032-1
	MR. RATTAWAT THONGNIL	Code 435164050035-4
ADVISOR	MR. DATE MUANKHAW	
	MR. YONGYUTH DUNYAKUL	
ACADEMIC YEAR	2011	

ABSTRACT

The objective of this dissertation is to study the cooling of the pure metal. And alloys with a mixture of different elements to bring the cooling curve diagram to create a balance of metals and alloys by means of thermal analysis to study the structure and microstructure of metals and alloys with the elements. different combinations. Equilibrium diagram studied by means of thermal analysis is performed to create a diagram of the balance of the alloy, which is used as lead and tin. By performing a series of thermal analysis. Which consists of two main sets of thermal analysis. The maximum temperature of 1000 degrees Celsius and the temperature. In the first step of creating a balance diagrams are conducting experiments to determine the cooling curve of pure lead metal. Pure tin. Tin and lead. The molten material in the atmosphere at room temperature. And let it cool slowly in a series of thermal analysis. With the temperature reduced by the cooling curves on the graph to bring all 11 curves, the cooling of the material is a schematic diagram of a balanced equilibrium of the Eutectic

Keyword : Equilibrium Diagrams by Thermal Analysis Lead And Tin.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้ คณะผู้จัดทำปริญญานิพนธ์ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ทุนสนับสนุนในการจัดทำปริญญานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่อนุเคราะห์สถานที่ในการจัดทำปริญญานิพนธ์ โดยมี ผู้ช่วยศาสตราจารย์เดช เหมือนขาว อาจารย์ยงยุทธ ดุลยกุล อาจารย์วิทยา ศิริคุณ อาจารย์สุวศิน โชติกุลรุ่งโรจน์เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิชาโครงงานคณะอาจารย์สาขาวิศวกรรมอุตสาหการทุกท่านที่ให้คำปรึกษาที่ดี อำนวยความสะดวกในทำปริญญานิพนธ์ เรื่อง การศึกษาแผนภาพสมดุลด้วยวิธีการวิเคราะห์ความร้อน จนทำให้โครงงานนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบคุณความดีให้แก่ บิดา มารดา ผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาที่ดีตลอดมา จนทำให้การศึกษาแผนภาพสมดุลด้วยวิธีการวิเคราะห์ความร้อน สำเร็จไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของการทำโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 เฟส และแผนภาพสมดุล (Phase and Phase Diagram) และวิธีการสร้างแผนภาพสมดุล	8
2.3 วัสดุตะกั่วและวัสดุดีบุก (Lead and Tin)	15
2.4 ระบบของโลหะผสมที่มีส่วนประกอบ 2 ชนิดแบบยูเทคติก (Eutectic)	17
2.5 โลหะผสมตะกั่วและดีบุก	21
2.6 การแข็งตัวของโลหะ	22
2.7 โครงสร้างจุลภาค	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	30
3.1 แผนการดำเนินงาน	30
3.2 การคำนวณและการออกแบบสร้างชุดวิเคราะห์ความร้อน	33
3.3 วัสดุที่ใช้ทำการทดลอง	47
3.4 การทดสอบการใช้งานชุดทดสอบด้วยวิธีการวิเคราะห์ความร้อน	49
3.5 การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค	50
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์	57
4.1 การทดลองเพื่อหาเส้นโค้งการเย็นตัวและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะ	57
4.2 การสร้างแผนภาพสมดุลของวัสดุตะกั่ว – วัสดุดีบุก	64

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	66
5.1 สรุปผลการทดลอง	66
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	67
5.3 ข้อเสนอแนะ	67
บรรณานุกรม	68
ภาคผนวก ก	70
รูปกราฟเส้นโค้งการเย็นตัวของโลหะผสมตะกั่วกับดีบุก	71
ภาคผนวก ข	82
รูปของการดูโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมตะกั่วกับดีบุก	83
ภาคผนวก ค	87
รูปแสดงการเขียนแผนภาพสมดุลของโลหะผสมตะกั่วกับดีบุก	88
ภาคผนวก ง	91
แบบชุดวิเคราะห์ความร้อน	92
ประวัติผู้ทำปริญญานิพนธ์	101

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
3.1	แผนการดำเนินการของโครงการ	30
3.2	แสดงอัตราส่วนของวัสดุในการดำเนินการทดลอง	47

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงตัวอย่างแผนภาพสมดุล	7
2.2	แสดงแผนภาพสมดุลระบบ 2 สาร ชนิดต่าง ๆ ของโลหะ	10
2.3	แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวทั่ว ๆ ไปของโลหะบริสุทธิ์	11
2.4	แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวของโลหะผสม	11
2.5	แสดงการสร้างแผนภาพสมดุลด้วยวิธีการวิเคราะห์ความร้อนชนิด Simple Eutectic Type จากเส้นโค้งการเย็นตัว	12
2.6	แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวและการเปลี่ยนแปลงเฟสของโลหะขณะเกิดการแข็งตัว	12
2.7	แสดงการสร้างแผนภาพสมดุลของโลหะผสม ซึ่งมีสภาพเป็นสารละลายของแข็ง	13
2.8	แสดงแผนภาพสมดุลของโลหะผสม	14
2.9	แสดงเส้นลิควิดัสและเส้นโซลิดัสจะเป็นตัวบอกขอบเขตการเป็นเฟสของเหลวและของแข็งที่สมบูรณ์ของโลหะผสม	15
2.10	แสดงขั้นตอนการผลิตตะกั่ว	15
2.11	แสดงแผนภาพสมดุลของตะกั่วและดีบุก	18
2.12	แสดงโครงสร้างจุลภาคของตะกั่วและดีบุก	20
2.13	แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวของตะกั่ว – ดีบุก	21
2.14	แสดงแผนภาพสมดุลของตะกั่วและดีบุก	22
2.15	แสดงการแข็งตัวของโลหะ	23
2.16	แสดงลักษณะการเกิดของผลึก	24
2.17	แสดงการดูโครงสร้างจุลภาคด้ายกล้องจุลทรรศน์	26
2.18	แสดงโครงสร้างจุลภาค แบบเฟสเดียว	27
2.19	แสดงโครงสร้างมหภาคของเพลาที่ขาดเนื่องจากการหมุนอย่างรุนแรง	27
2.20	แสดงลักษณะของชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบการไหลของเกรน	29
3.1	แสดงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	32
3.2	แสดงเบ้าหลอมชนิดกราไฟต์ ยี่ห้อมอร์แกนรุ่น A 0.5	33
3.3	แสดงทิศทางการไหลของความร้อนผ่านผนังพื้นด้านล่างของชุดวิเคราะห์ความร้อน	37
3.4	แสดงทิศทางการไหลของความร้อนผ่านผนังด้านข้างของชุดวิเคราะห์ความร้อน	39

สารบัญรูป (ต่อ)

3.5	แสดงทิศทางการไหลของความร้อนผ่านฝาปิดด้านบนของชุดวิเคราะห์ความร้อน	40
3.6	แสดงลักษณะการออกแบบของชุดหลอม	42
3.7	แสดงลักษณะโครงสร้างของเตาหลอม	43
3.8	แสดงลักษณะฝาเปิด – ปิดด้านบน	44
3.9	แสดงลักษณะการติดตั้งขดลวดให้ความร้อน	44
3.10	แสดงลักษณะตู้ระบบไฟฟ้าและชุดควบคุม	45
3.11	แสดงลักษณะของชุดหลอมสำหรับการทดลอง	45
3.12	แสดงลักษณะของชุดเก็บข้อมูลความร้อน	46
3.13	แสดงหน้าจอแสดงผลของชุดวัดอุณหภูมิ	46
3.14	แสดงลักษณะของการติดตั้งชุดเก็บข้อมูลความร้อน	47
3.15	แสดงลักษณะตะกั่วสำหรับการทดลอง	47
3.16	แสดงลักษณะดีบุกสำหรับการทดลอง	48
3.17	แสดงกราฟแสดงการให้ความร้อนของชุดหลอม	49
3.18	แสดงกราฟแสดงการเย็นตัวของชุดหลอม	50
3.19	แสดงลักษณะแบบที่ใช้หล่อวัสดุทดลอง	50
3.20	แสดงลักษณะวัสดุที่หล่อเสร็จแล้วได้จากการทดลอง	51
3.21	แสดงลักษณะการตัดชิ้นงาน	51
3.22	แสดงลักษณะการจับชิ้นงานจริงที่หล่อด้วยเรซินเพื่อการขัดดูโครงสร้างจุลภาค	52
3.23	อุปกรณ์การขัดกระดาษทราย – น้ำ	52
3.24	แสดงการขัดผิวชิ้นงานทดสอบด้วยกระดาษทราย – น้ำ	53
3.25	แสดงลักษณะของผ้าสักหลาดสำหรับขัดด้วยเครื่องขัดมัน	53
3.26	แสดงลักษณะของผงอะลูมิน่าที่ใช้ขัด	54
3.27	แสดงลักษณะของเครื่องขัดแบบจานเดียว	54
3.28	แสดงลักษณะของการขัดมันด้วยเครื่องขัดแบบจานเดียว	55
3.29	แสดงลักษณะของกล้องจุลทรรศน์ทางโลหะวิทยาแบบแสง	56
3.30	แสดงลักษณะการวางชิ้นงานทดสอบเพื่อส่องดูโครงสร้างจุลภาค	56
4.1	แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวและโครงสร้างจุลภาค	64
4.2	แสดงแผนภาพสมดุลโลหะผสมตะกั่วกับดีบุก	65

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ในการศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุนั้นมีความสำคัญและยากที่จะเข้าใจได้และสมบัติอย่างหนึ่งที่จะกล่าวถึงคือ สมบัติของการผสมกันของโลหะ สิ่งที่เป็นตัวสื่อสำหรับการแสดงการผสมกันนั้น เรียกว่าแผนภาพสมดุล (Phase Diagram) ซึ่งเป็นแผนภาพสมดุลที่เกิดขึ้นจากการสังเกตุการเย็นตัวตั้งแต่เริ่มต้นจนสิ้นสุดของการแข็งตัวของโลหะหรือโลหะผสม กับสัดส่วนทางเคมีของโลหะหรือโลหะผสมนั้น ๆ ซึ่งจะเป็นตัวช่วยให้ทราบถึงโครงสร้างจุลภาคภายในเนื้อโลหะผสมนั้นได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร ในขณะที่โลหะผสมนั้นได้รับความร้อนสูงขึ้น หรือเย็นตัวต่ำลงที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ ซึ่งแผนภาพสมดุลสามารถแสดงตำแหน่งสมดุลของสัดส่วนกับอุณหภูมิ พร้อมทั้งแสดงปริมาณการผสมเข้ากันของโลหะผสมแต่ละชนิดและจะบอกถึงสมบัติของโลหะผสม เพื่อใช้ในการวิเคราะห์วิจัยคุณภาพของโลหะผสม โดยปกติโลหะบริสุทธิ์มักจะอ่อนและไม่มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะนำไปใช้งาน ซึ่งในปัจจุบันโลหะที่นำมาใช้งานด้านวิศวกรรมจะมีการเติมธาตุผสมลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติให้ตรงกับตามความต้องการ

แผนภาพสมดุลที่มีอยู่ในวัสดุ หมายถึงบริเวณที่มีโครงสร้างหรือองค์ประกอบที่แตกต่างจากเฟสอื่น กราฟที่แสดงถึงเฟสต่าง ๆ ที่มีอยู่ในวัสดุ ณ สภาวะหนึ่ง ซึ่งอุณหภูมิความดัน และองค์ประกอบต่างๆจะเรียกว่า แผนภาพสมดุล (Phase Diagrams) หรืออาจเรียกว่า ไดอะแกรมสมดุล (Equilibrium Diagrams) โดยทั่วไปแผนภาพสมดุล มักจะถูกสร้างขึ้นที่สภาวะสมดุล กล่าวคือ แผนภาพสมดุลนั้นบรรยากาศรอบการทดลองจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ซึ่งทำได้โดยทำให้โลหะหรือโลหะผสมนั้นเย็นตัวลงหรือร้อนขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากชนิด จำนวน และปริมาณของเฟสที่มีอยู่ในวัสดุจะส่งผลกระทบต่อสมบัติของวัสดุ แผนภาพสมดุลจึงเป็นประโยชน์ต่อวิศวกรเป็นอย่างมากที่สามารถนำไปใช้ในการทำนายลักษณะและสมบัติของวัสดุ รวมทั้งสามารถทราบข้อมูลต่าง ๆ ได้จากแผนภาพสมดุล

ดังนั้นแผนภาพสมดุลซึ่งมีความสำคัญในทางวิศวกรรมวัสดุ ในการผสมของโลหะตามสภาวะที่สมดุลระหว่างเฟสต่าง ๆ นั้นจะเป็นได้ในทางปฏิบัติเมื่อโลหะผสมนั้นได้เย็นตัวอย่างช้า ๆ

มีเวลาให้เกิดกระบวนการแพร่ (Diffusion) ปรับสัดส่วนสมดุลอยู่ตลอดเวลา ในการศึกษาแผนภาพสมดุล โดยวิธีการวิเคราะห์ทางความร้อนเป็นวิธีการนำโลหะผสมที่มีส่วนผสมต่างกันมาให้ความร้อนจนเกิดการหลอมละลายจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างช้า ๆ ในขณะที่เกิดการเย็นตัวลงโลหะและโลหะผสมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งจะแสดงด้วยเส้นโค้งการเย็นตัว (Cooling Curve) แล้วนำเส้นโค้งการเย็นตัวของแต่ละส่วนผสมมาเขียนแผนภาพที่มีความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเฟส และส่วนผสมของโลหะซึ่งเรียกว่า แผนภาพสมดุลเฟส ซึ่งแผนภาพดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นบรรทัดฐานในการศึกษาสมบัติ และการปรับปรุงสมบัติของโลหะผสม เพื่อประโยชน์ทาวด้านวิศวกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาการเย็นตัวของโลหะบริสุทธิ์ และโลหะผสมที่มีปริมาณธาตุผสมที่แตกต่างกัน

1.2.2 เพื่อสร้างแผนภาพสมดุลของโลหะและโลหะผสมด้วยวิธีการวิเคราะห์ความร้อน

1.2.3 เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะและโลหะผสมที่มีธาตุผสมที่แตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตของการทำโครงการ

1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษาคือวัสดุดีบุกและวัสดุตะกั่ว

1.3.2 สร้างแผนภาพสมดุลด้วยวิธีการวิเคราะห์ความร้อน

1.3.3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุดีบุกบริสุทธิ์ วัสดุตะกั่วบริสุทธิ์ และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของดีบุกผสมตะกั่ว

1.3.4 ออกแบบและสร้างชุดศึกษาแผนภาพสมดุลด้วยวิธีการวิเคราะห์ความร้อน ซึ่งสามารถให้ความร้อนไม่น้อยกว่า 1000 องศาเซลเซียส ใช้กระแสไฟฟ้า 220 V

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ชุดศึกษาแผนภาพสมดุลด้วยวิธีการวิเคราะห์ความร้อนซึ่งใช้เป็นชุดทดลองสำหรับการศึกษาการสร้างแผนภาพสมดุลในรายวิชาวัสดุวิศวกรรมและวิชาที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ทำให้ได้ทราบถึงวิธีการสร้างแผนภาพสมดุลและอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน

1.4.3 ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่าง โครงสร้าง กระบวนการและสามารถเลือกใช้วัสดุในงานวิศวกรรมได้อย่างถูกต้อง

บทที่ 2
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แผนภาพสมดุลประกอบด้วยเฟส เฟสหนึ่ง ๆ ในวัสดุชนิดหนึ่งในความหมายเชิงโครงสร้างจุลภาค คือ บริเวณหนึ่ง ๆ ซึ่งมีโครงสร้าง หรือองค์ประกอบที่แตกต่างจากบริเวณอื่น แผนภาพสมดุลเป็นรูปกราฟที่แสดงขอบเขตของเฟสต่าง ๆ ส่วนใหญ่แผนภาพสมดุลมักสร้างขึ้นตามเงื่อนไขที่วัสดุอยู่ในสภาวะสมดุล วิศวกรหรือนักวิทยาศาสตร์มักเป็นผู้ใช้แผนภูมิเพื่อทำความเข้าใจและทำนายพฤติกรรมต่าง ๆ ของวัสดุ

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พีระยศ แสนโภชน์ (2548) [1] ได้ศึกษาการพยากรณ์อุณหภูมิน้ำโลหะในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมเป็นการทดลองการใช้โครงข่ายประสาทเทียมมาพยากรณ์อุณหภูมิน้ำโลหะในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ อันเนื่องมาจากการปฏิบัติหน้างานจริงนั้นต้องใช้พนักงานที่มีความเชี่ยวชาญและคาดเดาอุณหภูมิของน้ำโลหะในเตาหลอมเหล็กสูง เพื่อที่จะทำการจุ่มวัดโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ที่ราคาสูงเกือบ 1 ล้านบาท ทำการจุ่มวัดและต้องพยายามจุ่มวัดให้น้อยครั้งที่สุดเพื่อยืดอายุการใช้งานของเทอร์โมมิเตอร์ดังกล่าว ดังนั้นกรรมวิธีการตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะในเตาหลอมของพนักงานจะต้องใช้พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเตาหลอมโลหะมากกว่าปกติ กล่าวคือน้ำโลหะในเตาหลอมนั้นอุณหภูมิที่ต้องการคือ 1500 องศาเซลเซียส แต่พนักงานจะต้องป้อนพลังงานไฟฟ้ามากขึ้นเพื่อให้อุณหภูมิของน้ำโลหะในเตาหลอมนั้นมากกว่า 1500 องศาเซลเซียส จึงจะสามารถเทน้ำโลหะลงแบบพิมพ์ได้ ซึ่งกรรมวิธีนี้จะทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน ซึ่งทางผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมเลปวิว (Lab view) เก็บข้อมูลอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้า อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาออก และพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเตา เพื่อนำข้อมูลต่าง ๆ มาเทรนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อมาพยากรณ์อุณหภูมิของน้ำโลหะในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำเพื่อการประหยัดพลังงาน

ศรีพงษ์ พรรณ์แผ้ว (2548) [2] ได้ศึกษาสมบัติของวัสดุผสมระหว่างบรอนซ์ดีบุกทัลคัมจากการเตรียมโดยกระบวนการผลิตโลหะผสมเชิงกล วัตถุประสงค์ของโครงการนี้ คือ การศึกษาสมบัติของวัสดุผสมระหว่างบรอนซ์ดีบุกทัลคัม ซึ่งได้จากการเตรียม 2 วิธี วิธีแรกผลิตโดยการผสมบรอนซ์ดีบุกทัลคัม และวิธีที่สองผลิตโดยบดผสมผงโลหะทองแดงและดีบุกกับทัลคัม โดยใช้เครื่องบดผสมแบบสั่นในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคือ ปริมาณผงทัลคัมและเวลาที่ใช้บดผสมพบว่าชิ้นงานที่เตรียมจากผงโลหะบรอนซ์ดีบุกผสมทัลคัมมีความ

แข็งแรง ความแข็ง ความหนาแน่นและผิวเรียบมากกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากผงโลหะทองแดงและดีบุกกับทัลคัมเพราะการอบผนึกชิ้นงานจากวิธีแรกจะง่ายกว่าวิธีที่สองเมื่อภาวะต่าง ๆ เหมือนกัน ชิ้นงานจากวิธีที่สองต้องใช้เวลาในการฟอร์มตัวเป็นบรอนซ์ก่อนและผงทัลคัมเป็นตัวขัดขวางการแพร่ของโลหะดีบุกเข้าไปในเนื้อของทองแดงและการอบผนึก เนื่องจากผงทัลคัมเสถียรและทนอุณหภูมิสูงกว่าผงโลหะจึงทำให้ความแข็งแรงลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงทัลคัมในขณะที่ความแข็งแรงลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณทัลคัมเพราะทัลคัมมีความแข็งแรงต่ำกว่าโลหะ เวลาในการบดผสมที่นานขึ้นทำให้การกระจายตัวของทัลคัมในเนื้อโลหะสม่ำเสมอมากขึ้น และทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลง จึงทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นสูงและแข็งแรง และยังพบว่าอัตราการสึกหรอและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงทัลคัมมากขึ้นและบดเป็นเวลาสั้น ๆ ดังนั้นการผสมทัลคัมในปริมาณที่เหมาะสมและบดเป็นเวลานานเพียงพอก็จะทำให้อัตราการสึกหรอและสัมประสิทธิ์การเสียดทานลดลงถึงระดับที่น่าพอใจ

วฤชา กาญจนอักษร (2549) [3] ได้ศึกษาพิษเฉียบพลันของตะกั่วและทองแดงที่มีต่อไส้เดือน การศึกษาความเป็นพิษของตะกั่วและทองแดงที่มีต่อไส้เดือนน้ำ (Limnodrilus Hoffmeisteri) ได้ทำการทดลองในระบบน้ำนิ่งในห้องปฏิบัติการเป็นระยะเวลา 96 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าทองแดงมีความเป็นพิษสูงกว่าตะกั่ว โดยมีค่า LC_{50} ที่ 72 และ 96 ชั่วโมง เท่ากับ 0.15 และ 0.09 mg/l ตามลำดับ ในขณะที่ตะกั่วมีความเป็นพิษต่ำกว่า โดยมีค่า LC_{50} ที่ 96 ชั่วโมง เท่ากับ 0.76 mg/l นอกจากนี้ยังพบว่าไส้เดือนน้ำชนิดนี้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างภายนอกและการตอบสนองทางพฤติกรรมเมื่อได้รับพิษของตะกั่วและทองแดง ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาระดับความเป็นพิษกึ่งเฉียบพลันได้ การศึกษาครั้งนี้สรุปได้ว่าสามารถนำไส้เดือนน้ำ (L. hoffmeisteri) ใช้เป็นสัตว์ทดลองในการประเมินระดับความเป็นพิษเฉียบพลันของตะกั่วและทองแดงในน้ำได้

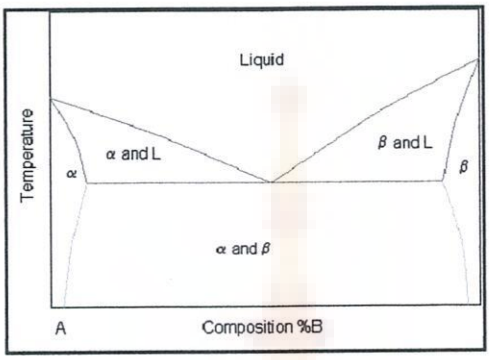
ธีระชัย บงการณ์ (2551) [4] ได้ศึกษาผลของตะกั่วส่วนเกินที่มีต่อโครงสร้างเฟสและโครงสร้างจุลภาคของผงผลึกเลดแบเรียมไททาเนตในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการเติมตะกั่วส่วนเกินที่มีต่อโครงสร้างเฟสและโครงสร้างจุลภาคของผงผลึกเลดแบเรียมไททาเนต [(Pb0.975Ba 0.025) TiO3; (PBT2.5)] ซึ่งเตรียมโดยวิธีผสมออกไซด์ด้วยการเติมตะกั่วส่วนเกินปริมาณ -3, 0, 1, 3, 5 และ 10 wt% เพื่อชดเชยตะกั่วที่สูญเสียในระหว่างการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและโครงสร้างจุลภาคของผงผลึกเลดแบเรียมไททาเนตโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X - Raydiffractrometer) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ตามลำดับ พบว่าผงผลึกเลดแบเรียมไททาเนตที่เตรียมได้มีโครงสร้างเป็นแบบเตะตระโกนอลนอกจากนี้พบการเกิดเฟสแปลกปลอมของเลดออก

ไซด์ (PbO) , ไททาเนตออกไซด์ (TiO), และเลดไดออกไซด์ (PbO_2) ในตัวอย่างที่ปริมาณตะกั่วส่วนเกินมากกว่า 1 wt เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วน c/a ปริมาตรต่อหน่วยเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้น และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อปริมาณตะกั่วส่วนเกินเพิ่มขึ้น

เกศราพร วทัญ (2552) [5] ได้ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการออกซิเดชั่นที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินผสมดีบุกเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในกระบวนการทำออกซิเดชั่น (Internal Oxidation) ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินผสมดีบุก การทดลองเริ่มจากการหลอมโลหะเงินผสมดีบุกที่มีส่วนผสมของ 5 Sn เป็นอินกอต จากนั้นนำอินกอตไปทำกระบวนออกซิเดชั่นภายใน โดยการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 650, 700 และ องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ระหว่างทำการอบได้ใส่ก๊าซออกซิเจนด้วยความดัน กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อัตราการไหลของก๊าซ ลิตรต่อนาที และปล่อยให้ชิ้นงานเย็นในเตา จากนั้นศึกษาโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงและอิเล็กตรอนศึกษาชนิดสารประกอบของโลหะด้วยเทคนิค XRD และวัดความแข็งด้วยสเกลวิกเกอร์ ผลการทดลองพบว่าชิ้นงานก่อนทำออกซิเดชั่นมีโครงสร้างเดนไดรต์ เมื่อทำการอบที่อุณหภูมิ , 700 และ 750 องศาเซลเซียส โครงสร้างมีลักษณะเกรนเป็น Equiaxed Grains บริเวณผิวชิ้นงานเกิดชั้นฟิล์มมีค่าความหนาระหว่าง 25 ไมครอน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบเป็น 700 และ 750 องศาเซลเซียส พบว่าลักษณะชั้นฟิล์มของชิ้นงานไม่ต่อเนื่อง และปริมาณดีบุกออกไซด์บริเวณชั้นฟิล์มของชิ้นงาเพิ่มขึ้นโดยที่อุณหภูมิอบ 750 องศาเซลเซียส พบปริมาณดีบุกออกไซด์มากที่สุดส่งผลให้ความแข็งที่ผิวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สรุปว่ากระบวนการทำออกซิเดชั่นภายในมีผลต่อโครงสร้างและความแข็งของโลหะเงินผสมดีบุก

Department of Materials Science and Metallurgy , University of Cambridge (1996) [6] ได้ศึกษาการสร้างแผนภาพสมดุลของวัสดุดีบุกและบิสมัท แผนภาพสมดุลเป็นส่วนสำคัญของโลหะผสมแสดงถึงสถานะสมดุลของวัสดุผสมเพื่อให้ได้กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและวัสดุผสม ซึ่งจะได้แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณจนเป็นรูปเป็นร่าง ดังนั้นมันเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งเพื่อให้สามารถสร้างแผนภาพสมดุลและรู้วิธีการที่จะใช้เพื่อทำนายพฤติกรรมของวัสดุทฤษฎีหลักของเฟสไดอะแกรมเป็นไปตามรอบความร้อนแฝงที่ถูกพัฒนาขึ้น เมื่อวัสดุผสมเย็นตัวและแสดงขั้นตอนการเปลี่ยนแปลง โดยการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลา เพื่อความหลากหลายของวัสดุผสมที่แตกต่างกัน เป็นไปได้ที่จะเห็นความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่แตกต่างกันตามรูปแบบขั้นตอนมันเป็นความสะดวกในการได้เป็นแผนภาพอีซี่ไบนารี (Easy Binary) แต่แม้ว่าจะเป็นความรวดเร็วในการใช้อ่านสำหรับจุดสูงสุดของแผนภาพอาจจะใช้เวลานานและอุปกรณ์ที่ใช้จึงมีความละเอียดอ่อนมากขึ้นในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น การ

เปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเมื่อระยะการเปลี่ยนแปลงที่เป็นของแข็ง โดยทั่วไปแผนภาพซิมเปิลไบนารี (Simple Binary) ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างแผนภาพสมดุล

L ย่อมาจากของเหลว โดยแยกวัสดุผสมออกเป็น 2 ส่วนคือ A และ B ส่วน α และ β เป็นขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงของที่เป็นของแข็ง A และ B ตามลำดับ สายสีฟ้าเป็นตัวแทนของสายการ ลิควิดตัส (liquidus) และโซลิตัส (solidus) ซึ่งง่ายในการวัด เส้นสีแดงเป็นเส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงที่เป็นของแข็งไปเป็นของแข็งและอื่น ๆ ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความละเอียดอ่อนมากขึ้นแต่ยังมีองค์ประกอบอีกจำนวนมากที่อยู่เบื้องหลังทฤษฎีอุณหพลศาสตร์เฟสไดอะแกรมซึ่งจะช่วยให้เป็นระบบมากขึ้นหรือปัญหาที่ซับซ้อนมากขึ้นที่จะคาดการณ์ทั้งนี้จะนำไปสู่การสร้างเฟสไดอะแกรมได้เร็วขึ้นเนื่องจากสามารถใช้เวลานานในการทดสอบและไม่เคยมีเวลาพร้อมที่จะทำงานในทางปฏิบัติดังกล่าวจุดสำคัญที่ต้องจำก็คือแผนภาพแสดงขั้นตอนความสมดุลและเพื่อให้อุณหภูมิเย็นตัว, เหล่านี้ยากที่จะบรรลุเนื่องจากปัญหาการเคลื่อนไหว แม้ในอุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจจะมีปัญหาของการมีเวลาเพียงพอที่แข็งในการรองรับการ equilibrate เป็นระบบคือการระบายความร้อน

R. McGraw (1997) [7] ได้ศึกษาแผนภาพสมดุลของแอมโมเนียมไบซัลเฟสและน้ำละอองลอยที่ดูดความชื้นทั้งจากธรรมชาติและจากของมนุษย์มีอยู่ แพร่หลายในบรรยากาศ พวกมันเป็นเมฆที่รวมตัวกันกับนิวเคลียสแจกจ่ายรังสีบนบรรยากาศและเกิดปฏิกิริยาควบแน่น ละอองลอยมีอิทธิพลโดยตรงต่อสภาพภูมิอากาศ โดยจะกระจายรังสีกลับสู่พื้นที่หรือโดยอ้อม โดยการเปลี่ยนคุณสมบัติของแสงและความถี่ของเมฆ ซัลเฟตซึ่งมีอยู่ทั้งในธรรมชาติและของมนุษย์ก็เป็นหนึ่งในละอองลอยในบรรยากาศที่สำคัญที่สุด พวกมันมาจากโมเลกุลของกรดกำมะถันที่ผลิตจาก Photochemical ก๊าซเหล่านี้เป็นกรดเป็นละอองลอยที่เป็นกลางอย่างรวดเร็วในบรรยากาศที่ลดลงโดยทำปฏิกิริยากับแอมโมเนีย ที่ความสูงต่ำดังนั้นที่แอมโมเนียที่มีความเข้มข้นสูงที่พบมากที่สุด

เป็นแบบละออง$(NH_4)_2SO_4$ และ $(NH_4)_3H(SO_4)_2$. ในขณะที่เหนือชั้นขอบเขต องค์ประกอบคือใกล้ NH_4HSO_4 ภายใต้ Convective strong เรานำเสนอบทความนี้สรุปโดยย่อจากการสังเกตของเราสามารถระงับ NH_4HSO_4 ได้ทางเดียวคือ อนุภาคและปฏิสัมพันธ์กับไอน้ำ, อุณหภูมิตั้งแต่ -40 ถึง 30 องศาเซลเซียส เราได้สร้างแผนภาพ NH_4HSO_4/H_2O และค้นพบใหม่ระยะชุ่มชื้นผลึกที่เสถียรที่อุณหภูมิต่ำ -30 องศาเซลเซียส เรามีแผนที่สามารถออก Deliquescence, การออกดอกและ Solid - Solid phase เปลี่ยนและแสดงว่าไม่เหมือนละอองลอยดูดความชื้นมากที่สุด NH_4HSO_4 แสดงพฤติกรรมของ Deliquescence strong ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

Morinaga Hiroumi (1999) [8] ได้ทำการศึกษาและพัฒนาการชุบเคลือบผิวเรือนเครื่องประดับโดยใช้ทองแดงผสมดีบุก พ่นเคลือบลงบนผิวของกำไลที่หล่อมาจากเงินผสมทองแดงในอัตราส่วน เงิน 95 เปอร์เซ็นต์ ทองแดง 5 เปอร์เซ็นต์ เพื่อทำให้ผิวกำไลมีความแข็งแรงทนต่อการบิดและทำให้สีของกำไลจากเดิมมีสีเงินเปลี่ยนมาเป็นสีเงินออกทองแดงและจากการศึกษายังพบอีกว่าทองแดงผสมดีบุกที่พ่นเคลือบลงไปนั้น ช่วยทำให้กำไลเงินไม่เกิดการหมองและยังช่วยเพิ่มความแข็งที่ผิวของกำไล นอกจากนี้ยังทำการพ่นเคลือบด้วยทองแดงผสมสังกะสี เพื่อเปรียบเทียบกับทองแดงผสมดีบุก จากการเปรียบเทียบทำให้พบว่าการพ่นเคลือบด้วยทองแดงผสมสังกะสีทำให้สีที่เกิดขึ้นเปลี่ยนจากสีเดิมมาเป็นสีออกทอง แต่ความแข็งยังน้อยกว่าทองแดงผสมดีบุก การพ่นเคลือบด้วยทองแดงผสมสังกะสีทำให้มีความสวยงามเพิ่มขึ้นเท่านั้นเอง แต่ทางด้านคุณสมบัติยังด้อยกว่าทองแดงผสมดีบุก

2.2 เฟส และแผนภาพสมดุล (Phase and Phase Diagram) และวิธีการสร้างแผนภาพสมดุล

เฟส (Phase) คือ บริเวณที่มีโครงสร้างหรือองค์ประกอบแตกต่างจากบริเวณอื่น โดยมีขอบเขตเฟส (Phase Boundary) ที่แน่นอน เช่น (น้ำกับน้ำแข็งมีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกัน แต่โครงสร้างแตกต่างกัน (น้ำเป็นของเหลวที่ไม่มีโครงสร้างผลึกแต่น้ำแข็งเป็นของแข็งที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล) ดังนั้น น้ำและน้ำแข็งจะมีเฟสที่ต่างกัน

โลหะผสม (Alloy) หรือสารละลาย (Solution) จะมีเฟสเดียว เพราะโลหะหรือสารประกอบที่นำมาผสมกันสามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) จึงไม่มีการแยกเฟสเกิดขึ้น แต่ถ้าไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกัน จะแยกเฟสให้เห็นเกิดเป็นของผสม (Mixture) เช่นของผสมระหว่างทรายกับน้ำจะมีเฟส 2 เฟส คือ เฟสที่เป็นของแข็งและของเหลว

แผนภาพสมดุล (Phase Diagram) คือ แผนภาพที่แสดงให้รู้ว่าวัสดุนั้นมีเฟสอะไรเกิดขึ้นบ้างที่อุณหภูมิ ความดัน และองค์ประกอบต่าง ๆ กัน และทุกเฟสที่เกิดขึ้นจะอยู่ในภาวะสมดุล ซึ่งเป็นภาวะที่ไม่มีปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ของเฟสกับสิ่งแวดล้อม และสมบัติของสารที่กำลัง

พิจารณาจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา จึงอาจเรียกว่า แผนภาพเฟสสมดุล (Phase Equilibrium Diagram) การศึกษาแผนภาพสมดุลจะสามารถ

1) ทำนายได้ว่าโลหะผสมที่มีองค์ประกอบหนึ่ง ๆ ที่อุณหภูมิใด ๆ จะเกิดเฟสอะไรบ้างที่อยู่ในภาวะสมดุล

2) บอกองค์ประกอบทางเคมีของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้น

3) คำนวณปริมาณ (Quantity) ของแต่ละเฟสที่มีอยู่

2.2.1 การสร้างแผนภาพสมดุลด้วยวิธีทางความร้อน

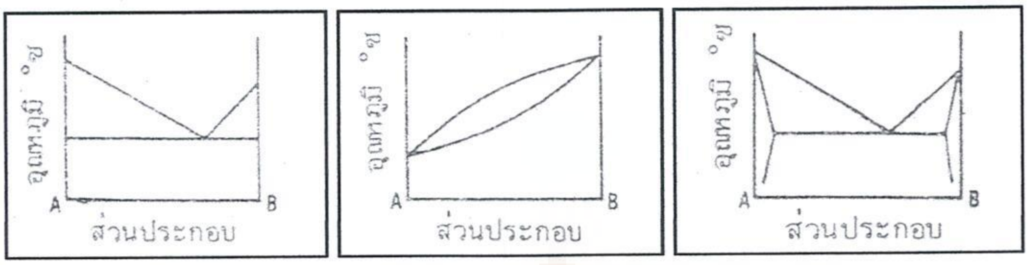
การสร้างแผนภาพสมดุลด้วยวิธีทางความร้อน (Thermal Equilibrium Diagrams) คือการปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะบริสุทธิ์ ให้ดีขึ้นมีคุณสมบัติตามวัตถุประสงค์ สามารถทำให้เป็นโลหะผสม (Alloy) จากการศึกษาโครงสร้างของโลหะที่เปลี่ยนไป เมื่อองค์ประกอบและอุณหภูมิต่าง ๆ กัน เมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล แล้วนำมาเขียนเป็นกราฟทำให้เกิดเป็น แผนภาพสมดุลด้วยวิธีทางความร้อนใช้เป็นบันทัดฐานในการศึกษาสมบัติ และการปรับปรุงคุณภาพของโลหะผสมขึ้น

โลหะผสมซึ่งประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิด ซึ่งจะไม่นับสิ่งเจือปน (Impurities) ต่าง ๆ โลหะผสมที่ประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิดเรียกว่าระบบ 2 สาร (Binary Alloy) การศึกษาแผนภาพสมดุลด้วยวิธีทางความร้อน ในขั้นต้นนั้นจะศึกษาเกี่ยวกับ ระบบ 2 สารเท่านั้น ระบบ 2 สารส่วนใหญ่ละลายเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกันเมื่ออยู่ในสภาวะของเหลว เมื่ออยู่ในสภาวะได้ 3 แบบคือ

1) โลหะทั้งสองต่างแยกตัวออกจากกันและกันโดยเด็ดขาดเมื่ออยู่ในสภาวะของแข็ง แผนภาพสมดุลทางความร้อนของโลหะผสมชนิดนี้จะเป็นชนิด Simple Eutectic

2) โลหะทั้งสองละลายเป็นเนื้อเดียวกันเมื่ออยู่ในสภาวะของแข็ง แผนภาพสมดุลทางความร้อนของโลหะผสมชนิดนี้จะเป็นชนิด Solid – Solution

3) โลหะทั้งสองละลายเข้ากันเป็นเนื้อเดียวบางส่วนเมื่ออยู่ในสภาวะของแข็ง แผนภาพสมดุลทางความร้อนของโลหะผสมชนิดนี้ จะเป็นแบบ Combination ดังแสดงตัวอย่างทั้ง 3 ชนิดในรูปที่ 2.1



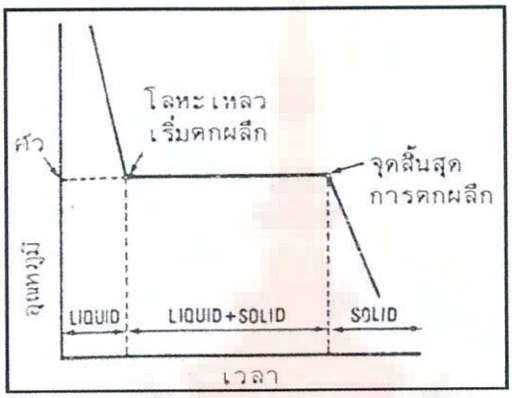
(ก) simple eutectic type (ข) solid – solution type (ค) combination type

รูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพสมดุลระบบ 2 สาร ชนิดต่าง ๆ ของโลหะ [9]

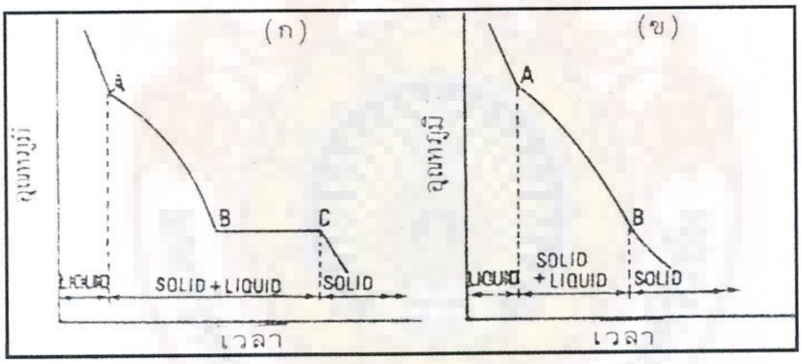
การสร้างแผนภาพสมดุลด้วยวิธีทางความร้อน สามารถสร้างได้จากเส้นโค้งการเย็นตัว (Cooling Curve) ของโลหะและโลหะผสมที่มีองค์ประกอบต่าง ๆ กันเส้นโค้งการเย็นตัวของโลหะบริสุทธิ์ จะมีจุดเริ่มแข็งตัวและจุดสิ้นสุดการแข็งตัว ณ อุณหภูมิเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.2 ส่วนเส้นโค้งการเย็นตัวของโลหะผสมจะมีการแข็งตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมิหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าโลหะผสมที่มี การสร้างแผนภาพสมดุลด้วยวิธีการทางความร้อนชนิดที่มีจุดยูเทคติก จะมีการแข็งตัวโดยอุณหภูมิคงที่ ณ จุดยูเทคติกนั้น ตัวอย่างการสร้างแผนภาพสมดุลด้วยวิธีการทางความร้อน จากเส้นโค้งการเย็นตัว (Cooling Curve) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 โลหะผสมที่นำมาหาเส้นโค้งการเย็นตัว ในที่นี้คือ โลหะผสมที่มีองค์ประกอบของ A และ B เป็น 80 เปอร์เซ็นต์ A 20 เปอร์เซ็นต์ B 60 เปอร์เซ็นต์ A 40 เปอร์เซ็นต์ B 40 เปอร์เซ็นต์ A 60 เปอร์เซ็นต์ B และ 20 เปอร์เซ็นต์ A 80 เปอร์เซ็นต์ B นอกจากนี้ก็มีเส้นโค้งการเย็นตัว ของโลหะบริสุทธิ์ A และ B จากเส้นโค้งการเย็นตัว เหล่านี้เมื่อโยงจุดที่โลหะเริ่มแข็งตัวเข้าด้วยกันจะได้เส้นโค้งของเหลว (Liquidus Curves) ซึ่งเป็นเส้นแสดงการเปลี่ยนสถานะของโลหะจากของเหลวเป็นของแข็ง และเมื่อโยงจุดที่สิ้นสุดการแข็งตัวของโลหะเข้าด้วยกันจะได้เส้นโค้งของแข็ง (Solidus Curves) โลหะที่อยู่ระหว่างเส้นโค้งของเหลวและเส้นโค้งของแข็งจะเป็นของแข็งปนกับของเหลว ส่วนโลหะที่อยู่ใต้เส้นโค้งของแข็งจะเป็นของแข็งทั้งหมด จากเส้นโค้งของเหลว AC จะเห็นว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์ B เพิ่มขึ้นอุณหภูมิแข็งตัวของโลหะจะลดลง ในทำนองเดียวกันทางด้านเส้นโค้งของเหลว CB จะเห็นว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์ A เพิ่มขึ้น อุณหภูมิแข็งตัวของโลหะก็จะลดลงเช่นกันโลหะผสมที่มีองค์ประกอบ ณ จุด C จะมีอุณหภูมิในการแข็งตัวต่ำที่สุด โลหะผสมดังกล่าวนี้เราเรียกว่ายูเทคติก (Eutectic) ซึ่งมีรากภาษามาจากภาษากรีกซึ่งแปลว่าหลอมตัวง่าย ณ จุดนี้ โลหะ A โลหะ B จะแข็งพร้อมกันโดยอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง เกิดเป็นผลึกของโลหะ A บริสุทธิ์และโลหะ B บริสุทธิ์ ตกสลับกันไปมาด้วยสัดส่วนของโลหะ A และ B ณ จุดยูเทคติก นั้น การแข็งตัวของโลหะผสม ณ จุดยูเทคติกนี้

นอกจากแข็งตัวในลักษณะดังกล่าวแล้ว อาจจะเกิดแข็งตัวในลักษณะเป็นโลหะผสมเนื้อเดียวกันตลอดหรืออาจจะแข็งตัวในลักษณะเป็นสารประกอบก็เป็นได้

โลหะผสมยูเทคติคอาจให้นิยามได้ว่าคือโลหะที่เกิดจากการแข็งตัวโดยมีอุณหภูมิคงที่เป็นของแข็งที่มีเฟสมากกว่าหรือเท่ากับ 2 และเป็นโลหะผสมที่มีจุดแข็งตัวต่ำที่สุดในโลหะผสมชุดนั้น ๆ



รูปที่ 2.3 แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวทั่ว ๆ ไปของโลหะบริสุทธิ์ [9]

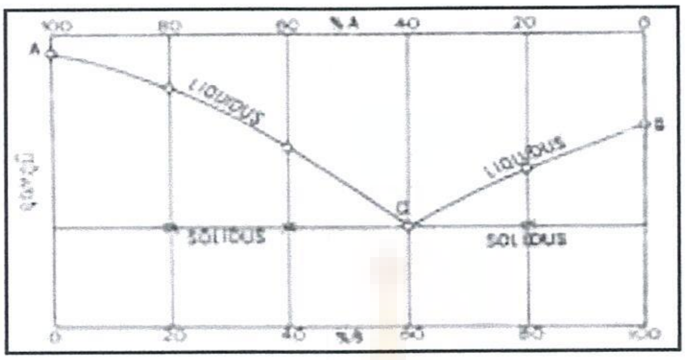


(ก) (ข)

(ก) เส้นโค้งการเย็นตัวของโลหะผสมสองชนิดที่มีแผนภาพสมดุลแบบ Eutectic Type

(ข) เส้นโค้งการเย็นตัวของโลหะผสมสองชนิดที่มีแผนภาพสมดุลแบบ Solid – Solution Type

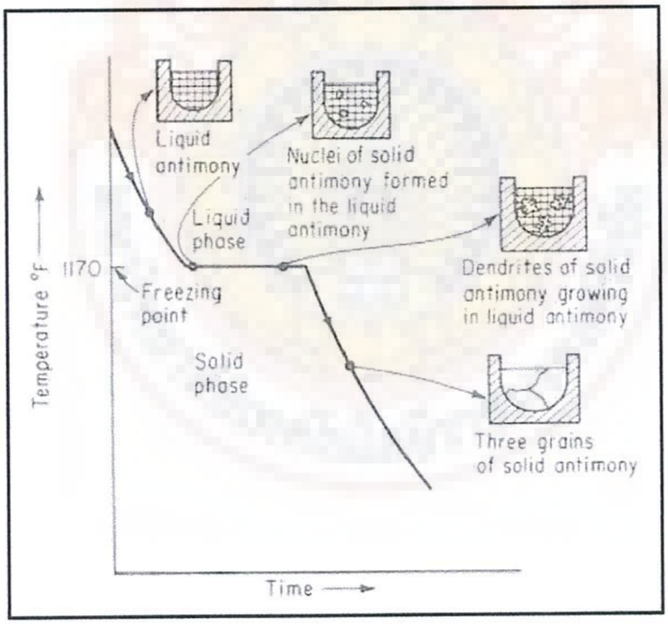
รูปที่ 2.4 แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวของโลหะผสม [9]



รูปที่ 2.5 แสดงการสร้างแผนภาพสมดุลด้วยวิธีการวิเคราะห์ความร้อนชนิด Simple Eutectic Type จากเส้นโค้งการเย็นตัว [9]

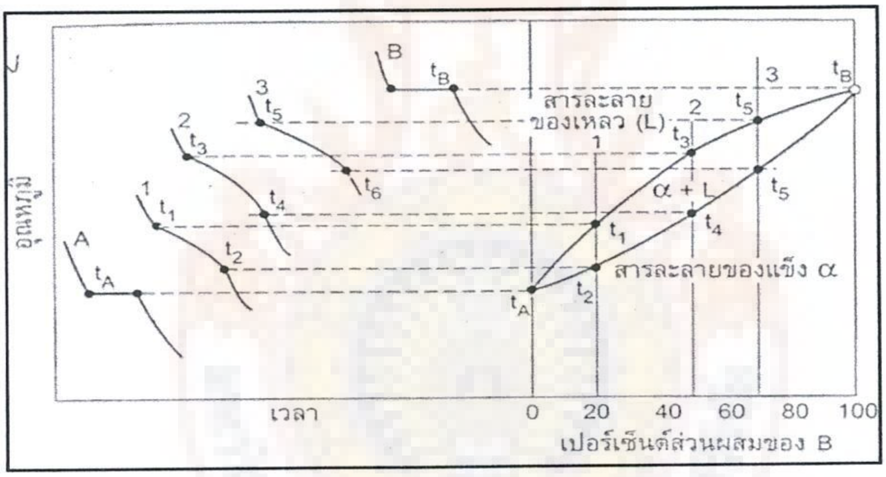
2.2.2 เส้นโค้งการเย็นตัว (Cooling Curves)

เส้นโค้งการเย็นตัว หมายถึงเส้นโค้งหรือกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (Temperature) กับเวลา (Time) ที่ใช้ในการเย็นตัวแบบสมดุล เช่น การแข็งตัวของโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสมจะมีเส้นโค้งการเย็นตัวที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6

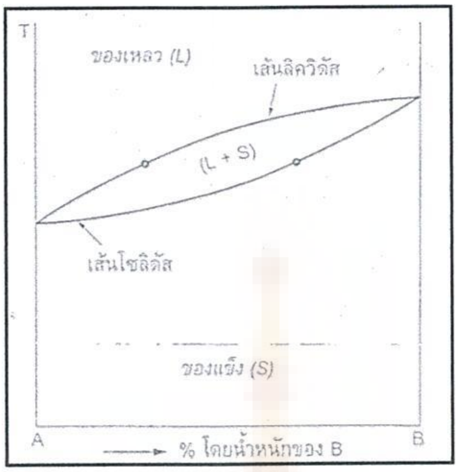


รูปที่ 2.6 แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวและการเปลี่ยนแปลงเฟสของโลหะขณะเกิดการแข็งตัว [10]

การสร้างแผนภาพสมดุลทำได้โดยใช้เส้นโค้งการเย็นตัวของโลหะผสม A และ B ที่ส่วนผสมต่าง ๆ โดยจากรูปที่ 2.6 เส้นโค้งการเย็นตัวประกอบไปด้วยโลหะบริสุทธิ์ A และ B เส้นโค้งการเย็นตัวหมายเลข 1 2 และ 3 เป็นของโลหะผสม 20 เปอร์เซ็นต์ 50 เปอร์เซ็นต์ และ 70 เปอร์เซ็นต์ B ตามลำดับ จากนั้น กำหนดให้แกนตั้งของรูปที่ 2.6 เป็นอุณหภูมิและแกนนอนเป็นเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมระหว่างโลหะ A และ B จากนั้นลากเส้นประจากอุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว รูปที่ 2.6 มาตัดกับเส้นส่วนผสมที่ลากไว้ในแนวตั้ง รูปที่ 2.6 ที่ส่วนผสม 100 เปอร์เซ็นต์ A 20 เปอร์เซ็นต์ B 50 เปอร์เซ็นต์ B 70 เปอร์เซ็นต์ B และ 100 เปอร์เซ็นต์ B ตามลำดับ จะได้จุดตัดที่เกิดขึ้นในรูปที่ รูปที่ 2.6 ที่จุด t_A t_1 t_3 t_5 และ t_B จากนั้นที่จุด t_A $t_2 t_4 t_6$ และ t_B ในรูปที่ 2.7 ลากเส้นมาตัดกับเส้นส่วนผสมในรูปที่ 2.6 เช่นกันจะได้จุด t_A t_2 $t_4 t_6$ และ t_B ที่รูป 2.6 จากนั้นลากเส้นผ่านทุกจุดตัดบนรูปที่ 2.7 โดยผ่านจุด t_A t_1 t_3 t_5 t_B t_2 t_4 และ t_6 เราจะได้แผนภาพสมดุลขึ้นมา ซึ่งเรียกว่า แผนภาพสมดุลเฟส (Phase Equilibrium Diagram) ดังรูปที่ 2.7



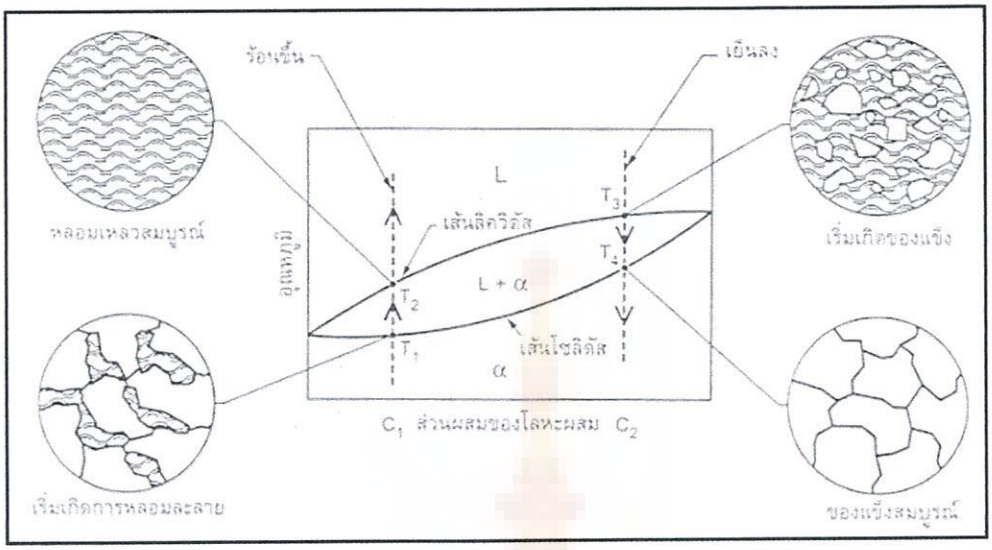
รูปที่ 2.7 แสดงการสร้างแผนภาพสมดุลของโลหะผสม ซึ่งมีสภาพเป็นสารละลายของแข็ง[10]



รูปที่ 2.8 แสดงแผนภาพสมดุลของโลหะผสม A และ B [10]

ส่วนประกอบของแผนภาพสมดุลจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ ๆ คือ เส้นแสดงขอบเขตของเฟส จากแผนภาพสมดุลในรูปที่ 2.8 ได้แก่ เส้นลิควิดตัส (Liquidus line) และเส้นโซลิดัส (Solidus line) ส่วนประกอบถัดมาคือพื้นที่ต่าง ๆ โดยเหนือเส้นลิควิดัสจะเป็นพื้นที่ที่อยู่ภายในเส้นลิควิดัสและเส้นโซลิดัสจะมี 2 เฟสร่วมกันคือ เฟสของแข็งและเฟสของเหลว

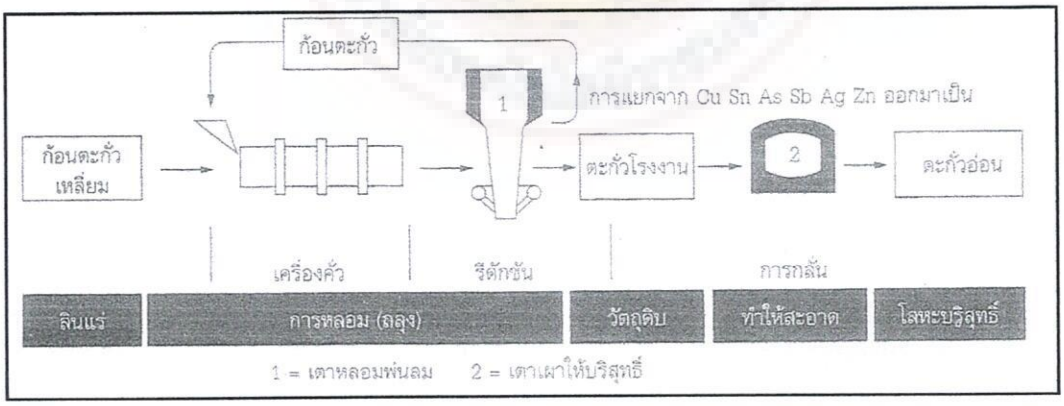
ส่วนประกอบต่างๆ ของแผนภาพสมดุลจะบอกคุณลักษณะของโลหะผสมได้ทุกส่วนผสม ทั้งในขณะเปลี่ยนสภาวะจากของเหลวไปเป็นของแข็งหรือจากของแข็งไปเป็นของเหลวก็ตาม หากพิจารณารูปที่ 2.9 เมื่อให้ความร้อนโลหะผสม AB ที่ส่วนผสม C_1 ขึ้นเรื่อย ๆ โลหะผสมจะเริ่มเกิดการหลอมเหลวที่ T_1 และจะละลายเป็นของเหลวอย่างสมบูรณ์ที่เหนือ T_2 และหากให้โลหะหลอมเหลวที่มีส่วนผสม C_2 เย็นตัวลงมาอย่างช้า ๆ จนถึง T_3 และหากเราให้โลหะหลอมเหลวที่มีส่วนผสม C_2 เย็นตัวลงมาอย่างช้า ๆ จนถึง T_3 ก็จะเริ่มมีเฟสของแข็งเกิดขึ้นในเฟสของเหลว และเมื่ออุณหภูมิลดลงเรื่อย ๆ เฟสของแข็งจะโตขึ้นและกลายเป็นเฟสของแข็งอย่างสมบูรณ์ที่ต่ำกว่า T_4



รูปที่ 2.9 แสดงเส้นลิควิดัสและเส้นโซลิดัสจะเป็นตัวบอกขอบเขตการเป็นเฟสของเหลวและของแข็งที่สมบูรณ์ของโลหะผสม [10]

2.3 วัสดุตะกั่วและวัสดุดีบุก (Lead and Tin)

2.3.1 ตะกั่ว (Lead) ตะกั่วเป็นโลหะที่เก่าแก่ที่สุดที่นำมาใช้ประโยชน์ เพราะว่าสามารถนำมารีดักชันได้ง่ายจากสินแร่เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำจึงมีความเร็วในการเป็นไอสูง เช่น การหล่อขึ้นรูปหรือการบัดกรี ไอของตะกั่วจะเป็นพิษต่อระบบการหายใจ ดั่งนั้นการทำงานกับตะกั่วจะต้องให้สถานที่ที่ทำงานมีอากาศถ่ายเทได้ดี ความหนาแน่น 11.3 kg/dm^3 หลอมเหลว 327 องศาเซลเซียส โมดูลัสยืดหยุ่น 175000 N/mm^2 ส.ป.ส. การขยายตัว $29 \times 10^{-6}/K$ ความสามารถนำกระแสไฟฟ้า 5 $m/\Omega \times mm^2$ ความต้านแรงดึง 10 - 15 N/mm^2 ความอัตราส่วนยืดถึง 50 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.10 แสดงขั้นตอนการผลิตตะกั่ว [11]

การผลิตตะกั่ว เริ่มจากการนำก้อนตะกั่วเหลี่ยม (ตะกั่วซัลไฟด์) เข้าเครื่องคั่วให้ร้อนโดยมีลมช่วยเป่าทำให้เกิดเป็น (ซังเฟอร์ไดร์ออกไซด์) SO_2 ลอยออกไป เหลือเป็นตะกั่วออกไซด์ (PbO) แล้วจะนำไปเข้าเตาหลอมพ่นลม (Shaft Furnace) ดูดออกซิเจนออก ก้อนตะกั่วออกไซด์ (PbO) ที่เหลืออยู่บางส่วนจะนำมาเข้าเตาคั่วอีก ตะกั่วส่วนมากจะสะอาดขึ้น แต่ก็ยังมี ทองแดง (Cu) ดีบุก (Sn) พลวง (Sb) เงิน (Ag) สังกะสี (Zn) ปนอยู่ต้องนำมากลั่นในเตาเผาให้บริสุทธิ์ ให้เป็นตะกั่วบริสุทธิ์ที่มีความอ่อน

ตะกั่วเป็นโลหะสีออกน้ำเงินเทาอ่อน มีความอ่อน โดยที่ความดัน 200 bar สามารถจะอัดให้ตะกั่วไหลออกได้ ตะกั่วทนการกัดกร่อนได้ดี ในการวางสายเคเบิลใต้ดิน จะใช้ตะกั่วหุ้มกันการกร่อน และกันแมลงเจาะทำลายได้ ใช้เป็นแผ่นกั้นรังสีเอ็กซ์ และกัมมันตภาพรังสี แผ่นแอกคิวมูเลเตอร์ เป็นต้นตะกั่วจะหล่อ และรีด ดึง อัด ขึ้นรูปง่าย

1) ตะกั่วอ่อนตะกั่วอ่อนเป็นตะกั่วไม่เจือ จะมีสารหนู พลวง บิสมัท ทองแดงหรือเงินเจืออยู่เล็กน้อย (ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของสินแร่) ตะกั่วมีโครงสร้างอะตอมเป็น FCC จึงใช้ขึ้นรูปได้ดีมากและอุณหภูมิการตกผลึกใหม่ (Recrystallization) จะอยู่ที่อุณหภูมิต่ำ ในการเจือเงินและแอนติโมนีจะทำให้อุณหภูมิการตกผลึกใหม่สูงขึ้น และสามารถอบอ่อนภาพหลังจากการขึ้นรูปได้อีกด้วย

2) ตะกั่วเจือ (Lead Alloys) ตะกั่วเจือ เมื่อเจือธาตุที่ทำให้กลายเป็นสารละลายของแข็ง (Solid Solution) หรือผ่านการชุบแข็งตกตะกอน จะทำให้ความเค้นสูงขึ้นจาก 15 N/mm^2 เป็น 60 N/mm^2 ตะกั่วเจือที่ใช้กันบ่อย ได้แก่ ตะกั่วแข็งมี 5 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ พลวง (Sb) ใช้สำหรับทำเป้าท่อหุ้มสายเคเบิล โลหะตะกั่วแบริ่งก็เช่นเดียวกันกับแคดเมียมที่เจือโลหะขาว ดีบุก(Sn) แคดเมียม Cd จะให้คุณสมบัติลื่น และทนต่อการสึกหรอได้เพียงพอ ตะกั่วเจอหล่ออัด (อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส ถึง 330 องศาเซลเซียส) ใช้ทำบอลล์ของกัฟเวอร์เนอร์ (Governer) ที่ควบคุมแรงเหวี่ยงหนีศูนย์นอกจาก พลวง (Sb) แล้ว ยังมี ดีบุก (Sn) และ แคลเซียม (Ca) เจืออยู่ด้วย ดีบุกจะช่วยให้ค่าความต้านแรงดึง และทนการกัดกร่อนได้สูงขึ้น ในส่วนเจือที่ใช้ทำหุ้มสายเคเบิลและโลหะทำตัวอักษร ส่วนแคลเซียมจะช่วยให้สามารถชุบแข็งตกตะกอนได้และใช้ทำแผ่นแอกคิวมูเลเตอร์ และโลหะ แบริ่งเมื่อทำเป็นตะกั่วบัดกรีอ่อนจะมีส่วนเจือ 62 เปอร์เซ็นต์ดีบุก 38 เปอร์เซ็นต์ตะกั่ว ซึ่งเป็นจุดยูเทคติคมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำที่สุด (183 องศาเซลเซียส)

2.3.2 ดีบุก (Tin) เป็นโลหะมีสีเงินขาวถึงสีเทาจัด ทนต่อการกัดกร่อนจากน้ำ ลม อาหาร หรือเครื่องดื่มที่สัมผัสกับโลหะชนิดนี้ไม่เป็นพิษจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้เก็บรักษาอาหารได้ แต่จะถูกกัดกร่อนด้วยกรดและด่างที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ดีบุกจะสามารถสลายเป็นผงสีเทา (Tin Pest) สามารถแปรรูปได้ง่าย หล่อขึ้นรูปได้ดีกว่าตะกั่ว (เมื่อทำการหล่ออัดเป็นชิ้นส่วนจะได้ขนาดเที่ยงตรงสูง) เนื่องจากมีความยืดมากจึงมีความสามารถรีดเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ ดีบุกส่วนใหญ่ (เป็น

โลหะแผ่นขาว) จะใช้ในอุตสาหกรรมทำภาชนะเก็บอาหาร แต่จะต้องไม่มีตะกั่วเจือปนอยู่ และใช้เป็นส่วนเจือที่ใช้ทำโลหะบัดกรี แบริ่งและบรอนซ์ ความหนาแน่น 7.3 kg/dm^3 จุดหลอมเหลว 232 องศาเซลเซียล โมดูลัสยืดหยุ่น 42400 N/mm^2 สัมประสิทธิ์การขยายตัว $27 \times 10^{-6}/K$ ความสามารถนำกระแสไฟฟ้า 8.8 $m/\Omega \times mm^2$ ความต้านแรงดึง 15 N/mm^2 ความยืดถึง 55 เปอร์เซ็นต์

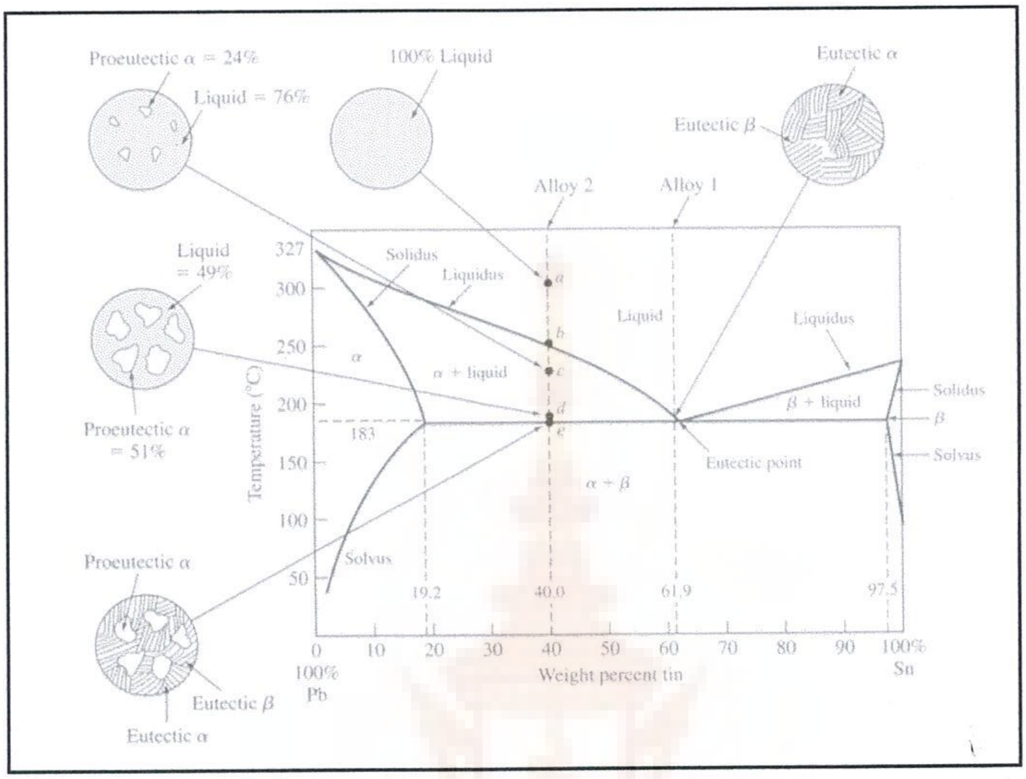
ดีบุกที่ผ่านการหลอมเหลว จะมีธาตุอื่นเจือปนอยู่ ได้แก่ ตะกั่ว (Pb) พลวง (Sb) ทองแดง (Cu) บิสมัท (Bi) และ เหล็ก (Fe) ดีบุกมีโครงสร้างอะตอมเป็น Tetragonal แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 132 องศาเซลเซียล จะเปลี่ยนโครงสร้างอะตอมเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ การเปลี่ยนโครงสร้างอะตอมนี้จะดำเนินไปอย่างเฉื่อยชามาก โดยในกรณีปกติต้องทำการซูเปอร์คูลิ่ง (Supercooling) เป็นเวลานาน เนื่องจากดีบุกทนการกัดกร่อนได้ดีจึงนิยมใช้ทำการเคลือบผิวทองแดงหรือเหล็กกล้า ด้วยการจุ่มร้อน (Hot Diping Tinning) หรือกัลป์วาไนซิ่ง เมื่อทำการรีด อัด หรือดึงดีลุกที่อุณหภูมิห้อง จะเกิดการตกผลึกใหม่ (Recrystallinzation) ระหว่างการแปรรูปจึงยังมีความยืดสูง ชิ้นส่วนที่มีพื้นที่น้อยจำนวนมาก ๆ นิยมทำการเคลือบด้วยดีบุก (Tin - Coat) ส่วนการกัลป์วาไนซิ่งด้วยดีบุกจะได้แก่โลหะแผ่นขาวจะให้ชั้นผิวดีบุกที่บางกว่า ชิ้นส่วนเครื่องจักรที่เป็นเหล็กหล่อจะต้องทำให้แกรไฟต์ที่ผิวหลุดออกมาก่อนแล้วจึงจะเคลือบผิวด้วยดีบุก

ดีบุก ที่สำคัญได้แก่

1) โลหะแบริ่ง
2) โลหะบัดกรีอ่อน
3) ดีบุกเจือหล่ออัด

2.4 ระบบของโลหะผสมที่มีส่วนประกอบ 2 ชนิดแบบยูเทคติก (Eutectic)

ระบบที่กล่าวข้างต้นเป็นระบบของโลหะผสมที่ส่วนประกอบทั้งสองสามารถละลายเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์แต่ยังมีระบบของโลหะผสมที่มีส่วนประกอบ 2 ชนิดอีกหลายระบบที่มีความสามารถในการละลายที่จำกัดของโลหะหนึ่งในโละหะอีกชนิดหนึ่ง เช่น ระบบที่ประกอบด้วยตะกั่ว – ดีบุก (Pb - Sn) ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงแผนภาพสมดุลของตะกั่วและดีบุก [12]

064596
536.1
๑.831
2554

บริเวณที่อยู่ปลายด้านซ้ายและด้านขวาของเฟสไดอะแกรมของตะกั่วและดีบุก ซึ่งถูกเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ α และ คือ β บริเวณ Terminal Solutions ซึ่งมีความสามารถในการละลายที่จำกัด กล่าวคือเฟส α เป็นโลหะผสมที่ตะกั่วเป็นตัวทะละลายและมีดีบุกเป็นตัวถูกละลาย โดยดีบุกจะละลายอยู่ได้มากที่สุดที่อุณหภูมิ 183 องศาเซลเซียส เท่ากับ 19.2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ส่วนเฟส β เป็นโลหะผสมที่มีดีบุกเป็นตัวทำลายและมีตะกั่วเป็นตัวถูกละลายโดยตะกั่วจะละลายอยู่ได้มากที่สุดที่อุณหภูมิ 183 องศาเซลเซียส เท่ากับ 2.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เมื่ออุณหภูมิต่ำลงกว่า 183 องศาเซลเซียส สภาพละลายได้ของตัวถูกละลายจะลดลงตามแนวเส้น Solvus lines ดังแสดงแผนภาพสมดุล

ในระบบของโลหะผสมที่มีส่วนประกอบ 2 ชนิดแบบยูเทคติก ดังเช่นระบบ Pb–Sn นี้ ถ้าระบบประกอบด้วย 61.9 เปอร์เซ็นต์ Sn และ 38.1 เปอร์เซ็นต์ Pb ซึ่งเป็นองค์ประกอบยูเทคติก (Eutectic Composition) ถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างช้า ๆ โลหะผสมนี้จะแข็งตัวที่อุณหภูมิคงที่ที่ 183 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิยูเทคติก (Eutectic Composition) อุณหภูมิยูเทคติก เป็นอุณหภูมิต่ำสุดที่เฟสของเหลวจะยังคงมีอยู่ในระบบและที่สภาวะจุดยูเทคติกนี้ เฟสของเหลวจะเปลี่ยนไปเป็นเฟสของแข็ง 2 เฟส คือ เฟส α และเฟส β ดังสมการของปฏิกิริยา Eutectic ดังนี้คือ

$$L \xrightarrow[\text{ทำให้เย็นตัวลง}]{\text{อุณหภูมิ Eutectic}} \alpha + \beta \quad (2.1)$$

ปฏิกิริยายูเทคติก นี้บางครั้งอาจเรียกว่าปฏิกิริยา Invariant เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิและสัดส่วนองค์ประกอบเฉพาะโดยที่ระบบจะมี 3 เฟสอยู่ร่วมกันภายใต้สภาวะสมดุลคือเฟสของของเหลว เฟสของโลหะผสม α และเฟสของโลหะผสม β เนื่องจากเฟสทั้งสามในเฟสไดอะแกรม 2 สาร จะสามารถอยู่ภายในสภาวะสมดุลเพียงอุณหภูมิเดียว ดังนั้นจึงเกิดอุณหภูมิคงที่ที่อุณหภูมิยูเทคติก ในเส้นโค้งการเย็นตัวของอัลลอยด์ที่มีองค์ประกอบยูเทคติก

2.4.1 การทำให้ระบบของโลหะผสมตะกั่วและดีบุกที่มีองค์ประกอบยูเทคติก เย็นตัวลงอย่างช้า ๆ เมื่อโลหะผสม Pb-Sn (Alloy 1 ในรูปที่ 2.11) ที่มีองค์ประกอบ Eutectic (61.9 เปอร์เซ็นต์ Sn) ถูกทำให้เย็นตัวลงจากอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ถึงอุณหภูมิ 183 องศาเซลเซียส โลหะผสมจะอยู่ในสถานะของเหลวและจะเริ่มเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งที่ประกอบด้วยโลหะผสม α (19.2 เปอร์เซ็นต์ Sn) และโลหะผสม β (97.5 เปอร์เซ็นต์ Sn) ที่อุณหภูมิ 183 องศาเซลเซียส ดังสมการของปฏิกิริยาดังนี้

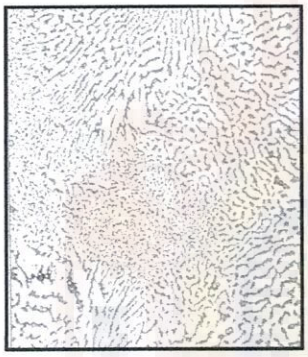
$$\text{ของเหลว (61.9\% Sn)} \xrightarrow[\text{ทำให้เย็นตัว}]{183\,^{\circ}\mathrm{C}} \alpha\ \text{(19.2\% Sn)} + \beta\ \text{(97.5\% Sn)} \quad (2.2)$$

ปฏิกิริยายูเทคติก จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 183 องศาเซลเซียส จนกระทั่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นสมบูรณ์ หลังจากนั้นโลหะผสมนั้นก็จะเย็นตัวลงอีกครั้งจนถึงอุณหภูมิห้อง ในช่วงที่อุณหภูมิลดลงนี้ สภาพละลายได้ของตัวถูกละลายในโลหะผสม α และ β จะลดลงตามเส้น Solvus Lines แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการแพร่จะช้าที่อุณหภูมิต่ำทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ยาก โครงสร้างจุลภาค(Microstructure) ของโลหะผสมนี้จะประกอบด้วยเฟสของ α กระจายสม่ำเสมอในเฟสของ β ดังแสดงในรูปที่ 2.11 หรือรูปที่ 2.12 (ก) องค์ประกอบที่อยู่ทางด้านซ้ายของจุด Eutectic จะเรียกว่า ไฮเปอร์ยูเทคติก (Hypoeutectic) รูปที่ 2.12 (ข) ในทางตรงกันข้าม องค์ประกอบที่อยู่ทางด้านขวาของจุด Eutectic จะเรียกว่าไฮเปอร์ยูเทคติก Hypereutectic รูปที่ 2.12 (ง)

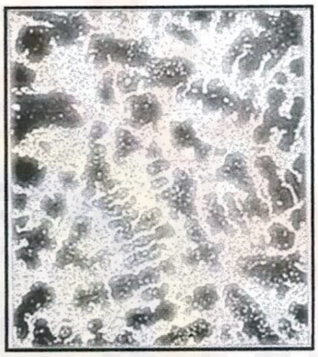
2.4.2 การทำให้ระบบของโลหะผสม Pb-Sn ที่ประกอบด้วย 60 เปอร์เซ็นต์ Pb และ 40 เปอร์เซ็นต์ Sn เย็นตัวลงอย่างช้า ๆเมื่อทำให้โลหะผสม 40 เปอร์เซ็นต์ Sn-60 เปอร์เซ็นต์ Pb (Alloy 2 ในรูปที่ 2.11) เย็นตัวลงจากสถานะของเหลวที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส (จุด a) ถึงอุณหภูมิก่อน 245 องศาเซลเซียส (จุด b) ระบบจะประกอบด้วยเฟสของของเหลวเพียงเฟสเดียว และที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส โลหะผสม α ที่ประกอบด้วย 12 เปอร์เซ็นต์ Sn จะเริ่มตกผลึกออกจาก

ของเหลว ซึ่งโลหะผสม α ที่เกิดขึ้นนี้อาจเรียกว่า Primary หรือ Proeutectic Alpha คำว่า Proeutectic Alpha นี้ถูกใช้เพื่อแยกแยะความแตกต่างของโลหะผสม α ที่เกิดขึ้นภายหลังโดยปฏิกิริยา Eutectic

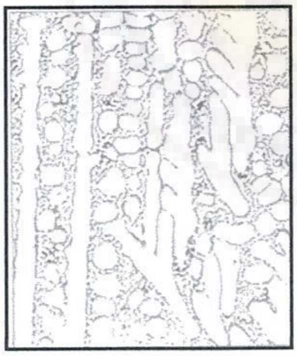
ขณะที่ของเหลวถูกทำให้เย็นตัวลงจากอุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิเหนือ 183 องศาเซลเซียส เล็กน้อย (จุด b ถึง d ในเฟสไดอะแกรม) ภายในระบบจะประกอบด้วย 2 เฟส คือ เฟสของของเหลว และเฟสของโลหะผสม α สัดส่วนองค์ประกอบของเฟสของแข็ง (α) จะเปลี่ยนแปลงตามเส้น Solidus กล่าวคือจาก 12 เปอร์เซ็นต์ Sn อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส ถึง 19.2 เปอร์เซ็นต์ Sn ที่อุณหภูมิ 183 องศาเซลเซียส แต่การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนองค์ประกอบจะเปลี่ยนแปลงเช่นนี้ได้ก็ต่อเมื่อโลหะผสมนี้ถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างช้า ๆ เพื่อให้อะตอมเกิดการแพร่เพื่อทำให้ภายในโครงสร้างมีความสม่ำเสมอ ที่อุณหภูมิ Eutectic (183 องศาเซลเซียส) ของเหลวที่เหลือในระบบจะแข็งตัวภายใต้ปฏิกิริยา Eutectic ดังสมการที่ (2.2) หลังจากที่ปฏิกิริยา Eutectic เกิดสมบูรณ์ โลหะผสมจะประกอบด้วย Proeutectic α และของผสม Eutectic ที่ประกอบด้วยโลหะผสม α (19.2 เปอร์เซ็นต์ Sn) และโลหะผสม β (97.5 เปอร์เซ็นต์ Sn)



(ก)



(ข)

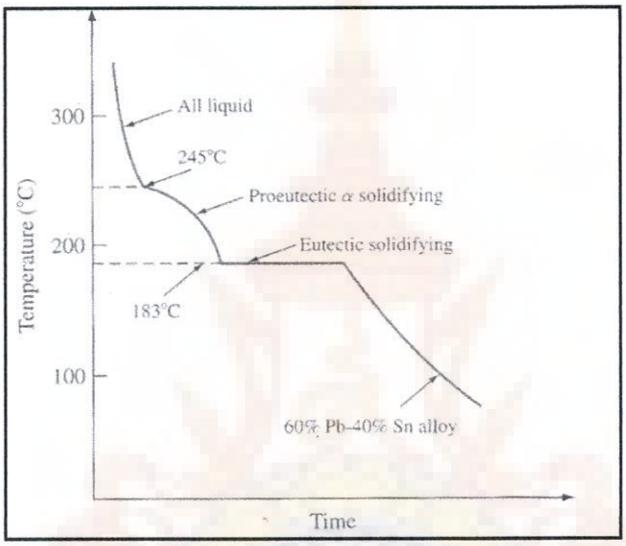


(ค)

(ข)

รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างจุลภาคของตะกั่วและดีบุก [12]

เมื่อทำให้ระบบเย็นตัวลงต่ำกว่าอุณหภูมิ 183 องศาเซลเซียส ต่อไปจนถึงอุณหภูมิห้อง ปริมาณของดีบุกในเฟสของ α และปริมาณตะกั่วในเฟสของ β จะลดลง แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากอัตราการแพร่จะช้าลงเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ดังนั้นระบบจึงยากที่จะเข้าสู่ภาวะสมดุลได้ รูปที่ 2.12(ข) แสดงโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของโลหะผสมที่ประกอบด้วย 40 เปอร์เซ็นต์ดีบุก (Sn) 60 เปอร์เซ็นต์ตะกั่ว (Pb) ซึ่งถูกทำให้เย็นลงอย่างช้า ๆ ซึ่งจะสังเกตเห็น Dendrite ที่เป็นเฟสของ α ถูกล้อมรอบด้วยเฟสของของแข็งที่มีองค์ประกอบ Eutectic

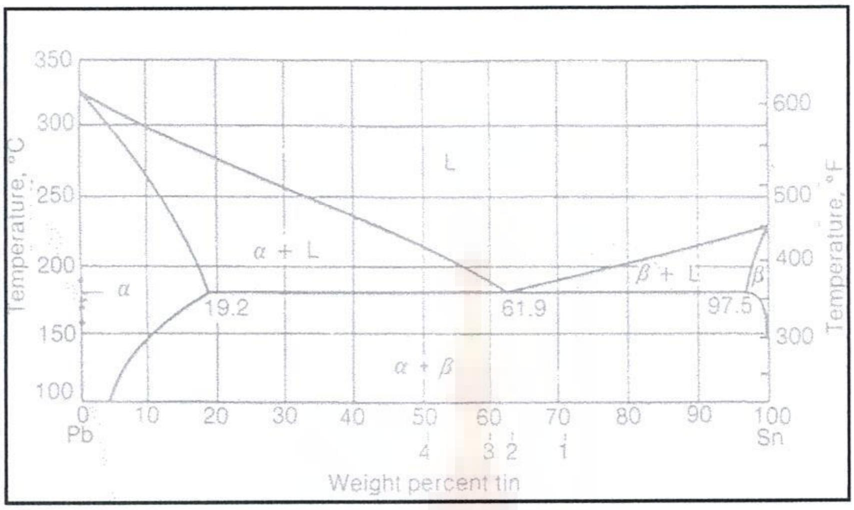


รูปที่ 2.13 แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวของตะกั่ว - ดีบุก [12]

2.5 โลหะผสมตะกั่วและดีบุก

แผนภูมิสมดุลมีลักษณะคล้ายคลึงกับตะกั่วและพลวง คือให้ปฏิกิริยายูเทคติกที่อุณหภูมิ 183 องศาเซลเซียส ที่ส่วนผสม 61.9 เปอร์เซ็นต์ ดีบุก เฟส α เป็นสารละลายของแข็งโดยที่ดีบุกสามารถละลายได้สูงสุด 19.2 เปอร์เซ็นต์ เฟส β เป็นสารละลายของแข็งทางด้านดีบุก โดยตะกั่วจะละลายได้มากที่สุดในดีบุก 2.5 เปอร์เซ็นต์ โครงสร้างของโลหะผสม Hypo-Eutectic จะประกอบด้วยเฟส β กับโครงสร้างยูเทคติก

ส่วนรูปที่ 2.13 แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวของโลหะผสมนี้ (60 เปอร์เซ็นต์ ตะกั่ว-40 เปอร์เซ็นต์ ดีบุก) ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าเส้นโค้งการเย็นตัว จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความชันขึ้นที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิจะคงที่ในช่วงที่ส่วนผสมยูเทคติด เกิดการแข็งตัว



รูปที่ 2.14 แสดงแผนภาพสมดุลของตะกั่วและดีบุก [13]

ดีบุกเมื่อผสมกับตะกั่วจะมีบทบาทเพิ่มทั้งความแข็งแรงและความแข็งให้กับโลหะผสมเช่นเดียวกับพลวง นอกจากนี้ยังให้โลหะผสมมีจุดหลอมเหลวต่ำลง เหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นโลหะบัดกรี (Solder) ซึ่งจะต้องมีคุณสมบัติไหลง่ายและซึมลงไปตามช่องว่างได้ดีซึ่งเรียกคุณสมบัตินี้ว่า Wetting นอกจากนี้ยังจะต้องมีจุดหลอมเหลวต่ำ ซึ่งโลหะผสมตะกั่วตรงส่วนผสมยูเทคติคจะมีความเหมาะสมที่จะเป็นโลหะบัดกรีที่ดี เพราะมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำและมีช่วงการแข็งตัวที่แคบมาก คือจะแข็งตัวได้ทันทีโดยไม่ผ่านช่วงการแข็งตัวที่เหนียวข้น (Pasty Stage) โลหะบัดกรีบางชนิดอาจจะผสมพลวงเล็กน้อย แต่ให้พลวงอยู่ในสภาพเป็นสารละลายของแข็งจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะบัดกรี

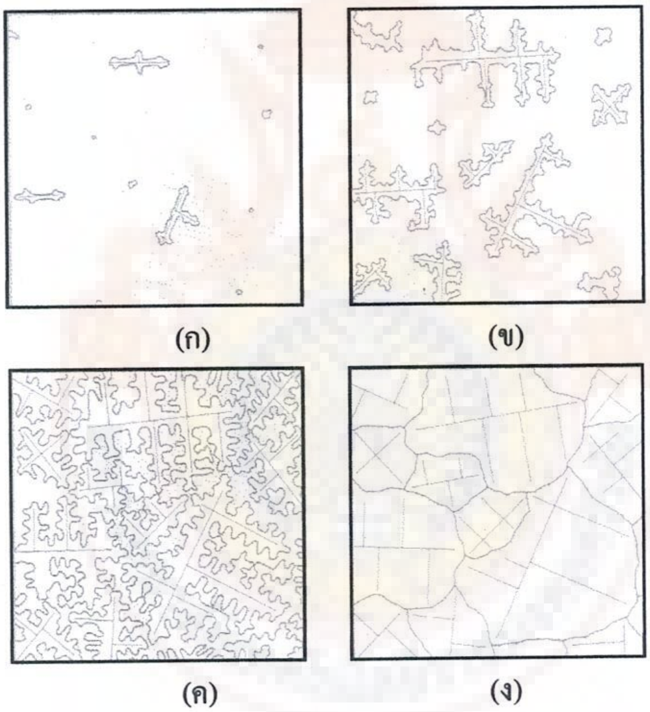
2.6 การแข็งตัวของโลหะ

ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะ กระบวนการเริ่มแรกคือการหล่อ โดยการหลอมโลหะให้อยู่ในสภาวะของเหลว จากนั้นเทแบบหล่อแล้วปล่อยให้เกิดการแข็งตัว ซึ่งเรียกว่า การแข็งตัวของโลหะ (Solidification of Metal) โลหะจะเกิดการแข็งตัวเมื่ออุณหภูมิหลอมเหลวลดต่ำลงมาจนถึงอุณหภูมิแข็งตัวโครงสร้างที่ได้จากการแข็งตัวจะมีผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกล ดังนั้นการควบคุมขนาดและรูปร่างของเม็ดเกรนจึงต้องกระทำกันในช่วงที่โลหะเกิดการแข็งตัวนี้

ในขณะที่โลหะเกิดการแข็งตัว อะตอมจำนวนมากจะวิ่งเข้ามารวมกลุ่มและจัดเรียงตัวต่อกันเป็นโครงสร้างผลึกและขยายตัวออกอย่างมีทิศทาง กระบวนการแข็งตัวของโลหะจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ การกำเนิดนิวเคลียสในขั้นแรก และการเติบโตหรือขยายตัวของนิวเคลียสจะเป็น

ขั้นตอนถัดมา รูปที่ 2.15 (ก) แสดงการกำเนิดนิวเคลียสเริ่มต้นของของแข็งซึ่งเกิดจากอะตอมของโลหะหลอมเหลวมารวมตัวกันเมื่ออุณหภูมิของน้ำโลหะเย็นลงมาถึงจุดแข็งตัว อนุภาคของแข็งขนาดเล็กนี้เรียกว่า นิวคลีไอ (Nuclei)

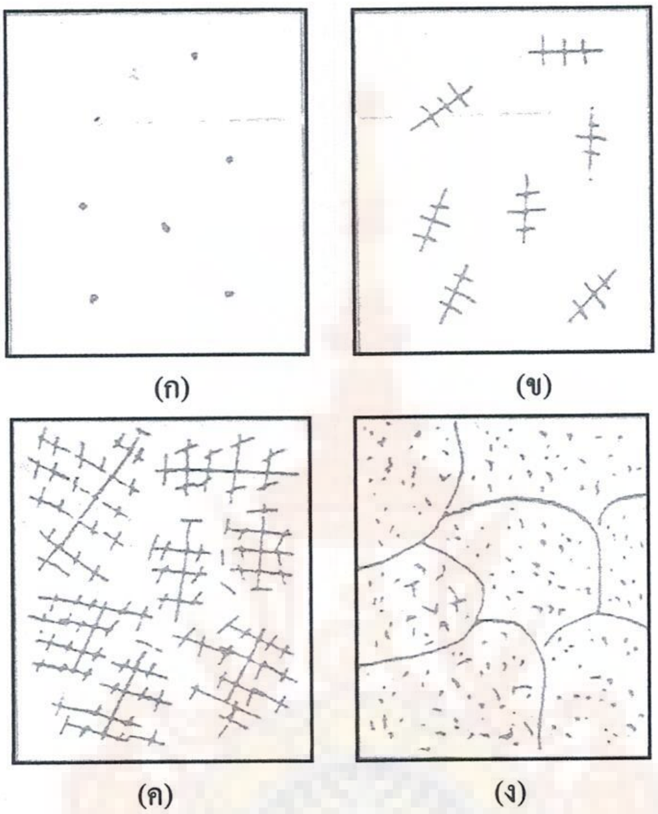
นิวคลีไอจะขยายตัวเนื่องจากอะตอมของโลหะในโลหะเหลววิ่งมาเกาะตัวเพิ่มขึ้นและขยายตัวเป็นกิ่งก้านสาขาคล้ายกิ่งไม้ (รูปที่ 2.15 (ข) และ (ค)) โดยมีชื่อเรียกตามลักษณะที่มองเห็นว่า ผลึกกิ่งไม้ (Dendrite) เมื่อมีการขยายตัวโลหะขึ้นเรื่อย ๆ ปลายของผลึกกิ่งไม้จะชนกัน (รูปที่ 2.15 (ค)) ทำให้ไม่สามารถขยายตัวไปในทิศทางนั้นได้อีก แต่จะเปลี่ยนไปขยายตัวไปยังบริเวณที่เป็นของเหลว จะกระทั่งของเหลวหมดไปกลายเป็นของแข็งทั้งหมด ผลึกกิ่งไม้เมื่อเติบโตเต็มที่จะเรียกว่า เม็ดเกรน (Grain) และขอบของเม็ดเกรนที่เป็นรอยเชื่อมต่อกันจะเรียกว่า ขอบเกรน (Grain Boundary) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ง)



รูปที่ 2.15 แสดงการแข็งตัวของโลหะ [14]

2.6.1 การแข็งตัวของโลหะบริสุทธิ์ เมื่อเทน้ำโลหะที่บริสุทธิ์ลงสู่แบบแล้ว น้ำโลหะจะถ่ายเทความร้อนจนเกิดนิวเคลียสเป็นจุดเริ่มต้นของการตกผลึก และจุดเริ่มต้นนั้นก็จะขยายตัวโตขึ้น ในขณะนั้นจุดเริ่มต้นใหม่ ๆ ก็จะเกิดขึ้นด้วย ปฏิกิริยาต่าง ๆ ดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นทุกส่วนของน้ำโลหะ โดยจะเกิดที่บริเวณที่น้ำโลหะถ่ายเทความร้อนได้ก่อน ซึ่งได้แก่บริเวณที่น้ำโลหะสัมผัสกับ

แบบหล่อ และในที่สุดน้ำโลหะทั้งหมดก็จะกลายเป็นผลึก (Grains) หลาย ๆ ผลึก โดยมีขอบของผลึก (Grain Boundary) แบ่งแยกผลึกทั้งหลายออกจากกัน ดังแสดงรูปที่ 2.16



(ก) นิวเครียสเริ่มเกิดขึ้น

(ข) นิวเครียสจะเติบโตทุกทิศทาง

(ค) ผลึกทั้งหลายที่เติบโตจะชนกันที่ขอบผลึก

(ง) การแข็งตัวสมบูรณ์โดยมีโครงสร้างหลายผลึก

รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะการเกิดของผลึก [14]

ขนาดของผลึกแต่ละผลึกขึ้นอยู่กับการเติบโตของผลึกและอัตราการเพิ่มของนิวเคลียสที่จุดเริ่มต้น คือถ้าอัตราการเติบโตของผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าอัตราการเพิ่มของนิวเคลียส ผลึกจะมีขนาดใหญ่ แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าอัตราการเติบโตของผลึกช้ากว่าการเพิ่มของนิวเคลียสที่จุดเริ่มต้น ก็จะทำให้ผลึกนั้นมีขนาดเล็ก

2.6.2 การแข็งตัวของโลหะผสม การแข็งตัวของโลหะบริสุทธิ์ที่กล่าวมาแล้วนั้น จะเห็นว่าสามารถทำความเข้าใจได้โดยง่าย แต่สำหรับโลหะผสมนั้นจะมีการแข็งตัวที่ซับซ้อนและแตกต่าง

กันออกไป ทั้งนี้ก็เพราะว่ามีการรวมตัวกันของโลหะ 2 ชนิด ซึ่งการรวมตัวกันนี้จะทำให้เกิดผลึกต่าง ๆ มากมาย โดยมีรายละเอียดดังนี้

หลังจากที่โลหะผสมที่เกิดจากการรวมกันของธาตุมากกว่า 1 ชนิดถูกเทลงสู่แบบหล่อโลหะ ผลึกของโลหะผสมที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากผลึกของโลหะบริสุทธิ์ ตัวอย่างเช่น โลหะผสมที่ประกอบด้วยธาตุ A และธาตุ B เกิดการแข็งตัว ผลึกที่เกิดขึ้นจะไม่เป็นผลึกของธาตุ A และธาตุ B แยกกันอยู่ แต่จะเป็นผลึกที่ประกอบไปด้วยธาตุ A และธาตุ B รวมกันอยู่ในลักษณะที่ธาตุ A ถูกละลายเข้าไปในธาตุ B หรือ ธาตุ B ถูกละลายในธาตุ A และการรวมกันทั้งสองลักษณะนั้นเรียกว่า สารละลายของแข็ง (Solid Solution) แต่ในบางครั้งอาจเกิดการรวมกันของธาตุ A และธาตุ B ซึ่งธาตุทั้งสองมีปริมาณใกล้เคียงกัน การรวมกันในลักษณะดังกล่าวนี้เรียกว่า สารประกอบของโลหะ (Intermetalic Compound) นอกจากสารละลายของแข็งและสารประกอบโลหะทั้ง 2 แล้ว ยังมีบางกรณีที่อาจจะพบได้ไม่บ่อยนัก คือกรณีที่ธาตุ A หรือธาตุ B หรือทั้ง A และ B จะปรากฏในสภาพผลึกบริสุทธิ์โดยไม่รวมตัวกัน

ดังนั้น จึงอาจจะสรุปได้ว่า โครงสร้างของโลหะผสมนั้นเกิดจากปฏิกิริยา 3 ลักษณะดังนี้ สารลายของแข็ง สารประกอบโลหะ และโลหะบริสุทธิ์

2.7 โครงสร้างจุลภาค

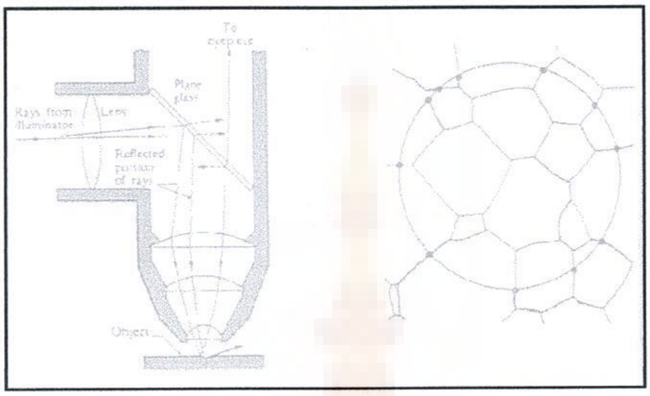
โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ได้แก่ การจัดเรียงตัวของเกรน (Grains) และเฟส (Phases) ในวัสดุ ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามปริมาณ, ขนาด, รูปร่าง และการกระจายตัวของเกรนและเฟส การศึกษาโครงสร้างจุลภาคต้องอาศัยกล้องจุลทรรศน์เชิงแสง (Optical Microscope) ซึ่งมีกำลังขยายถึง 2000 เท่า ที่ใช้กับโครงสร้างระดับไมโครเมตร (Micrometer) หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope) ซึ่งมีกำลังขยายถึง 50000 เท่า ที่ใช้กับโครงสร้างระดับโครงสร้างระดับนาโนเมตร (Nanometer)

2.7.1 วัสดุที่มีเฟสเดียว (Single – Phases Materials)

ถึงแม้วัสดุจะมีเฟสเดียว แต่อาจประกอบด้วยกลุ่มผลึกจำนวนมากจัดเรียงตัวในแนวต่างกัน โดยกลุ่มผลึกที่มีการจัดเรียงตัวไปทางเดียวกัน เรียกว่า เกรน ซึ่งบริเวณรอยต่อของเกรนที่เรียกว่า ขอบเกรน (Grain Boundaries) จะมีอะตอมจัดตัวกันอย่างหลวม ๆ ทำให้สามารถศึกษาขนาดและรูปร่างของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้โดยการ

1) ขัดผิวหน้าของวัสดุตัวอย่างให้เรียบ และเป็นเงามันคล้ายกระจก
2) ใช้สารเคมี เช่น กรด กัดผิวหน้าเป็นระยะเวลาสั้น ๆ (Etching)

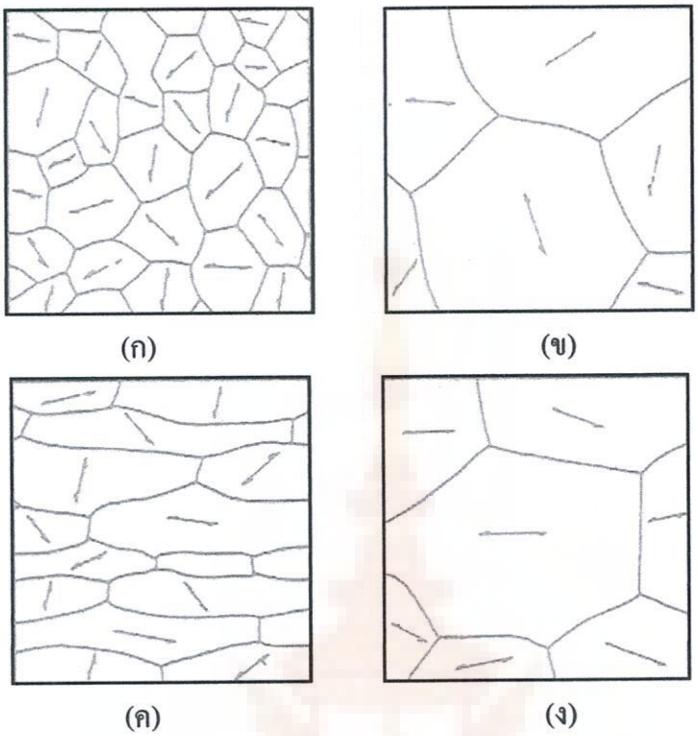
3) ส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 การสังเกตขอบเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์ บริเวณที่ถูกกัดด้วยกรดจะไม่สะท้อนแสง ทำให้เห็นเป็นเส้นมืดในภาพถ่าย



รูปที่ 2.17 แสดงการดูโครงสร้างจุลภาคด้ายกล้องจุลทรรศน์ [15]

2.7.2 เกรน (Grains) โครงสร้างจุลภาคของวัสดุที่มีเฟสเดียว จะเปลี่ยนแปลงไปตาม ขนาด (Size) รูปร่าง (Shape) และการจัดเรียง (Orientation) ของเกรน ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ทั้งขนาดและรูปร่างเป็นผลมาจากการเติบโตของเกรน นอกจากนี้ รูปร่างของเกรนยังขึ้นกับการจัดเรียงตัวของผลึกในขณะที่เกรนขยายขนาดให้ใหญ่ขึ้น

ถึงแม้จะบอกขนาดของเกรนด้วยความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลาง แต่เกรนส่วนใหญ่ไม่เป็นรูปทรงกลม แต่จะมีรูปร่างเป็น Equiaxed ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ก) เพราะมีขนาดใกล้เคียงกันทั้ง 3 มิติ หรืออาจมีรูปร่างเป็นแผ่น (Plate - Like) ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ค) หรือเป็นท่อน (Columnar) หรือเป็น Dendritic (Tree - Like)



รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างจุลภาค แบบเฟสเดียว [15]

2.7.3 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macroscope) การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคนี้เป็นการตรวจสอบโครงสร้างด้วยการมองด้วยตาเปล่า หรือถ้าใช้กล้องขยายก็มีกำลังขยายไม่เกิน 50 เท่า การเตรียมชิ้นงานเพื่อการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคนั้นไม่ยุ่งยากเพราะว่าเป็นการตรวจสอบรูพรุนภายในของโลหะ การแยกชั้นของผลึก รอยร้าว รอยแตก หน้าตัดที่ถูกดึงจนขาด และปริมาณธาตุผสมในโลหะ เป็นต้น

รูปที่ 2.19 แสดงโครงสร้างมหภาคของเพลาที่ขาดเนื่องจากการหมุนอย่างรุนแรง [15]

การตรวจสอบโครงสร้างดังกล่าวนี้มีวิธีการตรวจสอบหลายวิธี ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและจุดประสงค์ของการตรวจสอบ โดยมีรายละเอียดในแต่ละวิธีการดังนี้

1) การตรวจสอบธาตุผสมโดยวิธีการพิมพ์ภาพแบบเบามันน์ (Baumun) การตรวจสอบมหภาคโดยวิธีนี้จะสามารถทราบได้ว่ามีการแพร่กระจายของธาตุกำมะถันในโลหะมากน้อยเพียงใด การตรวจสอบวิธีนี้จะสามารถตรวจสอบการแพร่กระจายของธาตุกำมะถันในเหล็กกล้าเท่านั้น ซึ่งมีวิธีการตรวจสอบดังนี้

- ตัดชิ้นงานตามพื้นที่หน้าตัดที่ต้องการตรวจสอบด้วยเครื่องมือที่ทำให้เกิดความร้อนน้อยที่สุดทั้งนี้ก็เพราะความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้ธาตุกำมะถันมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้การตรวจสอบอาจเกิดข้อผิดพลาดจากความเป็นจริง
- ขัดผิวหน้าตัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 220 – 320 และในขณะขัดผิวควรเปิดน้ำเพื่อไล่เศษผงขัดและเศษโลหะออกด้วย
- ล้างผิวขัดให้สะอาดปราศจากไขมัน
- นำกระดาษอัดรูปถ่ายตอนกลางวันจุ่มลงในกรดกำมะถุนเจือจาง ซึ่งประกอบด้วยกรดกำมะถัน 5 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร โดยจุ่มนานประมาณ 2 นาที
- จากนั้นนำกระดาษอัดรูปออกจากกรดแล้วปล่อยให้แห้ง วางบนผิวขัดโดยใช้เวลาประมาณ 1 – 5 นาที
- ล้างกระดาษอัดรูปด้วยน้ำเปล่า แล้วนำไปแช่ในน้ำยาคงตัวซึ่งประกอบด้วยน้ำ 1 ลิตร เกลือ 250 กรัม และโพแทสเซียมเมทาไบซัลไฟด์ 25 กรัม โดยใช้เวลาในการแช่ประมาณ 15 นาที
- จากนั้นนำกระดาษอัดรูปดังกล่าวไป่ในน้ำเปล่านาน 30 นาที แล้วเป่าให้แห้งด้วยลมร้อน เมื่อเป่าด้วยลมร้อนจนกระดาษอัดรูปแห้งแล้ว เราะเห็นภาพการกระจายของกำมะถันเป็นสีน้ำตาลแก่ปรากฏอยู่บนกระดาษอัดรูปนั้น

2) การตรวจสอบโดยการกัดผิวกรดผิวงาน (Fly Etching) เหมาะสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ หรือเหล็กกล้าที่ผ่านการอบปกติมาแล้ว การตรวจสอบวิธีนี้จะใช้สำหรบการตรวจหาแนวเส้นใยการคราก หรือแนวเส้นใยรับแรง แนวเส้นดังกล่าวเกิดจากการขึ้นรูปเย็นแลกรรมวิธีทางความร้อน ซึ่งแนวดังกล่าวจะมีผลต่อความแข็งแรงของโลหะนั้น ๆ โดยวิธีการตรวจสอบดังต่อไปนี้

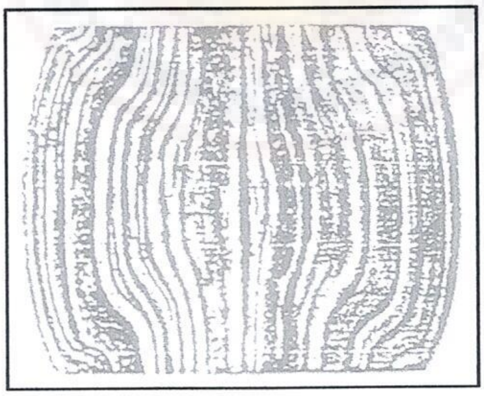
- ขัดผิวหน้าชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 – 1000
- นำชิ้นตรวจสอบไปอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 150 – 200 องศาเซลเซียส

- กัดผิวที่ต้องการตรวจสอบด้วยกรดดินประสิวแบบเจือ โดยใช้เวลาในการกัด 1 – 2 นาที
- เมื่อกัดด้วยกรดตามเวลาที่กำหนดแล้ว ล้างผิวทดสอบด้วยแอลกอฮอล์ แล้วเป่าให้แห้ง
- ตรวจสอบความเข้มของผิว ถ้าผิวตรวจสอบช่วงใดได้รับอิทธิพลจากการขึ้นรูปเย็น หรือกรรมวิธีทางความร้อน จนเกิดเส้นใยการครากและเส้นใยรับแรง ผิวช่วงนั้นจะถูกกัดด้วยกรดเป็นสีเข้มกว่าบริเวณอื่น

3) การตรวจสอบการไหลของเกรน (Grain Flow) เป็นการตรวจสอบโครงสร้างมหาภาควิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับการตรวจสอบเหล็กกล้าที่ผ่านการตีขึ้นรูป ซึ่งจะทำให้เกรนของเหล็กเกิดการไหลลื่นไปตามแนวแรงที่ตี เกรนที่ดีจะต้องมีการไหลของเกรนอย่างต่อเนื่องตามรูปร่างลักษณะของชิ้นงานนั้น ๆ ซึ่งจะส่งผลให้ชิ้นงานนั้นมีความแข็งแรงสูง

ดังนั้นการตรวจสอบโครงสร้างมหภาควิธีนี้ จะทำให้ทราบว่าเกรนของชิ้นงานที่ผ่านการตีขึ้นรูปมีการไหลของเกรนดีหรือไม่ โดยมีวิธีการตรวจสอบดังนี้

- ตัดชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบด้วยเครื่องมือตัดที่ไม่ก่อให้เกิดความร้อนสูง ทั้งนี้ก็เพราะว่าความร้อนที่เกิดขึ้นอาจส่งผลต่อผิวตรวจสอบ ทำให้การตรวจสอบผิดพลาดไปจากความเป็นจริง
- ขัดผิวที่ต้องการตรวจสอบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 – 320
- นำกรดเกลือ 2 ส่วน ผสมกับน้ำ 3 ส่วน แล้วนำไปต้มให้เดือด
- จุ่มชิ้นงานลงในกรดเกลือที่กำลังเดือดนานไม่เกิน 30 นาที แล้วนำชิ้นงานออกจากกรดเกลือ จากนั้นเราจะสามารถมองเห็นแนวการไหลของเกรนได้ชัดเจนดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบการไหลของเกรน [15]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

การศึกษาเพื่อหาข้อมูลเกี่ยวกับการสร้างแผนภาพสมดุลของวัสดุด้วยวิธีการวิเคราะห์ความร้อน เป็นการปรับปรุงสมบัติของโลหะบริสุทธิ์ให้ดีขึ้นมีสมบัติตามวัตถุประสงค์ทำได้โดยทำให้เป็นโลหะผสม (Alloy) จากการศึกษาโครงสร้างโลหะที่เปลี่ยนไป เมื่อองค์ประกอบและอุณหภูมิที่ต่าง ๆ กันเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล แล้วนำมาเขียนเป็นกราฟทำให้เกิดเป็นแผนภาพสมดุลด้วยวิธีการวิเคราะห์ความร้อนใช้เป็นบรรทัดฐานในการศึกษาสมบัติ และปรับปรุงคุณภาพของโลหะผสม

3.1 แผนการดำเนินงาน

ในการออกแบบและสร้างชุดวิเคราะห์ความร้อนเพื่อใช้ในการสร้างแผนภาพสมดุลด้วยวิธีการวิเคราะห์ความร้อนได้มีแผนในการดำเนินงานตามตาราง 3.1 ได้มีแผนการดำเนินงานดังนี้

3.1.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1.2 คำนวณและออกแบบชุดวิเคราะห์ความร้อน

3.1.3 จัดหาวัสดุอุปกรณ์

3.1.4 ดำเนินการสร้างชุดวิเคราะห์ความร้อน

3.1.5 ทดลองและเก็บข้อมูล

3.1.6 วิเคราะห์และปรับปรุงแก้ไข

3.1.7 สรุปผลการทดลอง

3.1.8 จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

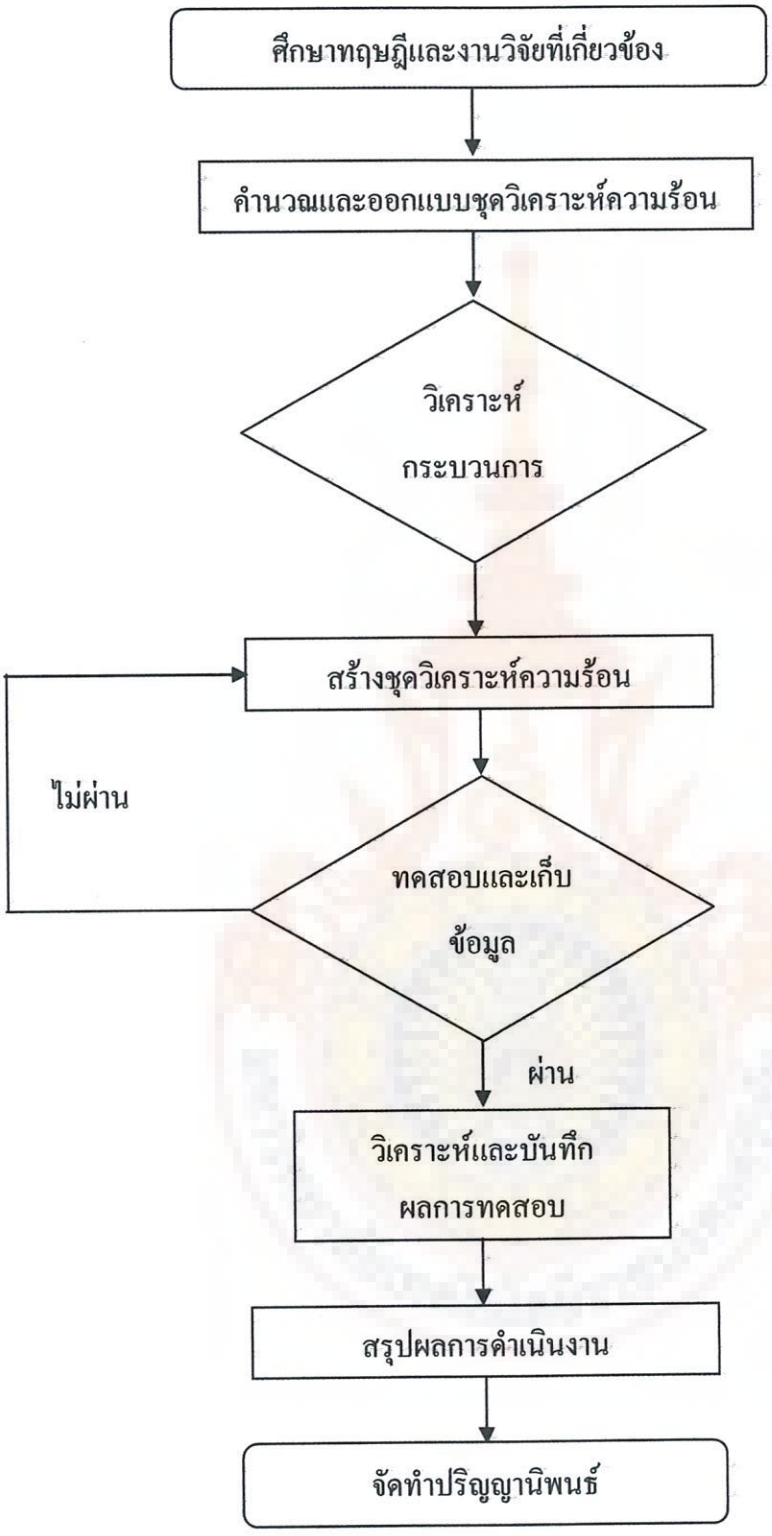
ตาราง 3.1 แผนการดำเนินการของโครงการ

กิจกรรม / ระยะเวลา	ระยะเวลา							
	2553					2554		
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ	มี.ค.
1.ศึกษาเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	- - -	- - -						
	———	———	———					
2.ออกแบบและสร้างชุดวิเคราะห์ความร้อน		- - -	- - -	- - -	- - -			
			———	———	———	———		
3.ทดลองการใช้ชุดวิเคราะห์ความร้อน				- - -				
					———	———	———	
4.ปรับปรุงชุดวิเคราะห์ความร้อน					- - -	- - -		
						———	———	
5.ทดสอบและเก็บข้อมูล				- - -	- - -	- - -	- - -	
						———	———	———
6.เสนอความก้าวหน้า					- - -			
							———	
7.จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์						- - -	- - -	- - -

แผนการดำเนินงาน - - - - -

การดำเนินงานจริง ————

จากตาราง 3.1 แสดงแผนการดำเนินงานและการดำเนินงานจริงซึ่งกิจกรรมบางอย่างในการดำเนินการจะไม่เป็นไปตามแผน เนื่องจากกิจกรรมบางอย่างต้องใช้เวลาและต้องมีการแก้ไขปรับปรุง ทำให้การทำงานล่าช้ากว่าแผนดำเนินงาน โดยมีขั้นตอนและรายละเอียดในการดำเนินงานดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

3.2 การคำนวณและการออกแบบสร้างชุดวิเคราะห์ความร้อน

การออกแบบชุดหลอม แบบขดลวดความต้านทาน มีอุณหภูมิเตาหลอม 1000 องศาเซลเซียส โดยทำโครงสร้างด้วยเหล็กฉาก ชุดหลอมเป็นระบบไฟฟ้า 220V

3.2.1 การกำหนดขนาดของเบ้าที่เหมาะสม ด้วยการเลือกใช้เบ้ากราไฟต์ ซึ่งทนอุณหภูมิได้สูงสุดประมาณ 1400 องศาเซลเซียส และเลือกใช้เบ้าหลอมโลหะยี่ห้อ มอร์แกน รุ่น A0.5ซึ่งมีขนาดภายนอกเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปากของเบ้าหลอมเท่ากับ 68 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางที่ก้นของเบ้าเท่ากับ 44 มิลลิเมตร และความสูงของเบ้าหลอมเท่ากับ 76 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เบ้านี้มีความหนาประมาณ 7 มิลลิเมตร ดังนั้นจะมีขนาดภายในเบ้าคิดเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปากของเบ้าเท่ากับ 54 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางที่ก้นของเบ้าเท่ากับ 30 มิลิเมตร และมีความลึกของเบ้าเท่ากับ 69 มิลลิเมตร น้ำหนักของเบ้าหลอมนี้หนักประมาณ 230 กรัม

รูปที่ 3.2 แสดงเบ้าหลอมชนิดกราไฟต์ ยี่ห้อมอร์แกนรุ่น A 0.5

1) คำนวณหาปริมาตรภายในเบ้าหลอมได้ดังนี้

จากสมการ 3.1

$$V = \left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{D_{top} + D_{bottom}}{2}\right)^2 (H) \quad (3.1)$$

แทนค่าในสมการ 3.1 จะได้ปริมาตรภายในเบ้าหลอมเท่ากับ

$$V = \left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{5.4-3}{2}\right)^2 (6.9)$$

$$= 7.80 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

เพราะฉะนั้น ปริมาตรภายในเบ้าหลอมกราไฟต์ รุ่น A0.5 จะเท่ากับ 7.80 ลูกบาศก์เซนติเมตร

2) คำนวณน้ำหนักของตะกั่วเหลว ซึ่งสามารถคำนวณหาน้ำหนักของตะกั่วเหลวที่บรรจุเต็มเบ้าได้ดังนี้

จากสมการ 3.2

$$W = \rho V \tag{3.2}$$

แทนค่าในสมการ 3.2 จะได้น้ำหนักของตะกั่วเหลวที่บรรจุเต็มเบ้าเท่ากับ

$$W = 11.3 \times 7.80$$

$$= 881.4 \text{ กรัม}$$

$$= 0.88 \text{ กิโลกรัม}$$

เพราะฉะนั้น น้ำหนักของตะกั่วเหลวที่บรรจุเต็มเบ้าหลอมชนิดกราไฟต์ รุ่น A0.5 จะเท่ากับ 0.88 กิโลกรัมซึ่งสามารถเลือกใช้เบ้าหลอมดังกล่าวนี้ได้ตามขอบเขตที่กำหนดไว้ว่าสามารถหลอมโลหะผสมตะกั่วได้ในปริมาณสูงสุดครั้งละไม่เกิน 1 กิโลกรัม

3.2.2 ออกแบบโครงสร้างของวิเคราะห์ความร้อนและฉนวนบุชุดวิเคราะห์ความร้อน

1) กำหนดชนิดและความหนาของฉนวนพื้นชุดวิเคราะห์ความร้อน พื้นชุดวิเคราะห์ความร้อน ต้องรับน้ำหนักของเบ้ากราไฟต์และน้ำหนักตะกั่ว รวมกันแล้วประมาณ 1.5 กิโลกรัม และต้องทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อนด้วย จึงเลือกใช้อิฐฉนวนความร้อน (Insulation Brick) เกรด C2 ซึ่งมีขนาดความกว้างเท่ากับ 11.5 เซนติเมตร ความยาวเท่ากับ 23 เซนติเมตร ความสูงเท่ากับ 7.6 เซนติเมตร โดยเรียงซ้อนกัน 1 ชั้น ได้พื้นชุดวิเคราะห์ความร้อน ที่มีความหนาเท่ากับ 7.6 เซนติเมตร

2) กำหนดชนิดและความหนาของฉนวนบุผนังชุดวิเคราะห์ความร้อน ต้องการวัสดุน้ำหนักเบาและเป็นฉนวนความร้อน เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนภายในชุดวิเคราะห์ความร้อน จึงเลือกใช้เซรามิกกันความร้อนแบบผืนผ้า (Ceramic Fiber Blanket) ซึ่งมีความหนา 5 เซนติเมตรวางเรียงซ้อนกัน 1 ชั้นครึ่ง ได้ความหนารวมเท่ากับ 7.5เซนติเมตร

3) กำหนดชนิดและความหนาของฉนวนด้านบนของชุดวิเคราะห์ความร้อน เลือกใช้เซรามิกกันความร้อนแบบแผ่น (Ceramic Fiber Vacuam Board) ซึ่งมีความหนา 5 เซนติเมตร วางเรียงซ้อนกัน 1 ชั้นได้ความหนารวมเท่ากับ 5 เซนติเมตร

4) ชุดตรวจวัดอุณหภูมิภายในชุดวิเคราะห์ความร้อน เลือกใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples) โดยมีชนิดของไส้แบบ K(CA)ขนาดของปลอกป้องกัน เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

5) ชุดให้ความร้อนการเผาไหม้ของชุดวิเคราะห์ความร้อน ใช้ขดลวดให้ความร้อนติดตั้งที่ผนังเตา 2 ด้าน โดยหล่อบนคอนกรีตทนไฟเพื่อกันสะเก็ดน้ำโลหะ กำลังไฟฟ้า 12A 220V 2P

6) โครงชุดวิเคราะห์ความร้อน ขนาดภายนอก กว้าง ยาว 320 × 340 มิลลิเมตร สูง 670 มิลลิเมตร ใช้เหล็กแผ่นหนา 3 มิลลิเมตร

3.2.3 การคำนวณปริมาณความร้อนที่ชุดวิเคราะห์ความร้อน ต้องการใช้

1) การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ให้กับตะกั่ว ปริมาณของตะกั่วที่ใช้ในการหลอม 0.88 กิโลกรัม ซึ่งมีความร้อนจำเพาะเท่ากับ 26.65 กิโลจูลต่อกิโลกรัมเคลวิน และมีความร้อนแฝงของการหลอมละลายเท่ากับ 4.77 กิโลจูลต่อกิโลกรัม โดยจะให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส หรือ 303 เคลวิน จนถึงอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส หรือ 1023 เคลวินจากนั้นกำหนดเวลา

ในการหลอมตะกั่ว 0.88 กิโลกรัม ได้ทั้งหมดภายในเวลาไม่เกิน 180 นาที ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ใช้เพื่อทำให้ตะกั่ว 0.88 กิโลกรัม หลอมละลายได้ดังนี้

จากสมการ 3.3

$$q_k = \frac{mC_p(T_1 - T_2) + mY}{t} \tag{3.3}$$

แทนค่าในสมการ 3.3 จะได้ปริมาณความร้อนเท่ากับ

$$q_{k1} = \frac{[0.88 \times 26.65 \times (1023 - 303)] + (0.88 \times 4.77)}{180 \times 60}$$

$$= 1.564 \text{ กิโลจูลต่อวินาที}$$

$$= 1564 \text{ วัตต์}$$

เพราะฉะนั้นปริมาณความร้อนที่ใช้กับตะกั่ว 1 กิโลกรัม หลอมละลายที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ในเวลา 180 นาที จะเท่ากับ 1564 วัตต์

2) การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ให้กับเบ้ากราไฟต์ น้ำหนักของเบ้ากราไฟต์ 0.23 กิโลกรัมซึ่งมีความร้อนจำเพาะของเบ้ากราไฟต์เท่ากับ 0.83 กิโลจูลต่อกิโลกรัม เคลวิน โดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 303 เคลวิน จนถึงอุณหภูมิ 1023 เคลวิน จะสามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ให้กับเบ้ากราไฟต์ ในเวลา 180 นาที ได้ดังนี้

จากสมการ 3.4

$$q_k = \frac{mC_p(T_1 - T_2)}{t} \tag{3.4}$$

แทนค่าในสมการ 3.4 จะได้ปริมาณความร้อนเท่ากับ

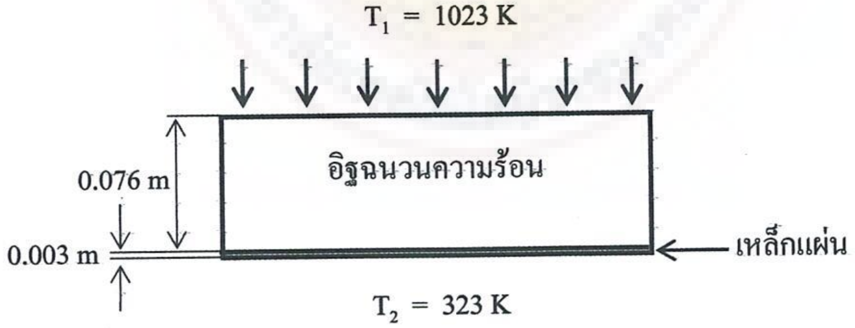
$$q_{k2} = \frac{0.23 \times 0.83 \times (1023 - 303)}{(180 \times 60)}$$

$$= 0.0127 \text{ กิโลจูลต่อวินาที}$$

$$= 12.72 \text{ วัตต์}$$

เพราะฉะนั้นปริมาณความร้อนที่ให้กับเบ้ากราไฟต์ ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสในเวลา 180 นาที จะเท่ากับ 12.72 วัตต์

3) การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านพื้นด้านล่างของชุดวิเคราะห์ความร้อน เมื่อต้องการความร้อนภายในชุดวิเคราะห์ความร้อน เท่ากับ 750 องศาเซลเซียส หรือ 1023 เคลวิน และอุณหภูมิผิวนอกของชุดวิเคราะห์ความร้อน ไม่เกิน 50 องศาเซลเซียสหรือ 323 เคลวินโดยพื้นด้านล่างของชุดวิเคราะห์ความร้อน มี 2 ชั้น คือ ชั้นในเป็นอิฐฉนวนความร้อนมีความหนาเท่ากับ 0.076 เมตร มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.45 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ชั้นที่ 2 คือเหล็กแผ่นหนา 0.003 เมตร มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 36 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน พื้นที่ของผนังพื้นด้านล่างของชุดวิเคราะห์ความร้อน ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อนเท่ากับ 0.36 ตารางเมตรดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงทิศทางการไหลของความร้อนผ่านผนังพื้นด้านล่างของชุดวิเคราะห์ความร้อน

จากสมการ 3.5 สามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านพื้นด้านล่างของชุดวิเคราะห์ความร้อน ได้จาก

$$q_k = \frac{T_1 - T_2}{\left[\left(\frac{L}{kA}\right)A + \left(\frac{L}{kA}\right)B + \left(\frac{L}{kA}\right)C\right]} \qquad (3.5)$$

แทนค่าในสมการ 3.5 จะได้ปริมาณความร้อนเท่ากับ

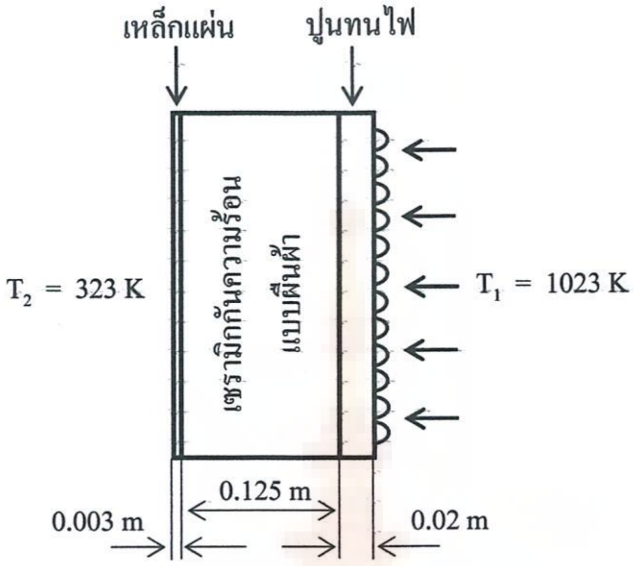
$$q_{k3} = \frac{(1023 - 323)}{\left[\left(\frac{0.076}{0.45 \times 0.36}\right) + \left(\frac{0.003}{36 \times 0.36}\right)\right]}$$

$$= \frac{700}{0.47 + (2.315 \times 10^{-4})}$$

$$= 1488.6 \text{ วัตต์}$$

เพราะฉะนั้นอัตราการส่งผ่านความร้อนที่พื้นล่างของชุดวิเคราะห์ความร้อน เท่ากับ 1488.6 วัตต์

4) การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านผนังเตาทั้ง 4 ด้าน เมื่อความร้อนภายในเตาเท่ากับ 1023 เคลวิน และต้องการอุณหภูมิผิวนอกของเตาไม่เกิน 323 เคลวิน โดยผนังด้านข้างจะมี 3 ชั้น คือ ด้านในจะมีปูนทนไฟมีความหนาเท่ากับ 0.02 เมตร มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.76 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ชั้นที่ 2 คือ เซรามิกซ์กันความร้อนแบบผืนผ้ามีความหนาเท่ากับ 0.125 เมตร มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.18 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน และชั้นนอกสุดคือเหล็กแผ่นหนา 0.003 เมตรมีค่าการนำความร้อนเท่ากับเท่ากับ 36 วัตต์ต่อเมตรเคลวินพื้นที่ของผนังด้านข้างที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อนเท่ากับ 0.72 ตารางเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงทิศทางการไหลของความร้อนผ่านผนังด้านข้างของชุดวิเคราะห์ความร้อน

จากสมการ 3.6 สามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านผนังด้านข้างของชุดวิเคราะห์ความร้อน ได้จาก

$$q_k = \frac{T_1 - T_2}{\left[\left(\frac{L}{kA}\right)A + \left(\frac{L}{kA}\right)B + \left(\frac{L}{kA}\right)C\right]} \qquad (3.6)$$

แทนค่าในสมการ 3.6 จะได้ปริมาณความร้อนเท่ากับ

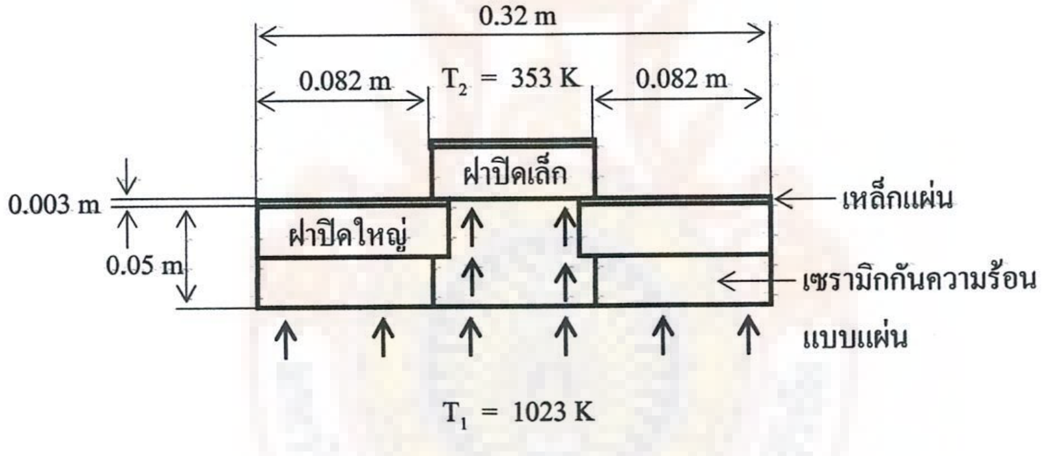
$$q_{k4} = \frac{(1023 - 323)}{\left[\left(\frac{0.02}{0.76 \times 0.72}\right) + \left(\frac{0.125}{0.18 \times 0.72}\right) + \left(\frac{0.003}{36 \times 0.72}\right)\right]}$$

$$= \frac{700}{0.037 + 0.965 + (1.157 \times 10^{-4})}$$

$$= 698.5 \text{ วัตต์}$$

เพราะฉะนั้นอัตราการส่งผ่านความร้อนที่ผนังชุดวิเคราะห์ความร้อน เท่ากับ 698.5 วัตต์

5) การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านผนังด้านบนของชุดวิเคราะห์ความร้อน เมื่อความร้อนภายในชุดวิเคราะห์ความร้อน เท่ากับ 1023 เคลวิน และต้องการอุณหภูมิผิวนอกของชุดวิเคราะห์ความร้อน ไม่เกิน 80 องศาเซลเซียส หรือ353 เคลวิน โดยฝาด้านบนของชุดวิเคราะห์ความร้อน จะมี 2 ชั้น คือชั้นในเป็นเซรามิกซ์กันความร้อนแบบแผ่นมีความหนาเท่ากับ 0.1เมตร สำหรับฝาปิดใหญ่ และความหนาเท่ากับ 0.045 เมตร สำหรับฝาปิดเล็ก โดยเซรามิกซ์กันความร้อนแบบแผ่นที่จะใช้มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.25 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ชั้นที่ 2 คือ เหล็กแผ่นหนา 0.003 เมตร มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 36 วัตต์ต่อเมตรเคลวิล พื้นที่ของฝาด้านบนของชุดวิเคราะห์ความร้อน สำหรับฝาปิดใหญ่เท่ากับ 0.108 ตารางเมตร และพื้นที่ของฝาด้านบนของชุดวิเคราะห์ความร้อน สำหรับฝาปิดเล็กเท่ากับ 0.037 ตารางเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงทิศทางการไหลของความร้อนผ่านฝาปิดด้านบนของชุดวิเคราะห์ความร้อน

จากสมการ 3.6 สามารถคำนวณปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านฝาด้านบนของชุดวิเคราะห์ความร้อน ได้จาก

$$q_k = \frac{T_1 - T_2}{\left[\left(\frac{L}{kA}\right)A + \left(\frac{L}{kA}\right)B + \left(\frac{L}{kA}\right)C\right]}$$

แทนค่าในสมการ 3.6 จะได้ปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านฝาปิดใหญ่เท่ากับ

$$q_{k5} = \frac{(1023-353)}{\left[\left(\frac{0.045}{0.25\times 0.108}\right)+\left(\frac{0.003}{36\times 0.108}\right)\right]}$$

$$= \frac{670}{3.7+(7.71\times 10^{-4})}$$

$$= 181.08 \text{ วัตต์}$$

แทนค่าในสมการ 3.6 จะได้ปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านฝาปิดเล็กเท่ากับ

$$q_{k6} = \frac{(1023-353)}{\left[\left(\frac{0.045}{0.25\times 0.037}\right)+\left(\frac{0.003}{36\times 0.037}\right)\right]}$$

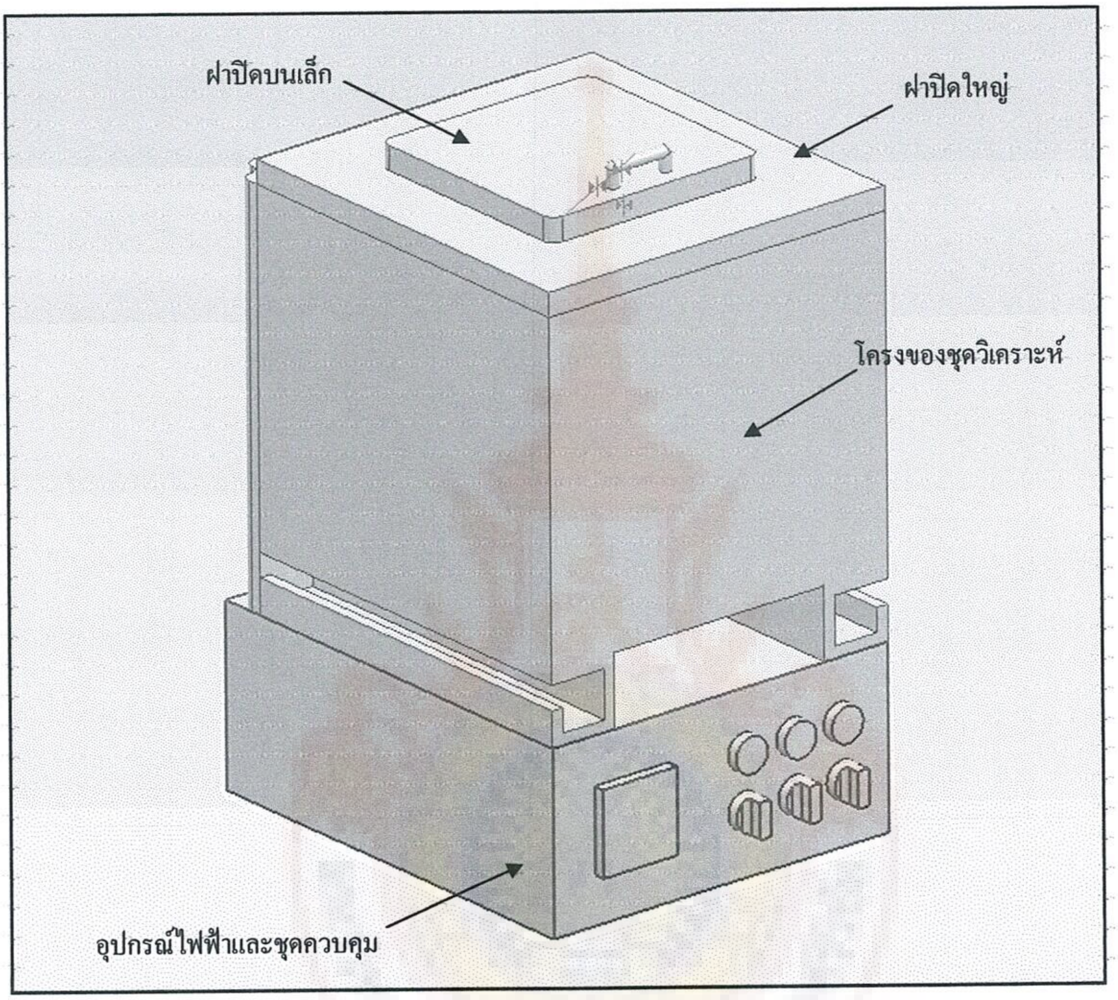
$$= \frac{670}{4.86+(2.25\times 10^{-3})}$$

$$= 137.8 \text{ วัตต์}$$

เพราะฉะนั้นอัตราการส่งผ่านความร้อนที่ฝาด้านบนของชุดวิเคราะห์ความร้อน เท่ากับ 181.08วัตต์ สำหรับฝาปิดใหญ่และ 137.8วัตต์ สำหรับฝาปิดเล็ก

ดังนั้นปริมาณความร้อนที่ใช้กับชุดวิเคราะห์ความร้อน ทั้งหมด เพื่อทำให้ตะกั่ว 1 กิโลกรัม หลอมละลายที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ในเวลา180 นาที จะเท่ากับ $q_{k1}+q_{k2}+q_{k3}+q_{k4}+q_{k5}+q_{k6}$ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4082.7 วัตต์ หรือประมาณ 4 กิโลวัตต์ ซึ่งปริมาณความร้อนดังกล่าวนี้มีค่าน้อยกว่ากำลังไฟฟ้ารวมของชุดวิเคราะห์ความร้อนที่มีค่าเท่ากับ 6.6 กิโลวัตต์ ทำให้ชุดวิเคราะห์ความร้อนที่

ได้สร้างขึ้นสามารถหลอมตะกั่ว 1 กิโลกรัมที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ในเวลา 180 นาที ตามที่กำหนดไว้ได้



รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะการออกแบบของชุดวิเคราะห์ความร้อน

3.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ในส่วนของการดำเนินการสร้างจะประกอบไปด้วยเครื่องมือเครื่องจักรที่เข้ามาเกี่ยวข้องดังนี้

1) เครื่องกลึงเฮอร์ริสันรุ่นเอ็ม 300 อาร์ (Harrison Model M 300R)

2) แท่นตัดไฟเบอร์ บ๊อซรุ่นจีซีโอ 2000 (BOSCHModel GCO 2000)

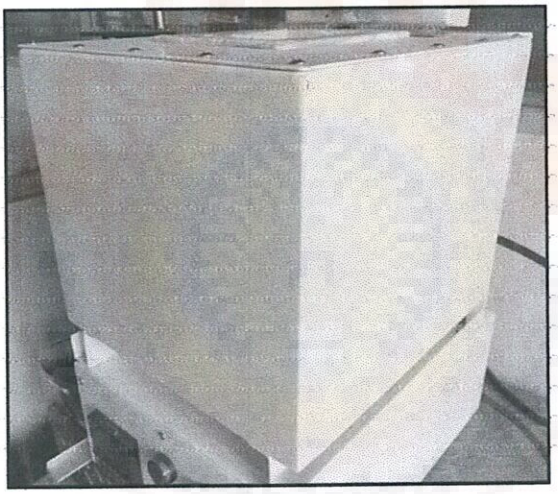
3) เครื่องเชื่อมไฟฟ้าไดชิรุ่นดีเอ.-ซี.ดี. 400 (Daichi Model DA.- C.D. 400)

4) เครื่องมือกลพื้นฐาน มีดังต่อไปนี้

- กลุ่มเครื่องมือมีดังต่อไปนี้ ตะไบ ค้อน ประแจปากตาย เลื่อย แคล้มป์จับยึดชิ้นงาน
- กลุ่มเครื่องมือกลมีดังต่อไปนี้ เครื่องเจียระไนมือ สว่านมือ
- กลุ่มเครื่องมือวัดมีดังต่อไปนี้ เวอร์เนียคาลิปเปอร์ เวอร์เนียไฮเกต ตลับเมตร ฟุตเหล็ก ฉาก
- กลุ่มอุปกรณ์ป้องกันมีดังต่อไปนี้ ถุงมือหนัง แว่นตา จุกอุดหู

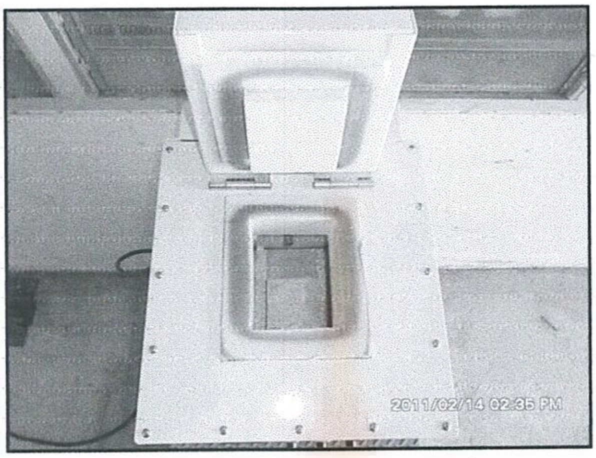
3.2.4 ส่วนประกอบของเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน สามารถแยกเป็นชิ้นส่วนต่างๆ ได้ดังนี้

1) ตัวโครงเตาหลอม ใช้เหล็กแผ่นหน้า 3มิลลิเมตร พับขึ้นรูปเป็นลักษณะรูปสี่เหลี่ยม กว้าง 320 มิลลิเมตร ยาว 340 มิลลิเมตรเมตรสูง 280 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.6



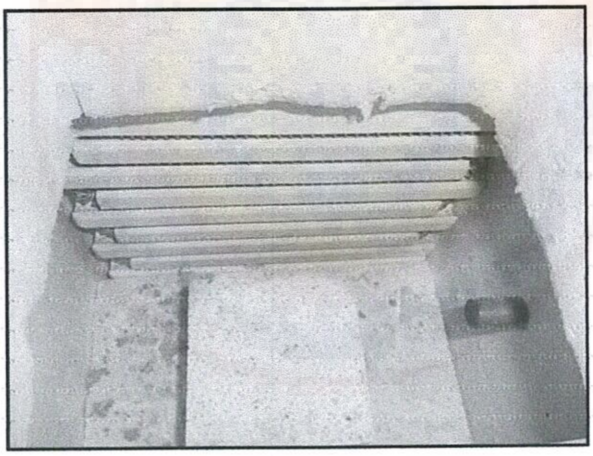
รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะโครงสร้างของชุดวิเคราะห์ความร้อน

2) ฝาปิด บุด้วยเซรามิกกันความร้อนแบบแผ่น เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนได้มีการออกแบบฝาปิดแบบ 2 ชั้น คือ ฝาปิดใหญ่ มีขนาด กว้าง 32 เซนติเมตร ยาว 34 เซนติเมตร ใช้ในการเปิดเพื่อที่จะทำการเปลี่ยนเบ้าหลอมและใส่เศษโลหะผสมอลูมิเนียมส่วนฝาปิดเล็ก มีขนาดกว้าง 18.8 เซนติเมตร ยาว 19.7 เซนติเมตร



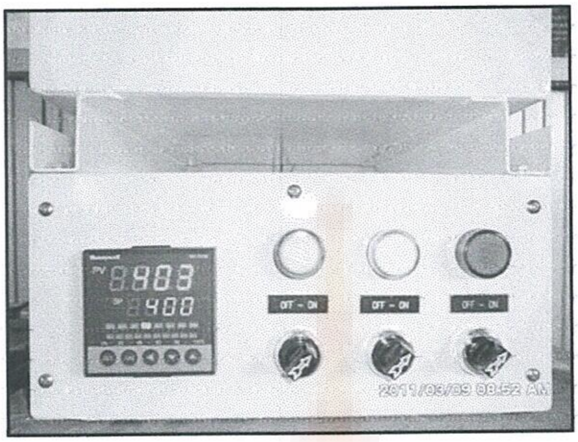
รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะฝาเปิด – ปิดด้านบน

3) ชุดแผงขดลวดให้ความร้อนใช้ชุดแผงขดลวดให้ความร้อนแบบสำเร็จรูป ใช้ของ Kanthal ขดลวดให้ความร้อนติดตั้งที่ผนังเตา 2ด้าน โดยหล่อบนคอนกรีตทนไฟเพื่อกันสะเก็ดน้ำโลหะ กำลังไฟฟ้า 12A 220V 2P

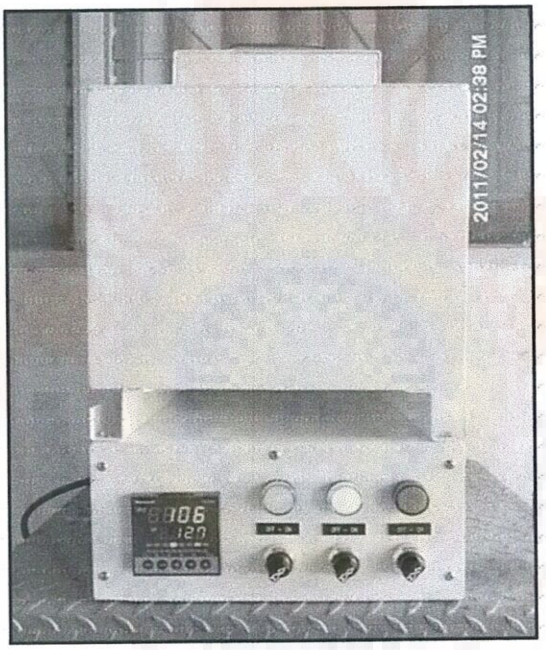


รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะการติดตั้งขดลวดให้ความร้อน

4) ตู้ควบคุมอุณหภูมิและวงจรไฟฟ้าลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมกว้าง 32 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตรและสูง 14.5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะตู้ระบบไฟฟ้าและชุดควบคุม

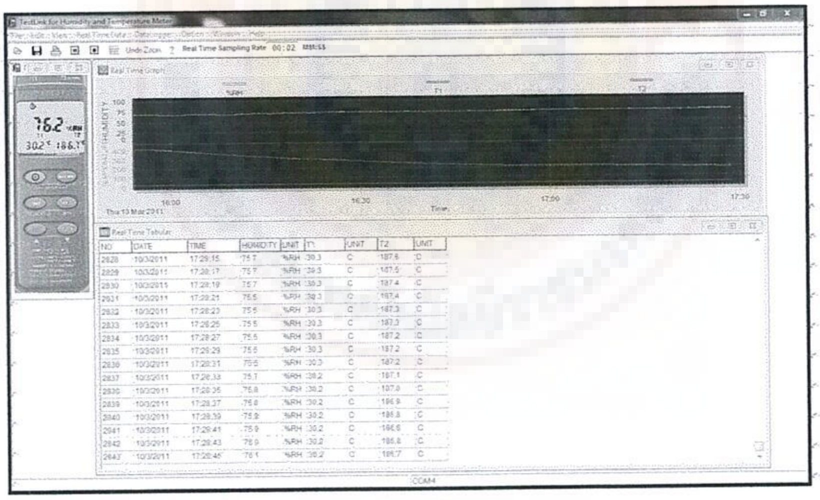


รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะของชุดหลอมสำหรับการทดลอง

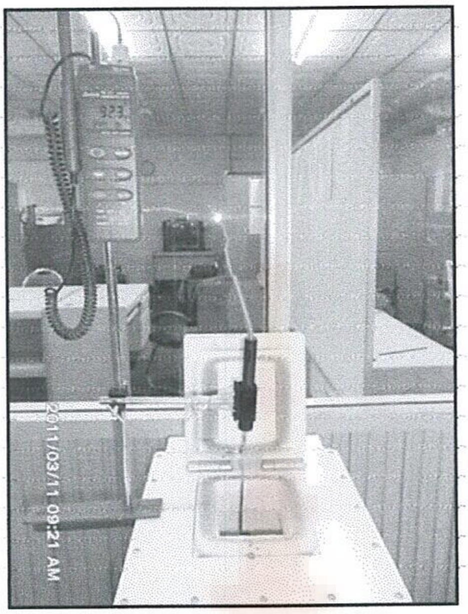
3.2.5 ชุดเก็บข้อมูลความร้อน ทำการออกแบบการวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เป็นอุปกรณ์ในการวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำโลหะ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ธาตุหนึ่งที่เป็นฐานสำหรับการสร้างคือ นิเกิล การบำรุงรักษาและสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่กำหนดเป็นค่ามาตรฐานจะไม่ใช้โลหะผสมแต่โดยทั่วไปจะผสมธาตุพิเศษเข้าไปเพื่อปรับปรุง

คุณภาพของแรงเคลื่อน/อุณหภูมิของจุดหลอมละลายที่กำหนด ใช้การบันทึกและเก็บข้อมูลอุณหภูมิเป็นแบบ Data Logger ในการทดลองจะต่ออุปกรณ์ชุดวัดอุณหภูมิเข้ากับคอมพิวเตอร์โดยตรงเพื่อจะทำให้ง่ายต่อการสังเกตการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากหน้าจอคอมพิวเตอร์

รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะของชุดเก็บข้อมูลความร้อน



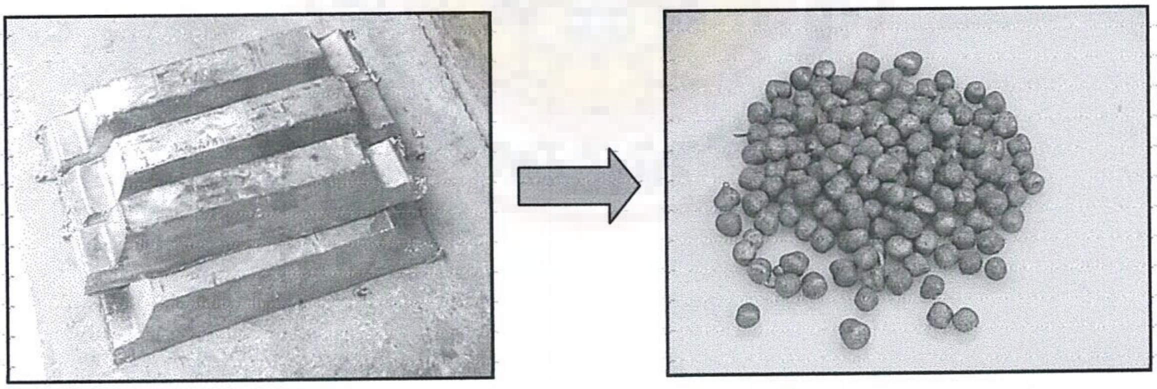
รูปที่ 3.13 แสดงหน้าจอแสดงผลของชุดเก็บข้อมูลความร้อน



รูปที่ 3.14 แสดงลักษณะของการติดตั้งชุดเก็บข้อมูลความร้อน

3.3 วัสดุที่ใช้ทำการทดลอง

3.3.1 ตะกั่ว การเตรียมตะกั่วเพื่อใช้ในการทดลองเนื่องจากตะกั่วที่ได้มาเป็นตะกั่วแท่งจึงยากที่จะชั่งน้ำหนักให้ได้น้ำหนักตามที่ต้องการเพื่อใช้ทดลองจึงจำเป็นที่จะต้องทำตะกั่วที่มีอยู่เป็นเม็ดเล็ก ๆ จึงได้นำเอาตะกั่วแท่งมาหลอมให้ละลายที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส แล้วให้น้ำโลหะที่ได้ไหลผ่านรูเล็ก ๆ หยดลงในน้ำโดยต้องระวังไม่ให้น้ำมีอุณหภูมิสูงจะได้เม็ดตะกั่วดังรูปที่ 3.15

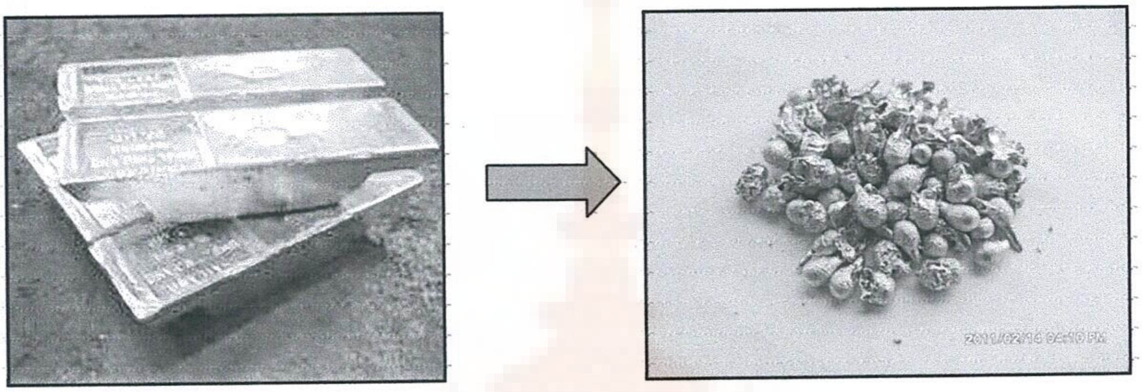


ก) ตะกั่วแท่ง

ข) ตะกั่วเม็ด

รูปที่ 3.15 แสดงลักษณะตะกั่วสำหรับการทดลอง

3.3.2 ดีบุก การเตรียมดีบุกเพื่อใช้ในการทดลองเนื่องจากดีบุกที่ได้มาเป็นดีบุกแท่งจึงยากที่จะชั่งน้ำหนักให้ได้น้ำหนักตามที่ต้องการเพื่อใช้ทดลองจึงจำเป็นที่จะต้องทำดีบุกที่มีอยู่เป็นเม็ดเล็ก ๆ จึงได้นำเอาดีบุกแท่งมาหลอมให้ละลายที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส แล้วให้น้ำโลหะที่ได้ไหลผ่านรูเล็ก ๆ หยดลงในน้ำโดยต้องระวังไม่ให้น้ำมีอุณหภูมิสูงจะได้เม็ดดีบุกดังรูปที่ 3.16



ก) ดีบุกแท่ง ข) ดีบุกเม็ด

รูปที่ 3.16 แสดงลักษณะดีบุกสำหรับการทดลอง

ตาราง 3.2 แสดงอัตราส่วนของวัสดุในการดำเนินการทดลอง

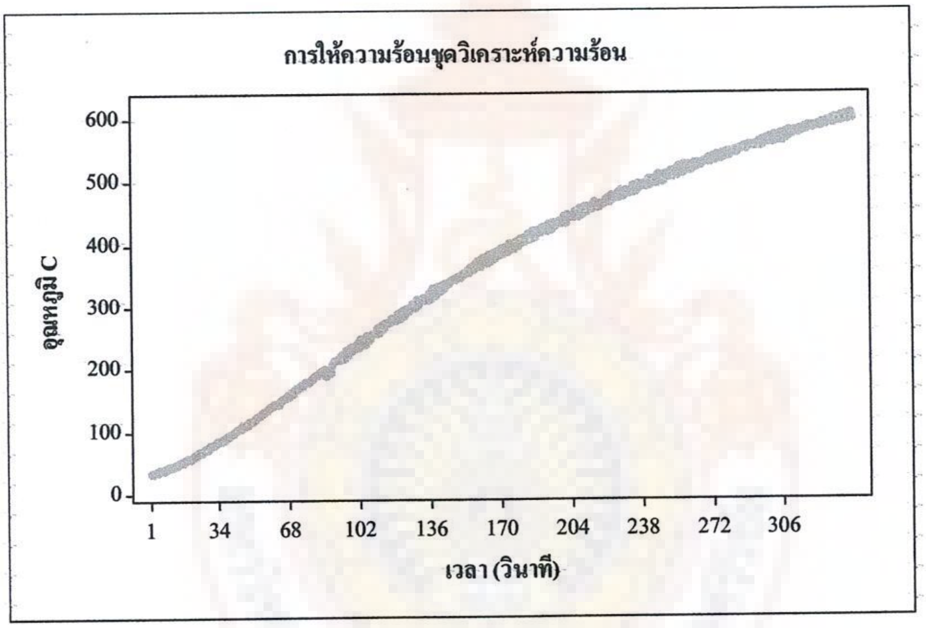
การทดลองครั้งที่	ดีบุก (Sn)		ตะกั่ว (Pb)	
	%	กรัม	%	กรัม
1	100	300	0	0
2	90	270	10	30
3	80	240	20	60
4	70	210	30	90
5	60	180	40	120
6	50	150	50	150
7	40	120	60	180
8	30	90	70	210
9	20	60	80	240
10	10	30	90	270
11	0	0	100	300

3.4 การทดสอบการใช้งานชุดทดสอบด้วยวิธีการวิเคราะห์ความร้อน

หลังจากที่ได้ทำการสร้างชุดทดสอบด้วยวิธีการวิเคราะห์ความร้อนแล้วจึงทำการทดสอบการใช้งานชุดทดลองเพื่อหาจุดบกพร่องและทำการปรับปรุงเพื่อจะให้ชุดทดสอบสามารถใช้ทำการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ

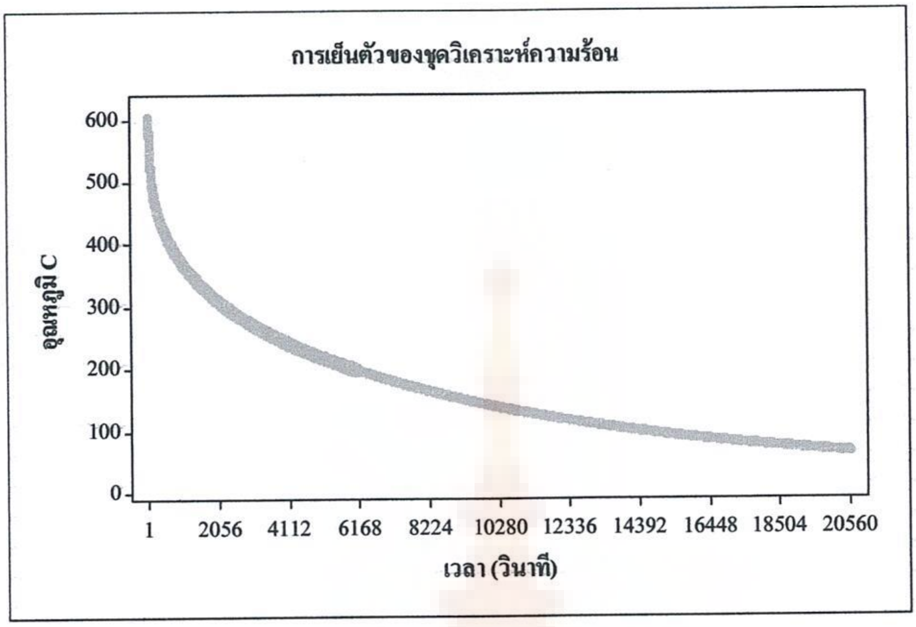
การทดสอบประสิทธิภาพชุดหลอมโดยการเปิดชุดหลอมตั้งอุณหภูมิ ที่ 600 องศาเซลเซียส เก็บข้อมูลโดยชุดวัดอุณหภูมิโดยได้กราฟ 2 กราฟ คือ

3.4.1 การให้ความร้อนของชุดหลอมตั้งอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ชุดหลอมใช้เวลา 11 นาที 8 วินาทีจึงได้อุณหภูมิที่ได้ตั้งไว้ในทุก ๆ 1 นาที อุณหภูมิของชุดหลอมจะเพิ่มขึ้น 50.84 องศาเซลเซียส หรือประมาณ 51 องศาเซลเซียส แสดงเป็นในรูปของกราฟดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 แสดงกราฟแสดงการให้ความร้อนของชุดหลอม

3.4.2 ขณะชุดหลอมมีอุณหภูมิที่ 600 องศาเซลเซียส ปล่อยให้ชุดหลอมเย็นตัวลงอย่างช้า ๆ โดยที่ปิดฝาชุดหลอมใช้เวลาในการเย็นตัว 12 ชั่วโมงเท่ากับว่าทุก ๆ 1 นาที อุณหภูมิของชุดหลอมจะลดลง 0.83 องศาเซลเซียส หรือประมาณ 1 องศาเซลเซียส แสดงเป็นในรูปของกราฟดังรูปที่ 3.19

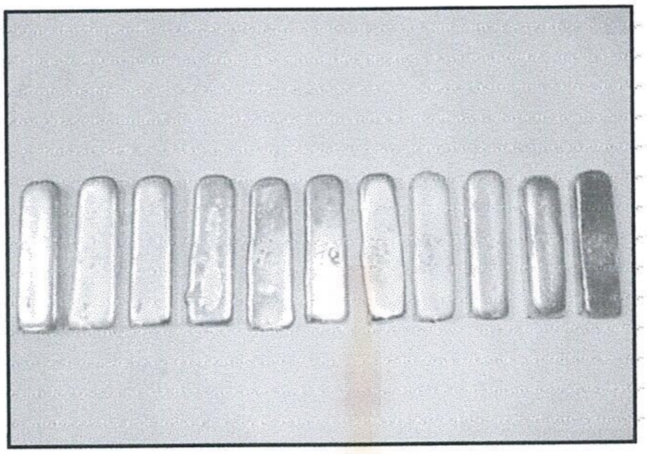


รูปที่ 3.18 แสดงกราฟแสดงการเย็นตัวของชุดหลอม

3.5 การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค

หลังจากทำการทดลองเพื่อหาเส้นโค้งการเย็นตัวของตะกั่วกับดีบุกได้แล้วนำเอาตะกั่วบริสุทธิ์ ดีบุกบริสุทธิ์ และตะกั่วผสมดีบุกที่ได้จากการทดลองมาหล่อใส่แบบที่เตรียมไว้เพื่อจะเตรียมไว้สำหรับการดูโครงสร้างจุลภาค

รูปที่ 3.19 แสดงลักษณะแบบที่ใช้หล่อวัสดุทดลอง

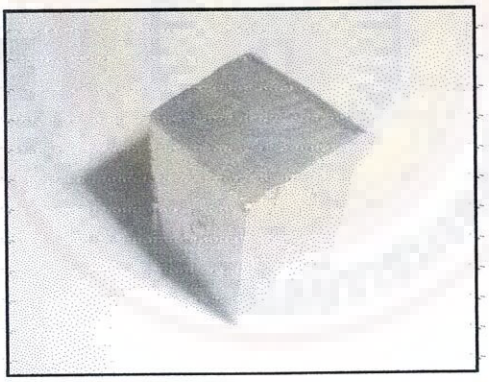


รูปที่ 3.20 แสดงลักษณะวัสดุที่หล่อเสร็จแล้วได้จากการทดลอง

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะ เป็นการศึกษาโครงสร้างของโลหะภายใต้กล้องที่มีกำลังขยายสูง

3.5.1 การตัดชิ้นงาน

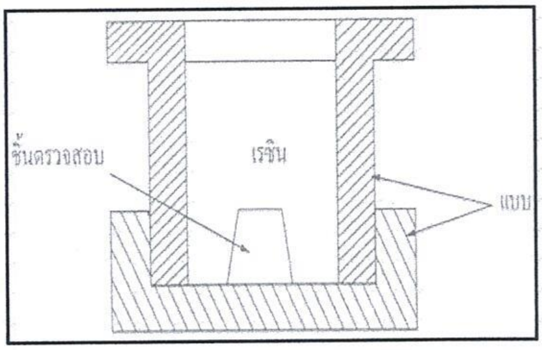
ชิ้นที่ได้จากการทดลองหลังจากที่หล่อเป็นแท่ง นำมาตัดเพื่อให้เกิดความร้อนน้อยที่สุดเพื่อป้องกันการเปลี่ยนโครงสร้างใช้เลื่อยมือในการตัด ตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ประมาณ 10 มิลลิเมตร เพื่อนำไปหล่อเรซินต่อไป

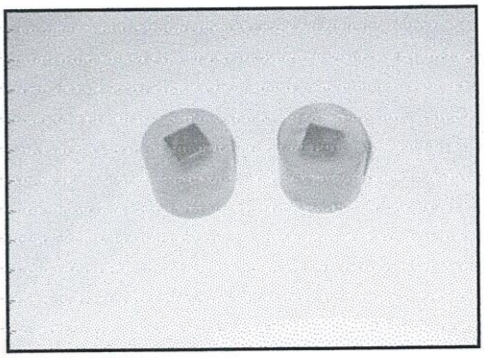


รูปที่ 3.21 แสดงลักษณะการตัดชิ้นงาน

3.5.2 การทำเรือนหุ้มชิ้นงาน (Mounting)

เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดเล็กไม่สามารถจับด้วยมือได้จะต้องใช้อุปกรณ์จับยึดเพื่อช่วยในการขัดให้มีผิวหน้าเรียบโดยการหล่อพลาสติกชนิดเทอร์โมเซสติ้ง เรซิน

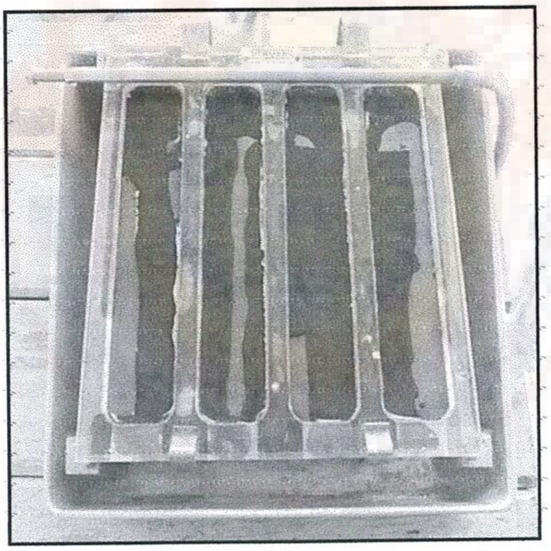




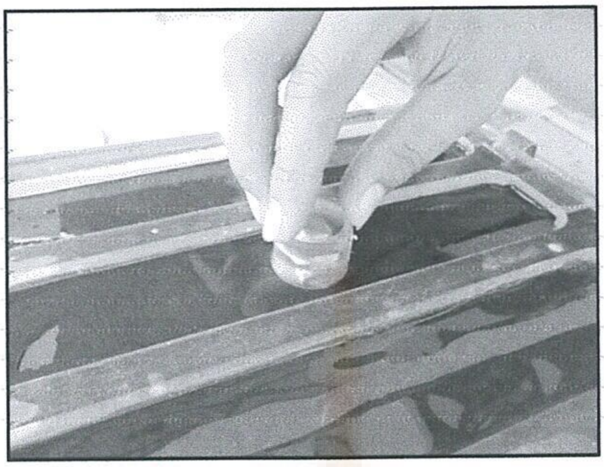
รูปที่ 3.22 แสดงลักษณะการจับชิ้นงานจริงที่หล่อด้วยเรซินเพื่อการขัดดูโครงสร้างจุลภาค

3.5.3 วิธีการขัดชิ้นงาน

1) การขัดหยาบ ทำการขัดผิวให้เรียบด้วยกระดาษทราย-น้ำ โดยเริ่มตั้งแต่เบอร์หยาบไปจนถึงเบอร์ละเอียด ในทางปฏิบัติจะเริ่มจากเบอร์ 150 180 220 320 400 600 800 และ 1000 ถึง 1200 ในการขัดจะใช้น้ำฉีดระบายความร้อน และล้างเอาเศษโลหะออกจากเม็ดของกระดาษทราย

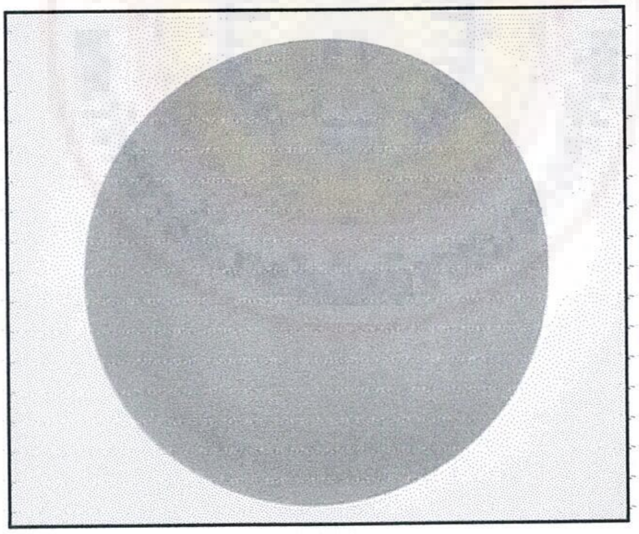


รูปที่ 3.23 อุปกรณ์การขัดกระดาษทราย - น้ำ



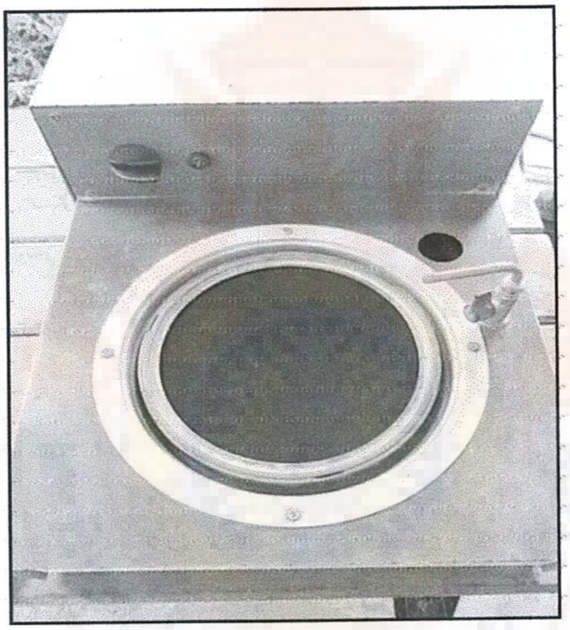
รูปที่ 3.24 แสดงการขัดผิวชิ้นงานทดสอบด้วยกระดาษทราย - น้ำ

2) การขัดละเอียด เป็นการขัดละเอียดขั้นสุดท้าย บนจานหมุนหุ้มด้วยผ้าสักหลาดโดยมีน้ำผสมผงขัดที่มีขนาดละเอียดมาก (0.3-0.05 ไมครอน) ที่นิยมใช้กันมาก คือ ผงอะลูมิน่า ($Al_2 0_3$) โดยขนาด 0.3 ไมครอน (ชนิดอัลฟ่า) จะใช้ในช่วงขัดมันหยาบ 2 ส่วน ขนาด 0.05 ไมครอน (ชนิดแกมม่า) จะใช้ในช่วงขัดมันละเอียดในขั้นสุดท้าย ทั้งหมดที่กล่าวมานี้จะช่วยขัดผิวของชิ้นงานทดสอบให้เรียบเทียบเท่ากับกระจกเงา โดยมีน้ำหล่อเย็นช่วยชะล้างเอาเศษโลหะออกจากจานหมุนดังกล่าวด้วย เครื่องชัดที่ใช้ส่วนใหญ่จะมีความเร็วรอบประมาณ 150-500 รอบต่อนาที

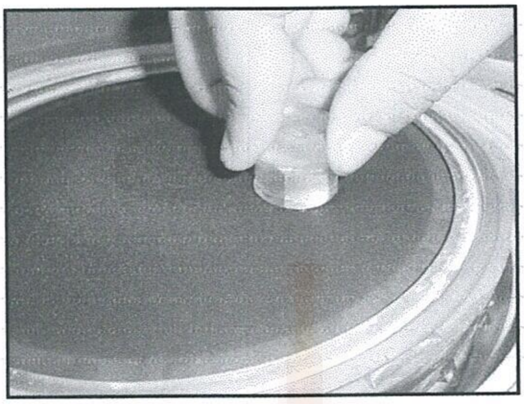


รูปที่ 3.25 แสดงลักษณะของผ้าสักหลาดสำหรับขัดด้วยเครื่องขัดมัน

รูปที่ 3.26 แสดงลักษณะของผงอะลูมิน่าที่ใช้ขัด



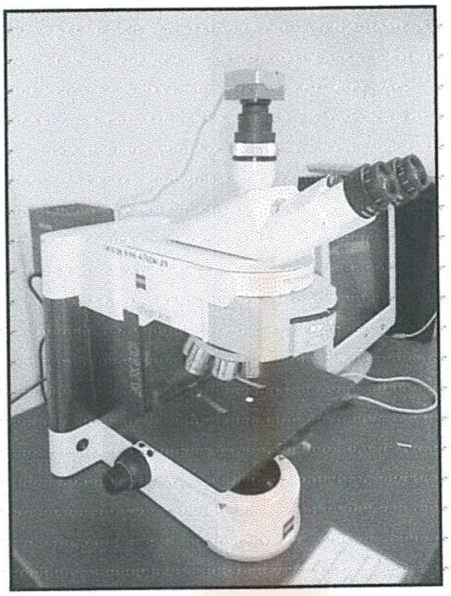
รูปที่ 3.27 แสดงลักษณะของเครื่องขัดแบบจานเดียว



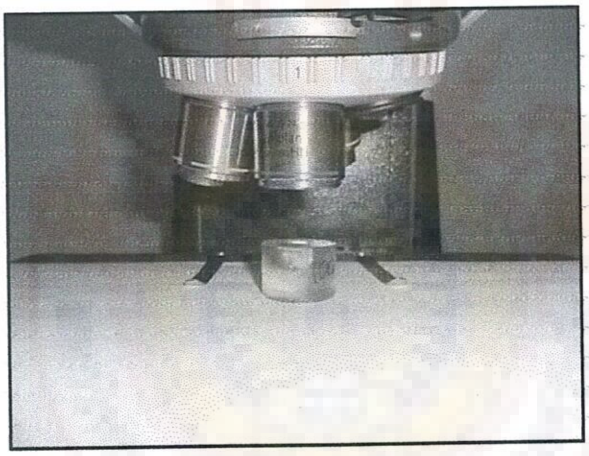
รูปที่ 3.28 แสดงลักษณะของการขัดมันด้วยเครื่องขัดแบบจานเดียว

3.5.4 การกัดกรด เป็นการนำชิ้นงานทดสอบไปกัดผิวบาง ๆ ด้วยสารละลายกรดเจือจาง ซึ่งมีหลายสูตร ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่จะศึกษาโครงสร้าง ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น เวลาที่ใช้ในการกัดกรดประมาณ 2-3 วินาที หลังจากนั้นก็นำมาล้างด้วยน้ำกลั่น หรือแอลกอฮอล์ แล้วเป่าด้วยลมอุ่นหรือลมร้อน ให้ผิวหน้าชิ้นงานทดสอบแห้งสนิท แล้วจึงนำไปตรวจสอบดูโครงสร้างต่อไปด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง ๆ

3.5.5 ตรวจสอบโครงสร้าง หลักการสำคัญของการใช้กล้องส่องก็คือ มีส่วนประกอบด้วยจุดกำเนิดแสง ส่งลำแสงผ่านเลนส์รวมแสงไปตกกระทบบนแผ่นแก้วสะท้อนแสง จึงเกิดแสงสะท้อนตกลงลนผิวชิ้นงานทดสอบในทางตั้งฉาก และผิวของชิ้นงานทดสอบที่มีความเรียบอยู่แล้วจะสะท้อนแสงกลับขึ้นมาเลนส์ขยายชุดแรก หลังจากนั้นลำแสงที่ผ่านการขยายครั้งแรกจะส่งผ่านไปยังเลนส์ขยายอีกชุด ก่อนที่จะผ่านเข้าตาเราอีกที ถ้าต้องการกำลังขยายเท่าใดก็ใช้ เลนส์ขยายใกล้ตาคูณกับเลนส์ขยายใกล้งานจะได้กำลังขยายตามที่ต้องการ หลังจากนั้นก็เข้าสู่กระบวนการถ่ายรูปโครงสร้างต่อไป



รูปที่ 3.29 แสดงลักษณะของกล้องจุลทรรศน์ทางโลหะวิทยาแบบแสง



รูปที่ 3.30 แสดงลักษณะการวางชิ้นงานทดสอบเพื่อส่องดูโครงสร้างจุลภาค

บทที่ 4
ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์

การศึกษาแผนภาพสมดุลของโลหะผสมเริ่มมาจากการทดสอบเพื่อให้ได้มาซึ่งเส้นโค้งการเย็นตัวของโลหะผสม โดยการทดลองเพื่อหาเส้นโค้งการเย็นตัวจะทดลองเพื่อหาเส้นโค้งการเย็นตัวของโละที่มีส่วนผสมที่แตกต่างกันไป โดยที่ปล่อยให้น้ำโละที่หลอมละลายเย็นตัวลงอย่างช้า ๆ และวัดอุณหภูมิเพื่อเปรียบเทียบกับเวลา

4.1 การทดลองเพื่อหาเส้นโค้งการเย็นตัวและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะ

อุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุที่บริสุทธิ์ใด ๆ ที่ความดันคงเป็นอุณหภูมิที่ไม่ซ้ำกันเพียงครั้งเดียว ขั้นตอนการรวมตัวของเหลวและของแข็งที่มีอยู่ร่วมกันในสภาวะสมดุลเท่านั้นที่อุณหภูมินี้เมื่อเย็น, อุณหภูมิของวัสดุหลอมเหลวที่จะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดหลอมละลายของวัสดุ ณ จุดนี้วัสดุที่จะเริ่มเป็นรูปเป็นร่างนำไปสู่การวิวัฒนาการของความร้อนแฝงที่อินเตอร์เฟซที่เป็นของเหลวของแข็งที่รักษาอุณหภูมิคงที่ทั่วทั้งวัสดุ เมื่อแข็งตัวจะเสร็จสมบูรณ์การเย็นจะคงดำเนินการต่อ การชะงักในระหว่างการเย็นตัวของวัสดุช่วยให้จุดหลอมละลายของวัสดุที่จะระบุในกราฟเส้นโค้งการเย็นตัว ระบบเส้นโค้งการเย็นตัวประกอบด้วยสององค์ประกอบ จัดแสดงในช่วงอุณหภูมิซึ่งขั้นตอนการเป็นของแข็งและของเหลวอยู่ในสมดุล แทนที่ด้วยอุณหภูมิหลอมเหลวเป็นหนึ่งเดียวของระบบในขณะนี้มีสองอุณหภูมิที่แตกต่างกันอุณหภูมิลิควิดัสและอุณหภูมิที่โซลิดัส ซึ่งมีความจำเป็นที่จะอธิบายการเปลี่ยนแปลงจากของเหลวไปเป็นของแข็ง อุณหภูมิลิควิดัสเป็นอุณหภูมิสูงกว่าที่ระบบทั้งหมดจะเป็นของเหลวและ โซลิดัส ที่อุณหภูมิต่ำกว่าที่ระบบเป็นของแข็งอย่างสมบูรณ์ ระหว่างนี้ทั้งสองจุดของเหลวและของแข็งอยู่ในสภาวะสมดุล เมื่ออุณหภูมิลิควิดัสถึงแข็งตัวจะเริ่มต้นและมีการลดลงของอัตราการเย็นที่เกิดจากวิวัฒนาการความร้อนแฝงและลดผลเนื่องมาจากในการไล่ระดับสีของเส้นโค้งการระบายความร้อน

หลังจากทดสอบได้เส้นโค้งการเย็นตัวนำเอาวัสดุที่ทดสอบมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์เป็นการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะด้วยกล้องกำลังขยายสูง (Microscope) เพื่อขยายดู รูปร่างและขนาด เกรน เฟสที่เกิด หรือสิ่งเจือปนที่อยู่ในเนื้อโลหะหรือวัสดุ เพื่อทราบถึงความสัมพันธ์ของกระบวนการผลิตโครงสร้างที่เกิดขึ้น อุปกรณ์ที่ใช้คือกล้องจุลทรรศน์ลำแสง (Light Microscope) โดยใช้หลักการการสะท้อนแสงของวัสดุ วัสดุที่ส่องดูต้องทึบแสง และจะตรวจโครงสร้างได้เฉพาะที่ผิวเท่านั้น ความแตกต่าง (Contrasts) ของรูปที่ปรากฏมาจากความแตกต่างของความสามารถในการสะท้อนแสงของโครงสร้าง การตรวจโครงสร้างโดยวิธี

นี้จะเรียกว่า Metallographic เลนส์ของกล้องในห้องปฏิบัติการจะมีกำลังขยายตั้งแต่ 5 เท่า ไปจนถึง 100 เท่า

ได้ผลการทดลองหาเส้นโค้งการเย็นตัวและการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะ ตะกั่วบริสุทธิ์ ดีบุกบริสุทธิ์ และตะกั่วผสมดีบุกได้ผลการทดลองดังนี้

4.1.1 เส้นโค้งการเย็นตัวและโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 100 เปอร์เซ็นต์

การทดลองเพื่อเส้นโค้งการเย็นตัวของตะกั่ว 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้องได้กราฟเส้นโค้งการเย็นตัวดังแสดงเส้นที่ 1 ในรูปที่ 4.1 และภาคผนวก ก รูปที่ ก.1 ซึ่งกราฟการเย็นตัวนี้ได้มาจากการวัดอุณหภูมิตั้งแต่ ตะกั่วเป็นน้ำโลหะจนกระทั่งตะกั่วแข็งตัวสมบูรณ์ กราฟสามารถอธิบายการเกิดการแข็งตัวได้ดังนี้ คือ ตั้งแต่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จนมาถึงอุณหภูมิ 329 องศาเซลเซียส จะยังเป็นน้ำโละเหลว และเริ่มก่อตัวเป็นนิวเคลียสที่จุด A ขณะที่ก่อตัวเป็นนิวเคลียสนี้อุณหภูมินะคงที่อยู่ที่ประมาณ 329 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 334 วินาที และที่จุด B ตะกั่วจะเป็นของแข็งสมบูรณ์ หลังจากนั้นอุณหภูมิจะค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง ในช่วงนี้ตะกั่วจะเป็นของแข็งอย่างสมบูรณ์แล้ว และจากการนำวัสดุทดลองที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ตะกั่วโดยน้ำหนักมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 100 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และภาคผนวก ข รูปที่ ข.1 โครงสร้างนี้ประกอบด้วยส่วนสีดำขนาดใหญ่ จำนวนมากสลับกับเฟสสีดำขนาดเล็ก ๆ สลับกันไปซึ่งเป็นเฟสของตะกั่ว

4.1.2 เส้นโค้งการเย็นตัวและโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 90 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 10 เปอร์เซ็นต์

การทดลองเพื่อเส้นโค้งการเย็นตัวของตะกั่ว 90 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 10 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้องได้กราฟเส้นโค้งการเย็นตัวดังแสดงในเส้นที่ 2 รูปที่ 4.1 และภาคผนวก ก รูปที่ ก.2 กราฟเส้นโค้งการเย็นตัวนี้สามารถอธิบายได้ถึงการเย็นตัวของตะกั่ว 90 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 10 เปอร์เซ็นต์ ได้ดังนี้ ตั้งแต่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสจนกระทั่งที่อุณหภูมิ 302 องศาเซลเซียส จะยังคงเป็นน้ำโลหะ และตะกั่วซึ่งมีอุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่าเริ่มก่อตัวเป็นนิวเคลียสที่จุด A ที่อุณหภูมิ 302 องศาเซลเซียส และคงที่อยู่ที่ 302 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 74 วินาที ซึ่งจะใช้เวลาน้อยกว่าตะกั่ว 100 เปอร์เซ็นต์ และตะกั่วแข็งตัวสมบูรณ์ที่จุด B หลังจากนั้นอุณหภูมิจะค่อย ๆ ลดลงขณะนั้น ดีบุกที่ผสมอยู่ยังคงเป็นของเหลวที่จุด C ดีบุกจะเริ่มก่อตัวเข้ากับตะกั่วที่อุณหภูมิประมาณ 185 องศาเซลเซียส ทำให้อุณหภูมิคงที่อยู่ประมาณ 8 วินาที หลังจากนั้นอุณหภูมิก็จะลดลงอย่างต่อเนื่องจนใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง ในช่วงนี้จะเป็นของแข็งสมบูรณ์แล้ว และจากการนำวัสดุทดลองที่ 90 เปอร์เซ็นต์ ตะกั่วและ 10 เปอร์เซ็นต์ ดีบุกโดยน้ำหนักมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 90 เปอร์เซ็นต์ ดีบุก 10

เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และภาคผนวก ข รูปที่ ข.2 โครงสร้างนี้ประกอบด้วยอนุภาคของตะกั่วสีดำที่มีขนาดเล็กลงจาก 100 เปอร์เซ็นต์และมีอนุภาคของดีบุกสีขาว แทรกเข้าไปอยู่ระหว่างอนุภาคของตะกั่วอยู่เล็กน้อย

4.1.3 เส้นโค้งการเย็นตัวและโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 80 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 20 เปอร์เซ็นต์

การทดลองเพื่อเส้นโค้งการเย็นตัวของตะกั่ว 80 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 20 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้องได้กราฟเส้นโค้งการเย็นตัวดังแสดงในเส้นที่ 3 รูปที่ 4.1 และภาคผนวก ก รูปที่ ก.3 กราฟเส้นโค้งการเย็นตัวนี้สามารถอธิบายได้ถึงการเย็นตัวของตะกั่ว 80 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 20 เปอร์เซ็นต์ ได้ดังนี้ เนื่องจากกราฟเส้นโค้งนี้เป็นกราฟที่เส้นโค้งที่มีส่วนผสมของ 2 ธาตุ สังเกตได้ว่ากราฟจะมีจุดที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 2 จุด อย่างเห็นได้ชัด ตั้งแต่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ถึงอุณหภูมิ 279 องศาเซลเซียส จะยังคงเป็นน้ำโลหะ ที่จุด A ตะกั่วจะเริ่มก่อตัวเป็นนิวเคลียส ซึ่งอุณหภูมิจะคงที่อยู่ที่ประมาณ 279 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 84 วินาที และแข็งตัวสมบูรณ์ที่จุด B หลังจากนั้นอุณหภูมิจะค่อย ๆ ลดลงซึ่งในช่วงนี้ดีบุกยังคงเป็นน้ำโลหะเมื่ออุณหภูมิลดลงมาถึงจุด C ที่อุณหภูมิประมาณ 183 องศาเซลเซียส ดีบุกจะเริ่มเข้ามาก่อตัวรวมอยู่กับตะกั่วทำให้อุณหภูมิคงที่อยู่ที่ 183 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 266 วินาที และแข็งตัวสมบูรณ์ที่จุด D หลังจากนั้นอุณหภูมิจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนใกล้เคียงอุณหภูมิห้องในช่วงนี้โลหะจะเป็นของแข็งสมบูรณ์ และจากการนำวัสดุทดลองที่ 80 เปอร์เซ็นต์ ตะกั่วและ 20 เปอร์เซ็นต์ ดีบุกโดยน้ำหนักมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 80 เปอร์เซ็นต์ ดีบุก 20 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และภาคผนวก ข รูปที่ ข.3 โครงสร้างนี้ประกอบด้วยอนุภาคดีบุกสีขาวแทรกอยู่ระหว่างอนุภาคตะกั่วสีดำได้มากขึ้น

4.1.4 เส้นโค้งการเย็นตัวและโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 70 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 30 เปอร์เซ็นต์

การทดลองเพื่อเส้นโค้งการเย็นตัวของตะกั่ว 70 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 30 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้องได้กราฟเส้นโค้งการเย็นตัวดังแสดงในเส้นที่ 4 รูปที่ 4.1 และภาคผนวก ก รูปที่ ก.4 กราฟเส้นโค้งการเย็นตัวนี้สามารถอธิบายได้ถึงการเย็นตัวของตะกั่ว 70 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 30 เปอร์เซ็นต์ ได้ดังนี้ เนื่องจากกราฟเส้นโค้งนี้เป็นกราฟที่เส้นโค้งที่มีส่วนผสมของ 2 ธาตุ สังเกตได้ว่ากราฟจะมีจุดที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 2 จุด อย่างเห็นได้ชัด ตั้งแต่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ถึงอุณหภูมิ 259 องศาเซลเซียส จะยังคงเป็นน้ำโลหะ ที่จุด A ตะกั่วจะเริ่มก่อตัวเป็นนิวเคลียส ซึ่งอุณหภูมิจะคงที่อยู่ที่ประมาณ 259 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 94 วินาที และแข็งตัวสมบูรณ์ที่จุด B หลังจากนั้นอุณหภูมิจะค่อย ๆ ลดลงซึ่งในช่วงนี้ดีบุกยังคงเป็นน้ำโลหะเมื่ออุณหภูมิลดลงมาถึงจุด

C ที่อุณหภูมิประมาณ 184 องศาเซลเซียส ดีบุกจะเริ่มเข้ามาก่อตัวรวมอยู่กับตะกั่วทำให้อุณหภูมิคงที่อยู่ที่ 184 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 548 วินาที และแข็งตัวสมบูรณ์ที่จุด D หลังจากนั้นอุณหภูมิจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนใกล้เคียงอุณหภูมิห้องในช่วงนี้โลหะจะเป็นของแข็งสมบูรณ์ และจากการนำวัสดุทดลองที่ 70 เปอร์เซ็นต์ ตะกั่วและ 30 เปอร์เซ็นต์ ดีบุกโดยน้ำหนักมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 70 เปอร์เซ็นต์ ดีบุก 30 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และภาคผนวก ข รูปที่ ข.4 โครงสร้างนี้ประกอบด้วยอนุภาคดีบุกสีขาวแทรกอยู่ระหว่างอนุภาคตะกั่วสีดำได้มากขึ้น

4.1.5 เส้นโค้งการเย็นตัวและโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 60 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 40 เปอร์เซ็นต์

การทดลองเพื่อเส้นโค้งการเย็นตัวของตะกั่ว 60 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 40 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้องได้กราฟเส้นโค้งการเย็นตัวดังแสดงในเส้นที่ 5 รูปที่ 4.1 และภาคผนวก ก รูปที่ ก.5 กราฟเส้นโค้งการเย็นตัวนี้สามารถอธิบายได้ถึงการเย็นตัวของตะกั่ว 60 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 40 เปอร์เซ็นต์ ได้ดังนี้ เนื่องจากกราฟเส้นโค้งนี้เป็นกราฟที่เส้นโค้งที่มีส่วนผสมของ 2 ธาตุ สังเกตได้ว่ากราฟจะมีจุดที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 2 จุด อย่างเห็นได้ชัด ตั้งแต่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ถึงอุณหภูมิ 237 องศาเซลเซียส จะยังคงเป็นน้ำโลหะ ที่จุด A ตะกั่วจะเริ่มก่อตัวเป็นนิวเคลียส ซึ่งอุณหภูมิจะคงที่อยู่ที่ประมาณ 237 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 102 วินาที และแข็งตัวสมบูรณ์ที่จุด B หลังจากนั้นอุณหภูมิจะค่อย ๆ ลดลงซึ่งในช่วงนี้ดีบุกยังคงเป็นน้ำโลหะเมื่ออุณหภูมิลดลงมาถึงจุด C ที่อุณหภูมิประมาณ 185 องศาเซลเซียส ดีบุกจะเริ่มเข้ามาก่อตัวรวมอยู่กับตะกั่วทำให้อุณหภูมิคงที่อยู่ที่ 185 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1010 วินาที และแข็งตัวสมบูรณ์ที่จุด D หลังจากนั้นอุณหภูมิจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนใกล้เคียงอุณหภูมิห้องในช่วงนี้โลหะจะเป็นของแข็งสมบูรณ์ และจากการนำวัสดุทดลองที่ 60 เปอร์เซ็นต์ ตะกั่วและ 40 เปอร์เซ็นต์ ดีบุกโดยน้ำหนักมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 60 เปอร์เซ็นต์ ดีบุก 40 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และภาคผนวก ข รูปที่ ข.5โครงสร้างนี้ประกอบด้วยอนุภาคดีบุกสีขาวแทรกอยู่ระหว่างอนุภาคตะกั่วสีดำได้มากขึ้นและเริ่มมากกว่าอนุภาคของตะกั่ว

4.1.6 เส้นโค้งการเย็นตัวและโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 50 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 50 เปอร์เซ็นต์

การทดลองเพื่อเส้นโค้งการเย็นตัวของตะกั่ว 50 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้องได้กราฟเส้นโค้งการเย็นตัวดังแสดงในเส้นที่ 6 รูปที่ 4.1 และภาคผนวก ก รูปที่ ก.6 กราฟเส้นโค้งการเย็นตัวนี้สามารถอธิบายได้ถึงการเย็นตัวของตะกั่ว 50 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 50 เปอร์เซ็นต์ ได้ดังนี้ ตั้งแต่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ถึงอุณหภูมิประมาณ 184 องศาเซลเซียส จะ

ยังคงเป็นน้ำโลหะที่จุด A โลหะ 2 ชนิดซึ่งมีส่วนผสมเท่ากันจะเริ่มก่อตัวเป็นนิวเคลียส อุณหภูมิจะคงที่อยู่ที่ประมาณ 184 องศาเซลเซียส และแข็งตัวสมบูรณ์ที่จุด B ใช้เวลา 680 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลานานอาจเนื่องมาจากว่าโลหะผสมมีปริมาณเท่ากันแต่มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่แตกต่างกันทำให้ใช้เวลานาน หลังจากนั้นอุณหภูมิจะลดลงอย่างต่อเนื่องและเป็นของแข็งสมบูรณ์ และจากการนำวัสดุทดลองที่ 50 เปอร์เซ็นต์ ตะกั่วและ 50 เปอร์เซ็นต์ ดีบุกโดยน้ำหนักมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 50 เปอร์เซ็นต์ ดีบุก 50 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และภาคผนวก ข รูปที่ ข.6โครงสร้างนี้ประกอบด้วยอนุภาคดีบุกสีขาวแทรกอยู่ระหว่างอนุภาคตะกั่วสีดำได้มากขึ้นและมากกว่าอนุภาคของตะกั่วอย่างเห็นได้ชัด

4.1.7 เส้นโค้งการเย็นตัวและโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 40 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 60 เปอร์เซ็นต์

การทดลองเพื่อเส้นโค้งการเย็นตัวของตะกั่ว 40 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 60 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้องได้กราฟเส้นโค้งการเย็นตัวดังแสดงในเส้นที่ 7 รูปที่ 4.1 ภาคผนวก ก รูปที่ ก.7 กราฟเส้นโค้งการเย็นตัวนี้สามารถอธิบายได้ถึงการเย็นตัวของตะกั่ว 40 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 60 เปอร์เซ็นต์ ได้ดังนี้ การเย็นตัวในช่วงแรกของน้ำโลหะอุณหภูมิจะไม่ค่อยคงที่อาจเนื่องมาจากเปอร์เซ็นต์ของดีบุกเริ่มมีมากกว่าตะกั่วแต่ก็สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้สองจุดใหญ่ ๆ คือที่จุด A ที่อุณหภูมิประมาณ 197 องศาเซลเซียส เกิดการก่อตัวเป็นนิวเคลียสของตะกั่วจะมีการคงที่ของอุณหภูมิในช่วงสั้น ๆ เพียง 96วินาที แล้วอุณหภูมิจะลดลงมาถึงจุด B ที่อุณหภูมิประมาณ 184 องศาเซลเซียส เกิดการก่อตัวระหว่างตะกั่วและดีบุกอุณหภูมิคงที่เป็นเวลา 1820 วินาที และการแข็งตัวสมบูรณ์ที่จุด C หลังจากนั้นอุณหภูมิจะลดลงอย่างต่อเนื่องและเป็นของแข็งสมบูรณ์ และจากการนำวัสดุทดลองที่ 60 เปอร์เซ็นต์ ตะกั่วและ 40 เปอร์เซ็นต์ ดีบุกโดยน้ำหนักมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 60 เปอร์เซ็นต์ ดีบุก 40 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และภาคผนวก ข รูปที่ ข.7โครงสร้างนี้ประกอบด้วยอนุภาคดีบุกสีขาวแทรกอยู่ระหว่างอนุภาคตะกั่วสีดำได้มากขึ้นและเริ่มมากกว่าอนุภาคของตะกั่ว

4.1.8 เส้นโค้งการเย็นตัวและโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 30 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 70 เปอร์เซ็นต์

การทดลองเพื่อเส้นโค้งการเย็นตัวของตะกั่ว 30 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 70 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้องได้กราฟเส้นโค้งการเย็นตัวดังแสดงในเส้นที่ 8 รูปที่ 4.1 และภาคผนวก ก รูปที่ ก.8 กราฟเส้นโค้งการเย็นตัวนี้สามารถอธิบายได้ถึงการเย็นตัวของตะกั่ว 30 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 70 เปอร์เซ็นต์ ได้ดังนี้ การเย็นตัวในช่วงแรกของน้ำโลหะอุณหภูมิจะไม่ค่อยคงที่อาจเนื่องมา

เปอร์เซ็นต์ของดีบุกเริ่มมีมากกว่าตะกั่วแต่ก็สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้สองจุดใหญ่ ๆ คือที่จุด A ที่อุณหภูมิประมาณ 190 องศาเซลเซียส เกิดการก่อตัวเป็นนิวเคลียสของตะกั่วจะมีการคงที่ของอุณหภูมิในช่วงสั้น ๆ เพียง 90วินาที แล้วอุณหภูมิจะลดลงมาถึงจุด B ที่อุณหภูมิประมาณ 185 องศาเซลเซียส เกิดการก่อตัวระหว่างตะกั่วและดีบุกอุณหภูมิคงที่เป็นเวลา 1118 วินาที และการแข็งตัวสมบูรณ์ที่จุด C หลังจากนั้นอุณหภูมิจะลดลงอย่างต่อเนื่องและเป็นของแข็งสมบูรณ์ และจากการนำวัสดุทดลองที่ 30 เปอร์เซ็นต์ ตะกั่วและ 70 เปอร์เซ็นต์ ดีบุกโดยน้ำหนักมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 30 เปอร์เซ็นต์ ดีบุก 70 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ภาคผนวก ข รูปที่ ข.8โครงสร้างนี้ประกอบด้วยอนุภาคดีบุกสีขาวเป็นส่วนใหญ่เล็กอนุภาคของตะกั่วเริ่มน้อยลงอยู่ระหว่างอนุภาคของดีบุก

4.1.9 เส้นโค้งการเย็นตัวและโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 20 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 80 เปอร์เซ็นต์

การทดลองเพื่อเส้นโค้งการเย็นตัวของตะกั่ว 20 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 80 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้องได้กราฟเส้นโค้งการเย็นตัวดังแสดงในเส้นที่ 9 รูปที่ 4.1 และภาคผนวก ก รูปที่ ก.9 กราฟเส้นโค้งการเย็นตัวนี้สามารถอธิบายได้ถึงการเย็นตัวของตะกั่ว 20 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 80 เปอร์เซ็นต์ ได้ดังนี้ การเย็นตัวในช่วงแรกของน้ำโลหะอุณหภูมิจะไม่ค่อยคงที่อาจเนื่องมา เปอร์เซ็นต์ของดีบุกเริ่มมีมากกว่าตะกั่วแต่ก็สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้สองจุดใหญ่ ๆ คือที่จุด A ที่อุณหภูมิประมาณ 207 องศาเซลเซียส เกิดการก่อตัวเป็นนิวเคลียสของตะกั่วจะมีการคงที่ของอุณหภูมิในช่วงสั้น ๆ เพียง 60วินาที แล้วอุณหภูมิจะลดลงมาถึงจุด B ที่อุณหภูมิประมาณ 185 องศาเซลเซียส เกิดการก่อตัวระหว่างตะกั่วและดีบุกอุณหภูมิคงที่เป็นเวลา 676 วินาที และการแข็งตัวสมบูรณ์ที่จุด C หลังจากนั้นอุณหภูมิจะลดลงอย่างต่อเนื่องและเป็นของแข็งสมบูรณ์ และจากการนำวัสดุทดลองที่ 20 เปอร์เซ็นต์ ตะกั่วและ 80 เปอร์เซ็นต์ ดีบุกโดยน้ำหนักมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 20 เปอร์เซ็นต์ ดีบุก 80 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1ภาคผนวก ข รูปที่ ข.9โครงสร้างนี้ประกอบด้วยอนุภาคดีบุกสีขาวเป็นส่วนใหญ่เล็กอนุภาคของตะกั่วเริ่มน้อยลงมากมีเพียงจุดเล็ก ๆ อยู่ระหว่างอนุภาคของดีบุก

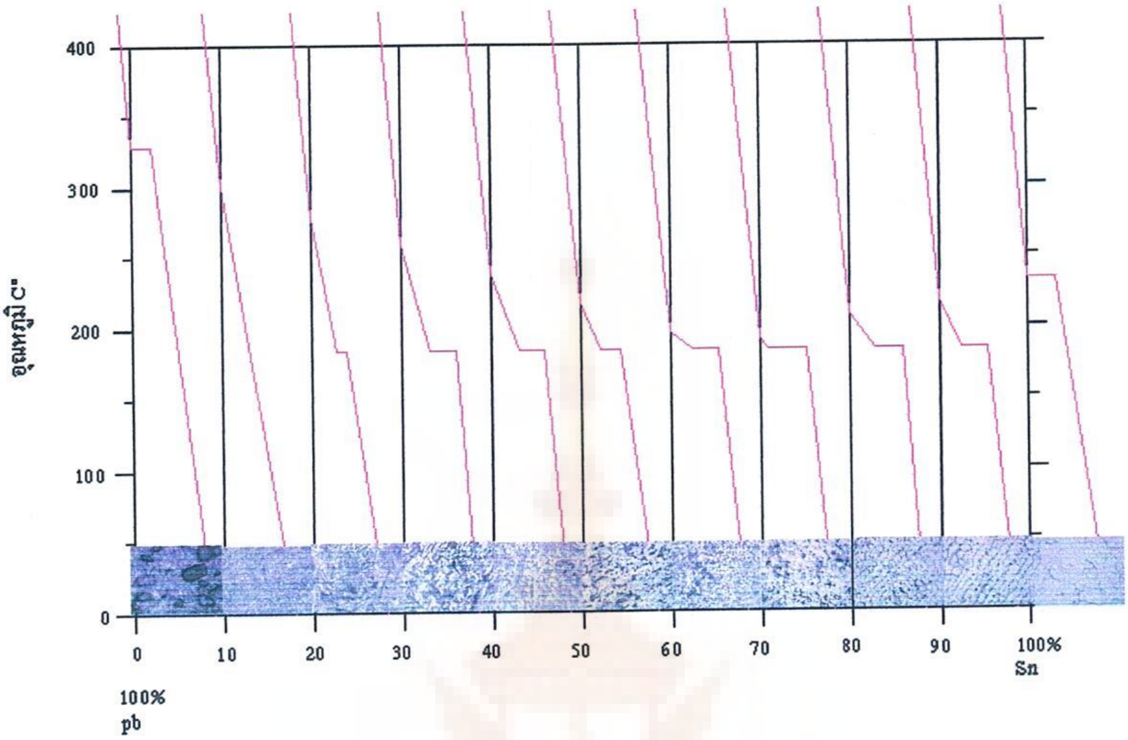
4.1.10 เส้นโค้งการเย็นตัวและโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 10 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 90 เปอร์เซ็นต์

การทดลองเพื่อเส้นโค้งการเย็นตัวของตะกั่ว 10 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 90 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้องได้กราฟเส้นโค้งการเย็นตัวดังแสดงในเส้นที่ 10 รูปที่ 4.1 และภาคผนวก ก รูปที่ ก.10

กราฟเส้นโค้งการเย็นตัวนี้สามารถอธิบายได้ถึงการเย็นตัวของตะกั่ว 10 เปอร์เซ็นต์ ผสมดีบุก 90 เปอร์เซ็นต์ ได้ดังนี้ จากกราฟเส้นโค้งการเย็นตัวสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้สองจุดใหญ่ ๆ คือที่จุด A ที่อุณหภูมิประมาณ 217 องศาเซลเซียส เกิดการก่อตัวเป็นนิวเคลียสของตะกั่วจะมีการคงที่ของอุณหภูมิในช่วงสั้น ๆ เพียง 60 วินาที แล้วอุณหภูมิจะลดลงมาถึงจุด B ที่อุณหภูมิประมาณ 185 องศาเซลเซียส เกิดการก่อตัวระหว่างตะกั่วและดีบุกอุณหภูมิคงที่เป็นเวลา 384 วินาที และการแข็งตัวสมบูรณ์ที่จุด C หลังจากนั้นอุณหภูมิจะลดลงอย่างต่อเนื่องและเป็นของแข็งสมบูรณ์จากการนำวัสดุทดลองที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ตะกั่วและ 90 เปอร์เซ็นต์ ดีบุกโดยน้ำหนักมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 10 เปอร์เซ็นต์ ดีบุก 90 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ภาคผนวก ข รูปที่ ข.10โครงสร้างนี้ประกอบด้วยอนุภาคดีบุกสีขาวเป็นส่วนใหญ่เล็กอนุภาคของตะกั่วเริ่มน้อยลงมากและเริ่มเป็นเส้น อยู่ระหว่างอนุภาคของดีบุก

4.1.11 เส้นโค้งการเย็นตัวและโครงสร้างจุลภาคของดีบุก 100 เปอร์เซ็นต์

การทดลองเพื่อเส้นโค้งการเย็นตัวของดีบุก 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้องได้กราฟเส้นโค้งการเย็นตัวดังแสดงในเส้นที่ 11 รูปที่ 4.1 และภาคผนวก ก รูปที่ ก.11 ซึ่งกราฟการเย็นตัวนี้ได้มาจากการวัดอุณหภูมิตั้งแต่ ดีบุกเป็นน้ำโลหะจนกระทั่งดีบุกแข็งตัวสมบูรณ์ กราฟสามารถอธิบายการเกิดการแข็งตัวได้ดังนี้ คือ ตั้งแต่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จนมาถึงอุณหภูมิ 233 องศาเซลเซียส จะยังเป็นน้ำโละเหลว และเริ่มก่อตัวเป็นนิวเคลียสที่จุด A ขณะที่ก่อตัวเป็นนิวเคลียสนี้อุณหภูมินะคงที่อยู่ที่ประมาณ 329 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1374 วินาที และที่จุด B ตะกั่วจะเป็นของแข็งสมบูรณ์ หลังจากนั้นอุณหภูมิจะค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง ในช่วงนี้ดีบุกจะเป็นของแข็งอย่างสมบูรณ์แล้ว และจากการนำวัสดุทดลองที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ดีบุกโดยน้ำหนักมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคของดีบุก 100 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ภาคผนวก ข รูปที่ ข.11 โครงสร้างนี้ประกอบด้วยส่วนสีขาวขนาดใหญ่ จำนวนมากและมีเพียงเส้นสีดำเล็กน้อย

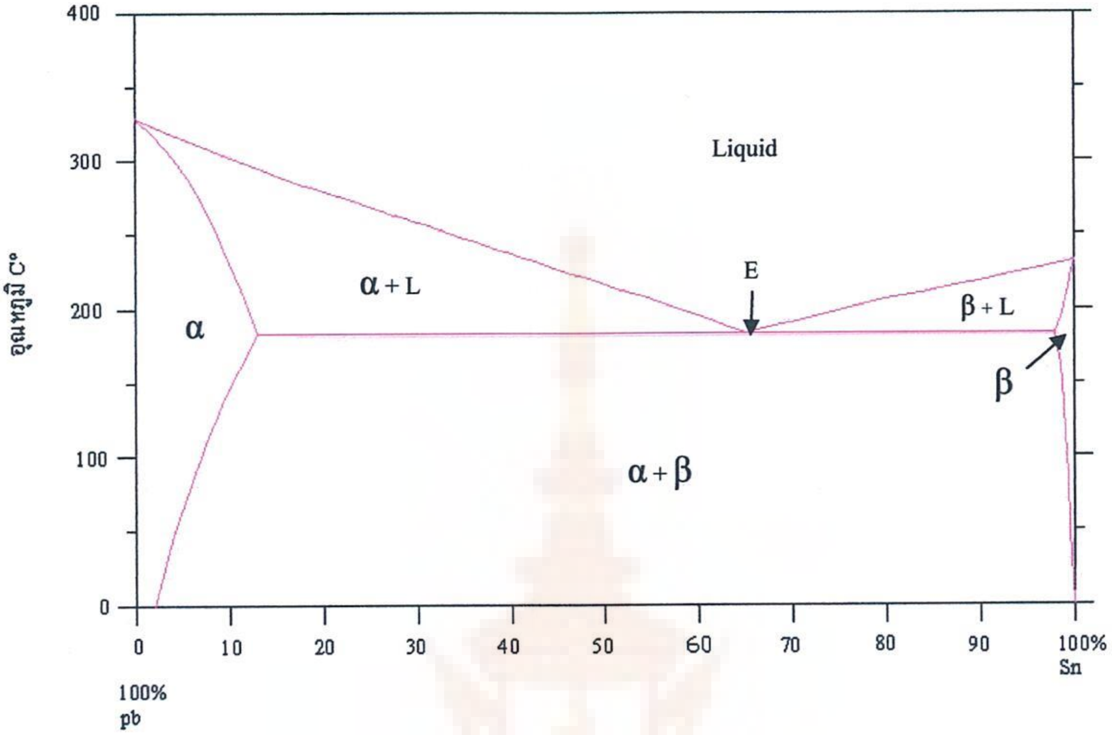


รูปที่ 4.1 แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวและโครงสร้างจุลภาค

4.2 การสร้างแผนภาพสมดุลวัสดุของตะกั่ว – วัสดุดีบุก

การศึกษาแผนภาพสมดุลโดยพิจารณาจากโลหะผสมระหว่างตะกั่ว (Pb) และ (Sn) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าส่วนผสมยูเทคติกจะอยู่ที่ 65.1%Sn อุณหภูมิยูเทคติกอยู่ที่ 184°C ตะกั่วบริสุทธิ์มีจุดหลอมละลายที่ 329 องศาเซลเซียส และดีบุกที่ 233 องศาเซลเซียส จากแผนภาพสมดุลจะมีส่วนประกอบที่สำคัญๆ ดังนี้

เฟสของเหลวคือ โลหะผสมระหว่างตะกั่วกับดีบุกที่หลอมละลายเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิเหนือเส้นลิควิดัส เฟสของแข็ง α คือสารละลายของแข็งของโลหะผสมตะกั่วกับดีบุก โดย α นี้จะมีตะกั่วเป็นส่วนมากและมีดีบุกเป็นส่วนน้อย ดีบุกสามารถละลายเป็นสารละลายของแข็ง α ได้สูงสุด 13 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 184 องศาเซลเซียส เฟสของแข็ง β คือสารละลายของแข็งของดีบุกกับตะกั่ว โดยที่ β นี้จะมีดีบุกส่วนมากและมีตะกั่วเป็นส่วนน้อยตะกั่วละลายสูงสุดได้เพียง 2 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 184 องศาเซลเซียส บริเวณที่มี 2 เฟสมีอยู่ด้วยกัน 3 ส่วนนั่นคือ บริเวณเฟสของแข็ง α กับของเหลว L บริเวณเฟสของแข็ง β กับของเหลว L และบริเวณเฟสของแข็ง β กับเฟสของแข็ง α



รูปที่ 4.2 แสดงแผนภาพสมดุลโลหะผสมตะกั่วกับดีบุก

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาแผนภาพสมดุลด้วยวิธีการวิเคราะห์ความร้อน มีรายละเอียดดังกล่าวมาข้างต้นแล้ว สามารถสรุปผลการศึกษาแผนภาพสมดุลด้วยวิธีการวิเคราะห์ความร้อนและข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุงพัฒนาให้เครื่องมีประสิทธิภาพในการทำงานได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ชุดวิเคราะห์ความร้อน

ในการสร้างชุดวิเคราะห์ความเพื่อศึกษาแผนภาพสมดุล โดยได้ชุดวิเคราะห์ความร้อนที่ให้อุณหภูมิสูงสุดได้ถึง 1000 องศาเซลเซียส และวัดอุณหภูมิแบบ Data Logger บันทึกผลโดยตรงที่คอมพิวเตอร์

5.1.2 เส้นโค้งการเย็นตัวของวัสดุ

การทดลองหาเส้นโค้งการเย็นตัวของโลหะดีบุก ตะกั่ว และโลหะผสมตะกั่วกับดีบุกได้กราฟเส้นโค้งการเย็นตัว 11 กราฟโดยทดลองในสภาวะอุณหภูมิห้อง ได้เส้นโค้งการเย็นตัวที่ใกล้เคียงกับทฤษฎี คือ ตามทฤษฎีจุดหลอมละลายของตะกั่วอยู่ที่ 327 องศาเซลเซียส การทดลองครั้งนี้ได้จุดหลอมละลายของตะกั่วอยู่ที่ 329 องศาเซลเซียส และตามทฤษฎีจุดหลอมละลายของดีบุกอยู่ที่ 232 องศาเซลเซียส การทดลองครั้งนี้ได้จุดหลอมละลายของตะกั่วอยู่ที่ 233 องศาเซลเซียส

5.1.3 แผนภาพสมดุลของโลหะผสมดีบุกกับตะกั่ว

การศึกษาแผนภาพสมดุลโดยพิจารณาจากโลหะผสมระหว่างตะกั่ว จะเห็นว่าส่วนผสมยูเทคติกจะอยู่ที่ 61.9 เปอร์เซ็นต์ ดีบุก อุณหภูมิยูเทคติกอยู่ที่ 184 องศาเซลเซียส ตะกั่วบริสุทธิ์มีจุดหลอมละลายที่ 329 องศาเซลเซียส และดีบุกที่ 233 องศาเซลเซียส

5.1.4 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุทดลอง

ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคจากวัสดุที่ใช้ทดลองหาเส้นโค้งการเย็นตัว โดยได้เตรียมชิ้นงานทดสอบ 11 ชิ้น โดยที่โครงสร้างจะสอดคล้องไปกับเปอร์เซ็นต์ของวัสดุหากเปอร์เซ็นต์ ดีบุกมากอนุภาคในโครงสร้างก็จะมากตามไปด้วย

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

ในการศึกษาแผนภาพสมดุลด้วยวิธีการวิเคราะห์ความร้อน มีปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นดังนี้

5.2.1 การทดลองหาเส้นโค้งการเย็นตัวมีความผิดพลาดบ่อยครั้งอันเนื่องมาจากสภาพอากาศที่ไม่คงที่

5.2.2 ภาชนะที่ใช้รองรับวัสดุในการวิเคราะห์ซึ่งเป็นกราไฟท์เมื่อทำการหลอมเกิดการเจือปนของคาร์บอนทำให้อุณหภูมิการเย็นตัวของวัสดุทดลองไม่สมดุล

5.2.3 การทดลองเพื่อหาเส้นโค้งการเย็นตัวของวัสดุ เป็นไปอย่างล่าช้าเนื่องจากอุปกรณ์บันทึกผลคือ คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊คที่ต่อเข้ากับอุปกรณ์วัดอุณหภูมิมีการแสตนบายเครื่องเมื่อเวลาผ่านไปนาน ๆ ทำให้ไม่มีการบันทึกและต้องเสียเวลาทดลองใหม่

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 เนื่องจากการทดลองเพื่อหาเส้นโค้งการเย็นตัวมีการผิดพลาดในการทดลองหลายครั้งทำให้เสียเวลาในการทดลองใหม่จึงควรใช้ห้องทดลองที่มีอุณหภูมิรอบ ๆ การทดลองคงที่

5.3.2 การใช้ภาชนะที่รองรับวัสดุหลอมที่เป็นเซรามิกซ์อาจทำให้เกิดการเจือปนเล็กน้อย หากต้องการเพื่อให้ไม่มีสิ่งปนอาจเปลี่ยนวัสดุที่ใช้เป็นภาชนะรองรับวัสดุหลอมเป็นแสตนเลส

5.3.3 เพื่อความปลอดภัยในการทดลอง ผู้ปฏิบัติงานจะต้องสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันทุกครั้งระหว่างปฏิบัติงาน เนื่องจากไอของวัสดุที่หลอมอาจเป็นอันตรายต่อร่างกาย

บรรณานุกรม

[1] พีระยศ แสนโภชน์ และภาคภูมิ. (2548). **การพยากรณ์อุณหภูมิน้ำโลหะในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.** คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิศวกรรมไฟฟ้า : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[2] ศรีพงษ์ พรรณ์แผ้ว. (2548). **สมบัติของวัสดุผสมระหว่างบรอนซ์ดีบุกกับทัลคัมจากการเตรียมโดยกระบวนการผลิตโลหะผสมเชิงกล.** วิศวกรรมวัสดุ : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

[3] วฤชา กาญจนอักษร และดวงพร. **พิษเฉียบพลันของตะกั่วและทองแดงที่มีต่อไส้เดือนน้ำ.** คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์.

[4] ธีระชัย บงการณ์ และรัตน์ติพร. (2551). ผลของตะกั่วส่วนเกินที่มีต่อโครงสร้างเฟสและโครงสร้างจุลภาคของผงผลึกเลดแบเรียมไททาเนต. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.

[5] เกศราพร วทัญญู และสิริพร. (2552). อิทธิพลของกระบวนการออกซิเดชั่นที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินผสมดีบุก. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[6] Department of Materials Science and Metallurgy , University of Cambridge. (1996). Phase diagrams and solidification

[7] Dan G. Imre, and R. McGraw.(1997). EnVironmental Chemistry DiVision, Department of Applied Science, BrookhaVen National Laboratory,Upton, New York 11973 and Institute of Terrestrial and Planetary Atmospheres, State UniVersity of New York,

[8] Morinaga Hiroumi, Nagashima Toshiaki, 1999, US. Patent No.6088552 : Developer suface accommodating container and developing device of copper alloy, 5 p.

[9] เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์. (2543). **วัสดุศาสตร์มูลฐาน.** วิทยาศาสตร์ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาวัสดุศาสตร์.

[10] จงกล รัตนสุข. (2525). **โลหะวิทยาเบื้องต้นและวัสดุวิศวกรรม.** สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

[11] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. (2550). **วัสดุวิศวกรรม.** กรุงเทพมหานคร – ซีเอ็ดยูเคชั่น.

[12] มานพ ตันตระบัณฑิตย์. (2545). **วัสดุวิศวกรรมฉบับปรับปรุง.** กรุงเทพมหานคร – สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น).

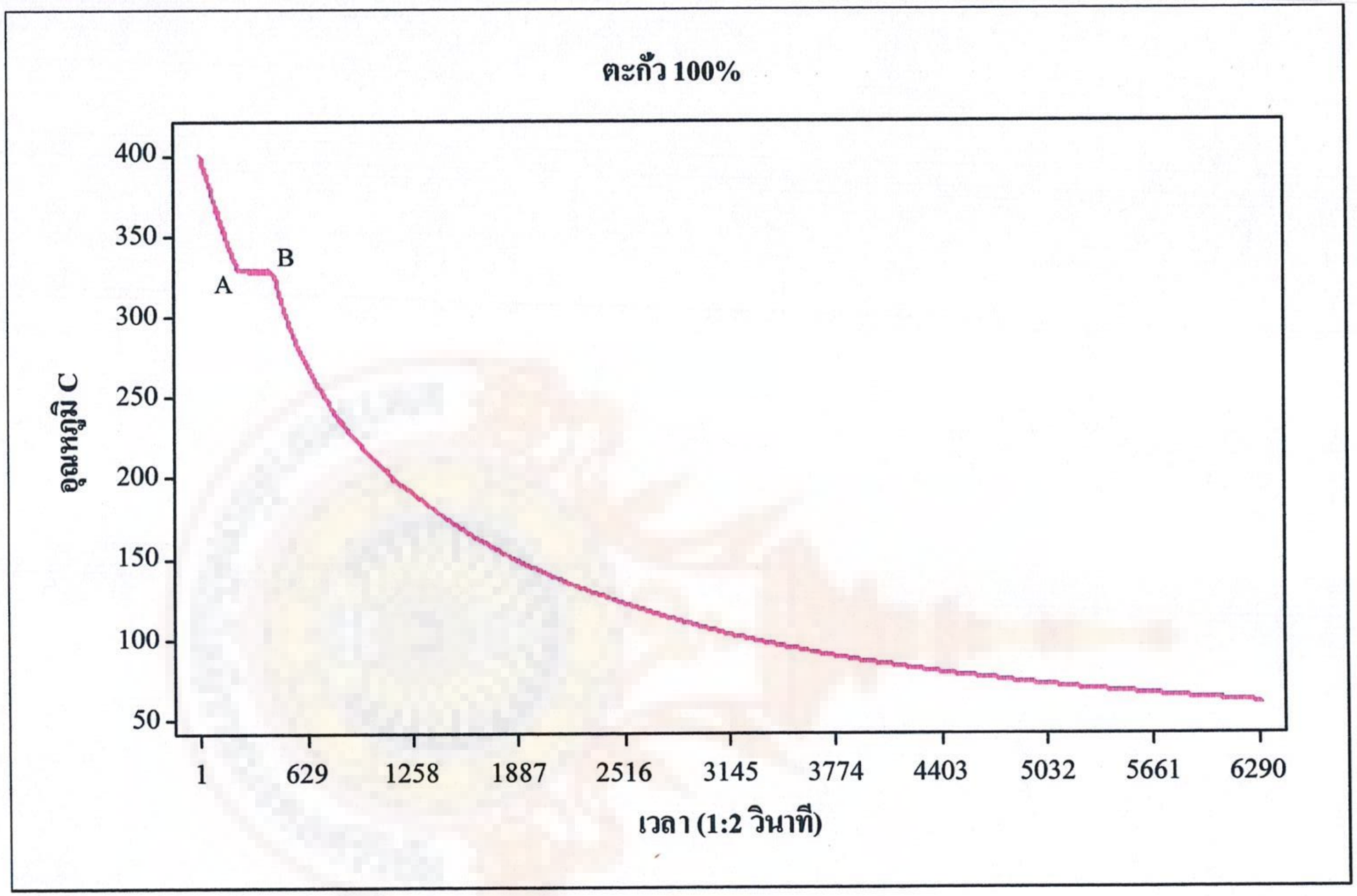
[13] แม้น อมรสิทธ์. (2552). **วัสดุวิศวกรรม.** กรุงเทพมหานคร – แมคกรอ-ฮิล.

[14] มนัส สถิรจินดา. (2536). **โลหะนอกกลุ่มเหล็ก.** พิมพ์ครั้งที่ 1. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

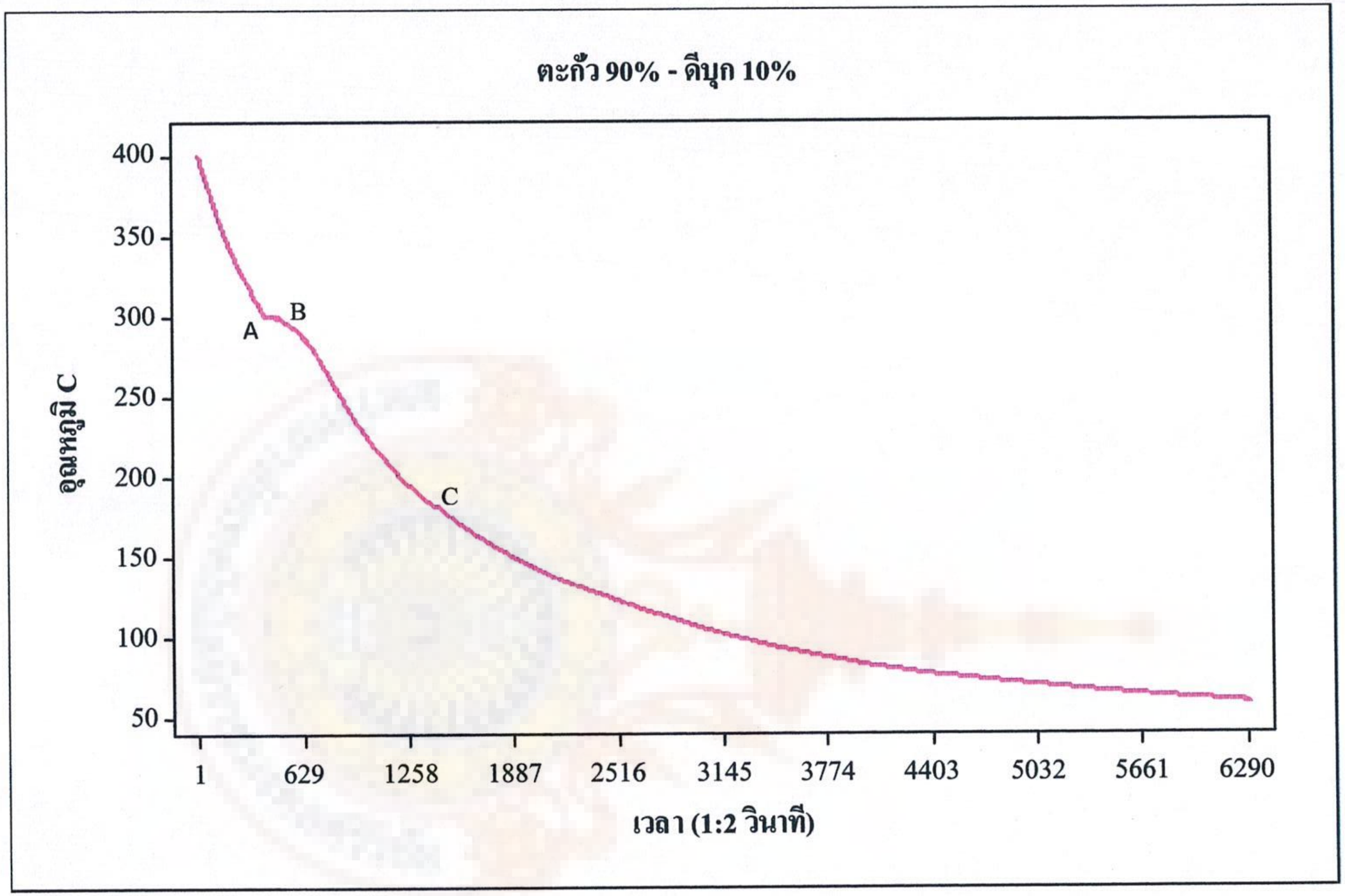
[15] ชวลิต เชียงกูล. (2543). **โลหะวิทยา.**สมคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น).

ภาคผนวก ก

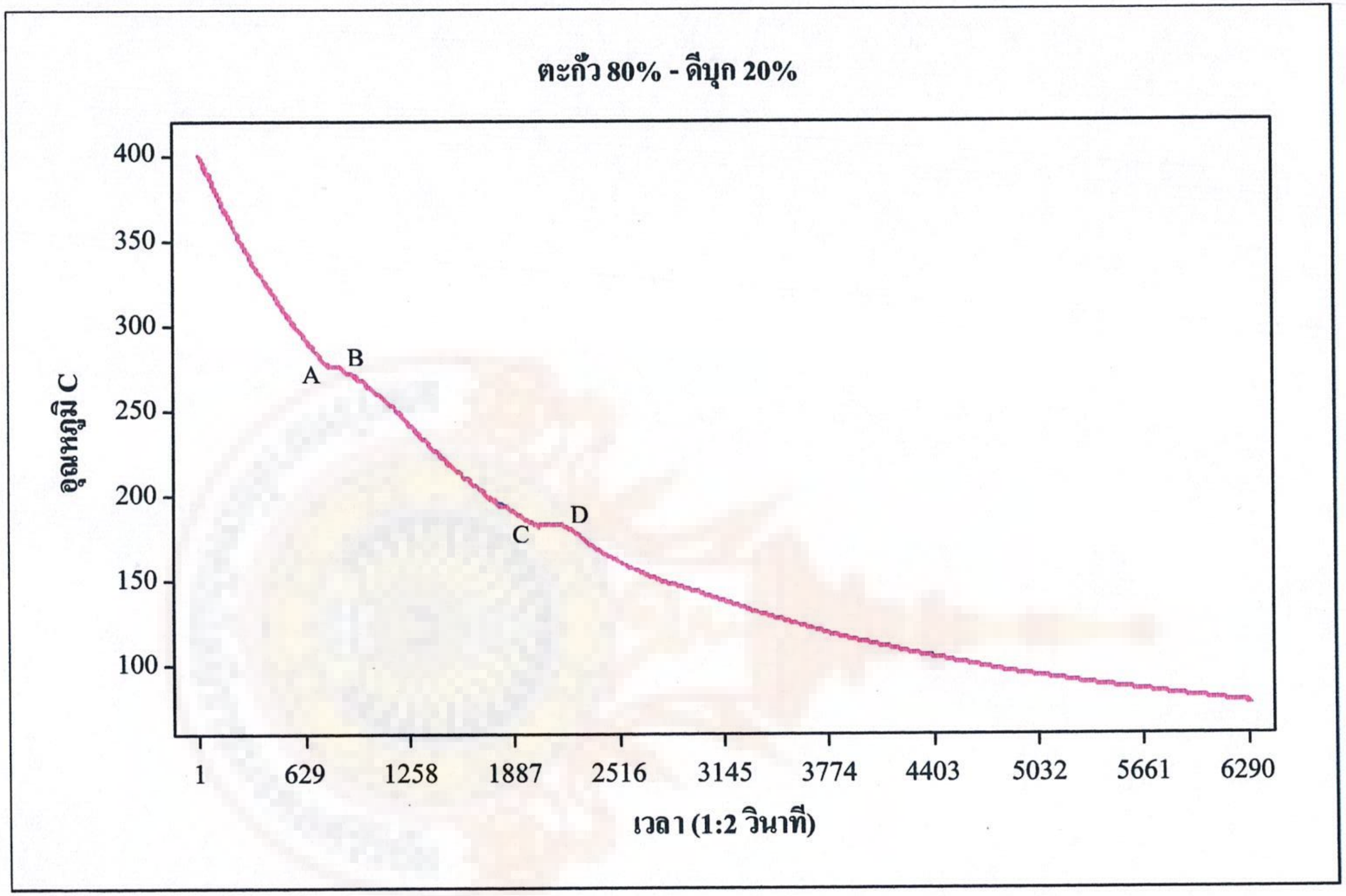
รูปกราฟเส้นโค้งการเย็นตัวของโลหะผสมตะกั่วกับดีบุก



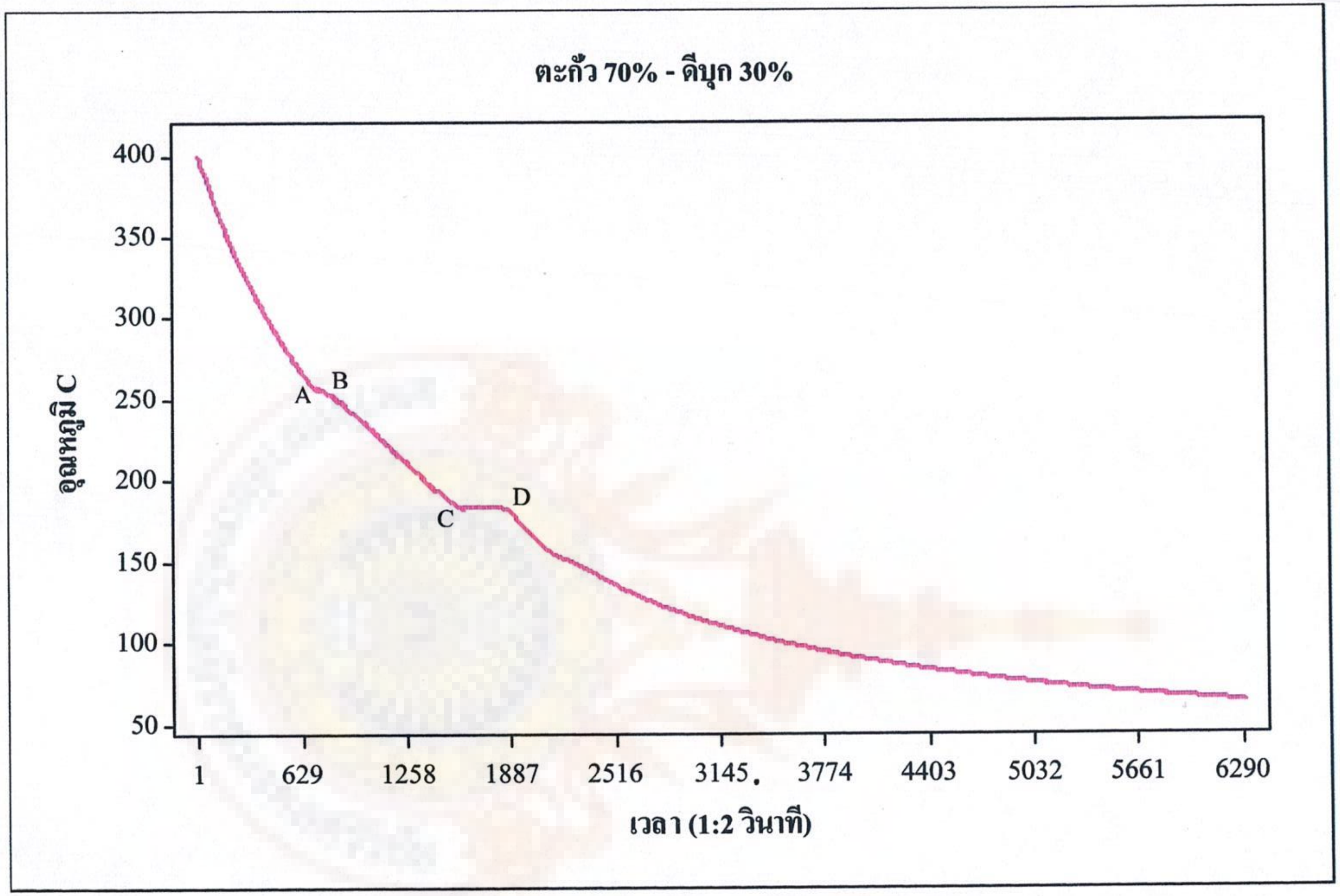
รูปที่ ก.1 แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวของตะกั่ว 100%



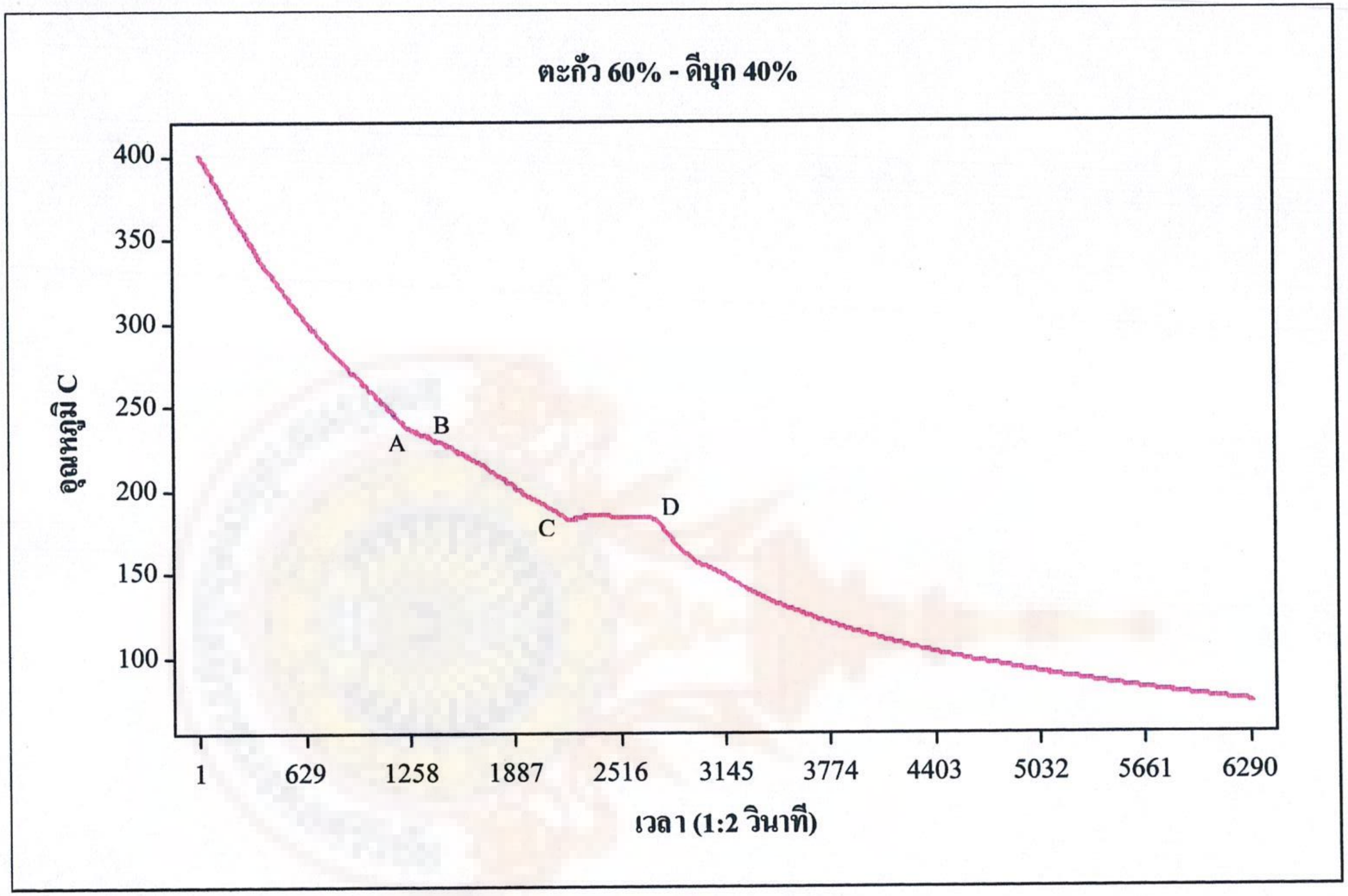
รูปที่ ก.2 แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวของตะกั่ว 90% กับ ดีบุก 10%



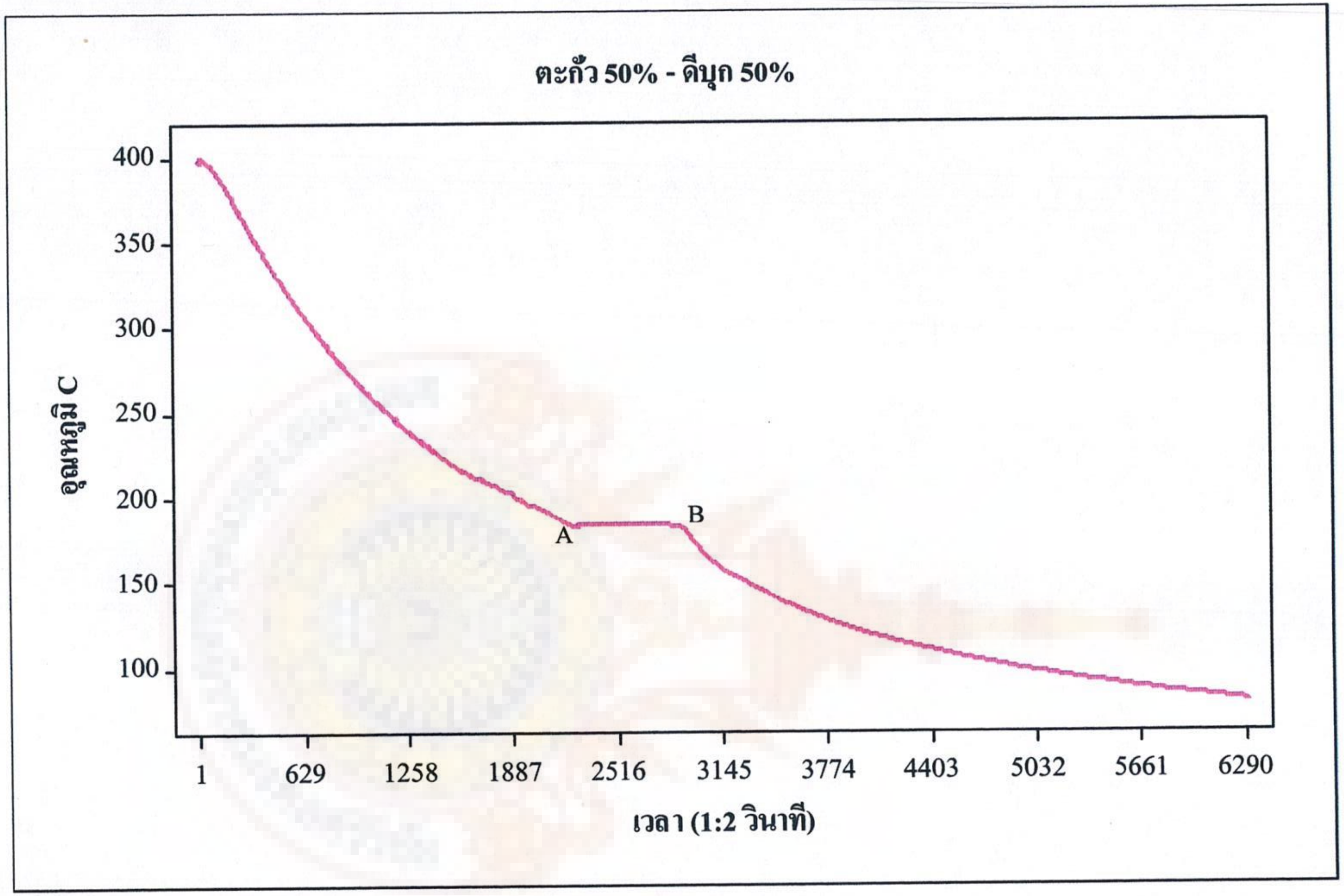
รูปที่ ก.3 แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวของตะกั่ว 80% กับ ดีบุก 20%



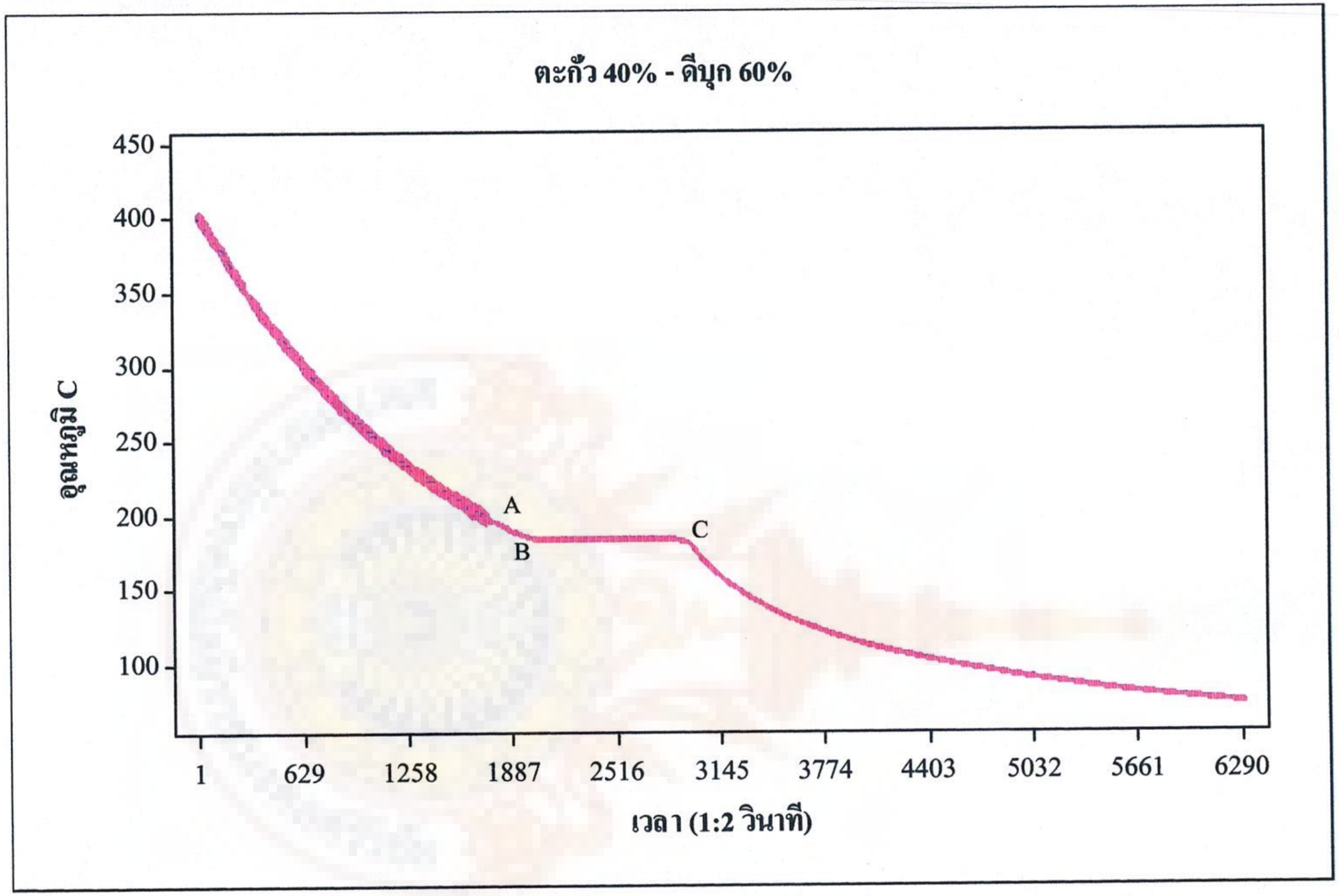
รูปที่ ก.4 แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวของตะกั่ว 70% กับ ดีบุก 30%



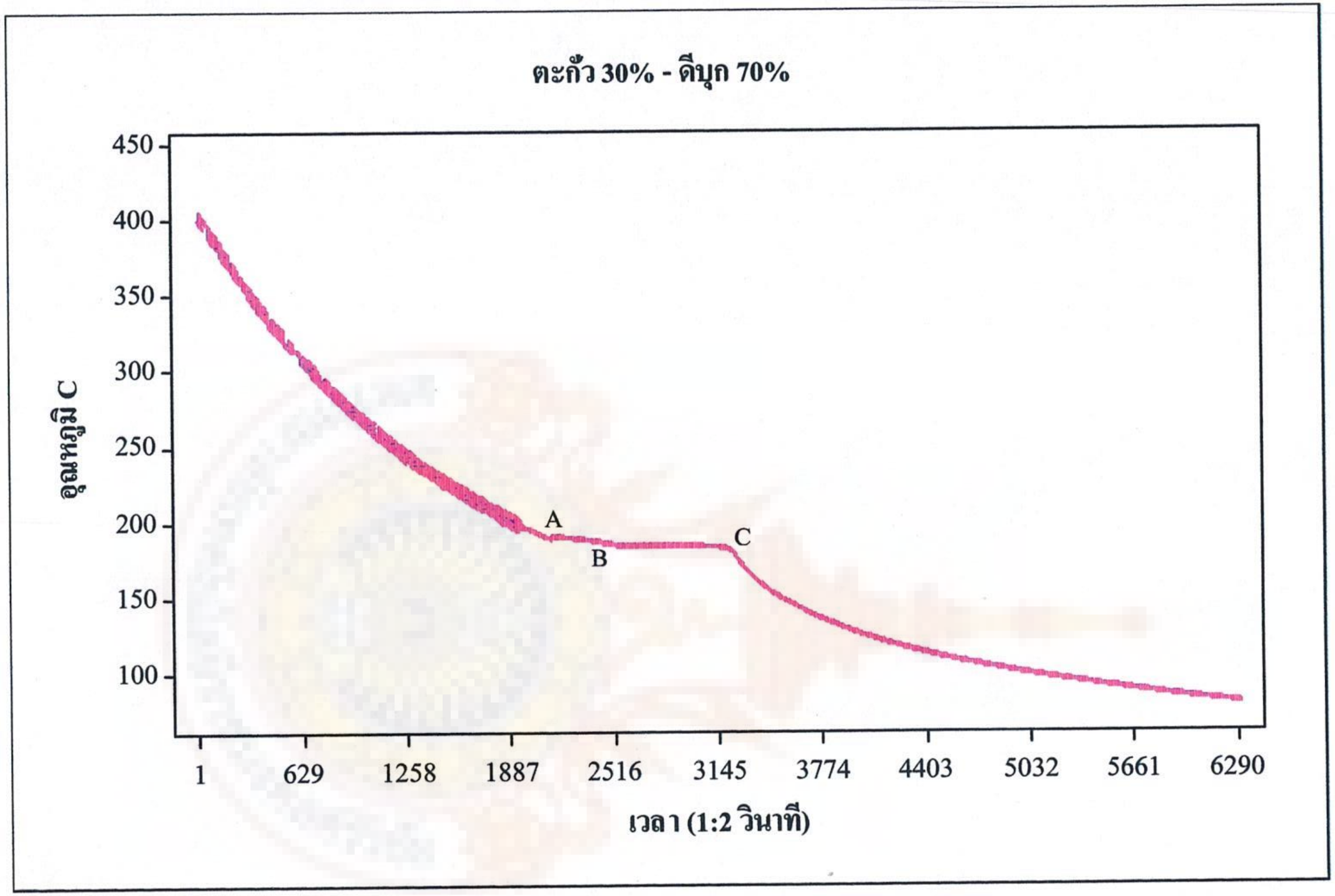
รูปที่ ก.5 แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวของตะกั่ว 60% กับ ดีบุก 40



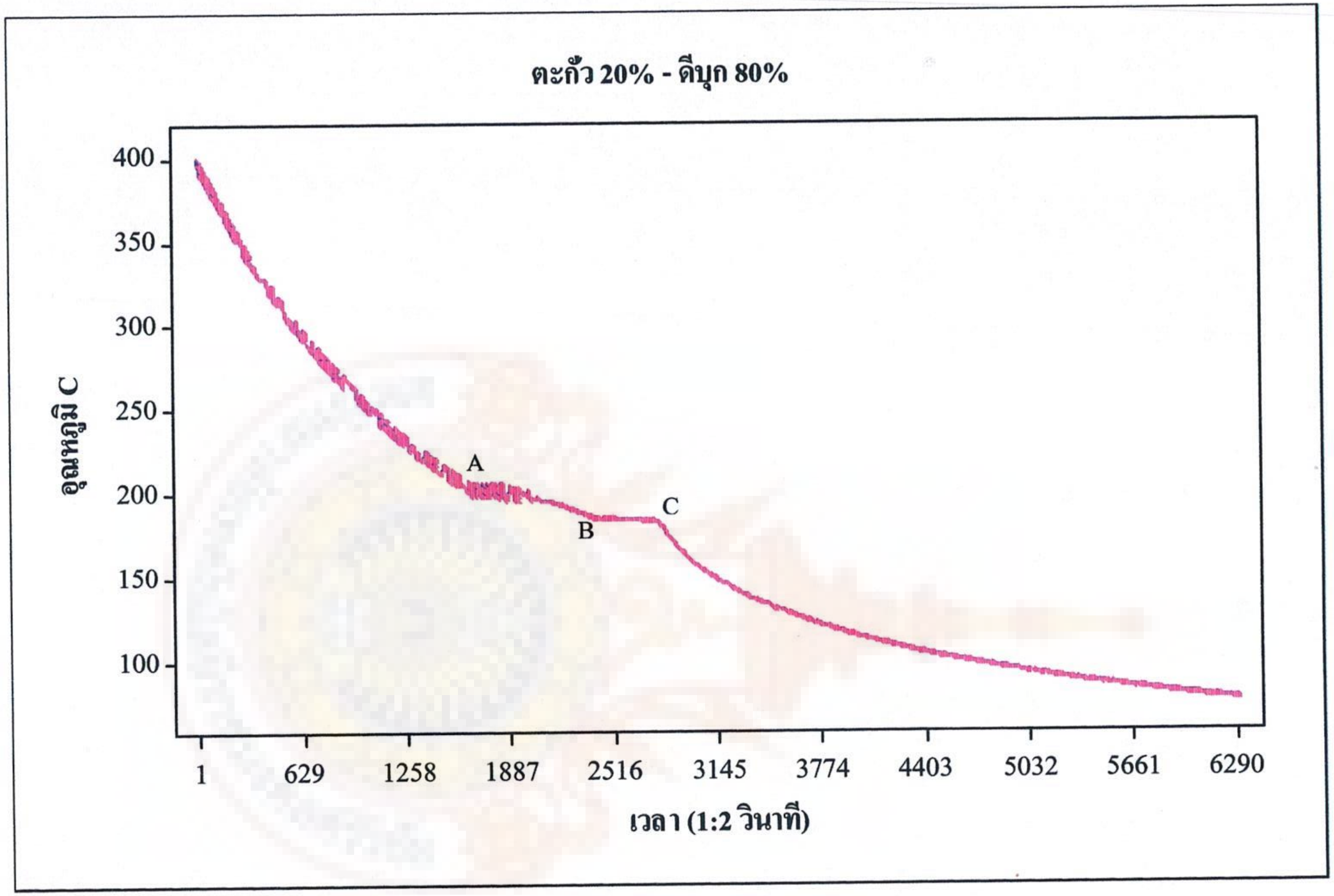
รูปที่ ก.6 แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวของตะกั่ว 50% กับ ดีบุก 50%



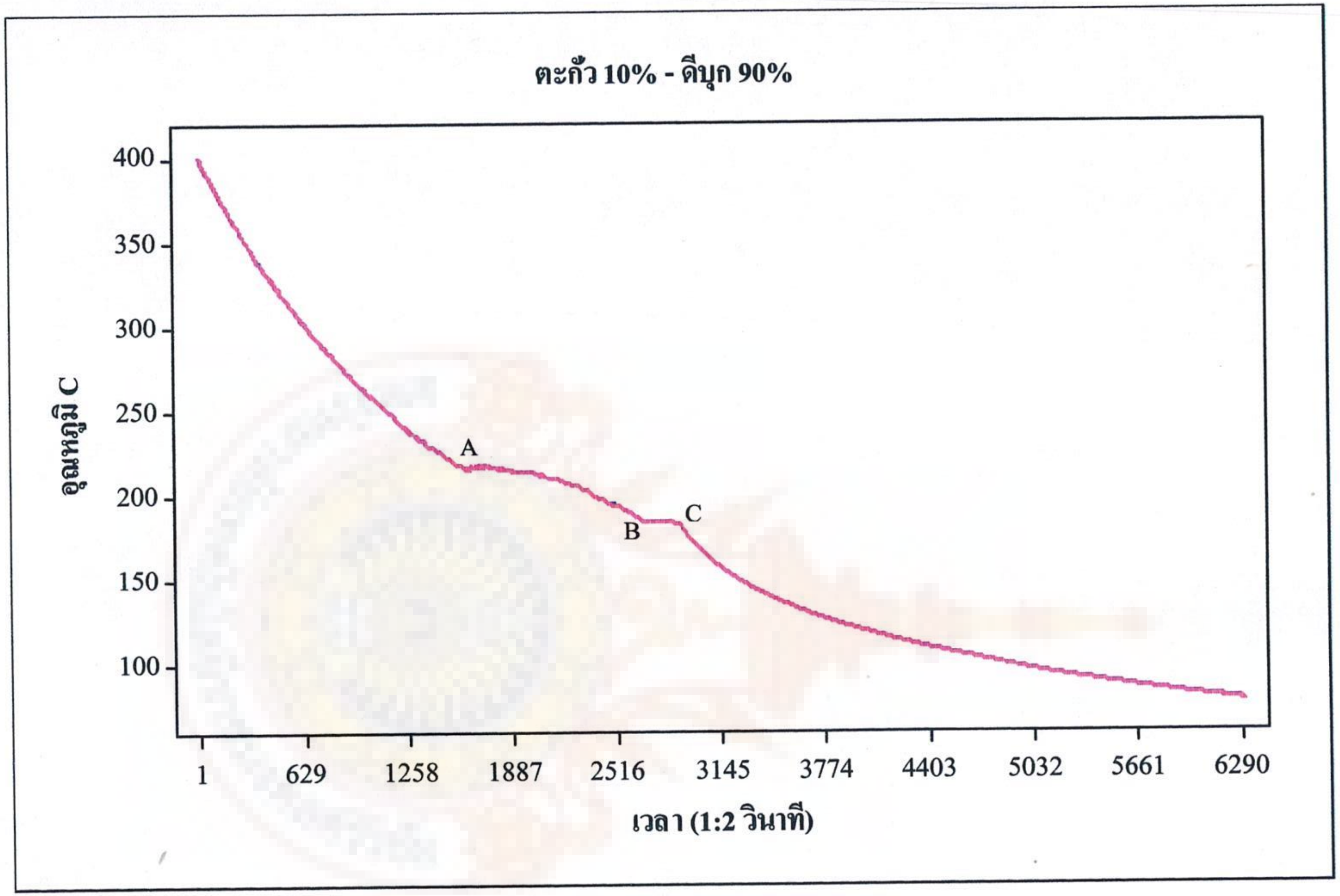
รูปที่ ก.7 แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวของตะกั่ว 40% กับ ดีบุก 60%



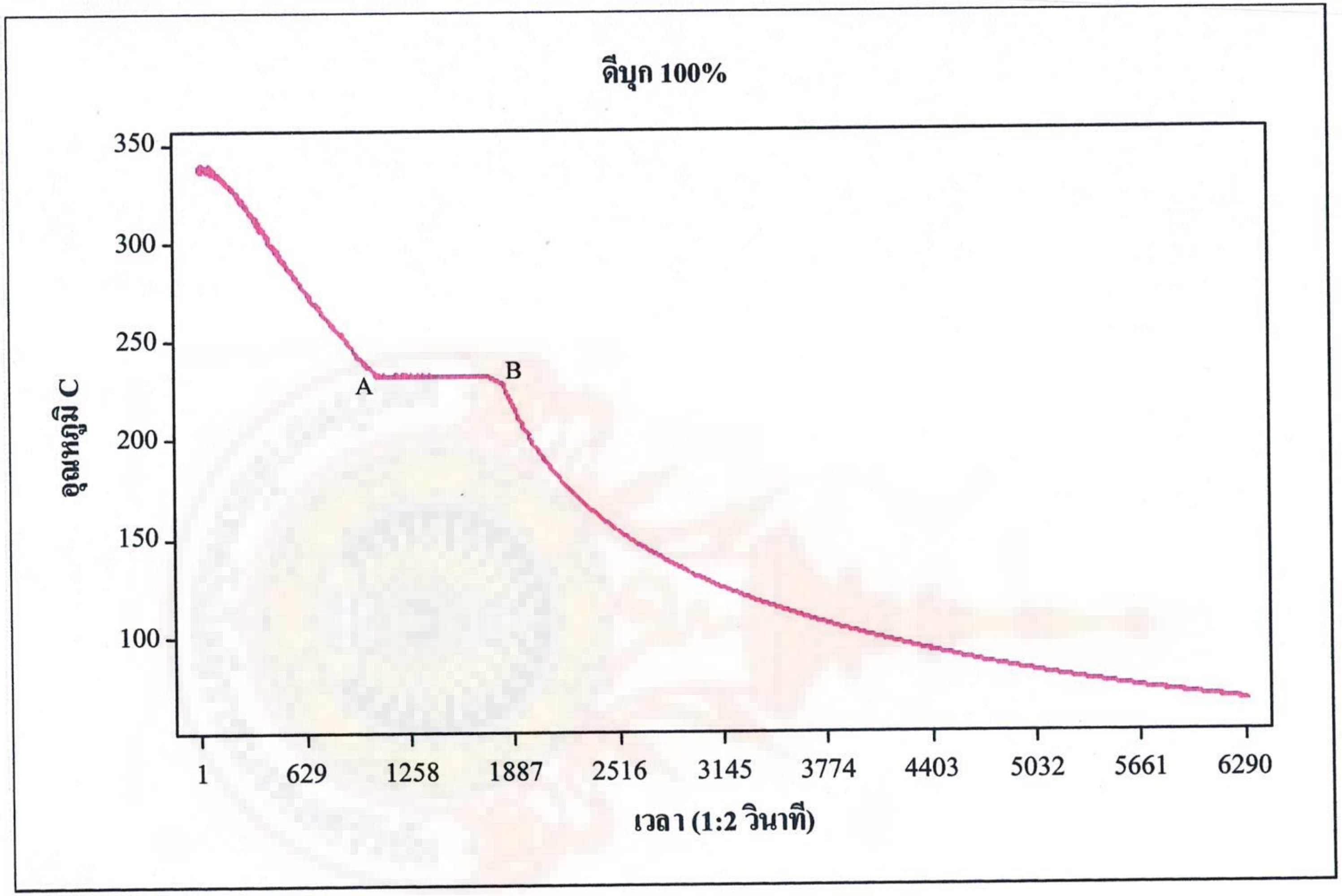
รูปที่ ก.8 แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวของตะกั่ว 30% กับ ดีบุก 70%



รูปที่ ก.9 แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวของตะกั่ว 20% กับ ดีบุก 80%



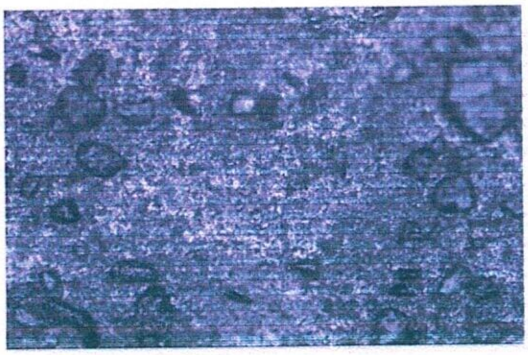
รูปที่ ก.10 แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวของตะกั่ว 10% กับ ดีบุก 90%



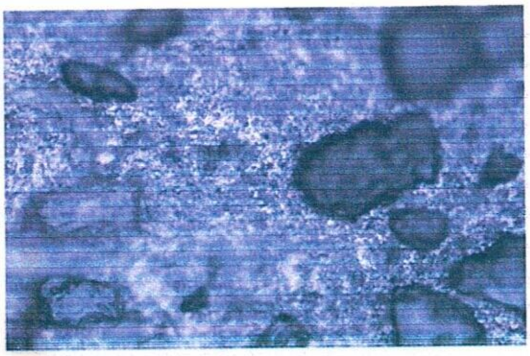
รูปที่ ก.11 แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวของดีบุก 100%

ภาคผนวก ข

รูปโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมตะกั่วกับดีบุก

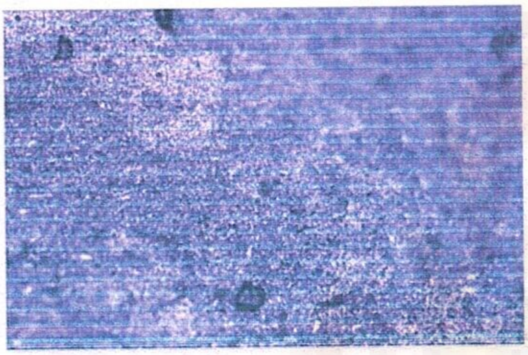


ก) กำลังขยาย 20X

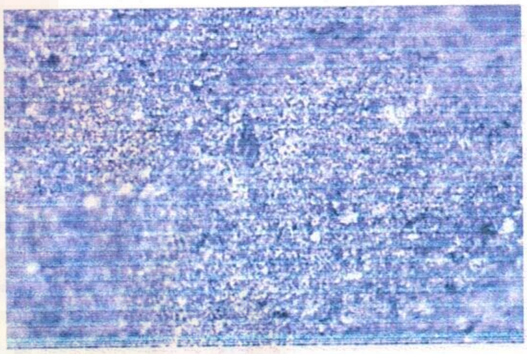


ข) กำลังขยาย 50X

รูปที่ ข.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคของตะกั่วบริสุทธิ์

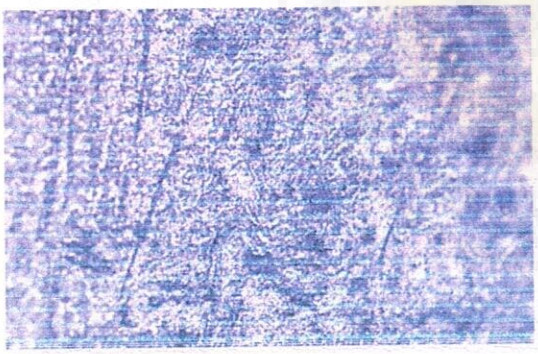


ก) กำลังขยาย 20X

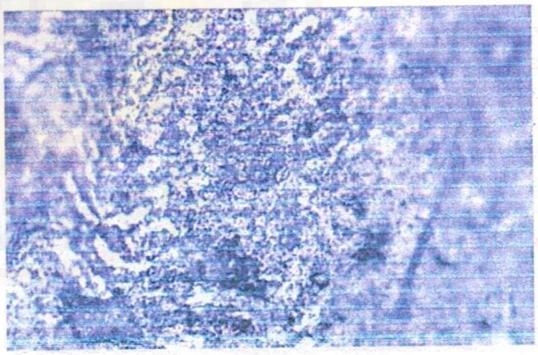


ข) กำลังขยาย 50X

รูปที่ ข.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 90%กับ ดีบุก 10%

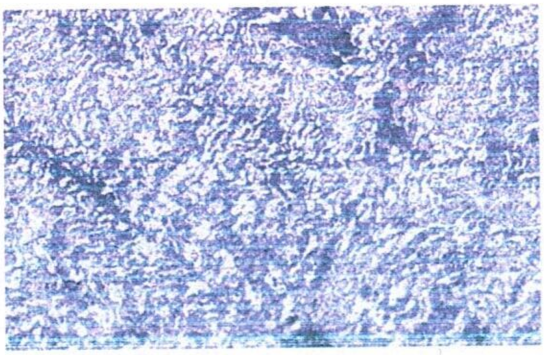


ก) กำลังขยาย 20X

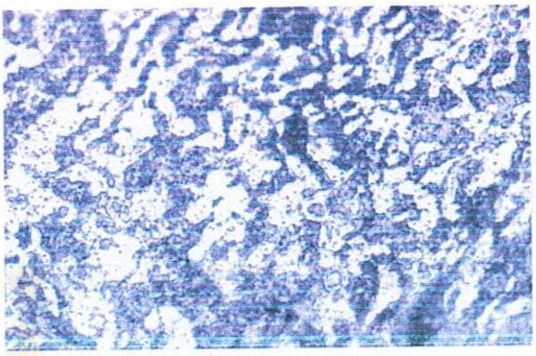


ข) กำลังขยาย 50X

รูปที่ ข.3 แสดงโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 80%กับ ดีบุก 20%

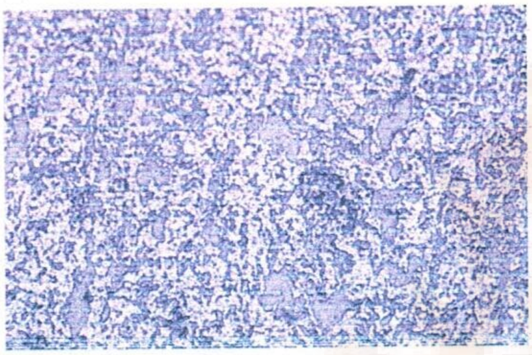


ก) กำลังขยาย 20X

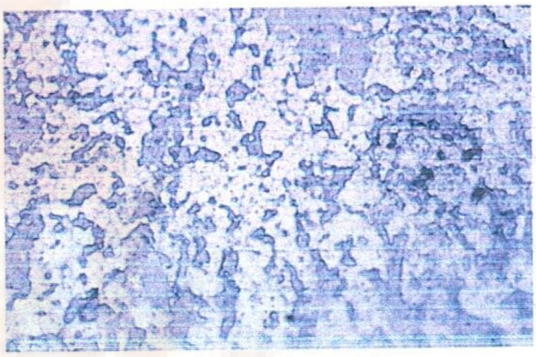


ข) กำลังขยาย 50X

รูปที่ ข.4 แสดงโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 70%กับ ดีบุก 30%

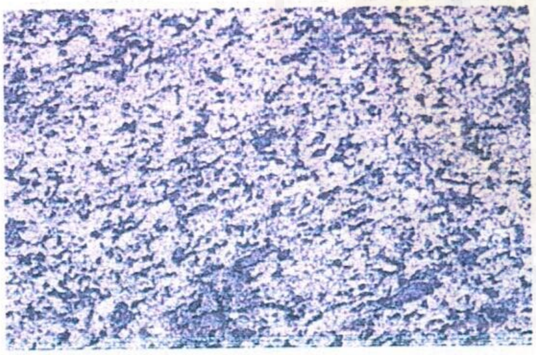


ก) กำลังขยาย 20X

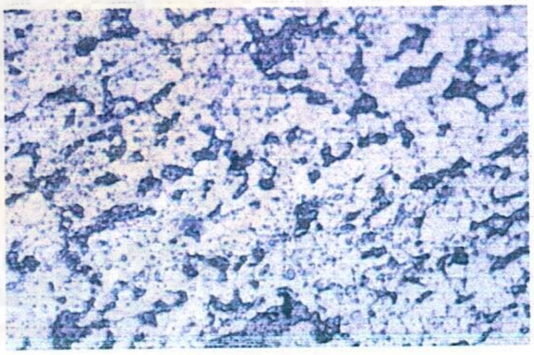


ข) กำลังขยาย 50X

รูปที่ ข.5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 60%กับ ดีบุก 40%



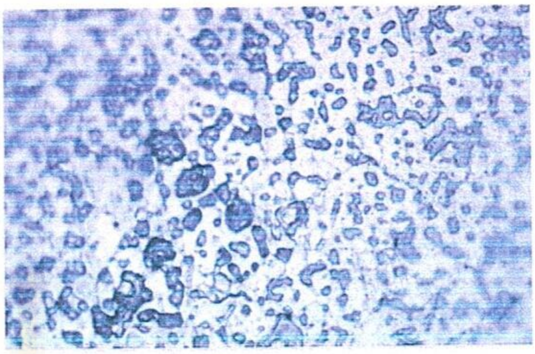
ก) กำลังขยาย 20X



ข) กำลังขยาย 50X

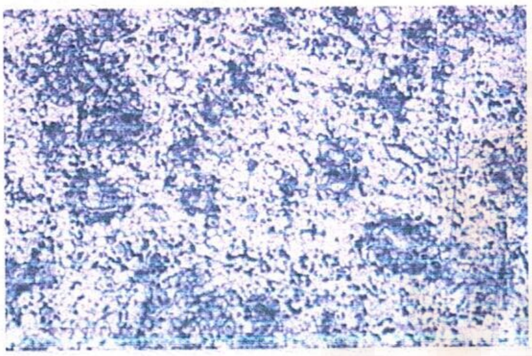
รูปที่ ข.6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 50%กับ ดีบุก 50%

ก) กำลังขยาย 20X

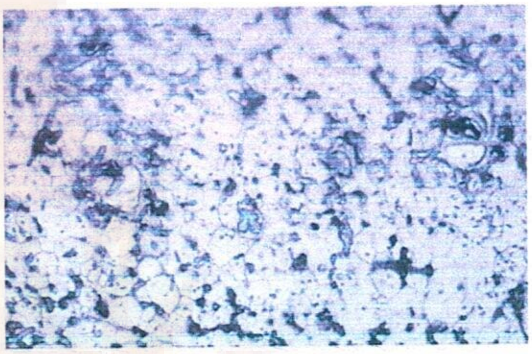


ข) กำลังขยาย 50X

รูปที่ ข.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 40%กับ ดีบุก 60%

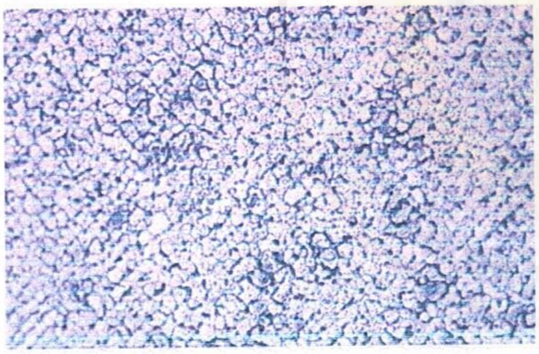


ก) กำลังขยาย 20X

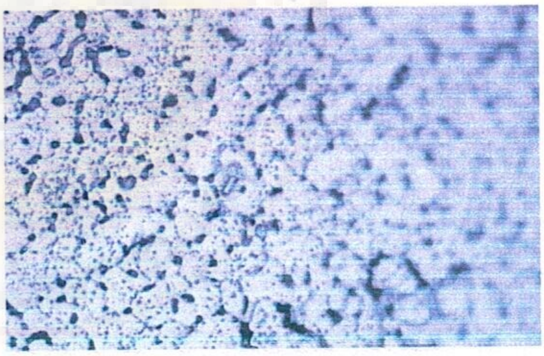


ข) กำลังขยาย 50X

รูปที่ ข.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 30%กับ ดีบุก 70%

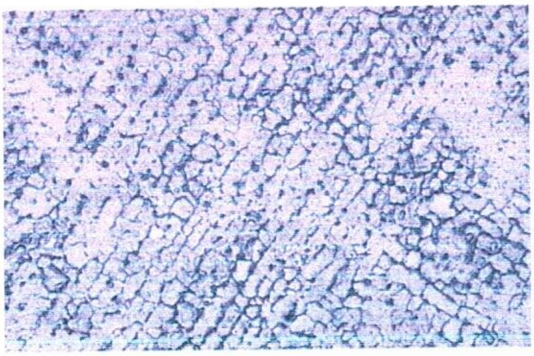


ก) กำลังขยาย 20X

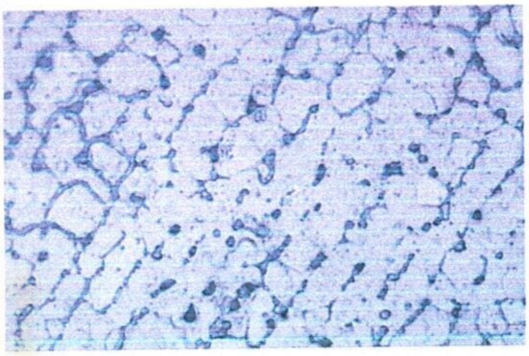


ข) กำลังขยาย 50X

รูปที่ ข.9 แสดงโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 20%กับ ดีบุก 80%

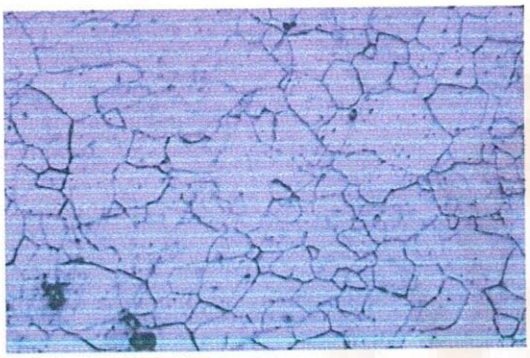


ก) กำลังขยาย 20X

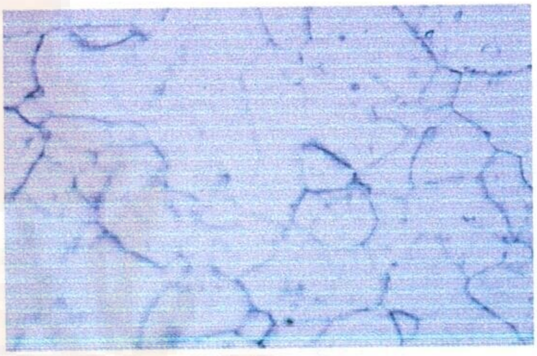


ข) กำลังขยาย 50X

รูปที่ ข.10 แสดงโครงสร้างจุลภาคของตะกั่ว 10%กับ ดีบุก 90%



ก) กำลังขยาย 20X

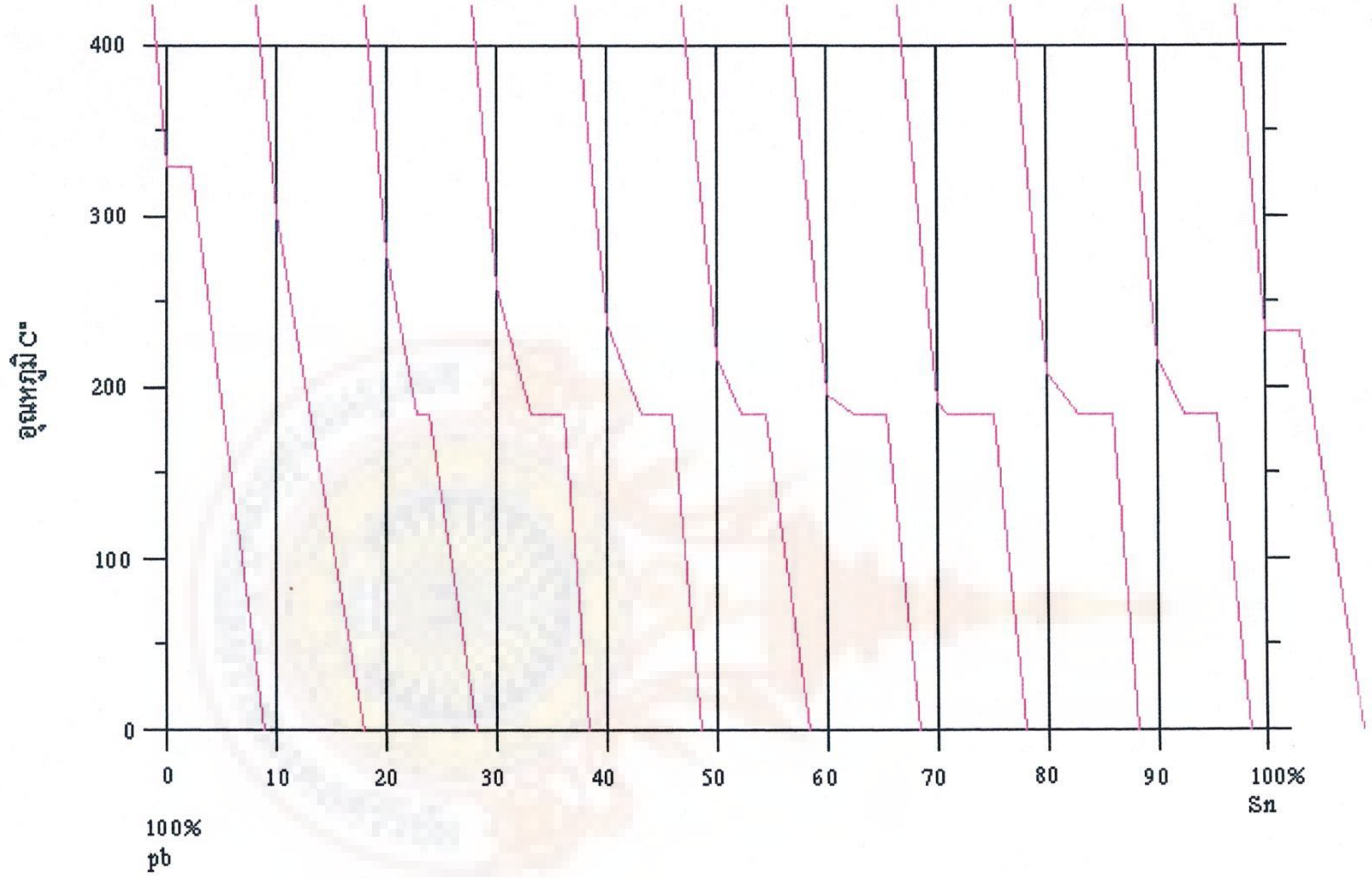


ข) กำลังขยาย 50X

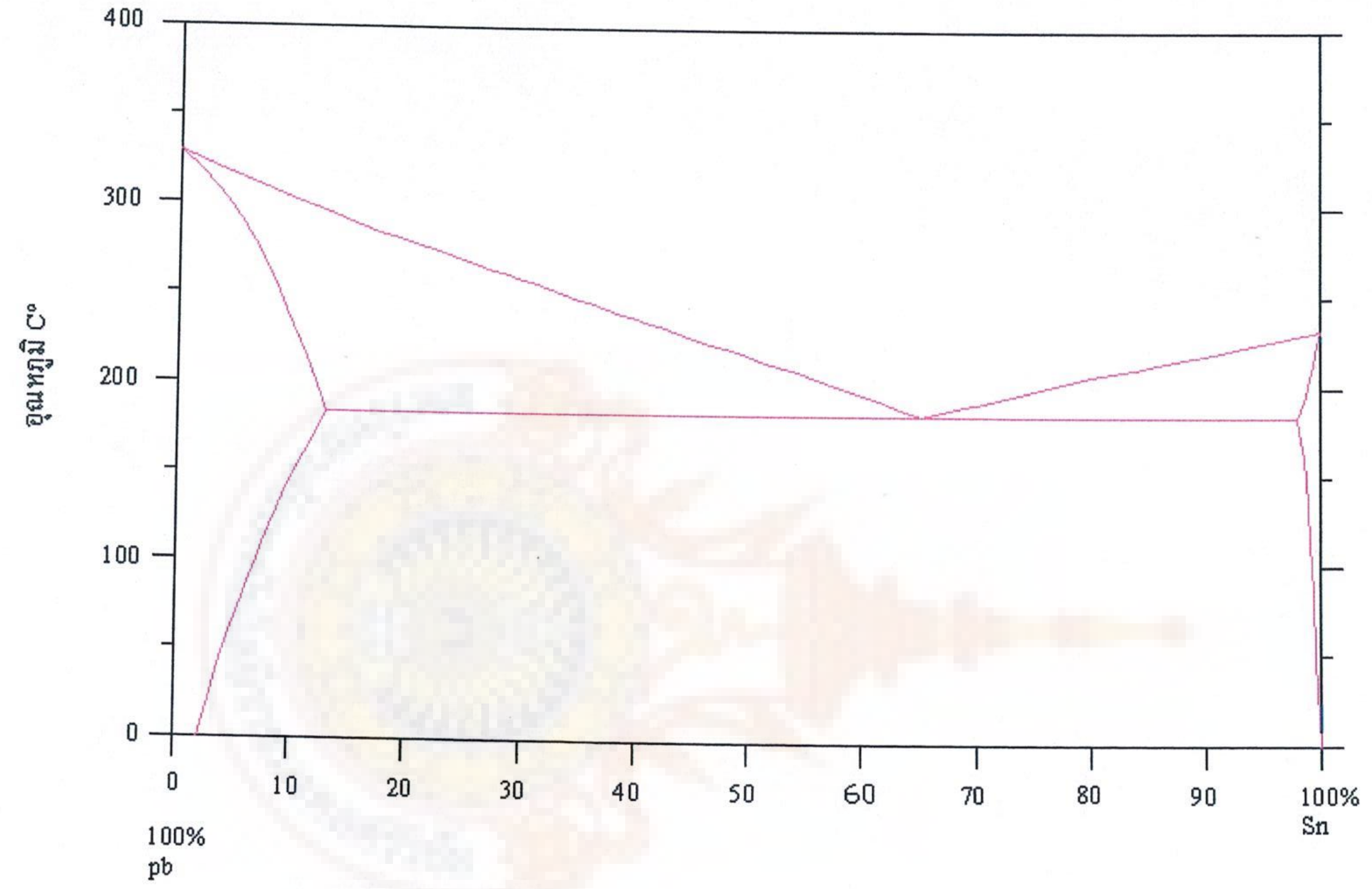
รูปที่ ข.11 แสดงโครงสร้างจุลภาคของดีบุกบริสุทธิ์

ภาคผนวก ค

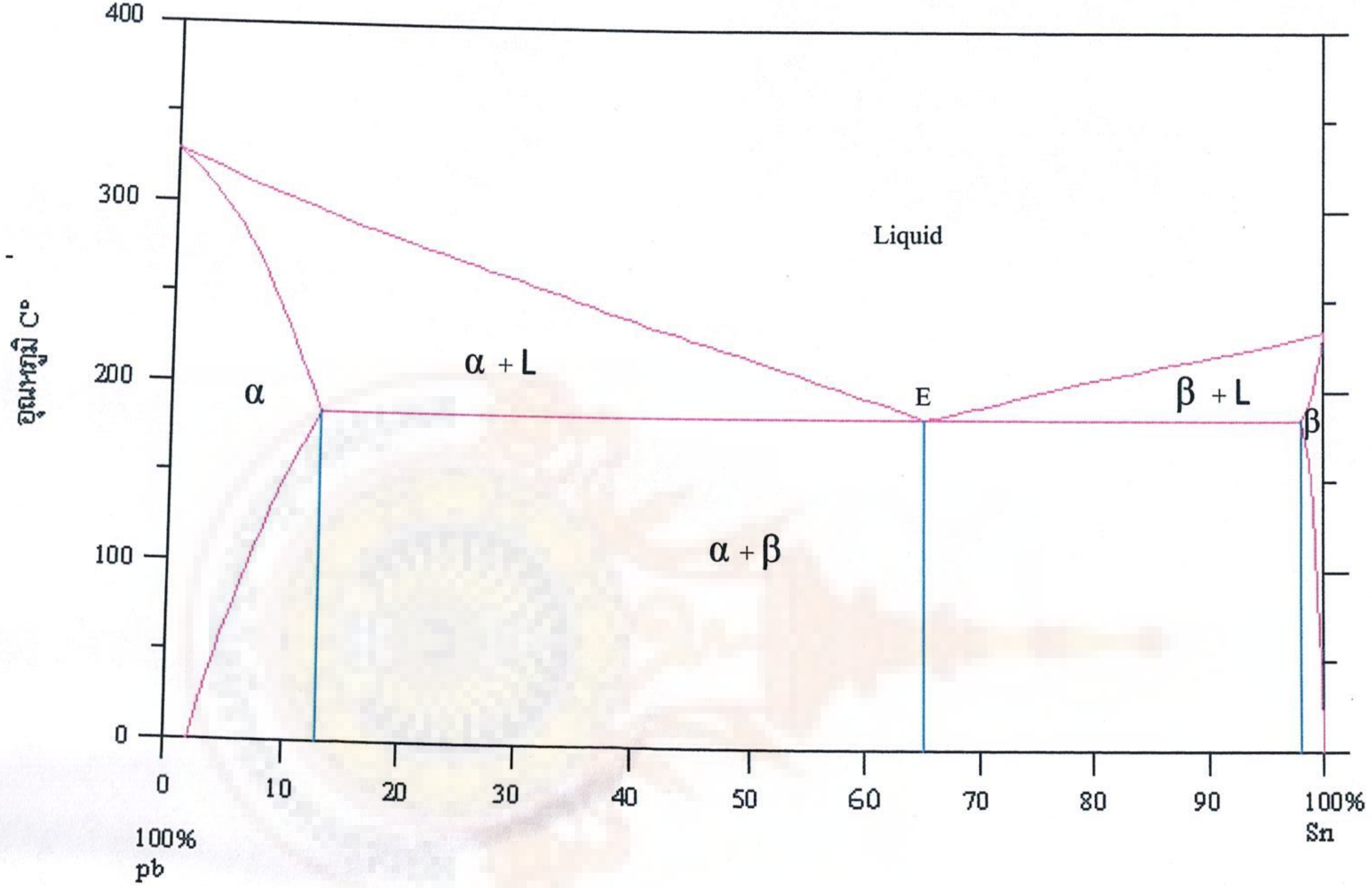
รูปแสดงการเขียนแผนภาพสมดุลโลหะผสมตะกั่วกับดีบุก



รูปที่ ค.1 แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวของโลหะผสมตะกั่วและดีบุก



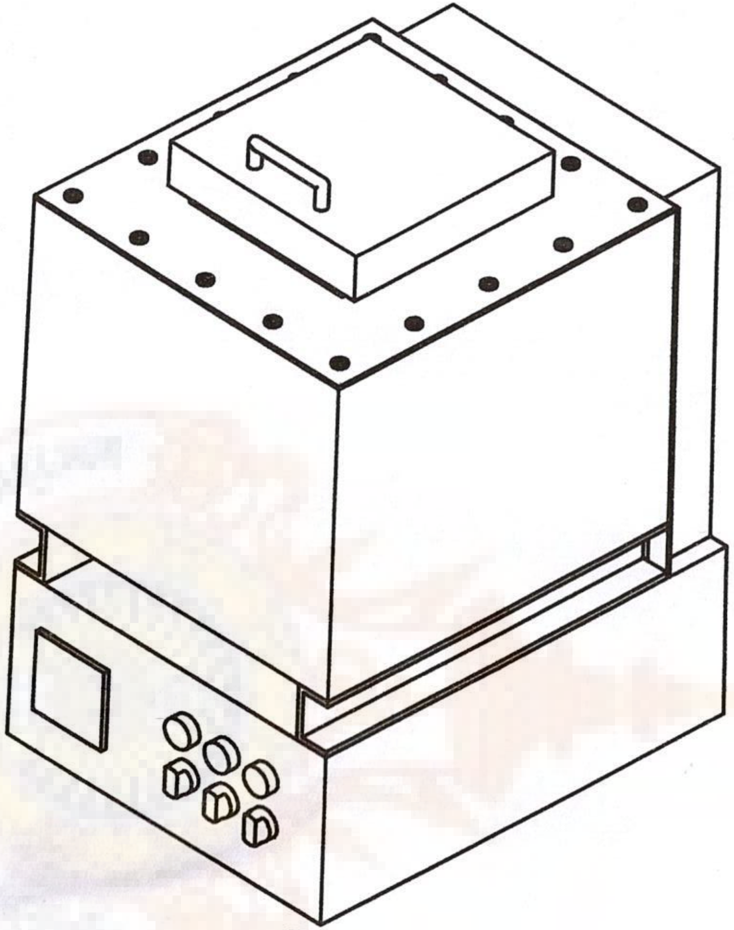
รูปที่ ค.2 แสดงแผนภาพสมดุลของโลหะผสมตะกั่วและดีบุก



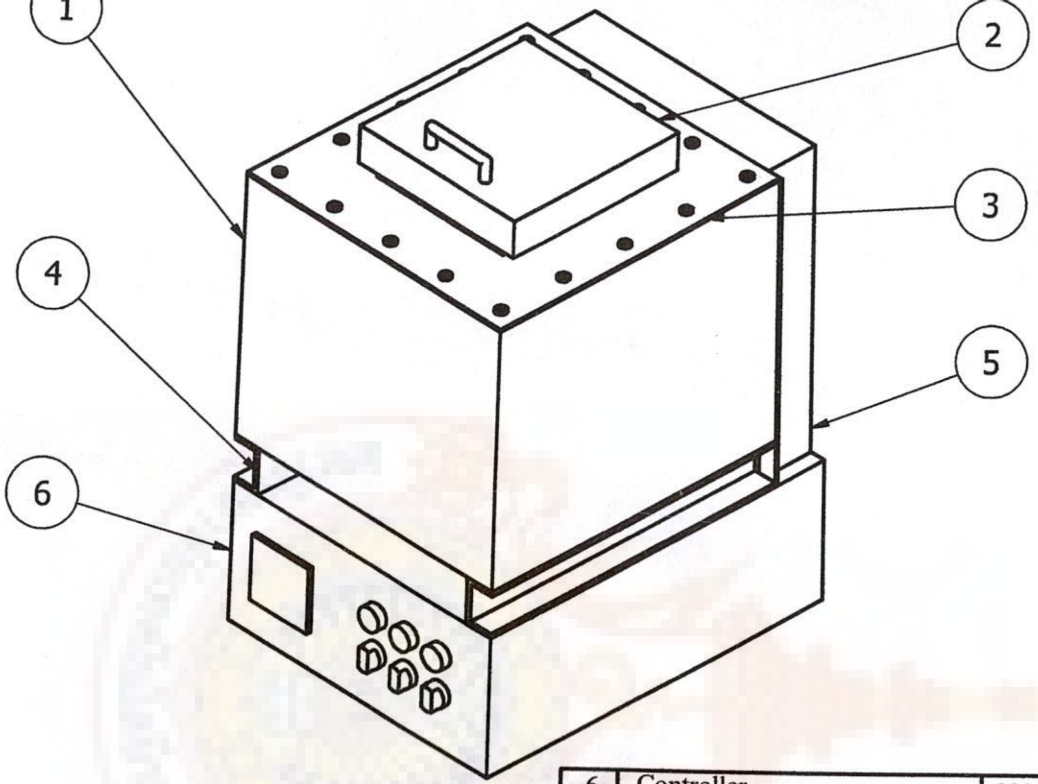
รูปที่ ค.3 แสดงส่วนผสมของแผนภาพสมดุลโลหะผสมตะกั่วและดีบุก

ภาคผนวก ง

แบบชุดวิเคราะห์ความร้อน

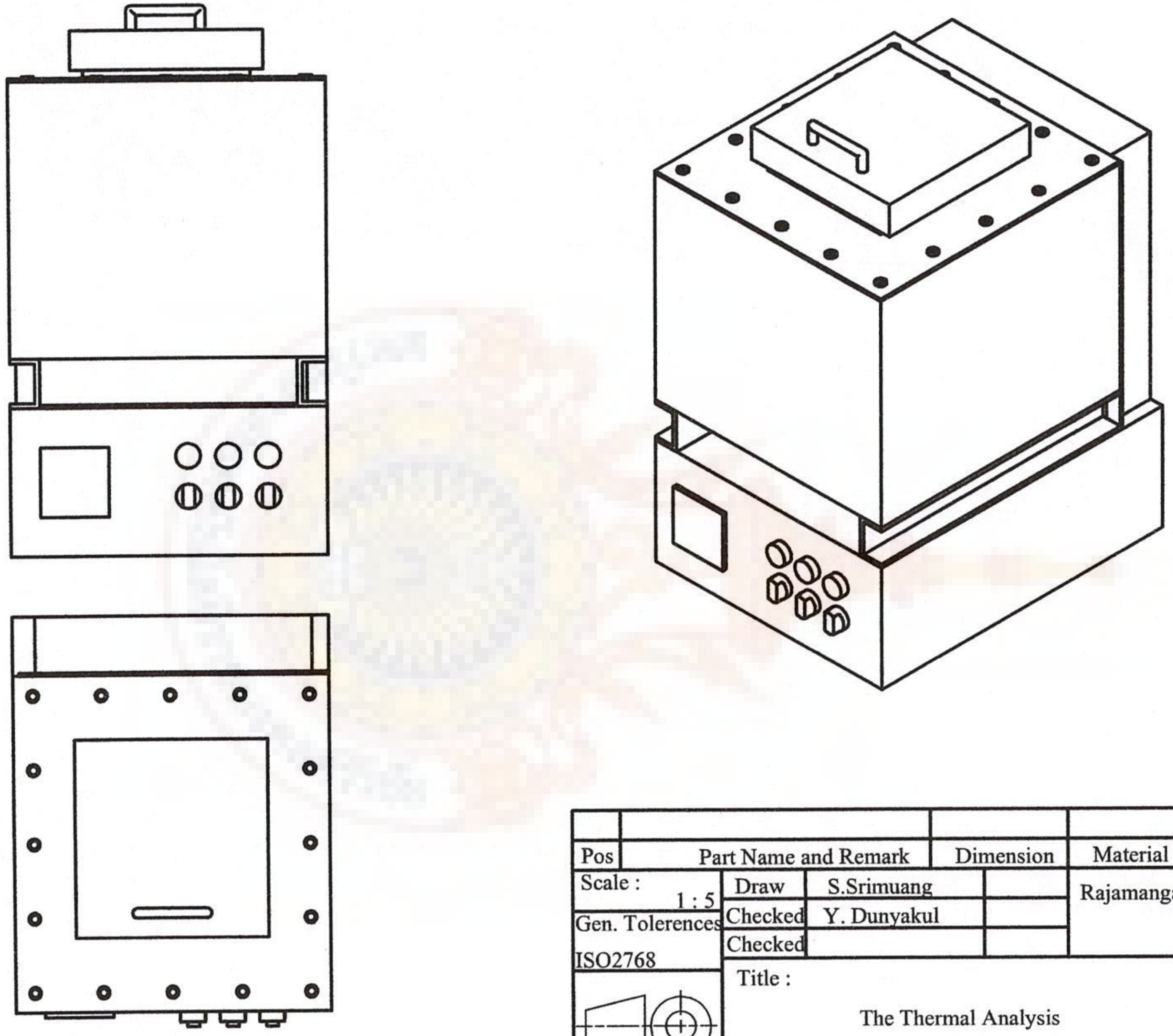


					TTA - A
Pos	Part Name and Remark	Dimension	Material	Reg	Drawing No.
Scale : 1 : 5	Draw	S.Srimuang		Rajamangala University of Technogy Srivijaya	
Gen. Tolerences ISO2768	Checked	Y. Dunyakul			
	Checked				
	Title : The Thermal Analysis			Drawing No. TTA - A	

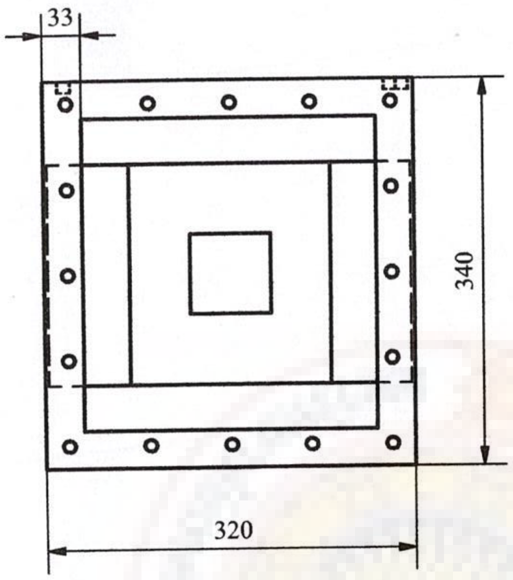


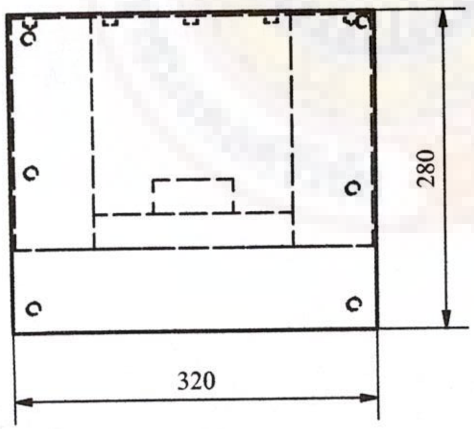
Pos	Part Name and Remark	Dimension	Material	Reg	Drawing No.
6	Controller	320x400x150	St 37	1	TTA - 06
5	The Back Cover	314x330x60	St 37	1	TTA - 05
4	Leg Supports	30x50x340	St 37	2	TTA - 04
3	Lange Cover	320x340x3	St 37	1	TTA - 03
2	Small Cover	195x200x40	St 37	1	TTA - 02
1	Combustion Chamber	320x340x280	St 37	1	TTA - 01

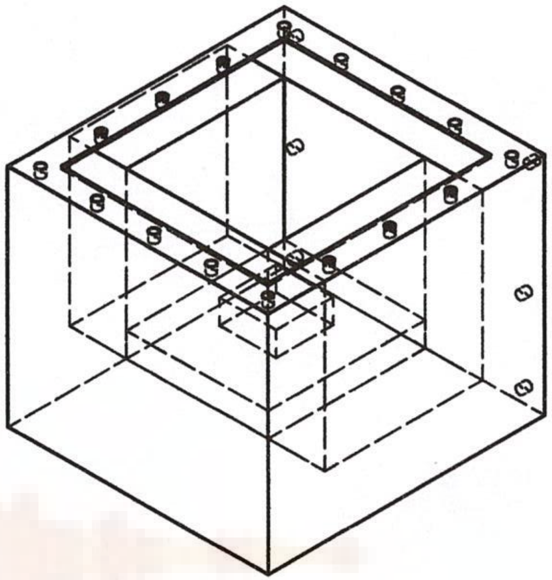
Scale : 1 : 6	Draw	S.Srimuang	Rajamangala University of Technogy Srivijaya
Gen. Tolerences ISO2768	Checked	Y. Dunyakul	
	Checked		
	Title : The Thermal Analysis		Drawing No. TTA - B



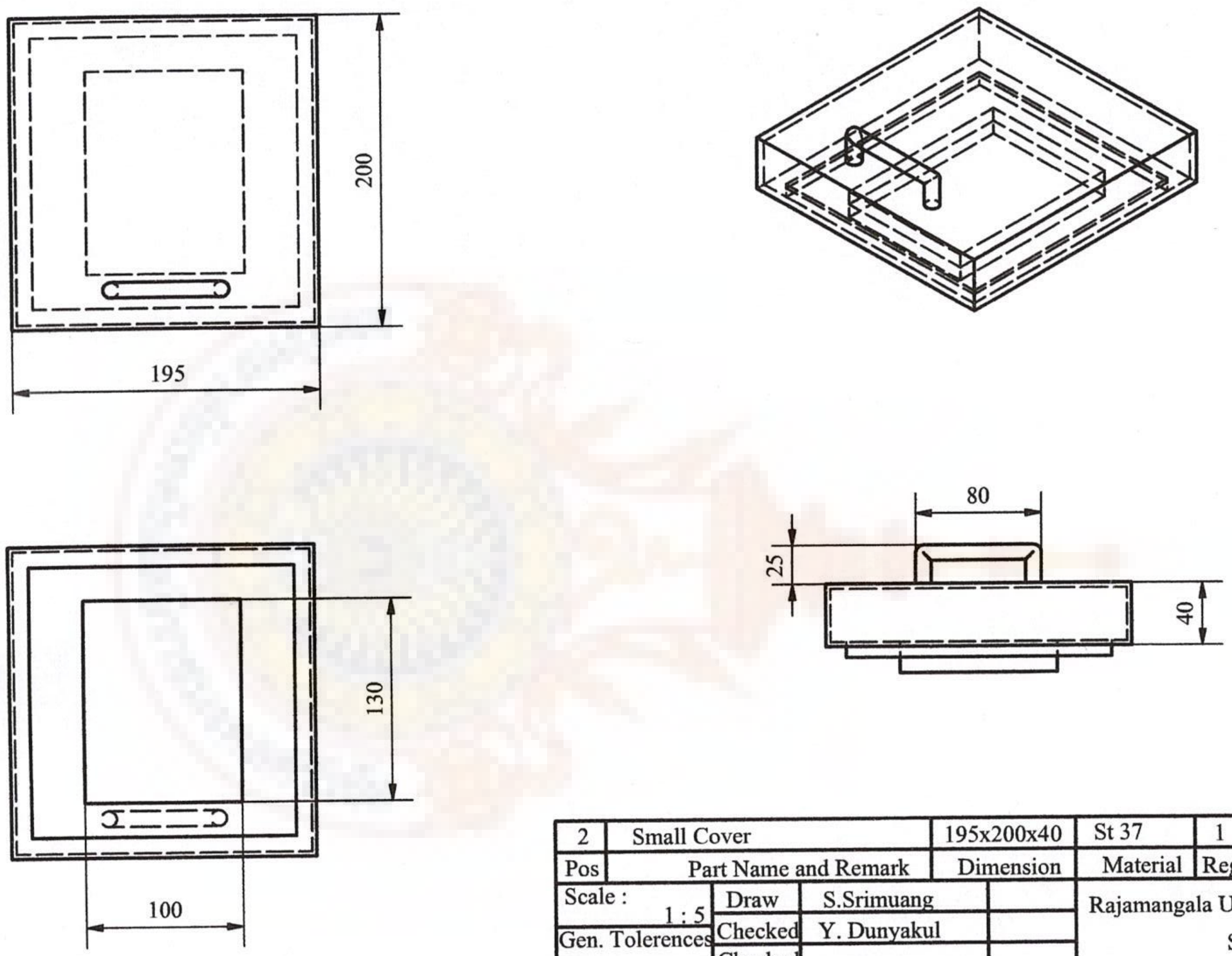
					TTA - C
Pos	Part Name and Remark	Dimension	Material	Reg	Drawing No.
Scale : 1 : 5	Draw: S.Srimuang		Rajamangala University of Technogy Srivijaya		
Gen. Tolerences	Checked: Y. Dunyakul				
ISO2768	Checked				
	Title : The Thermal Analysis			Drawing No. TTA - C	



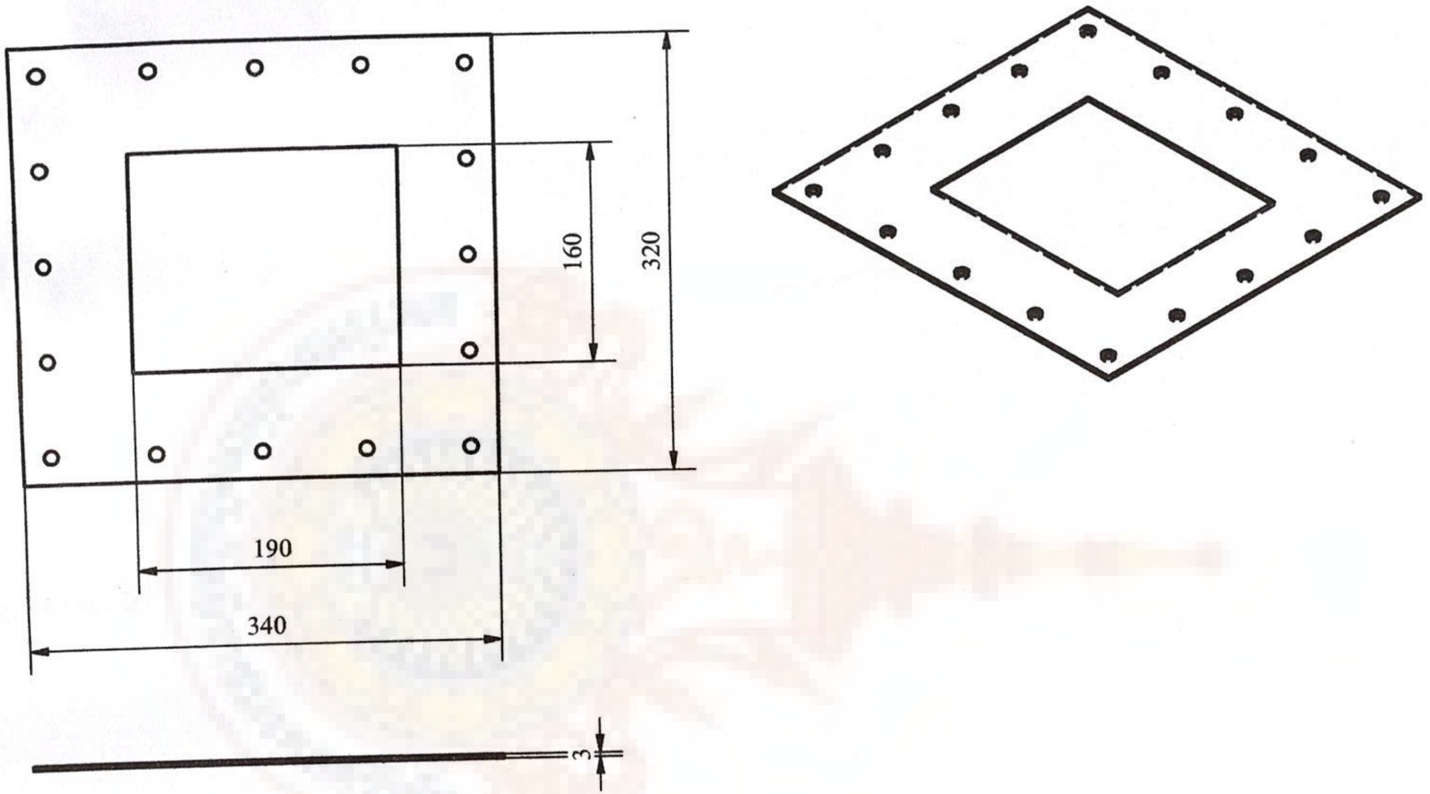




1	Combustion Chamber	320x340x280	St 37	1	TTA - 01
Pos	Part Name and Remark	Dimension	Material	Reg	Drawing No.
Scale : 1 : 5	Draw: S.Srimuang		Rajamangala University of Technogy Srivijaya		
Gen. Tolerences ISO2768	Checked: Y. Dunyakul				
	Checked				
	Title : The Thermal Analysis		Drawing No. TTA - 01		

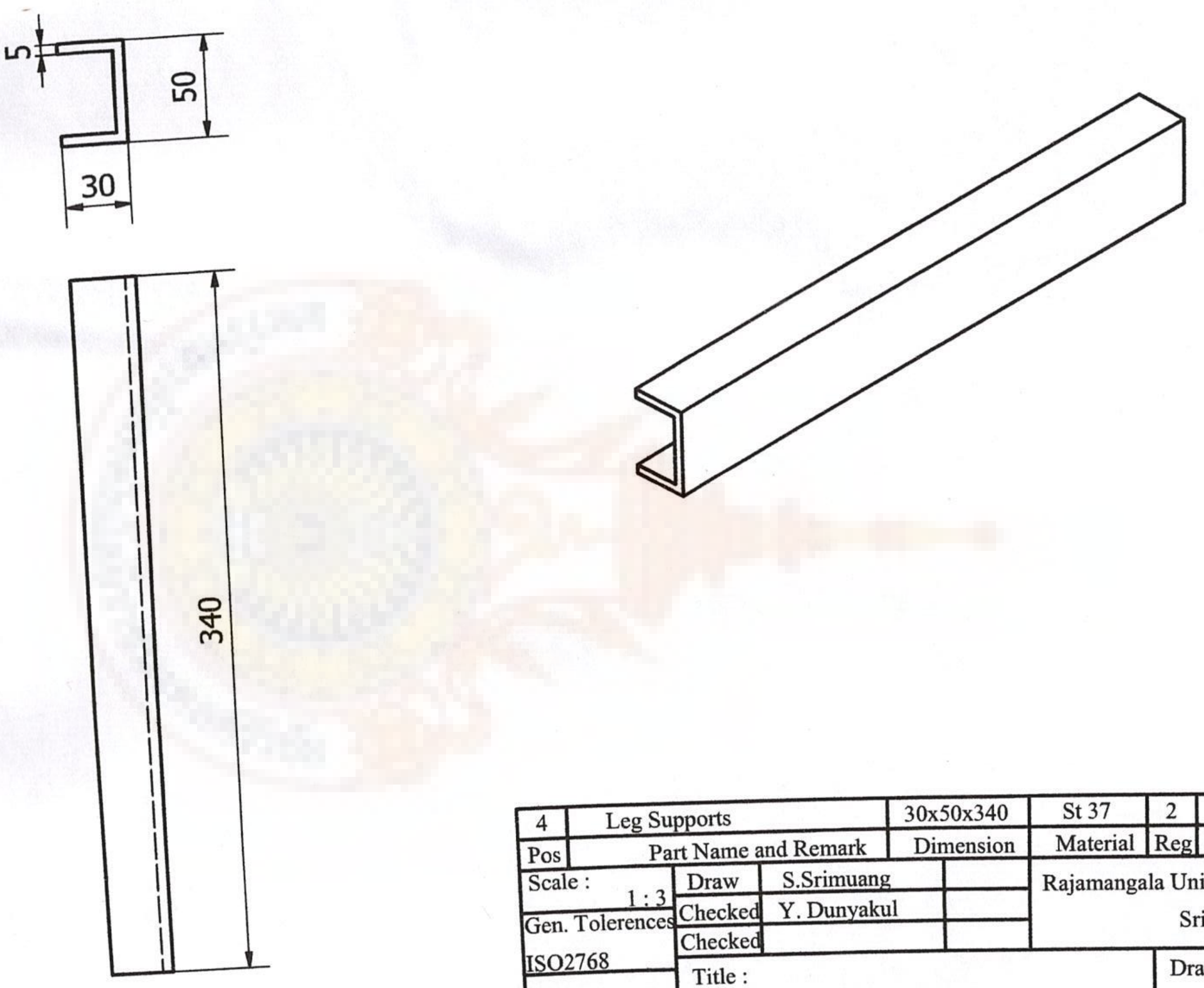


2	Small Cover	195x200x40	St 37	1	TTA - 02
Pos	Part Name and Remark	Dimension	Material	Reg	Drawing No.
Scale : 1 : 5	Draw: S.Srimuang		Rajamangala University of Technogy Srivijaya		
Gen. Tolerences ISO2768	Checked: Y. Dunyakul				
	Checked				
	Title : The Thermal Analysis			Drawing No. TTA - 02	



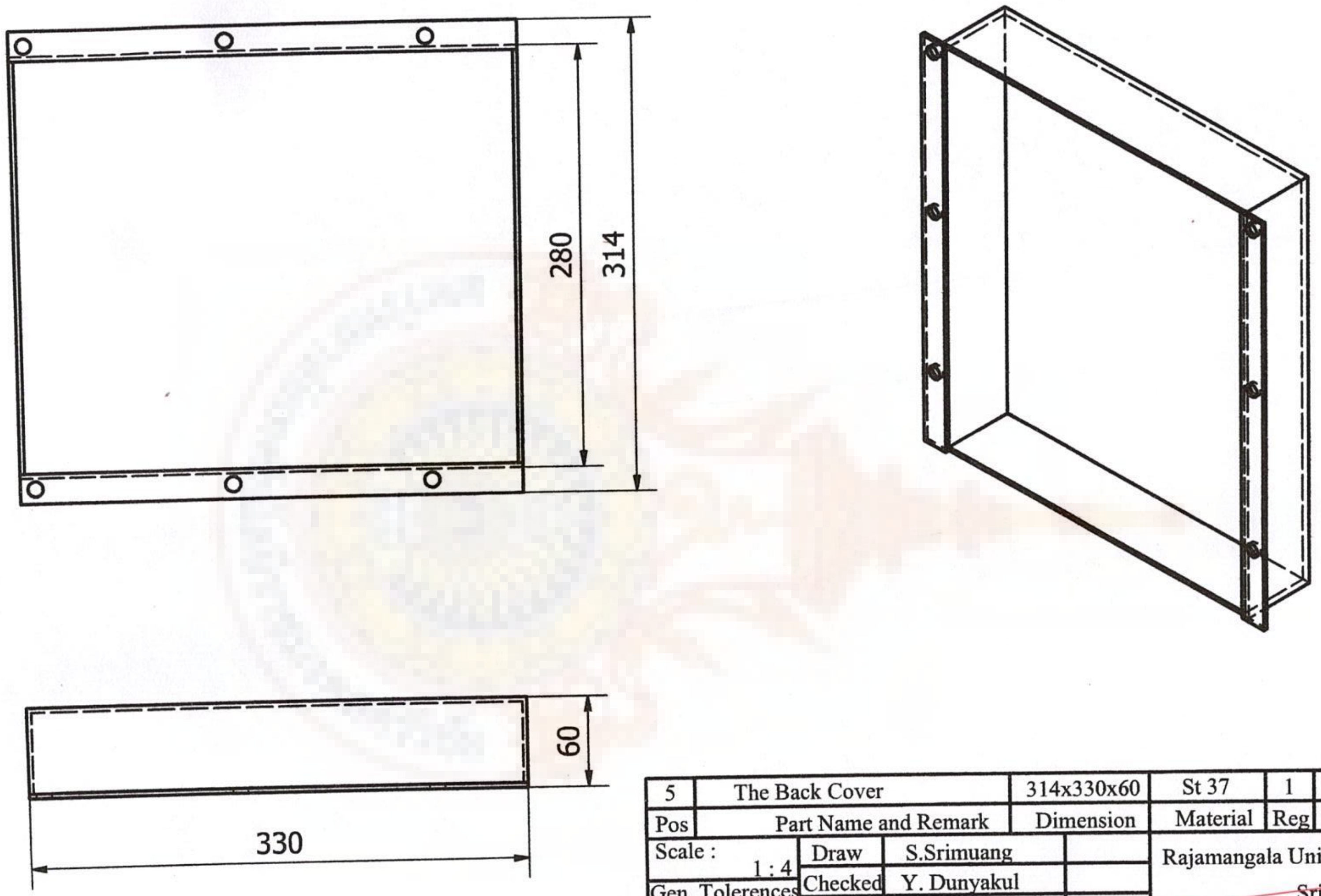
1	Lange Cover	320x340x3	St 37	1	TTA - 03
Pos	Part Name and Remark	Dimension	Material	Reg	Drawing No.

Scale : 1 : 5	Draw	S.Srimuang	Rajamangala University of Technogy Srivijaya
Gen. Tolerences	Checked	Y. Dunyakul	
ISO2768	Checked		
	Title : The Thermal Analysis		Drawing No. TTA - 03

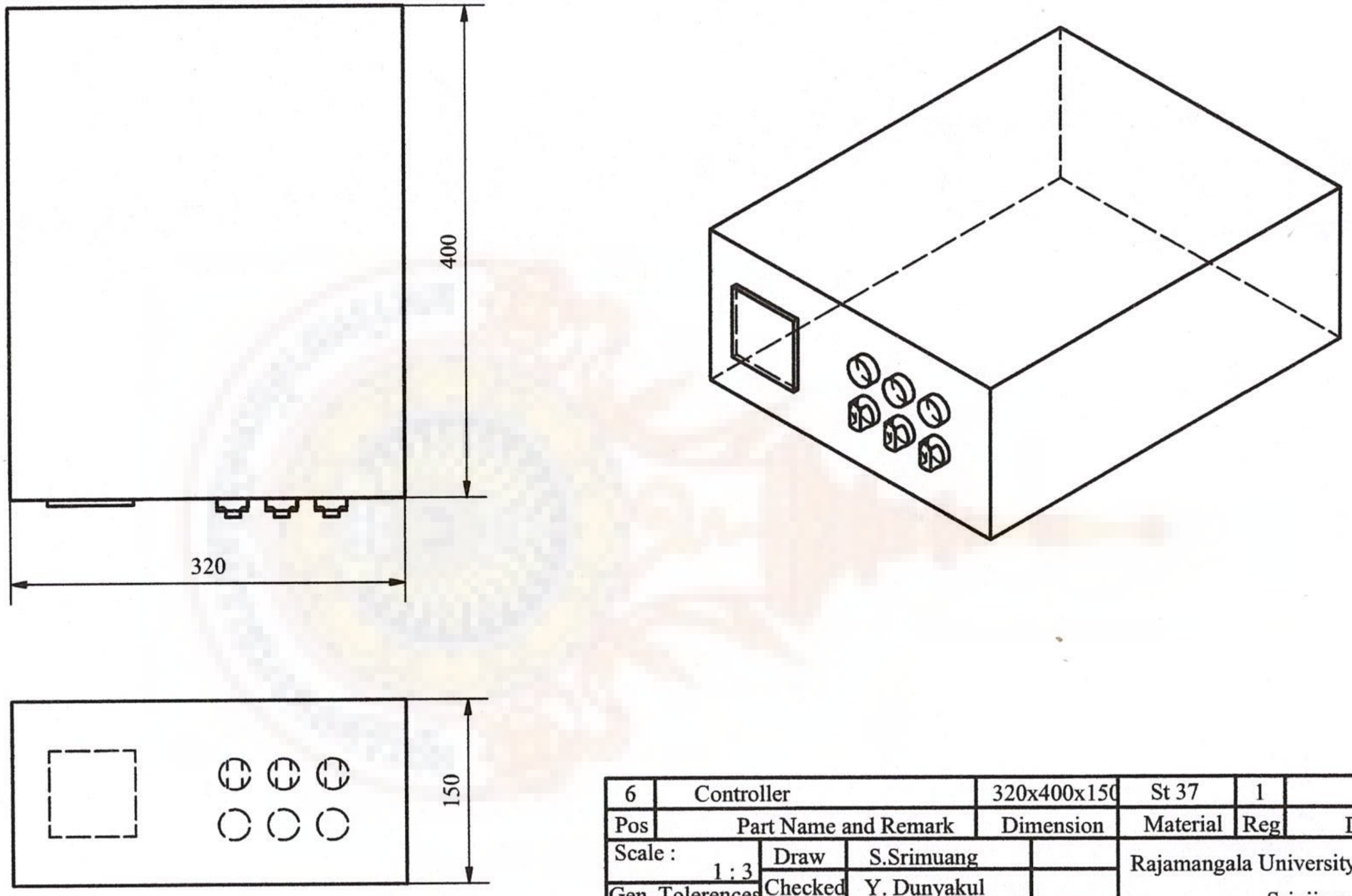


4	Leg Supports	30x50x340	St 37	2	TTA - 04
Pos	Part Name and Remark	Dimension	Material	Reg	Drawing No.

Scale : 1 : 3	Draw	S.Srimuang	Rajamangala University of Technogy Srivijaya
Gen. Tolerences ISO2768	Checked	Y. Dunyakul	
	Checked		
	Title : The Thermal Analysis		Drawing No. TTA - 04



5	The Back Cover	314x330x60	St 37	1	TTA - 05
Pos	Part Name and Remark	Dimension	Material	Reg	Drawing No.
Scale : 1 : 4	Draw: S.Srimuang		Rajamangala University of Technogy Srivijaya		
Gen. Tolerences ISO2768	Checked: Y. Dunyakul				
	Checked				
	Title : The Thermal Analysis		Drawing No. TTA - 05		



6	Controller		320x400x150	St 37	1	TTA - 06
Pos	Part Name and Remark		Dimension	Material	Reg	Drawing No.
Scale : 1 : 3	Draw	S.Srimuang		Rajamangala University of Technogy Srivijaya		
Gen. Tolerences ISO2768	Checked	Y. Dunyakul				
	Checked					
	Title : The Thermal Analysis				Drawing No. TTA - 06	

ประวัติผู้จัดทำปริญญานิพนธ์

ประวัติผู้จัดทำปริญญานิพนธ์

ชื่อ	นายสรายุทธ ศรีเมือง รหัส 435164050014-9
สาขาวิชา/ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
วัน-เดือน-ปี เกิด	วันที่ 25 สิงหาคม 2529
สถานที่เกิด	จังหวัดนครศรีธรรมราช
ที่อยู่	229/7 ม.1 ต.สิชล อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช 80120
ประวัติการศึกษา	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) วิทยาลัยเทคนิคนครศรีธรรมราช 2547 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) วิทยาลัยเทคนิคนครศรีธรรมราช 2549

ประวัติผู้จัดทำปริญญานิพนธ์

ชื่อ	นายพิรุณ ณรงค์รัตน์ รหัส 435164050032-1
สาขาวิชา/ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
วัน-เดือน-ปี เกิด	วันที่ 29 กันยายน 2530
สถานที่เกิด	จังหวัดสงขลา
ที่อยู่	57 ม.3 ต.ทุ่งตำเสา อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110
ประวัติการศึกษา	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) วิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่ 2548
	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) วิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่ 2550

ประวัติผู้จัดทำปริญญานิพนธ์

ชื่อ	นายรัฐวรรธน์ ทองนิล รหัส 43564050035-4
สาขาวิชา/ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
วัน-เดือน-ปี เกิด	วันที่ 26 ตุลาคม 2528
สถานที่เกิด	จังหวัดสงขลา
ที่อยู่	46/21 ม.2 ต.เขารูปช้าง อ.เมืองสงขลา จ.สงขลา 90000
ประวัติการศึกษา	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) วิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่ 2548
	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) วิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่ 2550