

ผลของโลหะผสมต่อคุณสมบัติการเปียกของโลหะประสานทอง 14 กระวัด

นาย กรณ์ดี ลิ้มปีไพฑูรย์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-334-305-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF ALLOY ADDITIVES ON WETTING PROPERTIES
OF 14 CARAT BRAZING ALLOYS

Mister Karan Limpaitoon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-334-305-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของโลหะผสมต่อคุณสมบัติการเปียกของโลหะประสานทอง
14 กระรัต

โดย

นาย กรันต์ ลิ้มปีเพ็ญทรัพย์

สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการ


อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร. จัตรชัย สมศิริ


อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

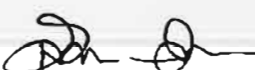
อาจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

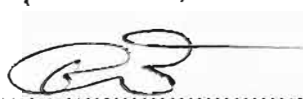
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. จัตรชัย สมศิริ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จันทนสิริสุธรรม)

นาย กรันต์ ลิ้มปีโพทรัพย์ : ผลของโลหะผสมต่อคุณสมบัติการเปียกของโลหะประสานทอง
14 กะรัต. (EFFECTS OF ALLOY ADDITIVES ON WETTING PROPERTIES OF 14 CARAT
BRAZING ALLOYS) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร. ฉัตรชัย สมศิริ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : อ.ดร. เอกสิทธิ์
นิสารัตนพร , 94 หน้า. ISBN 974-334-305-9.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปริมาณของสังกะสีที่เหมาะสมในโลหะประสานทองคำ 14 กะรัตเพื่อศึกษาวิธีการวัด
คุณสมบัติด้านการเปียกในโลหะประสานทอง 14 กะรัต โดยปรับเปลี่ยนช่วงของปริมาณสังกะสีตั้งแต่ 0-10 % ของ
ทองคำ ปริมาณ 58.5 % (ประมาณ 14 กะรัต) ปริมาณเงินและทองแดงในสัดส่วน 1 ต่อ 1 และวิธีการหล่อโลหะประสาน
ทองทำโดยผสมทองแดงและสังกะสีเข้าด้วยกันเป็นโลหะผสมมาสเตอร์ (Master Alloy) เพื่อลดการสูญเสียของ
สังกะสีในปริมาณหนึ่ง และนำโลหะผสมมาสเตอร์ หลอมกับทองคำและเงินในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน ได้เป็นโลหะ
ประสานทอง งานวิจัยทดสอบหาคุณสมบัติด้านการเปียก (Wettability) ด้วยวิธีทดสอบแบบ Sessile Drop จะได้ค่า
มุมสัมผัสและแรงตึงผิว ทดสอบหาจุดหลอมเหลว ความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Strength) และวัดค่าสีของ
โลหะประสานทอง พบว่าการหลอมโลหะประสานทองที่มีปริมาณสังกะสีสูงเกิน 10% จะเกิดปัญหาด้านการหล่อทำ
ให้ควบคุมการหลอมได้ยาก ด้านจุดหลอมเหลวเมื่อเติมสังกะสีจะช่วยลดจุดหลอมเหลวได้ คือที่ประมาณสังกะสี 10
% จุดหลอมเหลวประมาณ 720 องศาเซลเซียส ในขณะที่ถ้าไม่เติมสังกะสีได้จุดหลอมเหลวประมาณ 810 องศา
เซลเซียส ด้านคุณสมบัติการเปียก เมื่อเติมสังกะสีจะลดมุมสัมผัสและแรงตึงผิวไปได้ในปริมาณที่สูงมาก คือเมื่อไม่
เติมสังกะสีจะมีค่ามุมสัมผัสประมาณ 145 องศาและแรงตึงผิวประมาณ 1092 mN/m เมื่อเติมสังกะสีประมาณ 10%
มุมสัมผัสจะมีค่าน้อยกว่า 60 องศาและค่าแรงตึงผิวนั้นต่ำมากจนไม่สามารถวัดค่าได้ ด้านความแข็งและความแข็งแรง
พบว่ามีค่าเมื่อเติมสังกะสีในปริมาณต่ำจะไม่ส่งผลต่อความแข็งและความแข็งแรง แต่ถ้ามีสังกะสีในปริมาณสูง
ประมาณ 10 % ขึ้นไปจะทำให้มีความแข็งและความแข็งแรงสูงขึ้นมาก และสังกะสียังมีผลทำให้คุณสมบัติด้านสีของ
โลหะประสานทองเปลี่ยนไป คือทำให้มีสีซีดลง

ภาควิชา วิศวกรรม.....
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ.....
ปีการศึกษา 2542.....

ลายมือชื่อนิสิต กรันต์ ลิ้มปีโพทรัพย์.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม 1015๒๕ ปรีชา.....

4070525821 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD: WETTABILITY / SESSILE DROP METHOD / BRAZING ALLOY / 14 CARAT GOLD

KARAN LIMPAITON : EFFECTS OF ALLOY ADDITIVES ON WETTING
PROPERTIES OF 14 CARAT BRAZING ALLOYS. THESIS ADVISOR : ASSO.

PROF. CHATCHAI SOMSIRI, Ph.D. THESIS CO-ADVISOR : EKASIT
NISARATANAPON, Ph.D. 94 PP. ISBN 974-334-305-9

This research aims to investigate optimum zinc content, in 14 carat brazing alloy (58.5%), which produces good wettability. The investigation was conducted by varying the zinc contents in the range of 0-10 % by weight and by keeping the ratio of silver to copper at 1:1. In order to avoid the zinc loss, copper and zinc were therefore mixed and molten together and subsequently cast in a form of "Master alloy" bar. The master alloy then later used to produce 14 brazing carat gold alloy. The wettability of alloys was measured using sessile drop method, to obtain surface tension and contact angles of alloys of varying compositions. The effects of zinc on liquidus and solidus temperatures, hardness, strength and color of alloy were also studied. The results indicated that the liquidus and solidus temperatures decreased with increasing zinc content i.e., liquidus temperature of 720 °C and 810 °C for 10 % and 0 wt.% Zn respectively. The contact angle and surface tension also decreased when zinc content increased. The contact angle of 0 wt.% Zn was found to be 145 degrees whereas the contact angle of 10 wt.% Zn was less than 60 degrees. The hardness and the strength changed insignificantly when the zinc contents were increased from 0 to 4 wt.%. However when the zinc content was increased to more than 10 wt% the hardness and the strength of the alloy markedly increased. Zinc was also observed to have a bleaching effect on the 14 carat brazing alloys.

ภาควิชา วิศวกรรม
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต กานต์ ลิ้มไพทอน
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา [Signature]
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม 101548 ปรีชาธรรม



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดอกเตอร์.ฉัตรชัย สมศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดอกเตอร์ เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งท่านทั้งสองได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยด้วยดีมาตลอด รวมทั้งคณาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ต่าง ๆ อีกทั้งพนักงานธุรการ ครูปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ ที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และสถานที่เป็นอย่างดี และเนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับมาจากทุนอุดหนุนการวิจัยของสำนักงานกองทุนเพื่อการวิจัย(สกว.) และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ(สวทช.) จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ รุ่นพี่ และรุ่นน้อง ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ ที่เป็นกำลังใจและให้คำปรึกษาต่าง ๆ นางสาวอดิگانต์ ทองสะอาด เพื่อนที่คอยเป็นกำลังใจและช่วยให้คำปรึกษาข้อเสนอแนะ และแนวทางต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ นางสาวของทอง จรัสสิงห์ ที่ธุรการที่ช่วยให้คำปรึกษาในการทำรายงานและให้ความสะดวกในการค้นหาข้อมูลของห้องสมุด นางสาวนิสานาถ วัฒนธรรักษ์ เพื่อนที่คอยเป็นกำลังใจและช่วยเรียบเรียงรูปเล่มวิทยานิพนธ์ นายพรหมมินท์ เจริญยิ่ง รุ่นพี่ที่ให้คำแนะนำเป็นอย่างดีในการทำการทดลองต่าง ๆ และช่วยจัดการเรื่องการทดสอบค่าสีของโลหะประสาน นาง โสภา จิระวงศ์อร่าม พนักงานปฏิบัติการเครื่อง DTA ที่ช่วยให้ความสะดวกด้านการใช้เครื่องมือและการทดสอบ คุณนิศย์ พนักงานบริษัทโรสท์แพคเตอร์ ที่ช่วยให้คำแนะนำเกี่ยวกับการประสานทอง รุ่นพี่และเพื่อนกลุ่มทอง ที่คอยเป็นกำลังใจและให้คำปรึกษาต่าง ๆ พี่เสนีย์ ครูปฏิบัติ ที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษาด้านการใช้เครื่องมือห้องปฏิบัติการ นายธีรพงษ์และนายเอกพจน์ ที่ให้คำแนะนำด้านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อน ๆ ได้ะสวนที่เป็นกำลังใจและให้ความบันเทิงด้านต่าง ๆ และรวมถึงทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือแต่ไม่สามารถกล่าวถึง ณ ที่นี้ได้หมด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา คุณย่า และพี่น้อง ซึ่งสนับสนุนในด้านต่าง ๆ และเป็นกำลังใจอย่างยิ่งแก่ผู้วิจัยจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญงานวิจัย.....	1
1.2 คำสำคัญ.....	2
1.3 วัตถุประสงค์.....	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 การปรีทัศน์วรรณกรรม.....	4
2.1 ประวัติและความเป็นมาของทองคำ.....	4
2.2 มาตรฐานการวัดความบริสุทธิ์ของทองคำ.....	5
2.3 โลหะผสมทองคำผสมและทองคำกะรัต.....	6
2.3.1 คุณสมบัติต่าง ๆ ของทองคำและโลหะผสมอื่น ๆ.....	6
2.3.2 ทองคำกะรัต.....	7
2.4 โลหะประสาน.....	9
2.4.1 ความแตกต่างระหว่าง brazing กับ soldering.....	9
2.5 คุณสมบัติของโลหะประสานทอง.....	14
2.5.1 อุณหภูมิที่ใช้งาน.....	14
2.5.2 สี.....	14
2.5.3 คุณสมบัติทางกล.....	14
2.5.4 ความต้านทานการกัดกร่อน.....	14
2.5.5 ราคา.....	15
2.5.6 ส่วนผสมทางเคมีต้องไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม.....	15
2.5.7 ความสามารถด้านการเปียก.....	15

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
2.6 การวัดความสามารถด้านการเปียก.....	16
2.7 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าแรงตึงผิวและมุมสัมผัส.....	21
2.7.1 เวลาที่ใช้ในการทดลอง.....	21
2.7.2 อุณหภูมิ.....	21
2.7.3 ฐานรองชิ้นงาน.....	23
3 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	24
3.1 วัตถุประสงค์.....	24
3.2 เครื่องมือที่ใช้.....	24
3.3 การเตรียมชิ้นงาน.....	24
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	26
3.5 ระเบียบและวิธีการตรวจสอบวิเคราะห์ผล.....	28
3.6 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลอง.....	30
4 รายงานผลการทดลอง.....	31
4.1 ผลของส่วนผสมและช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว.....	31
4.2 คุณสมบัติทางกล.....	32
4.2.1 ผลทดสอบความแข็ง.....	32
4.2.2 ผลการทดสอบแรงดึงแบบ Lap shear.....	32
4.3 ผลคุณสมบัติด้านการเปียก.....	33
4.4 ผลทดสอบค่าสี.....	35
5 อภิปรายผล.....	36
5.1 ส่วนผสมทางเคมีและช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว.....	36
5.2 ด้านคุณสมบัติทางกล.....	38
5.3 ด้านคุณสมบัติการเปียก.....	42
5.3.1 ค่าUtility variance.....	42
5.3.2 ค่าแรงตึงผิวและมุมสัมผัส.....	43
5.4 ด้านสีโลหะประสาน.....	44
6 สรุปผล.....	48
รายการอ้างอิง.....	50
ภาคผนวก	

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
ภาคผนวก ก.....	53
ภาคผนวก ข.....	56
ภาคผนวก ค.....	58
ภาคผนวก ง.....	60
ภาคผนวก จ.....	68
ภาคผนวก ฉ.....	71
ภาคผนวก ช.....	89
ประวัติผู้วิจัย.....	94

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้าที่
2.1 การเปรียบเทียบค่าความบริสุทธิ์ของทองคำในแบบต่างๆ.....	6
2.2 แสดงสมบัติทางฟิสิกส์ของทองคำ ทองแดง เงิน และสังกะสี.....	7
2.3 แสดงช่วงของการหลอมเหลวของโลหะผสมทอง.....	8
2.4 แสดงช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวของทองคำในอัตราส่วนของเงินและทองแดง ต่างๆกัน.....	10
2.5 ตัวประสานทองสีเหลืองที่ปราศจากแคดเมียม.....	11
2.6 ข้อมูลทางด้านอุณหภูมิสำหรับตัวประสานทองสีเหลือง.....	12
2.7 แสดงจุดหลอมเหลวและจุดเดือดของโลหะต่างๆ.....	12
2.8 แสดงค่าแรงดึงผิวของโลหะผสมทองและธาตุผสมอื่นๆ.....	18
2.9 แสดงแรงดึงผิวและมุมสัมผัส.....	18
3.1 แสดงความบริสุทธิ์ของวัสดุดิบ.....	24
3.2 แสดงส่วนผสมของโลหะผสมมาสเตอร์(master alloys).....	25
3.3 แสดงส่วนผสมของตัวประสานทองคำ 14 กระรัต.....	25
3.4 แสดงส่วนผสมของทองคำผสม 14 กระรัตที่จะถูกประสาน.....	26
3.5 แสดงผลส่วนผสมของโลหะผสมมาสเตอร์หลังจากงานหล่อ.....	26
3.6 แสดงวิธีการวิเคราะห์ธาตุที่ได้จากการหลอม.....	28
3.7 แสดงสารเคมีที่ใช้ในการกัดกรดสำหรับโลหะผสมทองคำ 14 กระรัต.....	29
4.1 แสดงผลของส่วนผสมโลหะประสานทองและช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว.....	31
4.2 ผลการทดสอบความแข็งของโลหะประสานทอง.....	32
4.3 ผลทดสอบแรงดึงแบบ Lap shear.	32
4.4 แสดงผลของมุมสัมผัสและแรงดึงผิว.....	33
4.5 แสดงผลค่าสีของโลหะผสมทองและโลหะประสานทองคำ 14 กระรัต.....	35
5.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของสังกะสีที่เติมและผลหลังการหล่อ.....	36
5.2 แสดงขนาดเกรนโดยเฉลี่ยของโลหะประสาน.....	41
ก.1 ค่าของสีในทองคำ 14 กระรัต.....	54
ก.2 ค่าของสีในโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสม.....	55
ก.3 ค่าสีของงานหล่อ.....	55
ง.1 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง d_n/H กับ D	65
ง.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า j กับ ds/dm	67

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	แผนภูมิสมมูล 3 เฟส ของ ทอง - เงิน - ทองแดง.....	8
2.2	แสดงช่วงของส่วนผสมของสี่ของโลหะผสมทอง-เงิน-ทองแดง.....	9
2.3	แสดงความต้านทานการหมองของโลหะผสม ทอง-เงิน-ทองแดง.....	15
2.4	แสดงของเหลวในสมดุลกับของแข็งด้วยมุมสัมผัส.....	16
2.5	เครื่องมือทดสอบแบบ sessile drop.....	19
2.6	แสดงการวัดบน sessile drop เพื่อการคำนวณหาค่าแรงตึงผิวและมุมสัมผัส...	19
2.7	แสดงคู่อันดับของชิ้นงานในการคำนวณ.....	20
2.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับมุมสัมผัสของทองคำบน TiC ที่ 1100 °C.....	21
2.9	แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับมุมสัมผัสของทองบน SiC(a.), TiO ₂ (b.)และZnO(c.)	22
2.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสและ Work of adhesion ของทองบน ฐานต่างๆกันกับ function of bandgap energies E _g ของฐานต่างๆ.....	23
3.1	แสดงชิ้นงานมาสเตอร์อัลลอยด์.....	26
4.1	ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง S002 (Zn=0 wt.%).....	33
4.2	ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง B101-2(Zn=0.66 wt.%)...	33
4.3	ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง B103-2 (Zn=2.20 wt.%)..	34
4.4	ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง B105-1 (Zn=3.40 wt.%)..	34
4.5	ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง B107-1 (Zn=4.47 wt.%)..	34
4.6	ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง B117-2 (Zn=10.08 wt.%)	34
5.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสังกะสีกับช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว..	37
5.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Utility Variance กับปริมาณสังกะสี.....	38
5.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสังกะสีกับช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว..	39
5.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสังกะสีกับค่าความแข็ง.....	40
5.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทองแดงกับค่าความแข็ง.....	41
5.6	แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะประสานทอง.....	42
5.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นที่ความเค้นสูงสุดกับ ปริมาณสังกะสีในโลหะประสานทองคำ 14 กะรัต.....	43
5.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นที่ความเค้นสูงสุดกับ	

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ปริมาณทองแดงในโลหะประสานทองคำ 14 กระรัต.....	44
5.9 แสดงชิ้นงานทดสอบ Sessile ที่หกลอมตัวไม่สมมาตร.....	45
5.10 แสดงชิ้นงานทดสอบ Sessile drop ที่สมมาตร.....	46
ก.1 แสดงแกนคู่อันดับของการวัดค่าสี.....	53
ข.1 แสดงเครื่องมือทดสอบ Differential Thermal Analysis (DTA)	56
ข.2 แสดงตัวอย่างผลของการทดสอบ DTA.....	57
ง.1 แสดงส่วนของผิวส่วนโค้งของของเหลว.....	60
ง.2 แสดงความสูงของของเหลวในท่อ Capillary (M แทน Meniscus)	60
ง.3 แสดงเครื่องมือทดสอบหาแรงตึงผิวโดยวิธี Capillary Rise Method.....	62
ง.4 แสดง Wilhelmy Plate Method.....	62
ง.5 แสดงวิธีการวัดแรงตึงผิวแบบ Ring Method (Du Nouy tensionmeter)	63
ง.6 แสดง Drop Weight Method.....	63
ง.7 แสดงค่า Correction factor ϕ ที่มีความสัมพันธ์กับค่า a และ V.....	63
ง.8 แสดงเครื่องมือทดสอบแบบ Sessile Drop Method.....	64
ง.9 แสดงผิวส่วนโค้งของการทดสอบแบบ Sessile Drop.....	65
ง.10 แสดงการคำนวณหาค่าแรงตึงผิวแบบ Dorsey.....	66
ง.11 แสดงผิวส่วนโค้งของการทดสอบแบบ Pendant Drop Method.....	67
จ.1 แสดงคู่อันดับของชิ้นงานทดสอบแบบ Sessile drop.....	68
จ.2 แสดงปัญหาแบบ ADSA-D โดย (a)มุมสัมผัสมากกว่าหรือเท่ากับ 90 องศา (b) มุมสัมผัสน้อยกว่า 90 องศา.....	69
ฉ.1 แสดงชิ้นงานทดสอบ Lap Shear ก่อนตั้ง (ก.)ด้านหน้า(ข.)ด้านข้าง.....	71
ฉ.2 แสดงชิ้นงานทดสอบ Lap Shear หลังตั้ง (ก.)ด้านหน้า(ข.)ด้านข้าง.....	72
ช.1 แสดงตัวอย่าง Source code เกี่ยวกับ รุงเง-คุดตาอันดับ4.....	85
ช.2 แสดงเมนูส่วนแรก.....	90
ช.3 แสดงเมนูส่วน ADSA.....	90
ช.4 แสดงส่วนADSA กรณีไม่ทราบค่า b และ c.....	91
ช.5 แสดงส่วน ADSA ในการเลือกรูปที่จะหาค่าแรงตึงผิว.....	91

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
ข.6	แสดงส่วนกำหนดขนาดชิ้นงาน.....	92
ข.7	แสดงส่วนADSAที่ทราบค่า b และ c และให้ป้อนค่า.....	92
ข.8	แสดงผลการคำนวณค่าคู่อันดับ x และ z ที่มุมใด ๆ.....	92
ข.9	แสดงรูปหยดของเหลวที่ค่า b และ c ที่กำหนด.....	93



บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

ภาวะวิกฤตการณ์ทางเศรษฐกิจที่เกิดขึ้นอย่างรุนแรงในประเทศไทยตั้งแต่ปีพุทธศักราช 2540 ได้สร้างความเสียหายแก่ชนทุกกลุ่มในสังคมไทย ผู้เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหา ก็ได้กำหนดมาตรการและแนวทางต่าง ๆ อาทิเช่น รมรทให้ใช้สินค้าไทย ลดสินค้าฟุ่มเฟือยจากต่างประเทศ และที่สำคัญคือการส่งเสริมการส่งออก แต่ในขณะเดียวกันปัญหาที่เราจะพบได้ในทุก ๆ อุตสาหกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ก็คือ ในอุตสาหกรรมนั้นไม่สามารถผลิตสินค้าที่มีคุณภาพเพียงพอที่สามารถแข่งขันกับตลาดต่างประเทศได้ ทั้งนี้สืบเนื่องมาจากการขาดความรู้ความเข้าใจขั้นพื้นฐานอย่างแท้จริง ซึ่งโดยส่วนใหญ่ต่างก็ได้ ทำตามประสบการณ์ที่ตนเองมีอยู่ หรือไม่ก็จากการรับเทคโนโลยีจากต่างชาติที่เข้ามาลงทุนโดยขาดความเข้าใจอย่างแท้จริง ทำให้ไม่สามารถพัฒนาเทคโนโลยีให้ก้าวไกลกว่าที่ควรจะเป็นได้

อุตสาหกรรมทองคำและเครื่องประดับ ต่างก็ประสบปัญหาดังกล่าวด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะในกลุ่มอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ซึ่งผู้ผลิตส่วนใหญ่ต่างก็ใช้ประสบการณ์จากบรรพบุรุษสืบทอดต่อกันมาในการผลิต โดยความรู้ทางด้านการผลิตทองคำและเครื่องประดับนี้จะเป็นความลับทางการค้า และมีหลากหลายตามแต่ประสบการณ์ของแต่ละร้านค้า แต่ทั้งนี้แล้วในโรงงานต่าง ๆ ก็ยังประสบปัญหาในด้านต่าง ๆ อยู่มาก ซึ่งทำให้ได้สินค้าที่ไม่ได้มาตรฐานเพียงพอที่จะแข่งขันกับต่างชาติได้ ปัญหาที่พบบทเช่น รูปพร ความแข็งแรง โลหะประสาน โดยในตัวหลังสุดนั้นจะพบว่าก็เป็นปัญหาที่สำคัญข้อหนึ่งทีเดียว

โลหะประสานที่ใช้ ในอุตสาหกรรมบ้านเรานั้นทั้งที่นำเข้าจากต่างประเทศ และผลิตขึ้นเอง การนำเข้าจากต่างประเทศทำให้สูญเสียเงินตราจำนวนหนึ่งอย่างน่าเสียดาย ทั้งที่โลหะประสานเหล่านี้สามารถผลิตขึ้นเองได้โดยไม่ยาก แต่ในการผลิตขึ้นเองในประเทศในปัจจุบันนี้ ก็ประสบปัญหาด้านคุณสมบัติต่าง ๆ มากมาย เช่น ด้านอุณหภูมิของโลหะประสาน ความสามารถด้านการเปียกของโลหะประสาน สีของโลหะประสานไม่เข้ากันกับตัวที่จะประสาน ความต้านทานการผุกร่อนเมื่อผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลาสั้น ๆ และปัญหาสุดท้ายที่สำคัญและผู้ประกอบการส่วนใหญ่จะมองข้ามไปคือ ความปลอดภัยในการทำงานของช่างเนื่องจากในโลหะประสานของบางชนิดนั้นได้ผสมธาตุแคดเมียมเพื่อช่วยในการลดจุดหลอมเหลวของตัวประสานให้ต่ำลงและช่วยความสามารถด้านการเปียกด้วย แต่ธาตุแคดเมียมนี้มีจุดเดือดที่ต่ำและเป็นพิษด้วย ดังนั้นเมื่อสารนี้กลายเป็นไอจะเป็นอันตรายต่อปอดและไตอย่างรุนแรง เมื่อได้สูดดมเข้าไปในปริมาณที่มากและนาน ๆ ปัญหาที่ได้กล่าวมานั้นเกิดเนื่องจาก การขาดความรู้พื้นฐานด้านโลหวิทยาของผู้ประกอบการ ซึ่งสิ่งนี้เองทำให้ลูกค้าทั้งในและต่างประเทศขาดความมั่นใจในผลิตภัณฑ์

โลหะประสานทองนั้นได้มีการนำมาใช้เป็นเวลานานพอ ๆ กับการเริ่มมีการใช้ทองคำและทองคำกะรัต ตั้งแต่ราวปี ค.ศ. 1854 มีความจำเป็นที่ต้องมีการใช้โลหะประสานควบคู่ไปด้วย เพื่อใช้ในการประสานรอยต่อต่าง ๆ ในโดยช่วงแรกนั้นก็ได้นำแคดเมียมมาใช้ในงานประสานทองเนื่องจากมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำมาก แต่ในช่วงหลังก็ได้ล้มเลิกไปเนื่องจากเป็นสารพิษและมีอันตรายต่อผู้ใช้งานอย่างมาก จึงได้มีการพัฒนาโลหะประสานทองตัวอื่น ๆ ขึ้นมา โดยเริ่มมีการใช้โลหะชนิดอื่น ๆ ขึ้นเช่น สังกะสี อินเดียม ดีบุก โดยการศึกษาที่ผ่านมามีข้อมูลส่วนใหญ่ก็จะเป็นความลับ โดยจะมีการปกปิด และจะมีการถ่ายทอดเฉพาะในกลุ่มเท่านั้น แต่จะมีบางบทความและหนังสือ มีอยู่ข้อมูลอยู่บ้าง แต่ทั้งนี้ก็ตามก็ยังไม่มียุทธศาสตร์ที่เพียงพอในเชิงวิชาการได้ดั่งนี้ เพราะมีเพียงไม่กี่กลุ่มที่ศึกษาด้านนี้

ส่วนการศึกษาคุณสมบัติของโลหะประสานทองในที่นี้นั้นจะศึกษาในทอง 14 กะรัต โดยมีการเติมสังกะสีลงไป ทั้งนี้เพราะยังไม่มีผู้ศึกษาอย่างละเอียดและขาดข้อมูลเชิงวิชาการ อีกทั้งในทอง 14 กะรัตต่างก็พบปัญหาอยู่มาก ซึ่งจะเป็นรากฐานที่สำคัญในการศึกษาโลหะประสานทองในกะรัตต่อ ๆ ไปได้ โดยจะดูคุณสมบัติต่าง ๆ โดยจะมีการศึกษาในส่วนของคุณสมบัติของโลหะประสาน ที่ได้ คุณสมบัติด้านทางกล ความสามารถด้านการเปียก

ปัญหาด้านข้อมูลและเทคนิคทางการผลิตที่มีอยู่อย่างจำกัด และด้านคุณภาพที่ไม่เพียงพอต่อการแข่งขันต่อนานาชาติ ดังที่กล่าวข้างต้นมาแล้วนั้น เป็นปัญหาที่สำคัญทำให้เกิดผลกระทบต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมทองคำอย่างมาก ดังนั้นจึงทำให้มีความจำเป็นอย่างสูงในการศึกษาและวิจัยส่วนผสมโลหะประสาน ที่ใช้กับทอง 14 กะรัต โดยจะเป็นรากฐานที่สำคัญในการต่อยอดความรู้ในการที่จะพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตทองคำในประเทศขึ้นโดยไม่ต้องพึ่งพิงเทคโนโลยีต่างชาติ อีกทั้งยังจะเป็นเอกสารอ้างอิงที่สำคัญในการศึกษาต่อไป และที่สำคัญจะเป็นประโยชน์ต่อวงการอุตสาหกรรมและการพัฒนาประเทศในระยะยาวอีกด้วย

1.2 คำสำคัญ

Gold alloy, Solder , Brazing , Wettability , Surface tension , Contact angle, Axisymmetric drop shape analysis

1.3 วัตถุประสงค์

- 1.3.1 เพื่อศึกษาส่วนผสมของ สังกะสี และโลหะอื่น ๆ เช่น ดีบุก อินเดียม เป็นต้น ที่เหมาะสมกับโลหะประสานทอง 14 กะรัต
- 1.3.2 เพื่อศึกษาวิธีการวัดคุณสมบัติด้านการเปียกในโลหะประสานทอง 14 กะรัต

1.4 ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาดัชนีประสมของที่ใช้กับทองคำ 14 กระรัต โดยมีการเติมโลหะทอง ทองแดง เงิน และสังกะสี ในอัตราส่วนต่างๆกัน โดยใช้วิธีทดสอบแบบ Sessile drop เพื่อหาค่าความตึงผิวและมุมสัมผัส (contact angle) เพื่อนำมาเปรียบเทียบความสามารถในการเปียก (wettability) ในส่วนผสมต่างๆกัน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบถึงปริมาณสังกะสี ที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน
- 1.5.2 ทราบอิทธิพลของสังกะสี ที่มีต่อคุณสมบัติด้านการเปียก

บทที่ 2

การปริทัศน์วรรณกรรม

ทองคำ(Gold) ซึ่งสามารถเขียนเป็นธาตุทางเคมี คือ " Au " (โดยมาจากภาษาละติน คำว่า Aurum) เป็นโลหะมีค่าที่มีความสำคัญมาตลอดตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน เนื่องมาจากทองคำนั้นเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน มีความนำไฟฟ้าสูง มีความเหนียวที่สูงมาก เมื่อนำมาทุบจะทำให้มีความหนาได้บางถึง 0.000013 เซนติเมตร และทองคำ 29 กรัม สามารถทำเป็นลวดยาวได้ถึง 100 กิโลเมตร ที่เดียว¹ จนกระทั่งทองคำบริสุทธิ์ได้ถูกใช้เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนเงินตราระหว่างประเทศ

2.1 ประวัติและความเป็นมาของทองคำ

มนุษย์ได้ค้นพบ ทองคำมาตั้งแต่ยุคก่อนประวัติศาสตร์ แต่เท่าที่มีหลักฐานที่จะมายืนยันได้นั้นมีการสรุปย่อเป็นบางส่วนออกมา ดังนี้²

4000 BC	ทองคำได้เป็นที่รู้จักและถูกใช้บริเวณยุโรปตอนกลางและทางตะวันออก
3000 BC	ชาวอียิปต์ นำทองคำมาเป็น แผ่น(Gold Leaf) และผสมกับโลหะชนิดอื่นๆ
1500 BC	ใช้หน่วย Shelkel (2ส่วน3 เท่าของทอง) เป็นมาตรฐานในการวัด ในเอเชียกลาง (โดยปัจจุบันคือ Shelkel เป็นหน่วยเงินในประเทศ อิสราเอล)
1091 BC	ทองคำรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสได้นำมาใช้ในรูปของเงินตราอย่างถูกกฎหมายในจีน
58 BC	Julius Caesar ได้ยึดทองคำในเมือง Gaul (ของฝรั่งเศส) เพื่อที่ไปชำระหนี้ที่กรุง Rome
1717	Isaac Newton, Master of the London Mint เป็นผู้ตั้งราคาทองคำเมื่อ 200 ปีที่ผ่านมา
1787	เหรียญทองคำได้เริ่มทำขึ้นในสหรัฐ โดยช่างทองชื่อ Ephraim Brasher
1886	George Harrison ขณะที่กำลังขุดหินเพื่อที่จะสร้างบ้านเขาได้พบทองคำ ขึ้นในแอฟริกาตอนใต้
1887	Glasgow doctors, Robert และ William Forrest, and chemist John S. MacArthur ได้จดสิทธิบัตรในการสกัดทองคำจากแร่โดยใช้ไซยาไนด์
1900	สหรัฐอเมริกาได้ปรับมาตรฐานทองคำเพื่อใช้เป็นหน่วยเงินตรา
1922	สุสานกษัตริย์ Tutankhamen (1352 BC) ได้ถูกเปิดออกและพบว่ามีหีบศพทองคำหนัก 2,448 ปอนด์ และได้พบวัตถุมีค่าที่ทำมาจากทองคำอยู่มากมาย

ทองคำได้มีการนำมาใช้ เรื่อยมาจนถึงปัจจุบันแต่เนื่องจากทองคำบริสุทธิ์สูงมีราคาแพง และมีความแข็งแรงต่ำ ดังนั้นทองประเภทนี้จึงถูกนำมาใช้งานไม่มากนัก ยกเว้น ในกรณีต้องการ

คุณสมบัติด้านการนำไฟฟ้าที่ดี และความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน เช่นในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ใช้รูปชิ้นส่วนไอซี ใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ เช่น หัววัดควบคุมอุณหภูมิสำหรับเตาไฟฟ้า หรือเป่าในเครื่องรังสีเอ็กซ์ ท่อหรือภาชนะที่ทนต่อการเกิดออกซิเดชันใช้บรรจุสารเคมีพิเศษ

ในกรณีที่โลหะทองเติมธาตุผสมต่างๆเข้าไป กลายเป็นโลหะทองผสมมีจุดประสงค์หลักเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกล โดยเฉพาะความแข็งแรง ความแข็ง หรือเพื่อเปลี่ยนแปลงสีของโลหะให้สวยงาม โดยธาตุที่เติมลงไปเช่น ทองแดง และ เงิน ซึ่งเป็นโลหะผสมหลัก เมื่อเติมธาตุผสมต่างๆลงไปโดยจะมีสัดส่วนของทองคำแปรเปลี่ยนไปตามลำดับ ดังนั้นทำให้มีผลต่อความบริสุทธิ์ ของโลหะผสมนั้น

2.2 มาตรฐานการวัดความบริสุทธิ์ของทองคำ¹

โลหะผสมทองคำที่มีความบริสุทธิ์เกือบถึง 100 % เราสามารถเรียกได้ว่าเป็นทองบริสุทธิ์ (Pure Gold) แม้ว่าจะมีสิ่งเจือปนอยู่เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ทางการค้าโลหะที่มีปริมาณเนื้อทองคำมากกว่า 99.99 % จะถูกเรียกว่า ทองที่พิสูจน์แล้ว(Proof Gold)

ความบริสุทธิ์(Fineness) คือปริมาณทองคำที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุเทียบต่อ 1000 ส่วน บางครั้งใช้หน่วยวัดความบริสุทธิ์ที่เป็นระบบที่ใช้ออกปริมาณตามมาตรฐานที่เราเรียกว่า กะรัต(Karat)

โดยความแตกต่างระหว่าง Carat กับ Karat คือ Karat หมายถึง หน่วยวัดที่ใช้ออกปริมาณทองคำในเนื้อโลหะ โดยแทนโลหะที่มีทองคำอยู่ 100 % มีค่าเท่ากับ 24 Karat ส่วน Carat หน่วยที่ใช้ออกน้ำหนักของอัญมณี เช่น เพชร โดยใน อังกฤษ ได้ใช้ทั้งสองคำได้เหมือนกัน แต่ในอเมริกาและยุโรป ได้ใช้คำว่า Karat โดยคำว่า Carat มีต้นกำเนิดมาจาก ต้นถั่วที่พบในแถบเมดิเตอร์เรเนียน(Carob tree: Ceratonia siliqua) โดยในฝักจะมีเมล็ดเล็กๆอยู่ซึ่งจะมีน้ำหนักค่อนข้างคงที่ จึงได้นำมาเป็นที่ชั่งน้ำหนักในสมัยโบราณ ซึ่ง 1 Carat ประมาณ 3.086 g tr. หรือ 200 mg

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความบริสุทธิ์ คือ

$$\text{Fineness xxx} = \text{xxx fine} = \text{xx.x\% Au by weight} = \text{xxx/1000} \cdot 100\%$$

$$\text{X karat} = \text{X/24} \cdot 100 \% \text{ Au by weight}$$

โดยได้แสดงไว้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบค่าความบริสุทธิ์ของทองคำในแบบต่างๆ

ปริมาณทองคำในเนื้อโลหะ	เปอร์เซ็นต์ของเนื้อทอง	ความบริสุทธิ์ (FINENESS)	หน่วยกะรัต (KT หรือ K)
990/1000	99.0	990	24
954/1000	95.4	954	23
916/1000	91.6	916	22
750/1000	75	750	18
585/1000	58.5	585	14
357/1000	35.7	357	9
333/1000	33.3	333	8

ข้อสังเกต จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า การเปรียบเทียบโดยใช้หน่วยกะรัต ทำได้โดยการแบ่งเนื้อทองบริสุทธิ์ 100 % ออกเป็น 24 ส่วน ยกเว้น กรณี ทองคำ 24 kt จะใช้กับปริมาณทองคำตั้งแต่ 99.0 % ขึ้นไป

ส่วนคำว่า Hallmarking คือค่าที่ใช้แสดงปริมาณหรือมาตรฐานของทองคำซึ่งแสดงเป็นตัวเลขทศนิยมโดยกำหนดให้ทองคำบริสุทธิ์ 100% มีค่าเท่ากับ 1.000

มาตรฐานวัดน้ำหนักทองในประเทศไทย เราใช้หน่วยเป็นบาท มีค่าเท่ากับ 15.244 กรัม

2.3 โลหะทองคำผสม หรือทองคำกะรัต

2.3.1 คุณสมบัติต่างๆของทองคำและโลหะผสมอื่นๆ

โดยทั่วไปโลหะทองคำ จะมีการเติม ธาตุต่างๆด้วย เช่น ทองแดง เงิน สังกะสี โดยได้แสดงคุณสมบัติต่างๆ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติทางฟิสิกส์ของทองคำ ทองแดง เงิน และสังกะสี

	ทองคำ	ทองแดง	เงิน	สังกะสี
สัญลักษณ์	Au	Cu	Ag	Zn
เลขอะตอม	79	29	47	30
น้ำหนักอะตอม	196.967	63.54	107.87	65.37
โครงสร้างผลึกที่ 20°C	fcc	fcc	fcc	hcp
รัศมีอะตอม(nm)	0.1441	0.1278	0.1444	0.139
ความหนาแน่นที่ 20°C	19.32	8.96	10.49	7.14
จุดหลอมเหลว(°C)	1064.4	1083	961.9	419.5
จุดเดือด(°C)	2808	2595	2210	906
แรงตึงผิวที่จุดหลอมเหลว(mN/m)	1140	1300	895	770

2.3.2 ทองคำกะรัต

เนื่องจากทองคำบริสุทธิ์มีความแข็งแรงที่ต่ำ และราคาสูง จึงได้มีการใช้งานของทองคำกะรัตมาก โดยมีการเติมธาตุ ทองแดงและ เงินเข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกล และคุณสมบัติด้านสีที่มีความหลากหลายมากขึ้น

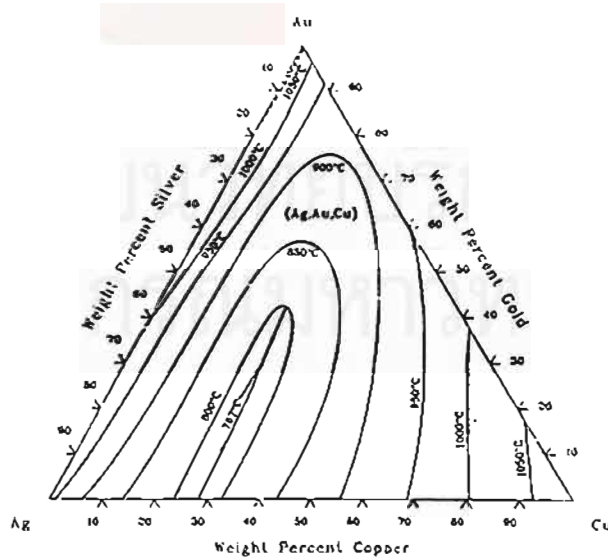
จากการศึกษา³ ที่ผ่านมามีการนำทอง 18 กะรัต มาใช้งานกันตั้งแต่ก่อนปี 1854 โดยได้ใช้ทองผสมกับเงิน โดยเติมลงไปปริมาณเล็กน้อยและได้มีใช้กันมาเรื่อยๆ และได้มีการใช้ทองในกะรัตต่างๆกันเพิ่มขึ้น คือ 9 และ 14 กะรัต ตามมา ซึ่งการเติมโลหะผสมอื่นนั้นเป็นสิ่งสำคัญ เช่น การเติมเงินลงไปทอง นั้นจะไม่ช่วยลดจุดหลอมเหลวของโลหะผสมนี้จนกว่าจะมีปริมาณเงินถึง 35 % (ส่วนผสมจะใกล้ทอง 16 กะรัต) โดยจะได้จุดหลอมเหลวลดลงเล็กน้อย (ประมาณ 1010-1020 °C) ในขณะที่เมื่อเติมทองแดงลงไปทองนั้นช่วยลดจุดหลอมเหลวลงทันที เช่น เมื่อเติมทองแดงลงไปปริมาณ 25 % (หรือ ทอง 18 กะรัต) ทำให้จุดหลอมเหลว ลดลงเป็น 885 °C จากทองคำบริสุทธิ์ที่มีจุดหลอมเหลว 1064 °C

โดยตารางที่ 2.3 จะแสดงถึงจุดหลอมเหลวของทองคำกะรัตต่างๆ โดยจะเห็นได้เช่น ในทองคำ 14 กะรัต ที่มีปริมาณ ทอง 58.5% เงิน 20.75% ทองแดง 20.75% อุณหภูมิที่ เริ่มแข็งตัวประมาณ 845 °C อุณหภูมิที่แข็งตัวสิ้นสุด ประมาณ 827 °C

ตารางที่ 2.3 แสดงช่วงของการหลอมเหลวของโลหะผสมทอง³

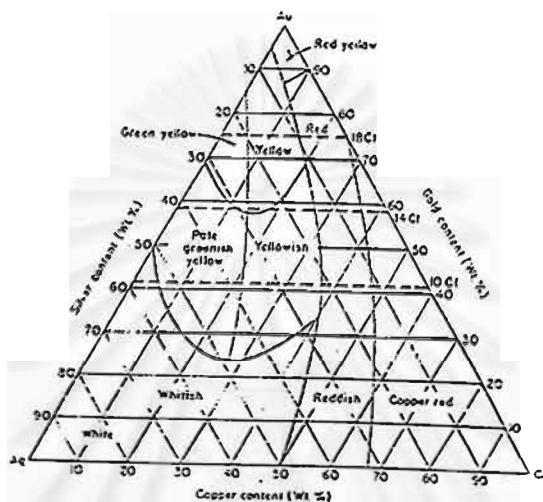
กะรัต	ปริมาณส่วนผสม (wt.%)			อุณหภูมิ(°C)		
	ทอง	เงิน	ทองแดง	เริ่มแข็งตัว	แข็งตัวอย่าง สมบูรณ์	ความแตกต่างของ อุณหภูมิ
22	91.6	4.2	4.2	1003	971	32
20	83.3	8.3	8.3	955	915	40
18	75	12	12.5	905	882	23
16	66.6	16.7	16.7	872	855	17
14	58.5	20.75	20.75	845	827	18
12	50	25	25	827	807	20
9	37.5	31.25	31.25	825	790	35

ในขณะที่ความรู้ทางด้านโลหะวิทยาได้มีการพัฒนามากขึ้น ได้มีการศึกษาถึงอิทธิพลของส่วนผสมหลัก เงิน และทองแดง ราวปี ค.ศ. 1954 ทำให้ทราบถึงจุดหลอมเหลวของโลหะผสมของ ทอง-เงิน-ทองแดง ในรูปของแผนภูมิสมดุล 3 เฟส (Ternary phase diagram) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยเส้นที่บคือเส้นที่บอกถึงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวใดๆ ตามส่วนผสมทางเคมี



รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุล 3 เฟส ของ ทอง - เงิน - ทองแดง

ในการเติมทองแดงและเงินนั้นส่งผลให้ทองคำระดับนั้น ๆ มีสีที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสัดส่วนของโลหะผสมเป็นสิ่งที่สำคัญโดยมีการแสดงความสัมพันธ์ของสีของโลหะผสมทอง-เงิน-ทองแดง คล้ายกันกับที่แสดงในรูปของแผนภูมิสมมูล 3 เฟส แต่ต่างออกไปที่อยู่ในรูปพื้นที่ของส่วนผสมต่างๆที่จะมีสีแตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงช่วงของส่วนผสมของสีของโลหะผสมทอง-เงิน-ทองแดง

2.4 โลหะประสาน(Brazing)

การใช้งานทองคำนั้นบางครั้งมีความจำเป็นที่จะต้องเชื่อมประสานต่อรอยต่อต่าง ๆ หรือซ่อมแซมชิ้นงานนั้น ๆ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะใช้โลหะประสานขึ้น³ ในยุคแรก ๆ ของการใช้งานนั้นได้มีการเติมทองผสมกับเงิน แต่ต่อมาได้มีการใช้ทองคำระดับมากขึ้น ดังนั้นจึงเกิดปัญหาขึ้นว่าเมื่อมีการใช้ทองคำระดับต่าง ๆ กันขึ้น จะต้องใช้ตัวประสานที่มีส่วนผสมต่าง ๆ กันอีกหรือไม่ โดยได้มีการระบุถึงคุณสมบัติที่จำเป็นของตัวประสาน คือ เรื่องของสีของรอยประสาน โดยต้องมีการใช้ส่วนผสมให้ใกล้เคียงกับสีของทองคำที่นำมาประสานที่สุด และตัวประสานควรจะต้องมีจุดหลอมเหลวที่น้อยกว่าชิ้นงานที่จะประสานและต้องมีคุณสมบัติทางกลที่ใกล้เคียงกันจึงเป็นสิ่งสำคัญ

การใช้งานตัวประสานโดยทั่วไปจะทำโดยการรีดโลหะประสานให้เป็นแผ่นบาง ๆ และนำมาตัดหรืออัดให้เล็กลงกลายเป็นขนาดที่เหมาะสมประมาณ 1/4" * 1/4" * 1/100" โดยมีชื่อเรียกต่างๆกันเช่น Pallion (ภาษาฝรั่งเศส), Spangle หรือ small plate และตัวประสานยังถูกใช้ในรูปแบบของผง (Dust) ก็ได้

ความสามารถในการละลายของตัวประสานทอง จากการวิจัย³ ได้พบว่า ในสัดส่วนของเงินและทองแดงที่เท่า ๆ กันโดยน้ำหนัก (ปริมาณทองคำคงที่) จะมีจุดหลอมเหลวต่ำที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวของทองคำในอัตราส่วนของเงินและทองแดงต่าง ๆ กัน³

ส่วนผสม(wt.%)			อัตราส่วน		จุดหลอม เหลว (°C)	จุดที่เริ่มมีการ ไหล (°C)
ทอง	เงิน	ทองแดง	เงิน	ทองแดง		
ทอง 15 กระรัต						
62.5	32.0	5.5	6	1	966	1004
62.5	25.0	12.5	2	1	890	925
62.5	18.75	18.75	1	1	860	877
62.5	12.5	25.0	1	2	875	895
62.5	5.5	32.0	1	6	910	925
ทอง 12 กระรัต						
50.0	43.0	7.0	6	1	900	939
50.0	33.3	16.7	2	1	809	838
50.0	25.0	25.0	1	1	807	827
50.0	16.7	33.3	1	2	851	865
50.0	7.0	43.0	1	6	881	905

จากตารางที่ 2.4 พบว่าอัตราส่วนของเงินและทองแดงที่ 1:1 ในทอง 15 กระรัตจะได้จุดหลอมเหลวต่ำสุดประมาณ 860°C ในทอง 12 กระรัตจะมีค่าประมาณ 807 °C

ส่วนงานวิจัยของ Greg Normandeau⁴ ได้กล่าวว่าการเติมแคดเมียมและสังกะสีในช่วงประมาณ 1- 25 % โดยน้ำหนัก จะช่วยลดจุดหลอมเหลวได้ และสามารถช่วยคุณสมบัติทางด้านการเปียก (wetting) ด้วยแร่ทองคำวิจัยมะเร็งนานาชาติ(International Agency for Research on Cancer, IARC) ได้วิตกกังวลเกี่ยวกับการใช้แคดเมียม เพราะแคดเมียมมีจุดหลอมเหลวที่ 321°C และจุดเดือดที่ 767°C โดยจะเกิดเป็นไอของแคดเมียมออกไซด์ซึ่งเป็นสารพิษที่เป็นอันตรายต่อร่าง

กายอย่างมากเช่น ก่อให้เกิดโรคทางด้านปอดและไต The National Institute of Occupational Health & Safety (1993) ยังได้กำหนดค่ามาตรฐานที่ต่ำสุดที่จะมีแคดเมียมออกไซด์ในอากาศที่ใช้งานในการทำงานได้ ไม่เกิน 0.01 mg/m^3 ต่อการทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน แต่ขณะที่การใช้สังกะสีกำหนดที่ 5.0 mg/m^3 ต่อการทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน จะเห็นได้ว่าค่าต่างกันถึง 500 เท่า เนื่องจากแคดเมียมจะเป็นสารที่มีพิษต่อร่างกายมนุษย์มากที่สุด

การแก้ปัญหาที่ทำได้ง่ายที่สุด ก็คือ การเลิกใช้งานแคดเมียมในการทำตัวประสานโดยเริ่มกันตั้งแต่ปี 1977 สำหรับตัวประสานที่ใช้กันคือมีการเติม เงิน(Ag),ทองแดง(Cu) เช่นในตัวประสานของทอง 18 กระรัต ที่อัตราส่วน 1: 2.57 โดยจะได้จุดหลอมเหลวต่ำที่สุดประมาณ 895°C และยังมีการเติมสารบางตัวเพื่อลดจุดหลอมเหลวลงไปอีก เช่น สังกะสี (Zn), ดีบุก (Sn), อินเดียม (In), แกลเลียม (Ga), เจอมาเนียม(Ge)โดยจะไม่มีการใช้แคดเมียม(Cd)อีก ตารางที่ 2.5 ได้แสดงส่วนผสมของตัวประสานทองสีเหลืองที่ปราศจากแคดเมียมที่กระรัตต่างๆ และตารางที่ 2.6 แสดงข้อมูลทางด้านอุณหภูมิและค่า utility variance ซึ่งคำนวณจากผลต่างของจุดหลอมเหลวของตัวประสาน กับ จุดที่เริ่มมีการไหลตัวของงานหล่อ เช่น ในทอง 14 กระรัต งานหลอมมีจุดที่เริ่มมีการไหลตัวที่อุณหภูมิเป็น 855°C ในตัวประสาน 14 กระรัตแบบ easy จะมีจุดหลอมเหลว เป็น 728°C ดังนั้นค่า utility variance เป็น 127°C โดยยังมีค่ามากยิ่งง่ายต่อการประสาน

ตารางที่ 2.5 ตัวประสานทองสีเหลืองที่ปราศจากแคดเมียม⁴

วัสดุ	ทองคำ (wt.%)	เงิน (wt.%)	ทองแดง (wt.%)	สังกะสี (wt.%)	ดีบุก (wt.%)	อินเดียม (wt.%)
10k 'easy'	41.67	27.10	20.90	5.33	2.50	2.50
10k 'medium'	41.67	29.40	22.18	4.25	2.50	
10k 'hard'	41.67	33.25	23.85	1.23		
14k 'easy'	58.33	14.42	13.00	11.75		2.50
14k 'medium'	58.33	17.50	15.67	6.00	2.50	
14k 'hard'	58.33	20.00	18.17	3.50		
18k 'easy'	75.00	5.00	9.30	6.70		4.0
18k 'medium'	75.00	6.00	10.00	7.00		2.0
18k 'hard'	75.00	6.00	11.00	8.00		

หมายเหตุ ' casting ' คือชิ้นงานทองที่หล่อออกมาเพื่อจะนำมาประสานกัน ส่วน easy, medium, hard คือความง่ายต่อการประสานจากง่ายไปหายากตามลำดับ

ตารางที่ 2.6 ข้อมูลทางด้านอุณหภูมิสำหรับตัวประสานทองสีเหลือง⁴

วัสดุ	จุดหลอมเหลว (°C)	จุดที่เริ่มมีการไหล (°C)	Utility variance
10k casting	895	830	-
10k easy	730	680	100
10k medium	763	743	67
10k hard	795	777	35
14k casting	875	855	-
14k easy	728	685	127
14k medium	774	757	81
14k hard	807	795	48
18k casting	875	855	-
18k easy	750	726	105
18k medium	781	765	74
18k hard	804	797	46

งานวิจัยของ Dieter Ott (1996)⁵ ได้กล่าวถึงการใช้อาตุ สังกะสี ดีบุก อินเดียม แกเลียม ในการทดแทนธาตุแคดเมียมเนื่องจากธาตุดังกล่าวมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำดังแสดงในตารางที่ 2.7 และสามารถลดจุดหลอมเหลวให้แก่โลหะประสานได้อย่างดี อย่างไรก็ตามตามธาตุ ดีบุก อินเดียม แกเลียม ต่างก็มีจุดเดือดที่สูงทำให้ไม่มีปัญหาด้านงานหล่อเท่าสังกะสี นอกจากนี้สังกะสียังก่อให้เกิดปัญหาด้านสีแก่โลหะประสาน(ทำให้โลหะประสานนั้นมีสีที่ขาวมากขึ้น โดยเรียกว่าเกิด Bleaching Effect) ในขณะที่แกเลียมมีปัญหาด้านสีน้อยมาก

ตารางที่ 2.7 แสดงจุดหลอมเหลวและจุดเดือดของโลหะต่างๆ

โลหะ	จุดหลอมเหลว (°C)	จุดเดือด(°C)
สังกะสี	419	907
ดีบุก	232	2270
อินเดียม	157	2080
แกเลียม	30	2403
แคดเมียม	321	765

Christoph J.Raub และ Dieter Ott (1983)²² พบว่าเมื่อควบคุมปริมาณทองแดงให้คงที่ และที่สังกะสีประมาณ 0.5-1.9 % สังกะสีแทบจะไม่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลและไม่กระทบต่อ โครงสร้างทางจุลภาค

Mark Grimwade (1994)²³ ศึกษาถึงผลของการเติมสังกะสี(น้อยกว่า 0.5%) จะช่วยลด การเกิดออกซิเดชันได้ แต่ถ้าเติมมากเกินไป 10 % จะกระทบต่อสีและคุณสมบัติทางกล อีกทั้งยังมีผล ทำให้เกิด Softening Effect ได้อีกเนื่องจากสังกะสีจะลดพื้นที่ของการเกิด order

Greg Normandeau (1996)⁹ กล่าวว่าเมื่อเติมดีบุกจะทำให้เกิด Embrittlement ในโลหะ ประสานได้และถ้าเติมอินเดียมใน โลหะประสานทองคำ-นิกเกิล-ทองแดง-สังกะสีจะเกิด Segregated Structure ทำให้ยากต่อการขึ้นรูปอีกด้วย

M.Dabala และ M.Magrini (1998)²⁴ ศึกษาการเติมดีบุก อินเดียม แกเลียม เพื่อทดแทน แคดเมียม ซึ่งความสามารถในการละลายของอินเดียมและแกเลียมต่ำ และเมื่อเติมในโลหะ ประสานจะช่วยลดจุดหลอมเหลวได้ แต่จะไม่กระทบต่ออุณหภูมิหลอมเหลวสมบูรณ์(Liquidus) นัก ซึ่งจะทำให้ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวกว้างขึ้นด้วย

G.Humpston & D.M.Jacobson (1993)²⁵ ได้ศึกษากระบวนการเชื่อมที่อุณหภูมิต่ำ สำหรับงานที่ใช้ประกอบกับทองรูปพรรณ ซึ่งได้รับการพัฒนาเมื่อไม่นาน โดยเรียกวิธีนี้ว่า "diffusion soldering" ใช้จากชั้นบางๆของดีบุก เป็นโลหะเติมเต็ม และใช้ที่อุณหภูมิน้อยกว่า 450 ประโยชน์ของกระบวนการเชื่อมวิธีนี้ได้แสดงโดยพัฒนา foil ของตัวประสาน และได้เลือกใช้ฟลักซ์ (Flux) ที่เหมาะสมและเชื่อมได้ในอากาศ โดยทั่วไปได้พัฒนาเพื่อใช้กับ ทอง 18 และ 22 กะรัต และยังใช้ได้กับทองรูปพรรณ ที่มีสังกะสี 6.8 % โดยน้ำหนัก และทอง 990

งานวิจัยของ J.Cognard^{26,27} ได้อ้างถึงงานวิจัยของ E.H.Andrew (1982) ที่ได้พูดถึง เรื่องการวัดความแข็งแรงของรอยต่อ ของพวกทองเหลือง, เหล็ก, อะลูมิเนียม, เหล็กกล้าไร้สนิม โดย เขาได้นำวิธีไปประยุกต์ใช้กับการวัดความแข็งแรงของทองด้วยโดยใช้วิธีทดสอบแบบ Lap shear

2.4.1 ความแตกต่างระหว่าง brazing กับ soldering

ในการใช้งานนั้นมักจะใช้ชื่อตัวประสานว่า Soldering ซึ่งความเป็นจริงแล้วควรเรียกว่า Brazing เนื่องจากความหมายของ Brazing นั้นแทนการประสานที่ใช้งาน ที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 800°C (426°F) แต่อาจจะเรียกว่า hard soldering ก็ได้(มาจาก ภาษาละตินว่า Solidare แปลว่า ทำให้เป็นของแข็ง)

2.5 คุณสมบัติของโลหะประสานทอง

โดยทั่วไปแล้วโลหะประสานใช้เพื่อทำการเชื่อมรอยต่อของวัสดุ 2 ชิ้น โดยการหลอมละลายวัสดุให้อุณหภูมิมากกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะประสาน ในขณะที่เดียวกันอุณหภูมิจะต้องไม่สูงกว่าอุณหภูมิที่เริ่มมีการไหลตัวของวัสดุที่จะเชื่อมต่อ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงคุณสมบัติด้านต่างๆของโลหะประสานอีก อาทิ คุณสมบัติทางกล ความต้านทานการกัดกร่อน คุณสมบัติด้านการเปียก ผลต่อสภาพแวดล้อม ราคา ี

คุณสมบัติที่มีความสำคัญในโลหะประสาน

2.5.1 อุณหภูมิที่ใช้งาน(Working temperature)

อุณหภูมิที่ใช้ในการประสาน โดยทั่วไปจะสูงกว่าจุดหลอมเหลวของตัวประสานประมาณ 50-100 องศาเซลเซียส โดยจะต้องมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเริ่มไหลตัวของวัสดุที่จะประสาน ความแตกต่างระหว่าง จุดหลอมเหลวของตัวประสาน กับ อุณหภูมิที่เริ่มมีการไหลตัวของวัสดุ ยังมีความแตกต่างมากยิ่งมีการไหลตัวดีขึ้น

2.5.2 สี(color)

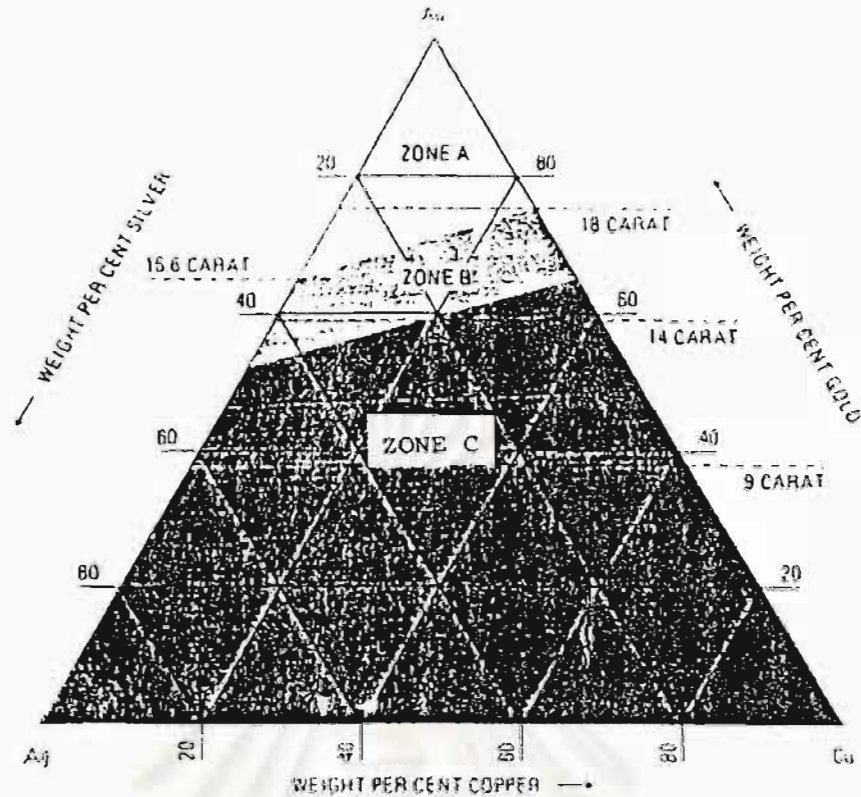
หลังจากประสานโลหะเข้ากับวัสดุแล้วความกลมกลืนของสีเป็นสิ่งที่สำคัญในงานเกี่ยวกับเครื่องประดับโดยจุดประสงค์เพื่อความสวยงาม ซึ่งในการบ่งบอกถึงลักษณะของสีนั้นยากและสับสนต่อการอธิบายในลักษณะข้อมูลทางคุณภาพ แต่โชคดีที่ผ่านมาได้เริ่มมีการใช้เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ ในการวัดค่าสี โดยจะช่วยลดข้อสงสัย หรือความคลุมเครือได้ โดยใช้มาตรฐาน CIELAB ในการวัดค่าสี ซึ่งได้แสดงทฤษฎีการวัดสีในภาคผนวก ก

2.5.3 คุณสมบัติทางกล(Mechanical properties)

คุณสมบัติทางกลที่สำคัญ เช่น ค่าความแข็งแรง ความแข็ง

2.5.4 ความต้านทานการกัดกร่อน

โลหะผสมทองคำนั้นจะมีความต้านทานการกัดกร่อนและต้านทานการหมองของสีค่อนข้างสูงตามปริมาณทองคำที่มีอยู่ในวัสดุ จะเห็นได้จากรูปที่ 2.3 แสดงความต้านทานต่อการหมองของโลหะผสม ทองคำ- ทองแดง- เงิน



รูปที่ 2.3 แสดงความต้านทานการหมองของโลหะผสม ทอง-เงิน-ทองแดง

โดย บริเวณ A แทน บริเวณที่ไม่มีการกัดกร่อนและการหมอง

บริเวณ B แทน บริเวณที่เกิดการหมองในบรรยากาศซัลเฟอร์

บริเวณ C แทน บริเวณที่เกิดการหมองและการกัดกร่อน

โดยทั่วไปจะมีความต้านทานต่อการหมองที่ปริมาณทองคำ มากกว่า 50 %at. (มากกว่า 18 กะรัต)

2.5.5 ราคา

การเลือกใช้งานโลหะประสมานั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงราคาของวัสดุที่จะใช้ด้วย เช่น การเลือกธาตุอินเดียมนั้น มีราคาที่สูง (ประมาณ 5 เท่าของเงิน) ในขณะที่เมื่อเลือกใช้งานสังกะสี จะมีราคาถูกกว่าแต่คุณภาพต่ำกว่าโลหะประสมที่มีธาตุอินเดียมผสม

2.5.6 ส่วนผสมทางเคมีต้องไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม

โลหะที่ออกมาจากโลหะผสมที่มีสารแคดเมียมผสมอยู่จะมีผลเกี่ยวกับปัญหาทางด้านปอดและไต โดยจะมีผลในระยะยาวทำให้ผู้ป่วย ร้อยละ 20 ถึงแก่ความตาย

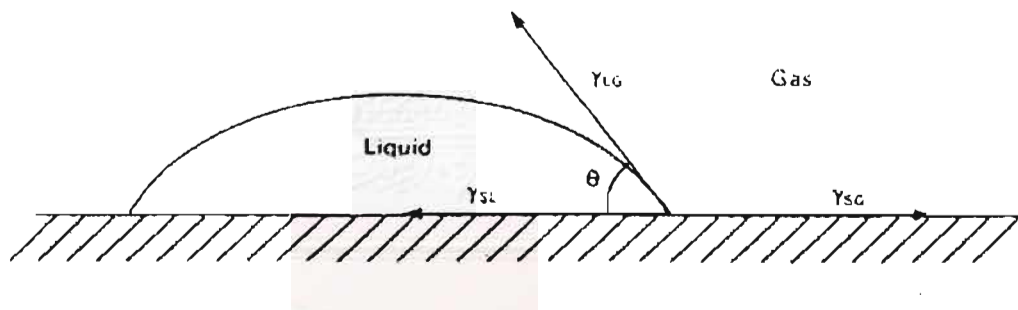
2.5.7 ความสามารถในการเปียก (Wettability)

ในการประสานที่ตินั้นจำเป็นต้องใช้โลหะประสานที่มีความสามารถในการเปียกที่ดี เพื่อที่จะทำให้มันสามารถไหลไปได้ครอบคลุมทั้งแบบ และทำให้มีความแข็งแรงพอเพียงที่จะยึดผิวสัมผัสนั้น

2.6 การวัดความสามารถในการเปียก⁷⁻¹⁸

ความสามารถในการเปียกคือ สิ่งที่แสดงให้เห็นว่า ของเหลวนั้นๆจะสามารถกระจายตัวไปบนผิวของของแข็งได้ดีเพียงไร ดังนั้นเมื่อของเหลว สามารถกระจายตัวได้ดีก็มีความสามารถในการเปียกสูงทำให้มีความแข็งแรงในการยึดติดผิวสัมผัสได้ดี โดยเราสามารถแสดงความสามารถในการเปียกได้โดยการหาค่าออกมาในรูปของตัวเลข ดังนี้ มุมสัมผัส(Contact angle) และ แรงตึงผิว(surface tension)

ถ้าของเหลวหยดลงบนฐานที่เป็นของแข็ง(solid substrate) ในบรรยากาศหนึ่งดังรูปที่ 2.4 มุมสัมผัส (contact angle) คือมุม θ จากสถานะตามรูปนี้ สามารถแสดงความสัมพันธ์ของแรงตึงผิวทั้งสามได้ดังสมการที่ 2.1



รูปที่ 2.4 แสดงของเหลวในสมดุลกับของแข็งด้วยมุมสัมผัส θ

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos\theta \quad \dots (2.1)$$

โดย γ_{SG} = แรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับก๊าซ(solid-gas)

γ_{SL} = แรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับของเหลว(solid-liquid)

γ_{LG} = แรงตึงผิวระหว่างของเหลวกับก๊าซ(liquid-gas)

θ = มุมสัมผัส(contact angle)

ซึ่งเราสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้ $\cos\theta = (\gamma_{SG} - \gamma_{SL}) / \gamma_{LG}$... (2.2)

จะเห็นได้ว่า θ เป็นตัววัดความสามารถในการเปียกได้ ดังนี้

เมื่อ $\theta < 90$ องศา คือ ของเหลวเปียกบนของแข็งนั้น

$\theta > 90$ องศา คือ ของเหลวไม่เปียกบนของแข็ง(non-wetting)
สมการที่ 2.1 นี้เขียนโดย Young แต่มักจะอ้างถึงสมการของ Young-Dupre ด้วยเสมอตั้งสมการที่ 2.2(ซึ่งเป็นการจัดรูปสมการใหม่)และยังสามารถแสดงออกมาในรูปของ Spreading Coefficient (SC) ตั้งสมการที่ (2.3)

$$SC = \gamma_{se} - (\gamma_{sl} + \gamma_{lg}) \quad \dots (2.3)$$

จากสมการที่ 2.1 ถึง 2.3 จะเห็นได้ว่า ของเหลวนั้นจะสามารถเปียกบนของแข็งได้ดี จะมีความสัมพันธ์ต่างกันตามแต่ค่าของ θ , γ_{se} , γ_{sl} , γ_{lg} เมื่อ θ มีค่าต่ำ γ_{se} มีค่าสูง และ γ_{sl} , γ_{lg} มีค่าต่ำ

ค่า θ , γ_{lg} สามารถแสดงได้ในรูปของพลังงานได้เป็น $W = \gamma_{lg} (1 + \cos\theta)$

โดย $W = \text{work of adhesion}$

การวัด surface tension มีหลายวิธีที่ใช้กันแต่ได้ค่าที่ไม่เที่ยงตรงนัก อย่างไรก็ตามวิธีที่ได้รับการยอมรับและให้ค่าค่อนข้างเที่ยงตรง ได้แก่ Sessile drop method, Pendant drop method, Drop weight method ซึ่งวิธีการต่าง ๆ ได้อธิบายโดยสังเขปในภาคผนวก ข

Lawrence E. Muir¹⁰ ได้แสดงค่าแรงตึงผิวของของโลหะต่าง ๆ โดยในที่นี้ได้แสดงเพียงค่าของโลหะผสมทองและธาตุผสมอื่น ๆ เช่น ทองแดง เงิน สังกะสีได้ผลดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 แสดงค่าแรงตึงผิวของโลหะผสมทองและธาตุผสมอื่นๆ¹⁰

โลหะหรือโลหะผสม	γ_{LG} (mN/m)	อุณหภูมิ(°C)
Gold	1140	1063
Au-31%Ag	1029	1108
Au-55%Ag	982	1108
Au-67%Ag	945	1108
Au-79%Ag	917	1108
Au-20%Cu	1110	1300
Au-50%Cu	1150	1300
Au-80%Cu	1200	1300
Cu	1300	1083
Ag	895	1000
Zn	770	420
Cd	590	321
In	560	156
Ga	720	30.3
Sn	550	232

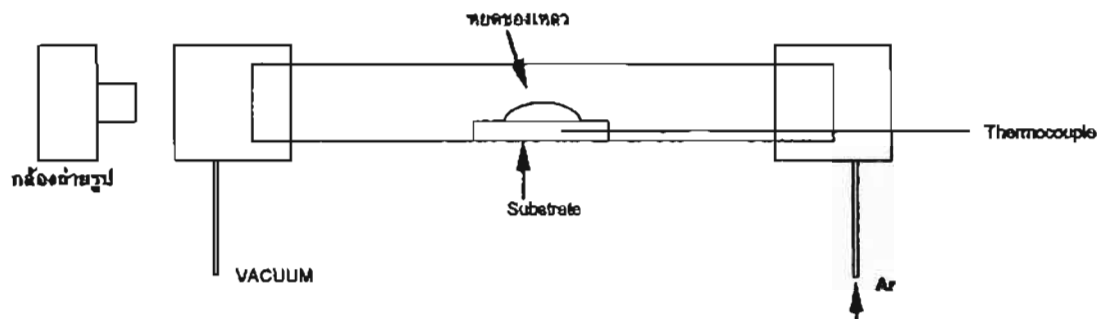
Dieter Ott และ Christoph J.Raub⁶ ศึกษาค่าแรงตึงผิวและมุมสัมผัสของการหล่อทอง

ในกระวัดต่างๆดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 แสดงแรงตึงผิวและมุมสัมผัส⁶

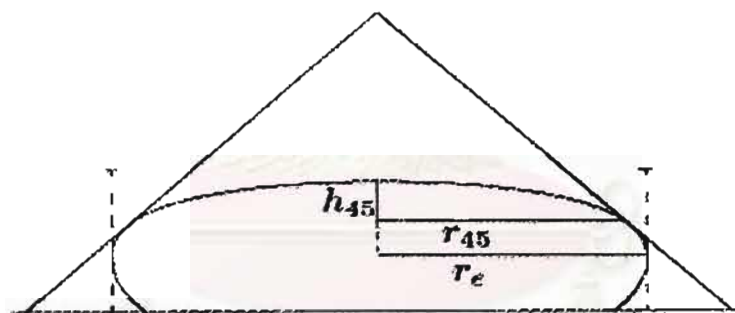
โลหะผสม	บรรยากาศ	มุมสัมผัส(องศา)	แรงตึงผิว(mN/m)
14 K yellow gold	Vacuum	144	1210
	Form gas	148	1330
	Ar	161	660
	Air	<50	--
18 K yellow gold	Ar	152	1230
with 1%Zn	Ar	106	30
with 1%Ni	Ar	157	191
18 K Pd-white gold	Form gas	150.	1510
18 K Ni-white gold	Ar	153	193

งานวิจัยส่วนใหญ่ที่ได้จากการค้นคว้าจะเลือกใช้ วิธี sessile drop กับ Pendent drop เพราะวิธีเหล่านี้เหมาะกับใช้กับที่อุณหภูมิสูง, สามารถทำที่บรรยากาศใดก็ได้, สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ดี โดยในวิธี sessile drop นั้นได้มีผู้ทดลองในแบบต่างๆกัน เช่น การวัดมุมโดยตรงจากหยดของเหลว หรือวัดทางอ้อมจากการถ่ายรูปออกมา ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เครื่องมือทดสอบแบบ sessile drop

การวัดวิธีนี้มีผู้ได้เสนอแนวคิดในการคำนวณแรงตึงผิวออกมาในแนวต่างๆกันโดยวิธีต่างๆ จะแสดงในภาคผนวก ข โดยจะแสดงงานของ Humenik and Kingery¹⁹ โดยเขาได้กล่าวถึงสมการของ Dorsey²⁰ ดังสมการที่ 2.4



รูปที่ 2.6 แสดงการวัดบน sessile drop เพื่อการคำนวณหาตัวแรงตึงผิวและมุมสัมผัส

$$\sigma = r_e^2 g \rho (0.052/f - 0.12268 + 0.0481f) \quad \dots (2.4)$$

$$f = (r_{45} - h_{45})/r_e - 0.41421 \quad \dots (2.5)$$

โดย ค่า $g = 9.81 \text{ m/s}^2 (\text{N/Kg})$

$\rho =$ ความหนาแน่น (g/cm^3)

$r =$ ความยาวของหยดของเหลว ดังรูป (cm)

$\sigma =$ แรงตึงผิว ($\approx 0.1 \text{ N/m}$)

หมายเหตุ $1 \text{ erg/cm}^2 = 10^{-3} \text{ N/m}$

สมการที่ 2.4 นั้น ได้นำค่าต่างๆที่ได้จากการทดลองดังรูปที่ 2.6 ซึ่งจะได้ค่าของมุมสัมผัสกับแรงตึงผิวระหว่างของเหลวกับแก้ว

จากงานข้างต้นยังมีข้อจำกัดทางด้านความเที่ยงตรงของข้อมูลอยู่ เนื่องจากใช้ค่าในการคำนวณที่จุด 45 องศาเท่านั้นอีกทั้งที่ไม่สามารถหาค่าได้ทุกขนาดของชิ้นงาน ดังนั้น O.I.del Ri'o and A.W. Neumann²¹ ได้ศึกษา การคำนวณแบบใหม่ที่เรียกว่า Axisymmetric Drop Shape Analysis (อธิบายอย่างละเอียดในภาคผนวก ค) ซึ่งวิธีการนี้สามารถเลือกจุดใดก็ได้ใน ชิ้นงานที่ได้มา อีกทั้งยังได้มีการพัฒนาเขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำให้การคำนวณนั้นสะดวก รวดเร็ว และมีความแม่นยำสูงกว่าอดีตมาก

วิธีการดังกล่าวนี้มีพื้นฐานมาจาก Semi empirical equation จาก Laplace equation โดยสามารถเขียนเป็นสมการในรูปของ Ordinary differential equations ได้ดังนี้

$$dx/d\theta = \cos\theta (2b+cz-\sin\theta/x)^{-1} \quad \dots(2.6)$$

$$dz/d\theta = \sin\theta(2b+cz-\sin\theta/x)^{-1} \quad \dots(2.7)$$

$$db/d\theta = 0 \quad \dots(2.8)$$

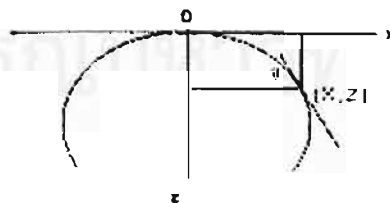
$$dc/d\theta = 0 \quad \dots(2.9)$$

$$dV/d\theta = 22/7*(x^2)*\sin\theta (2b+cz-\sin\theta/x)^{-1} \quad \dots(2.10)$$

$$x(0)=z(0)=0, x(\theta_1)=R, z(\theta_2)=H \quad \dots(2.11)$$

$$R=D/2$$

โดยที่ $x=0$ จะได้ว่า $\sin(\theta)/x = b$ ซึ่งค่า x กับ z นั้นเป็นค่าคู่อันดับของชิ้นงานตามรูปที่ 2.7 โดย θ เป็นค่ามุมของเส้นสัมผัส D แทนค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน R แทน ค่ารัศมีที่มุม θ_1 , H แทนค่า ความสูงที่มุม θ_2 , b แทน ค่า curvature ของชิ้นงานที่จุดกำเนิด c แทน ค่าคงที่คาพิลารี(Capillary constant) โดย $c = pg/\gamma$ ค่า p แทน ความหนาแน่นของชิ้นงานหลอมเหลว γ แทน แรงตึงผิว และค่า g แทน ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก



รูปที่ 2.7 แสดงคู่อันดับของชิ้นงานในการคำนวณ

จากสมการ ที่ 2.6 ถึง 2.10 นั้นใช้การแก้สมการแบบธรรมดาไม่ได้ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์มาช่วยคำนวณโดยผู้วิจัยส่วนใหญ่นิยมใช้ ระเบียบวิธีของ

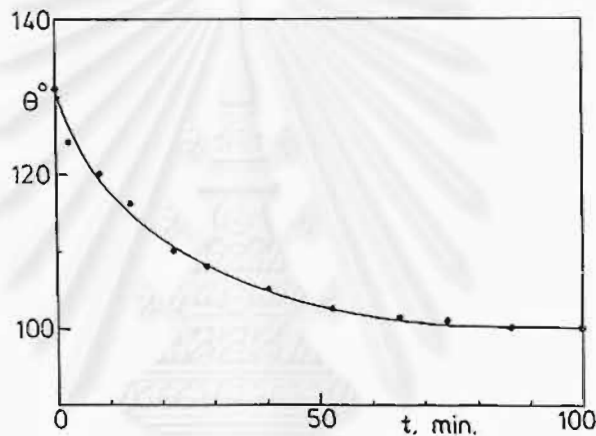
รุงเง-คุดตา(Runge-Kutta Method)อันดับที่สี่ เพราะว่าได้ผลลัพธ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง (งานวิจัยนี้
ได้เลือกให้ใช้ ระเบียบวิธีของรุงเง-คุดตาอันดับที่สี่ เช่นกัน โดยแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ง)

2.7 ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อค่าแรงตึงผิวและมุมสัมผัส

ในการทดลอง Sessile drop นั้นจะพบว่าปัจจัยต่างๆดังนี้

2.7.1 เวลาที่ใช้ในการทดลอง

เมื่อให้ความร้อนแต่โลหะจนหลอมเหลวแล้วที่อุณหภูมิคงที่ ที่จุดหนึ่ง จะเห็นว่าเมื่อปล่อยให้
เวลาผ่านไปและในขณะเดียวกันก็วัดค่ามุมสัมผัสก็จะเห็นได้ว่าค่าจะลดลง และจะค่อยๆคงที่ที่
ค่าๆหนึ่ง ดังรูปที่ 2.8



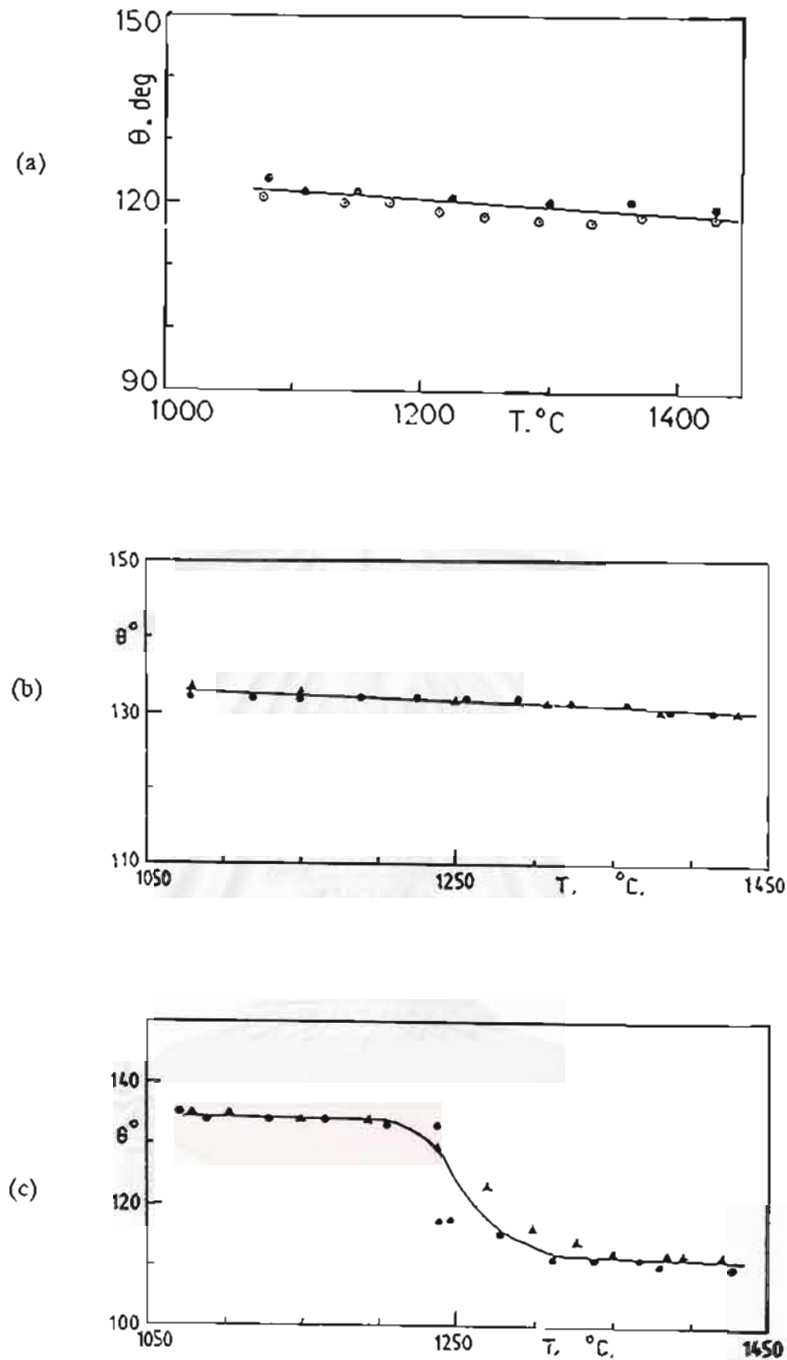
รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับมุมสัมผัสของทองคำน TIC ที่ 1100°C

2.7.2 อุณหภูมิ

ขณะที่โลหะถึงจุดหลอมเหลวโลหะจะปรับตัวอยู่ในของเหลว เมื่อเราให้ความร้อนขึ้นไป
เรื่อยๆ ในโลหะส่วนใหญ่นั้นค่ามุมสัมผัสจะมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่

2.9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

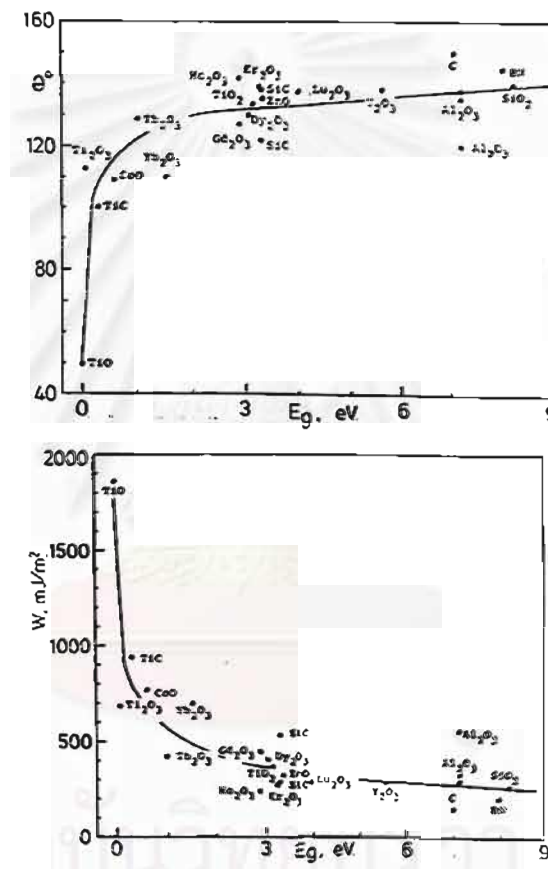


รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับมุมสัมผัสของทองคำบน SiC(a.), TiO₂(b.) และ ZnO(c.)

2.7.3 ฐานรองชิ้นงาน(Substrate)

ฐานรองชิ้นงานในการทดสอบ Sessile Drop เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อมุมสัมผัส ซึ่งในโลหะโดยทั่วไป พวก ทองแดง นิกเกิล เหล็ก ดีบุก โคบอล ซิลิกอน นั้น ฐานรองชิ้นงานจะมีผลต่อโลหะเหล่านี้โดยจะเห็นได้ว่า ฐานที่จำพวก Insulating (คือมีค่า $E_g > 4\text{eV}$) และพวกที่เป็น semiconducting (ค่า $E_g < 4\text{eV}$) จะเป็นตัวแบ่งให้โลหะเหล่านี้ว่าโลหะนั้นจะเปียก(Wetting)หรือไม่

บนฐานนั้นๆ ซึ่งในพวก semiconducting จะทำให้โลหะเปียกได้ง่าย แต่ในกรณีของทอง นั้นฐานไม่ค่อยมีผลมากนักยกเว้นในกรณีที่ฐานเป็น TiO เท่านั้น ดังนั้นในการทดลองหาค่าแรงตึงผิวและมุมสัมผัสของโลหะผสมทองคำ ไม่ควรเลือกใช้ฐานรองชิ้นงานเป็น TiO ดังจะเห็นในรูป 2.10 (รูปบน) พบว่าเมื่อใช้ TiO เป็นฐานรองชิ้นงาน จะเกิดการเปียกบนฐานรอง (มุมสัมผัสน้อยกว่า 90 องศา) ทำให้ไม่สามารถวัดค่าแรงตึงผิวได้ ดังนั้นในการทดลองควรเลือกใช้ฐานรองชิ้นงานชนิดอื่น ๆ แทน เช่น SiO_2 , Al_2O_3 (ส่วนงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ Al_2O_3 เป็นฐานรองชิ้นงาน)



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสและ Work of adhesion ของทองบนฐานต่างๆกับ function of bandgap energies E_g ของฐานต่างๆ

บทที่ 3
ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 วัสดุดิบ

วัสดุดิบที่ใช้ในการทดลองนี้มี ทองคำ เงิน ทองแดง และสังกะสี ซึ่งในการเตรียมตัวอย่างทดลองนั้นจะมีความบริสุทธิ์ 99 % ขึ้นไป โดยแสดงค่าความบริสุทธิ์ของวัสดุดิบในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงความบริสุทธิ์ของวัสดุดิบ

ชนิดของโลหะ	ค่าความบริสุทธิ์(%)	ลักษณะของวัสดุดิบ
ทองคำ (Au)	99.99	แผ่น
เงิน(Ag)	99.9	เม็ดโลหะ
ทองแดง(Cu)	99.9	เม็ดโลหะ
สังกะสี(Zn)	99.9	แท่ง

3.2 เครื่องมือที่ใช้

3.2.1. เตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ(Induction furnace)

3.2.2. กล้องจุลทรรศน์แบบแสง(Optical Microscope)

3.2.3. เครื่องทดสอบแรงดึง(Universal Tensile Test)

3.2.4. เตาเผาโลหะแบบท่อ (Tube furnace)

3.2.5 เครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์(Micro Vickers hardness tester)

3.2.6 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์(Spectrophotometers)

3.3 การเตรียมชิ้นงานเบื้องต้น

3.3.1 โลหะผสมมาตรฐาน(master alloy)

เตรียมโลหะผสมมาตรฐานเพื่อนำมาใช้ในการหล่อตัวประสานทองแดงผสมดังตารางที่

3.2 เพื่อลดการสูญเสียของปริมาณสังกะสีขณะหลอมตัวประสานทอง

ตารางที่ 3.2 แสดงส่วนผสมของโลหะผสมมาสเตอร์(master alloys)

หมายเลข	ส่วนผสม(wt.%)	
	สังกะสี	ทองแดง
M001	30	70
M002	80	20

หมายเหตุ M แทน Master alloy

3.3.2 ตัวประสานทอง

ตัวประสานทองมีส่วนผสมของทองคำ เป็น 58.4 % โดยน้ำหนัก นอกนั้นเป็นส่วนผสมอื่นๆ โดยมีอัตราส่วนของเงินกับทองแดง เป็น 1:1 ส่วนสังกะสีจะแปรผันตั้งแต่ค่า 1-17 %โดยน้ำหนัก โดยมีการเติมมาสเตอร์อัลลอยด์ลงไปโดยทำให้ได้ตัวประสานทองได้ส่วนผสมดังตารางที่ 4.3 โดยรายละเอียดของปริมาณมาสเตอร์อัลลอยด์ที่ใช้อยู่ใน ภาคผนวก จ

ตารางที่ 3.3 แสดงส่วนผสมของตัวประสานทองคำ 14 กระรัต

หมายเลข	ส่วนผสม (wt. %)		
	สังกะสี	เงิน	ทองแดง
B101	1	20.3	20.3
B103	3	19.3	19.3
B105	5	18.3	18.3
B107	7	17.3	17.3
B109	9	16.3	16.3
B111	11	15.3	15.3
B113	13	14.3	14.3
B115	15	13.3	13.3
B117	17	12.3	12.3

หมายเหตุ B แทน โลหะประสาน(Brazing) และตัวเลขสองหลักด้านท้ายแทน ปริมาณสังกะสีที่เติมในโลหะประสาน

3.3.3 ทองคำผสม 14 กระรัต

ทำโดยผสม ทองคำ ทองแดง และเงินในอัตราส่วนดังตารางที่ 3.3 โดยทำการหลอมและเทลงแบบหล่อหลังจากนั้นทำความสะอาดและนำไปรีดให้ได้ความหนาประมาณ 0.7 มิลลิเมตร เพื่อที่จะนำไปตัดและทำเป็นชิ้นงานที่จะใช้ในการเชื่อมต่อไป

โดยจะนำชิ้นงานที่ผ่านการรีดนั้นมาทำการตัดแบ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด ความกว้าง 4.5 มิลลิเมตร และความยาว 12 มิลลิเมตร หนา 0.7 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.4 แสดงส่วนผสมของทองคำผสม 14 กระรัตที่จะถูกประสาน

หมายเลข	ส่วนผสม(wt.%)	
	เงิน	ทองแดง
S002	16.5	25

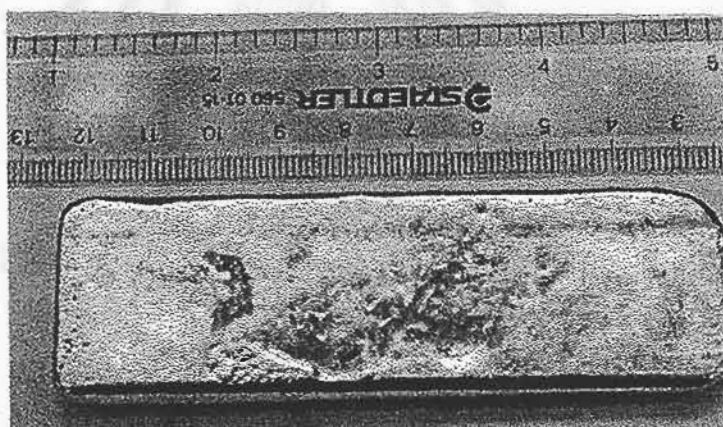
หมายเหตุ S แทน โลหะผสมทองที่จะถูกประสานโดยโลหะประสานทองในตารางที่ 3.3

3.3.4 ฐาน(Substrate)

ฐานที่ใช้ในการทดสอบกับ sessile drop method โดยเป็น อะลูมินา(Alumina) หนา 2 มิลลิเมตร ความกว้าง 2 มิลลิเมตร ความยาว 2 มิลลิเมตร

3.4 ขั้นตอนการทดลองโดยละเอียด

3.4.1. หลอมทองแดงกับสังกะสีด้วยเตาหลอมโลหะแบบเหนียวนำที่อุณหภูมิ 1100°C ปกคลุมบรรยากาศด้วยก๊าซอาร์กอน เพื่อทำโลหะผสมมาสเตอร์(Master alloy)โดยผสมส่วนผสมตามตารางที่ 3.2 ได้ชิ้นงานดังภาพที่ 3.1 หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์ส่วนผสมด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ได้ผลดังตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.1 แสดงชิ้นงานโลหะผสมมาสเตอร์ M001

ตารางที่ 3.5 แสดงผลส่วนผสมของโลหะผสมมาสเตอร์หลังจากงานหล่อ

หมายเลข	ทองแดง(wt.%)	สังกะสี(wt.%)	อื่น ๆ(wt.%)
M001	83.64	16.25	0.11
M002	35.10	64.80	0.10

3.4.2. หุ้มเศษโลหะผสมมาสเตอร์ด้วยแผ่นเงินและแผ่นทอง(เพื่อลดการสูญเสียสังกะสี)ตามส่วนผสมต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.3 (ส่วนปริมาณของธาตุที่เติมแสดงในภาคผนวกที่ ข) ลงในเตาหลอม

โลหะแบบเหนียวนำโดยใช้เบ้ากราไฟท์ ที่อุณหภูมิ 1100°C ปกคลุมด้วยบรรยากาศอาร์กอน และเทลงแบบหล่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เซนติเมตร สูง 5 เซนติเมตร หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาทำความสะอาดและตัดแบ่ง โดยจะนำชิ้นงานไปวัดส่วนผสม, ทดสอบ Sessile drop, ทดสอบ DTA, ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และทดสอบ lap shear

- 3.4.3. หากจุดหลอมเหลวจากเครื่อง DTA (Differential thermal analysis) โดยใช้ชิ้นงานที่ได้จากข้อ 3.4.2 น้ำหนักชิ้นงานทดสอบประมาณ 15-30 มิลลิกรัม บรรยากาศไนโตรเจน และให้ความร้อนด้วยอัตรา 10 °C ต่อนาที ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 1000°C (รูปและผลการทดลองแสดงในภาคผนวก จ)
- 3.4.4. นำชิ้นงานที่ได้จากข้อ 3.4.2 กับฐานรองขึ้น(substrate)ที่เป็นอะลูมินา(Al_2O_3)ที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 600, 800, 1000, 1200 มาทำการทดสอบแบบ sessile drop method โดยใช้เครื่องที่ดัดแปลงมาจาก เตาเผาโลหะแบบท่อ (Tube furnace) ชิ้นงานทดสอบน้ำหนักประมาณ 0.5-2 กรัม รูปร่างทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.6 เซนติเมตร (ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 600, 800, 1000, 1200 และทำความสะอาดด้วยอะซิโตนก่อนเริ่มทดสอบ) ปรับอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องจนถึงประมาณ 1000°C ครอบบรรยากาศด้วยก๊าซอาร์กอน(รูปตัวอย่างชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบแสดงในภาคผนวก ข)
- 3.4.5. ทดสอบความแข็งแรงของโลหะประสานทองที่ได้สภาพหลังจากการหล่อ(As Cast) โดยขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 600, 800, 1000, 1200 และขัดละเอียดด้วยผงเพชรตั้งแต่เบอร์ 9, 3, 1, 1/4 ไมครอนและนำไปทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ ใช้น้ำหนัก 300 กรัม เวลา 30 วินาที
- 3.4.6. ทดสอบค่าสีของโลหะประสานที่ได้สภาพหลังจากการหล่อ(As cast) เตรียมชิ้นงานโดยขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 800 ทดสอบด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์(Spectrophotometer) ซึ่งจะวัดค่าสีออกมาในรูปแบบตัวเลข 3 ค่าคือ ค่า L,a,b (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก)
- 3.4.7 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

3.5.ระเบียบและวิธีการตรวจสอบวิเคราะห์ผล

3.5.1 การตรวจสอบค่าส่วนผสมทางเคมี

วิธีการวิเคราะห์ได้แสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 แสดงวิธีการวิเคราะห์ธาตุที่ได้จากการหลอม

หมายเลข	ธาตุ	วิธีการวิเคราะห์	สถานที่วิเคราะห์
1	Au	Gravimetic	บ.บางกอก แอสเสย์ออฟฟิเชียลจำกัด
2	Ag	Gravimetic	บ.บางกอก แอสเสย์ออฟฟิเชียลจำกัด
3	Zn	AA	ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4	Cu	Balance	-

หมายเหตุ รายละเอียดการเตรียมชิ้นงานวิเคราะห์ธาตุ และการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ข

3.5.2 การตรวจสอบขนาดเกรน

เตรียมชิ้นงานที่ได้จากการกัดกรด ด้วยสารเคมี 5 % KCN + 5% (NH₄)₂S₂O₃ โดยวัดขนาดด้วยวิธี Linear Intercept หรือ Heyn ตามมาตรฐาน ASTM ที่ E 112

3.5.3 การตรวจวัดค่าความแข็ง

ตรวจวัดค่าความแข็งแบบ ไมโครวิคเกอร์ ด้วยน้ำหนัก 300 กรัม วัดระยะอินเดนท์ทั้ง 2 แกน โดยเครื่องได้คำนวณค่าความแข็งวิคเกอร์ หน่วย (Pa) จากสมการ 3.1 ออกมา โดยวัดตามหน้าตัดขวางของชิ้นงาน ห่างจากด้านริมของชิ้นงาน 0.1 มิลลิเมตร และรอยวัดต่อไปห่างจากรอยแรกทุก ๆ 0.5 มิลลิเมตร

$$HV = 1.8544 P/a^2 \quad \dots(3.1)$$

$$P = \text{น้ำหนักกด(Kg)}$$

$$a = \text{ระยะอินเดนท์ (mm)}$$

3.5.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

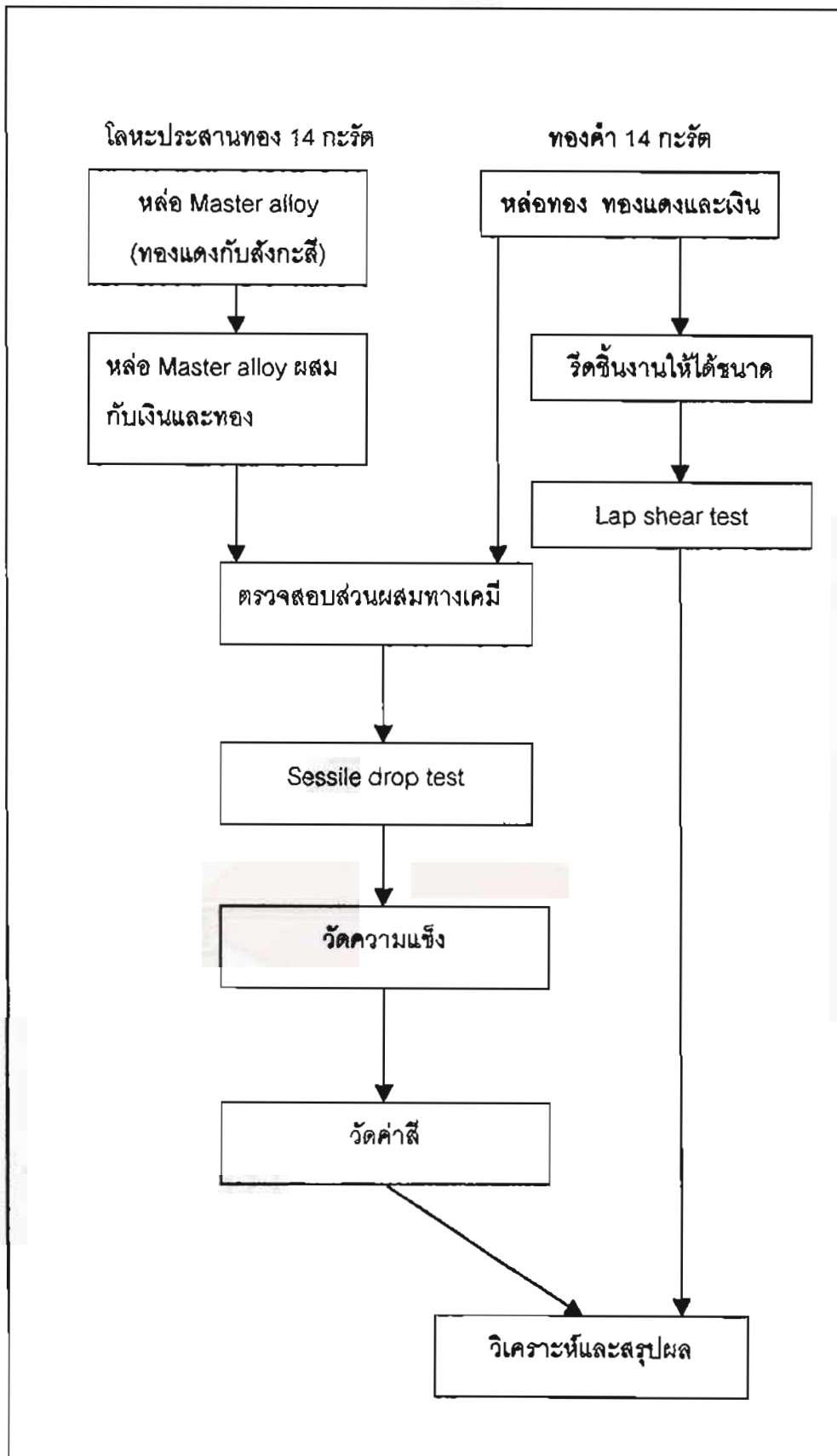
ตรวจสอบเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางจุลภาคของทองคำ 14 กระรัต โดยใช้สารเคมีดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 แสดงสารเคมีที่ใช้ในการกัดกรดสำหรับโลหะผสมทองคำ 14 กระรัต

หมายเลข	สารเคมี	ระยะเวลาที่กัด	จุดประสงค์
1	5%KCN+ 5%(NH ₄) ₂ S ₂ O ₃	1-7 นาที	เพื่อแสดงขอบเกรน
2	(Conc.HCl+Conc.HNO ₃) อัตราส่วน 3:1 ปริมาณ 30 % เจือจางด้วยน้ำ	20 วินาที ถึง 2 นาที	เพื่อแสดงรายละเอียด ภายในเกรน(จะเกิดคราบ ของฟิล์มคลอไรด์ขณะกัด ให้ใช้ แอมโมเนียเช็ดขึ้น งานเพื่อกำจัดคราบออก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.6. แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลอง



บทที่ 4

รายงานผลการทดลอง

4.1 ผลของส่วนผสม และช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว

หลอมโลหะประสานทองโดยเตาหลอมแบบเหนียวนำโดยใช้โลหะผสมมาสเตอร์(Master Alloy)ของสังกะสีและทองแดง ผสมกับทองคำและเงิน ในการหลอมได้ผลของส่วนผสมดังตารางที่ 4.1 และวัดช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวโดยใช้เครื่องDifferential Thermal Analysis (DTA) ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางเดียวกัน

ตารางที่ 4.1 แสดงผลของส่วนผสมโลหะประสานทองและช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว

หมายเลข	ทองคำ (wt.%)	เงิน (wt.%)	ทองแดง (wt.%)	สังกะสี (wt.%)	จุดหลอมเหลว (°C)	จุดที่เริ่มมีการไหลตัว (°C)
B101-1	58.68	20.60	19.80	0.92		
B101-2	58.53	15.40	25.41	0.66	810.4	825.0
B103-1	61.80	19.20	16.50	2.50		
B103-2	58.33	17.47	22.01	2.20	785.8	803.9
B105-1	58.46	15.60	22.54	3.40		
B105-2	58.71	20.48	17.44	3.37	775.5	792.5
B109-1	63.76	20.18	11.63	4.43	751.3	777.1
B107-1	58.36	16.29	20.89	4.47	774.1	791.4
B117-1	61.98	12.82	15.18	10.02		
B117-2	60.11	12.00	17.81	10.08	720.6	744.3
s002	58.69	15.68	25.63	-	822.8	840.3
B109-AC21	51.71	19.20	23.72	5.37	678.5	698.9
B109-AC12	52.46	8.01	34.07	5.46	726.6	740.7

จากตารางข้างต้นจะเห็นว่าโลหะประสานบางค่าที่ไม่มีผลช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว เนื่องจากชิ้นงานนั้นเป็นชิ้นงานทดสอบ จึงได้หลอมออกมาในปริมาณที่ต่ำเพื่อเป็นแนวทางในการหลอมชิ้นงานชิ้นอื่นๆ

4.2 ผลคุณสมบัติทางกล

4.2.1 ผลการทดสอบความแข็ง(Hardness)

ทดสอบความแข็งได้ใช้เครื่องแบบไมโครวิคเกอร์ ซึ่งใช้น้ำหนักขนาด 300 กรัม เวลาทดสอบ 30 วินาทีได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความแข็งของโลหะประสานทอง

หมายเลข	ทองคำ (wt.%)	เงิน (wt.%)	ทองแดง (wt.%)	สังกะสี (wt.%)	ค่าความแข็ง Hv(300g)
s002	58.69	15.68	25.63	0	204.21
B103-2	58.33	17.47	22.01	2.20	188.68
B105-2	58.71	20.48	17.44	3.37	167.92
B105-1	58.46	15.60	22.54	3.40	177.96
B109-1	63.76	20.18	11.63	4.43	148.91
B107-1	58.36	16.29	20.89	4.47	169.87
B117-2	60.11	12.00	17.81	10.08	195.41

4.2.2 ผลการทดสอบแรงดึงแบบ Lap shear

ทดสอบแรงดึงเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลของตัวประสานด้วยกันด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงขนาด 10 ตัน ชิ้นงานทดสอบทำแบบ Lap shear โดยใช้ตัวประสานทองมาเชื่อมโลหะผสมทองคำ 14 กระรัต ได้ผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลทดสอบแรงดึงแบบ Lap shear

หมายเลข	ปริมาณสังกะสี(wt.%)	Stress At Max.Load(MPa)
B101-2	0.66	217.8
B103-2	2.20	196.2
B105-2	3.37	190.3
B107-1	4.47	228.6
B117-2	10.08	321.8

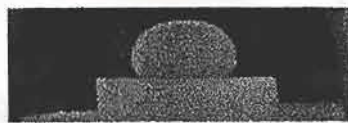
4.3 ผลคุณสมบัติด้านการเปียก(Wettability)

การวัดคุณสมบัติด้านการเปียกในที่นี้ใช้การทดสอบแบบ Sessile drop เพื่อหาค่ามุมสัมผัสและแรงตึงผิว ผลการทดลองได้ดังตารางที่ 4.4 และรูปของหยดของเหลวที่ปริมาณสังกะสีต่างๆดังรูปที่ 4.1 ค่าแรงตึงผิวและมุมสัมผัสได้จากการคำนวณของ Axisymmetric Drop Shape Analysis ใช้โปรแกรมวิชวลเบสิก เวอร์ชัน 6 ในการประมวลผล(รายละเอียดของโปรแกรมอยู่ในภาคผนวก ข และแผ่นดิสก์)

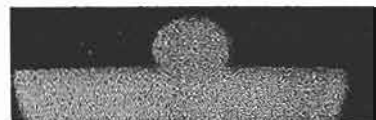
ตารางที่ 4.4 แสดงผลของมุมสัมผัสและแรงตึงผิว

หมายเลข	ปริมาณสังกะสี (Wt.%)	แรงตึงผิว(mN/m)	มุมสัมผัส(องศา) (คำนวณจากโปรแกรม)	มุมสัมผัส(องศา) (วัดจากค่าจริง)
S002	0	1092.09	145.8	148.9
B101-2	0.66	658.99	133.2	136.7
B103-2	2.20	-	-	130.0
B105-1	3.40	677.00	140.4	132.3
B107-1	4.47	377.90	133.2	124.0
B109-1	4.43	-	-	123.8
B117-2	10.08	-	-	60.4

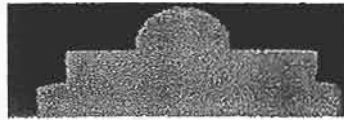
หมายเหตุ : - หมายถึงไม่สามารถหาค่าได้ เนื่องจากรูปร่างไม่สมมาตร



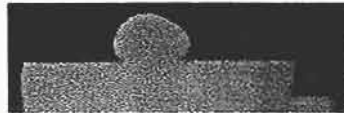
รูปที่ 4.1 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง S002 (Zn=0 wt.%)



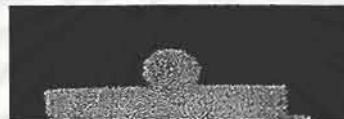
รูปที่ 4.2 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง B101-2(Zn=0.66 wt.%)



รูปที่ 4.3 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง B103-2 (Zn=2.20 wt.%)



รูปที่ 4.4 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง B105-1 (Zn=3.40 wt.%)



รูปที่ 4.5 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง B107-1 (Zn=4.47 wt.%)



รูปที่ 4.5 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง B109-1 (Zn=4.43 wt.%)



รูปที่ 4.6 ผลทดสอบ Sessile drop ของโลหะประสานทอง B117-2 (Zn=10.08 wt.%)

สำนักงานวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 ผลการทดสอบค่าสี

โลหะประสานทองที่หล่อมาแล้วหลังจากทำความสะอาดและขัดผิวที่ เบอร์ 600 จนไม่
เห็นแนวการขัด และนำมาวิเคราะห์ค่าสีโดยใช้เครื่อง Spectrophotometer ได้ค่าดังตารางที่ 4.5

ตาราง 4.5 แสดงผลค่าสีของโลหะผสมทองและโลหะประสานทองคำ 14 กระวัด

หมายเลข	Zn(wt.%)	L	a	b	DE
S002	0	63.55	6.03	19.75	0.00
B101-2	0.66	63.16	2.08	18.52	4.16
B103-2	2.20	60.24	-0.01	16.33	7.69
B105-1	3.40	67.25	-1.00	18.92	7.99
B105-2	3.37	65.17	-1.84	17.37	8.38
B107-1	4.47	66.12	-1.11	18.76	7.65
B109-1	4.43	67.48	-2.66	16.43	10.10
B117-2	10.08	69.12	-2.16	18.07	10.04
B109AC21	5.37	64.34	-1.12	14.19	9.10
B109AC12	5.46	63.96	-1.94	16.16	8.75

หมายเหตุ ค่า DE นั้นใช้ชิ้นงาน S002 (Zn มี 0 wt.%) เป็นตัวเปรียบเทียบกับชิ้นงานอื่น ๆ
ผลทดสอบข้างต้นนั้นจะมีค่าตัวเลข 4 ตัว คือ ค่า L, a, b และ DE

- 1.) ค่า L คือ Lightness โดย L=0 (Black), L=100(White)
- 2.) ค่า a คือ ค่าสีแดง-เขียว ถ้าสีแดงค่า a จะมีค่าเป็นบวกตั้งแต่ 0 ถึง 100
ถ้าสีเขียวค่า a จะมีค่าเป็นลบตั้งแต่ -100 ถึง 0
- 3.) ค่า b คือ ค่าสีเหลือง-น้ำเงิน ถ้าสีเหลืองค่า b จะมีค่าเป็นบวกตั้งแต่ 0 ถึง 100
ถ้าสีน้ำเงินค่า b จะมีค่าเป็นลบตั้งแต่ -100 ถึง 0

4.) ค่า DE คือ ค่าที่แสดงความแตกต่างระหว่างวัตถุ 2 ชนิดที่มีการเปรียบเทียบค่าสีกันโดย

$$\text{คำนวณจาก } DE = \left((L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2 \right)^{1/2}$$

เมื่อ L1, a1, b1 คือค่าที่วัดได้จากวัตถุชิ้นแรก และ L2, a2, b2 คือค่าที่วัดได้จากวัตถุชิ้นที่สอง
กรณีนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการวัดความแตกต่างของสีจากวัตถุเดียวกันแต่มีสีเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการหมองของโลหะทองคำผสม หรือจากสาเหตุอื่น(ถ้า DE มากกว่า 4 คือ
สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก)

บทที่ 5

อภิปรายผล

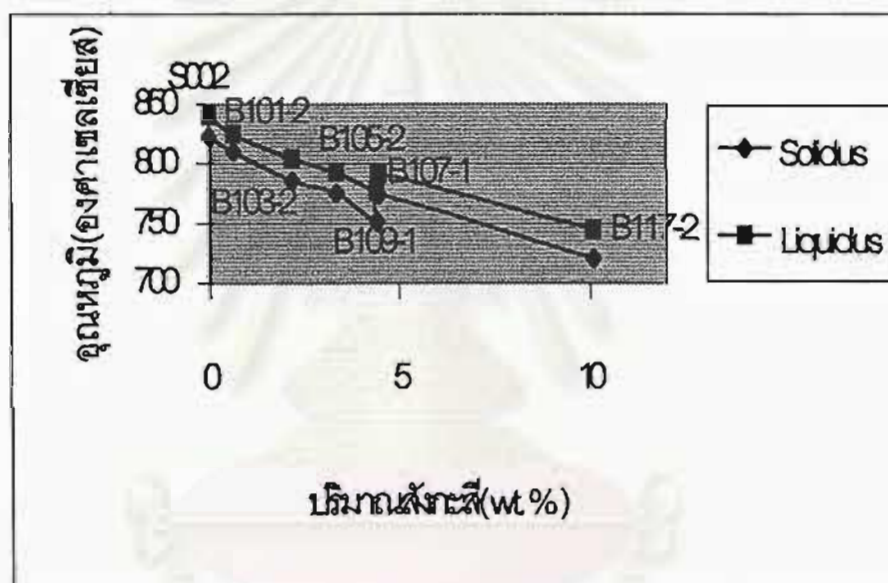
5.1 ส่วนผสมทางเคมีและช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว

ผลของส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบกับตารางส่วนผสมทางเคมีที่กำหนดไว้ก่อนหลอมดังตารางที่ 3.3 และนำมาแสดงการเปรียบเทียบทั้งสองตารางและการเติมสังกะสีในการทดลองจริงในตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าการสูญเสียของปริมาณสังกะสีในปริมาณที่สูงถ้าเติมสังกะสีในปริมาณที่สูง ในขณะที่ถ้าเติมสังกะสีในปริมาณต่ำ ก็จะมีการสูญเสียในปริมาณต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากสังกะสีมีจุดเดือดที่ต่ำประมาณ 907 องศาเซลเซียส (เกิดไอสีขาวคล้ายไยเมฆนุ่มแต่มีขนาดใหญ่กว่ามาก) ในขณะที่การทดลองนี้หลอมที่ประมาณ 1100°C ดังนั้นจึงเกิดการสูญเสียปริมาณสังกะสีดังตารางที่ 5.1 ซึ่งปัจจัยในการหลอมมีผลต่อการสูญเสียด้วยเช่น การควบคุมบรรยากาศ เวลาที่ใช้ในการหลอม อุณหภูมิหลอม ปริมาณสังกะสีที่ใช้ ทั้งที่ในการทดลองนี้ได้ใช้โลหะผสมมาสเตอร์ (Master alloy) ของสังกะสีและทองแดง ช่วยในการหลอมแต่ก็มีขีดจำกัดในการหลอมถ้ามีสัดส่วนของสังกะสีในปริมาณสูงโดยจะเกิดปัญหาของไอสังกะสีขึ้น ในการหลอมตั้งแต่ปริมาณสังกะสีที่มากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ซึ่งทำให้ไม่สามารถควบคุมงานหล่อได้ตามข้อกำหนดได้ดั่งนี้ ดังตารางที่ 5.1 ที่ขึ้นงานหมายเลข B107-1 เป็นต้นไปปริมาณสังกะสีจะสูญเสียในปริมาณที่สูงขึ้นมาก ในการทดลองนี้สามารถหล่อสังกะสีได้ปริมาณมากที่สุดที่ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ถ้าปริมาณมากกว่านี้ จะเกิดปัญหาเกี่ยวกับไอของสังกะสีอย่างมากจนไม่สามารถควบคุมคุณภาพชิ้นงานหล่อได้

ตารางที่ 5.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของสังกะสีที่เติมและผลหลังการหล่อ

หมายเลข	ปริมาณสังกะสีที่กำหนด(wt.%)	ปริมาณสังกะสีที่เติม(wt.%)	ปริมาณสังกะสีที่เหลือ(wt.%)	ปริมาณสังกะสีที่สูญเสีย(wt.%)
B101-1	1	1	0.92	0.08
B101-2	1	1	0.66	0.34
B103-1	3	3	2.50	0.50
B103-2	3	3	2.20	0.80
B105-1	5	5	3.40	1.60
B105-2	5	7	3.37	3.63
B109-1	9	11	4.43	6.57
B107-1	7	9	4.47	4.53
B117-1	17	20	10.02	9.98
B117-2	17	20	10.08	9.92

จากตารางที่ 4.1 ผลของสังกะสีจะทำให้จุดหลอมเหลวลดลงอย่างเห็นได้ชัดโดยนำมาแสดงในรูปกราฟ ที่ 5.1 โดยทั่วไปโลหะผสมทองคำ 14 กระรัต จะมีค่า Liquidus อยู่ระหว่าง 850-950 องศาเซลเซียสได้จากการประมาณ จากแผนภูมิสมมูล 3 เฟสรูปที่ 2.1) ซึ่งอัตราส่วนของทองแดงต่อเงินจะมีผลต่อช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวด้วย โดยทั่วไปอัตราส่วนของทองแดงต่อเงินประมาณ 1 หรืออัตราส่วนของปริมาณทองแดงมากกว่าปริมาณเงินเล็กน้อย(>1)จะได้ค่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่าส่วนผสมอื่น ๆ (ดังรูปที่ 2.1) และเมื่อได้เติมสังกะสีซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำอยู่แล้วประมาณ 419 องศาเซลเซียสยิ่งทำให้โลหะผสมที่ได้นั้นมีอุณหภูมิหลอมเหลวลดลง



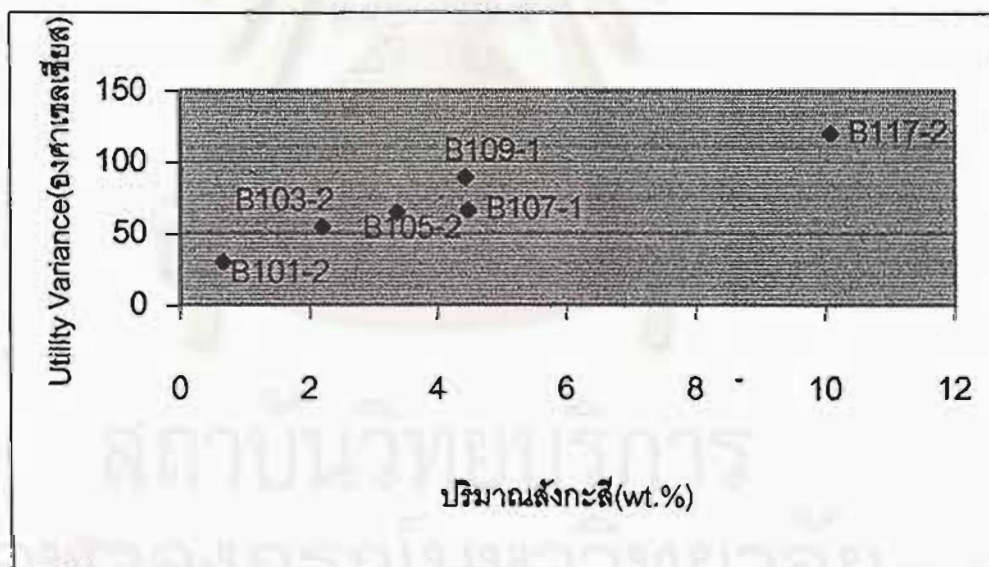
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสังกะสีกับช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว

จากกราฟข้างต้นจะเห็นว่าผลของชิ้นงาน B109AC21 (Au=51.7, Zn=5.37, Cu/Ag=1.24) และ B109AC12 (Au=52.5, Zn=5.46, Cu/Ag=4.25) ไม่ได้นำมาวาดด้วยทั้งนี้เนื่องจากปริมาณทองคำของทั้งสองไม่อยู่ในกลุ่มเดียวกับพวก 14 กระรัต คือ ประมาณ 51-53 เปอร์เซ็นต์ เมื่อลองเปรียบเทียบค่าที่ได้ของทั้งสองชิ้นงานจะมีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวที่ต่ำคือ B109AC12 (726.6-740.7°C) และ B109AC21 (678.5-698.9°C) เนื่องจากมีปริมาณทองที่ต่ำและมีส่วนผสมของสังกะสีด้วย เมื่อลองเปรียบเทียบของทั้งสองค่า ปริมาณทอง และสังกะสีอยู่ปริมาณที่ใกล้เคียงกัน แต่ต่างที่สัดส่วนของทองแดงและเงิน โดยอัตราส่วนของทองแดงและเงินของ B109AC12 ประมาณ 4.25 ในขณะที่ B109AC21 ประมาณ 1.24 เห็นได้ชัดว่าสัดส่วนของ B109AC21 ใกล้เคียง

เคียง 1 จึงทำให้ผลของอุณหภูมิมีค่าต่ำกว่า B109AC12 (เป็นไปตามสมมุติฐานที่กล่าวไปแล้วข้างต้น)

เมื่อสัดส่วนทองแดงและเงินแตกต่างกันมีผลทำให้ค่าอุณหภูมิแตกต่างกันด้วยดังตัวอย่างของชิ้นงาน B109AC12 และ B109AC21 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากกราฟของรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าผลของสังกะสีมีผลทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวมีแนวโน้มลดลงจริง คือ ตั้งแต่ชิ้นงาน S002 ($Zn = 0 \text{ wt.}\%$) มีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ $822.8\text{-}840.3^{\circ}\text{C}$ เมื่อเพิ่มปริมาณสังกะสีขึ้นเรื่อย ๆ แนวโน้มของอุณหภูมิเริ่มลดลงดัง ชิ้นงาน B117-2 ($Zn = 10.08 \text{ wt.}\%$) มีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ $720.6\text{-}744.3^{\circ}\text{C}$

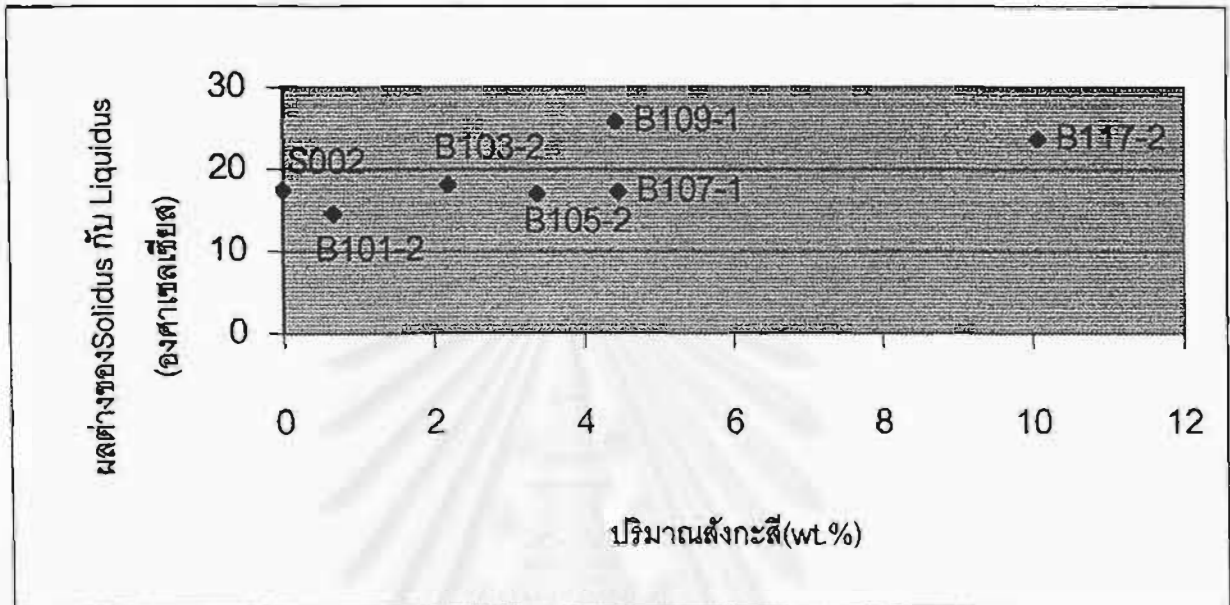
เมื่อพิจารณาถึงการประสานระหว่างโลหะประสานกับชิ้นงานที่จะประสานเข้าด้วยกันเราพิจารณาถึงค่า Utility variance คือ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิหลอมเหลวสมบูรณ์ของชิ้นงานที่จะประสาน(ในที่นี้ก็คือ S002)กับอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะประสาน จากรูปที่ 5.2 พบว่าเมื่อความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสังกะสีกับค่า Utility variance มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงคือยิ่งสังกะสีมากค่า Utility variance ยิ่งมีค่าสูง ซึ่งแสดงถึงว่าโลหะประสานนั้นมีความสามารถในการเปียกดีขึ้นและหลอมเหลวได้ง่ายขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Utility Variance กับปริมาณสังกะสี

หมายเหตุ : ค่า utility variance = อุณหภูมิหลอมเหลวสมบูรณ์ของชิ้นงานที่จะถูกประสาน - อุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะประสาน

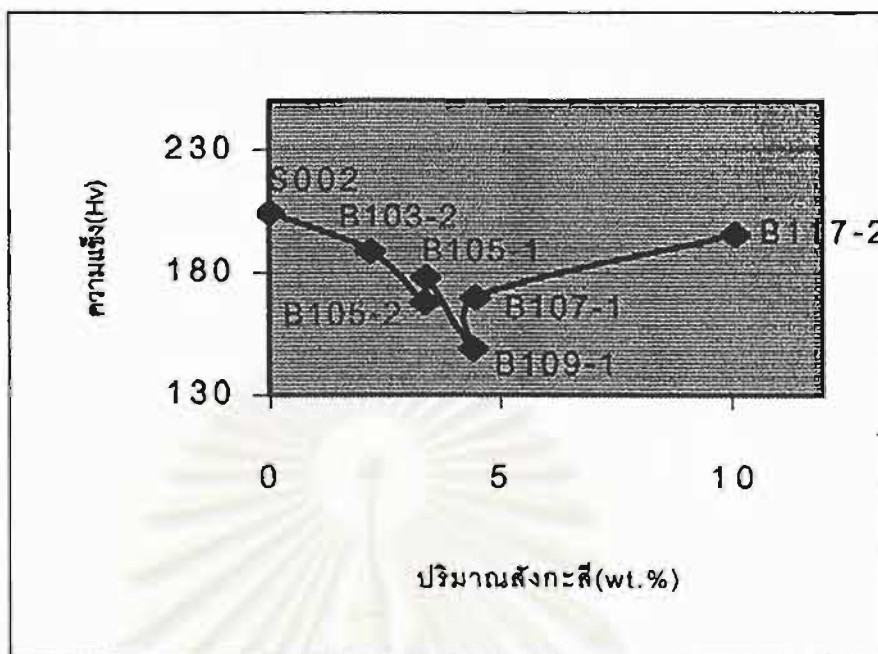
เมื่อพิจารณาถึงค่า ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว หรือ Pasty stage (ผลต่างระหว่าง จุดหลอมเหลวกับจุดหลอมเหลวสมบูรณ์ของโลหะประสาน) ดังรูปที่ 5.3 พบว่าเมื่อปริมาณสังกะสีเพิ่มขึ้น ค่าช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวค่อนข้างจะคงที่แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยซึ่งแสดงถึงความสามารถในการไหลตัวของชิ้นงานใกล้เคียงกัน



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสังกะสีกับช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว

5.2 ด้านคุณสมบัติทางกล

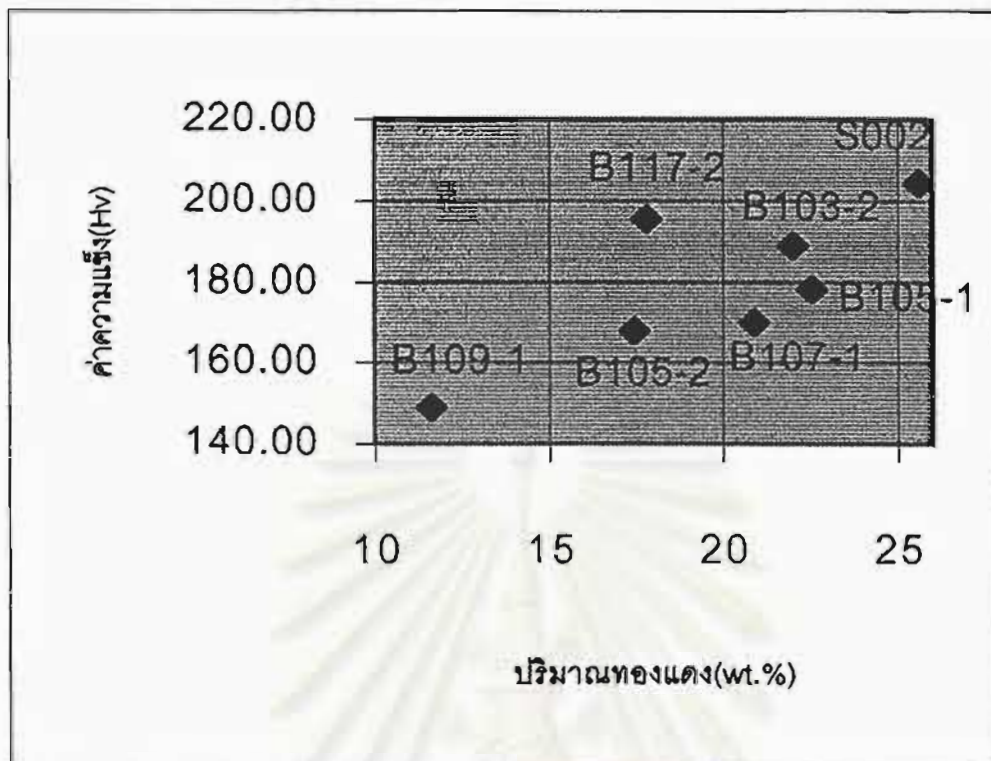
ในการทดลองนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกล คือ ค่าความแข็ง ความแข็งแรงจากข้อมูลในตารางที่ 4.2 และ 4.3 นำมาวิเคราะห์ค่าความแข็งที่ได้โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสังกะสีกับค่าความแข็งดังรูปที่ 5.4 จากรูปที่ 5.4 ดังกล่าวพบว่ในช่วงแรกค่าความแข็งจะลดต่ำลง(ตั้งแต่สังกะสี 0-4.47 %)และค่อยเพิ่มขึ้น(ตั้งแต่สังกะสี 4.47-10.08%)แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 5.5 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทองแดงและค่าความแข็งของชิ้นงาน



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสังกะสีกับค่าความแข็ง

เดียวกัน รูปที่ 5.5 ชิ้นงาน B109-1 (Cu=11.63 wt.%) ความแข็งประมาณ 148.91 Hv ในขณะที่ชิ้นงาน S001 (Cu=25.628 wt.%) ความแข็งประมาณ 204.21 Hv จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณทองแดงสูงขึ้นยิ่งทำให้ความแข็งสูงขึ้นตามลำดับคือ โดยทั้งรูป 5.4 และ 5.5 แสดงได้ชัดเจนว่าผลของความแข็งของโลหะประสานนั้นขึ้นกับอิทธิพลของทองแดงแต่เมื่อปริมาณสังกะสีที่สูงดังชิ้นงาน B117-2 (Cu=17.811 wt.%, Zn=10.08 wt.%) ทั้งที่ปริมาณทองแดงต่ำแต่มีความแข็งที่สูงขึ้น ก็คือเมื่อปริมาณสังกะสีเพิ่มขึ้นในปริมาณมาก ๆ จะทำให้ความแข็งสูงขึ้นด้วยจนทำให้ชิ้นงานเปราะได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

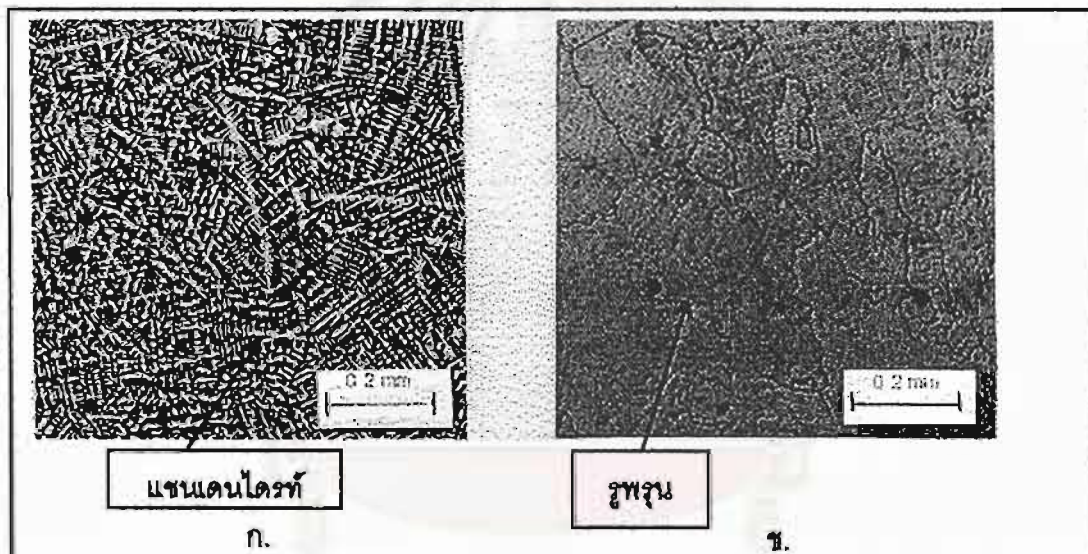


รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทองแดงกับค่าความแข็ง

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ พบว่าสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมาของ Dieter Ott และ Christoph J. Raub (1992)²⁸ ที่พบว่า สังกะสีในโลหะผสมทองคำ เงิน และทองแดง จะเกิดกลไกเพิ่มความแข็งแรงแบบสารละลายของแข็ง (Solid solution strengthening) กับทองคำ เงิน และทองแดง ทำให้เกิดความแข็งแรงสูงที่ขึ้น ในขณะที่ งานของ Dieter Ott (1997)²³, Edmund M. Wise และคณะ²⁹ และ Mark Grimwade (1994)³⁰ พบว่าการเติมสังกะสีในปริมาณเพียงเล็กน้อยจะทำให้การเกิด order ลดลงเนื่องจากมันจะลดพื้นที่ Immiscibility ซึ่งจะทำให้มีความแข็งแรงลดลงด้วย เรียกว่า เกิด "Softening Effect"

เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะประสานทองดังรูปที่ 5.6 จะเป็นโครงสร้างหลังงานหล่อ (As Cast) เมื่อกัดกรดต่างชนิดกัน ใน 5.6 ก กัดด้วยกรดกัดทองเจือจางด้วยน้ำ 30 เปอร์เซ็นต์เห็นเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ (Dendrite) และ 5.6 ข กัดด้วยกรด 5% KCN + 5% (NH₄)₂S₂O₃ เห็นเป็นขอบเกรนและเมื่อวัดขนาดผ่านศูนย์กลางเกรนของโลหะประสานทองโดยวัดขนาดด้วยวิธี Linear Intercept หรือ Heyn ตามมาตรฐาน ASTM ที่ E 112 ได้ผลดังตารางที่ 5.2 ปรากฏว่าขนาดเกรนค่อนข้างคงที่ คือ ประมาณ 0.16 มิลลิเมตร มีเพียง ชิ้นงาน S002 (Zn=0

wt.%) และ B117-2(Zn=10.08 wt.%) ที่มีขนาดเกรนเล็กกว่าแต่ไม่มากนักคือประมาณ 0.12 มิลลิเมตร ซึ่งก็สอดคล้องกับค่าความแข็งที่สูงขึ้นเมื่อขนาดเกรนเล็กลง จากงานวิจัยของ Dieter Ott(1997)²³ พบว่าสังกะสีไม่ใช่อธาตุที่มีผลต่อการปรับขนาดเกรน(Grain refiner)ซึ่งก็เป็นไปตามการทดลองที่ได้ อีกทั้งเมื่อพิจารณาถึงค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์ค่าผลต่างของพลังงานอิสระ(Gibb free energy)พบว่าสังกะสีมีเสถียรภาพต่อการเกิดออกไซด์ที่สูงคือ ΔG ของ ZnO ประมาณ -198.8 kJ/mole ที่ 1100 องศาเซลเซียส ในขณะที่ในทองแดง ค่าคือ ΔG ของ CuO ประมาณ -35.1 kJ/mole ค่า ΔG ยังมีค่าติดลบมากแสดงถึงว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี หมายความว่าสังกะสีเป็นธาตุที่ช่วยลดการเกิดออกไซด์ขึ้นในงานหล่อได้ดี กว่าทองแดง ซึ่งโดยปกติจะเติมประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ก็สามารถลดเกิดออกไซด์ขึ้น ได้ดีแล้ว อีกทั้งยังทำให้ผิวที่ได้สวยงามและเงางาม ในกรณีที่เพิ่มปริมาณสังกะสีให้สูงขึ้นก่อให้เกิดผลเสียที่ผิวจะเกิดรูพรุนในชิ้นงานเนื่องจากไอของสังกะสีที่ระเหยออกมา²³ ได้ดังจะเห็นได้ในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะประสานทอง

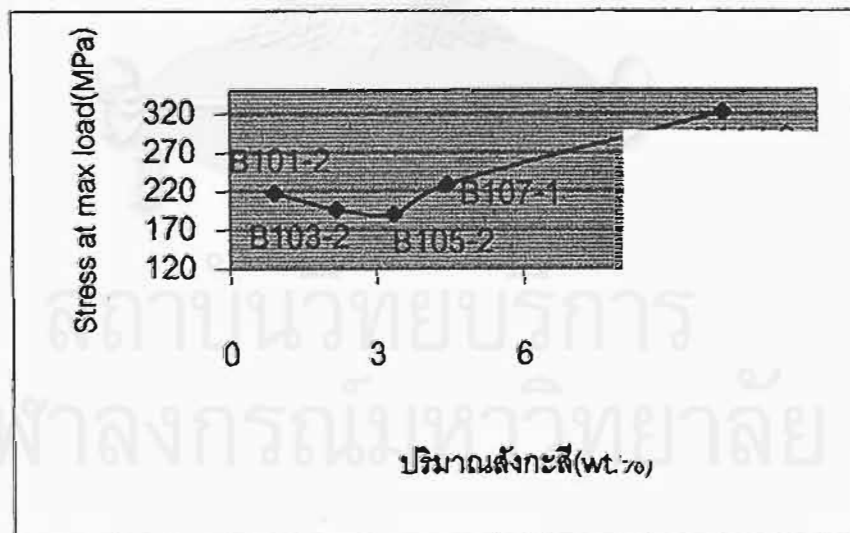
5.6 ก กัดด้วย(Conc.HCl+Conc.HNO₃)อัตราส่วน 3:1 ปริมาณ 30 % เจือจางด้วยน้ำ

5.6 ข กัดด้วยกรด 5%KCN + 5%(NH₄)₂S₂O₈

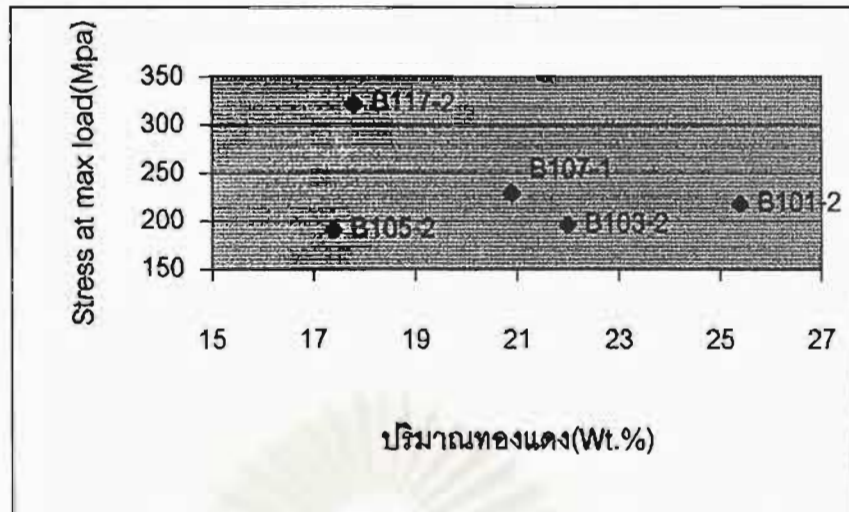
ตารางที่ 5.2 แสดงขนาดเกรนโดยเฉลี่ยของโลหะประสาน

หมายเลข	สังกะสี(wt.%)	ขนาดเกรน(mm)
S002	0	0.12
B101-1	0.92	0.20
B103-2	2.50	0.15
B105-1	3.40	0.16
B105-2	3.37	0.16
B109-1	4.43	0.16
B117-2	10.08	0.12
B109AC12	5.37	0.19
B109AC21	5.46	0.16

ผลความแข็งแรงของการทดสอบแรงดึงแบบ Lap Shear ในตารางที่ 4.3 นำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสังกะสีกับค่าความเค้นที่ภาระสูงสุดดังรูปที่ 5.7 และ ปริมาณทองแดงกับค่าความเค้นที่ภาระสูงสุดดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นที่ความเค้นสูงสุดกับปริมาณสังกะสีในโลหะประสานทองคำ 14 กระรัต



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นที่ความเค้นสูงสุดกับปริมาณทองแดงในโลหะประสานทองคำ 14 กระรัต

จากรูปที่ 5.8 จะพบว่าเมื่อปริมาณของทองแดงเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความเค้นสูงสุดเพิ่มขึ้นด้วยยกเว้น ที่ชิ้นงาน B117-2 (Cu = 17.8%) เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.7 จะพบว่าที่ปริมาณสังกะสีน้อย ๆ ค่าความเค้นไม่มีความแตกต่างกันนักแต่เมื่อเพิ่มปริมาณสังกะสีที่สูงขึ้นมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงสูงขึ้นตามไปด้วย โดยผลที่ได้นั้นสอดคล้องกับผลของค่าความแข็งที่กล่าวมาก่อนแล้วคือ ปัจจัยในการเพิ่มความแข็งแรงขึ้นกับปริมาณของทองแดง แต่เมื่อเพิ่มสังกะสีในปริมาณสูงเกิน 10 % จะมีผลทำให้ความแข็งแรงสูงขึ้นด้วย

5.3 ด้านคุณสมบัติการเปียก(Wettability)

การวัดคุณสมบัติการเปียกสามารถวัดได้หลายวิธีในการทดลองนี้มีดังต่อไปนี้

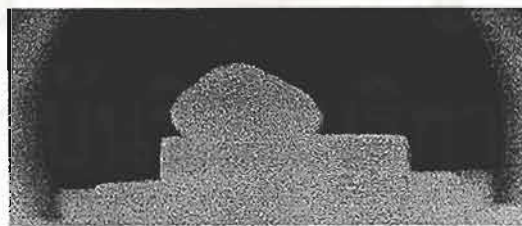
5.3.1 ค่า Utility Variance

ค่า Utility variance คือผลต่างของอุณหภูมิที่เริ่มหลอมเหลวของชิ้นงานที่จะประสานกับอุณหภูมิที่เริ่มมีการไหลตัวของโลหะประสาน ค่าดังกล่าวแสดงถึงว่าโลหะประสานนั้นมีความสามารถในการเปียกที่ดีกับชิ้นงานนั้น ๆ เพียงใด ค่าของ Utility Variance ของโลหะประสาน มีค่าสูงหมายถึงมีความสามารถในการเปียกสูงกับโลหะที่จะประสานสูง ในการทดลองนี้ได้ใช้ S002 (Zn = 0 wt.%) เป็นชิ้นงานอ้างอิงกับโลหะประสานอื่น ๆ เพื่อเปรียบเทียบว่าโลหะประสานต่าง ๆ กัน จะมีความสามารถการเปียกกับชิ้นงาน S002 ได้ดีเพียงใดซึ่งได้กล่าวมาแล้วดังรูปที่ 5.2

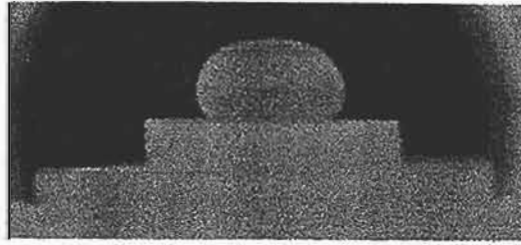
ค่าที่ได้จากค่า Utility Variance นั้นเป็นค่าที่หาได้ง่ายและสะดวก แต่มีข้อจำกัดที่เป็นค่าเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่จะประสาน ไม่ใช่ค่าเฉพาะวัสดุ จึงทำให้การอธิบายได้ไม่ถี่นัก

5.3.2 ค่าแรงตึงผิวและมุมสัมผัส

ผลที่ได้จากตาราง 4.4 เป็นค่าที่บอกถึงลักษณะเฉพาะของโลหะประสานแต่ละชนิดโดยเมื่อค่าแรงตึงผิวและมุมสัมผัสยิ่งต่ำ แสดงถึงความสามารถในการเปียกที่ดี ในงานทดลองนี้ได้ใช้วิธีการคำนวณค่าแรงตึงผิวแบบ Axisymmetric Drop Shape Analysis โดยต้องควบคุมชิ้นงานขณะหลอมเหลวให้มีความสมมาตรทั้งชิ้นคล้ายรูป 5.10 ถ้าเกิดกรณีที่ชิ้นงานที่ไม่สมมาตรชิ้นจะทำให้ไม่สามารถวัดค่าแรงตึงผิวที่แท้จริงออกมาได้ แต่ค่ามุมสัมผัสที่วัดจากค่าจริงสามารถวัดได้จากการประมาณได้คร่าวๆเท่านั้น ดังจะเห็นในตาราง 4.4 และรูปที่ 4.1-4.6 ซึ่งในการทดลองนี้พบว่าที่ชิ้นงานที่ไม่มีปริมาณสังกะสี(S002)และชิ้นงานที่มีปริมาณสังกะสีต่ำๆสามารถวัดค่าแรงตึงผิวได้แต่ถ้าปริมาณสังกะสีสูงๆไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากชิ้นงานมีค่าแรงตึงผิวที่ต่ำจึงทำให้ไม่มีแรงภายในเพียงพอที่จะจัดรูปร่างของหยดของเหลวให้คงรูปได้ดังจะเห็นในรูปที่ 5.9 คือเกิดสภาวะการเปียก(wetting) แต่ในขณะที่ชิ้นงานที่มีค่าแรงตึงผิวที่สูงจะแรงเพียงพอที่สามารถจัดเรียงอะตอมเป็นรูปร่างหยดของเหลวได้ดังรูปที่ 5.10 โดยผลที่ได้จากการเติมสังกะสีจะเห็นได้ชัดเจนว่าสังกะสีปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้นก็ทำให้ค่าแรงตึงผิวและมุมสัมผัสลดลงได้ ซึ่งมีผลทำให้ได้รูปร่างไม่สมมาตรด้วย และอีกเหตุผลหนึ่งเกิดจากการควบคุมบรรยากาศในการทดลองนี้ไม่สามารถควบคุมบรรยากาศได้ถี่นัก



รูปที่ 5.9 แสดงลักษณะชิ้นงานทดสอบ Sessile ที่หลอมตัวไม่สมมาตร



รูปที่ 5.10 แสดงลักษณะรีนังงานทดสอบ Sessile drop ที่สมมาตร

5.4 ด้านสีของโลหะประสาน

ตารางที่ 4.5 แสดงผลของค่าสีโดยวัดออกมาในค่าของ L, a และ b (รายละเอียดดังภาคผนวก ก) โดย ค่า L ของโลหะประสานจากการทดลองมีค่าประมาณ 60-70 ซึ่งหมายถึงค่าความสว่างที่ออกไปทางสีขาว(สีขาวมีค่าเท่ากับ 100) เมื่อเติมสังกะสีสูงขึ้นยิ่งทำให้โลหะนั้นมีสีขาวมากขึ้น ค่า a (แทนค่าสีแดง-เขียว ถ้าสีแดงค่า a จะมีค่าเป็นบวกตั้งแต่ 0 ถึง 100 และถ้าสีเขียวค่า a จะมีค่าเป็นลบตั้งแต่ -100 ถึง 0) อยู่ในช่วง บวก 6 และเมื่อเติมสังกะสีมากขึ้นยิ่งทำให้ค่าเป็นลบมากขึ้นคือประมาณ -2 ซึ่งแสดงว่าสีจะเปลี่ยนจากสีแดงอ่อนๆไปเป็นสีทางเขียวอ่อนๆมากขึ้น ในขณะที่ ค่า b (แทนค่าสีเหลือง-น้ำเงิน ถ้าสีเหลืองค่า b จะมีค่าเป็นบวกตั้งแต่ 0 ถึง 100 ถ้าสีน้ำเงินค่า b จะมีค่าเป็นลบตั้งแต่ -100 ถึง 0) จากการทดลองค่าที่ได้ค่อนข้างจะคงที่คือประมาณ 16-19 (สีออกเหลืองอ่อน) ซึ่งโดยรวมแล้วจะเห็นได้ว่าเมื่อเติมสังกะสีเพิ่มขึ้นยิ่งทำให้โลหะนั้นมีสีสว่างขึ้นสีออกไปทางสีเหลืองเขียวอ่อนๆ และเมื่อเราพิจารณาค่า DE คือค่าที่เปรียบเทียบค่าสีของวัสดุ 2 ชนิด(โดยในที่นี้ใช้ S002 เป็นตัวอ้างอิงเพราะเป็นตัวที่นำมาประสานด้วย)โดยค่า DE หาได้จากค่า L, a, b ของ S002 กับ โลหะประสานที่เปรียบเทียบ (ค่า $DE = \frac{((L2-L1)^2 + (a2+a1)^2 + (b2-b1)^2)^{1/2}}$) โดยค่าที่ได้สูงขึ้นเมื่อสังกะสีเพิ่มขึ้น หมายถึง มีความแตกต่างของสีระหว่างตัวประสานกับโลหะที่จะประสาน(S002)ที่ชัดเจนขึ้น โดยทั่วไป ค่า DE ที่มากกว่า 4 สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของสีได้ด้วยตาเปล่าได้ ในงานวิจัยของ Dieter Ott (1996)⁵ ได้กล่าวถึงผลของการเติมสังกะสีจะทำให้เกิด "Bleaching Effect"เช่นเดียวกัน โดยสอดคล้องกับผลการทดลองได้

การเติมสังกะสีในโลหะประสานนั้นจะทำให้เกิดผลกระทบต่อสีอย่างเห็นได้ชัดคือเปลี่ยนจากสีเหลืองไปเป็นเหลืองอ่อนออกไปทางสีขาวมากขึ้น(ขึ้นกับปริมาณสังกะสีที่ใช้)จนบางทีในการใช้งานได้นำโลหะประสานที่มีปริมาณสังกะสีสูงๆไปประสานกับโลหะผสมทองคำที่มีสีขาวด้วย ดังนั้นในทางปฏิบัติโลหะประสานที่มีการเติมสังกะสีต่ำ(น้อยกว่า 3 %)สีของโลหะประสานยังไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนักจึงเหมาะกับงานประสานกับโลหะผสมทองคำสีเหลือง ถ้าปริมาณสังกะสีที่ใช้สูงขึ้น(มากกว่า 3 %)ทำให้สีของโลหะประสานเป็นสีขาวมากขึ้น ดังนั้นจึงเหมาะกับโลหะผสม

ทองคำที่มีสีเหลืองอ่อนจนถึงขาว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสีของโลหะประสาน อย่างไรก็ตามไม่ว่าปริมาณสังกะสีจะสูงหรือต่ำเพียงไร ในงานประสานที่ซ่อมแซมชิ้นงานเพียงเล็กน้อยก็สามารถใช้ได้เนื่องจากบริเวณที่ซ่อมแซมนั้นไม่เห็นถึงความแตกต่างของสีระหว่างโลหะประสานกับชิ้นงานเดิมเพราะว่าพื้นที่ที่ซ่อมนั้นมีขนาดเล็กมาก

บทที่ 6

สรุปผล

1. สังกะสีทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะประสานต่ำลงโดยช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 720.6-744.3 องศาเซลเซียสที่ปริมาณสังกะสีประมาณ 10.08 เปอร์เซ็นต์ (ในขณะที่ชิ้นงานไม่เติมสังกะสี จะมีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 822.8-840.3 องศาเซลเซียส)
2. สังกะสีทำให้ความสามารถในการเปียกของโลหะประสานดีขึ้น โดยสังกะสีช่วยทำให้ค่ามุมสัมผัส ค่ามุมสัมผัสของชิ้นงานที่ไม่เติมสังกะสี มีค่าประมาณ 148.9 องศา เมื่อเติมสังกะสี 10.08 % ทำให้มุมสัมผัสลดลงเป็น 60.4 องศา
3. สังกะสีที่เพิ่มขึ้นทำให้ลดแรงตึงผิวของโลหะประสานได้ จาก 1092 mN/m (ไม่เติมสังกะสี) จนไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากมีค่าแรงตึงผิวที่ต่ำ(สังกะสี 10.08 % ไม่สามารถวัดค่าได้)
4. ปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้นในปริมาณน้อย(น้อยกว่า 3%)ไม่มีผลต่อค่าความแข็งและความแข็งแรงมากนัก โดยปัจจัยของความแข็งและความแข็งแรงหลักนั้นขึ้นกับปริมาณทองแดงที่มีอยู่ โดยที่ปริมาณทองแดงสูงทำให้ความแข็งและความแข็งแรงสูง แต่ในกรณีที่ปริมาณของสังกะสีสูงจะทำให้มีความแข็งและความแข็งแรงสูงขึ้นจนกระทั่งเปราะได้
5. การเติมสังกะสีไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะประสานทองโดยขนาดเกรนไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก
6. การเติมสังกะสีในปริมาณต่ำ(ประมาณ 0.5 %)สามารถช่วยให้ผิวสวยงามขึ้นเนื่องจากสังกะสีช่วยลดการเกิดออกซิเดชันได้ แต่ถ้าเติมในปริมาณที่สูงเกินไปจะทำให้เกิดรูที่ชิ้นงานได้ซึ่งเกิดเนื่องมาจากไอของสังกะสีที่มีปริมาณมาก อีกทั้งยังมีคราบสีขาวของสังกะสีออกไซด์เกิดที่ผิวอีกด้วย
7. ปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อสีของโลหะประสานโดยจะมีสีที่ขาวเหลืองมากขึ้น

ข้อจำกัดงานวิจัย

1. ข้อมูลด้านการทดสอบ Sessile drop มีน้อยและเครื่องมือทดสอบที่ใช้ เป็นเครื่องมือที่ดัดแปลงมาจากเตา Tube furnace จึงทำให้ประสิทธิภาพในการควบคุมการทดลองไม่ดีนัก
2. ปริมาณของชิ้นงานทดสอบมีจำนวนจำกัดทำให้ได้ข้อมูลที่จะนำมาเปรียบเทียบไม่มากนัก

ข้อจำกัดงานวิจัย

1. ข้อมูลด้านการทดสอบ Sessile drop มีน้อยและเครื่องมือทดสอบที่ใช้ เป็นเครื่องมือที่ดัดแปลงมาจากเตา Tube furnace จึงทำให้ประสิทธิภาพในการควบคุมการทดลองไม่ดีนัก
2. ปริมาณของชิ้นงานทดสอบมีจำนวนจำกัดทำให้ได้ข้อมูลที่จะนำมาเปรียบเทียบไม่มากนัก

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาอิทธิพลของการเติมโลหะผสมชนิดอื่นๆ เช่น อินเดียม แกเลียม ดีบุก ในโลหะประสานทองที่มีสังกะสีอยู่ เพราะจะสามารถลดปัญหาการเกิด Bleaching effect ได้
2. การเติมสังกะสีไม่ควรเติมในปริมาณที่ สูงเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากจะสูญเสียสังกะสีในปริมาณที่สูง ควบคุมการหลอมลำบาก อีกทั้งยังอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานเนื่องจากมีไอของสังกะสีเกิดขึ้นอย่างรุนแรงและตลอดเวลาด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- 1 Microsoft Encarta encyclopedia, 1996 . [Computer program]
- 2 <http://www.goldstitute.com>
- 3 Ernest, A. Smith. Working in precious metals. London: N.A.G. Press, 1978.
- 4 Greg, Normandeau. Gold Bull 18(1996): 20-24.
- 5 Ott, Dieter. Gold Technology 19(1996): 2-6.
- 6 Ott, Dieter and Christoph J. Raub. Gold Bull 18(1985): 140-143.
- 7 Bikerman, J. J.. Physical surfaces. : Academic press, 1970.
- 8 Davies, J. T., and Rideal, E. K. Interfacial phenomena. : Academic press, 1963.
- 9 Temple, c. potton. Paint flow and pigment dispersion. : John Wiley & sons, 1978.
- 10 Lawrence, E. Murr. Interfacial phenomena in metals and alloys. : Addison- Wesley Publishing, 1975.
- 11 Humpston, G., and Jacobson, D. M. Gold Bull 27 (October 1994): 110-116.
- 12 Bernard, G., and Lupis, C. H. P. Met. trans. 2(1971): 555-559.
- 13 Bernard, G., and Lupis, C. H. P. Met. trans. 2(1971): 2991-2998.
- 14 Asthana, R. Met.trans. 26A(1995): 1307-1311.
- 15 Oh, S-Y, Cornie, C. A., and Russell, K. C. Met.Trans. 20A(1989): 527-532.
- 16 Kanetkar, C. S., Kacar, A. S., and Stefanescu, D. M. Met.Trans. 19A(1988): 1833-1839.
- 17 Mrdjenovich, R., Kaufman, S. M., Whalen, T. J., and Corey, C. L. Met.Trans. 1(1970): 2175-2178.
- 18 White, D. W. G. Met.Trans. 2(1971): 3067-3071.
- 19 Humenik, M., Jr., and Kingery, W. D. J.Amer.Ceram.Soc. 37(1954): 18-23.
- 20 Dorsey, N. E. Journal of the washington academy of sciences 18 (1928): 505-509.
- 21 O.I. Del Rio and A.W. Neumann. J. of colloid and interface science. 196(1997): 136-147.
- 22 Christoph J. Raub and Ott, Dieter. Gold Bull, 16(1983): 46-51.
- 23 Ott, Dieter. Gold Technology. 22(1997): 31-44.
- 24 M. Dabala, M. Magrini and M. Poliero. Gold Technology. 24(1998): 6-9.
- 25 Humpston, G., and Jacobson, D. M. Gold Bull. 26 (July 1993): 90-104.
- 26 Cognard, J. Gold Bull. 17(October 1984): 131-139.

- 27 Michel, Barquis, and Jacques, Cognard. Gold Bull. 19(July 1986): 82-86.
- 28 Ott, Dieter and Christoph J.Raub. Gold Technology. 7(1992): 2-7.
- 29 Edmund M.wise ,Gold recovery ,properties and applications, D.Vannostrand company,inc. : 262- 263.
- 30 Mark Grimwade. Gold Technology. 14(1994): 10-17.
- 31 ปราโมทย์ เตชะอำไพ . ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์.
จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย , 2523.
- 32 Raykhtsaum, G. and Agarwal,D.P. Gold Technology 22(July 1997): 26-30.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ทฤษฎีการวัดค่าสีของโลหะประกอบเครื่องประดับ²¹

ลักษณะสีที่ปรากฏบนผิววัสดุใดๆ จะปรากฏออกมานั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลัก 3 อย่างคือ

1. ที่มาของต้นกำเนิดแสง
2. ตัววัตถุ
3. ผู้สังเกตและการรับรู้

มาตรฐานการอธิบายระบบสี มีอยู่ 2 ระบบที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

1. Munshell system ใช้พิกัดแบบ 3 ค่าคือ

-Hue คือ ชื่อสีอธิบายเป็นคำๆ เช่น สีแดง สีดำ หมายถึง ...

-Chroma บอกความเข้มของสีโดยวัดแยกออกจากแกน ขาว-เทา-ดำ

-Value อธิบายตำแหน่งของ Scale ของ ขาว เทา ดำ

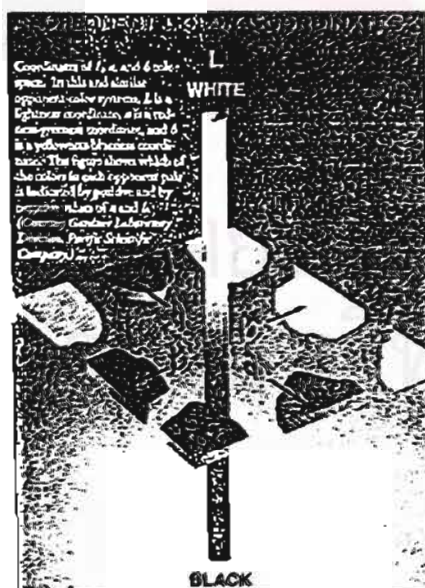
หมายเหตุ ระบบนี้ ผู้สังเกตต้องพิจารณาสีของวัตถุเทียบกับแฟ้มสีมาตรฐานที่ใกล้เคียงกันมากที่สุดแล้วเรียกสีของวัตถุนั้นตามสีที่ใกล้เคียงที่สุดนั้น

2. CIELAB system(The Committee of International on Illumination)

ระบบนี้จะให้หลักการอธิบายเชิงคณิตศาสตร์ เป็นระบบที่นิยมมากที่สุด ในการใช้สีตรงกันข้าม

อธิบายซึ่งเรียกว่า องค์ประกอบของสีได้แก่ สีเขียว-แดง สีเหลือง-น้ำเงิน และสีขาว-ดำ โดยใช้หลัก

การมองเห็นของตามนุษย์เป็นพื้นฐาน เพราะตาจะมีเซลล์แบบ cone เพียงอย่างเดียวจึงเห็นความแตกต่างระหว่างสีแดงกับสีเขียวได้ ซึ่งรูปที่ ก.1 แสดงแกนคู่อันดับของการวัดค่าสี



รูปที่ ก.1 แสดงแกนคู่อันดับของการวัดค่าสี

การเตรียมชิ้นงานเพื่อที่จะวัดค่าสีนั้นขนาดที่จะวัดควรมีขนาดอย่างน้อยต่ำ $10*10*1$ mm และทำการวัดโดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 600 และต้องขัดอย่างดีไม่ให้เกิดแนวของการเรียงตัว

ความหมายของค่าสีในระบบนี้คือ

L = Lightness โดย L=0 (Black), L=100(White)

a = ค่าสีแดง-เขียว ถ้าสีแดงค่า a จะมีค่าเป็นบวกตั้งแต่ 0 ถึง 100

ถ้าสีเขียวค่า a จะมีค่าเป็นลบตั้งแต่ -100 ถึง 0

b = ค่าสีเหลือง-น้ำเงิน ถ้าสีเหลืองค่า b จะมีค่าเป็นบวกตั้งแต่ 0 ถึง 100

ถ้าสีน้ำเงินค่า b จะมีค่าเป็นลบตั้งแต่ -100 ถึง 0

ตัวอย่างการวัดความแตกต่างของค่าสีที่วัดได้จากวัตถุ 2 ชิ้นนี้เป็นดังสมการ

$$DE = \left((L2-L1)^2 + (a2-a1)^2 + (b2-b1)^2 \right)^{1/2}$$

เมื่อ L1, a1, b1 คือค่าที่วัดได้จากวัตถุชิ้นแรก และ L2, a2, b2 คือค่าที่วัดได้จากวัตถุชิ้นที่สอง กรณีนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการวัดความแตกต่างของสีจากวัตถุเดียวกันแต่มีสีเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการหมองของโลหะทองคำผสม หรือจากสาเหตุอื่น

คุณภาพสีที่วัดได้ถูกต้องหรือไม่ขึ้นกับแสงที่สะท้อนจากวัตถุ และการใช้กระจกสะท้อนแสงช่วยเก็บแสงสะท้อนจากวัตถุในกรณีที่มีผิวละเอียดได้กลับมาหมด ถ้าเป็นผิวหยาบจะสามารถวัดโดยไม่ใช่กระจกช่วยได้ ถ้า DE=1 ไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงหรือความแตกต่างได้ แต่ถ้า DE=4 จะสามารถเริ่มสังเกตเห็นด้วยสายตาได้

การใช้งาน

เราสามารถที่จะกำหนดขอบเขตของสีของทองคำกะรัตต่างๆได้ โดยมี 4 สีหลักคือ สีแดง เหลือง เขียว และขาว โดยตารางที่ ก.1 แสดงสีของทองคำ 14 กะรัต

ตารางที่ ก.1 ค่าของสีในทองคำ 14 กะรัต

สี	Limit a	Limit b
แดง	>3.5	15.0 ถึง 23.0
เหลือง	-1.0 ถึง 3.5	18.5 ถึง 23.0
เขียว	-1.0 ถึง -5.5	17.0 ถึง 23.0
ขาว	-1.0 ถึง 1.0	<12.0

ทั้งนี้เรายังสามารถวัดค่าสีของโลหะบริสุทธิ์ได้เช่น ทอง ทองแดง เงิน ซึ่งได้แสดงดังตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 ค่าของสีในโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสม

ประเภท	L	a	b
ทอง	84.0	4.8	34.3
เงิน	95.8	-0.7	5.3
ทองแดง	84.0	11.8	14.3
70/30 Brass	91.1	-4.1	22.0

สีของทองคำแต่ละกะรัตก็มีค่าต่างๆกันดังแสดงในตารางที่ ก.3 โดยจากตารางจะเห็นว่าค่าความสว่างของทอง 14 กะรัตจะอยู่ในช่วง 80-95 ส่วนทอง 14 กับ 10 กะรัตจะมีค่า b ที่ต่ำ แต่ในขณะที่ ค่า b ของ 18 กะรัตจะมีค่าสูงกว่า

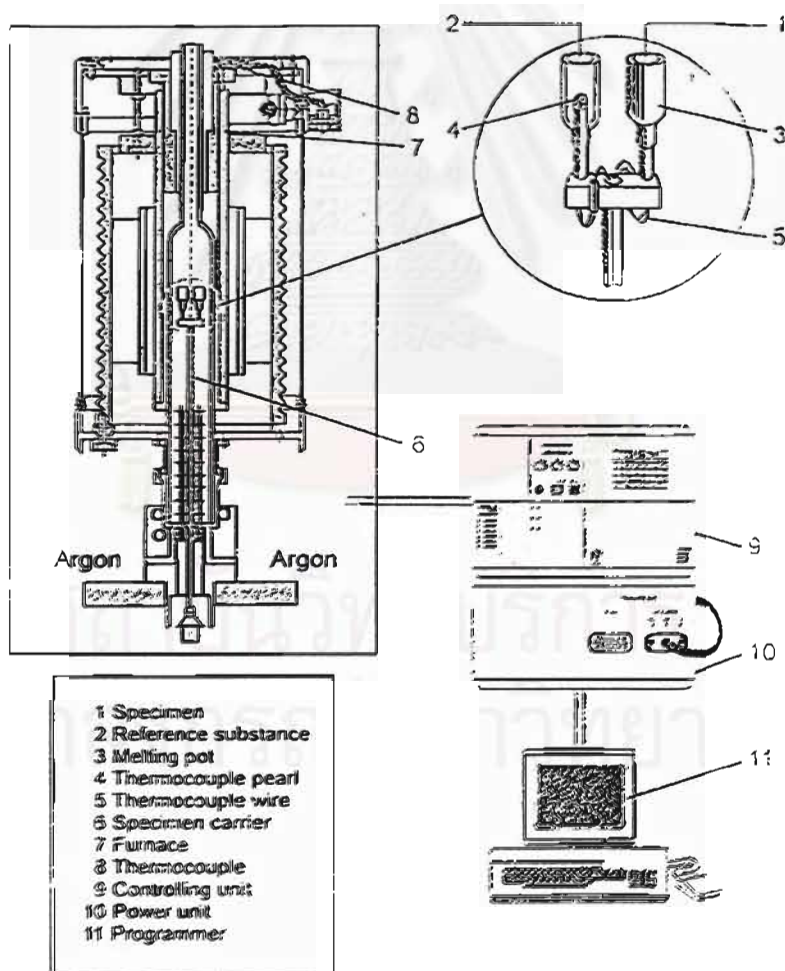
ตารางที่ ก.3 ค่าสีของงานหล่อ

กะรัต	L	a	b
14K	87.3	2.7	20.5
10K	88.2	1.3	20.0

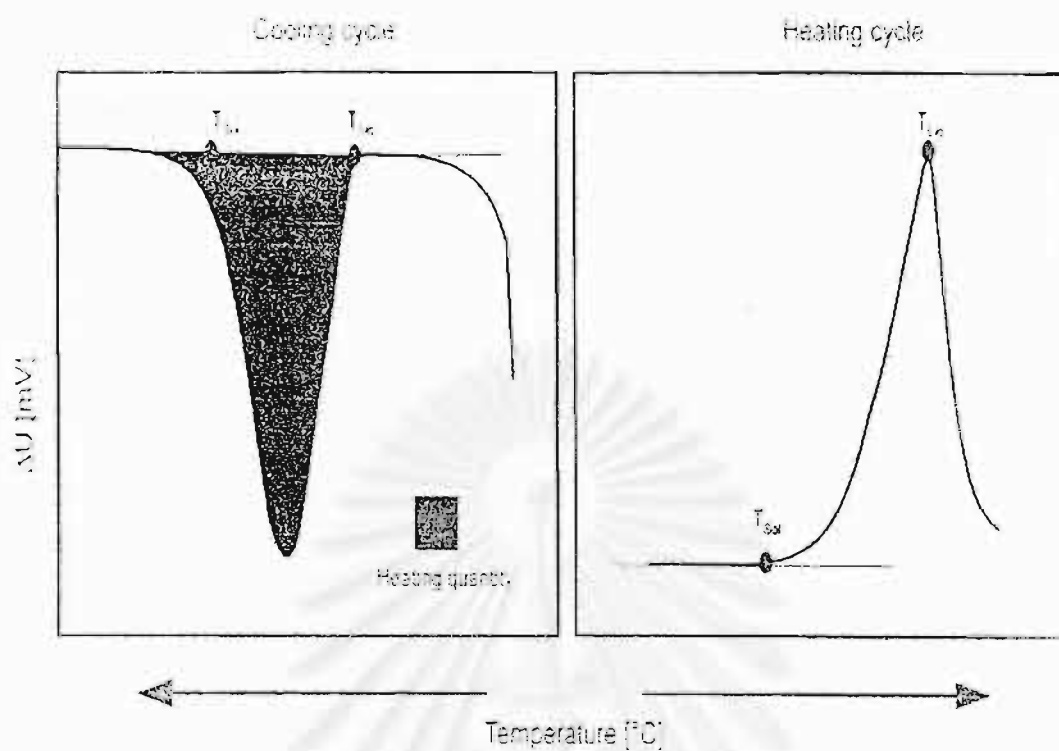
ภาคผนวก ข

Differential Thermal Analysis

Differential thermal analysis เป็นเทคนิคที่วัดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวอย่างกับวัสดุอ้างอิง โดยถูกวัดในรูปฟังก์ชันของอุณหภูมิ ซึ่งถูกใช้เพื่อวัด จุด liquidus solidus และการเปลี่ยนแปลงของเฟสระหว่างการแข็งตัว(Solidification) โดยวัสดุอ้างอิง คือ อะลูมินา (Al₂O₃) จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสระหว่างอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงเนื่องจาก การคายความร้อน หรือ ดูดความร้อน ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเฟสของตัวอย่างโดย รูปที่ ข.1 แสดงเครื่องมือ Differential Thermal Analysis ซึ่งตัวอย่างที่ทดสอบสามารถทำได้ในบรรยากาศต่างๆ เช่น อาร์กอน ไนโตรเจน สูญญากาศ ซึ่งน้ำหนักที่ใช้ทดสอบประมาณ 200 mg ส่วนรูปที่ ข. 2 แสดงถึงตัวอย่างผลของการทดสอบ DTA โดยได้แสดงถึงวิธีการคำนวณหาจุด Liquidus และ Solidus



รูป ข. 1 แสดงเครื่องมือทดสอบ Differential Thermal Analysis (DTA)



รูปที่ ๒.๒ แสดงตัวอย่างผลของการทดสอบ DTA

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ระเบียบวิธีของรุงเง-คุดตา(Runge-Kutta Method)³¹

ระเบียบวิธีนี้จัดว่าเป็นระเบียบวิธีที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะการคำนวณที่ต้องการผลลัพธ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง แนวความคิดที่ใช้ในการประดิษฐ์ระเบียบวิธีของรุงเง-คุดตา นี้คือการหาค่าความชันที่มีความเที่ยงตรงสูงเพื่อก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่มีความเที่ยงตรงสูงตามมา สมการหลักที่ใช้ในการคำนวณผลลัพธ์ในระเบียบวิธีของรุงเง-คุดตานั้นอยู่ในรูปแบบดังต่อไปนี้

$$y_{i+1} = y_i + \phi(x_i, y_i, h)h \quad \dots(\text{ค.1})$$

โดย $\phi(x_i, y_i, h)h$ เรียกว่าฟังก์ชันส่วนเพิ่ม(increment function) ซึ่งมีความหมายของความชันเฉลี่ยตลอดขนาดช่วงความกว้าง h ที่จะนำไปใช้ในการคำนวณหาส่วนเพิ่มขึ้นจากผลลัพธ์เดิม ฟังก์ชันส่วนเพิ่มนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบโดยทั่วไปได้ดังนี้

$$\phi = a_1k_1 + a_2k_2 + a_3k_3 + \dots + a_nk_n \quad \dots(\text{ค.2})$$

โดย $a_l, l=1,2,3,\dots,n$ เป็นค่าคงที่และ

$$k_1 = f(x_i, y_i) \quad \dots(\text{ค.3})$$

$$k_2 = f(x_i + p_1h, y_i + q_{11}k_1h) \quad \dots(\text{ค.4})$$

$$k_3 = f(x_i + p_2h, y_i + q_{21}k_1h + q_{22}k_2h) \quad \dots(\text{ค.5})$$

⋮

⋮

⋮

$$k_n = f(x_i + p_{n-1}h, y_i + q_{n-1,1}k_1h + q_{n-1,2}k_2h + \dots + q_{n-1,n-1}k_{n-1}h) \quad \dots(\text{ค.6})$$

โดย n แทน อันดับที่ของระเบียบวิธีรุงเง-คุดตา

ในระเบียบวิธีการนี้ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย คือ รุงเง-คุดตา อันดับสี่(Fourth-order Runge-Kutta method) โดยดัดแปลงสมการ ค.1-ค.6 ที่อยู่ในรูปแบบทั่วไปโดยใช้ $n=4$ และสามารถนำไปประดิษฐ์ขึ้นไปเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้โดยตรงนั้นมีลักษณะดังนี้

$$y_{i+1} = y_i + [1/6(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)]h \quad \dots(\text{ค.7})$$

โดย

$$k_1 = f(x_i, y_i) \quad \dots(\text{ค.8})$$

$$k_2 = f(x_i + 1/2h, y_i + 1/2k_1h) \quad \dots(\text{ค.9})$$

$$k_3 = f(x_i + 1/2h, y_i + 1/2k_2h) \quad \dots(\text{ค.10})$$

$$k_4 = f(x_i + h, y_i + k_3h) \quad \dots(\text{ค.11})$$

ระบบสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง

ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ส่วนใหญ่ไม่เพียงประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งเพียงสมการเดียวดังเช่นที่ผ่านมา แต่จะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งหลายสมการที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กันซึ่งก่อให้เกิดระบบสมการที่ประกอบด้วย n สมการย่อยในรูปแบบดังนี้

$$dy_1/dx = f_1(x, y_1, y_2, \dots, y_n) \quad \dots(\text{ค.13})$$

$$dy_2/dx = f_2(x, y_1, y_2, \dots, y_n) \quad \dots(\text{ค.13})$$

$$dy_3/dx = f_3(x, y_1, y_2, \dots, y_n) \quad \dots(\text{ค.13})$$

· · ·

· · ·

· · ·

$$dy_n/dx = f_n(x, y_1, y_2, \dots, y_n) \quad \dots(\text{ค.13})$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

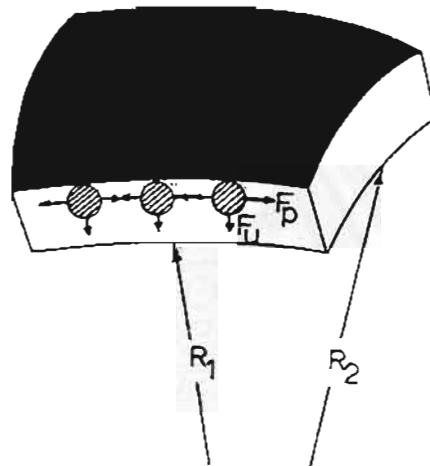
ภาคผนวก ง

แรงตึงผิวและมุมสัมผัส

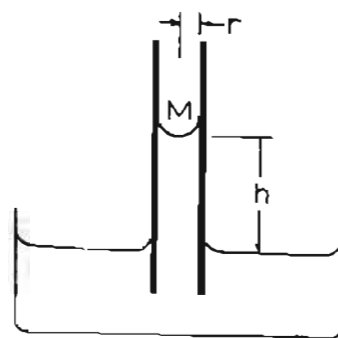
อะตอมหรือโมเลกุลที่ผิวของของเหลว(ดังรูปที่ ง.1) เมื่อพิจารณาถึงแรงที่กระทำโดย Unsymmetrical forces (F_u ,แรงที่ตั้งฉากกับผิวของเหลว มีผลต่อความดันที่มีอยู่เท่ากันทุกทิศทาง) กับแรง F_p (แรงที่ขนานกับผิวของของเหลว) ในกรณีที่ไม่คำนึงถึงผลของแรงโน้มถ่วง ความดันที่มาจาก F_u จะต้องเท่ากันทั่วทั้งผิวถ้าของเหลวอยู่ในสภาวะสมดุล Laplace ได้แสดงสมการพื้นฐานของแนวคิดนี้คือสมการที่ ง.1

$$\Delta p = \gamma_{LV} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad \dots(ง.1)$$

โดย Δp คือ ความแตกต่างของความดันระหว่างผิวสองผิว และ γ_{LV} คือ แรงตึงผิวระหว่างของเหลวกับก๊าซ



รูปที่ ง.1 แสดงส่วนของผิวส่วนโค้งของของเหลว



รูปที่ ง.2 แสดงความสูงของของเหลวในท่อ Capillary (M แทน Meniscus)

เชื่อว่า Leonardo da Vinci ได้สังเกตและบันทึกในเรื่อง Rise Capillarity ซึ่งเป็น ปรากฏการณ์ที่รู้จักกันโดยเรียกว่า Capillary เพราะว่าการทดลองนั้นได้ใช้ท่อที่มีรูขนาดเล็ก ๆ จนคล้าย

เส้นผม(Hair หรือ Capillus ภาษาละติน) เมื่อจุ่มท่อCapillary ดังรูปที่ ง.2 พบส่วนโค้ง M ที่เป็นไปได้ทั้งส่วนโค้งที่เว้าขึ้นหรือลง และสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ ง.2

$$\Delta p = g\rho_L h = \gamma_{LV}*(1/R_1+1/R_2) \quad \dots(ง.2)$$

g แทน ค่าแรงโน้มถ่วง ρ_L แทน ความหนาแน่นของของเหลว และ h แทน ความสูงของของเหลวในท่อ พบว่าถ้าท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมาก ๆ เมื่อดูที่พื้นที่หน้าตัดค่า R_1 และ R_2 (ส่วนโค้งของผิวของเหลวจะมีลักษณะเป็นกึ่งทรงกลม) และที่มุมสัมผัสเป็น 0 จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ ง.3

$$g\rho_L h = 2\gamma_{LV}/R \quad \dots(ง.3)$$

แต่ถ้ามุมสัมผัสไม่เท่ากับ 0 จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ ง.4

$$g\rho_L h = 2\gamma_{LV}*\cos\theta_L/R \quad \dots(ง.4)$$

ในทางกลับกันถ้าท่อ Capillary ไม่เล็กทำให้ส่วนโค้งไม่มีลักษณะคล้ายกึ่งทรงกลม ดังนั้นจะได้สมการโดยประมาณคือสมการ ง.5 (เมื่อมุมสัมผัสไม่เท่ากับศูนย์)

$$\gamma_{LV} = g\rho_L r/2(h+r/3-0.129r^2/h) \quad \dots(ง.5)$$

และเมื่อมุมสัมผัสเท่ากับศูนย์จะเป็นไปสมการ ง.6

$$\gamma_{LV} = g\rho_L r/2(h+r/3) \quad \dots(ง.6)$$

วิธีการวัดแรงตึงผิว

จากสมการดังกล่าวมาแล้วข้างต้นเป็นรากฐานของแนวความคิดในการหาค่าแรงตึงผิวในระบบ Capillary แต่เนื่องจากวิธีดังกล่าวนี้มีข้อจำกัดกับวัสดุที่มุมสัมผัสไม่เท่ากับศูนย์ และการวัดที่อุณหภูมิสูง จึงได้มีวิธีการวัดต่าง ๆ อีกมากดังต่อไปนี้

1. Capillary Rise Method

วิธีการนี้ได้กล่าวแล้วข้างต้นและรูปที่ ง.3 แสดงเครื่องมือทดสอบ

2. Wilhelmy Plate Method

วิธีนี้ใช้แผ่นบาง ๆ จุ่มในของเหลวดังรูปที่ ง.4

3. Ring Method

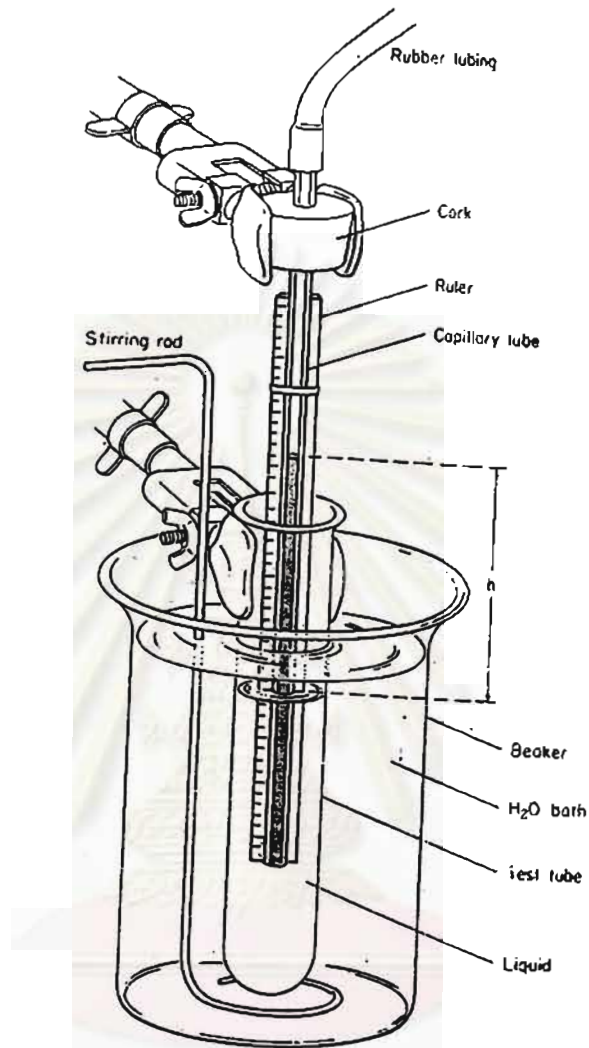
ค่าแรงตึงผิวนี้ได้คำนวณจากแรงที่ดึงวงแหวนให้ขึ้นจากผิวของของเหลว ดังรูปที่ ง.5 และสามารถเขียนเป็นสมการดังสมการที่ ง.7

$$\gamma = f/(4*\pi*r) \quad \dots(ง.7)$$

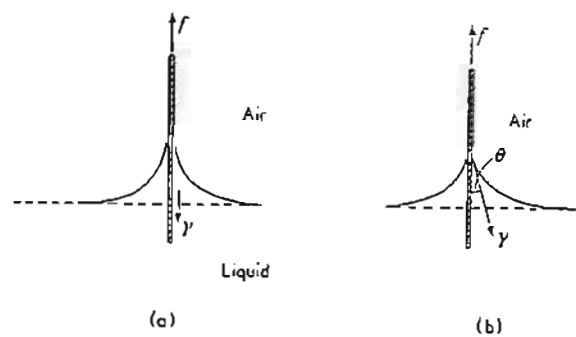
สมการนี้ใช้กับกรณีมุมสัมผัสเท่ากับศูนย์และแรง f กระทำในแนวตั้ง แต่ความเป็นจริงแล้วค่า f นั้นไม่ได้กระทำในแนวตั้งดังนั้นจึงได้ปรับสมการเพื่อความถูกต้องดังสมการที่ ง.8

$$\gamma = \beta f/(4*\pi*r) \quad \dots(ง.8)$$

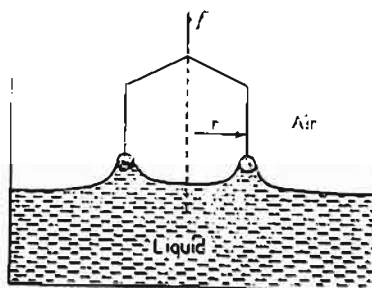
β คือ Correction Factor ขึ้นกับค่า r ชนิดขดลวดและค่าความหนาแน่นของของเหลว รูปของวิธีนี้ดังรูปที่ ง.5



รูปที่ ง.3 แสดงเครื่องมือทดสอบหาแรงตึงผิวโดยวิธี Capillary Rise Method



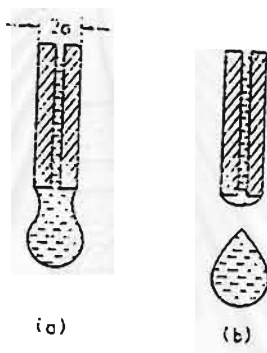
รูปที่ ง.4 แสดง Wilhelmy Plate Method



รูปที่ ๓.5 แสดงวิธีการวัดแรงตึงผิวแบบ Ring Method (Du Nouy tensiometer)

4. Drop Weight Method

วิธีการนี้ดังรูปที่ ๓.6 หยดซึ่งงานทดสอบผ่านท่อและวัดน้ำหนักหรือปริมาตรของของเหลวที่ติดกับปากท่อและนำไปคำนวณหาค่าแรงตึงผิวดังสมการที่ ๓.9



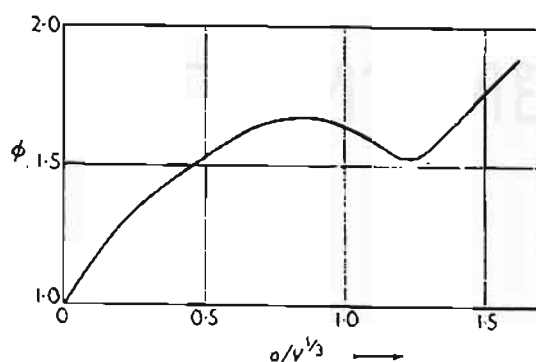
รูปที่ ๓.6 แสดง Drop Weight Method (a) แทนรูปขณะที่ของเหลวกำลังหยด (b) แทนรูปของเหลวที่หยดลงมาจากปากท่อแล้ว

$$\gamma = Mg / (2 \cdot \pi \cdot a) \quad \dots(๓.9)$$

M แทน มวลของของเหลวที่หยดลงมา ซึ่งในสมการที่ ๓.9 นั้นมีความผิดพลาดจึงได้เปลี่ยนสมการใหม่เป็น สมการที่ ๓.10

$$\gamma = \phi Mg / (2 \cdot \pi \cdot a) \quad \dots(๓.10)$$

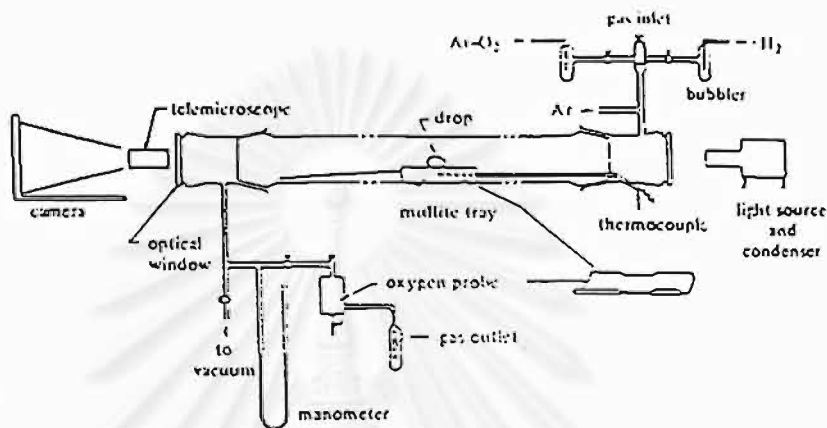
โดย ϕ แทน หักจั่นของ a และ V ของชิ้นงานดังรูปที่ ๓.7



รูปที่ ๓.7 แสดงค่า Correction factor ϕ ที่มีความสัมพันธ์กับค่า a และ V

5. Sessile Drop Method

วิธีการทดลองนี้ทำโดยใช้เตาแวนอนให้ความร้อนแก่ชิ้นงานในบรรยากาศต่าง ๆ เช่น สูญญากาศ ก๊าซเฉื่อยต่าง ๆ ทำที่อุณหภูมิที่สูงกว่าหรือเท่ากับอุณหภูมิหลอมเหลวของชิ้นงาน วางชิ้นงานบนฐานรองชิ้นงาน(Substrate) ที่ทำจากเซรามิกส์ที่ขัดเรียบและวัดผิวส่วนโค้งของหยดของเหลวโดยใช้อุปกรณ์ถ่ายภาพ รูปเครื่องมือดังรูปที่ ๖.8



รูปที่ ๖.8 แสดงเครื่องมือทดสอบแบบ Sessile Drop Method

วิธีการคำนวณวิธีนี้ให้สมการพื้นฐานของ Laplace โดยสามารถเขียนใหม่เป็น

$$\Delta p = \gamma_{LV} * (1/R_1 + 1/R_2) = g\rho_L z + p_0 \quad \dots(๖.11)$$

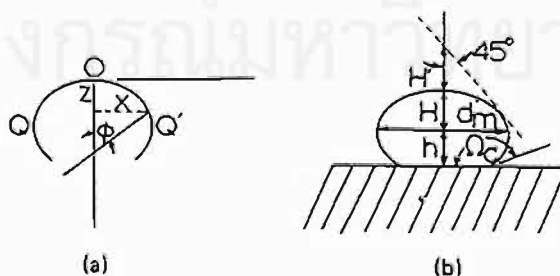
p_0 แทน ค่าความดันที่จุดยอดของส่วนโค้งซึ่งมีค่าเป็น $2\gamma_{LV}/b$ ได้สมการเป็น

$$\gamma_{LV} * (1/R + \sin\phi/R) = g\rho_L z + 2\gamma_{LV}/b \quad \dots(๖.12)$$

เมื่อ $2 + \beta(z/b) = 1/(R/b) + \sin\phi/(x/b) \quad \dots(๖.13)$

$$\beta = b^2 \rho_L g / \gamma_{LV} \quad \dots(๖.14)$$

ค่าต่าง ๆ ในสมการเป็นดังรูปที่ ๖.9 และจากสมการ ๖.12-14 ได้มีผู้ดัดแปลงและเขียนเป็นรูปแบบ



รูปที่ ๖.9 แสดงผิวส่วนโค้งของการทดสอบแบบ Sessile Drop

สมการใหม่ ๆ เพื่อง่ายและถูกต้องมากขึ้นดังต่อไปนี้

Bashforth & Adam ได้สร้างตาราง ของ β กับ $x/2$ สำหรับที่ $\phi = 90$ และ x/b ของค่า b และ ϕ ดังรูปที่ ง.9(a) และวัดค่า $dm/2$ และ H ดังรูปที่ ง.9(b) ค่า β และ b สามารถเปิดดูได้จากตารางและคำนวณค่าแรงตึงผิวได้ดังสมการ ง.15

$$\gamma_{LV} = g\rho_L b^2/\beta \quad \dots(ง .15)$$

Koshemik ได้ทำตารางอย่างง่าย ๆ ดังตารางที่ ง.1

ตารางที่ ง.1 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง d_m/H กับ D

dm/H	2.40	2.42	2.44	2.46	2.48	2.50
D	0.2373	0.2240	0.2122	0.2013	0.1914	0.1824
dm/H	2.52	2.54	2.56	2.58	2.60	2.62
D	0.1740	0.1664	0.1592	0.1527	0.1466	0.1407
dm/H	2.64	2.66	2.68	2.70	2.72	2.74
D	0.1334	0.1304	0.1257	0.1212	0.1171	0.1132
dm/H	2.76	2.78	2.80	2.82	2.84	2.86
D	0.1095	0.1061	0.1027	0.0995	0.0966	0.0937
dm/H	2.88	2.90	2.92	2.94	2.96	2.98
D	0.0911	0.0885	0.0861	0.0838	0.0816	0.0795
dm/H	3.00	3.02	3.04	3.06	3.08	3.10
D	0.0775	0.0756	0.0737	0.0719	0.0702	0.0686
dm/H	3.12	3.14	3.16	3.18	3.20	3.22
D	0.0670	0.0655	0.0641	0.0627	0.0613	0.0600
dm/H	3.24	3.26	3.28	3.30	3.32	3.34
D	0.0588	0.0576	0.0564	0.0553	0.0542	0.0531
dm/H	3.36	3.38	3.40	3.42	3.44	3.46
D	0.0521	0.0511	0.0502	0.0493	0.0483	0.0475
dm/H	3.48	3.50	3.52	3.54	3.56	3.58
D	0.0467	0.0458	0.0450	0.0443	0.0435	0.0428
dm/H	3.60	3.62	3.64	3.66	3.68	3.70
D	0.0421	0.0414	0.0408	0.0401	0.0395	0.0389
dm/H	3.75	3.80	3.85	3.90	3.95	4.00
D	0.0374	0.0360	0.0347	0.0334	0.0322	0.0313

$$\text{สมการที่ใช้คือ } \gamma_{LV} = D(d_m)^2 \rho_L g \quad \dots(ง .16)$$

ถ้ากรณีที่ชิ้นงานมีขนาดใหญ่มาก ๆ จะเป็นไปดังสมการ

$$\gamma_{LV} = \rho_L g H^2/2 \quad \dots(ง .17)$$

Gibson พบว่าสมการ ง.17 ไม่เหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดมากกว่า 12 เซนติเมตรจึงได้เขียนสมการใหม่เป็นสมการที่ ง.18 ซึ่งใช้ได้ตั้งแต่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 4 เซนติเมตร

$$\gamma_{LV} = \rho_L g H^2/2 * (1.641(d_m/2))/(1.641(d_m/2)+H) \quad \dots(ง .18)$$

Dorsey ได้แสดงสมการอย่างง่าย ๆ ดังสมการที่ ง.19 และรูปวิธีการวัดดังรูปที่ ง.10

$$\gamma_{LV} = r_e^2 g \rho (0.052/f - 0.12268 + 0.0481f) \quad \dots (ง.19)$$

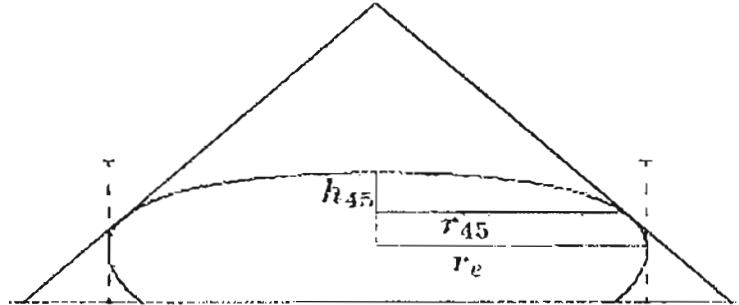
$$f = (r_{45} - h_{45})/r_e - 0.41421 \quad \dots (ง.20)$$

โดย ค่า $g = 9.81 \text{ m/s}^2 (\text{N/Kg})$

ρ = ความหนาแน่น (g/cm^3)

r = ความยาวของหยดของเหลว ดังรูป (cm)

γ_{LV} = แรงตึงผิว ($\approx 0.1 \text{ N/m}$)



รูปที่ ๓.10 แสดงการคำนวณหาค่าแรงตึงผิวแบบ Dorsey

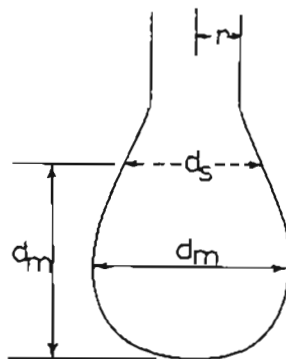
Rotenberg เป็นผู้เริ่มต้นการใช้วิธีคิดแบบ Axisymmetric Drop Shape Analysis (ADSA) ในการคำนวณหาแรงตึงผิวโดยใช้วิธีระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการคิดซึ่งวิธีการนี้ได้ให้ค่าที่แม่นยำ เทียบตรงมากกว่าวิธีที่กล่าวมาแล้วข้างต้น และได้แสดงวิธีการคิดอย่างละเอียดในภาคผนวก ๑

6. Pendant Drop Method

ลักษณะของชิ้นงานดังรูปที่ ๓.11 พบว่าแรงโน้มถ่วงทำให้ของเหลวมีลักษณะที่ยืดขึ้นแต่ในขณะที่แบบ Sessile Drop Method จะตรงกันข้ามคือทำให้แบนขึ้นโดยวิธีนี้จะมีความเที่ยงตรงที่สูงและมีข้อดีกว่า Sessile Drop Method เพราะจะไม่จำเป็นต้องใช้ฐานรองชิ้นงานโดยวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้

$$\gamma_{LV} = j\rho g(d_m)^2 \quad \dots(\text{๓} .21)$$

j คือ Drop Shape Factor d_m คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของของเหลวที่มากที่สุด



รูปที่ ๓.11 แสดงมีส่วนโค้งของการทดสอบแบบ Pendant Drop Method

ค่า j สามารถ หาค่าได้จากตารางที่ ง.2

ตารางที่ ง.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า j กับ ds/dm

ds/dm	0.30	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36
J	7.0984	6.5400	6.0400	5.5908	5.1861	4.8203	4.4887
ds/dm	0.37	0.38	0.39	0.40	0.41	0.42	0.43
J	4.1877	3.9138	3.6643	3.4357	3.2258	3.0326	2.8548
ds/dm	0.44	0.45	0.46	0.47	0.48	0.49	0.50
J	2.6911	2.5401	2.4003	2.2709	2.1507	2.0391	1.9352
ds/dm	0.51	0.52	0.53	0.54	0.55	0.56	0.57
J	1.8384	1.7481	1.6637	1.5848	1.5109	1.4416	1.3766
ds/dm	0.58	0.59	0.60	0.61	0.62	0.63	0.64
J	1.3155	1.2581	1.2040	1.1531	1.1050	1.0597	1.0168
ds/dm	0.65	0.66	0.67	0.68	0.69	0.70	0.71
J	0.9764	0.9380	0.9018	0.8674	0.8347	0.8038	0.7744
ds/dm	0.72	0.73	0.74	0.75	0.76	0.77	0.78
J	0.7464	0.7198	0.6945	0.6704	0.6474	0.6255	0.6046
ds/dm	0.79	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85
J	0.5846	0.5655	0.5473	0.5298	0.5131	0.4970	0.4817
ds/dm	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92
J	0.4669	0.4527	0.4391	0.4260	0.4134	0.4012	0.3895
ds/dm	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99
J	0.3780	0.3671	0.3564	0.3460	0.3359	0.3259	0.3160

วิธีแบบ Pendant Drop Method สามารถแก้ปัญหา ด้วยวิธีคำนวณแบบ Axisymmetric Drop Shape Analysis (ADSA) ได้ด้วยสมการเดียวกันแต่ในที่นี้ไม่ขอกล่าวถึง

ภาคผนวก จ

Axisymmetric Drop Shape Analysis(ADSA)¹²

วิธีการคำนวณนี้เป็นวิธีที่ใช้คอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการประมวลผล เพื่อวัดค่าแรงตึงผิว และมุมสัมผัส จากรูปร่างและขนาดของหยดซึ่งงานแบบ Sessile Drop Method และ Pendant Drop Method โดยใช้สมการพื้นฐานของ Laplace ในการคำนวณ จะได้ค่าที่เที่ยงตรง มีประสิทธิภาพ และน่าเชื่อถือที่สุด โดยได้แบ่งวิธีคิดหลายแบบขึ้นกับข้อมูลที่ได้ดังต่อไปนี้

1. Axisymmetric Liquid-Fluid Interfaces(ALFI)

พิจารณารูปที่ จ.1 แสดงสถานะสมดุลของของไหลสองชนิด สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$dx/ds = \cos\theta \quad \dots(จ.1)$$

$$dz/ds = \sin\theta \quad \dots(จ.2)$$

$$d\theta/ds = 2b + cz - \sin\theta/x \quad \dots(จ.3)$$

$$dV/ds = \pi x^2 \sin\theta \quad \dots(จ.4)$$

$$dA/ds = 2\pi x \quad \dots(จ.5)$$

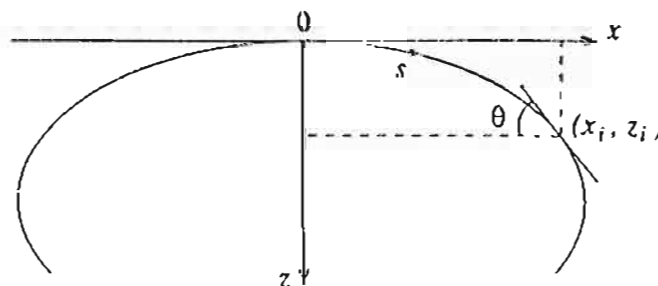
$$x(0)=z(0)=\theta(0)=V(0)=A(0)=0 \quad \dots(จ.6)$$

b คือ ส่วนโค้งที่จุดยอด และ c แทน $\Delta\rho g/\gamma$ เป็น ค่าคงที่ Capillary ของระบบ θ แทน มุมสัมผัส A แทน พื้นที่ผิว V แทน ปริมาตรของของเหลว

$$\sin\theta/x = b \quad \text{ที่ } s=0 \text{ และจาก สมการ จ.3 ได้ว่า}$$

$$d\theta/ds = b \quad \text{ที่ } s=0 \quad \dots(จ.7)$$

จากสมการข้างต้นนั้นเป็นสมการอนุพันธ์ทำให้ยากต่อการแก้ให้อยู่ในรูปอย่างง่ายดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์มาใช้โดยวิธีที่ใช้กันเช่น Runge-Kutta, Euler, Burlisch-Stoer ซึ่งวิธีที่นิยมใช้กันคือ วิธีของรุงเงคุดตาอันดับ 4 เนื่องจากมีความเที่ยงตรงที่สูง วิธี ALFI นั้นต้องรู้ค่า b และ c เพื่อใช้สมการใน จ.1-จ.7 จะได้ค่า x, z, V, A และ θ ออกมาทำให้ได้ผิวส่วนโค้งของชิ้นงานใด ๆ ที่รู้ค่า b และ c ใด ๆ



รูปที่ จ.1 แสดงคู่อันดับของชิ้นงานทดสอบแบบ Sessile drop

2. Contact angle measurements from diameter and volume of sessile drops(ADSA-D)
วิธีนี้ใช้เพื่อวัดค่ามุมสัมผัสจากเส้นผ่านศูนย์กลางและปริมาตร(ต้องรู้ค่า b และ c) โดยแบ่ง
เป็น 2 กรณีดังรูปที่ ๑.2

2.1 มุมสัมผัสมากกว่าหรือเท่ากับ 90 องศา

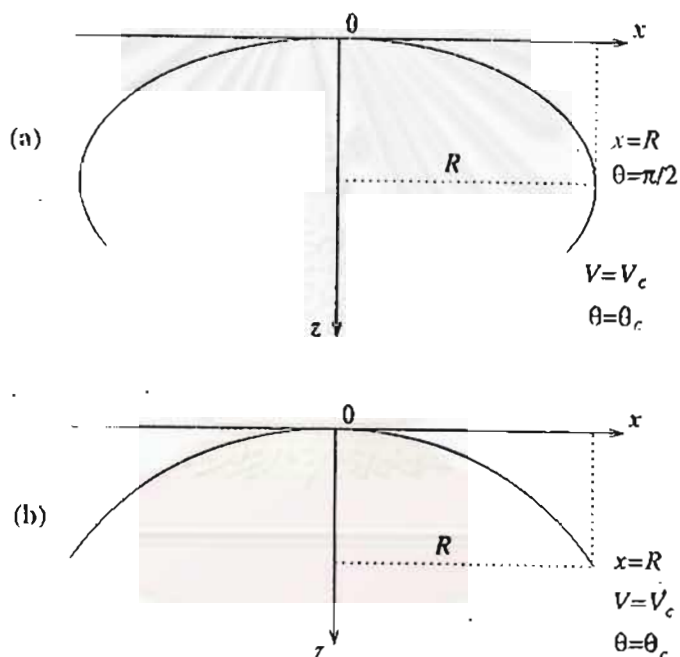
สมการ ๑.1-๑.7 สามารถจัดรูปใหม่โดยเขียนในฟังก์ชันของ x ดังต่อไปนี้

$$d\theta/dx = 1/\cos\theta \cdot (2b + cz - \sin\theta/x) \quad \dots(๑.8)$$

$$dz/dx = \tan\theta \quad \dots(๑.9)$$

$$db/dx = 0 \quad \dots(๑.10)$$

$$z(0)=\theta(0)=0, \theta(R)=\pi/2 \quad \dots(๑.11)$$



รูปที่ ๑.2 แสดงปัญหาแบบ ADSA-D โดย (a)มุมสัมผัสมากกว่าหรือเท่ากับ 90 องศา (b) มุมสัมผัสน้อยกว่า 90 องศา

2.2 มุมสัมผัสน้อยกว่า 90 องศา

$$d\theta/dx = 1/\cos\theta \cdot (2b + cz - \sin\theta/x) \quad \dots(๑.12)$$

$$dz/dx = \tan\theta \quad \dots(๑.13)$$

$$dV/dx = \pi x^2 \tan\theta \quad \dots(๑.14)$$

$$db/dx = 0 \quad \dots(๑.15)$$

$$z(0)=\theta(0)=V(0)=0, V(R)=V_c \quad \dots(๑.16)$$

โดย V_c แทน ปริมาตรทั้งหมดของชิ้นงาน

3. Surface tension measurement from height and diameter of sessile drop and pendant drops(ADSA-HD)

เป็นวิธีการวัดค่าแรงตึงผิวโดยรู้ค่าความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน ณ จุดมุมสัมผัสใดก็ได้แต่โดยทั่วไปที่นิยมวัดกันคือบริเวณที่มุม 90 องศา เนื่องจากวัดค่าได้ง่ายและสะดวกที่สุด สมการที่ใช้คือ

$$dx/d\theta = \cos\theta (2b+cz-\sin\theta/x)^{-1} \quad \dots(2.17)$$

$$dz/d\theta = \sin\theta(2b+cz-\sin\theta/x)^{-1} \quad \dots(2.18)$$

$$db/d\theta = 0 \quad \dots(2.19)$$

$$dc/d\theta = 0 \quad \dots(2.20)$$

$$x(0)=z(0)=0, x(\theta_1)=R, z(\theta_2)=H \quad \dots(2.21)$$

$R=D/2$ โดยที่ $x=0$ จะได้ว่า $\sin(\theta)/x = b$ ซึ่งค่า x กับ z นั้นเป็นค่าคู่อันดับของชิ้นงาน ตามรูปที่ ๑.1 โดย θ เป็นค่ามุมของเส้นสัมผัส D แทนค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน R แทน ค่ารัศมีที่มุม θ_1 H แทนค่า ความสูงที่มุม θ_2 b แทน ค่า curvature ของชิ้นงานที่จุดกำเนิด c แทนค่าคงที่คาพิลารี(Capillary constant) โดย $c = \rho g/\gamma$ ค่า ρ แทน ความหนาแน่นของชิ้นงาน หลอมเหลว γ แทน แรงตึงผิว และค่า g แทน ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก

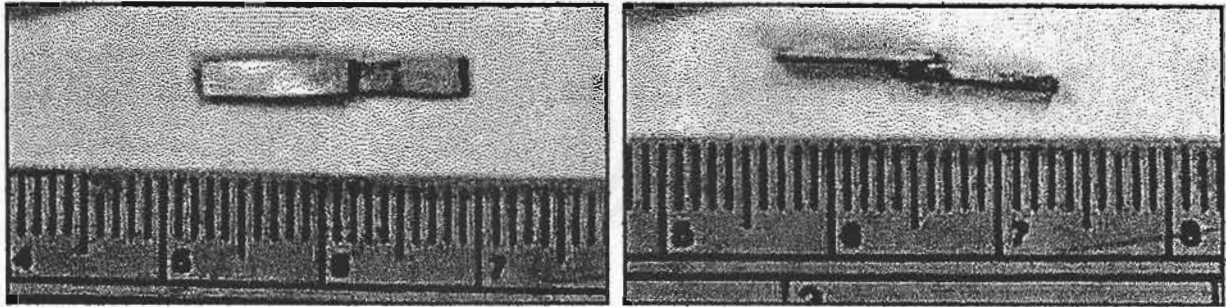
4. Surface tension measurement by drop profile fitting of sessile drop and pendant drops (ADSA-P)

วิธีนี้ได้ใช้ค่าส่วนโค้งของชิ้นงานมาคำนวณซึ่งจะมีความถูกต้องสูงที่สุด แต่มีความซับซ้อนกว่าวิธีข้างต้น(ในที่นี้ไม่ขอกล่าวถึงรายละเอียด)

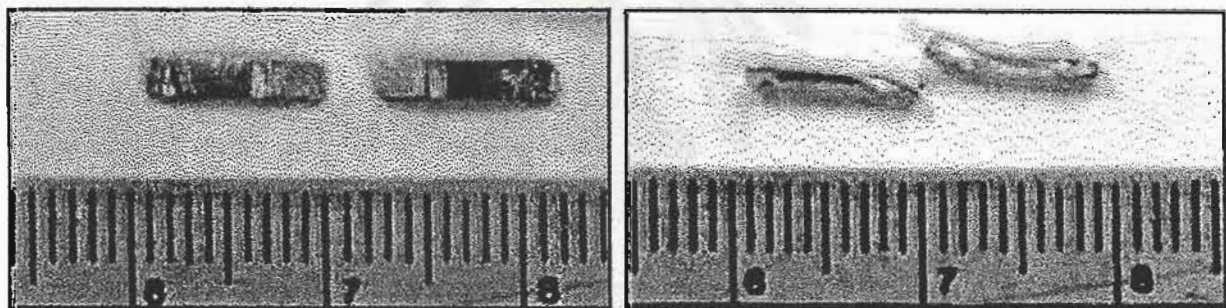
ภาคผนวก ฉ

ข้อมูลดิบ

ฉ.1 แสดงลักษณะรูปชิ้นงานทดสอบ Lap Shear



รูปที่ ฉ.1 แสดงชิ้นงานทดสอบ Lap Shear ก่อนดึง (ก.)ด้านหน้า(ข.)ด้านหลัง



รูปที่ ฉ.2 แสดงชิ้นงานทดสอบ Lap Shear หลังดึง (ก.)ด้านหน้า(ข.)ด้านหลัง

ฉ.2 ผลทดสอบส่วนผสมของทองคำและเงิน

จากการทดสอบปริมาณทองคำและเงินโดยบริษัทบางกอก แอสเสย์ออฟฟิศ จำกัด ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

REF. TO : J057 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
ถ.พญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ



Bangkok Assay Office Co., Ltd.
1230-1232 New Road, Bangkok 10500
Thailand. Tel. 233-1295, 235-0388
Fax: 236-6574

เบอร์ ID : 026770
DATE : 21/10/99

CREDIT INVOICE

PROVIDING A TECHNICAL SERVICE FOR ANALYSING THE PURITY OF PRECIOUS METAL ARTICLES.
ให้บริการทางด้านเทคนิคในการวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของเครื่องรูปพรรณ
PROVIDING A STANDARD FOR GOLD ARTICLES.
บริการมาตรฐานทองคำเครื่องรูปพรรณ

IMPROVING THE QUALITY OF PURCHASE METALS FOR ACCEPTANCE IN INTERNATIONAL MARKET.
ปรับปรุงคุณภาพทองคำที่ซื้อเพื่อรับการยอมรับในตลาดโลก
INCREASING TRUST AMONG CONSUMERS, INTERNATIONAL MARKET.
เพิ่มความเชื่อมั่นในหมู่ผู้บริโภค ตลาดต่างประเทศ
INCREASING THE CREDIT OF THAI GOLD MARKET.
เพิ่มความน่าเชื่อถือของตลาดทองคำไทย
INCREASING THE CREDIT OF THAI GOLD MARKET.
เพิ่มความน่าเชื่อถือของตลาดทองคำไทย

ASSAY

SAMPLE CODE	ARTICLE	WEIGHT IN (GM.)	PCS.	TAG	SAMPLING WEIGHT	ANALYTICAL WEIGHT	LAB RESULT						
							CODE	WEIGHT	%	CODE	WEIGHT	%	
9	G	2.67	1	P5994	2.67	2.02344	AU	1.18762	58.693				
9	G	2.67	1	P5994	2.67	2.02344	AG	0.31725	15.679			\$ 002	

A - FROD CODE F - FINE ASSAY G - GRAVIMETRIC F - FILLATION

REFINING

ANALYTICAL CHEMISTRY

DESCRIPTION	SPECIFY	WEIGHT IN	SAMPLING WEIGHT	100% CONTENT			PAYABLE WEIGHT
				CODE	%	WEIGHT	

MISCELLANEOUS

ITEM	DESCRIPTION	PACKING SIZE		UNIT PRICE	QTY	AMOUNT
		PCS.	WEIGHT			
1	GRAVIMETRIC AU	1		600		600.00
1	GRAVIMETRIC AG	1		300		300.00
	VAT 7%					63.00

ค่าธรรมเนียมค่าบริการ

TOTAL AMOUNT

963.00

1. รับทองคำ	2. รับเงิน	3. รับทองคำขาว	4. รับทองคำดำ	5. รับทองคำขาว	6. รับเงิน	7. รับทองคำขาว	8. รับเงิน
RECEIVED	DATE	AMOUNT	DATE	AMOUNT	DATE	AMOUNT	DATE

บริษัทฯ ขอสงวนสิทธิ์ในผลการวิเคราะห์ทองคำที่ได้รับมอบหมาย และขอสงวนสิทธิ์ในการคืนทองคำที่ได้รับมอบหมายในกรณีที่ลูกค้าไม่มารับทองคำคืนภายในเวลาที่กำหนด

CUSTOMER # :

NO TO J057

ศูนย์บริการลูกค้า
 ถนนวิภาวดีรังสิต กรุงเทพมหานคร
 (เขตจตุจักร) กรุงเทพฯ (ไทย)



Bangkok Assay Office Co., Ltd.

1230-1232 New Road, Bangkok 10150
 Thailand. Tel. 233-1293, 233-0588
 Fax: 236-6574
 023321

DUPLICATE

JOB ID : 22/05/99

DATE :

CREDIT INVOICE

- IMPROVING THE QUALITY OF PRECIOUS METALS FOR ACCEPTANCE IN INTERNATIONAL MARKETS.
- ปรับปรุงคุณภาพของโลหะมีค่าเพื่อให้เป็นที่ยอมรับในตลาดนานาชาติ
- INCREASING TRUST AMONG CONSUMERS, INTERNATIONAL MARKETS.
- เพิ่มความไว้วางใจในหมู่ผู้บริโภค ตลาดนานาชาติ
- HALLMARKING TO INSURE STANDARDS.
- ให้เครื่องหมายรับประกันมาตรฐาน

PROVIDING A TECHNICAL SERVICE FOR ANALYZING THE PURITY OF PRECIOUS METAL ARTICLES
 ให้บริการทางเทคนิคในการวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของโลหะมีค่าในรูปแบบ
 PROVIDING A STANDARD OREGOLD ARTICLES
 ให้บริการมาตรฐานทองคำในรูปแบบ
 ASSAY

NO.	METHOD	WEIGHT IN GMS	PCS	TAG	SAMPLING WEIGHT	ANALYTICAL WEIGHT	LAB RESULT					
							CODE	WEIGHT	%	CODE	WEIGHT	%
9	G	4.37	1	P0933	4.37	2.01560	AU	1.17835	58.462		B105 -1	
9	G	4.37	1	P0933	4.37	2.01560	AG	0.31435	15.596		B105 -1	
9	G	4.67	1	P0934	4.67	2.01116	AU	1.17706	58.526		B103	
9	G	4.67	1	P0934	4.67	2.01116	AG	0.30977	15.403		B103	
9	G	3.30	1	P0935	3.30	3.15389	AU	1.95487	61.983		B117	
9	G	3.30	1	P0935	3.30	3.15389	AG	0.40432	12.820		B117	
9	G	4.28	1	P0936	4.28	3.03060	AU	1.76766	58.327		B101	
9	G	4.28	1	P0936	4.28	3.03060	AU	0.52938	17.468		B101	

METHOD CODE G - THE ASSAY G - GRAVIMETRIC T - TITRATION

ANALYTICAL CHEMISTRY

DESCRIPTION	SPECIFY	WEIGHT IN	SAMPLING WEIGHT	100 % CONTENT			PAYABLE WEIGHT
				CODE	%	WEIGHT	

PACKED QUOTE

ITEM	DESCRIPTION	PACKING SIZE		UNIT PRICE	DR./CR.	AMOUNT
		PCS	WEIGHT			
1	GRAVIMETRIC AU	4		600		2,400.00
2	GRAVIMETRIC AG	4		300		1,200.00
VAT 7%						252.00
ค่าแรงพิมพ์และบรรจุภัณฑ์ (ไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม)						3,852.00
TOTAL AMOUNT						

15. หมายเลข G.M.C. CODE	0. หมายเลข NRG	1. รหัสชนิดสินค้า MATERIAL	2. รหัส LABLING	3. รหัสกล่อง BRACE	4. เลขมงคล BROOCH	5. รหัสตุ้มห้อย CUFFLINK	6. รหัสพู่ PENDANT	7. เลขมงคลไหม NECK	8. รหัสเข็ม SETS	9. อื่น ๆ OTHERS	
ผู้รับซื้อ / ผู้รวบรวม BUYER / COLLECTOR				ผู้รับประกัน APPROVE BY							

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับและเป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการซื้อขายทองคำหรือเครื่องประดับทองคำเท่านั้น

CUSTOMER #

REF TO

J057

ลูกค้ากรมท่าอากาศยาน
คณะอุตสาหกรรมค้าสาร ภาควิชา อุตสาหกรรมโลหการ
ถ.พญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ



Bangkok Assay Office Co., Ltd.

1230-1232 New Road, Bangkok 10300
Thailand. Tel. 233-1295, 235-0588
Fax: 236-6574

101

JOB ID : 028365

DATE : 05/01/00

- PROVIDING A TECHNICAL SERVICE FOR ANALYZING THE PURITY OF PRECIOUS METAL ARTICLES
- ให้บริการทางเคมีเทคนิคในการวิเคราะห์ปริมาณบริสุทธิ์ของเครื่องประดับ
- PROVIDING A STANDARD FOR GOLD ARTICLES
- ให้บริการมาตรฐานให้กับเครื่องประดับทองคำ

CREDIT INVOICE

- IMPROVING THE QUALITY OF PRECIOUS METALS FOR ACCEPTANCE IN INTERNATIONAL MARKETS.
- ปรับปรุงคุณภาพทองโลหะมีค่าเพื่อให้อยู่ในที่ยอมรับในตลาดนานาชาติ
- INCREASING TRUST AMONG CONSUMERS, INTERNATIONAL MARKETS.
- เพิ่มความเชื่อถือกันในหมู่ผู้บริโภค ตลอดจนตลาดนานาชาติ
- HALLMARKING TO INSURE STANDARDS.
- ให้เครื่องหมายรับประกันมาตรฐาน

ASSAY

SAMPLE CODE	METHOD	WEIGHT (G)	PCS	TAG	SAMPLING WEIGHT	ANALYTICAL WEIGHT	LAB RESULT					
							CODE	WEIGHT	%	CODE	WEIGHT	%
9	G	4.17	1	P8364	4.17	0.63913	AU	0.33048	51.708		B109-AC21	
9	G	4.17	1	P8364	4.17	0.63913	AG	0.12273	19.203		"	
9	G	6.14	1	P8365	6.14	1.00529	AU	0.52735	52.458		B109-AC12	
9	G	6.14	1	P8365	6.14	1.00529	AG	0.08056	8.014		"	

METHOD CODE F - FIRE ASSAY G - GRAVIMETRIC T - TITRATION

ANALYTICAL CHEMISTRY

REFINING

DESCRIPTION	SPECIFY	WEIGHT IN	SAMPLING WEIGHT	100% CONTENT			PAYABLE WEIGHT
				CODE	%	WEIGHT	

MISCELLANEOUS

ITEM	DESCRIPTION	PACKING SIZE		UNIT PRICE	DR. ICR.	AMOUNT
		PCS.	WEIGHT			
1	GRAVIMETRIC	2		900		1,800.00
	VAT 7%					126.00
TOTAL AMOUNT						1,926.00

ที่จังหวัดภูเก็ต

ผู้รับเงิน BILL COLLECTOR	ผู้รับชำระ/ผู้รับเงิน BILL COLLECTOR	ผู้อนุมัติ APPROVE BY
------------------------------	---	--------------------------

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของทางบริษัทฯ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง

CUSTOMER # :

REF. TO :

J057

ลูกค้าองค์กรมหาวิทยาลัย
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาโลหการ
เขตบางเขน กรุงเทพฯ

ORIGINAL



Bangkok Assay Office Co., Ltd.

1230-1232 New Road, Bangkok 10500
Thailand. Tel. 233-1295, 235-0588
Fax: 236-6574

TEL :

JOB ID :

DATE : 024010

IMPROVING THE QUALITY OF PRECIOUS METALS FOR ACCEPTANCE IN INTERNATIONAL MARKETS

ปรับปรุงคุณภาพทองคำที่มีคุณภาพให้เป็นที่ยอมรับในตลาดนานาชาติ
INCREASING TRUST AMONG CONSUMERS, INTERNATIONAL MARKETS
เพิ่มความเชื่อมั่นของลูกค้าในตลาดนานาชาติ
HALL MARKING TO INSURE STANDARDS.
ให้เครื่องหมายรับรองสินค้ามาตรฐาน

CREDIT INVOICE

PROVIDING A TECHNICAL SERVICE FOR ANALYZING THE PURITY OF PRECIOUS METAL ARTICLES.

ให้บริการทางด้านเทคนิคในการวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของเครื่องประดับทองคำ
PROVIDING A STANDARD FOR GOLD ARTICLES
สร้างมาตรฐานให้กับเครื่องประดับทองคำ

ASSAY

SAMPLE CODE	METHOD	WEIGHT IN (GM.)	PCS.	TAG	SAMPLING WEIGHT	ANALYTICAL WEIGHT	LAB RESULT					
							CODE	WEIGHT	%	CODE	WEIGHT	%
9	G	3.80	1	P:788	3.80	2.01023	AU	1.18014	58.707		# B105 - 2	
9	G	3.80	1	P:788	3.80	2.01023	AG	0.41178	20.484			
9	G	3.67	1	P1784	3.67	2.01491	AU	1.28470	63.760		# B109	
9	G	3.67	1	P1784	3.67	2.01491	AG	0.40659	20.179			

METHOD CODE F - FINE ASSAY G - GRAVIMETIC T - TITRATION

ANALYTICAL CHEMISTRY

REFINING

DESCRIPTION	SPECIFY	WEIGHT IN	SAMPLING WEIGHT	100% CONTENT			PAYABLE WEIGHT
				CODE	%	WEIGHT	

MISCELLANEOUS

ITEM	DESCRIPTION	PACKER'S SIZE		UNIT PRICE	QTY	AMOUNT
		PCS.	WEIGHT			
1	GRAVIMETIC AU AG	2		700		1,400.00
	UAT 7%					98.00

หมายเหตุ: กรุณาตรวจสอบเงื่อนไขการชำระเงิน

TOTAL AMOUNT

1,498.00

ประเภททองคำ MISC. CODE	แหวน RING	สร้อยคอ BRACELET	ต่างหู EARRING	สร้อยคอ NECKLACE	แหวน BRIDGES	กระดุม CUFFLINK		เข็มขัด TIE/ACK	สร้อยข้อมือ SETS	อื่น ๆ OTHERS
ผู้รับทอง RECEIVER	ผู้รับภาระ/ผู้รับเงิน BILL COLLECTION					ผู้อนุมัติ APPROVE BY				

ผลการวิเคราะห์ทางเคมี เกิดจากโลหะที่นำมาให้วิเคราะห์ไม่อาจถือเป็นข้อผูกพันทางด้านกฎหมายหรือเรียกร้องค่าเสียหายใด ๆ ที่เกิดขึ้น

CUSTOMER # :

REF. TO :

J057 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาโลหการ
เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ

TEL.



Bangkok Assay Office Co., Ltd.

1230-1232 New Road, Bangkok 10500
Thailand. Tel. 233-1295, 235-0588
Fax: 236-6574

ORIGINAL

JOB ID : 025533

DATE :

31/03/2009
IMPROVING THE QUALITY OF PRECIOUS METALS FOR ACCEPTANCE IN INTERNATIONAL MARKETS.

CREDIT INVOICE

ปรับปรุงคุณภาพของโลหะมีค่าเพื่อให้เป็นที่ยอมรับในตลาดนานาชาติ
INCREASING TRUST AMONG CONSUMERS, INTERNATIONAL MARKETS.
เพิ่มความเชื่อถือในหมู่ผู้บริโภค ตลอดจนถึงตลาดนานาชาติ
HALLMARKING TO INSURE STANDARDS.
ให้เครื่องหมายรับประกันมาตรฐาน

PROVIDING A TECHNICAL SERVICE FOR ANALYZING THE PURITY OF PRECIOUS METAL ARTICLES.
ให้บริการทางด้านเทคนิคในการวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของโลหะมีค่า
PROVIDING A STANDARD FOR GOLD ARTICLES.
สร้างมาตรฐานให้กับเครื่องทองรูปพรรณ

ASSAY

SAMPLE CODE	METHOD	WEIGHT-IN (GM.)	PCS.	TAG	SAMPLING WEIGHT	ANALYTICAL WEIGHT	LAB RESULT					
							CODE	WEIGHT	%	CODE	WEIGHT	%
9	G	4.90	1	P3899	4.90	0.50181	AU	0.29284	58.357	# B107		
		4.90	2	P3899	4.90	0.50181	AG	0.08172	16.285			
9	G	3.91	1	P3900	3.91	0.51564	AU	0.30994	60.108	# B117		
		3.91	2	P3900	3.91	0.51564	AG	0.06188	12.001			

METHOD CODE F-FIRE ASSAY G-GRAVIMETIC T-TITRATION

REFINING

ANALYTICAL CHEMISTRY

DESCRIPTION	SPECIFY	WEIGHT IN	SAMPLING WEIGHT	100% CONTENT			PAYABLE WEIGHT
				CODE	%	WEIGHT	

MISCELLANEOUS

ITEM	DESCRIPTION	PACKING SIZE		UNIT PRICE	DR CR	AMOUNT
		PCS.	WEIGHT			
1	GRAVIMETIC AU AG	2		700		1,400.00
	VAT 7%					98.00

ทองคำสร้อยเกาสมบคบาทถวน

TOTAL AMOUNT

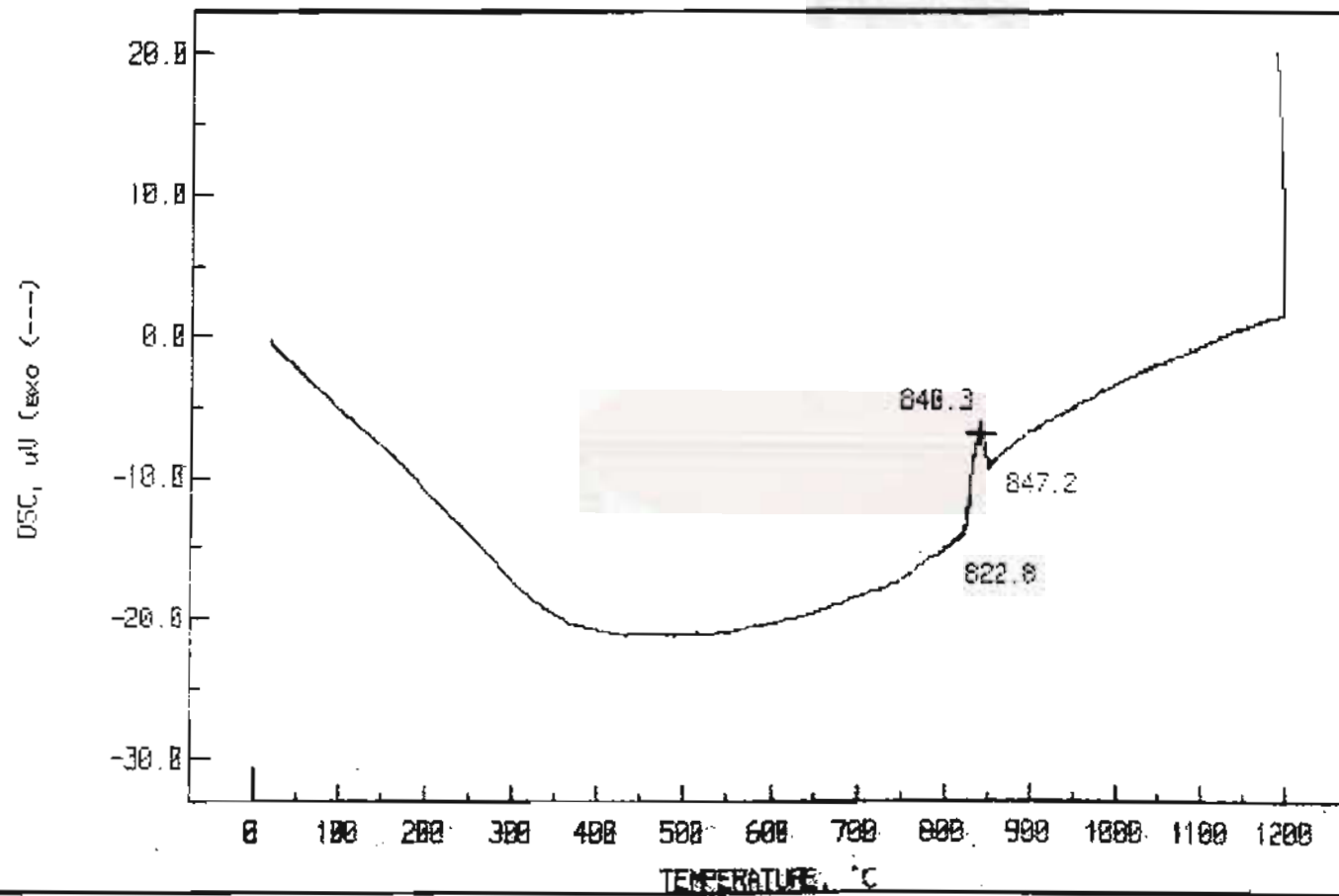
1,498.00

1	2	3	4	5	6	7	8	9
BRACELET	EARRING	NECKLACE	BROOCH	CUFFLINK	PENDANT	TIFFANY	SETS	OTHERS

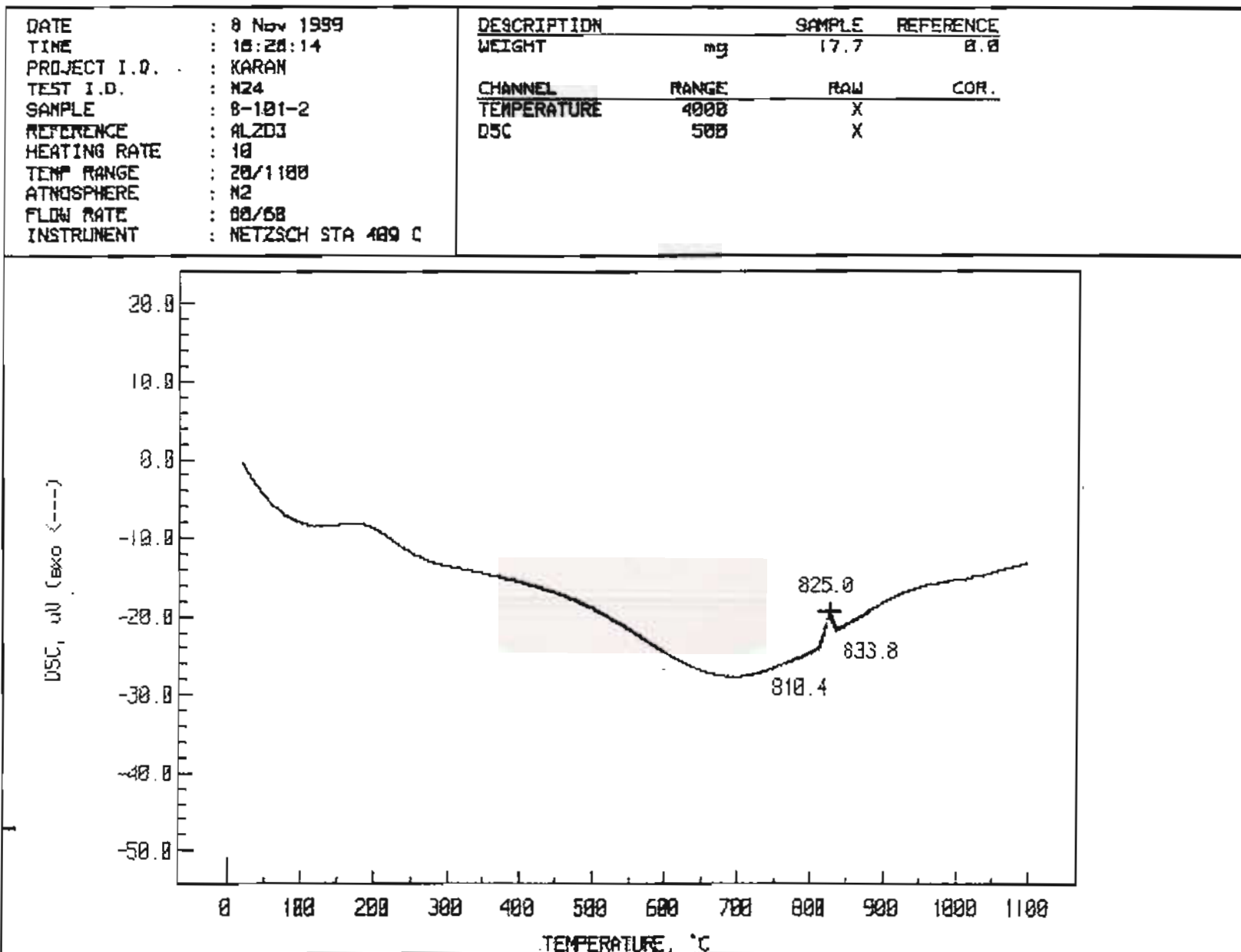
ขอสงวนสิทธิ์ในสินค้าที่ปรากฏในใบแจ้งหนี้... (Small print text)

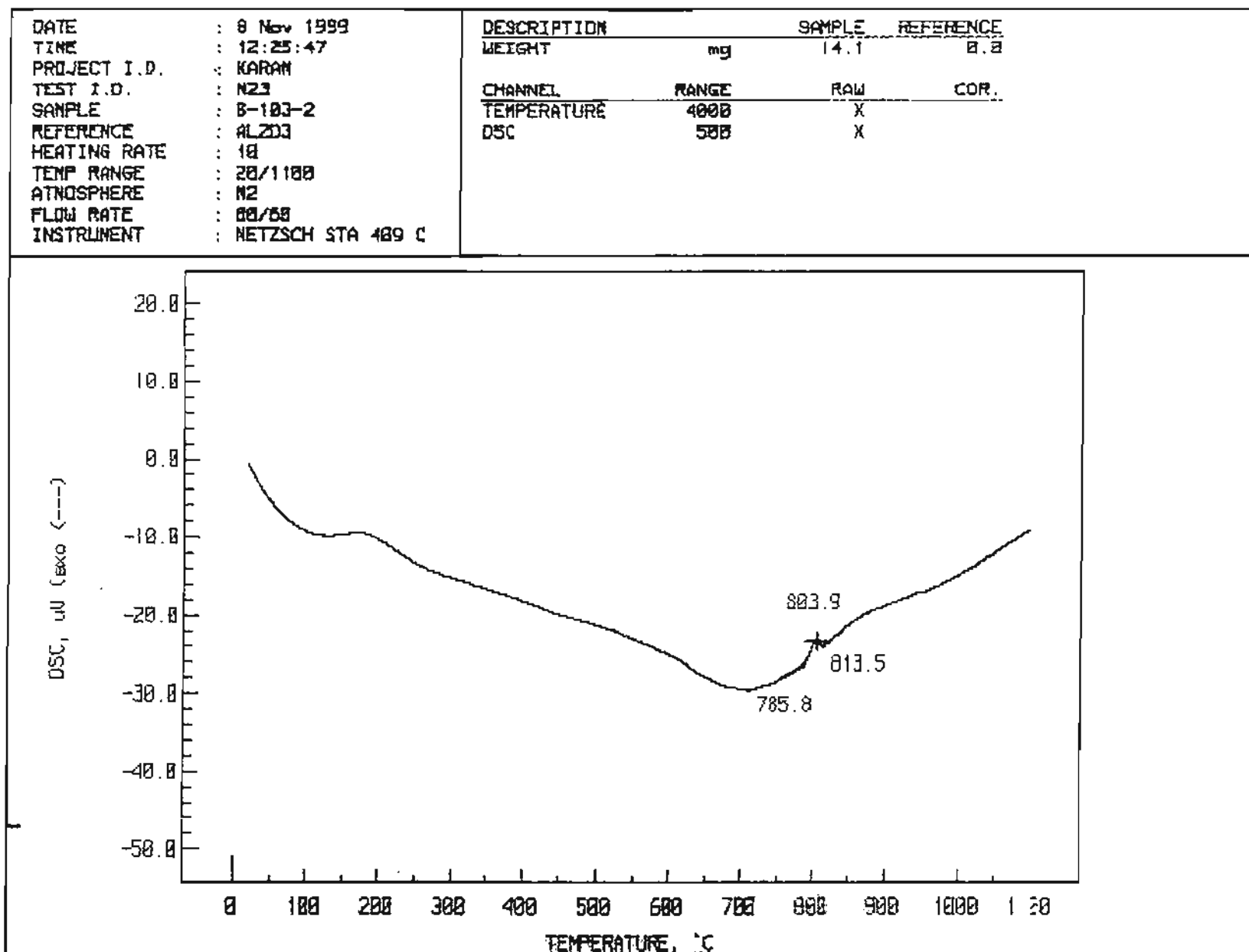
DATE : 26 Nov 1999
 TIME : 17:48:36
 PROJECT I.D. : KARAN
 TEST I.D. : M44
 SAMPLE : 9001-2
 REFERENCE : EMPT
 HEATING RATE : 10/B/20
 TEMP RANGE : 20/1200
 ATMOSPHERE : N2
 FLOW RATE : 00/00
 INSTRUMENT : NETZSCH STA 409 C

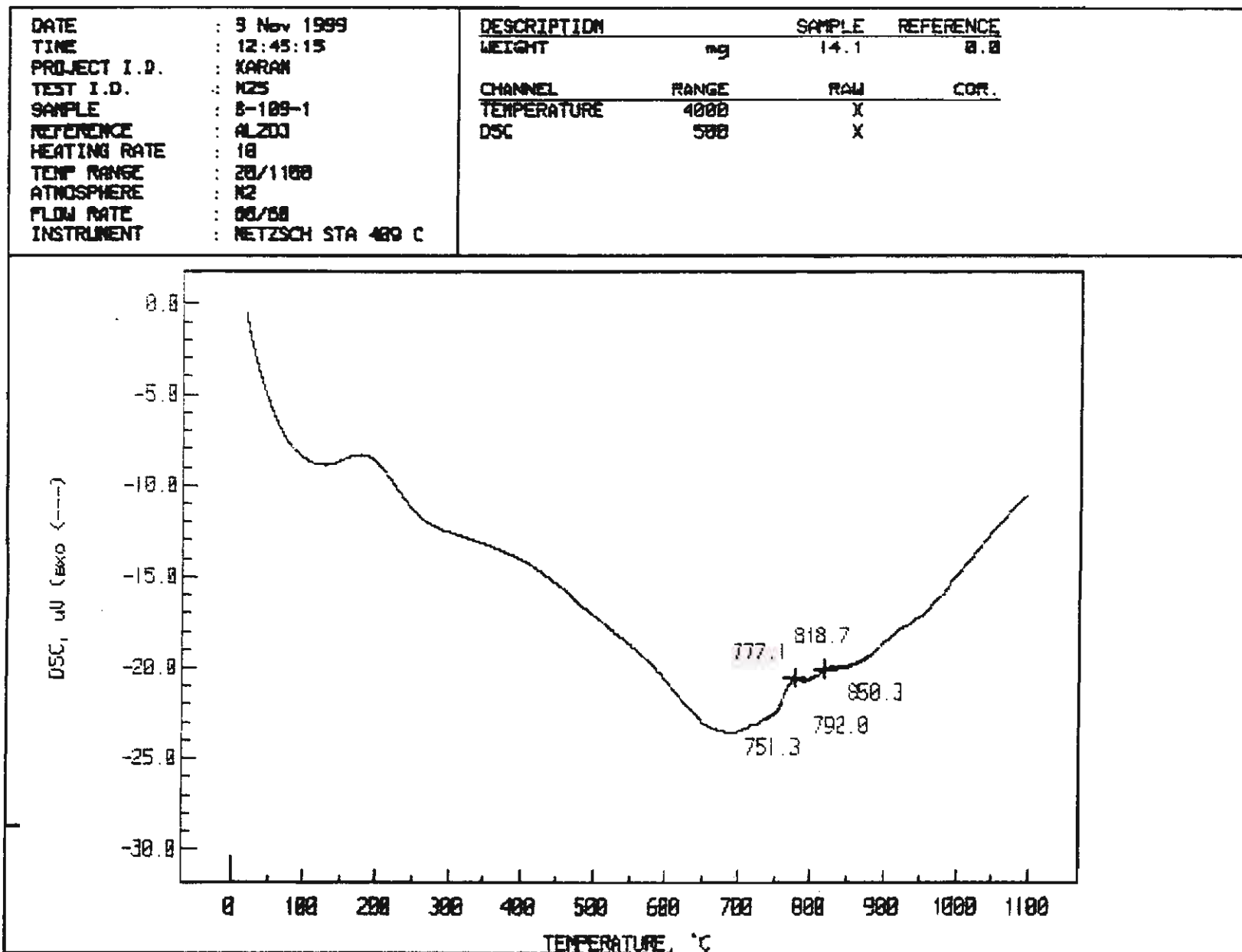
DESCRIPTION	SAMPLE	REFERENCE
WEIGHT	15.6	8.8
CHANNEL	RANGE	RAW
TEMPERATURE	4000	X
DSC	500	X

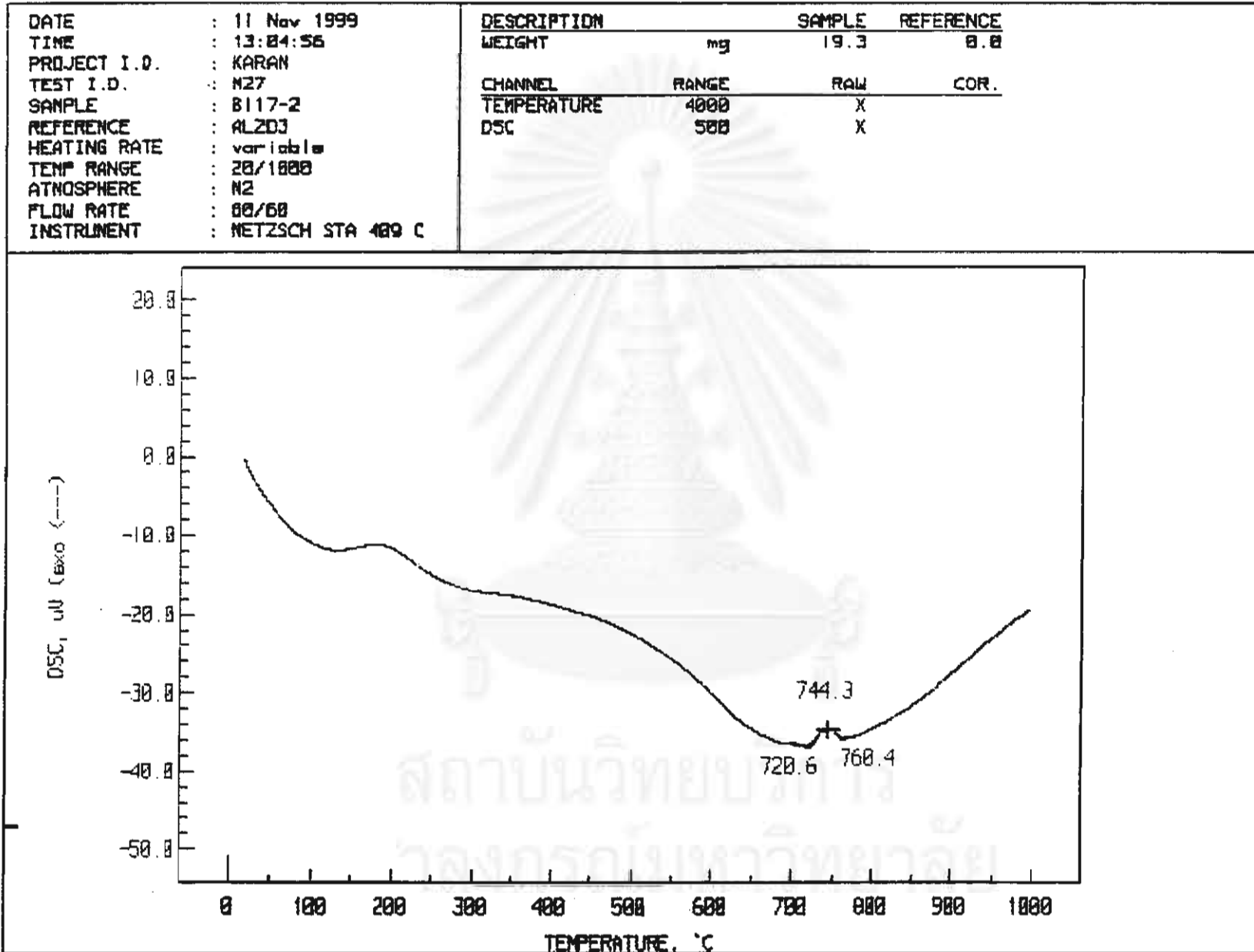


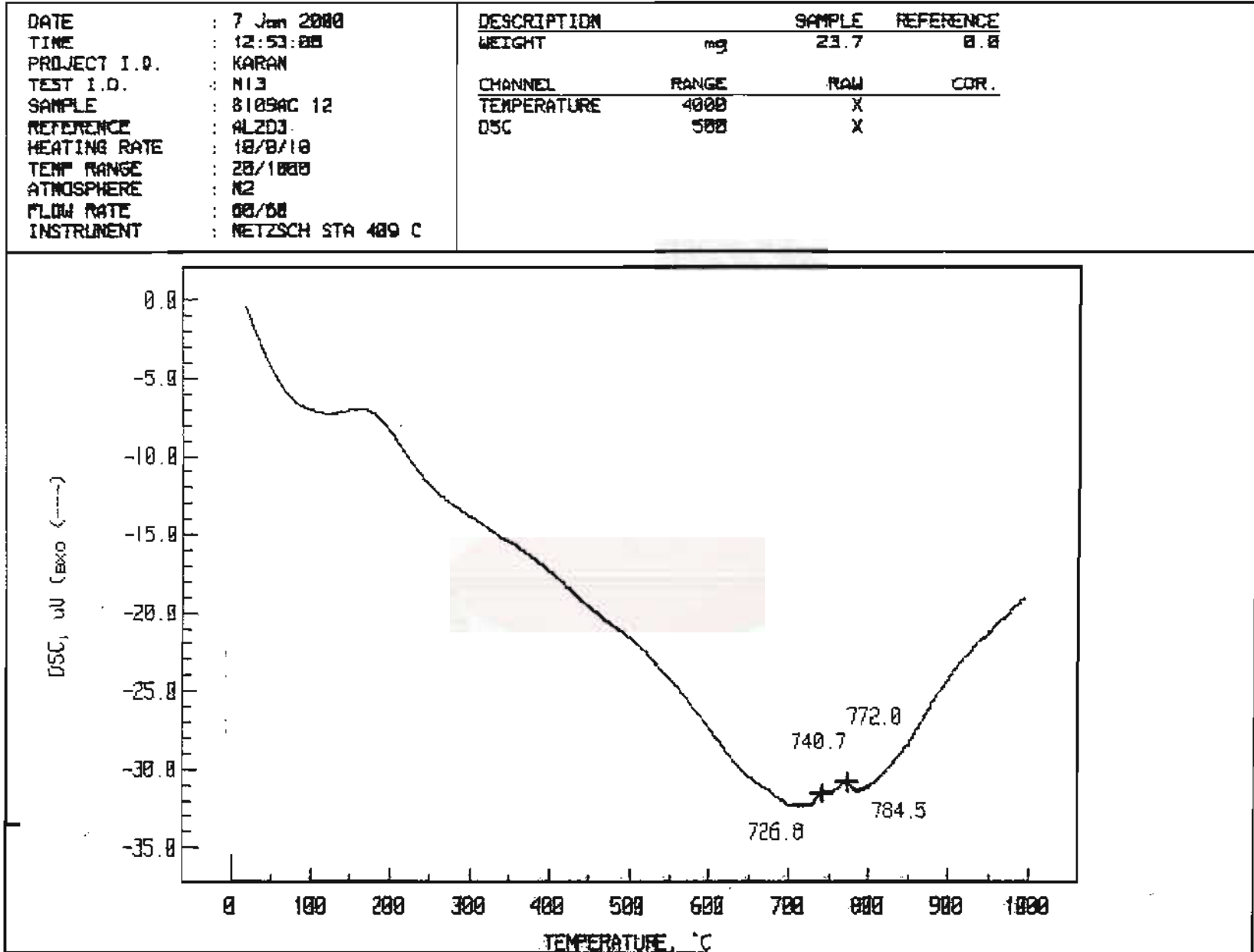
9.3 แสดงผลจากทดสอบโดยใช้เครื่อง Differential Thermal Analysis(DTA)

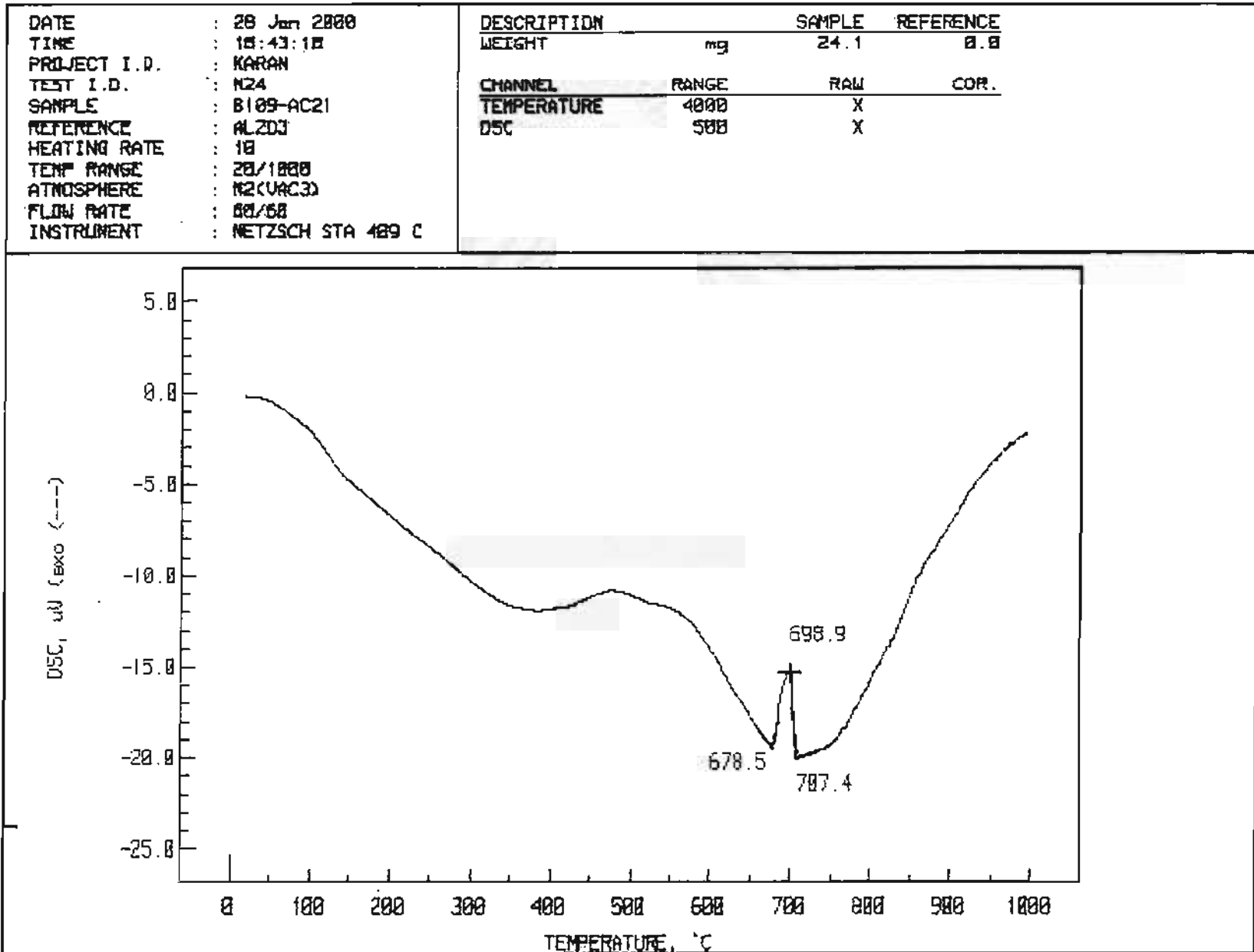






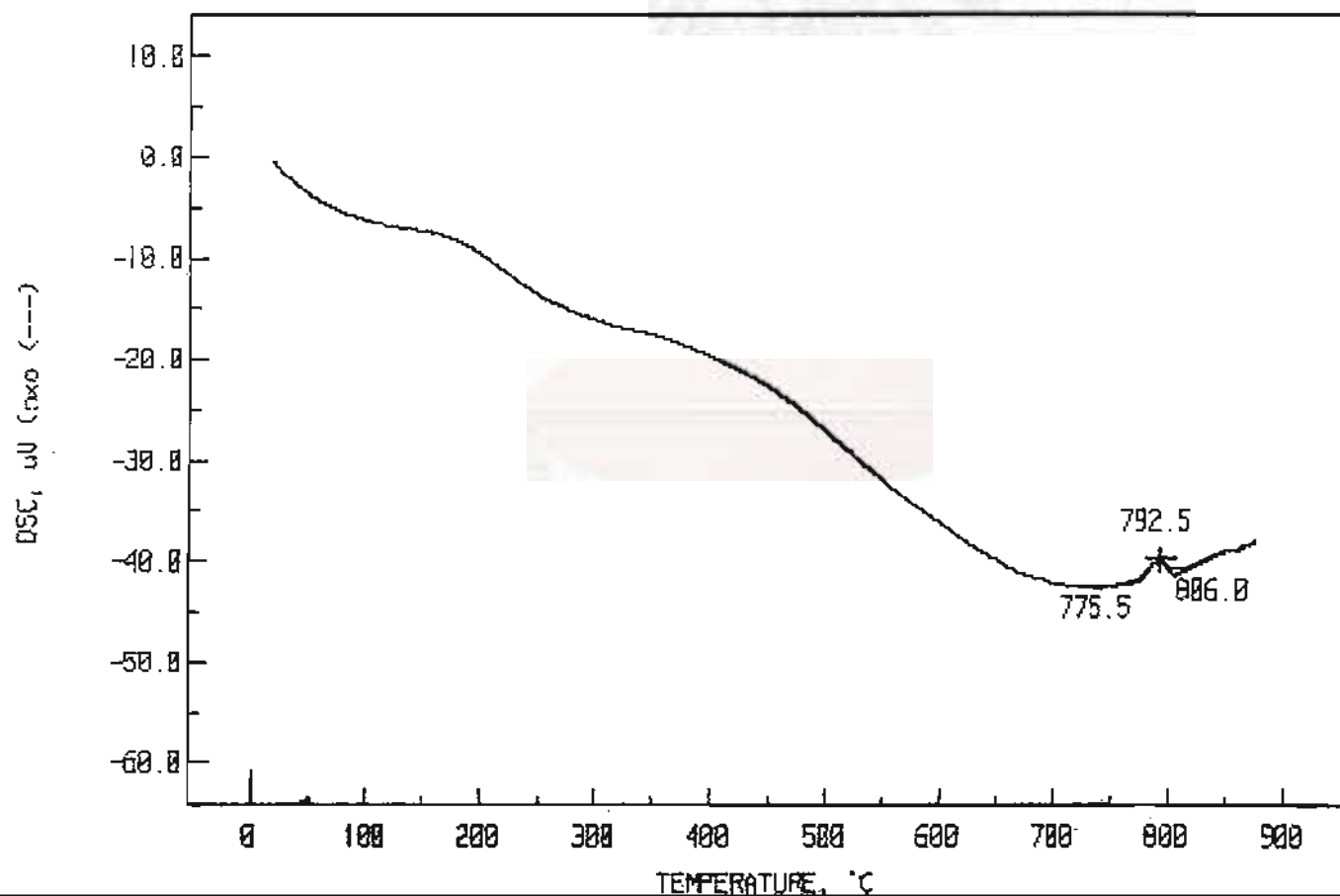






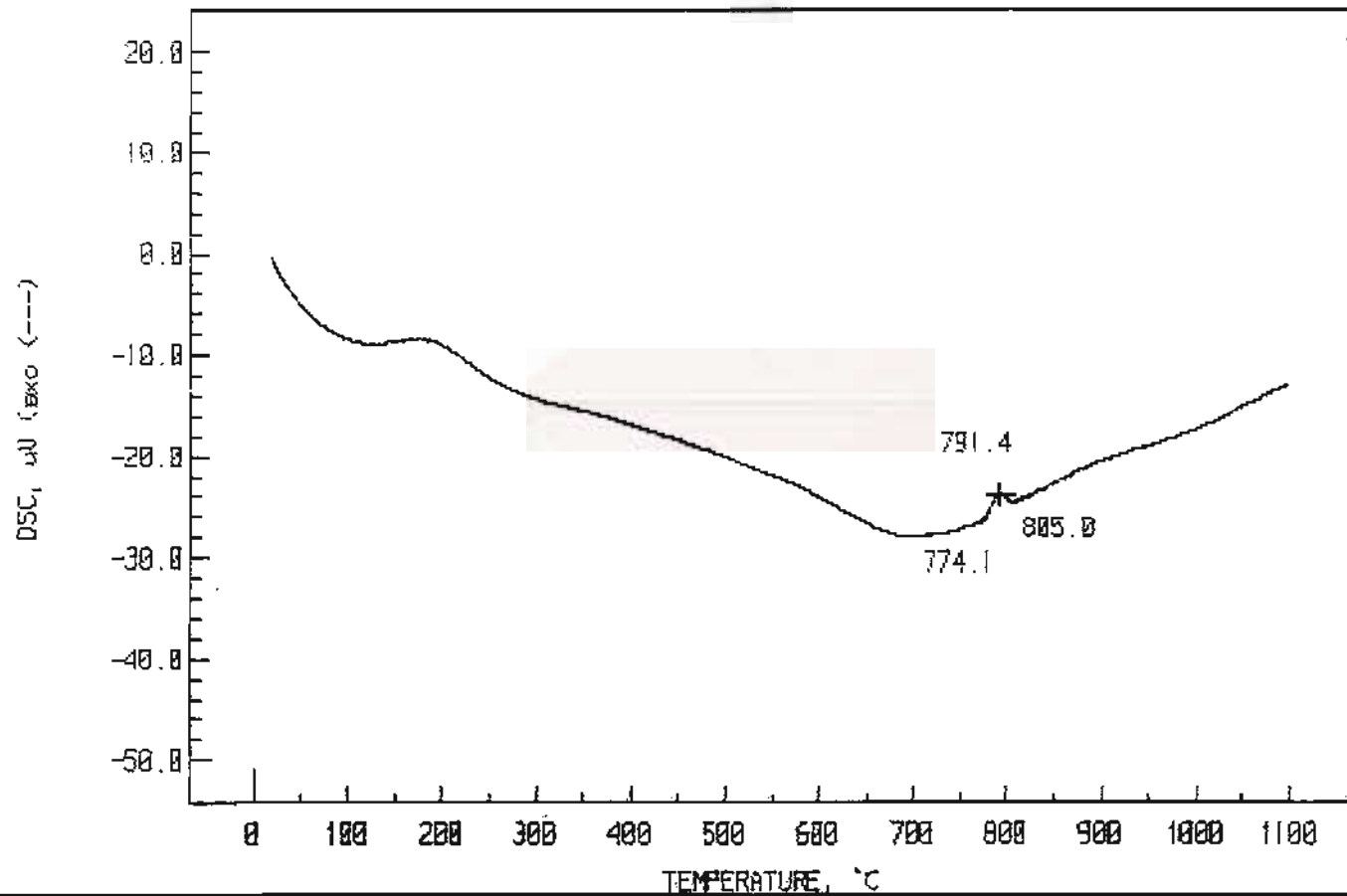
DATE : 5 Nov 1999
 TIME : 16:28:23
 PROJECT I.D. : KARAN
 TEST I.D. : N22
 SAMPLE : B-105-2
 REFERENCE : AL2O3
 HEATING RATE : 10
 TEMP RANGE : 20/1100
 ATMOSPHERE : N2
 FLOW RATE : 80/60
 INSTRUMENT : NETZSCH STA 409 C

DESCRIPTION	SAMPLE	REFERENCE
WEIGHT	mg	13.1
		0.0
CHANNEL	RANGE	RAW
TEMPERATURE	4000	X
DSC	500	X



DATE : 9 Nov 1999
 TIME : 17:19:46
 PROJECT I.D. : KARAN
 TEST I.D. : N26
 SAMPLE : 8-107-1
 REFERENCE : AL2O3
 HEATING RATE : 10
 TEMP RANGE : 20/1100
 ATMOSPHERE : N2
 FLOW RATE : 80/50
 INSTRUMENT : NETZSCH STA 409 C

DESCRIPTION	SAMPLE	REFERENCE	
WEIGHT	mg	16.6	
		0.0	
CHANNEL	RANGE	RAW	COR.
TEMPERATURE	4000	X	
DSC	500	X	



จ.4 แสดงผล Lap shear test

Test type: Tensile
 Operator name: Operator
 Sample Identification: B201-1
 Interface Type: 5500

Sample Rate (pts/secs): 10.0000
 Crosshead Speed: 10.0000 mm/min
 2nd Crosshead Speed: 0.0000 mm/min
 Full Scale Load Range: 5.000 kN

Sample comments:

	Load at Max.Load (N)	Stress at Max.Load (MPa)	Area (mm ²)
1	838.551	217.806	3.850
Mean	838.551	217.806	3.850
S.D.	0	0	0

Test type: Tensile
 Operator name: Operator
 Sample Identification: B103-2
 Interface Type: 5500

Sample Rate (pts/secs): 10.0000
 Crosshead Speed: 10.0000 mm/min
 2nd Crosshead Speed: 0.0000 mm/min
 Full Scale Load Range: 5.000 kN

Sample comments:

	Load at Max.Load (N)	Stress at Max.Load (MPa)	Area (mm ²)
1	1071.142	196.180	5.460
Mean	1071.142	196.180	5.460
S.D.	0	0	0

Test type: Tensile
 Operator name: Operator
 Sample Identification: B205-2
 Interface Type: 5500

Sample Rate (pts/secs): 10.0000
 Crosshead Speed: 10.0000 mm/min
 2nd Crosshead Speed: 0.0000 mm/min
 Full Scale Load Range: 5.000 kN

Sample comments:

	Load at Max.Load (N)	Stress at Max.Load (MPa)	Area (mm ²)
1	607.865	190.255	3.195
Mean	607.865	190.255	3.195
S.D.	0	0	0

Test type: Tensile
 Operator name: Operator
 Sample Identification: B207-1
 Interface Type: 5500

Sample Rate (pts/secs): 10.0000
 Crosshead Speed: 10.0000 mm/min
 2nd Crosshead Speed: 0.0000 mm/min
 Full Scale Load Range: 5.000 kN

Sample comments:

	Load at Max.Load (N)	Stress at Max.Load (MPa)	Area (mm ²)
1	685.739	228.580	3.000
Mean	685.739	228.580	3.000
S.D.	0	0	0

Test type: Tensile
 Operator name: Operator
 Sample Identification: B117-2
 Interface Type: 5500

Sample Rate (pts/secs): 10.0000
 Crosshead Speed: 10.0000 mm/min
 2nd Crosshead Speed: 0.0000 mm/min
 Full Scale Load Range: 5.000 kN

Sample comments:

	Load at Max.Load (N)	Stress at Max.Load (MPa)	Area (mm ²)
1	1542.763	342.836	4.500
Mean	1542.763	342.836	4.500
S.D.	0	0	0

Test type: Tensile
 Operator name: Operator
 Sample Identification: B217-2
 Interface Type: 5500

Sample Rate (pts/secs): 10.0000
 Crosshead Speed: 10.0000 mm/min
 2nd Crosshead Speed: 0.0000 mm/min
 Full Scale Load Range: 5.000 kN

Sample comments:

	Load at Max.Load (N)	Stress at Max.Load (MPa)	Area (mm ²)
1	1022.464	300.725	3.400
Mean	1022.464	300.725	3.400
S.D.	0	0	0

ภาคผนวก ข

รายละเอียดเกี่ยวกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การแก้ปัญหาสมการของADSA ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์เชิงย่อย ไม่สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการอย่างง่ายได้ ดังนั้นจึงได้ใช้ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์แบบ รุ่งเง-คุดตาอันดับ 4 มาช่วยในการคำนวณ และได้ใช้โปรแกรมวิซวลเบสิก เวอร์ชัน 6 ในการเขียนโปรแกรมเพื่อให้สะดวกรวดเร็วต่อการคำนวณ หลักการของโปรแกรมคร่าว ๆ มีดังนี้

ส่วนของโปรแกรมมี 2 โปรแกรมย่อยคือการประมวลผลแบบ Dorsey และ แบบ ADSA ผู้ใช้งานป้อนรูปภาพที่ต้องการคำนวณ และโปรแกรมจะหาขนาดของชิ้นงานตามคู่อันดับต่าง ๆ (ทำตามเมนู) โปรแกรมจะเก็บค่า X และ Z ที่จุด 90 องศาและให้คอมพิวเตอร์ประมวลค่าที่ b และ c (โปรแกรมจะ Trial and Error ค่า b และ c ไปเรื่อย ๆ แต่เพื่อความรวดเร็วจะกำหนดขอบเขตของค่า b และ c อีกที) แทนค่าในสมการ ดังรูปที่ ข.1 แสดงส่วนหนึ่งของ Source code เกี่ยวกับรุ่งเง-คุดตาอันดับ4

```

x = 0      z = 0      V = 0      h = 22 / 7 / 100      Q = 0
For k = 0 To 100
    If x = 0 Then
        k1x = b ^ (-1)
        k1z = 0
        k1v = 0
    Else
        k1x = Cos(Q) * (2 * b + c * z - Sin(Q) / x) ^ (-1)
        k1z = Sin(Q) * (2 * b + c * z - Sin(Q) / x) ^ (-1)
        k1v = 22 / 7 * (x ^ 2) * Sin(Q) * (2 * b + c * z - Sin(Q) / x) ^ (-1)
    End If
    k2x = Cos(Q + h / 2) * (2 * b + c * (z + (h / 2) * k1z) - Sin(Q + h / 2) / (x + h / 2 * k1x)) ^ (-1)
    k2z = Sin(Q + h / 2) * (2 * b + c * (z + (h / 2) * k1z) - Sin(Q + h / 2) / (x + h / 2 * k1x)) ^ (-1)
    k2v = pi * ((x + h / 2 * k1x) ^ 2) * Sin(Q + h / 2) * (2 * b + c * (z + h / 2 * k1z) - Sin(Q + h / 2) / (x + h / 2 * k1x)) ^ (-1)
    k3x = Cos(Q + h / 2) * (2 * b + c * (z + (h / 2) * k2z) - Sin(Q + h / 2) / (x + h / 2 * k2x)) ^ (-1)
    k3z = Sin(Q + h / 2) * (2 * b + c * (z + (h / 2) * k2z) - Sin(Q + h / 2) / (x + h / 2 * k2x)) ^ (-1)
    k3v = pi * ((x + h / 2 * k2x) ^ 2) * Sin(Q + h / 2) * (2 * b + c * (z + h / 2 * k2z) - Sin(Q + h / 2) / (x + h / 2 * k2x)) ^ (-1)
    k4x = Cos(Q + h) * (2 * b + c * (z + h * k3z) - Sin(Q + h) / (x + h * k3x)) ^ (-1)
    k4z = Sin(Q + h) * (2 * b + c * (z + h * k3z) - Sin(Q + h) / (x + h * k3x)) ^ (-1)
    k4v = pi * ((x + h * k3x) ^ 2) * Sin(Q + h) * (2 * b + c * (z + h * k3z) - Sin(Q + h) / (x + h * k3x)) ^ (-1)
    Xarray(k) = x
    Zarray(k) = z
    Varray(k) = V
    Qarray(k) = Q * 180 / 22 * 7

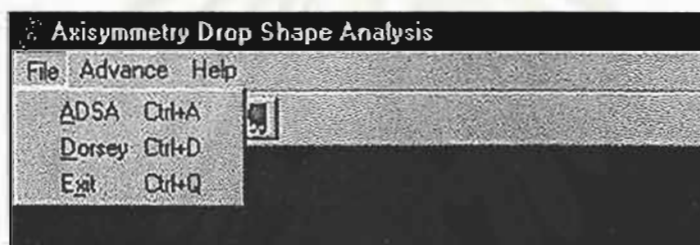
```

รูปที่ ข.1 แสดงตัวอย่าง Source code เกี่ยวกับ รุ่งเง-คุดตาอันดับ4

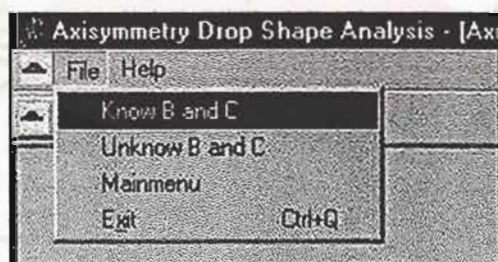
จะได้ค่า X และ Z นำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับ X และ Z ที่วัดได้จากรูปจนกว่าจะได้ค่า b และ c ที่ทำให้ให้ได้ค่า X และ Z ที่ใกล้เคียง X และ Z จากรูปที่สุด จากนั้นนำค่า b และ c ที่ได้ไปประมวลผลหาค่า ปริมาตร โดยต้องรู้ค่ามุมสัมผัสจากรูปเพื่อหาจุดที่สิ้นสุดของปริมาตรของชิ้นงาน และนำค่าไปเปรียบเทียบกับจุดสิ้นสุดจะได้ค่าปริมาตร ออกมา นำไปหาค่าความหนาแน่น (ความหนาแน่น = มวล/ปริมาตร) และนำค่าปริมาตรที่ได้กับ ค่า c ไปคำนวณหาแรงตึงผิวต่อ(แรงตึงผิว = ความหนาแน่น $\cdot g/c$)

ส่วนด้านโปรแกรมของ Dorsey จะให้ผู้ใช้เลือกรูปที่ต้องการและให้กำหนดขนาดของชิ้นงานตามเมนูที่สั่ง(ที่จุด 45 องศา) และต้องป้อนค่าความหนาแน่นของชิ้นงานจะได้ค่าแรงตึงผิวออกมา

ส่วนต่อไปจะแสดงรูปตัวอย่างของโปรแกรมมีดังต่อไปนี้รูปที่ ๒.๒แสดงส่วนเมนูที่แบ่งเป็น 2 โปรแกรมย่อยคือ ADSA และ Dorsey เมื่อกดเข้าไปส่วน ADSA จะแบ่งเป็น 2 กรณีคือ 1. เมื่อทราบค่า b และ c แล้ว 2. เมื่อไม่ทราบค่า b และ c ดังจะเห็นในรูปที่ ๒.3

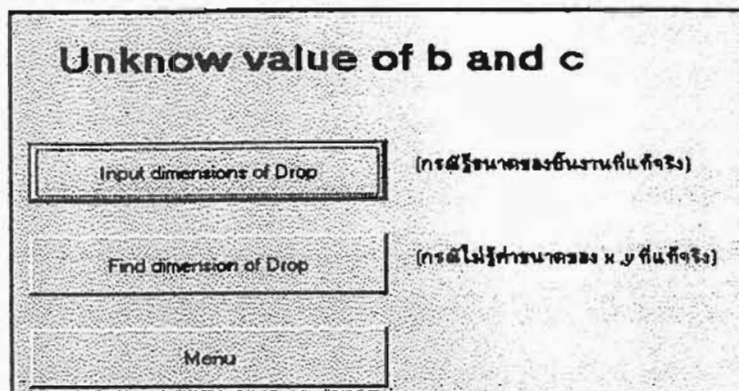


รูปที่ ๒.๒ แสดงเมนูส่วนแรก

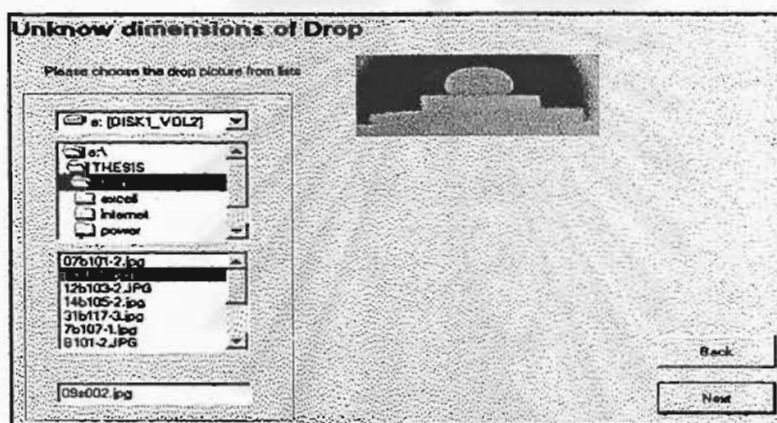


รูปที่ ๒.๓ แสดงเมนูส่วน ADSA

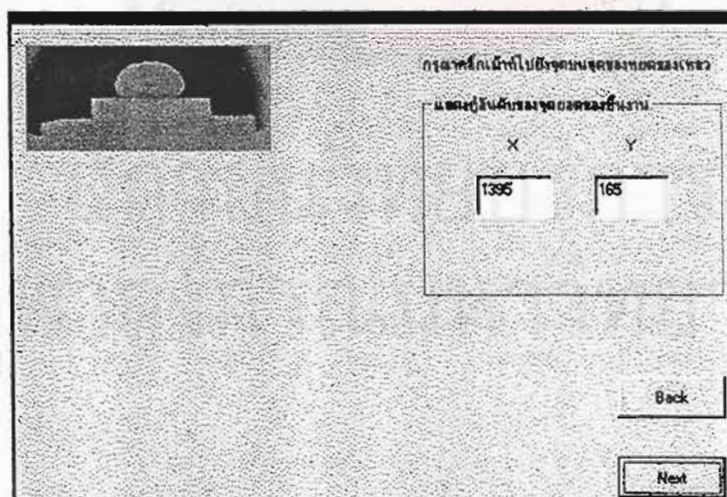
เมื่อเข้าไปในส่วนกรณีที่ 2 เมื่อไม่ทราบค่า b และ c พบว่าโปรแกรมจะถามถึงขนาดของชิ้นงานและได้แบ่งเป็น 2 อย่างคือ กรณีที่ทราบขนาดที่แท้จริงของชิ้นงานแล้ว กับกรณีที่ไมทราบซึ่งในงานวิจัยนี้เราจะวัดรูปจากโปรแกรมนี้(กรณีที่ 2) ดังภาพที่ ๒.4



รูปที่ ๔.๔ แสดงส่วนADSA กรณีไม่ทราบค่า b และ c



รูปที่ ๔.๕ แสดงส่วน ADSA ในการเลือกรูปที่จะหาค่าแรงดึงผิว



รูปที่ ๔.๖ แสดงส่วนกำหนดขนาดชิ้นงาน

รูปที่ ข.5 แสดงส่วนที่ไม่ทราบขนาดของชิ้นงานจึงได้เลือกรูปที่ต้องการจะหาค่าแรงดึงผิว และวัดขนาดชิ้นงานดังรูป ข.6 และเมื่อทำการคลิกเมาท์ไปยังจุดที่โปรแกรมสอบถามโปรแกรมจะทำการคำนวณหาขนาดของชิ้นงานและนำไปคำนวณหาค่าต่าง ๆ ต่อไป

ส่วนในกรณีที่เราอยากทราบรูปแบบของหยดชิ้นงานที่ค่า b และ c ที่เราระบุจากรูปที่ ข.3 เมื่อกดไปยังค่าที่ทราบค่า b และ c และป้อนค่า b และ c ดังรูปที่ ข.7 และโปรแกรมจะคำนวณได้ค่า X , Z ณ มุมใด ๆ ออกมาในรูปตารางดังรูปที่ ข.8 และเมื่อคลิกในส่วนของกราฟจะพบรูปส่วนโค้งของหยดของเหลวที่ค่า b และ c นั้นดังรูปที่ ข.9

กรณการหาค่า b และ c

ค่า c

ค่า b

Calculation

Menu

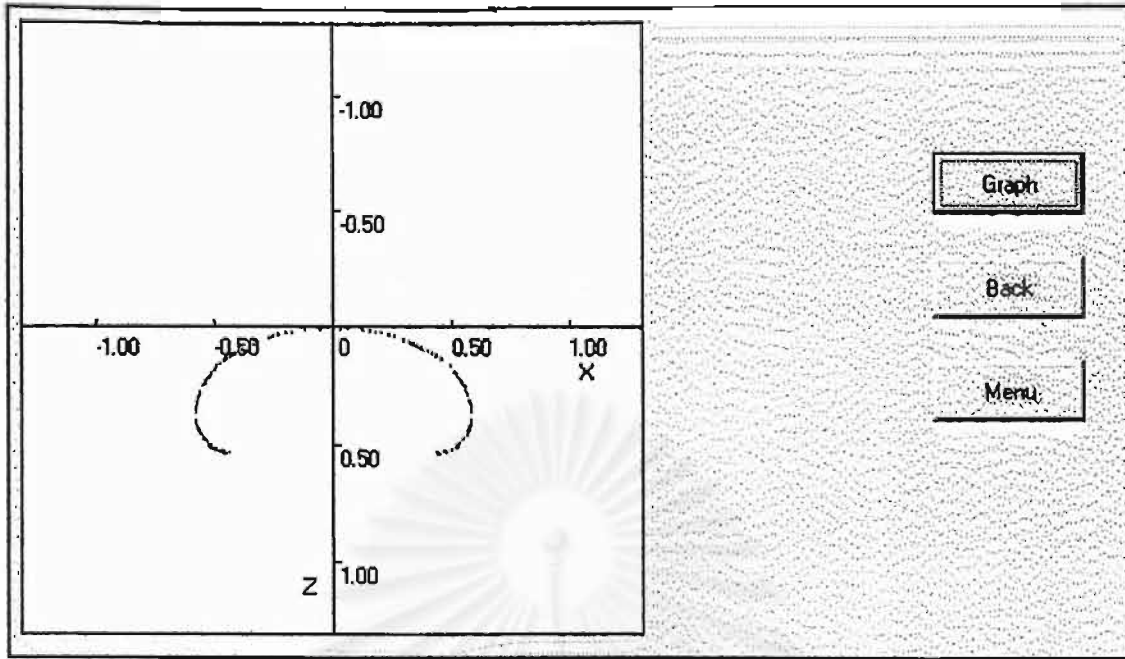
รูปที่ ข.7 แสดงส่วนADSAที่ทราบค่า b และ c และให้ป้อนค่า

มุม(องศา)	X	Z	ปริมาตร(cm^3)
0.00	0.0000	0.0000	0.00000
1.80	0.0314	0.0005	0.00000
3.60	0.0624	0.0020	0.00001
5.40	0.0929	0.0044	0.00006
7.20	0.1226	0.0076	0.00018
9.00	0.1512	0.0117	0.00042
10.80	0.1787	0.0165	0.00084
12.60	0.2049	0.0219	0.00147
14.40	0.2299	0.0279	0.00236

Graph

Back

รูปที่ ข.8 แสดงผลการคำนวณค่าคู่อันดับ x และ z ที่มุมใด ๆ



รูปที่ ๓.๑ แสดงรูปหยดของเหลวที่ค่า b และ c ที่กำหนด

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย กรันต์ ลิம்ப์ไพฑูรย์ เกิดวันที่ 8 กรกฎาคม 2518 ที่อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสาคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540

