



การพัฒนาวัสดุจุดหลอมตัวต่ำสำหรับก้ำบั้งรังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา

โดย

รัชชัย สุมิตร
วีระชัย บัญชรเทวกุล
ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล
สุวิทย์ ปอนด์ชัยยะ
นเรศร์ จันทน์ขาว

โครงการวิจัย เลขที่ ๓๕๖ - NC - ๒๕๓๒
ทุนส่งเสริมการวิจัยด้วยเงินงบประมาณแผ่นดิน

สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์

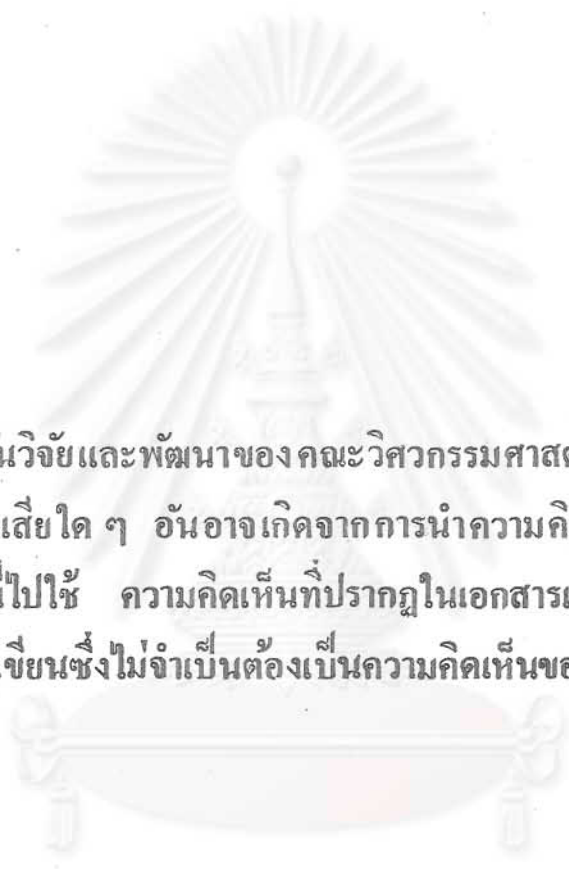
คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ ฯ

ตุลาคม ๒๕๓๖

๗๘
๗๘ ๒๕
๐๐๗๘๓๘



สถาบันวิจัยและพัฒนาของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ไม่รับผิดชอบ
ต่อผลเสียใด ๆ อันอาจเกิดจากการนำความคิดเห็นในเอกสาร
ฉบับนี้ไปใช้ ความคิดเห็นที่ปรากฏในเอกสารเป็นความคิดเห็น
ของผู้เขียนซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นความคิดเห็นของสถาบันฯ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การพัฒนาวัสดุจุดหลอมตัวสำหรับกัมมันตรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา

โดย



รศ.ดร.ชัชชัย สุมิตร

วุฒิ Dr. Ing. (ไฟฟ้าและนิวเคลียร์)

ดร.วีระชัย บัญชรเทวกุล

วุฒิ วศ.บ. (โลหการ), วศ.ม. (นิวเคลียร์เทคโนโลยี), D. Eng. (Nuclear Eng.)

ผศ.ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล

วุฒิ วท.บ. (เคมี), วศ.ม. (นิวเคลียร์เทคโนโลยี)

ผศ.สุวิทย์ บุณณชัยยะ

วุฒิ คอ.บ. (ไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์), วศ.ม. (นิวเคลียร์เทคโนโลยี)

ผศ.นเรศร์ จันทน์ขาว

วุฒิ วท.บ. (วิทยาศาสตร์ทั่วไป), วศ.ม. (นิวเคลียร์เทคโนโลยี)

โครงการวิจัยเลขที่ 35G-NC-2532

ทุนส่งเสริมการวิจัยด้วยงบประมาณแผ่นดิน

สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ

ตุลาคม 2536

I 15405833 - 9 พ.ย. 2536

บทคัดย่อ



ผลการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาวัสดุจุดหลอมตัวต่ำสำหรับกำบังรังสีเอกซ์ และรังสีแกมมาพบว่า โลหะผสมเทอนารีระบบบิสมีท-ตะกั่ว-ดีบุก บิสมีท-แคดเมียม-ตะกั่ว และบิสมีท-แคดเมียม-ดีบุก เหมาะกับการหล่อโลหะในช่วงอุณหภูมิ 120-175 องศาเซลเซียส ในขณะที่โลหะผสมควอเทอนารีระบบ บิสมีท-ตะกั่ว-ดีบุก-แคดเมียม เหมาะกับการหล่อโลหะในช่วงอุณหภูมิ 95-120 องศาเซลเซียส โครงสร้างของโลหะผสมเทอนารีพบว่ามีเนื้อแน่น สามารถประเมินความหนาแน่นจากการคำนวณ ในขณะที่โลหะผสมควอเทอนารีจะมีเฟสของสารประกอบระหว่างโลหะซึ่งมีความหนาแน่นต่ำปรากฏ ทำให้ไม่สามารถประเมินความหนาแน่นโดยการคำนวณ ความแข็งแรงของโลหะผสมทั้งสองระบบมีค่าประมาณ 2-3 เท่าของโลหะตะกั่ว ทำให้ชิ้นงานหล่อมีความแข็งแรงและรักษารูปร่างได้ดีขึ้นกว่าเดิม แม้จะมีอุณหภูมิจุดหลอมตัวต่ำกว่าโลหะตะกั่วมาก ในการศึกษาคุณสมบัติการกำบังรังสีโดยพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทเชิงเส้น (หรือสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทเชิงมวล) ในช่วงพลังงานที่ใช้ทางการแพทย์ (60-150 keV) พบว่าที่ค่าความหนาแน่นคงที่เมื่อระดับพลังงานคงที่ ธาตุและส่วนผสมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบจะเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทโดยตรง รวมทั้งมีข้อสรุปจากการศึกษาผลการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมในขณะที่กำลังหล่อโลหะ และข้อควรระวังในการหล่อโลหะด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ABSTRACT

Studies on development of low melting point materials for x-ray and gamma ray shielding for medical applications showed that the casting temperature range of 120-175 °C was suitable for Bi-Pb-Sn, Bi-Cd-Pb, and Bi-Cd-Sn ternary alloys while 90-120 °C range was suitable for Bi-Pb-Sn-Cd quaternary alloys. Ternary alloys had sound texture without any presence of low density phase of intermetallic compound as found in quaternary alloys, thus enabled their density estimations by calculation. Both system alloys had 2-3 times hardness values compared to that of lead metal. This indicated the improvement in strength to weight ratio while their casting temperatures were lower. Radiation shielding properties of both system alloys at 60-150 keV energy range were not far different from lead metal. When material or composition was fixed, the attenuation coefficients decreased while the radiation energy increased. In contrast when the radiation energy was fixed, existing elements and their compositions would play important role on the obtaining attenuation coefficients. Oxidation effect on composition change and precautions during casting of alloys were also discussed.



กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสภาวิจัยแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และ
ขอขอบคุณฝ่ายวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อำนวยความสะดวก
สะดวกในเรื่องต่าง ๆ จนสิ้นสุดงานวิจัยนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญ

		หน้า
บทที่ 1	บทนำ	1
บทที่ 2	การศึกษาวิจัยที่ผ่านมา	4
บทที่ 3	วัตถุประสงค์ของการวิจัย	18
บทที่ 4	วัสดุ และการทดลอง	19
บทที่ 5	ผลการทดลองและวิจารณ์	21
บทที่ 6	สรุปผลการวิจัย	35
บรรณานุกรม		37
ภาคผนวก 1	ตารางความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมขององค์ประกอบ และจุดหลอมตัวของธาตุ โลหะผสมต่าง ๆ ที่จุดยูเทคติก และส่วนผสมอื่น ๆ จากข้อมูลอ้างอิงต่าง ๆ	39
ภาคผนวก 2	ข้อมูลของโลหะบิสมีท ตะกั่ว ดีบุก และแคดเมียม	42
ภาคผนวก 3	ข้อมูลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันแพทเทิร์นของโลหะบิสมีท ตะกั่ว ดีบุก แคดเมียม และ PbBi (จาก JCPDS) และข้อมูลจากการทดลอง	58
ภาคผนวก 4	ข้อมูลสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีและการแอทเทนนูเอทริงส์ของโลหะตะกั่วและสารตัวอย่าง (จากข้อมูลอ้างอิงและจากการทดลอง) ที่ระดับพลังงานต่าง ๆ	63
ภาคผนวก 5	ภาพตัวอย่างโครงสร้างของโลหะผสมควอเทอนารี	68

เลขหมู่ ๑๗
 ๑๕ 15
เลขทะเบียน ๐๐๗๘๓๘
วัน.เดือน.ปี ๒๕๖๒.๒๖

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ไบนารีเฟสไดอะแกรมของบิสมัท-ตะกั่ว	5
รูปที่ 2.2 ไบนารีเฟสไดอะแกรมของตะกั่ว-ดีบุก	6
รูปที่ 2.3 ไบนารีเฟสไดอะแกรมของตะกั่ว-แคดเมียม	6
รูปที่ 2.4 ไบนารีเฟสไดอะแกรมของบิสมัท-แคดเมียม	6
รูปที่ 2.5 ไบนารีเฟสไดอะแกรมของบิสมัท-ดีบุก	7
รูปที่ 2.6 ไบนารีเฟสไดอะแกรมของดีบุก-แคดเมียม	7
รูปที่ 2.7 เทอนารีเฟสไดอะแกรมของบิสมัท-ตะกั่ว-ดีบุก	9
รูปที่ 2.8 เทอนารีเฟสไดอะแกรมของบิสมัท-ตะกั่ว-แคดเมียม	9
รูปที่ 2.9 เทอนารีเฟสไดอะแกรมของบิสมัท-ดีบุก-แคดเมียม	9
รูปที่ 2.10 หลักการของระบบ DTA	11
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสไดอะแกรมและลักษณะของ DTA curve ที่ส่วนผสมต่าง ๆ	12
รูปที่ 5.1 การเปรียบเทียบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันแพทเทิร์นระหว่าง ตัวอย่างซึ่งเตรียมที่ส่วนผสม Pb:Bi (50:50 โดยน้ำหนัก) และสารประกอบ PbBi โดย Suryanarayana et al.	22
รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันแพทเทิร์นของโลหะบริสุทธิ์ และโลหะผสมซึ่งเตรียมจากการทดลอง	24
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสี และสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทรังสีเชิงเส้นของโลหะตะกั่ว (ข้อมูลอ้างอิง และจากการทดลอง) ของสารตัวอย่างที่ระดับพลังงานต่าง ๆ	28

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 5.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและส่วนผสมของโลหะผสม เทอนารี และโลหะผสมควอเทอนารี ที่เตรียมขึ้น	27
ตารางที่ 5.2	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การคูดกลืนรังสี และ สัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทรังสีเชิงมวล (ข้อมูลอ้างอิง และจากการทดลอง) ของสารตัวอย่าง ที่ระดับพลังงาน ต่าง ๆ	30

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รายงานฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาวัสดุจุดหลอมตัวต่ำสำหรับกำบังรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา

บทที่ 1

บทนำ

วัสดุกำบังรังสี (shielding materials) หมายถึงวัสดุใด ๆ ซึ่งอาจเป็นธาตุ สารประกอบหรือสารผสม ซึ่งสามารถลดความเข้มและพลังงาน (แอทเทนนูเอท, attenuate) ของรังสีที่ผ่านวัสดุนั้น ๆ ได้ จากการที่รังสีมีหลายชนิด วัสดุกำบังรังสีที่ใช้จึงแตกต่างกันตามหลักการแอทเทนนูเอท เช่น การใช้วัสดุที่มีความหนาแน่นสูงกำบังรังสีเบตา แกมมา และรังสีเอกซ์ และใช้วัสดุที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลักในการกำบังรังสีนิวตรอน เป็นต้น ในปัจจุบันมีการใช้รังสีเอกซ์ และรังสีแกมมาอย่างแพร่หลาย ทั้งในการศึกษา วิจัย รังสีบำบัดทางการแพทย์ และอุตสาหกรรมต่าง ๆ คณะผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาวัสดุกำบังรังสีที่ใช้ประโยชน์ทางการแพทย์เพื่อป้องกันอวัยวะปกติของผู้รับการบำบัดทางรังสีในบริเวณที่ไม่ต้องการให้โดนรังสีเพื่อความปลอดภัยในขณะที่กำลังรับการบำบัดด้วยรังสี

ตะกั่วเป็นโลหะชนิดหนึ่ง มีความหนาแน่นสูง (11.34 กรัม/ซม^3) มีจุดหลอมตัวที่อุณหภูมิ 327 องศาเซลเซียส (โดยประมาณ) และมีหมายเลขอะตอมเท่ากับ 82 โลหะตะกั่วบริสุทธิ์เป็นวัสดุกำบังรังสี (radiation shielding) ที่นิยมใช้งานกันอยู่ทั่วไปในปัจจุบันเนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทรังสีสูง สามารถกำบังรังสีเบตา รังสีเอกซ์และรังสีแกมมาได้ดี ขึ้นรูปง่าย หาซื้อได้ง่ายในประเทศ และราคาไม่แพง ข้อเสียของโลหะตะกั่วคือมีค่าอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อน้ำหนักต่ำ (low strength to weight ratio) ทำให้รักษารูปร่างที่ต้องการได้ยากเมื่อใช้งานในรูปแบบแบนหรือมีลักษณะบอบบาง รูปร่างของโลหะตะกั่วที่ใช้กำบังรังสีโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นก้อน (block) จากการหล่อโลหะและเป็นแผ่น (sheet) จากการรีดโลหะ

แม้ว่าอุณหภูมิจุดหลอมตัวของโลหะตะกั่วจะไม่สูงมาก แต่การขึ้นรูปโดยการหล่อโลหะ (ใช้อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมตัวประมาณ 50-75 องศาเซลเซียส) โดยผู้ใช้งานเองจะทำได้ยากเนื่องจากวัสดุที่เป็นแบบพิมพ์ (mold) จะต้องแข็งแรงและทนความร้อนได้สูงกว่า 400 องศาเซลเซียส รวมทั้งจะต้องจัดหาอุปกรณ์หลอมโลหะที่เหมาะสมและตกแต่งชิ้นงานหล่อให้ใช้งานได้ตามต้องการ ดังนั้นการขึ้นรูปโลหะตะกั่วเพื่อใช้ในการทำขั้วรังสีโดยทั่วไป (เป็นก้อน แผ่นแบน หรือทรงกระบอก) จึงนิยมว่าจ้างโรงงานหล่อโลหะหล่อชิ้นงานดังกล่าว ข้อดีของการขึ้นรูปชิ้นงานโดยวิธีหล่อโลหะคือ สามารถออกแบบให้ชิ้นงานที่ได้จากการหลอมมีรูปร่างและลักษณะใกล้เคียงกับต้องการได้โดยตรง หลังจากตกแต่งชิ้นงานจากการหล่อโลหะอีกเพียงเล็กน้อยจะได้ชิ้นงานสำเร็จรูปตามต้องการ ในขณะที่การขึ้นรูปโดยการรีดจะเหมาะกับงานที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อน เช่น ท่อนกลม ท่อนเหลี่ยม (ตัน/กลวง) แผ่นแบน และรูปมุมฉาก เป็นต้น เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนจะนานกว่าวิธีการขึ้นรูปโดยวิธีหล่อโลหะมาก

จากเหตุผลข้างต้นจะเห็นได้ว่าอุปสรรคในการขึ้นรูปวัสดุทำขั้วรังสีโดยวิธีหล่อโลหะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิจุดหลอมตัวของโลหะที่ใช้ ดังนั้นการลดอุณหภูมิจุดหลอมตัวของโลหะตะกั่วโดยใช้โลหะอื่นผสมเพื่อให้ได้โลหะผสมของตะกั่ว (Lead alloys) หรือการใช้โลหะผสมอื่น ๆ ซึ่งมีอุณหภูมิจุดหลอมตัวลดลง โดยยอมสูญเสียคุณสมบัติในการทำขั้วรังสีบางส่วนเมื่อเทียบกับตะกั่ว จะช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถขึ้นรูปหรือหล่อชิ้นงานที่มีรูปร่างตามต้องการได้เองโดยไม่มีข้อจำกัดในเรื่องขนาด และปริมาณงาน เนื่องจากการหล่อโลหะทำได้ง่ายขึ้น วัสดุทำแบบพิมพ์ได้ง่าย ไม่จำเป็นต้องจัดหาอุปกรณ์ในการหลอมโลหะ (เตาหลอมโลหะ) ไม่ต้องมีประสบการณ์สูง และช่วยลดอันตรายที่อาจเกิดขึ้นในขณะปฏิบัติงานด้วย

ในการศึกษาการลดอุณหภูมิจุดหลอมตัวของโลหะผสมของตะกั่ว หรือโลหะผสมอื่น ๆ นั้นอาศัยหลักการที่ว่าคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของโลหะบริสุทธิ์จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีธาตุอื่นเข้ามาผสม เช่น โดยทั่วไปอุณหภูมิจุดหลอมตัวของโลหะบริสุทธิ์จะลดลงเมื่อปริมาณของธาตุผสมเพิ่มขึ้น ดังนั้นตัวแปรหลักที่เราจะใช้ในการพิจารณาเลือกจุดหลอมตัวของโลหะผสมระบบหนึ่ง ๆ คืออุณหภูมิยูเทคติก และ

ส่วนผสมยูเทคติก (eutectic temperature and composition)

"ยูเทคติก" เป็นศัพท์เทคนิคที่หมายถึงปฏิกิริยาซึ่งเกิดที่อุณหภูมิคงที่ในขณะที่กำลังเย็นตัวหรือมีอุณหภูมิลดลง โดยสารละลายในสภาวะของเหลวจะเปลี่ยนเป็นเฟสของแข็งสองชนิดหรือมากกว่าปนกัน ปฏิกิริยานี้จะสามารถเกิดย้อนกลับทางได้ และจำนวนเฟสของแข็ง (solid phase) ที่เกิดขึ้นจะเท่ากับจำนวนขององค์ประกอบในระบบนั้น ๆ

การพิจารณาเลือกโลหะผสมต่าง ๆ ซึ่งมีจุดหลอมตัวต่ำกว่าโลหะตะกั่วเพื่อใช้งานจะเน้นที่โลหะผสมเทอนารี และโลหะผสมควอเทอนารี ซึ่งเป็นโลหะผสมของโลหะสามชนิด และสี่ชนิดตามลำดับ โดยโลหะผสมที่พิจารณานี้จะต้องมีอุณหภูมียูเทคติกต่ำกว่าจุดหลอมตัวของตะกั่ว และในขณะเดียวกันความหนาแน่นของโลหะผสมจะต้องไม่แตกต่างจากโลหะตะกั่วมากเกินไป ทั้งนี้เพื่อคงคุณสมบัติในการกำบังรังสีให้ใกล้เคียงกับโลหะตะกั่วที่ใช้เป็นมาตรฐาน

การศึกษาข้อมูลของโลหะผสมเหล่านี้เพื่อใช้ในงานกำบังรังสี นอกจากจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและการแพทย์โดยตรงแล้ว ยังสามารถนำไปดัดแปลงใช้ประโยชน์กับอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ รวมทั้งช่วยพัฒนาอุตสาหกรรมโลหะภายในประเทศให้ก้าวหน้ายิ่งขึ้นเนื่องจากโลหะหลายชนิดที่ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุกำบังรังสีดังกล่าวมีการผลิตอยู่แล้วในอุตสาหกรรมโลหะภายในประเทศเช่น โลหะตะกั่ว ดีบุก และแคดเมียม เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การศึกษาวิจัยที่ผ่านมา

จากหลักการที่กล่าวข้างต้นที่ว่า อุณหภูมิจุดหลอมตัวของโลหะบริสุทธิ์จะลดลงเมื่อปริมาณของธาตุผสมเพิ่มขึ้น และเมื่อศึกษาเฟสไดอะแกรมของโลหะผสมใด ๆ จะพบว่าอุณหภูมิจุดหลอมตัวที่ส่วนผสมยูเทคติกมีโอกาที่จะมีค่าต่ำที่สุดหรือเป็นอุณหภูมิต่ำที่สุดภายในระบบที่กำลังศึกษานั้น ๆ เราจะนำหลักการและข้อสังเกตข้างต้นมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับโลหะผสมจุดหลอมตัวต่ำ โดยเริ่มต้นพิจารณาจากกลุ่มโลหะที่เราศึกษาอยู่ว่า อุณหภูมิยูเทคติกของโลหะผสมระบบใด (ซึ่งมีโลหะในกลุ่มข้างต้นผสมอยู่) มีจุดหลอมตัวต่ำกว่าจุดหลอมตัวของโลหะบริสุทธิ์มาก หรืออยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เราสนใจ เราจะเก็บข้อมูลของโลหะผสมระบบนั้นไว้พิจารณา การศึกษาจะเริ่มตั้งแต่ระบบไบนารี (โลหะ 2 ชนิด) ระบบเทอร์นารี (โลหะ 3 ชนิด) ไปจนถึงระบบควอเทอร์นารี (โลหะ 4 ชนิด) ตามลำดับ ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้ จะช่วยให้เราทราบว่า เมื่อต้องการให้จุดหลอมตัวของโลหะผสมอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ต้องการ จะต้องใช้โลหะผสมระบบใด และจะต้องควบคุมส่วนผสมให้อยู่ในช่วงใด จึงจะให้ผล (ช่วงอุณหภูมิลอมตัว) ได้ตามความต้องการ ส่วนคุณสมบัติอื่น ๆ นั้น จำเป็นต้องศึกษาโดยตรงจากตัวอย่างที่เตรียมขึ้นในเวลาต่อมา

2.1 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสม

จากการศึกษาเป็นขั้นตอนตามลำดับดังกล่าวข้างต้นกับโลหะ 4 ชนิดคือ บิสมัท ตะกั่ว ดีบุก และ แคดเมียม ซึ่งเป็นขอบเขตของการวิจัย สามารถสรุปข้อมูลเบื้องต้นสำหรับโลหะผสมในแต่ละระบบ คือ ไบนารี เทอร์นารี ควอเทอร์นารี ฯลฯ ดังนี้

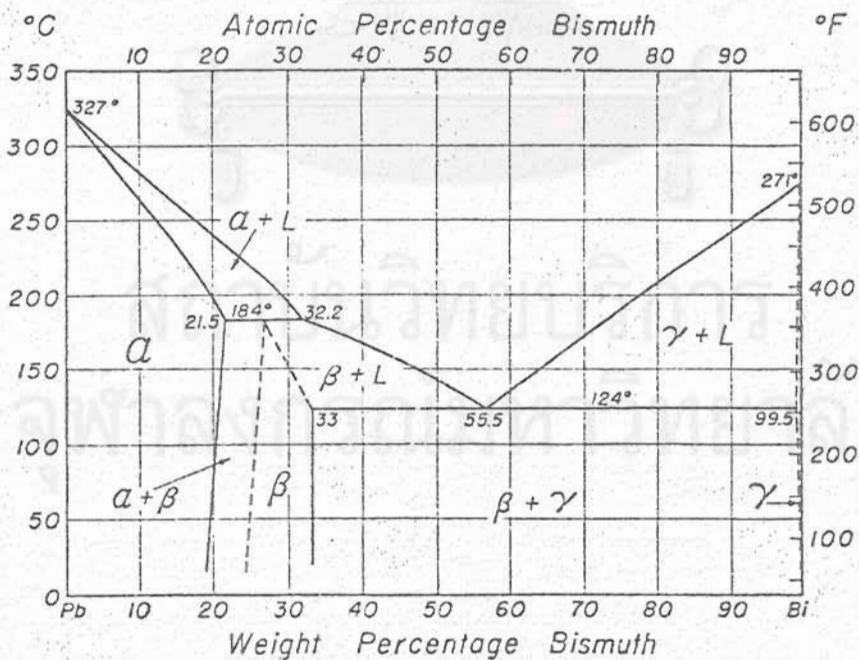
2.1.1 ระบบโลหะผสมไบนารี (โลหะสองชนิด)

จากการศึกษาไบนารีเฟสไดอะแกรมของโลหะ 4 ชนิดคือบิสมัท (Bi) ตะกั่ว (Pb) ดีบุก (Sn) และแคดเมียม (Cd) พบว่าโลหะแต่ละระบบจะมีอุณหภูมิ

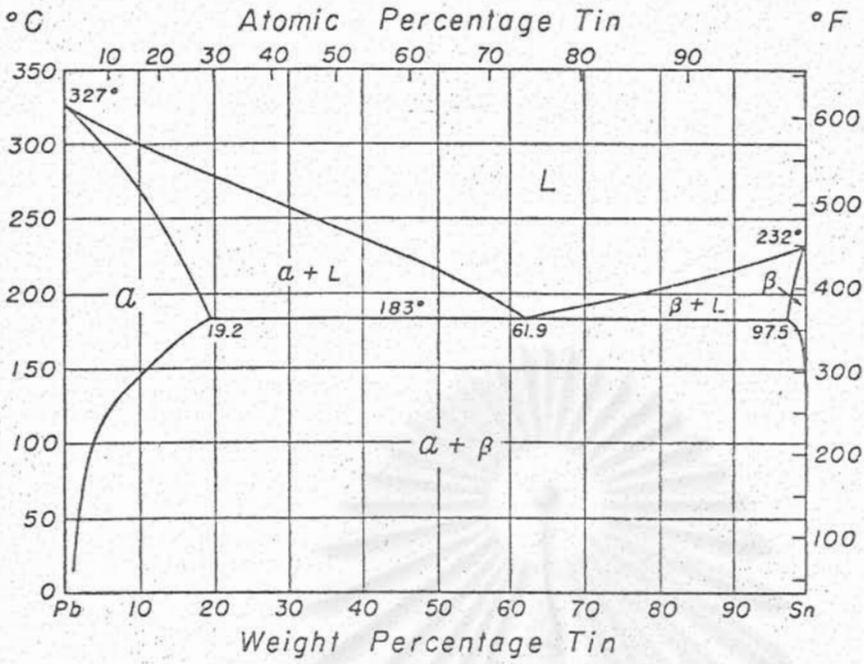
ยูเทคติกและส่วนผสมยูเทคติกซึ่งมีจุดหลอมตัวต่ำสุดดังแสดงในตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.1 ถึง 2.6 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดของไบนารีเฟสไดอะแกรมของโลหะที่พิจารณา 4 ชนิด ซึ่งจะให้จุดหลอมตัวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมตัวของตะกั่ว

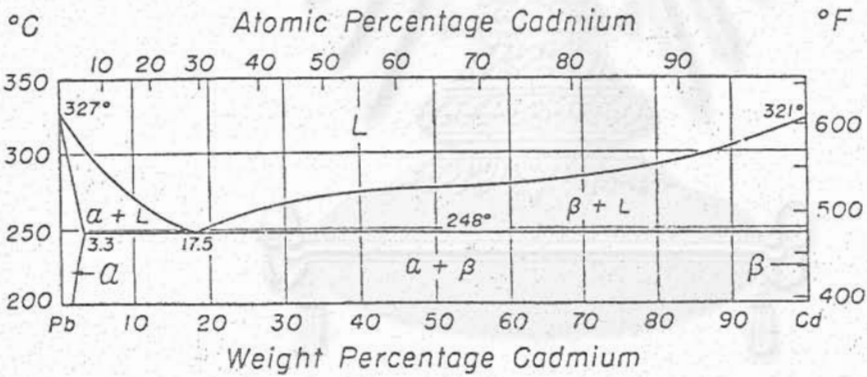
โลหะผสม	จุดหลอมตัว ($^{\circ}\text{C}$)	ส่วนผสมยูเทคติกที่จุดหลอมตัวต่ำสุด (%wt)
Pb-Bi	124	55.5 %Bi
Pb-Sn	183	61.9 %Sn
Pb-Cd	248	17.5 %Cd
Bi-Cd	144	40 %Cd
Sn-Bi	139	57 %Bi
Sn-Cd	176	32.3 %Cd



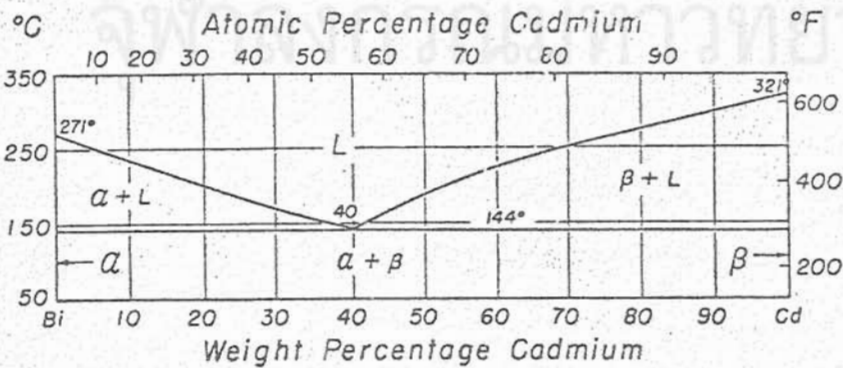
รูปที่ 2.1 ไบนารีเฟสไดอะแกรมของตะกั่ว-บิสมัท



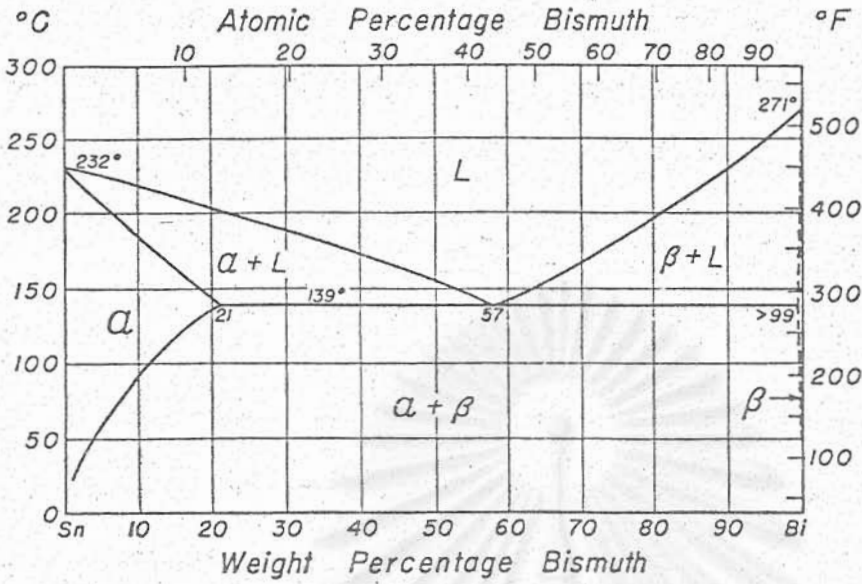
รูปที่ 2.2 ไบนารีเฟสไดอะแกรมของตะกั่ว-ดีบุก



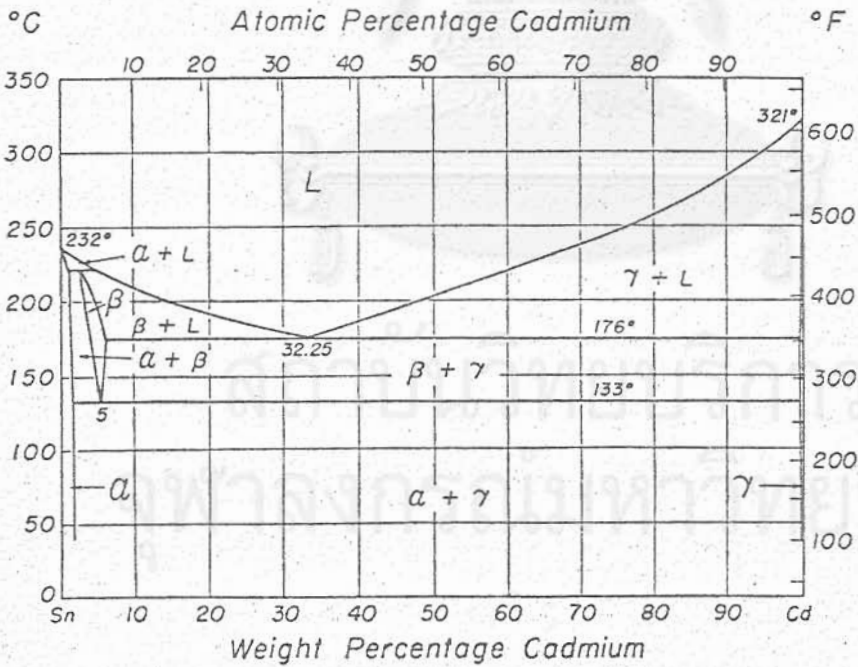
รูปที่ 2.3 ไบนารีเฟสไดอะแกรมของตะกั่ว-แคดเมียม



รูปที่ 2.4 ไบนารีเฟสไดอะแกรมของบิสมัท-แคดเมียม



รูปที่ 2.5 ไบนารีเฟสไดอะแกรมของดีบุก-บิสมัท



รูปที่ 2.6 ไบนารีเฟสไดอะแกรมของดีบุก-แคดเมียม

จากรูปที่ 2.1 ถึง 2.6 เราพบว่าโลหะผสมทั้ง 6 ระบบจะมีปฏิกริยา
ยูเทคติกปรากฏอยู่ทุกระบบ โดยอุณหภูมิยูเทคติกของระบบ Bi-Pb จะมีอุณหภูมิจุด
หลอมตัวต่ำที่สุดที่ 124 องศาเซลเซียส และการควบคุมให้ส่วนผสมมีค่าใกล้เคียง
กับส่วนผสมยูเทคติกมากที่สุดจะช่วยลดปัญหาการเปลี่ยนแปลงของจุดหลอมตัวในขณะที่
หล่อโลหะได้โดยตรง

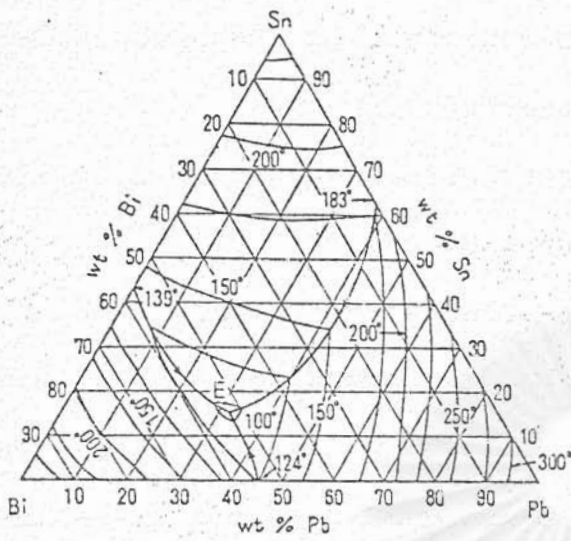
2.1.2 ระบบโลหะผสมเทอนารี (โลหะสามชนิด)

จากการศึกษาโลหะผสมเทอนารีระหว่างโลหะ 4 ชนิดคือ บิสมัท ตะกั่ว
ดีบุก และ แคดเมียม พบว่าข้อมูลของโลหะผสมเทอนารีส่วนใหญ่ที่พบจะเป็นระบบของ
Bi:Pb:Sn Bi:Sn:Cd และ Bi:Pb:Cd ส่วนระบบ Pb:Sn:Cd นั้นมีข้อมูลน้อย
มาก ข้อมูลของแต่ละระบบสรุปโดยย่อได้ดังนี้

ก. โลหะผสมเทอนารีของ Bi:Pb:Sn มีหลายชนิดแตกต่างกันตาม
สิทธิบัตรและส่วนผสม เช่น D'Arcet's alloy, Lichtenberg's alloy,
Homberg's alloy, Malotte's alloy, Rose's alloy, Newton's
fusible alloy, Semalloy 1280, Onion และ Rose เป็นต้น (รายละเอียด
แสดงในภาคผนวกที่ 1 และ 2) อุณหภูมิจุดหลอมตัวของโลหะผสมเหล่านี้มี
ค่าไม่แน่นอน ตั้งแต่อุณหภูมิต่ำสุด 92 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิเป็นช่วง
(96-100 องศาเซลเซียส) และมีรายงานเกี่ยวกับจุดเทอนารียูเทคติกของระบบนี้
ที่ส่วนผสม Bi:Pb:Sn เท่ากับ 52:32:16 (96 องศาเซลเซียส) ซึ่งต่างจากราย
งานที่ส่วนผสม 52.6:31.8:15.8 (99.5 องศาเซลเซียส ดังรูป 2.7) ว่าเป็น
อุณหภูมิต่ำสุดของระบบนี้

ข. โลหะผสมเทอนารีของ Bi:Pb:Cd มีรายงานของส่วนผสมเทอ
นารียูเทคติกที่ส่วนผสม 52:40:8 (92 องศาเซลเซียส) และที่ส่วนผสม 51.65:
40.2:8.15 (93.3 องศาเซลเซียส ดังรูป 2.8) ว่าเป็นจุดที่ให้อุณหภูมิต่ำสุดของ
ระบบนี้ ในขณะที่มีรายงานว่าที่ส่วนผสม 51.6:40.2:8.1 มีอุณหภูมิจุดหลอมตัวที่
91.5 องศาเซลเซียส

ค. โลหะผสมเทอนารีของ Bi:Sn:Cd มีรายงานของจุดยูเทคติก
ที่ส่วนผสม 54:26:20 ซึ่งให้จุดหลอมตัวต่ำสุดของระบบนี้ที่ 102 และ 104 องศา

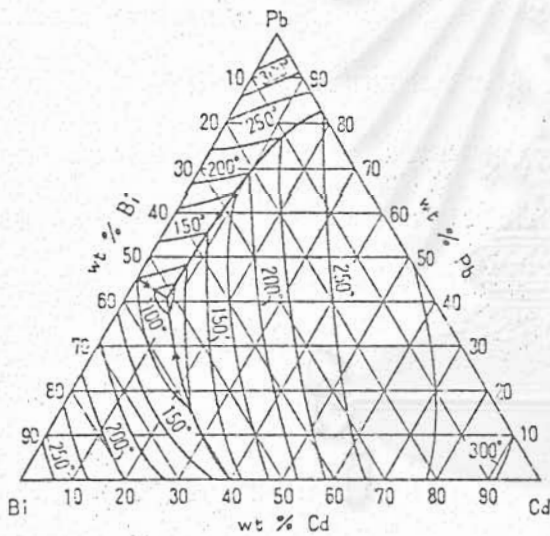


รูปที่ 2.7

เทอนารีเฟสไดอะแกรมของบิสมัท-ตะกั่ว-ดีบุก

Bi-Pb-Sn 二元共晶
曲线を太線で示し、25° ごと
の液相面の等温線を細線で示
した。

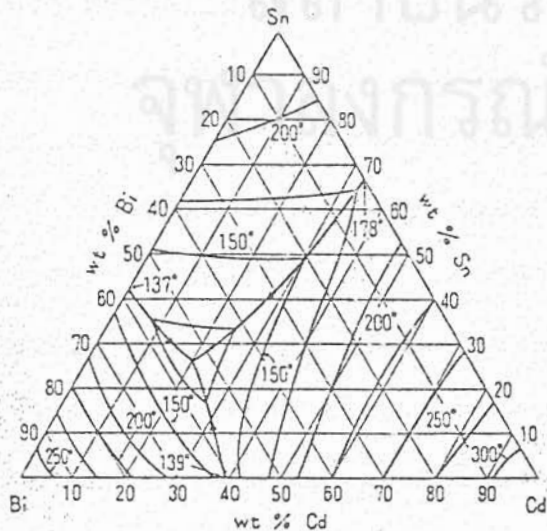
三元共晶点 E は、99.5°、
52.6% Bi, 31.8% Pb, 15.8
% Sn である。



รูปที่ 2.8

เทอนารีเฟสไดอะแกรมของบิสมัท-แคดเมียม-ตะกั่ว

Bi-Cd-Pb 単純な三元共晶系で、三元共晶点: ± 93.3°, 40.2% Pb, 8.13
% Cd, 31.65% Bi である。
図中実線: ± 25° おきの液相面を示し、太線: 二元共晶曲线である。



รูปที่ 2.9

เทอนารีเฟสไดอะแกรมของบิสมัท-แคดเมียม-ดีบุก

Bi-Cd-Sn 単純な三元共晶系で、三元共晶点: ± 104°, 54% Bi, 20% Cd
25%, Sn である。二元共晶曲线を太線で示した。
細線: ± 50° 間隔の液相面の等温線である。

เซลเซียส (ดังรูป 2.9) ข้อมูลดังกล่าวนี้ขัดแย้งกับข้อมูลที่ส่วนผสม 50:25:25 ซึ่งมีจุดหลอมตัวเพียง 95 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าจุดยูเทคติกซึ่งกล่าวข้างต้น)

ง. โลหะผสมเทอนารีของ Pb:Sn:Cd นั้นมีรายงานเพียงจุดเดียวที่ 32:50:18 โดยมีจุดหลอมตัว 145 องศาเซลเซียส

2.1.3 ระบบโลหะผสมควอเทอนารี (โลหะสี่ชนิด)

ข้อมูลของโลหะผสมควอเทอนารีระหว่างโลหะ 4 ชนิด คือ บิสมัท ตะกั่ว ดีบุก และแคดเมียม นั้น มีอยู่หลายส่วนผสมเช่น Ostalloy, Lipowitz alloy, Wood's alloy, Wood's metal, Bendalloy, Cerrobend, Gutherie's alloy, Cerro-safe or Safalloy โดยมีจุดหลอมตัวประมาณ 70 องศาเซลเซียส และมีรายงานว่าที่ส่วนผสมของควอเทอนารียูเทคติก 50:27:13:10 จะมีจุดหลอมตัวที่ 70 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำที่สุดในระบบนี้

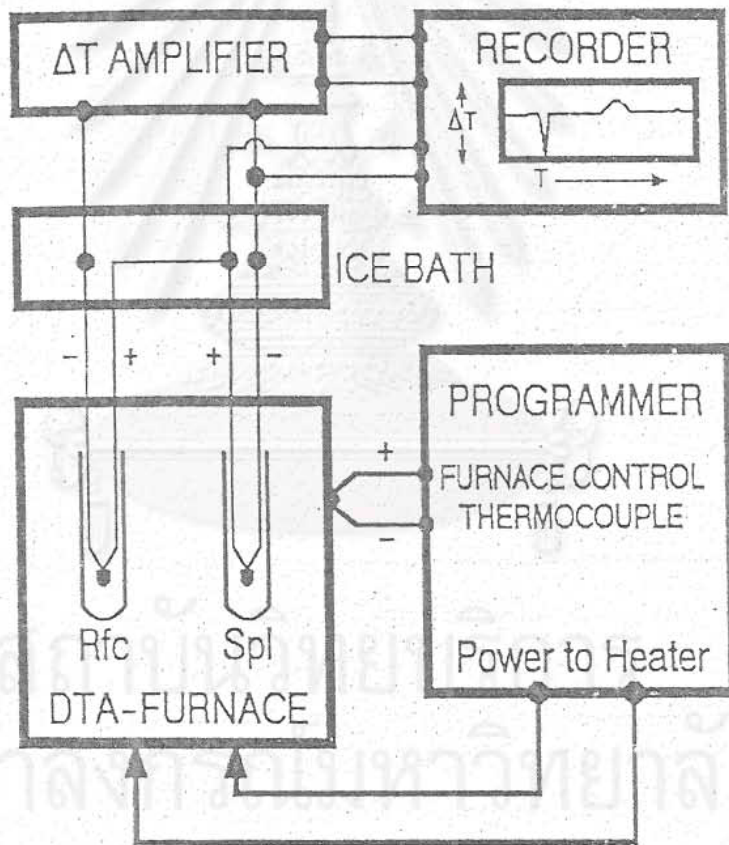
นอกจากนี้ยังมีรายงานของโลหะผสมควอเทอนารีระบบอื่น เช่นระบบของ Bi:Pb:Sn:In จะมีอุณหภูมิหลอมตัว 57 องศาเซลเซียสที่ส่วนผสมยูเทคติก 49.4:18:11.6:21 ซึ่งต่ำกว่าระบบของ Bi:Pb:Sn:Cd มาก แต่เนื่องจากโลหะอินเดียม (In) มีราคาแพง หาได้ยากภายในประเทศ และต้องใช้ในปริมาณสูง จึงไม่เหมาะที่จะศึกษา หรือนำมาใช้ประโยชน์ในปัจจุบัน

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสไดอะแกรม และ DTA curve

DTA (Differential Thermal Analysis) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หรือศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุโดยการประยุกต์เทคนิคของการวัด heating curve หรือ cooling curve ร่วมกับเทคนิคการวัดการเปลี่ยนแปลงความร้อนในเชิงปริมาณ เข้าด้วยกัน

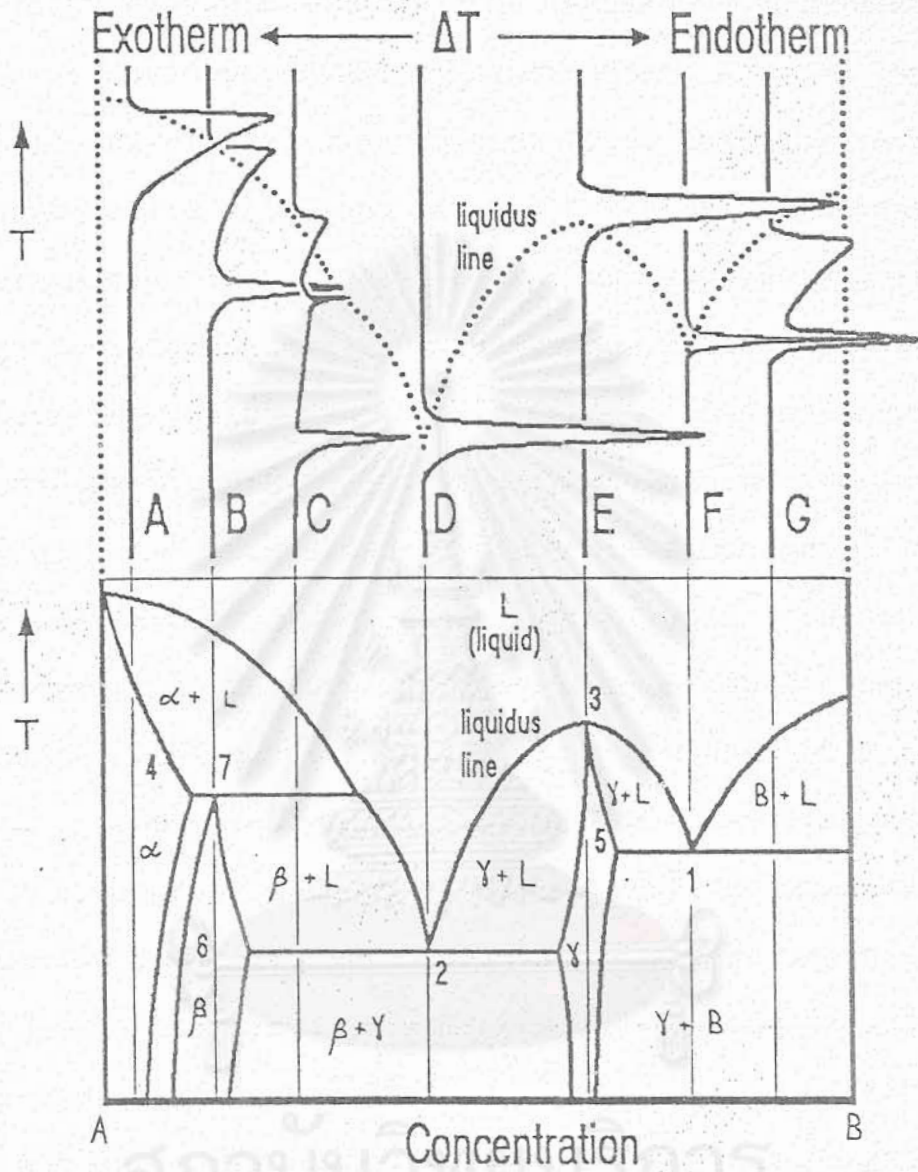
หลักการของ DTA จะอาศัยเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) ในการวัดอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง และนำค่าความแตกต่างที่ตรวจวัดได้นำมาควบคุมและชดเชยปริมาณความร้อนที่เพิ่มขึ้น (หรือลดลง) ให้อยู่ในอัตราคงที่ เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ในการควบคุมจะตรวจวัดอุณหภูมิของเตาเผาเทียบกับอุณหภูมิที่ตั้งโปรแกรมไว้และนำความแตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นมาควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดให้ความร้อน

ในเตาเผาตลอดช่วงเวลาของการทดลอง สารมาตรฐาน (Rfc) และสารตัวอย่าง (Sp1) จะถูกจัดวางภายในเตาเผาให้สมมาตรกันเพื่อให้ความแตกต่างของอุณหภูมิที่วัดได้สัมพันธ์กับ heat flow ภายในเตาเผา ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสารมาตรฐานและสารตัวอย่างซึ่งมีค่าน้อยมาก (เมื่อเทียบกับอุณหภูมิสัมบูรณ์) จะถูกขยายสัญญาณ ก่อนที่จะบันทึกผลในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (T/t) กับอุณหภูมิ (T) ดังรูป 2.10 ซึ่งแสดงถึงระบบของ DTA อย่างง่าย



SCHMATIC OF A
DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS
EXPERIMENT (DTA)

รูปที่ 2.10 หลักการของระบบ DTA



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสไดอะแกรมและลักษณะของ DTA curve ที่ส่วนผสมต่าง ๆ

- รูปส่วนบนเป็น DTA curve ของส่วนผสม A ถึง G ซึ่งเป็นผลจากการทดลอง โดยมีเส้นจุด (dotted line) เป็นเส้นลึควัดส เส้นในแนวตั้งแสดงถึงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปโดยเริ่มจากด้านล่าง (อุณหภูมิต่ำ) จนถึงด้านบน (อุณหภูมิสูง) และมีเส้นในแนวระดับแสดงผลต่างของอุณหภูมิ หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

เมื่อพิจารณา DTA curve จากอุณหภูมิต่ำไปยังอุณหภูมิสูงที่ส่วนผสม G (เช่น เดิม) จะได้ผลการทดลองแสดงเป็นเส้นหนักในภาพบนซึ่งจะพบว่า ตราบเท่าที่อุณหภูมียังต่ำกว่าอุณหภูมิตุเลศติก base line ที่ปรากฏจะราบเป็นเส้นตรง เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุความร้อน (heat capacity) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิตุเลศติก จะเกิดพีคซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic reaction เนื่องจากการหลอมตัว) โดยโครงสร้างยูเลศติกทั้งหมดจะหลอมตัวเป็นของเหลวปนอยู่กับเฟส B ที่เหลืออยู่ จากนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฟส B ที่เหลือจะค่อย ๆ หลอมตัวอย่างต่อเนื่อง (คำนวณได้จาก Lever rule) ก่อให้เกิดเป็นพีคป้าน (broad melting peak) ขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงถึงเส้นลึควัดสการหลอมตัวจะสิ้นสุดลงและ base line ที่ปรากฏจะราบเป็นเส้นตรงอีกครั้งหนึ่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยความชันที่ปรากฏจะขึ้นกับค่าความจุความร้อนจำเพาะของเฟสของเหลวที่ส่วนผสม G นั้น

การหาอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ทำได้โดยต่อเส้นตรงออกจากแนวเส้นทั้งสองด้าน ณ บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนเกิดขึ้น อุณหภูมิที่เส้นตรงทั้งสองตัดกันจะถือเป็นอุณหภูมิที่ต้องการ จาก DTA curve จะหาจุดบนเส้นลึควัดสได้เสมอจากด้านปลายของพีคป้านพีคสุดท้าย และจะบ่งชี้อุณหภูมิตุเลศติกได้จากพีคแหลม (sharp melting peak) พีคแรกสุด

ที่ส่วนผสม F จะปรากฏ melting peak ที่แหลมเพียงพีคเดียว ซึ่งเป็นลักษณะของการหลอมตัวที่ส่วนผสมยูเลศติก ที่อุณหภูมิตุเลศติกเฟสแกมมาและเฟส B จะละลายเข้าด้วยกันอย่างสมบูรณ์

ที่ส่วนผสม E จะเป็นกรณีของการหลอมตัวแบบ congruent [การหลอมตัวที่อุณหภูมิกงที่ ซึ่งทั้งเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจะมีส่วนผสมเหมือนกันตลอดช่วงการเปลี่ยนแปลง] โดยที่ DTA curve จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงจนถึง



จุดหลอมเหลวของสารประกอบนั้น และเกิดการหลอมเหลวทันที

ที่ส่วนผสม D จะพบ melting peak ที่แหลมเพียงพีกเดียว ซึ่งสมนัยกับส่วนผสมยูเทคติกดังปรากฏในเฟสไดอะแกรม ทั้งเฟสเบต้าและเฟสแกมมาจะละลายเข้าด้วยกันอย่างสมบูรณ์ จากการพิจารณา DTA curve ที่ส่วนผสม D และ E เปรียบเทียบกันจะพบว่า DTA curve เพียงอย่างเดียวจะไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าสารที่กำลังศึกษาอยู่นั้นเป็นสารประกอบบริสุทธิ์หรือเป็นส่วนผสมยูเทคติกแน่ วิธีแก้ไขจะทำได้โดยวิเคราะห์สเปกตรัม DTA ที่ส่วนผสมใกล้เคียงส่วนผสมนั้น ๆ ทั้งสองด้าน เพื่อดูลักษณะของเฟสไดอะแกรมที่เป็นจริง

ที่ส่วนผสม C เป็นกรณีของ DTA curve ที่ผ่านทั้งปฏิกิริยายูเทคติกและปฏิกิริยาเพอริเทคติก ขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นผ่านอุณหภูมิยูเทคติก ส่วนผสมยูเทคติกจะหลอมตัวทำให้เกิดพีกยอดแหลมขึ้น และเกิดพีกยอดแหลมอีกครั้งเมื่อผ่านอุณหภูมิเพอริเทคติก จากนั้นจึงเกิดพีกบ้นเนื่องจากการละลายของเฟสแอลฟาเกิดขึ้นจนกระทั่งถึงเส้นลิวิดัส (หรืออีกนัยหนึ่งเส้นจุดซึ่งแสดงถึงจุดสุดท้ายของการละลายที่ส่วนผสมต่าง ๆ ของระบบนั้น ๆ ก็คือจุดบนเส้นลิวิดัสนั่นเอง)

ที่ส่วนผสม B จะแสดง DTA curve ของส่วนผสมเพอริเทคติก และ

ที่ส่วนผสม A จะแสดง DTA curve ของสารละลายในสภาพของแข็ง

ซึ่งมีพีกบ้นปรากฏเพียงพีกเดียว โดยอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการหลอมตัวจะเป็นจุดตัดบนเส้นโซลิดัส ("solidus line" เป็นขอบเขตสุดท้ายที่เฟสของเหลวปรากฏอยู่ได้จะไม่ปรากฏเฟสของเหลวที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้) และอุณหภูมิที่สิ้นสุดการหลอมตัวจะเป็นจุดตัดบนเส้นลิวิดัสเช่นเดิม

จากการวิเคราะห์ DTA curve ที่ส่วนผสมดังกล่าวข้างต้นร่วมกับผลวิเคราะห์จากส่วนผสมอื่น ๆ เพิ่มเติม จะช่วยให้สามารถสร้างเฟสไดอะแกรมของระบบที่กำลังศึกษาได้เช่นกันโดยอาศัยความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้น

3. คุณสมบัติการกำบังรังสี

เมื่อรังสีเอกซ์ หรือรังสีแกมมาวิ่งผ่านวัสดุใดก็ตาม จะมีอันตรกิริยาเกิดขึ้น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีนั้น ๆ อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นจะมีอยู่ 3 แบบคือ

3.1 โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์

โฟตอนของรังสีจะชนและถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม ทำให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกจากวงโคจร และมีพลังงานจลน์เท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของโฟตอน และแรงยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนนั้นในอะตอม อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน ในกระบวนการนี้รังสีแกมมาจะหายไป และจะเกิดได้ดีในรังสีแกมมาที่มีช่วงพลังงานค่อนข้างต่ำ

3.2 คอมพ์ตันเอฟเฟกต์

โฟตอนพลังงาน (E) จะชนกับอิเล็กตรอนแบบอินอีลาสติก โดยประพัตติตัวเหมือนอนุภาคอย่างหนึ่ง แล้วโฟตอนนี้จะเบี่ยงเบนไปเป็นมุม θ_p ในขณะที่อิเล็กตรอนในวงโคจรหลุดออกไปทำมุม θ_e กับแนวทิศทางเดิมของโฟตอน จากสูตรของไอส์ไตน์ $E = mc^2$ จะทำให้เราทราบถึงมวลซึ่งโฟตอนทำหน้าที่คล้ายเป็นมวลสารในการชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจร และจากการใช้กฎการอนุรักษ์มวล และพลังงาน จะทำให้เราสามารถทำนายถึงทิศทางของโฟตอน และอิเล็กตรอนที่เบี่ยงเบนไปได้ การเกิดอันตรกิริยาแบบนี้อาจเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า การกระเจิงแบบคอมพ์ตัน โดยที่โฟตอนจะถ่ายเทพลังงานเพียงบางส่วนให้กับอิเล็กตรอนในวงโคจร และจะเกิดได้ดีในรังสีแกมมาช่วงพลังงานปานกลาง

3.3 การเกิดอิเล็กตรอนคู่ หรือแฟร์โพรดักชัน

ในกระบวนการนี้โฟตอนที่มีพลังงานสูงจะหายไปเมื่อวิ่งเข้าไปใกล้นิวเคลียสของอะตอม กลายเป็นอิเล็กตรอน และโพสิตรอนวิ่งหลุดออกไปจากอะตอม ในกรณีนี้รังสีแกมมาที่หายไปจะต้องมีพลังงานสูงกว่า 1.02 MeV ขึ้นไป (พลังงาน 1.02 MeV นี้จะสมนัยกับมวลของอิเล็กตรอน และโพสิตรอนรวมกัน) จึงจะเกิดกระบวนการนี้ได้และโอกาสที่จะเกิดกระบวนการนี้ในอะตอมของธาตุหนักจะมีสูงกว่าในอะตอมของธาตุเบา

เมื่อรังสีแกมมาที่มีความเข้ม I_0 วิ่งทะลุผ่านวัสดุที่มีความหนา x รังสีที่ทะลุผ่านออกมา I จะสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

โดยที่ μ คือค่า สัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทเชิงเส้น ของวัสดุนั้น ๆ

สมการนี้จะใช้ได้ดีในกรณีที่วัสดุที่รังสีทะลุผ่านเป็นวัสดุบาง รังสีที่พิจารณามีพลังงาน
 เค็ว และถูกบีบอัดรังสีให้ขนานกัน การประยุกต์ใช้สมการนี้จะช่วยให้เราสามารถ
 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานของรังสีที่ระดับพลังงานต่าง ๆ ได้



สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาเฉพาะวัสดุกำบังรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา
2. ศึกษาหาส่วนผสม และความหนาแน่นของวัสดุจุลหอยท่ดำ เมื่อกำหนดช่วงอุณหภูมิของการขึ้นรูป
3. ศึกษาช่วงอุณหภูมิของการขึ้นรูป เมื่อกำหนดส่วนผสม และความหนาแน่นของวัสดุหอยท่ดำ
4. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทของรังสีเอกซ์ และรังสีแกมมาที่ระดับพลังงานต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

วัสดุและการทดลอง

4.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. โลหะบิสมีท ตะกั่ว ดีบุก และแคดเมียม (เกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรมโลหะ)
2. เครื่องชั่งน้ำหนักสำหรับเตรียมตัวอย่าง
3. เครื่องแก้วและอุปกรณ์เป่าแก้วสำหรับเตรียมโลหะผสมต่าง ๆ
4. เครื่องอัดไฮดรอลิก
5. Differential Thermal Analyzer (DTA) ซึ่งเป็นอุปกรณ์วิเคราะห์สำหรับศึกษาอุณหภูมิจุดหลอมตัวของตัวอย่างโลหะผสมที่เตรียมขึ้น
6. Vicker Hardness Tester สำหรับวัดความแข็งของโลหะผสมที่เตรียมขึ้นเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ
7. หัววัดรังสีชนิดไฮเพอร์เพียวเจอมาเนียม อุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง และต้นกำเนิดรังสีเอกซ์พลังงานต่าง ๆ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทริงส์ที่ระดับพลังงานต่าง ๆ ของวัสดุจุดหลอมตัวต่ำที่เตรียมขึ้น

4.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนักของโลหะแต่ละชนิดในอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ที่ต้องการ
2. บรรจุสารตัวอย่าง (ในข้อ 1) ลงในหลอดแก้ว แล้วผนึก (seal) หลังจากที่ควบคุมให้สภาพภายในหลอดแก้วเป็นสุญญากาศ หรือบรรจุด้วยก๊าซอาร์กอน
3. หลอมสารตัวอย่างภายในหลอดแก้ว เข้าให้เนื้อโลหะผสมกันอย่างสม่ำเสมอจนเป็นเนื้อเดียว ปลอบให้โลหะผสมเป็นตัวอย่างช้า ๆ

- (1 ตัวอย่าง) เพื่อใช้ศึกษาโครงสร้าง และทำให้เป็นตัวอย่างรวดเร็ว (อีก 1 ตัวอย่าง) เพื่อใช้เตรียมตัวอย่างสำหรับเครื่อง DTA
4. นำตัวอย่างที่ปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ ออกจากหลอดแก้ว เพื่อนำไปเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาโครงสร้างในสภาวะสมดุล วัดความแข็งและทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอท
 5. นำตัวอย่างที่ปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วออกจากหลอดแก้ว อัดเป็นแผ่นบางด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก เพื่อให้มีเนื้อสม่ำเสมอยิ่งขึ้น ก่อนที่จะเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DTA
 6. นำตัวอย่างโลหะผสมที่เตรียมขึ้นไปหลอมซ้ำที่สภาพแวดล้อมแตกต่างกันเพื่อศึกษาผลของสภาพแวดล้อม หรือตัวกลางซึ่งมีผลต่อการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสม

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิจารณ์

5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างจุดหลอมตัว ส่วนผสมขององค์ประกอบ และ โครงสร้าง

จากการใช้เทคนิค DTA เพื่อศึกษาจุดหลอมตัวของโลหะผสมต่าง ๆ ที่เตรียมขึ้น และใช้กล้องจุลทรรศน์เพื่อศึกษาโครงสร้างของโลหะผสมเหล่านี้ พบว่า

5.1.1 ระบบไบนารี

โลหะผสมไบนารีของบิลมัท-ดีบุก บิลมัท-แคดเมียม ตะกั่ว-ดีบุก และตะกั่ว-แคดเมียม ทั้งสี่ระบบนี้พบว่าในแต่ละระบบมีปฏิริยายูเทคติกปรากฏเพียงจุดเดียว (แตกต่างกันเพียง ระบบของบิลมัท-แคดเมียมจะให้โครงสร้างของโลหะบิลมัทบริสุทธิ์ และแคดเมียมบริสุทธิ์ปนกัน ในขณะที่อีก 3 ระบบที่เหลือจะให้โครงสร้างของสารละลายในสภาพของแข็งของโลหะแต่ละชนิดปนกัน) สำหรับระบบของดีบุก-แคดเมียมนั้นแม้ว่าจะมีปฏิริยาเพอริเทคติก ยูเทคติก และยูเทคตอยด์เกิดขึ้นก็ตาม เฟสที่ปรากฏที่อุณหภูมิต่ำกว่า 133 องศาเซลเซียส (ในสภาพสมดุล) จะมีเพียงสารละลายในสภาพของแข็งของโลหะดีบุก และโลหะแคดเมียมเท่านั้น

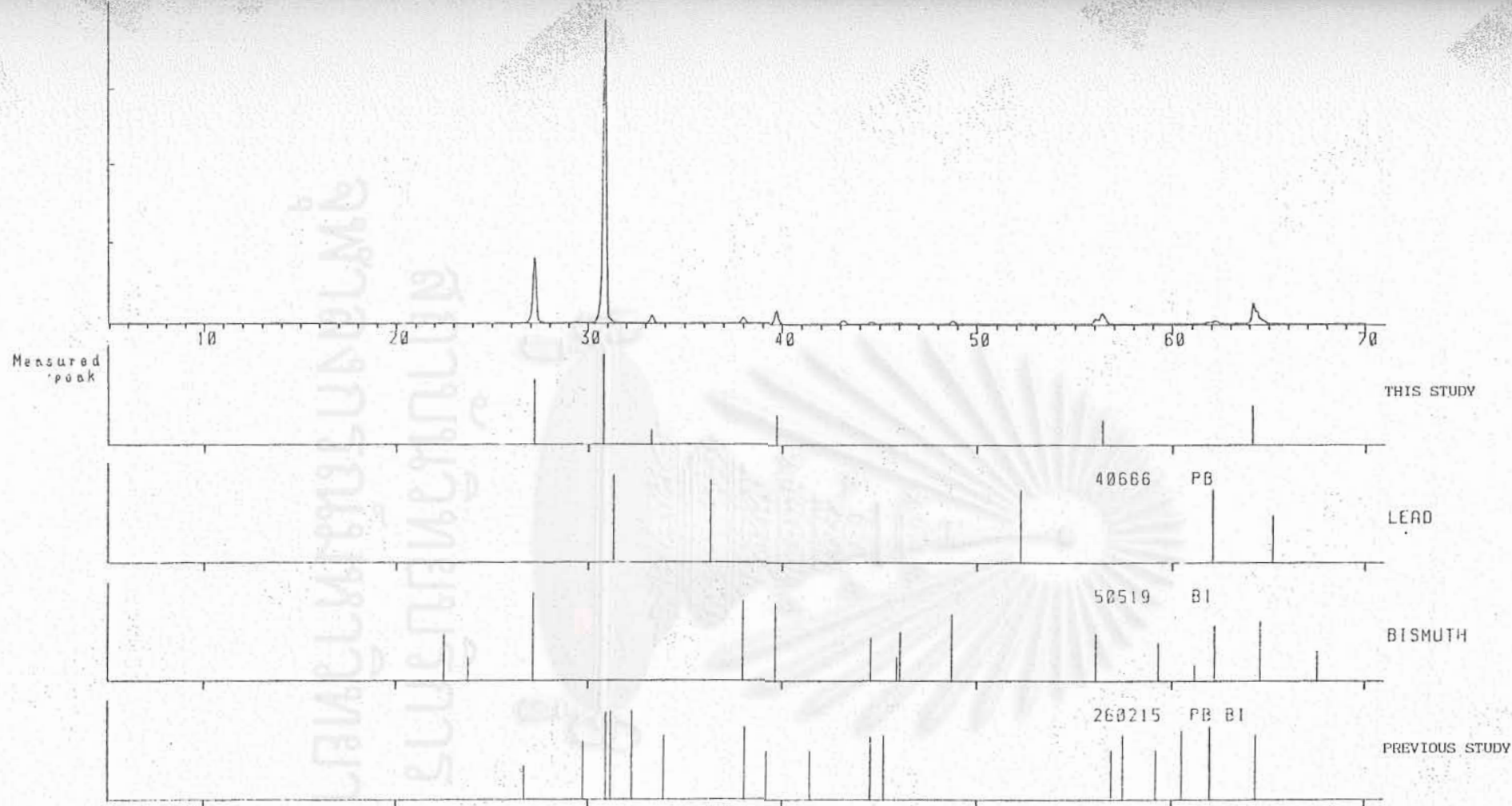
[คำอธิบาย

เพอริเทคติก : ปฏิริยาที่เกิดขึ้น (กลับไป/กลับมา ได้) ที่อุณหภูมิคงที่ โดยที่เฟสของเหลวจะทำปฏิริยากับเฟสของแข็ง เกิดเป็นเฟสของแข็งเฟสใหม่ ในขณะที่เย็นตัว

ยูเทคตอยด์ : ปฏิริยาที่เกิดขึ้น (กลับไป/กลับมา ได้) ที่อุณหภูมิคงที่ โดยที่เฟสของแข็ง (เฟสที่ 1 ซึ่งมักจะเป็นสารละลายในสภาพของแข็ง) เปลี่ยนเป็นเฟสของแข็งใหม่ 2 เฟส (หรือเท่ากับจำนวน component ที่มีอยู่ในระบบนั้น) ในขณะที่ยังเย็นตัว]

ในระบบของบิสมีท-ตะกั่ว พบว่ามีปฏิกิริยาเพอริเทคติกและยูเทคติกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 184 และ 124 องศาเซลเซียสตามลำดับ โครงสร้างในสภาวะสมดุลย์ของส่วนผสมยูเทคติกจะประกอบด้วยเฟสเบต้า (โครงสร้างเพอริเทคติก) ปนอยู่กับเฟสแกมมา (สารละลายในสภาพของแข็งของโลหะบิสมีท) เนื่องจากโครงสร้างที่ปรากฏในระบบไบนารีทั้ง 6 ที่ศึกษานี้มีเนื้อ (texture) เป็นโลหะทั้งหมด [รวมทั้งเฟสเบต้าซึ่งเป็นสารประกอบระหว่างโลหะ (intermetallic compound)] ไม่ปรากฏเฟสซึ่งมีความหนาแน่นต่ำปนอยู่เลย การคำนวณคุณสมบัติในการกำบังรังสีจึงสามารถประเมินได้จากการคำนวณโดยใช้คุณสมบัติการกำบังรังสีของโลหะบริสุทธิ์แต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบของระบบนั้น ๆ (ในลักษณะของสารผสม)

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของโลหะผสมไบนารี Pb-Bi ที่อัตราส่วน 50:50 ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน พบว่า แพทเทิร์นของโลหะผสมไบนารี Pb-Bi (50:50) ที่ได้จากการเตรียม จะใกล้เคียงกับส่วนผสมของ PbBi ซึ่งมีอัตราส่วนของอะตอม (atomic ratio) เท่ากับ 1:1 [เหตุที่ใช้ข้อมูลดังกล่าวได้ เป็นผลจากการที่โลหะตะกั่ว และโลหะบิสมีทมีน้ำหนักอะตอมใกล้เคียงกันมาก (207.19 และ 208.98 ตามลำดับ)] เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแพทเทิร์นของสารประกอบระหว่างโลหะของ PbBi ซึ่งมีรายงานโดย Suryanarayana et al. จาก JCPDS X-ray data file no. 26-215 ซึ่งเตรียมโดยการลดอุณหภูมิจากสภาพน้ำโลหะทันที และศึกษาที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน หรือ -196 องศาเซลเซียส พบว่ามีความแตกต่างกันมากดังแสดงในรูปที่ 5.1 ความแตกต่างที่เกิดขึ้นคาดว่า เป็นผลจากเทคนิคการเตรียมตัวอย่างซึ่งแตกต่างกัน โครงสร้างซึ่งรายงานโดย Suryanarayana et al. นั้น อาจเป็นโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นในขณะที่น้ำโลหะกำลังเย็นตัวอย่างรวดเร็วมาก แต่แนวความคิดนี้ขัดกับความเป็นจริงที่ว่าอะตอมของธาตุในน้ำโลหะจะอยู่ในสภาพ random ไม่ใช่โครงสร้างแบบผลึกในสภาพของแข็ง (ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมตัว) ดังนั้นโครงสร้างที่เกิดขึ้นจากการเย็นตัวของน้ำโลหะด้วยอัตราเร็วสูงมาก จึงควรเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous) มากกว่าที่จะเป็นโครงสร้างแบบผลึก เนื่องจากโครงสร้างที่ส่วนผสม PbBi ที่เตรียมขึ้นในการวิจัยนี้เกิดจากการที่น้ำโลหะถูกปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ จาก



รูปที่ 5.1 การเปรียบเทียบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันแพทเทิร์นระหว่าง PbBi (50:50 โดยน้ำหนัก) และสารประกอบ PbBi โดย Suryanarayana et al.

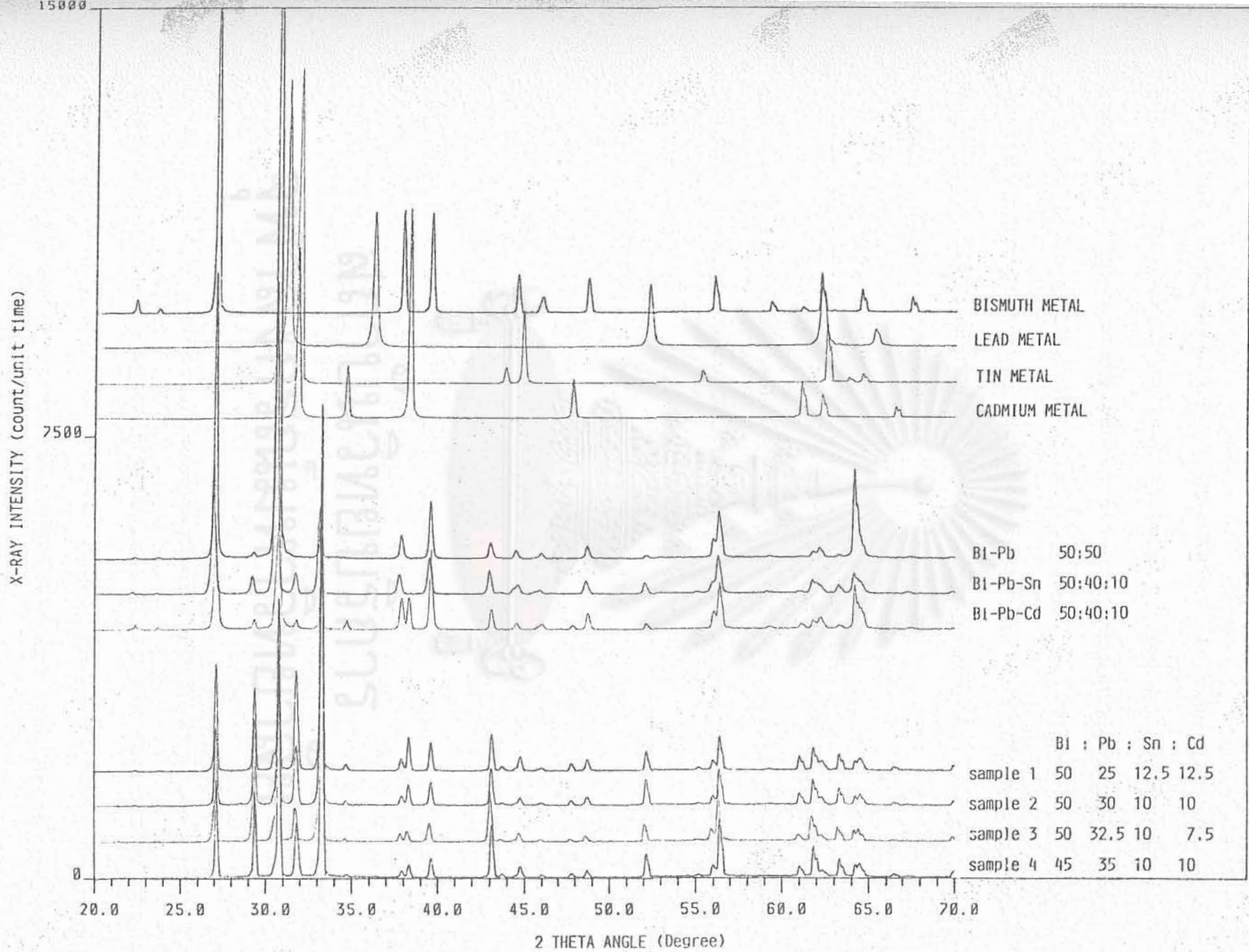
สภาพน้ำโลหะหลอมเหลวซึ่งอยู่ในสภาวะสมดุลย์ตลอดเวลา ทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นประกอบด้วยเฟสเบต้าปนกับเฟสแกมมา นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบแพทเทิร์นของโลหะ PbBi ที่อัตราส่วน 50:50 กับแพทเทิร์นของโลหะผสมเทอนารี Bi-Pb-Sn และ Bi-Pb-Cd ที่อัตราส่วน 50:40:10 (ทั้งสองระบบ) พบว่าตำแหน่งของพีคที่ตรวจพบมีความแตกต่างกันน้อยมาก การที่เตรียมโลหะผสมเทอนารีขึ้น โดยลดปริมาณของโลหะตะกั่วจาก 50% เหลือ 40% และให้ส่วนผสมที่เหลือเป็นโลหะดีบุกและแคดเมียมตามลำดับนั้น อาศัยหลักการที่ว่าในขณะที่ส่วนผสมเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย โครงสร้างเดิมจะเปลี่ยนไปน้อยมาก การทดลองดังกล่าวจึงเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของโครงสร้างจริงที่อัตราส่วนผสมนั้น ๆ อีกวิธีหนึ่ง

5.1.2 ระบบเทอนารี

โลหะผสมเทอนารีระบบบิสมัท-ตะกั่ว-ดีบุก พบว่ามีอุณหภูมิเทคติกประมาณ 95-96 องศาเซลเซียส มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิเทคติกซึ่งเคยมีรายงานไว้ที่ 96 และ 99.5 องศาเซลเซียส ผลจากความบริสุทธิ์ของโลหะที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ที่มีต่อความแตกต่างของอุณหภูมิที่วัดได้นั้นคาดว่ามีส่วนน้อย เนื่องจากได้ตรวจสอบโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยลำอิเล็กตรอนแล้ว ไม่พบธาตุเจือปนแต่อย่างใด (อาจมีอยู่บ้างแต่ไม่สามารถตรวจพบได้) นอกจากนี้ยังพบจุดเปลี่ยนแปลงการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 81 องศาเซลเซียสซึ่งคาดว่าไม่ใช่จุดหลอมตัว แต่เป็นผลจากการที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสเกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณความร้อนที่ดูดกลืนที่อุณหภูมิดังกล่าวมีขนาดต่ำกว่าปริมาณความร้อนที่ดูดกลืนช่วงอุณหภูมิ 95-96 องศาเซลเซียสมาก

ในระบบของบิสมัท-ตะกั่ว-แคดเมียม พบว่ามีอุณหภูมิเทคติกที่ 96 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิซึ่งเคยมีการรายงานไว้ที่ 92 และ 93.3 องศาเซลเซียส

ในระบบของบิสมัท-ดีบุก-แคดเมียม พบว่ามีอุณหภูมิเทคติกที่ 103.5 องศาเซลเซียสซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิซึ่งเคยมีการรายงานไว้ที่ 102 และ 104 องศาเซลเซียส



โครงสร้างของโลหะผสมเทอนารีเหล่านี้พบว่าอยู่ในรูปของเนื้อโลหะทั้งหมด ไม่ปรากฏเฟสของสารประกอบระหว่างโลหะซึ่งมีความหนาแน่นต่ำปนอยู่เลย การศึกษาโครงสร้างผลึกของเฟสต่าง ๆ ที่ปรากฏโดยเปรียบเทียบกับแพทเทิร์นของโลหะบริสุทธิ์จากเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันดังแสดงในรูปที่ 5.2 พบว่าอยู่ในรูปของสารผสมระหว่างสารละลายในสภาพของแข็ง ทำให้สามารถประเมินคุณสมบัติในการกำบังรังสีของโลหะผสมเทอนารีเหล่านี้ได้จากการคำนวณ (ในลักษณะของสารผสม) โดยใช้คุณสมบัติการกำบังรังสีของโลหะบริสุทธิ์แต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบของระบบนั้น ๆ

5.1.3 ระบบควอเทอนารี

โลหะผสมควอเทอนารีของระบบ บิสมัท-ตะกั่ว-ดีบุก-แคดเมียมพบว่าอุณหภูมิยูเทคติกซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ให้จุดหลอมต่ำสุด มีค่าประมาณ 70-71 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบช่วงส่วนผสมหลายช่วงที่แสดงจุดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนเพียงจุดเดียว ช่วงส่วนผสมเหล่านี้ได้แก่

<u>Bi</u>	:	<u>Pb</u>	:	<u>Sn</u>	:	<u>Cd</u>
50		(30-50)		(15-10)		5
50		(22.5-35)		(20-7.5)		7.5
50		(25-30)		(15-10)		10
50		(22.5-27.5)		(15-10)		12.5
45		(25-40)		(25-10)		5
45		(30-35)		(15-10)		10
40		(20-40)		(30-10)		10 และที่
40		25		30		5

การที่ส่วนผสมของโลหะผสมควอเทอนารีเหล่านี้มีจุดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนเพียงจุดเดียวที่อุณหภูมิประมาณ 70-71 องศาเซลเซียสทั้งที่อยู่ในระบบเดียวกันนั้นอาจวิเคราะห์ได้โดยอาศัย Phase rule ที่ว่า โลหะผสมควอเทอนารีระบบนี้ยังคงมีจุดควอเทอนารียูเทคติกเพียงจุดเดียว (และเป็นจุดตัดของเส้นที่ลากออกจากจุดเทอนารียูเทคติกของแต่ละระบบย่อย) แต่มีช่วงส่วนผสมใกล้เคียง

เป็นบริเวณกว้างซึ่งในบริเวณดังกล่าวอุณหภูมิจุดหลอมตัวจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก อีกสาเหตุหนึ่งซึ่งอาจเป็นไปได้ก็คือ ความไวของระบบวัดซึ่งใช้ในการทดลองนี้มีค่าไม่สูงพอที่จะตรวจพบความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน

โครงสร้างของโลหะผสมควอเทอนารีในช่วงส่วนผสมข้างต้นนี้ พบว่ามีเนื้อโลหะเป็นหลัก และมีโครงสร้างซึ่งมีลักษณะเป็นเส้น (แสดงในภาคผนวก 5) มีความหนาแน่นต่ำปนอยู่ ดังนั้นคุณสมบัติในการกำบังรังสีของโลหะผสมควอเทอนารีจึงไม่สามารถประเมินได้จากการคำนวณ จำเป็นต้องทำการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทโดยตรงจากตัวอย่างที่เตรียมขึ้น นอกเหนือจากช่วงส่วนผสมข้างต้นจะพบโครงสร้างโลหะแบบ dendrite (ลักษณะคล้ายกิ่งไม้) ซึ่งมีจุดหลอมตัวสูงขึ้นเป็นผลให้อุณหภูมิหลอมตัวที่ส่วนผสมอื่น ๆ สูงขึ้น และสามารถตรวจพบจุดเปลี่ยนแปลงการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นตามลำดับ โครงสร้างเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันแพทเทิร์นของเฟสต่าง ๆ ที่ปรากฏ พบว่ามีลักษณะคล้ายกับโลหะผสมเทอนารี (แม้จะมีเฟสความหนาแน่นต่ำปรากฏอยู่) ทั้งนี้เป็นผลจากการที่รังสีเอกซ์จะเลี้ยวเบนได้ดีกับเนื้อโลหะซึ่งมีความหนาแน่นของอะตอมสูง (>90% โดยพื้นที่หรือปริมาตร) มากกว่าเฟสที่มีความหนาแน่นต่ำ ทำให้โอกาสในการตรวจพบแพทเทิร์นของเฟสที่มีความหนาแน่นต่ำมีน้อยมากในการศึกษาครั้งนี้

5.2 คุณสมบัติเชิงกล

คุณสมบัติด้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุในขณะที่ใช้งาน (stiffness) โดยทั่วไปนิยมใช้ความต้านทานแรงดึง (tensile strength) หรือความต้านทานแรงอัด (compressive strength) เป็นหลักในการพิจารณา วัสดุใดมีความต้านทานแรงดึงหรือความต้านทานแรงอัดได้ดี จะมีความแข็งแรงและสามารถคงรูปได้ดีเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ เนื่องจากความแข็ง (hardness) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความต้านทานแรงดึง และการทดสอบความแข็งสามารถทดสอบได้ง่ายกว่าการทดสอบแรงดึง ในการวิจัยนี้จึงใช้ความแข็งเป็นค่าเปรียบเทียบความแข็งแรงของวัสดุจุดหลอมตัวต่ำที่เตรียมขึ้นเทียบกับความแข็งของโลหะตะกั่ว (ซึ่งเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในการกำบังรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา) และเลือกใช้เครื่องวัดความแข็งแบบ

วิกเกอร์ (Vicker's hardness tester) ซึ่งแสดงหน่วยความแข็งเป็น VHN (Vicker's hardness number) เป็นอุปกรณ์ทดสอบความแข็ง (เนื่องจากตะกั่วมีค่าความแข็งต่ำมาก) ผลการศึกษาสามารถสรุปดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง⁽¹⁾ และส่วนผสมของโลหะผสมเทอนารี และโลหะผสมควอเทอนารีที่เตรียมขึ้น

ส่วนผสม (% โดยน้ำหนัก)				ค่าความแข็ง (VHN)
Bi	Pb	Sn	Cd	
52.6	31.8	15.8	-	$8.9 \pm 0.1^{(2)}$
51.65	40.2	-	8.15	$10.9 \pm 0.2^{(2)}$
54	-	26	20	$20.5 \pm 0.4^{(2)}$
50	25	12.5	12.5	$10.7 \pm 0.9^{(2)}$
50	30	10	10	11.3 ± 0.4
50	32.5	10	7.5	11.1 ± 0.6
45	35	10	10	9.6 ± 0.4

หมายเหตุ (1) : ความแข็งของโลหะบิสมัท ตะกั่ว ดีบุก และแคดเมียม มีค่าโดยประมาณ 10.3 ± 0.2 , 4.0 ± 0.3 , 6.3 ± 0.1 และ 19.5 ± 0.3 VHN ตามลำดับ ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 ครั้ง

(2) : ค่าความแข็งที่ส่วนผสมยูเทคติก

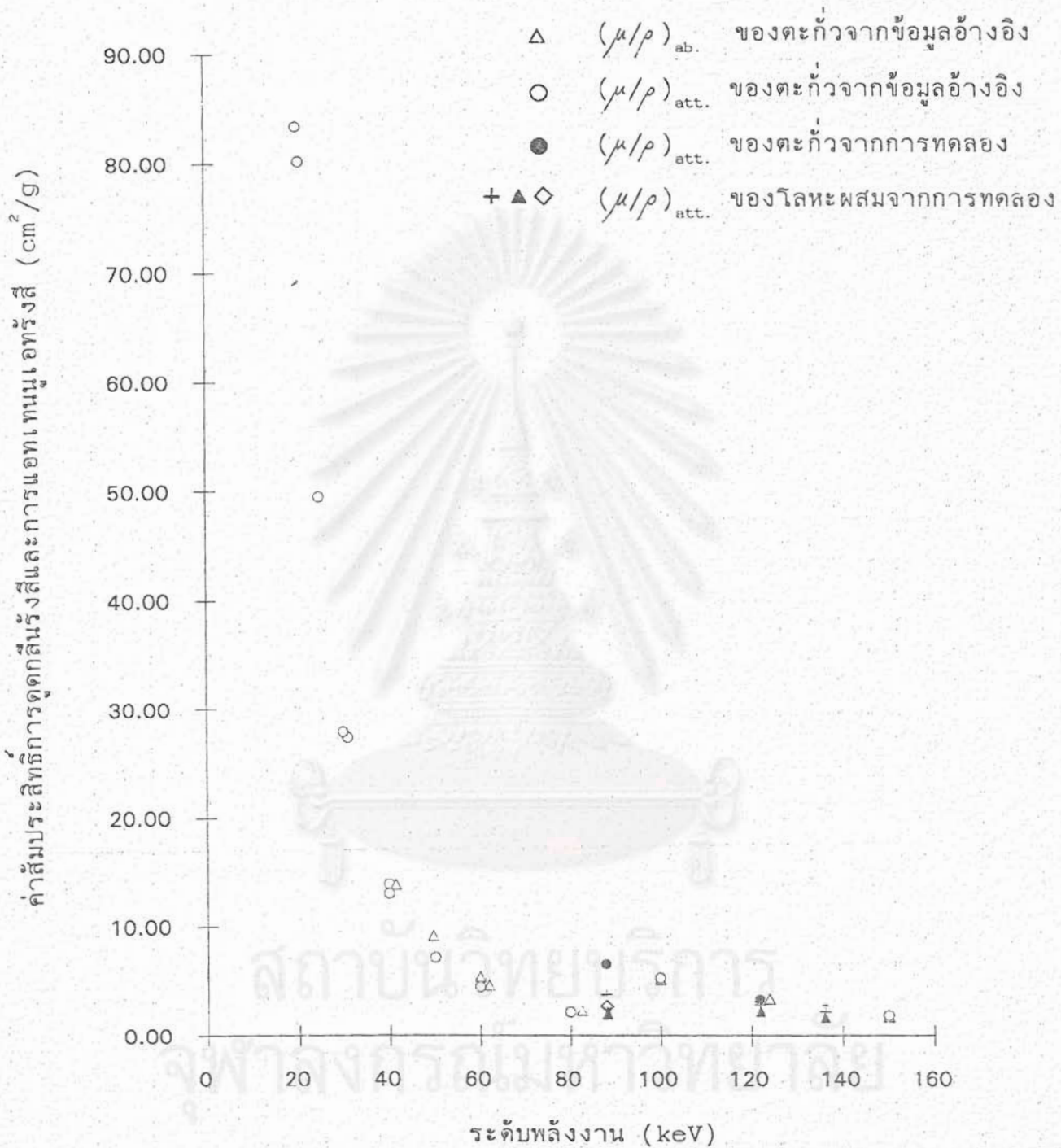
เมื่อพิจารณาค่าความแข็งของโลหะตะกั่วเป็นหลักพบว่า ค่าความแข็งที่ส่วนผสมยูเทคติกของโลหะผสมเทอนารี โลหะผสมควอเทอนารี และส่วนผสมใกล้เคียงจุดควอเทอนารียูเทคติก จะมีความแข็งสูงกว่าโลหะตะกั่วประมาณ 2-3 เท่า เป็นส่วนใหญ่ ความแข็งที่ปรากฏนี้ คาดว่าเป็นผลจากความแข็งของธาตุองค์ประกอบเป็นหลัก เป็นผลจาก solid solution strengthening ของธาตุองค์ประกอบ และจากความแข็งของสารประกอบระหว่างโลหะที่เกิดขึ้นเพียงส่วนน้อย

เนื่องจากในการใช้งานโดยทั่วไป วัสดุกำบังรังสีจะรับเพียงน้ำหนักที่เกิดจากมวลสารของวัสดุเอง และมีแรงภายนอกมากระทำน้อยมาก (ยกเว้นในกรณีที่มีรูปร่างเป็นก้อน ซึ่งจำเป็นต้องวางซ้อนกันเป็นชั้น ๆ) ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นนี้จะช่วยให้การรักษารูปร่างของโลหะผสมเทอนารี และโลหะผสมควอเทอนารี ดีกว่าโลหะตะกั่ว (มีความแข็งแรงสูงขึ้น และมีจุดหลอมตัวที่ต่ำกว่าโลหะตะกั่วมาก) เมื่อใช้ประโยชน์เป็นวัสดุกำบังรังสีโดยหล่อโลหะผสมให้มีรูปร่างเข้ากับอวัยวะของผู้ป่วยในส่วนที่ต้องการกำบังรังสีในขณะที่บำบัดด้วยรังสี

5.3 คุณสมบัติในการกำบังรังสี

ค่าสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทเชิงเส้นจากการทดลองของโลหะตะกั่ว โลหะผสมเทอนารี และโลหะผสมควอเทอนารีจากการทดลอง (ที่ระดับพลังงาน 60, 88, 122 และ 136 keV) เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงต่าง ๆ ของโลหะตะกั่วที่ระดับพลังงานต่าง ๆ ถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 5.3 จากรูปจะพบว่าค่าอ้างอิงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าสูงกว่าค่าอ้างอิงสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทในช่วงพลังงานต่ำ ความแตกต่างนี้จะลดลงเมื่อระดับพลังงานสูงขึ้น และมีค่าใกล้เคียงกันที่ระดับพลังงาน 40 keV หรือสูงกว่านี้ ในขณะที่ระดับพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานและค่าสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว

จากรูปที่ 5.3 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทเชิงเส้นของโลหะผสมต่าง ๆ ที่เตรียมขึ้นที่ระดับพลังงานต่าง ๆ (4 ค่า) จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงของโลหะตะกั่วเกือบทุกระดับพลังงาน ยกเว้นที่ระดับพลังงาน 88 keV ซึ่งตรงกับค่า K absorption edge ของโลหะตะกั่วพอดี (88.001 keV) ซึ่งส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทเชิงเส้นของโลหะตะกั่วและโลหะผสมอื่น ๆ ที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน และ/หรือ สัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทสูงขึ้นอย่างฉับพลัน และมีค่าลดลงอย่างค่อนเนื่องที่ระดับพลังงานสูงขึ้น ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นเช่นกันที่ระดับพลังงาน 90.521 keV ซึ่งตรงกับค่า K absorption edge ของโลหะบิสมีท (ส่วนค่า K absorption edge ของโลหะดีบุก และแคดเมียมซึ่งมีค่า 29.190 และ 26.712 keV นั้นจะไม่มีผลกระทบต่อค่าสัมประ



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสี และ สัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทริงส์เชิงเส้น (จากข้อมูลอ้างอิง และ จากการทดลอง) ของสารตัวอย่าง ที่ระดับพลังงานต่าง ๆ

ตารางที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีและสัมประสิทธิ์การแอทเทนูเอทเอทรังสีเชิงมวล (ข้อมูลอ้างอิงและจากการทดลอง) ของสารตัวอย่างที่ระดับพลังงานต่าง ๆ

ส่วนผสม (% โดยน้ำหนัก)					ความหนาแน่นจากการคำนวณ (g/cu.cm)	ค่าสัมประสิทธิ์การแอทเทนูเอทเอทเชิงมวล ($\mu/p, \text{cm}^2/\text{g}$) ที่ระดับพลังงานต่าง ๆ			
No.	Bi	Pb	Sn	Cd		60 keV	88 keV	122 keV	136 keV
1	-	100	-	-	11.34	4.67 ± 0.15	6.58 ± 0.31	3.29 ± 0.15	2.36 ± 0.06
2	54	-	26	20	9.15	5.19 ± 0.15	1.96 ± 0.18	2.17 ± 0.11	1.66 ± 0.14
3	52.6	31.8	15.8	-	9.91	5.21 ± 0.25	3.36 ± 0.16	2.99 ± 0.17	2.20 ± 0.07
4	51.65	40.2	-	8.15	10.33	5.02 ± 0.27	3.71 ± 0.05	3.19 ± 0.08	2.41 ± 0.17
5	50	25	12.5	12.5	9.24*	5.18 ± 0.15	2.99 ± 0.08	2.61 ± 0.07	2.09 ± 0.11
6	50	30	10	10	9.40*	5.18 ± 0.10	3.18 ± 0.19	2.82 ± 0.08	2.19 ± 0.15
7	50	32.5	10	7.5	9.46*	5.17 ± 0.10	3.33 ± 0.13	2.89 ± 0.05	2.14 ± 0.07
8	50	35	10	5	9.53*	5.20 ± 0.08	3.55 ± 0.11	2.99 ± 0.07	2.17 ± 0.08
9	45	35	10	10	9.47*	5.25 ± 0.07	3.38 ± 0.12	2.79 ± 0.06	2.23 ± 0.09
10	40	40	10	10	9.55*	5.19 ± 0.11	3.79 ± 0.15	2.82 ± 0.04	2.16 ± 0.07

หมายเหตุ * : ค่าความหนาแน่นจากการประเมินโดยสมมติว่าเฟสความหนาแน่นต่ำที่เกิดขึ้น มีผลให้ค่าความหนาแน่นลดลง 5 %

สิทธิ์การแอทเทนนูเอทจากการทดลองครั้งนี้แต่อย่างใด เนื่องจากมีระดับพลังงานต่ำกว่าช่วงพลังงานที่กำลังพิจารณาอยู่มาก) ข้อเสนอแนะเหตุผลดังกล่าวซึ่งเห็นได้ชัดเจนก็คือ ในระบบของโลหะผสมเทอนารีบีสมาท-ดีบุก-แคดเมียมนั้น จะมีค่าสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทเชิงมวลต่ำมาก ($1.96 \pm 0.18 \text{ cm}^2/\text{g}$) ที่ระดับพลังงาน 88keV เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะตะกั่วหรือโลหะผสมอื่น ๆ ที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ

จากการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทเชิงมวลที่ได้จากการทดลอง (ตารางที่ 5.2) จะพบว่าสำหรับวัสดุหนึ่ง ๆ ซึ่งมีค่าความหนาแน่นคงที่ (อาจเปลี่ยนไปได้ภายในระบบ) ค่าสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทจะลดลงเมื่อระดับพลังงานของรังสีเพิ่มขึ้น (ในแต่ละช่วงของ absorption edge) ที่ระดับพลังงานของรังสีคงที่ (ส่วนผสมเปลี่ยนแปลงได้ภายในระบบ) ค่าสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น หรือเมื่อปริมาณของธาตุซึ่งมีสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทสูงเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีทุกประการ ค่าสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทเชิงมวลที่ระดับพลังงาน 60 และ 130 keV ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงมีค่าไม่ต่อเนื่องนั้น คาดว่ามีสาเหตุจากส่วนผสมขององค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลงไป จากการใช้ค่าความหนาแน่น (ซึ่งได้จากการประมาณ) เข้ามาคำนวณ และการที่ค่าสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทของธาตุที่เป็นองค์ประกอบแต่ละธาตุจะเปลี่ยนแปลงอย่างอิสระไม่เกี่ยวข้องกันในช่วงระดับพลังงานดังกล่าว

5.4 การเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมควอเทอนารีในขณะที่ขึ้นรูปโดยการหล่อโลหะ

เนื่องจากการขึ้นรูปวัสดุจุดหลอมตัวต่ำจะใช้วิธีการหล่อโลหะเป็นหลัก การควบคุมสภาพบรรยากาศในขณะที่กำลังหล่อโลหะจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพราะโลหะที่อยู่ในสภาพหลอมเหลวสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีกว่าสภาพของแข็ง การปล่อยให้ผิวหน้าของน้ำโลหะสัมผัสกับอากาศโดยตรงจึงเป็นสิ่งที่ต้องหลีกเลี่ยง โลหะแต่ละชนิดในวัสดุจุดหลอมตัวต่ำจะเกิดออกซิเดชันในอัตราที่แตกต่างกัน เป็นผลให้ส่วนผสมเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งคือ จุดหลอมตัวของโลหะผสมจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาด้วย การลดการเกิดออกซิเดชันในขณะที่

หลอมโลหะผสมบิสมีท-ตะกั่ว-ดีบุก-แคดเมียม สามารถกระทำได้โดยควบคุมส่วนผสมให้ใกล้เคียงยุคยูเทคติก และใช้อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส ร่วมกับการควบคุมตัวแปรอื่น ๆ ดังนี้

5.4.1 ควบคุมสภาพบรรยากาศเหนือผิวโลหะหลอมเหลวให้เป็นสุญญากาศ หรืออยู่ในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซอาร์กอน เป็นต้น วิธีการนี้เหมาะกับกรณีที่มีภาชนะสำหรับหลอมโลหะมิดชิด มีเครื่องสูบลมอากาศ และมีก๊าซเฉื่อยอยู่แล้ว สามารถหลอมโลหะในปริมาณมากได้ดี แต่จะมีค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากเครื่องมือและวัสดุที่ใช้มีราคาแพง

5.4.2 ใช้สารตัวกลางบางชนิด เช่น น้ำมัน น้ำ ฯลฯ ซึ่งมีอุณหภูมิของจุดหลอมตัวต่ำกว่าจุดหลอมตัวของโลหะผสมจุดหลอมตัวต่ำ แต่มีจุดเดือดสูงกว่าอุณหภูมิขึ้นรูปของโลหะผสมจุดหลอมตัวต่ำคั่นอยู่ระหว่างน้ำโลหะและอากาศ เพื่อลดการแพร่ของออกซิเจนจากอากาศไปสู่ น้ำโลหะโดยตรง วิธีการนี้เหมาะกับกรณีที่ไม่มีเครื่องมือและวัสดุสำหรับควบคุมในการหล่อโลหะอย่างเหมาะสม หรือใช้กับการทดลองที่มีปริมาณของน้ำโลหะไม่มากนัก

จะเห็นได้ว่าตัวแปรสำคัญสำหรับวิธีการทั้งสองก็คือ จะต้องควบคุมอุณหภูมิของน้ำโลหะให้ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียสเสมอด้วยระบบควบคุมอุณหภูมิ และพยายามให้ออกซิเจนสัมผัสกับน้ำโลหะน้อยที่สุด ซึ่งวิธีแรกมีค่าใช้จ่ายสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่สอง การวิจัยนี้จึงเน้นศึกษาวิธีที่สองเนื่องจากศึกษาได้ง่าย และให้ผลการวิจัยดังนี้

การทดสอบตัวกลางชนิดต่างๆ เช่น น้ำมันเครื่อง (lubricating oil) น้ำมันก๊าด (kerozene) น้ำประปา (tap water) น้ำกรองปราศจากไอออน (deionized water) และน้ำกลั่น (distilled water) เพื่อเปรียบเทียบกันพบว่า

- ตัวกลางเหล่านี้จะช่วยลดอัตราการเกิดออกซิเดชันให้เกิดขึ้นน้อยกว่าเมื่อปล่อยให้ น้ำโลหะสัมผัสกับอากาศโดยตรง

- ตัวกลางที่เลือกใช้สามารถระเหยกลายเป็นไอและควั่นในขณะที่กำลังหลอมโลหะ ควั่นที่เกิดจากการกลายเป็นไอ และการเกิดออกซิเดชันกับอากาศ จะก่อให้เกิดมลพิษต่อผู้ที่ปฏิบัติงาน หรืออยู่ใกล้เคียง บริเวณดังกล่าวได้ ในกรณีของน้ำจะมีเพียงไอน้ำเกิดขึ้นซึ่งไม่ก่อให้เกิดมลพิษเมื่อเทียบกับการใช้น้ำมันเป็นตัวกลาง
- ความหนา และปริมาณของชั้นตัวกลางที่อยู่เหนือน้ำโลหะ จะมีผลต่อการแพร่ออกซิเจนจากอากาศสู่น้ำโลหะ โดยที่อัตราการเกิดออกซิเดชันจะลดลงเมื่อความหนาของตัวกลางเพิ่มขึ้น การลดผิวหน้า (ด้านบนสุด) ของน้ำโลหะที่จะเปิดสัมผัสกับอากาศ จะช่วยลดปริมาณของตัวกลางที่จำเป็นต้องใช้ให้เหลือน้อยลงได้
- การกวนน้ำโลหะ และชั้นตัวกลางจะมีผลให้อุณหภูมิของน้ำโลหะและตัวกลางสม่ำเสมอขึ้น แต่ในขณะที่เดียวกันจะมีผลให้ออกซิเจนละลายในตัวกลางได้มากขึ้น เป็นผลให้อัตราการเกิดออกซิเดชันของน้ำโลหะสูงขึ้น
- การใช้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิในการหลอมโลหะ จะช่วยลดอันตรายที่อาจเกิดจากการใช้ตัวกลาง ได้มาก
- ในกรณีที่ไม่มีอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิในการหลอมโลหะ การใช้ตัวกลางที่ไม่เหมาะสมอาจก่อให้เกิดอันตรายขณะปฏิบัติงานได้ง่าย เช่น อุณหภูมิของตัวกลางที่เป็นน้ำมันอาจลุกติดไฟได้ง่าย หรือเกิดการเดือดอย่างรุนแรงก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้ ทั้งนี้เป็นผลจากการที่น้ำโลหะมีจุดเดือดสูงมาก ทำให้สามารถสะสมปริมาณความร้อนได้มาก วิธีป้องกันที่ดีที่สุดคือการกวนน้ำโลหะอย่างต่อเนื่องเพื่อให้อุณหภูมิของน้ำโลหะคงที่ และความร้อนสามารถกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แต่วิธีการดังกล่าวจะมีผลต่อการเกิดออกซิเดชันของน้ำโลหะด้วย ซึ่งจำเป็นต้องควบคุมให้เหมาะสม



บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

จากข้อมูลในการวิจัยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

6.1 ผลของส่วนผสม และความหนาแน่นของวัสดุหลอมตัวดำ เมื่อกำหนดช่วงอุณหภูมิของการขึ้นรูป

เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมโลหะโดยทั่วไปจะสูงกว่าอุณหภูมิของจุดหลอมตัวประมาณ 25-50 องศาเซลเซียส การกำหนดช่วงอุณหภูมิการหลอมโลหะจึงเป็นการกำหนดชนิดของโลหะผสมที่จะใช้โดยตรง จากการพิจารณาจากเฟสไดอะแกรมของโลหะผสมต่าง ๆ สามารถสรุปได้ว่า

- โลหะผสมไบนารีของบิสมีท ตะกั่ว ดีบุก และ แคดเมียม เหมาะที่จะใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 150-225 องศาเซลเซียส (ยกเว้นในระบบของตะกั่ว-แคดเมียมซึ่งเหมาะกับการใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 275-300 องศาเซลเซียส) ข้อดีของกลุ่มโลหะไบนารีก็คือมีโครงสร้างเป็นสารผสมระหว่างเฟสโลหะสองชนิด [อาจอยู่ในรูปของโลหะ สารละลายในสภาพของแข็ง (ของโลหะ) หรือสารประกอบของโลหะ]

- โลหะผสมเทอนารีของบิสมีท ตะกั่ว ดีบุก และแคดเมียม (ยกเว้นในระบบของตะกั่ว-ดีบุก-แคดเมียม ซึ่งไม่ได้ศึกษาในงานวิจัยนี้) เหมาะที่จะใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 120-175 องศาเซลเซียส โครงสร้างของเฟสที่ปรากฏเป็นสารผสมของเฟสโลหะซึ่งอยู่ในรูปของโลหะ หรือสารละลายในสภาพของแข็ง

- โลหะผสมควอเทอนารีของบิสมีท ตะกั่ว ดีบุก และแคดเมียม เหมาะที่จะใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 95-120 องศาเซลเซียส โครงสร้างของเฟสที่ปรากฏเป็นสารผสมของเฟสโลหะซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายในสภาพของแข็ง และสารประกอบของโลหะซึ่งมีความหนาแน่นต่ำ

ความหนาแน่นของโลหะผสมโบนาร์ และโลหะผสมเทอนาร์ที่เตรียมขึ้นนี้ สามารถประเมินได้จากการคำนวณในรูปของสารผสมที่เป็นองค์ประกอบโดยตรง เนื่องจากมีโครงสร้างอยู่ในรูปของโลหะหรือสารละลายในสภาพของแข็ง ส่วนโลหะผสมควอเทอนาร์นั้นค่าที่ประเมินจากการคำนวณจะสูงกว่าความเป็นจริง ทั้งนี้เป็นผลจากการที่มีเฟสของสารประกอบระหว่างโลหะซึ่งมีความหนาแน่นต่ำเกิดขึ้นในระบบ

6.2 ผลของช่วงอุณหภูมิการขึ้นรูป เมื่อกำหนดส่วนผสม และความหนาแน่นของวัสดุหลอมตัวต่ำ

สำหรับกรณีที่ส่วนผสมถูกกำหนดไว้แล้วจะหาอุณหภูมิขึ้นรูปได้โดยพิจารณาจากเฟสไดอะแกรมของระบบนั้น ๆ โดยตรง ส่วนในกรณีที่ความหนาแน่นถูกกำหนดไว้จะต้องพิจารณาก่อนว่ามีโลหะผสมระบบใดบ้างที่ให้ความหนาแน่นอยู่ในช่วงที่ต้องการ จากนั้นจะพิจารณาจากเฟสไดอะแกรมของระบบนั้นอีกครั้งหนึ่ง

6.3 คุณสมบัติทางกายภาพ และสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทของรังสีเอกซ์ และรังสีแกมมาที่ระดับพลังงานต่าง ๆ

จากผลการศึกษาสรุปได้ว่า โลหะผสมที่เตรียมขึ้นมีความแข็ง 2-3 เท่าของโลหะตะกั่ว ซึ่งมีผลให้ชิ้นงานหล่อมีความแข็งแรงและคงรูปได้ดีขึ้นแม้จะมีอุณหภูมิของจุดหลอมตัวต่ำกว่าโลหะตะกั่วมาก ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทของโลหะผสมที่ศึกษานั้นพบว่าเป็นไปตามทฤษฎีคือ

- ที่ความหนาแน่นคงที่ เมื่อระดับพลังงานรังสีสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทจะมีค่าลดลง และ
- ที่ระดับพลังงานคงที่ เมื่อความหนาแน่นของสารตัวอย่างเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอทจะเพิ่มขึ้น

รวมทั้งข้อสรุปจากการศึกษาผลของการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมในขณะที่กำลังหลอมโลหะ และข้อควรระวังในการหลอมโลหะด้วย

บรรณานุกรม

1. F.N. Rhines, Phase Diagram in Metallurgy. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York 1956.
2. L.H. Van Vlack, Elements of material Science, 2nd ed. Reading, Mass.: Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1964.
3. Metals Handbook (1948 edition). American Society for Metals. Ohio. p. 1178-1180, 1188-1189, and 1238.
4. E.A. Brandes, Smithells Metal Reference Book, 6th ed., Butterworth & Co. (Publishers) Ltd. 1983. p. 11-127, 133, 139, 167, 171, 397, and 34-7, 8.
5. G.S. Brady and H.R. Clauser, Materials Handbook, 10th ed. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York 1972. p.342-343.
6. R.B. Ross, Metallic Materials Specification Handbook, 3rd ed., Methuen Inc. New York. 1979. p. 75-76, 78-79, 175, 199-203, and 589-595.
7. N.E. Woldman and R.C. Gibbons, Engineering Alloys, 5th ed., Van Nostrand Reinhold Company, New York. 1973.
8. B. Wunderlich, Thermal analysis. Academic Press, Inc. 1990.
9. K. Almenas and R. Lee, An Introduction to Nuclear Engineering. Springer-Verlag 1990. p.290-302.
10. D. Ertel. Kernforschungszentrum Karlsruhe, Schule fur Kerntechnik, X-ray fluorescence analysis. 1988.

11. Tertian and F. Claisse, Principle of quantitative x-ray fluorescence analysis. Heyden & Son Ltd. 1982. 385 p. Appendix 4.
12. A.B. Chilton, J. Kenneth, and R.E. Faw, Principle of radiation shielding.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก 1

ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมขององค์ประกอบ และอุณหภูมิจุดหลอมตัวของธาตุ โลหะผสมต่าง ๆ (ในระบบไบนารี เทอนารี ควอเทอนารี และ ควินารี) ที่จุดยูเทคติก และส่วนผสมอื่น ๆ จากข้อมูลอ้างอิงต่าง ๆ

ส่วนผสม (% โดยน้ำหนัก)					อุณหภูมิจุดหลอมตัว	ชื่อ
Bi	Pb	Sn	Cd	In	(เซลเซียส)	
<u>โลหะบริสุทธิ์ (1 ธาตุ)</u>						
100					269, 271.3	
	100				327.4	
		100			232	
			100		321	
				100	156.4	
<u>ระบบไบนารี (2 ธาตุ)</u>						
58	42				125	ไบนารียูเทคติก และ Cerrotru
57		43			135	ไบนารียูเทคติก
40			60		144, 142.75	ไบนารียูเทคติก
38.1	61.9				183	ไบนารียูเทคติก
82.6			17.4		249	ไบนารียูเทคติก
		67	33		172.65	ไบนารียูเทคติก

ส่วนผสม (% โดยน้ำหนัก)					อุณหภูมิจุดหลอมตัว	ชื่อ
Bi	Pb	Sn	Cd	In	(เซลเซียส)	
<u>ระบบเทอนารี (3 ธาตุ)</u>						
52.6	31.8	15.8			99.5	เทอนารียูเทคติก
52	32	16			96	เทอนารียูเทคติก
51.65	40.2		8.15		93.3	เทอนารียูเทคติก
52	40		8		92	เทอนารียูเทคติก
54		26	20		102, 104	เทอนารียูเทคติก
58		17		25	79	เทอนารียูเทคติก
3	: 3	: 3	(ratio)		121	Homberg's alloy
35	35	30			98	Rose' alloy
46	20	34			95	Malotte's alloy
50	25	25			93	D'Arcet's alloy
50	28	22			79	Rose fusible-1
50	28	22			96-100	Rose
50	30	20			96-100	Onion
50	30	20			92	Lichtenberg's
50	31.2	18.8			95	Newtons fusible
52.2	32	15.5			96	Semalloy 1280
51.6	40.2		8.1		91.5	-
50		25	25		95	Newton's alloy
57		17		26	79	Cerrolow 174
57.5		17.3		25.2	78.8	-

ส่วนผสม (% โดยน้ำหนัก)					อุณหภูมิจุดหลอมตัว	ชื่อ
Bi	Pb	Sn	Cd	In	(เซลเซียส)	
<u>ระบบควอเทอนารี</u>						
50	27	13	10		70	ควอเทอนารียูเทคติก
49.5	7.3	13.1	10.0		70-74	Ostalloy
42.5	37.7	11.3	8.5		70-90	Cerrosafe or Safalloy
47.4	19.4	20	13.2		-	Guthrie's alloy
50	25	12.5	12.5		70	Wood's metal
50	26.7	13.3	10		70	Cerrobend
15	8	4	3	(ratio)	70	Lipowitz alloy
7-8	4	2	1-2	(ratio)	71	Wood's alloy
49.4	18	11.6		21	57,58	ควอเทอนารียูเทคติก หรือ Cerrolow 13
49	18	15		18	58-69	Cerrolow 136B
<u>ระบบควินารี (5 ธาตุ)</u>						
44.7	22.6	8.3	5.3	19.1	46.7	Semalloy 1010
44.7	22.6	11.3	5.3	16.1	48-53	Cerrolow 117B
47.5	25.4	12.6	9.5	5	57-65	Cerrolow 14C
48	25.6	12.8	9.6	4	61-65	Cerrolow 147

จากตารางข้างต้นจะพบว่า มีข้อมูลบางส่วนที่ขัดแย้งกันเอง เช่น มีส่วนผสมเหมือนกัน แต่มีรายงานของอุณหภูมิจุดหลอมตัวที่แตกต่างกันไป

ภาคผนวก 2

ข้อมูลของโลหะบิสมัท ตะกั่ว ดีบุก และแคดเมียม

Bismuth Bi

Physical properties

Atomic number	83	
Atomic weight	209.0	
Crystal structure	Rhombohedral	
Colour	White with reddish tinge	
Specific gravity	9.8	
Density	9800 kg/m ³	(0.34 lbf/in. ³)
Melting point	271.3 °C	
Boiling point	1420 °C	
Specific heat	0.13 J/g °C	(0.030 cal/g °C)
Thermal conductivity	10 W/m °C	(2.4 cal/m s °C)
Coefficient of linear expansion (20–100° C)	13.3 × 10 ⁻⁶ /°C	
Latent heat of fusion	54.4 J/g	(13 cal/g)
Latent heat of vaporization	854 J/g	(204 cal/g)
Thermal neutron absorption cross-section	0.032 barns/atom	
Electrical conductivity	1.7% IACS (copper 100%)	
Specific resistance	1120 microhm mm	
Temperature coefficient of electrical resistance	0.0043/°C	
Electrochemical equivalent	2.59 g/A/h	
Electrode potential	+0.2 V	
Magnetic susceptibility	-1.35 × 10 ⁻⁶	
Young's modulus of elasticity	31.7 × 10 ⁹ N/m ²	(4.6 × 10 ⁶ lbf/in. ²)
Tensile strength	- N/mm ²	
Hardness	- DPN	

General notes on bismuth

Bismuth is soft but quite brittle, being similar in many respects to antimony, arsenic and zinc. It has considerably more metallic properties than either antimony or arsenic but is a very poor heat conductor and, like antimony, expands on solidification, this property being transferred to its alloys.

The pure metal can be extruded as a very fine wire which is used in high quality pyrometer and galvanometer suspensions, as well as hair lines in optical instruments.

The bismuth alloys are characterized by their low melting point, low contraction rate and high fluidity. These low melting point alloys are used as fusible plugs or links which melt when heat is applied, and are found in fire sprinkler systems, holding open fire doors, and other safety devices which must automatically operate when the temperature rises above a certain limit. Alloys melting from 60 °C upwards are available.

Bismuth alloys exist which expand on solidification and remain dimensionally constant or contract very slightly. All of these are used in engineering to fill pipes at bending, to hold intricate parts during machining, or as patterns to simulate certain shrinkage characteristics.

Molten bismuth does not readily oxidize and it is this property which enhances the fluidity of some alloys. This, with the low contraction rate, gives castings of a very high definition, and is thus used as type metal in good quality printing.

Small quantities of bismuth added to austenitic stainless steel are reported to increase the machinability without detracting from the corrosion resisting or mechanical properties, while some zinc alloys have also been produced, notably in Germany, with bismuth added for the same purpose.

Symbol	Nominal analysis, supplier, condition and remarks.
AAF 11078A/1	27% Pb 13% Sn 11% Cd Bi alloy; US Service; melting point 71 °C
AAF 11078A/2	42% Pb 7.0% Cd Bi alloy; US Service; melting range 80-91 °C
ANATOMICAL ALLOY	17% Pb 19% Sn 10% Hg Bi alloy; Melting point 60 °C; used for making bone replicas
BISMANOL	20% Mn Bi alloy; Pressed powder for magnets; consult PMA for further information
BISMUTH	Commercially pure Bi metal; Blackwells; primary metal
BISMUTH	High purity Bi metal impurities 10 p.p.m.; Johnson Matthey; supplied as ingot or wire
CERROBASE	44.5% Pb Bi alloy; Mining and Chemical Co.; melting point 124 °C
CERRO-CAST	Bi base alloy; Melting range 140-170 °C; Mining & Chemical Co.
CERRO-LOW 117	Bi base alloy; Melting point 47.5 °C; Mining & Chemical Co.
CERRO-LOW 136	Bi base alloy; Melting point 58 °C; Mining & Chemical Co.
CERRO-LOW 147	Bi base alloy; Melting range 61-65 °C; Mining & Chemical Co.
CERROSAFE	37.5% Pb 11.3% Sn 8.5% Cd Bi alloy; Melting range 70-90 °C; Mining & Chemical Products Ltd
CERROTRIC	42% Sn Bi alloy; Melting point 138.5 °C; Mining & Chemical Products Ltd
CERROTRU	42% Sn 1% Pb Bi alloy; Mining & Chemical Co; melting range 134-135 °C; zero contraction on solidification
D'ARCET	25% Sn 25% Pb Bi alloy; Information from Tin Research Institute; melting range 96-98 °C
GLANCE	Bismuth sulphide ore
hBiI	99.9999% Bi rod, 12 mm diameter; Light Ltd; high purity metal
LICHTENBERG	20% Sn 30% Pb Bi alloy; Information from Tin Research Institute; melting range 96-100 °C

Symbol	Nominal analysis, supplier, condition and remarks.
LIPOWITZ	13.3% Sn 26.7% Pb 10% Cd Bi alloy; Information from Tin Research Institute; melting range 70-73 °C
MALOTTE	34% Sn 20% Pb Bi alloy; Information from Tin Research Institute; melting range 96-123 °C
NEWTON	18.8% Sn 31.2% Pb Bi alloy; Information from Tin Research Institute; melting range 96-97 °C
ONION	20% Sn 30% Pb Bi alloy; Information from Tin Research Institute; melting range 96-100 °C
ROSE	22% Sn 28% Pb Bi alloy; Information from Tin Research Institute; melting range 96-100 °C
WOODS	12.5% Sn 25% Pb 12.5% Cd Bi alloy; Information from Tin Research Institute; melting range 70-72 °C

Note. The following abbreviations and units are used in the tables:

DPN	Hardness, diamond pyramid number
UTS	Ultimate tensile strength, N/mm ²
E _{10n}	Elongation, %
Proof	0.1 % proof strength, N/mm ²

$$1 \text{ N/mm}^2 = 0.1 \text{ hbar} = 0.102 \text{ kgf/mm}^2 = 0.06475 \text{ tonf/in}^2 = 145.04 \text{ lbf/in}^2$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Lead Pb

Physical properties

Atomic number	82	
Atomic weight	207.21	
Crystal structure	Face-centred cubic	
Colour	Blue-grey	
Specific gravity	11.34	
Density	11340 kg/m ³	(0.42 lb/in. ³)
Melting point	327 °C	
Boiling point	1750 °C	
Specific heat	0.129 J/g °C	(0.0308 cal/g °C)
Thermal conductivity	17.6 W/m °C	(8.2 calories/m s °C)
Coefficient of linear expansion (20–100° C)	29.1 × 10 ⁻⁶ /°C	
Latent heat of fusion	24.1 J/g	(5.75 cal/g)
Latent heat of vaporization	850 J/g	(203 cal/g)
Thermal neutron absorption cross-section	0.17 barns/atom	
Electrical conductivity	9% IACS (copper 100%)	
Specific resistance	208 microhm mm	
Temperature coefficient of electrical resistance	0.0043/°C	
Electrochemical equivalent	3.858 g/A/h	
Electrode potential	-0.126 V	
Magnetic susceptibility	-0.12 × 10 ⁻⁶	
Young's modulus of elasticity	14 × 10 ⁹ N/m ²	(2 × 10 ⁶ lbf/in. ²)
Tensile strength	18 N/mm ²	(1.2 tonf/in. ²)
Hardness	5 DPN	

General notes on lead

Lead occurs in deposits widespread throughout the world and it is of note that this metal, which has been used for plumbing since Roman times at least, makes up only 0.002% of the earth's crust. Lithium, which is looked on as a rare metal is present as 0.004%. Lead ores however, tend to be found in concentrated pockets which makes their mining more economical than lithium, which is evenly distributed.

The excellent ductility of lead which has a complete absence of cold working properties has made this a favourite material which is further enhanced by its excellent corrosion resistance and ease with which it can be cold forge welded.

The Romans had lead water pipes and used lead as a roofing material. Lead pipes are now being replaced by copper, aluminium and plastic tubing, as these have thinner wall sections for the same strength and do not suffer creep failure at normal temperatures. The use of lead for sheathing electric cables is also largely being replaced with aluminium and plastic. Lead will be attacked corrosively by soft or neutral water which contains carbon dioxide. This can cause a health hazard when lead pipe is used.

The largest use of lead and its alloys is in the lead/sulphuric acid electrical storage battery or 'accumulator'. No other material can supply the necessary electrical, chemical and corrosion resistant properties as economically as lead.

The chemical industry still uses large quantities of lead in contact with acids and chromium electroplating equipment is lead lined and uses lead anodes.

Some of the newer plastics, stainless steel and titanium, are now threatening these uses of lead, which suffers from the disadvantage of being the heaviest metal in common use. This added to its low strength and very low creep properties means that it almost always has to be supported by other metals. Additions of antimony to lead increase the strength without affecting its chemical resistance to any great extent, but make it more difficult to weld or solder.

A range of bearing metals exists with lead as the main constituent. Here the lead is used as a soft matrix supporting the hard intermetallic compounds of antimony, copper, tin and cadmium. These alloys are used for high bearing loads, and can stand reasonably high temperatures. Lead bearings do not however have good fatigue strength and must not be used where reciprocating loads are involved unless special precautions are taken. A number of different alloys have been developed which cater for conditions varying from lightly loaded slow moving, up to such purposes as bearings on stone crushing equipment.

It is strongly advised that use is made of the detailed information available from the sources listed for these very special purpose alloys.

Lead is also used as a base for soldering and some fusible alloys.

GENERAL NOTES ON LEAD

As an alloying element lead has many uses. It is more economical than tin and has many similar properties being present in many tin based bearing alloys and almost all tin based solders and fusible alloys.

Lead is added to steel, aluminium and copper alloys up to 0.3% to improve machinability. It does not dissolve in any of these materials thus has little effect on their properties, but does form a discontinuity which prevents long curling cuttings. The soft lead also acts to some extent as a built-in solid lubricant, but there remains doubt as to the extent of the practical advantage of this property.

Lead sheeting has been the standard protection until recent years against X-rays and radioactivity.

Lead and its alloys have no natural resonant frequencies, and it is thus a 'silent' metal. This property is

being studied at present, as much of the world's considerable noise is caused by the vibration of metals.

The corrosion resistant and bearing properties of lead when applied as an electroplated deposit are now being exploited.

Lead oxide as a base for paints has been used for many years, and there are modern 'paints' chemically producing an adherent deposit of metallic lead on steel which show considerable promise. Metallic lead and most of its compounds are toxic, thus cannot be used in contact with foodstuffs, or on such articles as children's toys.

Although many of the newer materials are joining copper as a competitor to lead and its alloys, there is little doubt that lead will remain an economical material for many purposes for years to come.

Symbol	Nominal analysis, supplier, condition and remarks.	Symbol	Nominal analysis, supplier, condition and remarks.
2.3010	99.99% Pb: German Standard	A 122	Lead base white metal: Capping metal; Anti-Attrition
2.3020	99.985% Pb: German Standard	A 205	Lead base white metal: For gland packing; hard; Anti-Attrition
2.3021	0.06% Cu 99.9% Pb: Chemical grade; German Standard	A 210	Lead base white metal: For railway waggons; Anti-Attrition DPN: 32
2.3030	99.94% Pb: German Standard	ALLULOY No. 1	Lead base white metal: For heavy duty & eccentric bearings; Anti-Attrition; as A 110
2.3040	99.9% Pb: For chemical use; German Standard	ALLULOY No. 2	Lead base white metal: Capping metal; Anti-Attrition; as A 122
2.3075	0.1% Cu 99.75% Pb: German Standard	AMS 4750A	45% Sn Pb alloy: Solder
2.3085	98.5% Pb: German Standard	AMS 4755A	5.5% Ag Pb alloy: Solder
2.3131	0.005% Sn & Sb Pb: German Standard	AMS 4756	1.5% Ag 1% Sn Pb alloy: Solder
2.3132	0.12% Sb 0.005% Sn Pb: German Standard	AMS 7720	6.5% Sb 0.5% Sn Pb alloy: Casting
2.3137	0.8% Sb 0.005% Sn Pb: German Standard	AMS 7721	6.5% Sb 0.5% Sn Pb alloy: Sheet & extrusion
2.3138	2.5% Sn Pb alloy: German Standard	ANTIMONIAL LEAD	30% Sb Pb: Used in chemical plants battery plates; common name
2.3139	0.04% Te 0.005% Sn & Sb Pb: German Standard	ARSENIC-LEAD	25% As Pb alloy: Blackwells; primary metal
2.3201	0.7% Sb 1.2% As Pb alloy: German Standard	ASTM B237	10% Sn 15% Sb 0.5% Cu Pb alloy: Bearing metal; melting point 240 °C; compressive strength 100 N/mm ² DPN: 22
2.3202	0.25% Sb Pb alloy: German Standard	ASTM B238	5% Sn 15% Sb 0.5% Cu Pb alloy: Bearing metal; melting point 237 °C; compressive strength 100 N/mm ² DPN: 20
2.3203	3% Sb 1.5% As Pb alloy: German Standard	ASTM B2313	6% Sn 10% Sb 0.5% Cu Pb alloy: Bearing metal
2.3205	6% Sb Pb alloy: German Standard	ASTM B2315	1% Sn 16% Sb 0.6% Cu Pb alloy: Bearing metal; melting point 248 °C DPN: 21
2.3208	8% Sb Pb alloy: German Standard	ASTM B29	99.85 - 99.94% Pb pig: Specification covers 4 grades
2.3212	12% Sb Pb alloy: German Standard	ASTM B3211.5 S	1% Sn 1.5% Ag Pb solder: Melting point 309 °C
2.3229	8.8% Sb Pb alloy: German Standard	ASTM B322.5 S	2.5% Ag Pb solder: Melting point 304 °C
2.3299	8.8% Sb Pb alloy: German Standard	ASTM B322 A	2% Sn Pb solder
A 1 BABBITT	Pb base bearing metal: Medium duty; Magnolia Anti-Friction Metal Co DPN: 26 UTS: 66	ASTM B322 B	2% Sn 0.3% Sb Pb solder
A 5	Ag Pb base soft solder: Mallory Metallurgical; electrical conductivity 7.2% IACS; melting range 304-370 °C UTS: 37 Elong: 35%	ASTM B325 A	5% Sn Pb solder: Melting range 270-312 °C
A 25	Ag Pb base soft solder: Mallory Metallurgical; electrical conductivity 7.2% IACS; melting point 304 °C UTS: 37 Elong: 35%	ASTM B325 B	5% Sn 0.3% Sb Pb: Solder; melting range 270-312 °C
A 36	Lead base white metal: For railway waggons; Anti-Attrition DPN: 25	ASTM B3210 B	10% Sn 0.3% Sb Pb: Solder; melting range 268-299 °C
A 105	Lead base white metal: For gland packing; soft; Anti-Attrition	ASTM B3215 B	15% Sn 0.3% Sb Pb: Solder; melting range 277-288 °C
A 110	Lead base white metal: For heavy duty and eccentric bearings: Anti-Attrition	ASTM B3220 B	20% Sn 0.3% Sb Pb: Solder; melting range 183-277 °C
Note. The following abbreviations and units are used in the tables:		ASTM B3220 C	20% Sn 1% Sb Pb: Solder; melting range 183-277 °C
DPN	Hardness, diamond pyramid number	ASTM B3225 A	25% Sn Pb: Solder; melting range 183-266 °C
UTS	Ultimate tensile strength, N/mm ²		
Elong	Elongation, %		
Proof	0.1 % proof strength, N/mm ²		
1 N/mm ² =0.1 hbar=0.102 kgf/mm ² =0.06475 tonf/in ² =145.04 lbf/in ²			

Symbol	Nominal analysis, supplier, condition and remarks.
ASTM B32/25 B	25% Sn 0.3% Sb Pb: Solder; melting range 183-266 °C
ASTM B32/25 C	25% Sn 1.3% Sb Pb: Solder; melting range 183-266 °C
ASTM B32/30 A	30% Sn Pb: Solder; melting range 183-255 °C
ASTM B32/30 B	30% Sn 0.3% Sb Pb: Solder; melting range 183-255 °C
ASTM B32/30 C	30% Sn 1.6% Sb Pb: Solder; melting range 183-255 °C
ASTM B32/35 A	35% Sn Pb: Solder; melting range 183-247 °C
ASTM B32/35 B	35% Sn 0.3% Sb Pb: Solder; melting range 183-247 °C
ASTM B32/35 C	35% Sn 1.8% Sb Pb: Solder; melting range 183-247 °C
ASTM B32/40 A	40% Sn Pb: Solder; melting range 183-238 °C
ASTM B32/40 B	40% Sn 0.3% Sb Pb: Solder; melting range 183-238 °C
ASTM B32/40 C	40% Sn 2% Sb Pb: Solder; melting range 183-238 °C
ASTM B32/45 A	45% Sn Pb: Solder; melting range 183-227 °C
ASTM B32/45 B	45% Sn 0.3% Sb Pb: Solder; melting range 183-227 °C
ASTM B102 Y10A	10% Sn Pb alloy: Bearing metal
ASTM B102	5% Sn 15% Sb Pb alloy: Bearing metal
YT155A	
ASTM B325	For refined secondary PB; two listed; soft; Cu free and Cu bearing with 0.04% Cu
AUTO A	16% Sb 1% Cu Pb alloy: Bearing metal; Stone Manganese
BABBITT	Sn Cu Sb Pb white metal bearing alloys: Further information from Lead Development Association
BABBITT No. 6	Pb base bearing metal: For general engineering; Eyre Smelting; liquidus 272 °C DPN: 20 UTS: 45 Elon: 3%
BAHN METAL	0.6% Na 0.7% Ca 0.05% Ni Pb: Bearing metal; German origin
BS 219/1S	1.2% Sn 0.1% Sb (max) 1.5% Ag Pb alloy solder: Melting range 309-310 °C
BS 219/5S	5% Sn 0.1% Sb (max) 1.5% Ag Pb alloy solder: Melting range 296-301 °C
BS 219 C	40% Sn 2.2% Pb alloy: Solder; melting range 185-227 °C
BS 219 D	30% Sn 1.5% Sb Pb alloy: Solder; melting range 185-248 °C
BS 219 G	40% Sn 0.4% Sb (max) Pb alloy: Solder; melting range 183-234 °C
BS 219 H	35% Sn 0.3% Sb (max) Pb alloy: Solder; melting range 183-255 °C
BS 219 J	30% Sb 0.3% Sb (max) Pb alloy: Solder; melting range 183-255 °C
BS 219 L	32% Sn 1.8% Sb Pb alloy: Solder, melting range 185-243 °C
BS 219 M	45% Sn 2.5% Sb Pb alloy: Solder; melting range 185-215 °C
BS 219 N	18% Sn 1% Sb Pb alloy: Solder; melting range 185-275 °C
BS 219 R	45% Sn 0.4% Sb (max) Pb alloy: Solder, melting range 183-224 °C
BS 219 V	20% Sn 0.2% Sb (max) Pb alloy: Solder; melting range 183-276 °C
BS 334 A	99.99% Pb chemical lead: Primary material
BS 334 B	Chemical Pb containing protective elements: Primary material 0.005% Bi (max)
BS 335/2	7% Sb Pb alloy: Casting: corrosion resistant for lining tanks; 'Regulus Metal' DPN: 15 UTS: 40
BS 335/3	9% Sb Pb alloy: Casting: 'Regulus Metal'; corrosion resistant; wear resistant DPN: 16 UTS: 45

GENERAL NOTES ON LEAD

Symbol	Nominal analysis, supplier, condition and remarks.
BS 335/4	11% Sb Pb alloy: Casting: 'Regulus metal'; corrosion resistant; machinable DPN: 17 UTS: 57
BS 335/5	12% Sb (min) Pb alloy: Casting: 'Regulus Metal'; corrosion resistant; machinable DPN: 19 UTS: 60
BS 602/1	99.8% Pb: Pipe
BS 602/2	99.5% Pb: Pipe
BS 602/3	0.05% Te Pb: Pipe
BS 643	5% Sn 15% Sb Pb alloy: Used for capping wire ropes
BS 801	99.8% Pb: For cable sheathing
BS 801 B	0.9% Sb Pb alloy: For sheathing
BS 801 D	0.25% Cd 0.5% Sb Pb alloy: For sheathing
BS 801 E	0.4% Sn 0.2% Sb Pb alloy: For sheathing
BS 1085	0.004% Ag 0.004% Cu Pb: Pipe
BS 1178	99.9% Pb alloy: Sheet & strip for building
BS 3332/7	12% Sn 13% Sb 1% Cu Pb alloy: Bearing metal
BS 3332/8	5% Sn 15% Sb Pb alloy: Bearing metal
CAPSULE METAL	8% Sn Pb alloy: Origin unknown
CERROBASE	Bi Pb alloy: Casting for pattern metal; Mining & Chemical Ltd; can be cast into paper moulds etc.; melting point 124 °C
COMSOL	Ag Sn Pb base soft solder: Mallory Metallurgical; electrical conductivity 8% IACS; melting point 296 °C UTS: 37 Elon: 40%
CRUSHER	Pb base hardened bearing metal for dusty conditions: Magnolia Anti-Friction Metal Co UTS: 66
DIN 1707 LPB 98.5	98.5% Pb alloy
DIN 1707 LSn 8	8% Sn 0.5% Sb Pb alloy
DIN 1707 LSn 25	25% Sn 1.7% Sb Pb alloy
DIN 1707 LSn 30	30% Sn 2.0% Sb Pb alloy
DIN 1707 LSn 33	33% Sn 2.2% Sb Pb alloy
DIN 1707 LSn 35	35% Sn 2.3% Sb Pb alloy
DIN 1707 LSn 40	40% Sn 2.7% Sb Pb alloy
DIN 1719	Pb specification covers various grades pure lead
DIN 1741 Sb Pb 46	2% Cu 40% Sn 12% Sb Pb alloy DPN: 17 UTS: 60 Elon: 4%
DIN 1741 Sb Pb 59	3% Cu 25% Sn 13% Sb Pb alloy DPN: 18 UTS: 60 Elon: 3%
DIN 1741 Sb Pb 85	5% Sn 10% Sb Pb alloy DPN: 18 UTS: 60 Elon: 8%
DIN 1741 Sb Pb 87	13% Sb Pb alloy DPN: 14 UTS: 45 Elon: 10%
DIN 1741 Sb Pb 97	3% Sb Pb alloy DPN: 9 UTS: 45 Elon: 20%
DIN 16512 Pb Sn 3 Sb 4	3.0% Sn 4% Sb Pb alloy
DIN 16512 Pb Sn 3 Sb 12	3% Sn 12% Sb Pb alloy: Typemetal
DIN 16512 Pb Sn 4 Sb 15	4% Sn 15% Sb Pb alloy
DIN 16512 Pb Sn 5 Sb 12	5% Sn 12% Sb Pb alloy
DIN 16512 Pb Sn 5 Sb 28	5.5% Sn 29% Sb Pb alloy
DIN 16512 Pb Sn 9 Sb 17	9% Sn 17% Sb Pb alloy
DIN 16512 Pb Sn 15 Sb 4	15% Sn 4.5% Sb Pb alloy
DIN 16512 V Pb Sn 5 Sb 28	5% Sn 28% Sb Pb alloy
DIN 16512 V Pb Sn 30 Sb 6	30% Sn 6% Sb Pb alloy
DIN 17640	Specification covering grades of lead
DIN 17641	Pb and Pb alloys: Specification covers several analysis

GENERAL NOTES ON LEAD

Symbol	Nominal analysis, supplier, condition and remarks.	Symbol	Nominal analysis, supplier, condition and remarks.
DTD 685	1.5% Ag 1.2% Sn Pb alloy: Solder; melting range 309-313 °C	MALTEX X No 1 A	4% Sn 14% Sb 1% Cu Pb alloy: Bearing metal; Stone Manganese, as BS 3332/8
DURASTIC A 1	Cu Pb Sn base bearing for reciprocating engines: Eyre Smelting; melting range 186-350 °C DPN: 31 UTS: 90 Elong: 3%	MALTEX X No 7	40% Sn 16% Sb 1% Cu Pb alloy: Bearing metal; Stone Manganese
ELECTRO TYPE	3% Sn 3% Sb Pb alloy: White metal; further information from Lead Development Association	MARINE I	4% Sn 14% Sb 1% Cu Pb alloy: Bearing metal; Stone Manganese; as BS 3332/8
ESD 32	10.0% Co 18.0% Fe Pb alloy: Origin unknown	MARINE II	22.5% Sn 7.7% Sb Pb alloy: Bearing metal; Stone Manganese
ESD 42	10.0% Co 18.0% Fe Pb alloy: Origin unknown	MASCOT	Sn Pb base melting metal for general use: Eyre Smelting; melting range 240-300 °C DPN: 23 UTS: 66 Elong: 2%
E QQ S 571/R	2.5% Ag Pb alloy solder: US Federal; melting point 304 °C	MONOTYPE METAL Pb Sb 5	9% Sn 17% Sb Pb alloy white metal: Further information from Lead Development Association 6% Sb Pb alloy: Designation used by German Standard
FLOWER BRAND	Pb base graphite impregnated bearing metal: Magnolia Anti-Friction Metal Co; constant load & speed DPN: 25.5 UTS: 66	Pb Sb 8	8% Sb Pb alloy: Designation used by German Standard
HOYT 3 M	Pb base bearing metal: Hoyt	Pb Sb 9	8.8% Sb Pb alloy: Designation used by German Standard
HOYT 4 A	Pb base bearing metal: Hoyt	Pb Sb 9X	8.8% Sb Pb alloy: Designation used by German Standard
HOYT 30	30% Sn Pb solder: Contains up to 1.7% Sb; melting range 183-255 °C; Hoyt	Pb Sb 12	12.5% Sb Pb alloy: Designation used by German Standard
HOYT 32	32% Sn 1.8% Sb Pb solder: Melting range 185-243 °C; Hoyt	PLASTIC METAL	Pb base bearing metal: Further information from Lead Development Association
HOYT 35	35% Sn Pb solder: Melting range 183-255 °C; Hoyt	PLUMBERS SOLDER P M	33.3% Sn Pb alloy: Further information from Lead Development Association
HOYT 40	40% Sn Pb solder: Slow setting; may contain Sb; melting range 183-234 °C; Hoyt	QQ L 201 A	99.97% Pb: Refined lead; Platt Metals Ltd
HOYT 142	Sn Pb base bearing metal: Hoyt	QQ L 201 B	99.9% Pb: Sheet; US Federal
HOYT 155	Sn Pb base bearing metal: Hoyt	QQ S 571 B	40% Sn Pb alloy: Solder; US Federal
HOYT STAR	Pb base bearing metal: Hoyt	QQ S 571 D	0.45% Sb 40% Sn Pb: Solder; US Federal; melting range 182-238 °C
h Pb 1	99.9999% Pb: Rod; Light Ltd; high purity metal	QQ S 571 D Ag 1.5	1.5% Ag 1.0% Sn Pb: Solder; US Federal; melting point 309 °C
h Pb 2	99.9999% Pb: Shot; Light Ltd; high purity metal	QQ S 571 D Ag 2.5	2.5% Ag Pb: Solder; US Federal; melting point 304 °C
h Pb 4b	99.9999% Pb: Sheet 1 mm thick; Light Ltd; high purity metal	QQ S 571 D Ag 5.5	5.5% Ag Pb: Solder; US Federal; melting range 304-366 °C
h Pb 73a	99.99% Pb single crystal 6.35 mm diameter x 25 mm: Light Ltd	QQ S 571 D Sn 5	5.0% Sn Pb: Solder; US Federal; melting range 270-313 °C
IBIS	Sn Pb base bearing metal for general purpose: Phosphor Bronze Ltd; available in various grades	QQ S 571 D Sn 10	10% Sn Pb; Solder; US Federal; melting range 269-299 °C
INTERTYPE METAL	3% Sn 12% Pb alloy: White metal; further information from Lead Development Association	QQ S 571 D Sn 20	1.0% Sb 20.5% Sn Pb; Solder; US Federal; melting range 182-277 °C
Kb Pb	0.005% Sb & Sn Pb: Designation used by German Standard	QQ S 571 D Sn 30	1.6% Sb 30.5% Sn Pb: Solder; US Federal; melting range 182-254 °C
Kb Pb Sb	0.12% Sn 0.005% Sn Pb: Designation used by German Standard	QQ S 571 D Sn 35	1.8% Sb 35.5% Sn Pb: Solder; US Federal; melting range 182-246 °C
Kb Pb Sn 2.5	2.5% Sn Pb alloy: Designation used by German Standard	QQ S 571 D Pb 65	0.45% Sb 37% Sn Pb: Solder; US Federal; melting range 182-246 °C
Kb Pb Te 0.04	0.04% Te 0.005% Sn & Sb Pb: Designation used by German Standard	QQ S 571 D Pb 80	0.45% Sb 20% Sn Pb: Solder; US Federal; melting range 182-277 °C
LEAD	Pb: Powder, stick, sheet, wire, foil, etc.; Blackwell; pure metal	RAILWAY A	40% Sn 16% Sb 1% Cu Pb alloy: Bearing metal; Stone Manganese
LEAD 6 A	6% Sb Pb alloy: Wire for spraying; Metco Ltd	REGULUS METAL	6-12% Sb Pb alloy: Casting; see BS 335
LINOTYPE METAL	3% Sn 12% Sb Pb alloy: White metal; further information from Lead Development Association	RM 1 METAL	Pb base hardened bearing metal for heavy dusty conditions: Magnolia Anti-Friction Metal Co
LOCO	Pb base hardened bearing metal for dusty conditions: Magnolia Anti-Friction Metal Co DPN: 36	R Pb	0.7% Sb 1.2% As Pb alloy: Designation used by German Standard
MAGNOLIA METAL	Pb base bearing metal: Further information from the Lead Development Association	SAE 1 A	45% Sn 0.4% Sb (max) Pb alloy: Solder; melting range 182-227 °C
MALTEX X No 1	8.7% Sn 16.7% Sb Pb alloy: Bearing metal; Stone Manganese	SAE 1 B	43% Sn 1.7% Sb Pb alloy: Solder; melting range 185-223 °C
		SAE 2 A	40% Sn 0.4% Sb (max) Pb alloy: Solder; melting range 182-223 °C
		SAE 2 B	38% Sn 1.7% Sb Pb alloy: Solder; melting range 185-232 °C
		SAE 3 A	30% Sn 0.5% Sb (max) Pb alloy: Solder; melting range 182-254 °C

Note. The following abbreviations and units are used in the tables:

DPN	Hardness, diamond pyramid number
UTS	Ultimate tensile strength, N/mm ²
Elong	Elongation, %
Proof	0.1 % proof strength, N/mm ²

$$1 \text{ N/mm}^2 = 0.1 \text{ hbar} = 0.102 \text{ kgf/mm}^2 = 0.06475 \text{ tonf/in}^2 = 145.04 \text{ lbf/in}^2$$

Symbol	Nominal analysis, supplier, condition and remarks.
SAE 3 B	30% Sn 1.0% Sb Pb alloy: Solder; melting range 182-250 °C
SAE 4 A	25% Sn 0.4% Sb (max) Pb alloy; Solder; melting range 182-266 °C
SAE 4 B	25% Sn 1.5% Sb Pb alloy: Solder; melting range 185-260 °C
SAE 5 A	20% Sn 0.4% Sb (max) Pb alloy: Solder; melting range 182-279 °C
SAE 5 B	20% Sn 1.5% Sb Pb alloy: Solder; melting range 185-266 °C
SAE 6 A	15% Sn 0.4% Sb (max) Pb alloy: Solder; melting range 224-290 °C
SAE 6 B	15% Sn 2.7% Sb (max) Pb alloy: Solder; melting range 224-290 °C
SAE 7 A	50% Sn 0.4% Sb (max) Pb alloy: Solder; melting range 182-216 °C
SAE 8 A	35% Sn 0.4% Sb (max) Pb alloy: Solder; melting range 182-245 °C
SAE 9 B	2.7% Sn 5.2% Sb Pb alloy: Solder; melting range 240-290 °C
SAE 13	6% Sn 10% Sb Pb alloy: For bearings
SAE 14	10% Sn 15% Sb Pb alloy: For bearings
SAE 15	1% Sn 15% Sb Pb alloy: For bearings
SAE 16	4.5% Sn 3.5% Sb Pb alloy: For bearings; cast on a sintered matrix
SAE 19	10% Sn Pb alloy: For bearings; this alloy is electroplated onto Cu or Ag based bearings
SAE 190	7% Sn Pb alloy: For bearings; this alloy is electroplated onto Cu or Ag based bearings
SAE 485	3% Sn 46% Cu Pb alloy: For bearings; cast on to steel or sintered backing
SPRABBITT L	0.25% Cu 10% Sn 13% Sb Pb alloy: Wire for spraying; Metco Ltd
STEREOTYPE	6% Sn 16% Sb Pb alloy: White metal; further information from Lead Development Association

GENERAL NOTES ON LEAD

Symbol	Nominal analysis, supplier, condition and remarks.
STA 7 LB1	Pb base bearing metal: Obsolete
STA 7 LB2	Pb base bearing metal: Obsolete; 'Magnolia Metal'
STA 7 TB2A	Pb base bearing metal: Obsolete; 'Babbit'
SX 25	0.25% Cu 2.5% Ag Pb alloy: Soft solder; Sheffield Smelting; melting range 302-305 °C DPN: 8.0 UTS: 37 Elon: 45% Proof: 23
TANDEM HDL	Pb base bearing metal: For shock loads; Eyre Smelting; liquidus 350 °C DPN: 34 UTS: 90 Elon: 1%
TANDEM RM	Pb base bearing metal: For shock loads; Eyre Smelting; liquidus 350 °C DPN: 31 UTS: 85 Elon: 3%
TANDEM SC	Pb base bearing metal: For low speed high duty; Eyre Smelting; liquidus 300 °C DPN: 27 UTS: 75 Elon: 2%
UNS L05001-L05999	Lead based alloys: American Standard System
V Pb Sn 5 Sb 28	5% Sn 28% Sb Pb alloy: Designation used by German Standard
V Pb Sn 30 Sb 6	30% Sn 6% Sb Pb alloy: Designation used by German Standard
W E WATSON BRAND	Sn Pb base bearing metal: For heavy duty purposes; Eyre Smelting; melting range 240-370 °C DPN: 30 UTS: 67 Elon: 1%

Note. The following abbreviations and units are used in the tables:

DPN	Hardness, diamond pyramid number
UTS	Ultimate tensile strength, N/mm ²
Elon	Elongation, %
Proof	0.1 % proof strength, N/mm ²

$$1 \text{ N/mm}^2 = 0.1 \text{ hbar} = 0.102 \text{ kgf/mm}^2 = 0.06475 \text{ tonf/in}^2 = 145.04 \text{ lbf/in}^2$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Tin Sn

Physical properties

Atomic number	50	
Atomic weight	118.7	
Crystal structure	alpha Tetrahedral cubic - 18 °C beta Body-centred tetragonal - 18-161 °C gamma Close-packed hexagonal - 161 °C	
Colour	Bright white	
Specific gravity	alpha 5.81 beta 7.29 gamma 6.56	
Density	alpha 5810 kg/m ³ beta 7290 kg/m ³ gamma 6560 kg/m ³	(0.21 lb/in. ³) (0.26 lb/in. ³) (0.236 lb/in. ³)
Melting point	231.84 °C	
Boiling point	2270 °C	
Specific heat	0.234 J/g °C	(0.056 cal/g °C)
Thermal conductivity	63.2 W/m °C	(15.1 cal/m s °C)
Coefficient of linear expansion (20-100° C)	23.8 × 10 ⁻⁴ /°C	
Latent heat of fusion	59.5 J/g	(14.2 cal/g)
Latent heat of vaporization	2399 J/g	(573 cal/g)
Thermal neutron absorption cross-section	0.65 barns/atom	
Electrical conductivity	14% IACS (copper 100%)	
Specific resistance	1150 microhm mm	
Temperature coefficient of electrical resistance	0.0044/°C	
Electrochemical equivalent	- g/A/h	
Electrode potential	-0.14 V	
Magnetic susceptibility	-0.25 × 10 ⁻⁶	
Young's modulus of elasticity	41.4 × 10 ⁹ N/m ²	(6 × 10 ⁶ lbf/in. ²)
Tensile strength	220 N/mm ²	(15 tonf/in. ²)
Hardness	- DPN	

General notes on tin

Tin is never found in the native state but deposits of the oxide ore - called tinstone - are widespread throughout the world. These deposits are seldom large and it is becoming progressively harder to win the ore.

Metal of 99.75-99.99% purity is commonly available, the most undesirable elements being lead, arsenic and bismuth, all of which embrittle tin.

The metal is silver-white and although it rapidly loses its original lustre it does not readily tarnish or discolour in air. It is a soft, ductile metal, being readily cut by a knife, and in the pure state is not subject to cold work. When block tin or tin pipes are bent a characteristic noise known as 'tin creak' is heard.

Tin is capable of being rolled into very thin sheets, but owing to its low strength cannot be drawn into thin wire.

The present high cost of tin prevents it being used for many purposes for which it is eminently suitable. The complete freedom from toxicity and its extreme ease of manipulation make it ideal as food and drink containers and at one time water pipes and 'silver' paper were made in pure tin.

The largest single use of tin is to coat steel sheet which is subsequently used to manufacture the well-known 'tins' used to store all types of food and drink. Although plastics and, to a greater extent, aluminium are now entering this field, tin plate remains the most economical and one of the commonest means of permanently storing foods of all kinds.

Tin can be applied to sheet steel, cast iron, aluminium, copper and its alloys generally by dip tinning after cleaning and fluxing, but also by electroplating and metal spraying techniques.

The low melting point, high fluidity and good wetting properties ensure excellent coverage by dip tinning, while the position of tin in the electrochemical series ensures that it sacrifices itself to protect the base metal if there is any break in the coating. Tin has comparable corrosion resistance in most atmospheres to zinc and cadmium without any danger from toxicity.

Apart from use in food containers, tin is used to coat copper conductor wires to prevent corrosion and ease the soldering of connections. Pure tin is also used to coat bearing shells and moulds prior to white metalling, and

GENERAL NOTES ON TIN

electrical connections of all types before soldering.

A limited quantity of pure tin piping and foil is still used for piping beer and wrapping foods, such as certain cheeses which corrode aluminium foil, but in general stainless steel and plastics have taken over in these fields.

About 50% of all tin mined is used for these purposes, while the remainder goes to the many alloys which use tin. The tin based alloys are described in the section following, but in addition it is a valuable alloying element, particularly in conjunction with copper. The copper-tin alloys take the generic name 'bronze' and are used where bearing properties, strength and corrosion resistance are required. The alloys are discussed in more detail under Section 14, particularly Section 14K.

Tin is also commonly found in lead alloys where it is used to strengthen. Small quantities increase the creep strength of lead while the lead-tin solders cover a wide range of analysis for a variety of purposes relating to melting temperatures, corrosion resistance and strength. In general the higher the tin content, the higher duty the alloys.

Tin is also added to lead based bearing alloys where it increases the load bearing properties and reduces the frictional coefficient.

It is of interest that tin added to lead almost always has a beneficial effect, whereas lead added to tin results in deleterious embrittlement and reduction in other properties.

Some zinc/tin and nickel/tin alloys are available which find most use as electrodeposits where an attractive silver-type lustre is desired. The nickel-tin deposit can have the analysis adjusted to give a bright plate which requires very little polishing. These deposits are relatively expensive.

There is no doubt that tin would find considerably more use if the price could be reduced. This is unlikely as tin is readily and economically obtained from its ores which are scarce and difficult to win. Tin has been used by mankind for centuries and the discovery of new easily obtained ore deposits is therefore highly improbable.

Following are listed the brand names and available information on pure tin.

Symbol	Nominal analysis, supplier, condition and remarks.	Symbol	Nominal analysis, supplier, condition and remarks.
ASTM B339 BANKA	99-99.8% Sn: Pig; primary metal; covers 5 grades 0.03% Pb 0.006% Cu 0.014% As 99.935% Sn; Brand name; further information from Tin Research Institute	PASS No 1	0.001% Pb 0.0002% Cu 0.003% As 99.975% Sn; Brand name; further information from Tin Research Institute
BS 3252 T1	99.9% Sn: Ingot; high purity tin	PYRMANT	0.048% Pb 0.022% Cu 0.043% As 99.85% Sn; Brand name; further information from Tin Research Institute
BS 3252 T2	99.75% Sn: Ingot; refined tin	REGIS	0.011% Pb 0.001% Cu 0.004% As 99.972% Sn; Brand name; further information from Tin Research Association
BS 3252 T3	99.0% Sn: Ingot; common tin	ROSE	0.002% Pb 0.012% Cu 99.955% Sn: Brand name; further information from Tin Research Association
CORNISH REFINED	0.065% Pb 0.34% Cu 0.03% As 99.82% Sn: Brand name; further information from Tin Research Institute	TIN	Sn: Ingot, sheet, sponge, etc.; Blackwells; primary metal
E S COY Ltd	0.03% Pb 0.012% Cu 0.031% As 99.899% Sn: Brand name; further information from Tin Research Institute	TOYO	0.04% Pb 0.03% Cu 0.03% As 99.8% Sn: Brand name; further information from Tin Research Institute
HAWTHORNE	0.028% Pb 0.028% Cu 0.029% As 99.891% Sn: Brand name; further information from Tin Research Institute	TULIP	0.006% Pb 0.01% Cu 0.008% As 99.87% Sn: Brand name; further information from Tin Research Institute
HERBERTON	0.18% Pb 0.03% Cu 0.037% As 99.715% Sn: Brand name; further information from Tin Research Institute	UMHK	0.12% Pb 0.013% Cu 0.006% As 99.966% Sn: Brand name; further information from Tin Research Institute
LAMB & FLAG	0.38% Pb 0.025% Cu 0.02% As 99.56% Sn: Brand name; further information from Tin Research Institute	ZTM	0.09% Pb 0.04% Cu 0.063% As 99.78% Sn: Brand name; further information from Tin Research Institute
LAMB & FLAG COMMER	0.763% Pb 0.03% Cu 0.029% As 99.128% Sn: Brand name; further information from Tin Research Institute		
LONGHORN 3 STAR	0.04% Pb 0.03% Cu 0.024% As 99.86% Sn: Brand name; further information from Tin Research Institute		
MELLANEAR GUAR 99.9	0.037% Pb 0.009% Cu 0.008% As 99.915% Sn: Brand name; further information from Tin Research Institute		
MELLANEAR REFINED	0.065% Pb 0.022% Cu 0.025% As 99.827% Sn: Brand name; further information from Tin Research Institute		
M & T ELECTROLYTIC	0.008% Pb 0.001% Cu 99.98% Sn: Brand name; further information from Tin Research Association		
M & T No 1	0.01% Pb 0.001% Cu 0.016% As 99.96% Sn: Brand name; further information from Tin Research Institute		

Note. The following abbreviations and units are used in the tables:

DPN	Hardness, diamond pyramid number
UTS	Ultimate tensile strength, N/mm ²
Elon	Elongation, %
Proof	0.1 % proof strength, N/mm ²

$$1 \text{ N/mm}^2 = 0.1 \text{ hbar} = 0.102 \text{ kgf/mm}^2 = 0.06475 \text{ tonf/in}^2 = 145.04 \text{ lbf/in}^2$$

Tin alloys

Specific gravity	7.35-7.95	
Density	7350-7950 kg/m ³	(0.266-0.287 lb/in. ³)
Solidus/liquidus	185-370 °C	
Thermal conductivity	- W/m °C	
Coefficient of linear expansion	- / °C	
Electrical conductivity	-	
Specific resistance	- microhm mm	
Young's modulus of elasticity	- N/m ²	
Impact	-	
Hot strength		
Temperature °C	Tensile strength N/mm ²	
20	31	
100	16	
150	9	

The above properties are typical of the following group, and may not apply exactly to any one specification. It is possible that with certain specifications some of the values may not be applicable.

General metallurgical characteristics

Tin based alloys are expensive and thus are only used when their properties cannot be reproduced using cheaper metals or other methods. Both the principal uses of the tin alloys also employ lead based alloys which are much cheaper. The first and greatest use of tin in the alloy form is as solder. This always has some lead present and may have other elements added for specific purposes.

In general the high tin solders have better corrosion resistance and are stronger than the high lead varieties. Silver increases the strength at temperature. The temperature range over which solders melt is of considerable importance as this decides the workability of the metal. Where high strength, mass produced articles are joined by soldering, a short solidification range is generally desirable to prevent movement and give speedy joints. Where it is necessary to work the solder during solidification, as with plumbers' or electricians' wiped joints, a long slow solidification range is essential. The alloy content decides the liquidus/solidus points and hence the choice of alloy for any particular use.

The second largest use for tin alloys is as a bearing metal where it again has lead as a second best competitor. Tin bearing alloys must be low in lead to prevent embrittlement, generally have under 0.5% lead with up to 10% antimony and 5% copper.

Tin has an excellent frictional coefficient, and even when alloyed is soft enough to accept grit particles, which become embedded and covered with tin, causing little or no scoring. There appears to be some affinity between tin and oil which considerably aids the tin bearing metals and allows them to run for longer periods in oil-starved conditions than most other bearing alloys.

There is also a considerable increase in temperature characteristics over the lead bearing alloys. Except for low load high speed duties, the tin bearing alloys must always be supported by a stronger metal shell on to which they are cast. The bond of tin alloy to steel or bronze must be excellent to prevent exfoliation and failure by plucking. Tin alloy bearings are now being replaced with new design bearings and alternative materials.

Thermal treatment

None of the tin alloys can have any of their characteristics altered by any form of thermal treatment. Because of their relatively low melting point, it is possible to cast tin bearing alloys on to heat treated steel shells. Provided care is taken it is even possible to cast on to steel which has been case hardened. It is not possible to carry out any useful form of heat treatment on the steel backing after casting the tin alloy without the danger of re-melting the tin.

Welding and brazing

These alloys melt far below the temperatures generally associated with the terms 'welding and brazing'. They can however, be very readily joined by the heat fusion process, and large bearings may be repaired by this method.

As stated above many of the alloys are solders used to join other metals where temperature of use and joint strength are low. The techniques for casting the metals, repairing by melting and soldering are generally similar.

TIN ALLOYS

All traces of oxide, oil grease and dirt must first be removed, particular care being taken when the tin alloy has to be bonded to steel. The final cleaning is often carried out by means of a flux, but this must not be relied upon to remove excessive dirt or oxide. The cleaned surface is then 'tinned' using pure tin or a high tin solder, either by dipping in the molten metal or rubbing the heated part with a stick of solder. It is the quality of this tinned layer which largely decides the standard of the final bond. Good quality fluxes considerably help this operation but may be acid in nature, resulting in subsequent corrosion unless carefully removed.

The final operation is the casting or soldering, depending on the function. This will vary from each part but in general it can be said that best results are obtained when a temperature just above the melting point of the tin alloy is used. The base metal should be at almost the same temperature, with rapid quenching as soon as solidification commences.

Flaw detection methods

Crack test. Oil penetrant chalk test. By carefully selecting the method of machining it is generally possible to prove the quality of the tin alloy casting by chalk testing at a stage where it can be easily re-cast if porosity or faulty bonding is present.

X-ray. Not required, except on special purpose high duty bearings.

Ultra-sonic test. This can be used on some bearings after rough machining to prove that the bond is satisfactory. This will also show porosity.

Symbol	Nominal analysis, supplier, condition and remarks.
2.3820	11% Zn Sn alloy: Working temperature 210 °C; German Standard
2.3830	40% Zn Sn alloy: Working temperature 260 °C; German Standard
2.3852	45% Pb 10% Zn + Cd Sn alloy: Working temperature 220 °C; German Standard
A 85	Tin base white metal: For diesel engine bearings; Anti-Attrition Ltd
A 89	Tin base white metal: For marine petrol engine bearings; Anti-Attrition Ltd
A 139	Tin base white metal: For railway carriage bearings; Anti-Attrition Ltd
A 127	Tin base white metal: For electric motor bearings; Anti-Attrition Ltd
A 129	Tin base white metal: For electric motor bearings; Anti-Attrition Ltd
ADASTRAL 'A'	3% Cu 4.5% Sb Sn alloy: Bearing metal; Stone Manganese for BS 3332/1
AERO No 2	Sn base Pb free bearing metal: High load; high speed; Magnolia Anti-Friction Metal Co

Note. The following abbreviations and units are used in the tables:

DPN	Hardness, diamond pyramid number
UTS	Ultimate tensile strength, N/mm ²
Elong	Elongation, %
Proof	0.1 % proof strength, N/mm ²

$$1 \text{ N/mm}^2 = 0.1 \text{ hbar} = 0.102 \text{ kgf/mm}^2 = 0.06475 \text{ tonf/in}^2 = 145.04 \text{ lbf/in}^2$$

Chemical etch. Not required.

Corrosion protection

Temporary. None required for tin alloys. The base metal will require to be treated in the same manner as that described in the appropriate section. Particular care must be taken if fluxes have been used as these are often of a very corrosive nature.

Permanent. No protection required for tin alloys which have excellent corrosion resistance to all except certain acids. The low melting point however, restricts the use of stove enamels in many cases and it must be remembered they are very often used in conjunction with mild steels which have very poor corrosion resistance.

Machinability

Tin alloys are subject to the same difficulties as all soft metals in that they tend to tear rather than cut.

Tools must be sharp and only single point cutting should be attempted. High speeds with low tool pressures and copious coolant as a lubricant give best results.

Uses

Solders for high duty, high strength, corrosion resistant purposes. For tinning before casting lead or tin based bearing metals.

Bearing metals for high duty purposes where the temperatures and pressures do not warrant the use of copper base alloys. The tin alloys have superior self-lubricating properties to all other common metal bearing alloys.

Symbol	Nominal analysis, supplier, condition and remarks.
ALGER METAL	Gn Sb alloy containing 10% Sb 0.3% Cu Sn alloy: Source unknown
ALGIERS METAL	10% Sb 0.3% Cu Sn alloy: Source unknown
ALICIA	Sn base bearing metal: Medium duty; Magnolia Anti-Friction Metal Co
AMS 4800 A	4.5% Cu 4.5% Sb Sn alloy: Bearing metal; 'Babbit'
ARGENTINE METAL	14.5% Sb Sn alloy: For toys; source unknown
ARGENTINE METAL	15% Sb Sn alloy
ARMA	Sb Cu Sn base bearing metal: For high duty loads; Phosphor Bronze Co
ARSENIC-TIN	5% As Sn alloy: Blackwells; primary metal
ASHBERRY	16% Sb 3% Cb 2% Zn Sn alloy: White metal; information from Tin Research Institute
ASTM B23/1	4.5% Sb 4.5% Cu 0.3% Pb Sn alloy: Bearing metal; melting point 223 °C; compressive strength 90 N/mm ² DPN: 17
ASTM B23/2	7.5% Sb 0.3% Pb 3.5% Cu Sn alloy: Bearing metal; melting point 241 °C; compressive strength 100 N/mm ² DPN: 24
ASTM B23/3	8% Sb 0.3% Pb 8% Cu Sn alloy: Bearing metal; melting point 240 °C; compressive strength 120 N/mm ² DPN: 27
ASTM B3290 A	50% Pb Sn: Solder; melting range 183-216 °C

TIN ALLOYS

Symbol	Nominal analysis, supplier, condition and remarks.	Symbol	Nominal analysis, supplier, condition and remarks.
ASTM B32/50 B	50% Pb 0.3% Sb Sn: Solder; melting range 183-216 °C	LA3BITT No 1	Sn base bearing metal: For high speed use; Eyre Smelting Co; melting point 376 °C DPN: 33 UTS: 90 Elon: 5%
ASTM B32/60 A	40% Pb Sn: Solder; melting range 183-190 °C	BRITANNIA	7% Sb 2% Cu Sn alloy: White metal; information from Tin Research Institute
ASTM B32/60 B	40% Pb 0.3% Sb Sn: Solder; melting range 183-190 °C	BS 2B 21	4% Cu 9% Sb Sn alloy: White metal; bearing metal
ASTM B32/63 A	37% Pb Sn: Solder (eutectic solder); melting point 183 °C	BS 2B 22	4% Cu 4% Sb 0.3% Ni Sn alloy: White metal; bearing metal
ASTM B32/63 B	37% Pb 0.3% Sb Sn: Solder (eutectic solder); melting point 183 °C	BS 219/95 A	5% Sb 0.07% Pb Sn alloy: Solder; melting range 236-243 °C
ASTM B32/70 A	30% Pb Sn: Solder; melting range 183-192 °C	BS 219A	35% Pb 0.6% Sb Sn alloy: Solder; melting range 183-185 °C
ASTM B32/70 B	30% Pb 0.3% Sb Sn: Solder; melting range 183-192 °C	BS 219E	47% Pb 2.7% Sb Sn alloy: Solder; melting range 185-204 °C
ASTM B32/95 TA	5% Sb Sn: Solder; melting range 234-240 °C	BS 219F	50% Pb 0.5% Sb (max) Sn alloy: Solder; melting range 183-212 °C
ASTM B102 CY44A	4.5% Sb 4.5% Cu Sn alloy: Bearing metal	BS 219K	40% Pb 0.5% Sb (max) Sn alloy: Solder; melting range 183-188 °C
ASTM B102 PY1815A	15% Sb 18% Pb 2% Cu Sn alloy: Bearing metal	BS 3332/1	7% Sb 3% Cu Sn alloy: Bearing metal
ASTM B102 YC135A	13% Sb 5% Cu Sn alloy: Bearing metal	BS 3332/2	9% Sb 4% Cu Sn alloy: Bearing metal
ATLAS	Zn Sn base bearing alloy: For stem tube bearings;	BS 3332/3	10% Sb 5% Cu 4% Pb Sn alloy: Bearing metal
ADMIRALTY 'A'	Eyre Smelting Co.; melting range 200-425 °C; compressive strength 60 N/mm ² DPN: 30 UTS: 75	BS 3332/4	12% Sb 3% Cu 10% Pb Sn alloy: Bearing metal
ATLAS	Sn base Pb free bearing metal: For steam turbines; Eyre Smelting Co; melting range 240-325 °C; compressive strength 70 N/mm ² DPN: 31 UTS: 90	BS 3332/5	7% Sb 3% Cu 15% Pb Sn alloy: Bearing metal
ADMIRALTY 'B'		BS 3332/6	10% Sb 3% Cu 27% Pb Sn alloy: Bearing metal
ATLAS AMACOL	Pb Sn base bearing alloy: For reciprocating engines; Eyre Smelting Co; melting range 190-370 °C; compressive strength 70 N/mm ² DPN: 33 UTS: 90	BS 3332/9	1.5% Cu 30% Zn Sn alloy: Bearing metal
ATLAS D8	Sn base bearing metal: For diesels; Eyre Smelting Co; melting range 240-405 °C; compressive strength 70 N/mm ² DPN: 35 UTS: 90	CERROBEND	Bi Cd Pb Sn alloy: Casting filler metal for tube bending; Mining & Chemical Products Ltd; melting point 70 °C; expands on solidification
ATLAS DD	Cn Sn base Pb free bearing metal: For diesels; Eyre Smelting Co; melting range 240-370 °C; compressive strength 70 N/mm ² DPN: 32 UTS: 80	CERROMATRIX	Bi Sb Pb Sn alloy: Casting for short run dies; Mining & Chemical Products Ltd; melting range 102-227 °C; expands on solidification
ATLAS DG	Sn base bearing metal: For diesels; Eyre Smelting Co; melting range 230-376 °C; compressive strength 70 N/mm ² DPN: 33 UTS: 90	CERROSEAL - 35	50% Sn Sn alloy: Mining & Chemical Products Ltd; melting range 117-127 °C; for fusible links
ATLAS FDS	Sn base Pb free bearing metal: For steam turbines; Eyre Smelting Co; melting range 240-330 °C; compressive strength 70 N/mm ² DPN: 32 UTS: 90	CERROTRU	Bi Sn alloy: Casting for pattern metal; Mining & Chemical Products Ltd; melting point 137.5 °C; no volume changes on solidification
ATLAS INFRANGA	Sn base Pb free bearing metal: For high speed diesels; Eyre Smelting Co; melting range 240-330 °C; compressive strength 70 N/mm ² DPN: 32 UTS: 90	CONDENSER FOIL	15% Pb 2% Sb Sn alloy: Used as the dielectric in electronic industry; origin unknown
ATLAS TENAXAS	Pb Sn base bearing alloy: For reciprocating engines; Eyre Smelting Co; melting range 186-340 °C; compressive strength 70 N/mm ² DPN: 30 UTS: 80	CUSIL	20% Cu Ag alloy: Free of trapped carbon; melting point 780 °C; Brazing alloy; Wesgo
AUTO 'C'	4% Pb 11% Sb 4% Cu Sn alloy: Bearing metal; Stone Manganese for BS 3332/3	DECARBONIZED	20% Cu Ag alloy: For brazing; melting point 780 °C; Wesgo
BABBITT	Sb Cu Pb Sn white metal bearing alloys: Information from Tin Research Institute	CUSIL VT	
		CY 44A	4.5% Sb 4.5% Cu Sn alloy: Designation used by ASTM
		DE	Sn base Pb free bearing metal: High load; high speed; Magnolia Anti-Friction Metal Co 99.0% Sn: Supplied in four grades
		DIN 1704	
		DIN 1707 L Sn 50	46% Pb 3.3% Sb Sn alloy
		DIN 1707 L Sn 60	35% Pb 3.5% Sb Sn alloy
		DIN 1707 L Sn 90	8% Pb 1.3% Sb Sn alloy
		DIN 1742 Sg Sn 50	4% Cu 33% Pb 13% Sb Sn alloy DPN: 26 UTS: 45 Elon: 2%
		DIN 1742 Sg Sn 60	4% Cu 23% Pb 13% Sb Sn alloy DPN: 28 UTS: 45 Elon: 1.5%
		DIN 1742 Sg Sn 70	5% Cu 10% Pb 15% Sb Sn alloy DPN: 30 UTS: 100 Elon: 1%
		DIN 1742 Sg Sn 75	5% Cu 3% Pb 17% Sb Sn alloy DPN: 30 UTS: 100 Elon: 2%
		DIN 1742 Sg Sn 78	4% Cu 1% Pb 17% Sb Sn alloy DPN: 30 UTS: 180 Elon: 3%
		DIN 8512	45% Pb 10% Zn + Cd Sn alloy: Working temperature 220 °C
		L Sn Pb Zn	
		DIN 8512	11% Zn Sn alloy: Working temperature 210 °C
		L Sn Zn 10	
		DIN 8512	40% Zn Sn alloy: Working temperature 260 °C
		L Sn Zn 40	
		DSYL	7% Cu 9% Sb 0.3% Pb Sn alloy: Bearing metal; Stone Manganese for BS 3332/2

Note. The following abbreviations and units are used in the tables:

DPN	Hardness, diamond pyramid number
UTS	Ultimate tensile strength, N/mm ²
Elon	Elongation, %
Proof	0.1 % proof strength, N/mm ²

$$1 \text{ N/mm}^2 = 0.1 \text{ hbar} = 0.102 \text{ kgf/mm}^2 = 0.06475 \text{ tonf/in}^2 = 145.04 \text{ lbf/in}^2$$

TIN ALLOYS

Symbol	Nominal analysis, supplier, condition and remarks.	Symbol	Nominal analysis, supplier, condition and remarks.
DTD 214	3.5% Cu 7% Sb 5% Cb Sn alloy: White metal; suitable for bearings	QQ M 151/1	4.0% Sb 4.0% Cu Sn alloy: For bearings; US Federal
DTD 244	6% Cu 6.5% Sb 0.5% Ni Sn alloy: White metal; suitable for bearings	QQ M 161/2	7.5% Sb 4.0% Cu Sn alloy: For bearings; US Federal
h Sn 1	99.9999% Sn: Bar; Light Ltd; high purity metal	QQ M 161/3	8.0% Sb 8.0% Cu 0.3% Pb Sn alloy: For bearings; US Federal
h Sn 73	99.99% Sn: Single crystal; 25 mm x 25 mm; Light Ltd	QQ M 161/4	13% Sb 5.5% Cu 0.2% Pb Sn alloy: For bearings; US Federal
HOYT 11D	Sb Cu Sn base bearing metal: Hoyt Ltd	QQ M 161/5	10% Sb 3.0% Cu 25% Pb Sn alloy: For bearings; US Federal
HOYT 11R	Sn base Pb free bearing metal: Hoyt Ltd	QQ S 571 A	50% Pb Sn alloy: Solder; US Federal
HOYT 11Z3	Sn base Pb free bearing metal: Hoyt Ltd	QQ S 571b Sn 60	0.45% Sb 40% Pb Sn: Solder; US Federal; melting range 182-189 °C
HOYT 38	Sb Cu Sn base bearing metal: Hoyt Ltd	QQ S 571d P 70	0.45% Sb 31% Sn: Solder; US Federal; melting range 182-254 °C
HOYT 71	Sb Cu Sn base bearing metal: Hoyt Ltd	QQ S 571d Sb 5	5.0% Sb Sn: Solder; US Federal; melting range 232-240 °C
HOYT 133C	Sn base bearing metal: Hoyt Ltd	QQ S 571d Sn 50	0.45% Sb 50% Pb Sn: Solder; US Federal; melting range 182-216 °C
HOYT 156B	Sn base bearing metal: Hoyt Ltd	QQ S 571d Sn 62	0.45% Sb 38% Pb Sn: Solder; US Federal; melting range 177-189 °C
HOYT 175	Sn base bearing metal: Hoyt Ltd DPN: 37 UTS: 80 Elou: 1.5%	QQ S 571d Sn 63	0.45% Sb 37% Pb Sn: Solder; US Federal; melting point 182 °C
HOYT BLOWPIPE	35.5% Pb Sn: Solder; quick setting; melting range 183-185 °C; Hoyt	QQ S 571d Sn 70	0.45% Sb 29% Pb Sn: Solder; US Federal; melting range 182-193 °C
SOLDER		QQ S 571d Sn 96	0.1% Pb (max) 4.0% Ag Sn: Solder; US Federal; melting point 221 °C
HOYT FIFTY	50% Pb Sn: Solder; may contain Sb; melting range 183-212 °C; Hoyt	RAILWAY C	5% Pb 11% Sb 4% Cu Sn alloy: Bearing metal; Stone Manganese for BS 3332/3
HOYT MARINE A	Sn base bearing metal: Hoyt Ltd	SAE 10	4.5% Cu 4.5% Sb Sn alloy: For bearings
HOYT SIXTY	40% Pb Sn: Solder; melting range 183-188 °C; Hoyt	SAE 11	5.7% Cu 6.7% Sb Sn alloy: For bearings
HOYTICE	Sn base bearing metal: Hoyt Ltd DPN: 27 UTS: 65 Elou: 6%	SAE 12	3.5% Cu 7.5% Sb Sn alloy: For bearings
L Sn 50	46% Pb 3.3% Sb Sn alloy: Designation used by German Standard	Sg Sn 50	4% Cu 33% Pb 13% Sb Sn alloy: Designation used by German Standard
L Sn 60	45% Pb 3.2% Sb Sn alloy: Designation used by German Standard	Sg Sn 60	4% Cu 23% Pb 13% Sb Sn alloy: Designation used by German Standard
L Sn 90	8% Pb 1.3% Sb Sn alloy: Designation used by German Standard	Sg Sn 70	5% Cu 10% Pb 15% Sb Sn alloy: Designation used by German Standard
L Sn Pb Zn	45% Pb 10% Zn + Cd Sn alloy: Designation used by German Standard	Sg Sn 75	5% Cu 3% Pb 17% Sb Sn alloy: Designation used by German Standard
L Sn Zn 10	11% Zn Sn alloy: Designation used by German Standard	Sg Sn 78	4% Cu 1% Pb 17% Sb Sn alloy: Designation used by German Standard
L Sn Zn 40	40% Zn Sn alloy: Designation used by German Standard	SILVER BABBITT	Ag Cd Ni Sn base bearing metal: Highest duty; Magnolia Anti-Friction Metal Co DPN: 33.6
LION BRAND	7% Cu 5% Sb Sn alloy: White metal; Blackwells; marine; main bearings	SOVEREIGN 8TS	3.0% Cu 8.9% Sb 1.1% Cd Sn alloy: Bearing metal; Glacier Metals Co DPN: 30 UTS: 98 Elou: 15% Proof: 64
LM 10A	Ag Cu Sn alloy: Soft Solder; Johnson Matthey; electrical conductivity 13% IACS; melting range 214-275 °C UTS: 70 Elou: 16%	SOVEREIGN 8TS	8.8% Sb 3.0% Cu 1% Cd Sn: Bearing metal; Glacier Metals DPN: 30 UTS: 100 Elou: 16% Proof: 80
NAVY	4% Cu 5% Sb 15% Pb Sn alloy: Bearing metal; Stone Manganese for BS 3332/5	SPRA BABBITT	3.5% Cu 0.25% Pb 7.5% Sb Sn alloy: Wire for spraying; Metco
No 75	Sn base bearing metal: High speed; medium load; Magnolia Anti-Friction Metal Co DPN: 28 UTS: 80	STA 7 TB1B	8% Sb 8% Cu 0.3% Pb Sn alloy: Bearing metal; obsolete
OE 1 METAL	Sn base bearing metal: High speed; medium load; Magnolia Anti-Friction Metal Co	STA 7 TB2	Sn base bearing metal: Obsolete
OE 2 METAL	Sn base bearing metal: Medium duty; Magnolia Anti-Friction Metal Co	STERN TUBE METAL	30% Zn 1.5% Cu Sn alloy: White metal; information from Tin Research Institute
PEWTER	12% Pb Sn alloy: White metal; information from Tin Research Institute	SX 4	4% Ag Sn alloy: For soldering; Sheffield Smelting Co; melting range 221-224 °C DPN: 14 UTS: 50 Elou: 43% Proof: 65
PLUMBSOL	Ag Sn base soft solder: Johnson Matthey; electrical conductivity 13.3% IACS; melting range 221-225 °C UTS: 2.5 Elou: 60%	TANDEM DE	Sn base bearing metal: For reciprocating engines; Eyre Smelting Co; melts at 315 °C DPN: 27 UTS: 80 Elou: 24%
PY 1815A	15% Sb 18% Pb 2% Cu Sn alloy: Designation used by ASTM range	TANDEM HP	Sn base bearing metal: For reciprocating engines; Eyre Smelting Co; melts at 330 °C DPN: 32 UTS: 80 Elou: 6%
Note. The following abbreviations and units are used in the tables:		TANDEM ME	Sn base bearing metal: For high speed use; Eyre Smelting Co; melts at 370 °C DPN: 32 UTS: 90 Elou: 6%
DPN	Hardness, diamond pyramid number		
UTS	Ultimate tensile strength, N/mm ²		
Elou	Elongation, %		
Proof	0.1 % proof strength, N/mm ²		
1 N/mm ² =0.1 hbar=0.102 kgf/mm ² =0.06475 tonf/in ² =145.04 lbf/in ²			

TIN ALLOYS

Symbol	Nominal analysis, supplier, condition and remarks.	Symbol	Nominal analysis, supplier, condition and remarks.
TANDEM ML	Sn base bearing metal: For high speed use; Eyre Smelting Co; melts at 340 °C DPN: 30 UTS: 80 Elong: 3%	WAGNER'S ALLOY	10% Sb 1% Cu 3% Zn 0.8% Bi Sn alloy: Origin unknown
TANDEM PLUS	Sn base bearing metal: For reciprocating engines; Eyre Smelting Co; melts at 350 °C DPN: 33 UTS: 90 Elong: 16%	WARNE'S METAL	26% Ni 26% Bi 11% Co Sn alloy: Used for jewellery; origin unknown
TC	Ag Cd Ni Sn base bearing metal: Highest duty; Magnolia Anti-Friction Metal Co UTS: 95	WELCH'S ALLOY	48% Ag Sn alloy: Used for dental purposes; origin unknown
TCS	Ag Cd Ni Sn base bearing metal: Highest duty; Magnolia Anti-Friction Metal Co; silver 'Babbitt' DPN: 33.6	WAMAYO METAL	4.5% Cu 4.5% Sb 1% Pb 1% Ni 1% Co (max) Sn alloy: Used for main bearings in internal combustion engines; origin unknown
TENAXAS AJ	Pb Sn base bearing metal; For reciprocating engines; Eyre Smelting Co; melting range 186-340 °C DPN: 30 UTS: 80 Elong: 3.5%	YC 135A	13% Sb 5% Cb Sn alloy: Designation used by ASTM
TINMANS SOLDER	33.3% Pb Sn alloy: White metal; Information from Tin Research Institute	ZINN	0.7% Pb 0.3% Cu Sn alloy: Used for hard service bearings; origin unknown
TURBEX	Sn base Pb free bearing metal: High speed; high load; Magnolia Anti-Friction Metal Co DPN: 25.5 UTS: 80		
UNDER-WATER	30% Zn 1.5% Cu 0.5% Pb 0.5% Sb Sn alloy: Bearing metal; Stone Manganese for BS 3332/9		
VULCAN	Sn base bearing metal: For high duty loads; Phosphor Bronze Ltd		

Note. The following abbreviations and units are used in the tables:

DPN	Hardness, diamond pyramid number
UTS	Ultimate tensile strength, N/mm ²
Elong	Elongation, %
Proof	0.1 % proof strength, N/mm ²

$$1 \text{ N/mm}^2 = 0.1 \text{ hbar} = 0.102 \text{ kgf/mm}^2 = 0.06475 \text{ ton/fin}^2 = 145.04 \text{ lb/fin}^2$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Cadmium Cd

Physical properties

Atomic number	48	
Atomic weight	112.4	
Crystal structure	Hexagonal	
Colour	White with blue tinge	
Specific gravity	8.64	
Density	8640 kg/m ³	(0.305 lb/in. ³)
Melting point	321 °C	
Boiling point	767 °C	
Specific heat	0.230 J/g °C	(0.055 cal/g °C)
Thermal conductivity	92 W/m °C	(22 cal/m s °C)
Coefficient of linear expansion (20–100° C)	30 × 10 ⁻⁶ /°C	
Latent heat of fusion	55.3 J/g	(13.2 cal/g)
Latent heat of vaporization	1197 J/g	(286 cal/g)
Thermal neutron absorption cross-section	2.400 barns/atom	
Electrical conductivity	22.5% IACS (copper 100%)	
Specific resistance	77 microhm mm	
Temperature coefficient of electrical resistance	0.0042/°C	
Electrochemical equivalent	2.09 g/A/h	
Electrode potential	-0.403 V	
Magnetic susceptibility	0.18 × 10 ⁻⁶	
Young's modulus of elasticity	55.2 × 10 ⁹ N/m ²	(8 × 10 ⁶ lbf/in. ²)
Tensile strength	75 N/mm ²	(5 tonf/in. ²)
Hardness	22 DPN	

General notes on cadmium

Approximately 60% of the world's supply of cadmium is used as electroplating anodes for deposition of a corrosion protection coating. Although much dearer than zinc, cadmium plating is commonly used and is specified for aircraft use wherever steel has to be protected by plating. It must not be used in contact with food as it can be poisonous if ingested. Cadmium oxide fumes are toxic and are a hazard if allowed to accumulate during melting, welding or brazing.

Metallic cadmium is a neutron absorber and is used in rod form, or in electroplated graphite rods as fission moderators in atomic piles.

There are very few alloys based on cadmium, but a few brazing materials have been developed which have a high shear strength. These are zinc/cadmium or silver/cadmium, and are used for tipping high speed tools. There are also a few cadmium based alloys used for bearing ma-

terials.

Cadmium is used as an alloying element with copper, when up to 1% cadmium is added to increase the tensile strength with very little reduction in electrical conductivity. These alloys are used for traction conductor wires and for long span transmission conductor wires.

With lead, cadmium forms an alloy which does not work harden, and has been used for cable sheathing purposes, where a harder coating than pure lead is required.

Low melting point alloys used for fusible links generally have some cadmium content. Where alloys with cadmium are tested above their melting point for any reason, great care is necessary to prevent ingestion of cadmium fumes, which are now known to be extremely toxic.

Note. The following abbreviations and units are used in the tables:

DPN	Hardness, diamond pyramid number
LTS	Ultimate tensile strength, N/mm ²
Elon	Elongation, %
Proof	0.1 % proof strength, N/mm ²

$$1 \text{ N/mm}^2 = 0.1 \text{ hbar} = 0.102 \text{ kgf/mm}^2 = 0.06475 \text{ tonf/in}^2 = 145.04 \text{ lbf/in}^2$$

Symbol	Nominal analysis, supplier, condition and remarks.
2.2480	20% Zn Cd brazing alloy: Working temperature 280 °C; German Standard
PC 2686/1	99.95% Cd (Sb + As + Th 0.01% (max)) anodes: Cast: rolled or extruded
CADMIUM	Cd metal: In form of powder, stick, sheet, etc.: Blackwell: primary metal
CAZIN	17.4% Zn Cd alloy: For soldering steel cables: origin unknown: melting point 263 °C

Symbol	Nominal analysis, supplier, condition and remarks.
DIN 8512 L Cd Zn 20	20% Zn Cd brazing alloy: Working temperature 280 °C
ELMET SILNO	Ag + Ni with Ag and Cd oxides: Sintered material; Metro Cutanit Ltd; range of materials
h Cd 1	99.9999% Cd rod 13 mm diameter: Light Ltd; high purity metal
L Cd Zn 20	20% Zn Cd brazing alloy: Designation used by German Standard
LM 5	Ag Cd base soft solder: Melting range 338-390 °C; Johnson Matthey; electrical conductivity 22.4% IACS UTS: 130 Elong: 25%
HT 5	16.5% Zn 5% Ag Cd alloy: Braze metal; melting range 270-285 °C; Sheffield Smelting Co. DPN: 60 UTS: 200 Elong: 8% Proof: 150

GENERAL NOTES ON CADMIUM

Symbol	Nominal analysis, supplier, condition and remarks.
SAE 18	1.3% Ni Cd alloy: For bearings
SAE 180	0.6% Cu 0.7% Ag Cd alloy: For bearings

Note. The following abbreviations and units are used in the tables:

DPN	Hardness, diamond pyramid number
UTS	Ultimate tensile strength, N/mm ²
Elong	Elongation, %
Proof	0.1 % proof strength, N/mm ²

$$1 \text{ N/mm}^2 = 0.1 \text{ hbar} = 0.102 \text{ kgf/mm}^2 = 0.06475 \text{ tonf/in}^2 = 145.04 \text{ lbf/in}^2$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก 3

ข้อมูลเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันแพทเทิร์นของโลหะบิสมัท ตะกั่ว ดีบุก แคนเดียม และ PbBi (จาก JCPDS) และข้อมูลจากการทดลอง

ข้อมูลจากรายงาน

50519 BI BISMUTH, SYN				40686 PB LEAD, SYN			
	2 θ	d value	Intensity		2 θ	d value	Intensity
1:	22.476	3.953	9	1:	31.281	2.857	100
2:	23.737	3.745	3	2:	36.262	2.475	50
3:	27.085	3.289	100	3:	52.186	1.751	31
4:	37.938	2.370	40	4:	62.037	1.495	32
5:	39.623	2.273	41	5:	65.153	1.431	9
6:	44.541	2.033	8	6:	76.869	1.239	2
7:	45.879	1.976	3	7:	85.351	1.136	10
8:	45.975	1.972	10	8:	88.144	1.107	7
9:	46.743	1.942	1	9:	99.248	1.011	6
10:	48.674	1.869	23	10:	107.807	.953	5
11:	56.052	1.639	9	11:	123.203	.876	1
12:	59.276	1.558	6	12:	133.769	.838	9
13:	61.113	1.515	2	13:	138.000	.825	4
14:	62.140	1.493	13				
15:	64.526	1.443	16				
16:	67.473	1.387	4				
17:	70.687	1.332	11				
18:	71.447	1.319	1				
19:	71.882	1.312	6				
20:	73.536	1.285	2				
21:	75.299	1.261	2				
22:	76.306	1.247	1				
23:	81.101	1.185	2				
24:	84.992	1.140	4				
25:	85.231	1.138	4				
26:	87.044	1.119	2				
27:	89.503	1.094	4				
28:	91.636	1.074	5				
29:	94.329	1.050	2				
30:	95.504	1.041	2				
31:	97.358	1.026	3				
32:	101.872	.992	1				
33:	102.716	.986	3				
34:	105.007	.971	2				
35:	109.014	.946	2				
36:	111.798	.930	4				
37:	112.272	.928	2				
38:	114.035	.918	2				
39:	116.341	.907	2				
40:	119.071	.894	2				

230345 PB			
	2 θ	d value	Intensity
1:	31.648	2.825	75
2:	33.210	2.695	30
3:	35.705	2.513	100
4:	46.455	1.953	10
5:	56.252	1.634	70
6:	61.113	1.515	20
7:	66.837	1.399	35
8:	68.537	1.368	35
9:	75.746	1.255	5
10:	87.899	1.110	15
11:	94.719	1.047	20
12:	101.732	.993	10
13:	113.711	.920	15

260215 PB BI			
	2 θ	d value	Intensity
1:	26.631	3.344	5
2:	29.725	3.003	15
3:	30.914	2.810	60
4:	31.189	2.865	100
5:	32.290	2.770	70
6:	33.948	2.639	20
7:	38.032	2.364	30
8:	39.154	2.299	10
9:	41.410	2.179	10
10:	44.541	2.033	20
11:	45.209	2.004	20
12:	56.853	1.618	10
13:	57.456	1.603	20
14:	59.175	1.560	10
15:	60.499	1.529	25
16:	61.934	1.497	30
17:	64.317	1.447	20

260214 BI			
	2 θ	d value	Intensity
1:	33.487	2.674	100
2:	48.093	1.890	16
3:	59.785	1.546	30
4:	70.255	1.339	18
5:	79.944	1.199	25
6:	89.379	1.095	5
7:	98.840	1.014	14
8:	108.408	.950	2
9:	119.071	.894	6
10:	129.376	.850	14
11:	144.666	.808	5

40673	SN	TIN, SYN	2 θ	d value	Intensity
1:	30.640		2.915		100
2:	32.015		2.793		90
3:	43.874		2.062		34
4:	44.827		2.020		74
5:	55.253		1.661		17
6:	62.450		1.486		23
7:	63.693		1.460		13
8:	64.526		1.443		20
9:	72.319		1.305		15
10:	73.196		1.292		15
11:	79.369		1.206		20
12:	89.379		1.095		13
13:	95.110		1.044		3
14:	95.504		1.041		5
15:	96.692		1.031		2
16:	97.358		1.026		5
17:	103.283		.982		5
18:	104.862		.972		2
19:	111.641		.931		3
20:	111.956		.929		13
21:	113.228		.923		5
22:	114.035		.918		5
23:	120.479		.887		4
24:	123.203		.876		2
25:	130.294		.849		4
26:	130.928		.847		10
27:	133.321		.839		4
28:	144.376		.809		5
29:	145.849		.806		3

191365	SN	2 θ	d value	Intensity
1:	34.225		2.618	55
2:	35.984		2.494	100
3:	49.158		1.552	20
4:	54.458		1.684	5
5:	62.450		1.486	35
6:	65.888		1.416	15
7:	72.100		1.309	10
8:	76.418		1.245	10

50674	CD	CADMILUM, SYN	2 θ	d value	Intensity
1:			31.831	2.809	65
2:			34.587	2.584	32
3:			38.312	2.347	100
4:			47.803	1.901	32
5:			61.010	1.517	26
6:			62.243	1.490	19
7:			66.520	1.404	3
8:			71.555	1.318	17
9:			73.306	1.290	2
10:			75.523	1.258	13
11:			77.207	1.235	4
12:			82.150	1.172	3
13:			92.910	1.063	5
14:			96.692	1.031	3
15:			97.760	1.022	4
16:			104.285	.976	2
17:			106.469	.962	9
18:			108.257	.951	1
19:			110.704	.936	1
20:			113.389	.922	4
21:			122.099	.880	2
22:			125.858	.865	10
23:			127.034	.861	2
24:			130.716	.847	1
25:			138.996	.822	5
26:			148.020	.801	2

50390	SN	2 θ	d value	Intensity
1:	23.647		3.759	100
2:	39.248		2.294	83
3:	46.359		1.957	53
4:	56.653		1.623	12
5:	62.243		1.490	20
6:	71.012		1.326	21
7:	76.082		1.250	11
8:	84.275		1.148	6
9:	89.131		1.098	10
10:	97.225		1.027	9
11:	102.153		.990	4
12:	110.549		.937	3
13:	115.840		.909	7
14:	125.279		.867	13
15:	131.355		.845	12

181380	SN	2 θ	d value	Intensity
1:	33.210		2.695	50
2:	34.872		2.571	100
3:	47.610		1.908	40
4:	52.481		1.742	10
5:	60.396		1.531	30
6:	63.485		1.464	5
7:	69.716		1.348	5

Bi

Peak table				
Nr.	2θ	d	I	I/I ₀
1	22.440	3.959	249.0	3
2	23.760	3.742	102.0	1
3	27.160	3.281	7157.0	100
4	37.960	2.368	1751.0	24
5	39.600	2.274	1707.0	24
6	44.560	2.032	666.0	9
7	46.000	1.971	280.0	4
8	48.680	1.869	596.0	8
9	56.000	1.641	620.0	9
10	59.320	1.557	196.0	3
11	61.120	1.515	108.0	2
12	62.160	1.492	677.0	9
13	64.480	1.444	402.0	6
14	67.440	1.388	274.0	4

Cd

Peak table				
Nr.	2θ	d	I	I/I ₀
1	31.840	2.808	2932.0	82
2	34.760	2.579	918.0	26
3	38.360	2.345	3582.0	100
4	47.840	1.900	675.0	19
5	61.080	1.516	623.0	17
6	62.280	1.490	407.0	11
7	66.520	1.404	200.0	6

Bi:Pb:Sn = 50:40:10

Pb

Peak table				
Nr.	2θ	d	I	I/I ₀
1	31.320	2.854	4619.0	100
2	36.320	2.471	2323.0	50
3	62.280	1.748	1095.0	24
4	62.200	1.491	1077.0	23
5	65.280	1.428	319.0	7

Peak table				
Nr.	2θ	d	I	I/I ₀
1	22.240	3.994	54.0	1
2	27.000	3.300	2223.0	42
3	29.240	3.052	333.0	6
4	30.680	2.912	5334.0	100
5	31.760	2.815	386.0	7
6	33.160	2.699	1475.0	28
7	37.760	2.380	257.0	7
8	39.520	2.278	638.0	12
9	43.000	2.102	412.0	8
10	44.600	2.030	177.0	3
11	45.880	1.976	81.0	2
12	48.600	1.872	239.0	4
13	52.040	1.756	211.0	4
14	55.040	1.667	52.0	1
15	56.280	1.633	661.0	12
16	59.080	1.562	58.0	1
17	60.920	1.519	60.0	1
18	61.720	1.502	251.0	5
19	63.200	1.470	168.0	3
20	64.080	1.452	360.0	7
21	67.200	1.392	52.0	1

Sn

Peak table				
Nr.	2θ	d	I	I/I ₀
1	30.600	2.919	1254.0	23
2	32.000	2.795	5464.0	100
3	43.840	2.063	275.0	5
4	44.880	2.018	1304.0	24
5	55.320	1.659	225.0	4
6	62.520	1.484	1022.0	19
7	63.760	1.458	95.0	2
8	64.560	1.442	162.0	3

Bi:Pb:Cd = 50:40:10

Peak table				
Nr.	2θ	d	I	I/I ₀
1	22.400	3.966	70.0	1
2	23.760	3.742	49.0	0
3	27.120	3.285	4694.0	37
4	29.360	3.040	195.0	2
5	30.760	2.904	12644.0	100
6	31.800	2.812	192.0	2
7	33.240	2.693	949.0	8
8	34.720	2.582	174.0	1
9	37.920	2.371	565.0	4
10	38.320	2.347	570.0	5
11	39.600	2.274	1366.0	11
12	43.080	2.098	363.0	3
13	44.480	2.035	132.0	1
14	46.000	1.971	113.0	1
15	47.840	1.900	90.0	1
16	48.720	1.867	295.0	2
17	52.120	1.753	116.0	1
18	56.000	1.641	325.0	3
19	56.360	1.631	813.0	6
20	59.280	1.558	67.0	1
21	61.080	1.516	111.0	1
22	61.760	1.501	174.0	1
23	62.200	1.491	225.0	2
24	63.240	1.469	92.0	1
25	64.160	1.450	770.0	6
26	67.480	1.387	48.0	0

Bi-Pb (50:50)

Peak table				
Nr.	2θ	d	I	I/I ₀
1	27.120	3.285	4910.0	21
2	29.360	3.040	139.0	1
3	30.760	2.904	23869.0	100
4	33.240	2.693	582.0	2
5	37.880	2.373	421.0	2
6	39.600	2.274	994.0	4
7	43.040	2.100	277.0	1
8	44.480	2.035	162.0	1
9	45.960	1.973	111.0	0
10	48.680	1.869	231.0	1
11	52.080	1.755	74.0	0
12	56.000	1.641	347.0	1
13	56.320	1.632	821.0	3
14	61.760	1.501	137.0	1
15	62.160	1.492	199.0	1
16	64.120	1.451	1528.0	6

50:25:12.5:12.5

Peak table				
Nr.	2θ	d	I	I/I ₀
1	22.440	3.959	39.0	1
2	27.120	3.285	1344.0	29
3	29.400	3.035	1441.0	23
4	30.520	2.927	334.0	5
5	30.800	2.901	2944.0	47
6	31.800	2.812	1733.0	28
7	33.280	2.690	6264.0	100
8	34.720	2.582	138.0	2
9	37.920	2.371	227.0	4
10	38.320	2.347	500.0	10
11	39.600	2.274	501.0	8
12	43.120	2.096	643.0	10
13	43.720	2.069	99.0	2
14	44.760	2.023	267.0	4
15	46.000	1.971	66.0	1
16	47.800	1.901	141.0	2
17	48.720	1.867	210.0	3
18	52.160	1.752	357.0	6
19	55.200	1.663	70.0	1
20	56.000	1.641	191.0	3
21	56.400	1.630	608.0	10
22	61.040	1.517	266.0	4
23	61.800	1.500	412.0	7
24	62.320	1.489	185.0	3
25	63.280	1.468	296.0	5
26	64.100	1.450	191.0	3
27	64.180	1.444	230.0	4
28	66.480	1.405	93.0	1
29	69.920	1.344	109.0	2

50:30:10:10

Peak table				
Nr.	2θ	d	I	I/I ₀
1	27.160	3.281	1674.0	25
2	29.400	3.035	1456.0	22
3	30.800	2.901	3491.0	52
4	31.840	2.808	939.0	14
5	33.280	2.690	6658.0	100
6	34.720	2.582	74.0	1
7	37.920	2.371	128.0	2
8	38.360	2.345	228.0	3
9	39.640	2.272	337.0	5
10	43.120	2.096	888.0	13
11	43.720	2.069	77.0	1
12	44.760	2.023	204.0	3
13	46.040	1.970	60.0	1
14	47.840	1.900	84.0	1
15	48.720	1.867	132.0	2
16	52.160	1.752	414.0	6
17	56.000	1.641	223.0	3
18	56.400	1.630	982.0	15
19	61.040	1.517	193.0	3
20	61.840	1.499	530.0	8
21	62.360	1.488	136.0	2
22	63.320	1.468	324.0	5
23	64.200	1.450	229.0	3
24	64.440	1.445	249.0	4
25	66.480	1.405	78.0	1
26	69.960	1.344	115.0	2

50:32.5:10:7.5

Peak table				
Nr.	2θ	d	I	I/I ₀
1	27.040	3.295	1658.0	29
2	29.280	3.048	951.0	17
3	30.680	2.912	3424.0	60
4	31.720	2.819	604.0	11
5	33.200	2.696	5705.0	100
6	34.600	2.590	76.0	1
7	37.800	2.378	162.0	3
8	38.240	2.362	186.0	3
9	39.520	2.278	343.0	6
10	43.000	2.102	862.0	15
11	43.640	2.072	62.0	1
12	44.680	2.027	160.0	3
13	46.920	1.973	58.0	1
14	47.680	1.906	60.0	1
15	48.600	1.872	115.0	2
16	52.040	1.756	310.0	5
17	55.000	1.668	59.0	1
18	55.880	1.644	228.0	4
19	56.280	1.633	864.0	15
20	60.960	1.519	134.0	2
21	61.720	1.502	446.0	8
22	62.240	1.490	128.0	2
23	63.200	1.470	266.0	5
24	64.120	1.451	217.0	4
25	64.400	1.446	231.0	4
26	69.840	1.346	102.0	2

45:35:10:10

Peak table				
Nr.	2θ	d	I	I/I ₀
1	27.120	3.285	1371.0	23
2	29.360	3.040	1468.0	25
3	30.800	2.901	2676.0	45
4	31.800	2.812	1052.0	13
5	33.280	2.690	5936.0	100
6	37.880	2.373	181.0	3
7	38.320	2.347	379.0	6
8	39.600	2.274	417.0	7
9	43.080	2.098	663.0	11
10	44.760	2.023	153.0	3
11	46.000	1.971	66.0	1
12	47.760	1.903	106.0	2
13	48.720	1.867	163.0	3
14	52.120	1.753	466.0	3
15	55.160	1.664	58.0	1
16	55.960	1.642	179.0	3
17	56.360	1.631	636.0	11
18	61.000	1.518	215.0	4
19	61.800	1.500	464.0	8
20	62.280	1.490	164.0	3
21	63.280	1.468	316.0	5
22	64.200	1.450	182.0	3
23	64.200	1.450	182.0	3
24	66.480	1.405	75.0	1
25	69.920	1.344	102.0	2

40:40:10:10

Peak table				
Nr.	2θ	d	I	I/I ₀
1	27.160	3.281	778.0	13
2	28.040	3.180	58.0	1
3	29.440	3.031	1427.0	23
4	30.840	2.897	5007.0	82
5	31.840	2.808	1010.0	17
6	33.320	2.687	6109.0	100
7	34.760	2.579	94.0	2
8	37.960	2.368	121.0	2
9	38.360	2.345	306.0	5
10	38.960	2.310	54.0	1
11	39.640	2.272	212.0	3
12	43.160	2.094	836.0	14
13	43.720	2.069	70.0	1
14	44.800	2.021	110.0	2
15	46.040	1.970	52.0	1
16	47.800	1.901	89.0	1
17	48.720	1.867	107.0	2
18	52.200	1.751	457.0	7
19	56.040	1.640	124.0	2
20	56.440	1.629	981.0	16
21	61.080	1.516	172.0	3
22	61.840	1.499	521.0	9
23	62.320	1.489	115.0	2
24	63.320	1.468	320.0	5
25	64.240	1.449	352.0	6
26	66.520	1.404	88.0	1
27	69.960	1.344	112.0	2

50:35:10:5

Peak table				
Nr.	2θ	d	I	I/I ₀
1	27.000	3.300	1345.0	22
2	29.280	3.048	1318.0	22
3	30.680	2.912	2324.0	38
4	31.720	2.819	369.0	6
5	33.160	2.699	6037.0	100
6	37.800	2.378	110.0	2
7	38.200	2.354	77.0	1
8	39.480	2.281	277.0	5
9	42.960	2.104	777.0	13
10	43.600	2.074	65.0	1
11	44.640	2.028	132.0	2
12	45.880	1.976	47.0	1
13	48.600	1.872	100.0	2
14	52.040	1.756	412.0	7
15	55.040	1.667	61.0	1
16	55.880	1.644	193.0	3
17	56.280	1.632	753.0	12
18	60.920	1.519	118.0	2
19	61.680	1.503	479.0	8
20	62.200	1.491	122.0	2
21	63.160	1.471	321.0	5
22	64.080	1.452	173.0	3
23	64.360	1.446	187.0	3
24	69.300	1.346	107.0	2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก 4

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสี และสัมประสิทธิ์การแอทเทนนูเอท
รังสีเชิงเส้น (จากข้อมูลอ้างอิง) ของโลหะตะกั่ว ที่ระดับพลังงานต่าง ๆ

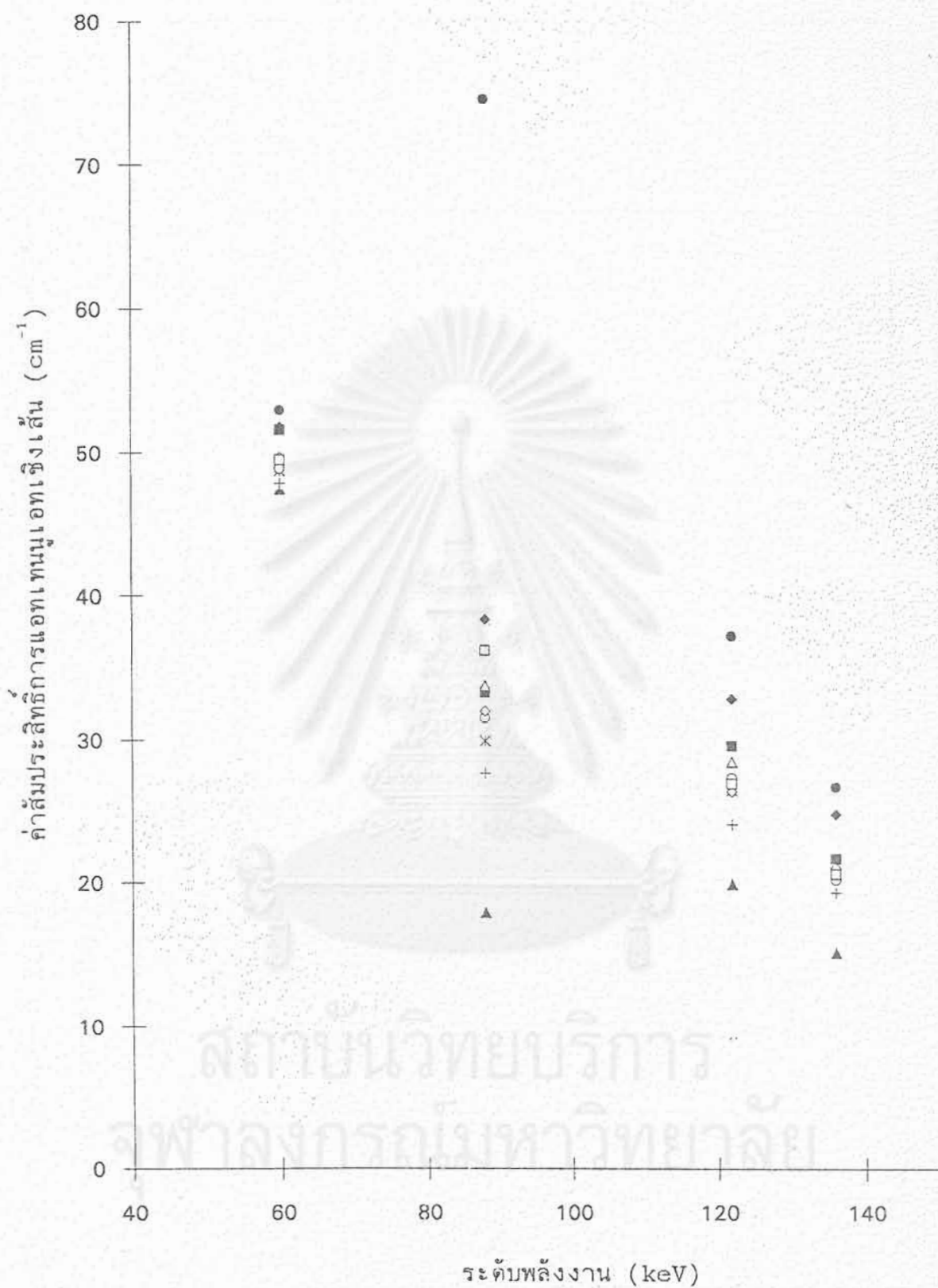
[μ/ρ , cm^2/g]

<u>Energy/keV</u>	<u>Absorption</u>	<u>Attenuation</u>	<u>Reference</u>
20		83.4	12
20.7		80.2	11
24.8		49.5	11
30		27.9	12
31		27.4	11
40		13.9	11
40		13.0	12
41.3	13.9		10
49.6	9.2		10
50		7.17	12
60	5.40		10
60		4.47	12
62	4.67		10
80		2.12	12
82.6	2.32		10
100	5.193	5.29	12
124	3.41		10
150	1.753	1.84	9

ตารางความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแอทเทนูเอชันเอกซเรย์เชิงเส้น (cm^{-1}) จากการทดลองของสารตัวอย่างที่ระดับพลังงานต่าง ๆ

No.	ส่วนผสม (% โดยน้ำหนัก)				ความหนาแน่น จากการคำนวณ ($\text{g}/\text{cu. cm}$)	ค่าสัมประสิทธิ์การแอทเทนูเอชันเอกซเรย์เชิงเส้น (μ, cm^{-1}) ที่ระดับพลังงานต่าง ๆ			
	Bi	Pb	Sn	Cd		60 keV	88 keV	122 keV	136 keV
1	-	100	-	-	11.34	52.96 ± 1.67	74.60 ± 3.53	37.25 ± 1.70	26.72 ± 0.62
2	54	-	26	20	9.15	47.45 ± 1.38	17.93 ± 1.65	19.92 ± 0.98	15.17 ± 1.30
3	52.6	31.8	15.8	-	9.91	51.61 ± 2.52	33.30 ± 1.54	29.61 ± 1.67	21.75 ± 0.64
4	51.65	40.2	-	8.15	10.33	51.82 ± 2.74	38.33 ± 0.51	32.91 ± 0.80	24.86 ± 1.80
5	50	25	12.5	12.5	9.73	47.83 ± 1.39	27.65 ± 0.72	24.12 ± 0.67	19.35 ± 1.02
6	50	30	10	10	9.90	48.72 ± 0.94	29.92 ± 1.77	26.48 ± 0.77	20.58 ± 1.39
7	50	32.5	10	7.5	9.96	48.88 ± 0.91	31.53 ± 1.18	27.32 ± 0.48	20.26 ± 0.62
8	50	35	10	5	10.03	49.52 ± 0.73	33.79 ± 1.01	28.50 ± 0.67	20.72 ± 0.79
9	45	35	10	10	9.97	49.68 ± 0.68	32.01 ± 1.15	26.42 ± 0.60	21.10 ± 0.87
10	40	40	10	10	10.05	49.50 ± 1.02	36.17 ± 1.41	26.93 ± 0.41	20.63 ± 0.69





ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบน (cm⁻¹)
จากการทดลองของสารตัวอย่าง ที่ระดับพลังงานต่าง ๆ

ตารางที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีและสัมประสิทธิ์การแอทเทนูเอทเชิงมวล (ข้อมูลอ้างอิงและจากการทดลอง) ของสารตัวอย่างที่ระดับพลังงานต่าง ๆ

ส่วนผสม (% โดยน้ำหนัก)					ความหนาแน่นจากการคำนวณ (g/cu.cm)	ค่าสัมประสิทธิ์การแอทเทนูเอทเชิงมวล ($\mu/p, \text{cm}^2/\text{g}$) ที่ระดับพลังงานต่าง ๆ			
No.	Bi	Pb	Sn	Cd		60 keV	88 keV	122 keV	136 keV
1	-	100	-	-	11.34	4.67 ± 0.15	6.58 ± 0.31	3.29 ± 0.15	2.36 ± 0.06
2	54	-	26	20	9.15	5.19 ± 0.15	1.96 ± 0.18	2.17 ± 0.11	1.66 ± 0.14
3	52.6	31.8	15.8	-	9.91	5.21 ± 0.25	3.36 ± 0.16	2.99 ± 0.17	2.20 ± 0.07
4	51.65	40.2	-	8.15	10.33	5.02 ± 0.27	3.71 ± 0.05	3.19 ± 0.08	2.41 ± 0.17
5	50	25	12.5	12.5	9.24*	5.18 ± 0.15	2.99 ± 0.08	2.61 ± 0.07	2.09 ± 0.11
6	50	30	10	10	9.40*	5.18 ± 0.10	3.18 ± 0.19	2.82 ± 0.08	2.19 ± 0.15
7	50	32.5	10	7.5	9.46*	5.17 ± 0.10	3.33 ± 0.13	2.89 ± 0.05	2.14 ± 0.07
8	50	35	10	5	9.53*	5.20 ± 0.08	3.55 ± 0.11	2.99 ± 0.07	2.17 ± 0.08
9	45	35	10	10	9.47*	5.25 ± 0.07	3.38 ± 0.12	2.79 ± 0.06	2.23 ± 0.09
10	40	40	10	10	9.55*	5.19 ± 0.11	3.79 ± 0.15	2.82 ± 0.04	2.16 ± 0.07

หมายเหตุ * : ค่าความหนาแน่นจากการประเมินโดยสมมุติว่าเฟสความหนาแน่นค่าที่เกิดขึ้น มีผลให้ค่าความหนาแน่นลดลง 5 %



ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแอทเทนูเอทเชิงมวล (cm^2/g) จากการทดลองของสารตัวอย่าง ที่ระดับพลังงานต่าง ๆ

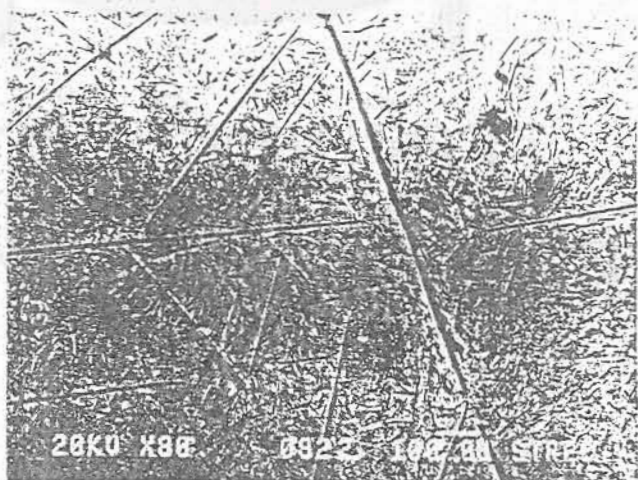
ภาคผนวก 5

ตัวอย่างภาพโครงสร้างของโลหะผสมควอเทอนารี



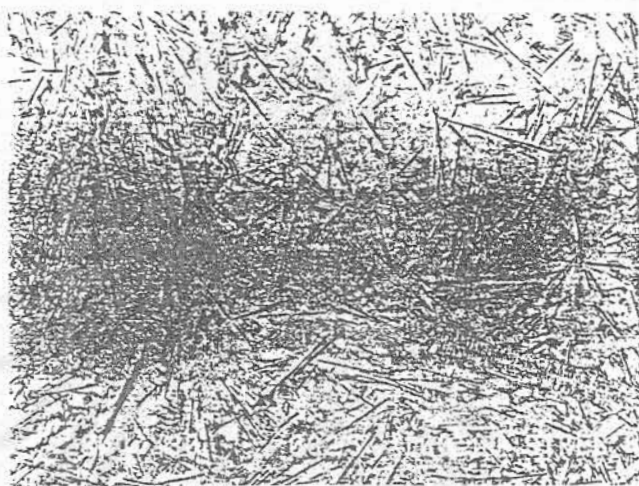
ภาพแสดงโครงสร้างโลหะผสมควอเทอนารี

ที่ส่วนผสม Bi:Pb:Sn:Cd = 50:25:12.5:12.5



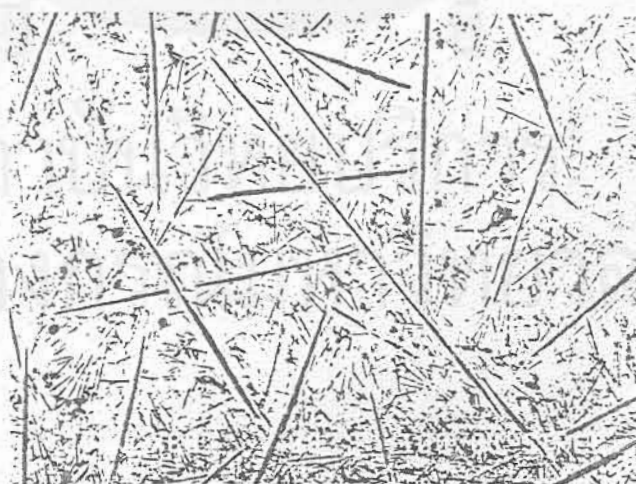
ภาพแสดงโครงสร้างโลหะผสมควอเทอนารี

ที่ส่วนผสม Bi:Pb:Sn:Cd = 50:30:10:10



ภาพแสดงโครงสร้างโลหะผสมควอเทอนารี

ที่ส่วนผสม Bi:Pb:Sn:Cd = 50:32.5:10:7.5



ภาพแสดงโครงสร้างโลหะผสมควอเทอนารี

ที่ส่วนผสม Bi:Pb:Sn:Cd = 45:35:10:10

