

การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมด้วยวิธี RSM ในกระบวนการเชื่อมต่อแบบ  
เทอร์โมโซนิกบนแผงจรรายขนาดใหญ่

RSM OPTIMIZATION WITH A<sub>6</sub> WIRE THERMOSONIC BONDING  
ON VLSI CIRCUITS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-228-2

การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมด้วยวิธี RSM ในกระบวนการเชื่อมต่อแบบ  
เทอร์โมโซนิคบนวงจรรวมขนาดใหญ่

RSM OPTIMIZATION WITH Au WIRE THERMOSONIC BONDING  
ON VLSI CIRCUITS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 40638  
วัน, เดือน, ปี 18 ต.ค. 2544

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง .b.....  
พ.ศ.2544 .i.....

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อ ISBN 974-648-288-2 ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

147365289

**RSM OPTIMIZATION WITH Au WIRE THERMOSONIC BONDING  
ON VLSI CIRCUITS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2001**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
**ISBN 974-648-288-2**

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าการฉีกเอาทั้งชิ้น อื่นทั้งเป็นก็ให้ตัดแปลงก็ไม่ได้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**  
**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมด้วยวิธี RSM ในกระบวนการเชื่อมต่อลวดทองคำ  
แบบเทอร์โมโซนิคบนวงจรรวมขนาดใหญ่  
RSM OPTIMIZATION WITH Au WIRE THERMOSONIC BONDING  
ON VLSI CIRCUITS

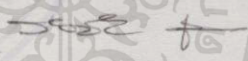

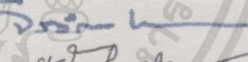
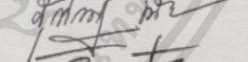
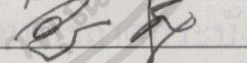
ชื่อนักศึกษา            นายสันติ ชาตรุประชีวิน

รหัสประจำตัว            41061175

ปริญญา                    วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา                วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์      รศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วันชัย	วิรุจ	
รศ.สมศักดิ์	เชียรศิริกุล	
ผศ.จิรวัดน์	ปานกลาง	
อาจารย์สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	
รศ.ดร.วิสุทธิ	จูติรุ่งเรือง	

วัน/เดือนปี ที่สอบ 22 พฤษภาคม 2544 เวลา 12.00-13.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัดชู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปเผยแพร่  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและที่ 25 ไปถึงสำนักงานบัณฑิตวิทยาลัย  
วันที่.....เดือน.....ปี พ.ศ..... 2544

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมด้วยวิธี RSM ในกระบวนการเชื่อมต่อลวดทองคำแบบเทอร์โมโซนิคบนวงจรรวมขนาดใหญ่
นักศึกษา	นายสันติ ชาตรุประชีวิน
รหัสประจำตัว	41061175
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ได้มีการพัฒนาเทคนิคการผลิตวงจรรวมอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้ได้วงจรรวมที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถรองรับเทคโนโลยีที่เปลี่ยนไปอย่างรวดเร็ว ตอบสนองต่อผู้ใช้งานรวมถึงราคาต้นทุนที่ต่ำ ซึ่งอุตสาหกรรมการผลิตวงจรรวมแบ่งออกเป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือ การผลิตแผ่นวงจรรวมและการนำตัววงจรรวมไปบรรจุเข้ากับตัวถัง สำหรับในประเทศไทยมีเพียงอุตสาหกรรมการผลิตประเภทที่สองเพียงอย่างเดียว โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นการพัฒนาเทคนิคหนึ่ง ในกระบวนการนำตัววงจรรวมไปบรรจุเข้ากับตัวถังโดยมีขั้นตอนที่สำคัญคือการ Wire Bonding โดยทำการศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการรวมถึงการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด โดยอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติในการหาเงื่อนไขของพารามิเตอร์ต่างๆ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดย จะบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดทองคำ ค่าแรงเฉือน และ ค่าแรงดึงลวด ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ตามกับ พารามิเตอร์อิสระทั้ง 4 ตัวคือ B\_Force, B\_Power, B\_Time, Temperature โดยแสดงผลการวิเคราะห์ในลักษณะกราฟ Contour เนื่องจากคุณภาพของการเชื่อมต่อที่สูงจะเกิดจากการที่มีพื้นที่สัมผัสระหว่างลวดทองคำกับบอลูมินัมมาก จากเหตุผลดังกล่าวสามารถที่จะประยุกต์ไปใช้กับวงจรรวมที่มีพื้นที่สัมผัสที่มีขนาดเล็กและระยะห่างระหว่างพื้นที่สัมผัสที่เป็นอลูมินัมที่มีขนาดแคบมาก ๆ ได้ โดยการลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางลวดทองคำให้เล็กลงตามความเหมาะสม และทำการออปติไมเซชันตัวที่เกิดขึ้นผลที่ได้สามารถนำไปใช้กับตัวถังที่เป็นประเภท BGA, TQFP หรือตัวถังที่มีระยะ Fine Pitch บางชนิดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	RSM Optimization With Au Wire Thermosonic Bonding on VLSI Circuits
<b>Student</b>	Mr. Santi Chatruprachewin
<b>Student ID.</b>	41061175
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2001
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Wisut Titiroongruang

### ABSTRACT

At present, microelectronics industry is continuing developed for the most efficiency of integrated circuit, to meet rapidly change of new technology and user's demand, with low-cost production. Integrated circuit industry could be divided into two types i.e. integrated circuit production and integrated circuit molding with packaging. For Thailand, there is only latter production. This thesis studies a technique of Thermosonic bonding optimization process with the packing, taking into consideration of statistical analysis of dependent parameter for optimization of Au Wire diameter. Result of the analysis indicates the relation of diameter of Au Wire with shear force and pull force. with 4 independent parameter(B\_Force, B\_Power, B\_Time, Temperature)the results will be display on contour chart. Since the high quality of Au Wire bonding depends on maximization of shear force and pull force, this study could be applied to use in some BGA, TQFP packaging or packaging with Fine Pitch device, by reducing Au wire in appropriate size and optimization.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากคำแนะนำ และ คำปรึกษาในการดำเนินการวิจัย จาก รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิตรุ่งเรือง ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบคุณ คุณจริยา นามเสนาะ สำหรับคำแนะนำดีๆ ขอขอบคุณบริษัท ALPHATEC SEMICONDUCTOR PACKAGING Ltd. และ บริษัท MICROCHIP TECHNOLOGY(Thailand) Co.,Ltd. ที่สนับสนุนวัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัยและให้ความรู้ในเรื่องเทคนิคต่างๆ ตลอดการวิจัย ขอขอบพระคุณ คุณย่า คุณอาสุตองนงค์ ตูยปลาตะ ที่สนับสนุนในเรื่องทุนการศึกษาและความห่วงใย ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และ น้องๆ ที่ห้องปฏิบัติการ Superconductor สจล. ที่ช่วยประสานงานในเรื่องเอกสารตลอดเวลาที่ทำการศึกษาอยู่ ขอขอบคุณ พี่ๆ กองการผลิต บริษัทวิทยุการบินแห่งประเทศไทย จำกัด ที่มีส่วนในวิทยานิพนธ์นี้

สุดท้ายขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้  
คุณค่าและประโยชน์ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบพระคุณผู้มีพระคุณทุกท่าน

สันติ ชาติรูประชีวิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 เทคโนโลยี Fine Pitch.....	5
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
1.4 สมมุติฐานของการศึกษา.....	6
1.5 ขอบเขตงานวิจัย.....	6
บทที่ 2 เทคโนโลยีการเชื่อมต่อในงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์.....	8
2.1 เชื่อมต่อแบบ Wedge Bonding and Machine Operations.....	8
2.2 การเชื่อมต่อแบบ Thermocompression bonding.....	9
2.3 การเชื่อมต่อแบบ Ultrasonic Wedge Bonding.....	10
2.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ของระบบการเชื่อมต่อแบบ Ultrasonic.....	10
2.4 การเชื่อมต่อแบบ Thermosonic Ball and Wedge Bonding.....	11
2.5 เปรียบเทียบ Bonding Tool ระหว่าง Gold Ball Bonding กับ Wedge Bonding.....	13
2.6 การเชื่อมต่อด้วยวิธี TAB.....	14
2.7 การเชื่อมต่อด้วยวิธี Flip Chip.....	15
2.8 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีการเชื่อมต่อแบบต่างๆ.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 คุณสมบัติและลักษณะของวัสดุตัวนำไฟฟ้า.....	18
3.1 คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุที่ทำหน้าสัมผัสทางไฟฟ้า.....	18
3.2 การนำไฟฟ้าในโลหะ.....	20
3.3 คุณสมบัติทางกลของวัสดุทางวิศวกรรม.....	23
3.3.1 คุณลักษณะความเค้น-ความเครียดของลวดเชื่อม.....	23
3.4 อายุของลวดเชื่อม.....	24
3.5 ผลของขั้ว EFO ต่อลวดทองคำ.....	25
3.6 ลักษณะทั่วไปของลวดทองคำ.....	28
3.7 ความเค้นและความเครียดของวัสดุที่ใช้เชื่อมต่อ.....	29
3.7.1 ความเค้นทางวิศวกรรม(Engineering Stress).....	29
3.7.2 ความเครียดทางวิศวกรรม(Engineering Strain).....	30
3.8 การทดสอบการเชื่อมต่อด้วยวิธีใช้แรงเฉือนที่กระทำกับลูกบอลทองคำ.....	30
3.8.1 การหาค่าแรงเค้นเฉือน.....	31
3.9 การทดสอบการเชื่อมต่อด้วยวิธีการดึง(Bond Pull Test).....	31
3.10 ลักษณะรอยสัมผัสต่างๆ ที่ใช้ในงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์.....	33
3.10.1 รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับโลหะ (Au กับ Al).....	33
3.10.2 รอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำ – โลหะ – โลหะ.....	34
3.11 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของลวดตัวนำ.....	42
บทที่ 4 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของพารามิเตอร์	
4.1 การกำหนดวิธีการทดลองโดยอาศัยหลักการทางสถิติ.....	37
4.1.1 การออกแบบการทดลองที่มี $2^2$ เงื่อนไข.....	37
4.1.2 การออกแบบการทดลองที่มี $2^k$ เงื่อนไข.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2	วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ตอบสนองแบบพื้นผิวด้วยเทคนิคRSM.....	39
4.2.1	การวิเคราะห์พารามิเตอร์อิสระที่มีกลุ่มข้อมูลแบบลิเนียร์.....	40
4.2.2	การวิเคราะห์พารามิเตอร์อิสระที่มีลักษณะกลุ่มข้อมูลแบบนอนลิเนียร์....	42
4.3	ความหมายและความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมต่อแบบ Thermosonic Ball Bonding.....	42
4.4	การออกแบบแผนการทดลองแบบ $3^4$ เงื่อนไขด้วยโปรแกรมทางสถิติ.....	43

## บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์

5.1	อุปกรณ์การทดลอง.....	49
5.2	ลำดับขั้นการทดลอง.....	49
5.3	ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อ.....	56
5.3.1	ผลเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ลูกบอลทองคำกับค่าแรงเค้นเฉือน.....	56
5.3.2	ผลเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ลูกบอลทองคำกับค่าแรงกด.....	57
5.3.3	ผลเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอลทองคำกับค่าเวลา ที่ใช้ในการเชื่อมต่อ.....	59
5.3.4	ผลเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ลูกบอลทองคำกับอุณหภูมิ.....	60
5.4	การวิเคราะห์ผลโดยออปติไมเซชันพารามิเตอร์.....	62
5.4.1	ผลวิเคราะห์ผลแรงเฉือนที่กระทำกับลูกบอลทองคำ ที่ได้จากการออปติไมเซชัน.....	62
5.4.2	ผลวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอลทองคำ ที่ได้จากการออปติไมเซชัน.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.4.3 ผลวิเคราะห์ผลขนาดลูกบอลทองคำด้วยกล้องจุลทรรศน์.....	63
5.4.4 ผลวิเคราะห์ผลแรงดึงที่กระทำกับลวดทองคำ.....	64
5.4.5 ผลวิเคราะห์ความสูงของลวดทองคำ.....	66
5.4.6 ผลวิเคราะห์ความหนาของลูกบอลทองคำ.....	67
5.5 ผลเปรียบเทียบค่าออปติโมเซชันของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อ.....	68
5.6 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วย SEM.....	69
5.6.1 ผลวิเคราะห์ลักษณะลูกบอลทองคำด้วย SEM.....	71
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....	74
เอกสารอ้างอิง.....	75
ภาคผนวก.....	76
ภาคผนวก ก.....	76
ภาคผนวก ข.....	78
ประวัติผู้เขียน.....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีวงจรรวม.....	1
1.2 แสดงจำนวนขาตัวถังชนิด QFP เทียบกับขนาดชิปวงจรรวม.....	7
2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีการเชื่อมแบบ TC .....	16
2.2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีการเชื่อมแบบ TS.....	16
2.3 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีการเชื่อมแบบ US.....	17
3.1 แสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุเชื่อมต่อ.....	19
3.2 ปัญหาและการแก้ปัญหาที่เกิดจากการฟอร์มลวดโดยพิจารณาจากคุณลักษณะลวด.....	29
4.1 เงื่อนไขการทดลองแบบ 2 ตัวแปร 2 ระดับ ( $2^2$ Factorial Experiment).....	37
4.2 เงื่อนไขการทดลองที่มีการออกแบบที่มี 2 ระดับและ k ตัวแปร.....	38
5.1 แสดงเงื่อนไขการทดลองจาก 4 พารามิเตอร์และแบ่งช่วงข้อมูล 3 ระดับ.....	50
5.2 เงื่อนไขการทดลองเพื่อลดขนาดลวดทองคำในตำแหน่ง First Bond.....	53
5.3 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ตามเงื่อนไขการทดลองในตำแหน่ง First Bond.....	54
5.4 แสดงค่าจุดออปติมิ้มต่างๆ บนรูป Contour โดยให้ค่าที่สูงกว่าและต่ำกว่าของจุดอ้างอิง.....	68
5.5 อธิบายนัยสำคัญที่ได้จากตารางที่ 5.4 โดยแสดงเป็นค่า และค่าสูงของจุดออปติมิ้มต่างๆ.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แผนภูมิการแบ่งตัวถังวงจรรวมชนิดต่างๆ.....	2
1.2 เปรียบเทียบลักษณะแตกต่างระหว่างตัวถังกลุ่ม Through hole กับตัวถังกลุ่ม Surface Mount.....	4
1.3 ตำแหน่ง Fine Pitch บนชิปวงจรรวมที่มีขนาดน้อยกว่า 100 $\mu$ m.....	5
2.1 ขั้นตอนการเชื่อมต่อระหว่างลวดทองคำกับพื้นที่อลูมิเนียมด้วยวิธี Wedge Bonding.....	9
2.2 อุปกรณ์ของระบบการเชื่อมต่อแบบอัลตราโซนิค.....	11
2.3 ขั้นตอนการเชื่อมต่อระหว่างลวดทองคำกับพื้นที่อลูมิเนียมด้วยวิธี Gold Ball Bonding.....	12
2.4 เปรียบเทียบตำแหน่งลวดและทิศทางการเคลื่อนที่ของ Bonding Tool.....	13
2.5 การเชื่อมต่อด้วยวิธี Tape Automate Bond.....	14
2.6 การเชื่อมต่อด้วยวิธี Flip Chip.....	15
3.1 แสดงการนำกระแสของอิเล็กตรอนในโลหะ.....	21
3.2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเค้นของลวดกับค่าความยืดหยุ่น.....	23
3.3 แสดงอายุลวดเชื่อมอลูมิเนียมที่มีการแอนนีสและ ไม่มีการแอนนีสที่เวลาต่างกัน.....	25
3.4 แสดงอายุลวดเชื่อมทองคำที่มีการแอนนีสและ ไม่มีการแอนนีสที่เวลาต่างกัน.....	26
3.5 ผลเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของลวดกับค่าความเค้นของลวดที่ไม่มีการแอนนีส.....	27
3.6 ผลเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของลวดกับค่าความเค้นของลวดที่มีการแอนนีส.....	27
3.7 คุณลักษณะทางกายภาพของลวดทองคำในส่วนต่างๆหลังจากการฟอร์มลูกบอล.....	28
3.8 ลักษณะของลูกบอลทองคำและทิศของแรง Shear ที่กระทำ.....	30
3.9 โครงสร้างและทิศทางของตำแหน่งแรงดึงลวดเพื่อทดสอบค่าความยืดหยุ่นของลวด.....	32
3.10 ลักษณะแถบพลังงานระหว่าง Au กับ Al ที่ลักษณะเป็น Ohmic Contact.....	33
3.11 แสดงลักษณะโครงสร้างของรอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำ – โลหะ – โลหะ.....	34
4.1 ภาพสามมิติของการวิเคราะห์แบบ RSM โดยแกน z เป็นสิ่งที่ต้องการทราบค่า.....	41
จากการออปติไม้มและแกน x และแกน y เป็นระนาบตัวแปรอิสระ	
4.2 รูปแสดง Contour ของการวิเคราะห์ด้วยวิธี RSM .....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ตำแหน่งของจุดวิเคราะห์โดยมีช่วงบริเวณเป็นตัวกำหนดข้อมูลหรือตำแหน่งอปติมิ้ม.....	42
4.4 แสดงภาพรวมการกำหนดเงื่อนไขการออกแบบการทดลอง.....	44
4.5 แสดงการกำหนดพารามิเตอร์อิสระเพื่อสร้างตารางการทดลอง.....	44
4.6 แสดงการกำหนดจำนวนพารามิเตอร์ตามที่ทำการวิเคราะห์.....	45
4.7 แสดงตารางเงื่อนไขการทดลองของพารามิเตอร์อิสระ.....	45
4.8..แสดงตารางข้อมูลของพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองจริงเพื่อนำมาวิเคราะห์.....	46
4.9 แสดงการกำหนดวิธีวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Response Surface Methodology.....	46
4.10 แสดงรูปการกำหนดผลการวิเคราะห์ข้อมูลตัวแปรตามเทียบกับพารามิเตอร์อิสระ.....	47
4.11 โพลชาร์ตการใช้งานของโปรแกรมวิเคราะห์ด้วยวิธี RSM.....	48
5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลกับผลเอาที่พหุการทดลอง.....	55
5.2 ตำแหน่งของชิ้นงานสตริปและตำแหน่งของหลอดทองคำบนชิ้นงาน.....	55
5.3 กราฟแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลอดทองคำกับค่าพลังงานการสั่น.....	56
5.4 กราฟแสดงค่าแรงเค้นเทียบกับขนาดพลังงานการสั่น.....	57
5.5 แสดงโครงสร้างแรงยึดทางเคมีของอูมิเนียมกับหลอดทองคำ.....	57
5.6 กราฟแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอลทองคำกับค่าแรงกด.....	58
5.7 กราฟแสดงค่าแรงเค้นเทียบกับค่าแรงกดที่กระทำกับลูกบอลทองคำ.....	58
5.8 กราฟแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอลทองคำกับค่าเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อ.....	59
5.9 กราฟแสดงค่าแรงเค้นเทียบกับค่าเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อ.....	60
5.10 การส่งผ่านความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมต่อไปสู่จรรยา.....	60
5.11 กราฟแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอลทองคำกับผลของอุณหภูมิ.....	61
5.12 กราฟแสดงค่าแรงเค้นเทียบกับผลของอุณหภูมิ.....	61
5.13 ผลการอปติมิ้มเซชันค่าแรงเค้นเทียบกับลูกบอลทองคำ.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.14 ผลการออปติไมเซชันเส้นผ่านศูนย์กลางลวดทองคำที่ขนาดพื้นที่อุณหภูมิ 110 $\mu\text{m}$ .....	63
5.15 แสดงภาพถ่ายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยกล้องจุลทรรศน์โดยรูป a เพิ่ม B_Power มากกว่าค่าออปติมัม (b) เพิ่ม B_Force มากกว่าค่าออปติมัม.....	63
5.16(a) แสดงภาพถ่ายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากการออปติมัม และ (b) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น.....	63
5.17 รูปแสดง การทดสอบความเครียดของลวดทองคำด้วยวิธีการดึง.....	65
5.18 ผลการออปติไมเซชันแรงดึงลวดทองคำที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดทองคำ 3.1mil.....	65
5.19 ผลการออปติไมเซชันความสูงลวดทองคำที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดทองคำ 3.1 mil และแรงเค้นเฉือนที่ 54.67 gf.....	66
5.20 แสดงลักษณะความหนาและตำแหน่งสัมผัสของลวดทองคำ.....	67
5.21 ลักษณะพื้นผิวใต้ลวดทองคำที่เกิดการขีดตีดระหว่างผิวสัมผัสทั้งสองไม่สมบูรณ์.....	67
5.22 ผลการออปติไมเซชันความหนาลวดทองคำที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดทองคำ 3.1 mil และแรงเค้นเฉือนที่ 54.67gf.....	68
5.23 แผนภาพการทำงานของ scanning electron microscope (SEM).....	70
5.24 ถ่าย X-RAY และ SEM เปรียบเทียบลักษณะตัวอย่างของลวดที่ไม่มีการลัมทับของลวดในตัวอย่าง A และ B กับการเชื่อมต่อที่มีการลัมทับของทองคำในตัวอย่าง C และ D.....	71
5.25 ภาพถ่าย SEM (a) ทำการตรวจสอบลักษณะตำแหน่งของจุดเชื่อมการลัมของลวดทองคำ (b) ภาพถ่าย SEM ตรวจสอบลักษณะความหนาของลวดทองคำ.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งนี้ออก และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# รายการคำย่อและสัญลักษณ์

Al	อลูมิเนียม
Au	ทองคำ
Ag	เงิน
A	พื้นที่หน้าตัดเส้นลวด
L	ความยาวเส้นลวด
P	กำลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนเส้นลวด
R	ความต้านทานเส้นลวด
E	สนามไฟฟ้า
J	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
$\rho$	สภาพความต้านทาน
$\sigma$	สภาพความนำ
$\mu$	สภาพความคล่องตัวของพาหะ
$\phi$	เส้นผ่านศูนย์กลางลวดทองคำ
$\phi_m$	Work Function
( $\sigma$ )	ความเค้นทางวิศวกรรม
(E)	ความเครียดทางวิศวกรรม
RSM	Response Surface Methodology
SMT	Surface Mount Technology
TC	Thermosonic Compression
TS	Thermosonic Ball Bonding
US	Ultrasonic Bonding
gf	Grams-force
SEM	Scanning Electron Microscopy
EFO	Electronic Frame off Spark
HV	Hight Voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ พัฒนาอย่างรวดเร็วไม่ว่าจะเป็นทางด้านความเร็วในการประมวลผลหรือหน่วยความจำที่มีความจุที่สูงขึ้นเป็นลำดับ จากสิ่งที่กล่าวมาเป็นการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากอดีตจนถึงปัจจุบัน เริ่มตั้งแต่มีทรานซิสเตอร์ตัวแรกซึ่งเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ทำงานในลักษณะตัวเดียวและมีอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟประกอบกันอยู่ในวงจร และการนำทรานซิสเตอร์ไปเป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ จากนั้นต่อมาวงจรต่างๆ ที่ประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ก็ถูกพัฒนาไปสู่ยุคของวงจรรวมดังตารางที่ 1.1

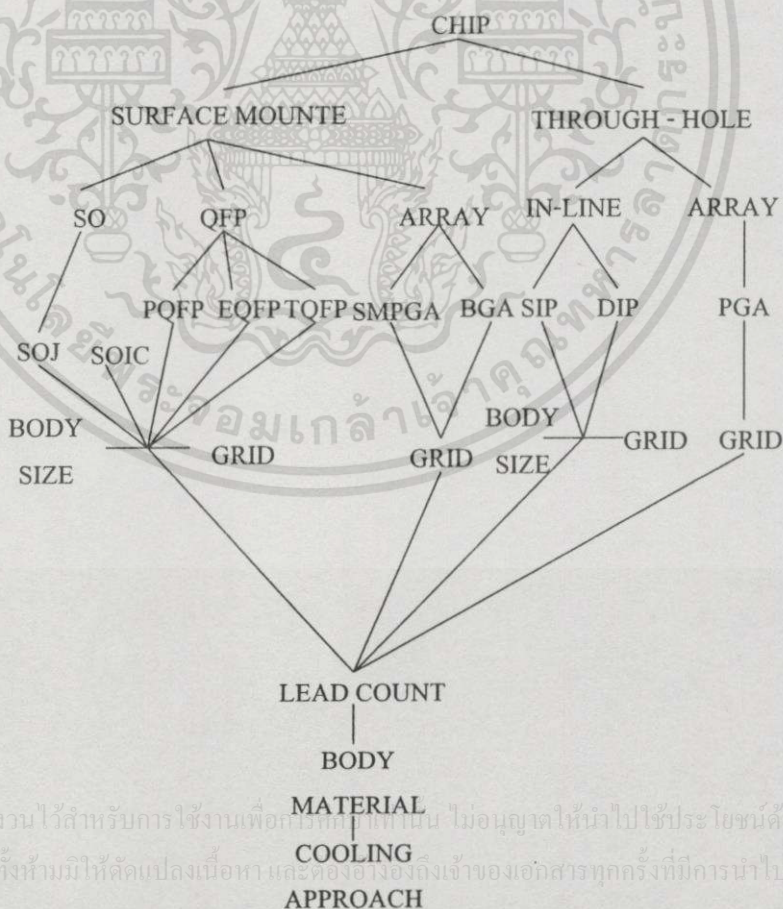
ตารางที่ 1.1 ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีวงจรรวม [1]

Characteristic	1975	1985	1995	2000
Semiconductor Process	TTL	CMOS	CMOS	BiCMOS
Relative Density	1	10	100	1000
Chip Area(cm <sup>2</sup> )	0.25	1	2	4
Pin/Chip	64	200	600	1000
Chip Power(W)	2	10	50	100
Power Density(W/cm <sup>2</sup> )	8	10	25	25
System Clock(MHz)	5	25	400	1000

เทคโนโลยีของวงจรรวมเริ่มตั้งแต่ยุคของ TTL ในปี ค.ศ.1975 โดยวงจรรวมในชิปจะประกอบไปด้วยเทคโนโลยีการสร้างแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ทั้งหมดและถูกบรรจุอยู่ในตัวถังประเภท TO39 หรือ DIP ซึ่งมีจำนวนขาต่อใช้งานเพียงไม่กี่ขาเท่านั้น แต่วงจรรวมประเภท TTL ก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า และพื้นที่ในการสร้างที่มีขนาดใหญ่จึงได้มีการพัฒนาและเปลี่ยนไปเป็นเทคโนโลยีของซีมอส จนกระทั่งถึงปัจจุบันเปลี่ยนเป็นเทคโนโลยีประเภทซีมอส ยังคงเป็นเทคโนโลยีหลัก ถ้าย้อนกลับไปพิจารณาถึง ความหนาแน่นของวงจรรวมได้มีการปรับปรุงให้วงจรรวมมีจำนวนความหนาแน่นของจำนวนตัวมอสให้มากขึ้น จากตารางที่ 1.1 ค่า

Relative Density เป็นตัวบ่งบอกการเพิ่มขึ้นของจำนวนอุปกรณ์ โดยคิดจากการนำตัวมอสมาคู่รวมเป็นวงจรใช้งานและสร้างขึ้นในชิปเดียวโดย เพิ่มขึ้นประมาณ 25 % ต่อปีในขณะที่พื้นที่ของชิปเพิ่มขึ้นประมาณ 12 % ต่อปีซึ่งเป็นผลจากการพัฒนาเครื่องจักร และความสามารถของกระบวนการสร้าง นั่นคือในส่วนของเทคโนโลยีทางด้าน Fabrication ในขณะที่ Micropackaging Engineer มีส่วนสำคัญในการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการแพคเกจจิ้ง ในการเพิ่มขึ้นของจำนวนขาที่ต่อใช้งานของชิปโดยจะเป็นการเพิ่มขึ้นประมาณ 12 % ต่อปีซึ่งจะสอดคล้องกับปริมาณการเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของชิป การกระจายกำลังงานไฟฟ้าและการออกแบบควบคุมความร้อนที่เพิ่มขึ้นบนตัวถังเป็นปัญหาหลักที่ตามมาโดยเห็นได้จากการเพิ่มขึ้น เป็นนัยสำคัญของกำลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียตั้งแต่ปี ค.ศ.1975 จนถึงปี ค.ศ.1995 หลังจากปี ค.ศ.1995 กำลังงานไฟฟ้าต่อชิปเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยหรือกล่าวได้ว่าไม่เพิ่มขึ้นเลย เนื่องมาจากมีพัฒนาการออกแบบวงจรรวมที่ใช้กำลังงานไฟฟ้าต่ำซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 30% ต่อปี

1.1.1 วิวัฒนาการของไมโครอิเล็กทรอนิกส์แพคเกจจิ้ง



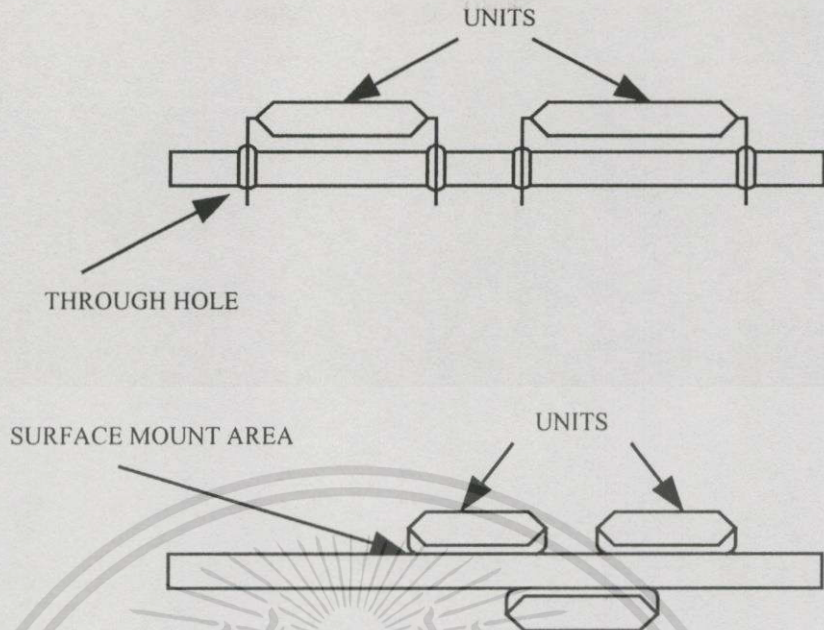
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 1.1 แผนภูมิการแบ่งตัวถังวงจรรวมชนิดต่างๆ

วิวัฒนาการของตัวถังเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ตามความสามารถของวงจรรวมที่พัฒนาขึ้นนับตั้งแต่ได้มีการสร้างวงจรรวมขึ้นตัวถังชนิด DIP Package ได้รับความนิยมน้อยลงแพร่หลายเนื่องจากมีราคาต้นทุนต่ำ รองรับวงจรรวมที่มีการทำงานไม่ซับซ้อนมากนักอาจมีเพียง 6-18 ขาสำหรับขนาด 300 mil ขณะที่จำนวนขาที่มากขึ้น จะอยู่ที่ 600 mil แต่มีข้อจำกัดที่จำนวนขาเพียง 40 ขา จำนวนขาที่ไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้ในตัวถังประเภทนี้มาจากขนาดของตัววงจรรวมจะต้องใหญ่ขึ้น กล่าวคือตัวถังที่ห่อหุ้มชิปที่อยู่ภายในจะต้องใช้พื้นที่มากขึ้น ในขณะที่ตัวชิปวงจรรวมไม่เพิ่มพื้นที่แต่อย่างใด แต่ข้อดีสามารถถอดประกอบรวมกับอุปกรณ์ชนิดอื่นบน PCB ได้ง่าย จากรูปที่ 1.1 เป็นแผนผังชนิดตัวถังวงจรรวมแบบต่างๆ โดยแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ คือ

1. แบบ Through Hole
2. แบบ Surface Mount (SMT)

ตัวถังในกลุ่ม Through Hole ตามแผนภูมิในรูปที่ 1.1 เป็นลำดับการเกิดของตัวถังยุคแรก โดยแบ่งย่อยออกเป็น 2 ประเภทคือ 1. ประเภท Inline 2. ประเภท Array ในกลุ่มประเภทแรกสามารถแบ่งย่อยๆ ตามการบรรจุของตัวถังได้อีก 2 ชนิด กล่าวคือสามารถทำการบรรจุลงในตัวถังชนิดพลาสติกและตัวถังชนิด Hermetic ที่มีใช้อยู่ในวงจรรวมประเภทหน่วยความจำซึ่งในปัจจุบันอาจกล่าวได้ว่าไม่มีการผลิตตัวถังชนิดดังกล่าวแล้ว ตัวถังในกลุ่ม Inline นี้ PDIP เป็นที่นิยมในท้องตลาด แต่ในปัจจุบันโดยกลุ่มตัวถังประเภท Inline ส่วนใหญ่สามารถรองรับเทคโนโลยีได้ระดับหนึ่งแต่เนื่องจากตัวถังดังกล่าวเมื่อนำไปประกอบลง PCB แล้วทำให้เสียพื้นที่ของแผ่น PCB ด้านที่ทำการบัดกรีและด้านที่ทำการบรรจุอุปกรณ์ลงไปเป็นข้อเสียของกลุ่มตัวถังประเภท Inline ได้มีการพัฒนาเพื่อลดข้อจำกัดทางด้านพื้นที่ของตัวถังประเภท Inline โดยทำการเปลี่ยนตัวถังเป็นประเภทอาร์เรย์ ตัวถังกลุ่มนี้มีจำนวนขาที่ต่อใช้งานมากกว่าประเภท Inline กล่าวคือเมื่อนำไปใช้กับวงจรรวมที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้แต่ข้อเสียยังจำกัดอยู่ที่การบัดกรีบนแผ่น PCB ที่ต้องทำในลักษณะ Through อยู่ ตัวถังในกลุ่ม Surface Mount (SMT) ถูกนำมาใช้บรรจุตัวถังวงจรรวมอย่างแพร่หลายในปัจจุบันซึ่งมีข้อดีหลายประการ เช่น สามารถทำการบัดกรีเพียงด้านเดียวบนแผ่น PCB ได้ขนาดของตัวถังมีขนาดเล็กและบางกว่า ประเภท Inline มีจำนวนขาต่อใช้งานมากกว่าประเภท Inline 4-5 เท่ามีความหลากหลายในการเลือกนำไปใช้งาน โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่คือ SO, QPF, ARRAY ทั้งสามกลุ่มจะมีจำนวนขาใช้งานไม่เท่ากันดังเช่นกลุ่ม SO จะมีลักษณะคล้ายกับตัวถังประเภท PDIP ต่างกันที่ลักษณะของขาที่กางออกเพื่อสัมผัสกับจุดบัดกรีบนวงจรรวมกล่าวคือตัวถังกลุ่ม Surface mount เป็นตัวถังที่สร้างขึ้นมาเพื่อแก้ไขข้อจำกัดในเรื่องพื้นที่ของ ตัวถังกลุ่ม Through hole ที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากวงจรรวมในปัจจุบันมีจำนวนขาใช้งานมากกว่า 100 ขา จากรูปที่ 1.2 เป็นการเปรียบเทียบลักษณะตำแหน่งของตัวถังทั้งสองกลุ่ม



รูปที่ 1.2 เปรียบเทียบลักษณะแตกต่างระหว่างตัวถังกลุ่ม Through hole กับตัวถังกลุ่ม Surface Mount [1]

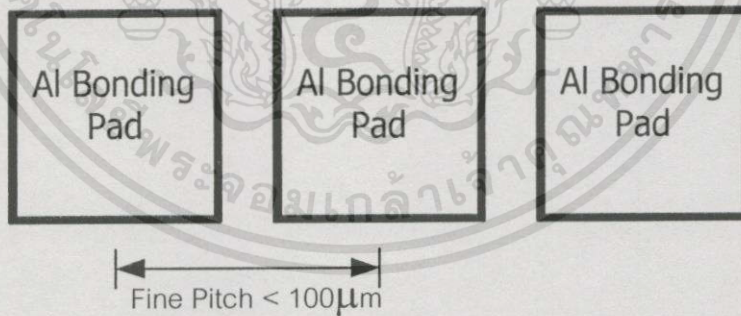
### 1.1.2 ปัญหาการเชื่อมต่อที่มีผลต่อแพคเกจจิ้งของไมโครอิเล็กทรอนิกส์

จากปริมาณพื้นที่ของชิปที่ใหญ่ขึ้นทำให้วงจรที่ประกอบ อยู่ภายในมีหน้าที่การท่ามากขึ้น ด้วยกล่าวคือความสามารถในการทำงานด้านต่างๆสูงขึ้น เช่น ฟังก์ชันการทำงานที่ซับซ้อน มีความจุหน่วยความจำเพิ่มขึ้น สิ่งต่างๆ เหล่านี้เป็นผลทำให้จำนวนขาใช้งานเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านแพคเกจจิ้งมีส่วนสำคัญช่วยสนับสนุนให้ อุตสาหกรรมทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ทั้งระบบพัฒนาอย่างต่อเนื่อง แต่ปัญหาของกระบวนการแพคเกจจิ้งมีด้วยกันหลายส่วนหรือหลายกระบวนการ เรียกโดยรวมว่า Package Assembly ประกอบด้วยขั้นตอนของการ Wafer Saw หรือการนำแผ่น wafer เข้าสู่กระบวนการตัด หลังจากแผ่นเวเฟอร์ผ่านกระบวนการตัด จะได้ออกมาเป็นชิปที่พร้อมจะนำไปใช้งานชิปดังกล่าวจะผ่านสู่กระบวนการ Die Attach เพื่อนำชิปที่ถูกตัดออกมาเป็นชิ้นเล็กๆ หรือที่เรียกว่า Die ไปประกอบติดกับแผ่น Lead Frame ด้วยอิพอกซี หลังจากนั้นนำไปอบด้วยความร้อนเพื่อให้อิพอกซีแห้ง ต่อจากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการ Bonding หรือการเชื่อมต่อลวดทองคำหรือลวดคอปเปอร์นิยเมียมจากตัวชิปเข้ากับ Lead Frame เพื่อเชื่อมต่อขาออกไปใช้งานภายนอก เมื่อผ่านกระบวนการ Wire Bonding แล้วจะเข้าสู่กระบวนการสุดท้ายของการแอสเซมบลี(Assembly)คือการ Mold ด้วยวัสดุโพลีเมอร์ที่เป็นชนิดเทอร์โมเซตติง จากกระบวนการทั้งหมด จากขั้นตอนกระบวนการแอสเซมบลีที่กล่าวมาในขั้นตอน Wire bonding จะมีผลโดยตรงกับการเพิ่มจำนวนขาต่อใช้งาน เนื่องจากพื้นที่เชื่อมต่อบนวงจรรวมที่เรียกว่า Bonding Pad มีพื้นที่เล็กลงรวมถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทองคำที่ใช้เชื่อมต่อลดลงด้วยในขณะที่ พื้นที่ของวงจรรวม

รวมทั้งหมดมีขนาดเท่าเดิมดังนั้นความจำเป็นในการปรับปรุงเทคนิคและ วิธีการต่างๆจำเป็นที่จะต้องมีการพัฒนาขึ้นเพื่อสามารถใช้เครื่องจักรที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในกระบวนการผลิต

## 1.2 เทคโนโลยี Fine pitch (FPT)

Fine pitch [2] คือ พัฒนาการของแพคเกจจิ้งวงจรรวม ซึ่งเป็นการแบ่งแยกขนาดช่องว่างระหว่างขาของ วงจรรวมที่มีช่องว่างอยู่ที่ 0.65 mm(0.026 inches) หรือพิจารณาจาก Bonding Pad ทั้งสองโดยทำการวัดจากจุดกึ่งกลางของ Bonding pad ที่หนึ่งถึง จุดกึ่งกลางของ Bonding pad ที่สองที่ระยะห่างน้อยกว่า 100  $\mu\text{m}$  ลงมา ดังรูปที่ 1.3 โดย Fine Pitch จะเป็นตัวกำหนดเทคโนโลยีทางด้านแพคเกจจิ้งที่สำคัญตัวหนึ่งเนื่องจากขนาดของ Fine Pitch แคลงมีผลทำให้ Bonding Pad มีพื้นที่น้อยตามมา โดยทั้งหมดนี้จะเป็นการเพิ่มจำนวนขาใช้งานของวงจรรวมออกไปตามความซับซ้อนของวงจรรวมนั้น Fine Pitch เป็นเทคโนโลยีที่ตามมาพร้อมๆกับการพัฒนาด้านการบรรจุขั้ววงจรรวมโดยส่วนมากจะนำไปใช้กับตัวถังตระกูล SMT เนื่องจากมีขาใช้งานมากกว่าตัวถังตระกูล Through Hole และสนับสนุนวงจรรวมประเภทฟิล์มบางที่มีขนาดใหญ่โดยยังสามารถใช้การเชื่อมต่อด้วยวิธี เทอร์โมโซนิก Ball Bonding ในปัจจุบันขั้ววงจรรวมที่เป็นหน่วยประมวลผลขนาดใหญ่เช่น ไมโครโพรเซสเซอร์ หรือหน่วยความจำขนาดใหญ่ที่มีเทคโนโลยีของซีมอสระดับซับไมครอน ระยะจุดเชื่อมต่อจะเป็น Fine Pitch ด้วยกันทั้งสิ้น ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าเทคโนโลยี Fine Pitch จำเป็นจะต้องสอดคล้องกับการพัฒนาทางด้าน Fabrication ด้วย



รูปที่ 1.3 ตำแหน่ง Fine Pitch บนขั้ววงจรรวมที่มีขนาดน้อยกว่า 100 $\mu\text{m}$

## 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้มีแนวคิดหลักสามประการ 1. เพื่อลดต้นทุนในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมการบรรจุวงจรรวมลงบนตัวถังชนิดพลาสติกแบบต่างๆ โดยใช้วิธีการเชื่อมต่อแบบเทอร์โมโซนิกซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในอุตสาหกรรม ทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์

2. รองรับเทคโนโลยีของวงจรรวมที่มีแนวโน้มที่จะลดขนาดพื้นลง ในปัจจุบันโดยที่ยังสามารถใช้เครื่องจักรประเภทเดิมหรือเปลี่ยนอุปกรณ์บางส่วนเพื่อเป็นการใช้ประโยชน์เครื่องจักรอย่างสูงสุดในขณะที่ความเชื่อมั่นในคุณภาพผลิตภัณฑ์ไม่เปลี่ยนแปลง 3. ผลที่ได้จากงานวิจัยสามารถนำไปเป็นข้อมูลเพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ปรับปรุงและพัฒนากระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

#### 1.4 สมมุติฐานของการศึกษา

โดยทั่วไปได้ทราบแล้วว่าการเชื่อมด้วยวิธี เทอร์โมโซนิค Ball Bonding เป็นการรวมข้อดีของการเชื่อมต้อแบบอื่นๆ เข้าด้วยกันจึงทำให้เกิดพารามิเตอร์ที่ต้องทำการพิจารณาจำนวนหลายตัว เช่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดทองคำในกระบวนการเชื่อมต่อ เพื่อให้เหมาะสมกับขนาดพื้นที่ต่อมิตีเนียมที่มีแนวโน้มลดขนาดระยะ Fine Pitch อยู่ที่ระหว่าง 85-110  $\mu\text{m}$  หรือน้อยกว่า 85  $\mu\text{m}$  โดยเฉพาะอย่างยิ่งการควบคุมปริมาณความร้อนที่เส้นลวดตัวนำซึ่งสามารถควบคุมได้จากปริมาณความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ด้วยเทคนิค Response Surface Methodology เพื่อทำการกำหนดค่าออปติไมเซชันของพารามิเตอร์ต่างๆ

#### 1.5 ขอบเขตงานวิจัย

รูปแบบของตัวถังที่มีการพัฒนาไป มีผลกระทบต่อการเชื่อมต่อภายในตัวถังวงจรรวม ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการหาจุดที่เหมาะสมของพารามิเตอร์อิสระ ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมด้วยวิธี เทอร์โมโซนิค Bonding หรือ Ball Bonding ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์แอสเซมบลี โดยอาศัยเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ RSM โดยวิธีดังกล่าวสามารถทำให้ทราบถึงค่าพารามิเตอร์ที่แท้จริงและคาดการณ์ถึงความน่าจะเป็นเมื่อเปลี่ยนวัสดุที่เป็นลวดทองคำ ให้มีขนาดเล็กลงตามพื้นที่ของจุดเชื่อมต้อบนวงจรรวม จากการประยุกต์นำเทคนิค RSM มาใช้สามารถลดรอบเวลาการผลิตของกระบวนการเชื่อมต่อลงรวมถึงทำให้คุณภาพของการเชื่อมต้อสูงโดยศึกษาได้จากค่าแรงเค้นเฉือนและแรงดึงเส้นลวดที่มีค่าสูง จากนั้นทำการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทองคำจาก 1.0 mil เป็น 0.8 mil เพื่อศึกษาผลของแรงเค้นเฉือนและแรงดึงเส้นลวด ผลจากปรับลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลงทำให้ต้นทุนการผลิตในส่วนการแอสเซมบลีลดลง รวมถึงรองรับวงจรรวมที่มีขาการใช้งานที่มีจำนวนมากขึ้นได้ โดยวิธีการเชื่อมต้อแบบ เทอร์โมโซนิค Bonding เป็นวิธีที่ใช้กับตัวถังชนิดพลาสติกโดยเฉพาะชนิด QFP ที่เป็นไมโครชิปไดโอดอีกทั้งยังมีให้ดูแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้เทคโนโลยีของ Fine Pitch ด้วย

ตารางที่ 1.2 ตารางแสดงจำนวนขาดัวถึงชนิด QFP เทียบกับขนาดชิปวงจรรวม [2]

Lead Pitch in mm.	MAXIMUM LEAD COUNT								
Body Size in mm.	1	0.08	0.65	0.5	0.4	0.3	0.25	0.2	0.15
10x10mm	20	32	40	72	88	120	144	180	236
12x12mm	36	48	56	88	108	144	176	224	296
14x14mm	52	64	80	108	128	176	208	264	344
20x20mm	76	96	120	152	192	256	304	384	504
24x24mm	108	136	168	184	232	304	368	464	616
28x28mm	156	192	216	240	272	360	432	544	720
32x32mm	-	-	-	248	312	416	496	624	824
36x36mm	-	-	-	280	352	464	560	704	936
40x40xmm	-	-	-	312	392	520	624	784	1040
44x44mm	-	-	-	344	432	576	688	864	1144
48x48mm	-	-	-	376	472	624	752	944	1256

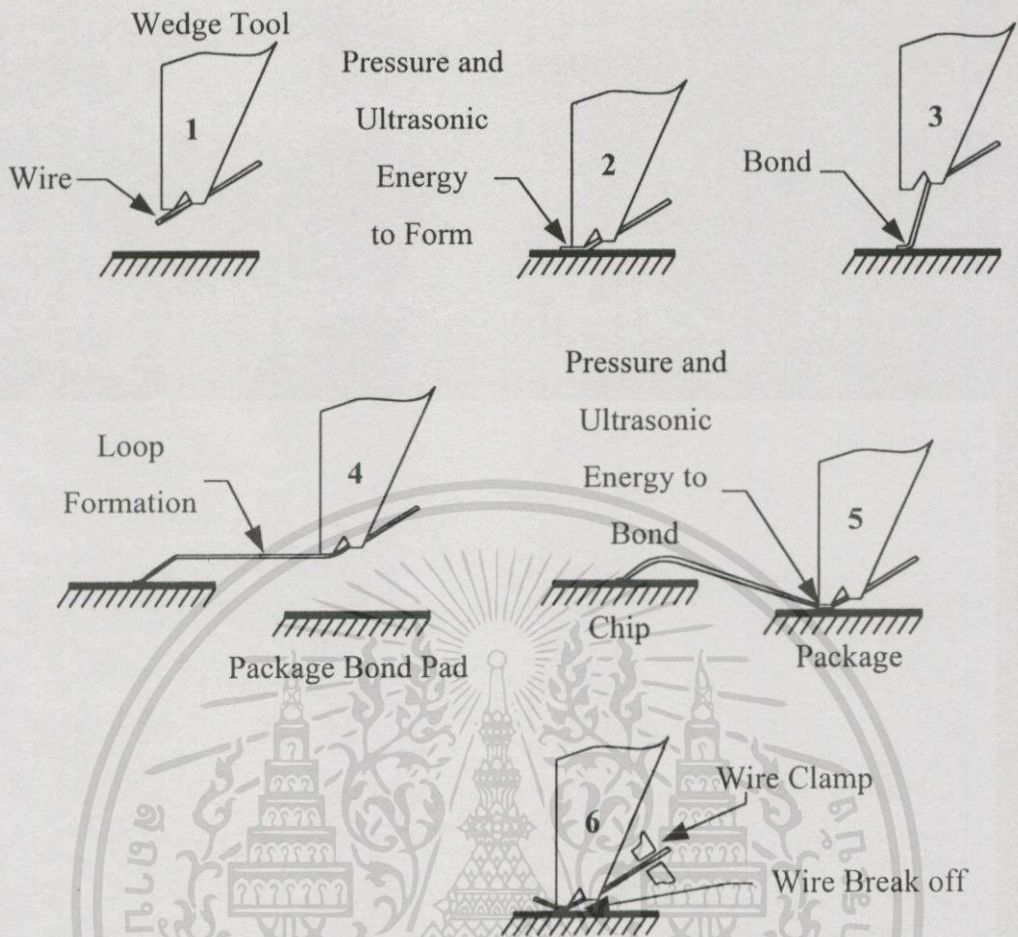
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เทคโนโลยีการเชื่อมต่อในงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์

ในปัจจุบันการเชื่อมต่อวงจรรวมที่ประดิษฐ์ขึ้นจากสารกึ่งตัวนำหรือที่เรียกว่า “ชิป” มากกว่า 95 % ใช้วิธีการเชื่อมแบบ Ultrasonic (US) ยกเว้นสิ่งประดิษฐ์บางชนิดที่ไม่ได้ใช้วิธีการเชื่อมแบบ US แต่ใช้วิธีการเชื่อมแบบอื่นเช่น Solder Bumps, Microballs, Flip Chip และ TAB Bonded โดยปกติการเชื่อมต่อด้วยวิธี US ระหว่างลวดอลูมิเนียมกับส่วนที่เป็นอลูมิเนียมบนชิป นั้นส่วนที่เป็นลวดจะมีส่วนผสมของซิลิกอนประมาณ 1 % โดย เส้นผ่านศูนย์กลาง อยู่ที่ 25-50  $\mu\text{m}$  และส่วนที่เป็นพื้นที่อลูมิเนียมหรือ Bonding Pad จะมีส่วนประกอบของ Si 1%, Cu 1-2%, เป็นต้น โดยที่ ขนาดของ เส้นผ่านศูนย์กลาง ที่มีขนาดใหญ่ (0.75mm) จะถูกนำไปใช้กับสิ่งประดิษฐ์ประเภทกำลัง ซึ่งจะมีกระแสไหลผ่านตัวเองสูง ในงานเชื่อมต่อทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่จะใช้วิธี เทอร์โมโซนิค Ball Bonding โดยมี US Transducer เป็นหัวใจของวิธีการเชื่อมต่อทุกชนิดโดยจะกล่าวแยกถึงเทคโนโลยีของ Wire Bonding และเปรียบเทียบแต่ละเทคโนโลยีต่อไป

### 2.1 การเชื่อมต่อแบบ Wedge Bonding และ Machine Operations

การเชื่อมต่อแบบ Wedge Bonding [3] และ ส่วนประกอบที่ใช้ในการเชื่อมต่อแสดงในรูปที่ 2.1 ตามลำดับ การเชื่อมต่อแบบ Wedge จะมีส่วนคล้ายกับการเชื่อมต่อแบบ Thermosonic Ball Bonding [3] โดยจะกล่าวในลำดับต่อไป การเชื่อมต่อแบบ Wedge มีข้อเสียในเรื่องความเร็วของการเชื่อมต่อเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเชื่อมต่อแบบ Ball Bond ในระบบอัตโนมัติและการฟอร์มลวดให้เป็นเส้นตรงระหว่างตำแหน่งเชื่อมต่อที่หนึ่งบนตัวชิปกับตำแหน่งเชื่อมต่อที่สองบน Lead Frame เป็นเงื่อนไขหลักการกำหนดเส้นทางเชื่อมที่ไม่ตรงระหว่างสองตำแหน่งที่กล่าวไป อาจจะทำให้เกิดปัญหาการหักที่ลวดที่ตำแหน่งเชื่อมบนตัวชิปได้ หลังจากที่ระบบการเชื่อมแบบ Ball Bonding ใช้กันอย่างแพร่หลายการเชื่อมต่อแบบ Wedge ถูกลดบทบาทลงเนื่องจากเหตุผลอีกประการหนึ่งคือ ในระบบการเชื่อมแบบ Ball Bonding สามารถนำลวดบรรจุลงใน Capillary ได้เพื่อเป็นการบังคับให้ลวดมีขนาดที่พอเหมาะสำหรับ พื้นที่อลูมิเนียม สามารถอธิบายขั้นตอนการเชื่อมแบบ Wedge โดยสรุปคือ ขั้นตอนที่ 1 เป็นการเตรียมลวดให้อยู่ในตำแหน่งจุดสัมผัสบน Capillary ขั้นตอนที่ 2 Wedge Tool ทำการลดระดับด้าลงมาและกดลวดลงบน Bonding Pad ขั้นตอนที่ 3 Wedge Tool ทำการยกตัวขึ้นเพื่อดึงลวด ขั้นตอนที่ 4 เป็นการฟอร์มลวดเพื่อทำการเชื่อมต่อตำแหน่งที่สองบน Lead Frame ขั้นตอนที่ 5 ทำการลด Wedge Tool ลงมาทำการเชื่อมต่อในตำแหน่งที่สองบน Lead Frame ขั้นตอนที่ 6 Wedge Tool ทำการตัดลวดให้ขาดโดยใช้แรงกดจาก Wedge Tool



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเชื่อมต่อระหว่างลวดทองคำกับพื้นที่อุณหภูมิมุมด้วยวิธี Wedge Bonding

## 2.2 การเชื่อมต่อแบบ Thermocompression bonding

Thermocompression (TC) Wedge และ Ball Bonding [3] สำหรับงานเชื่อมต่อทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้พัฒนาขึ้นโดย Bell-Laboratories ในปี 1957 วิธีการนี้ได้นำมาใช้จนกระทั่งมีวิธี US Wedge Bonding เข้ามาแทนที่ในช่วงกลางทศวรรษ 1960 ถึงแม้ว่า Au-Au TC Weld สามารถจะทำนอกระบบสุญญากาศและ ที่อุณหภูมิห้องได้แต่มีข้อจำกัดในเรื่องแรงที่ใช้กระทำจะต้องมีค่าที่สูงและอุณหภูมิที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างวัสดุทั้งสองจะมีค่าสูงด้วย โดยทั้งหมดอยู่ในสภาพแวดล้อมการผลิตที่ปกติ วิธีการ TC Bonding เป็นการเชื่อมต่อประเภทหนึ่งของ Solid-Phase Welding ซึ่งได้มีการรวมความร้อนกับแรงที่กระทำเข้าด้วยกันเพื่อใช้เปลี่ยนรูปในกระบวนการเชื่อมของวัสดุให้สามารถยึดติดกันได้ การหลีกเลี่ยงสิ่งปนเปื้อน(ได้แก่ฝุ่นที่ลอยอยู่ในอากาศ, ออกไซด์, เป็นต้น) ซึ่งเป็นผลมาจากการสัมผัส ระหว่างพื้นผิวทั้งสองโดยปกติพื้นผิวที่เป็นส่วนเชื่อมต่อบนชิปหรือที่เรียกว่า Bonding Window จะผ่านกระบวนการทำความสะอาดก่อนการเชื่อมต่อทุกครั้ง ที่จุดนี้ได้เกิดแรงยึดระหว่างอะตอมโดยใช้เวลาในช่วงสั้นๆ ซึ่งเป็นผลจากการเชื่อมวัสดุทั้งสองโดยมีความร้อนเป็นตัวกระทำ ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรในกระบวนการเชื่อมขั้นพื้นฐาน ได้แก่ เวลา,

อุณหภูมิและการเปลี่ยนรูปของวัสดุ เพื่อความสัมพันธ์ของตัวแปร และพลังงานที่ใช้กระตุ้น โดยพลังงานที่ใช้กระตุ้นหรือพลังงานที่จะได้มาจากแรงที่ใช้กระทำและอุณหภูมิ ซึ่งในงานเชื่อมต่อทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์ โดยส่วนใหญ่จะใช้อุณหภูมิประมาณ  $300^{\circ}\text{C}$  โดยปกติอุณหภูมิที่ใส่จะได้รับการผ่านความร้อนจากฮีตเตอร์ส่งผ่านขึ้นมานบนชิป ซึ่งการใช้ความร้อนมีความหลากหลายบางครั้ง ความร้อนที่ใช้จากเครื่องมือเพียงอย่างเดียว ( $>400^{\circ}\text{C}$ ) หรือบางครั้งรวมกับ Work Holder โดยที่เทคโนโลยี Ball-Bonding เป็นการใส่เส้นลวดผ่านเข้าไปใน Capillary ซึ่งเครื่องมือสามารถเคลื่อนที่ไปได้ทุกทิศทางหลังจากนั้นทำการเชื่อมต่อลักษณะการเชื่อมต่อที่เกิดขึ้นเป็นการเชื่อมต่อแบบอัดโน้มติผลจากการเชื่อมต่อแบบอัดโน้มติโดยใช้เครื่องจักรจะมีความเร็วกว่าการเชื่อมแบบ Wedge Bonding ประมาณ 2-3 เท่า มีการศึกษาอย่างจริงจังของกระบวนการเชื่อมต่อแบบ TC ที่ Bell Laboratories และ Western Electric อย่างไรก็ตามผลของการเชื่อมต่อแบบ TC ที่สำคัญๆ ได้มีการศึกษาโดยหน่วยงานอื่นๆ อีก Thermocompression Bonding จะมีความไวต่อการปนเปื้อนของพื้นผิวมากกว่าวิธีการเชื่อมแบบอื่นๆ ประกอบกับการที่ต้องใช้อุณหภูมิสำหรับการอินเตอร์เฟสระหว่างวัสดุทั้งสองสูง วิธีการนี้จึงไม่ได้นำมาใช้ในอุตสาหกรรมทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน และถูกแทนที่ด้วย Thermosonic Bonding

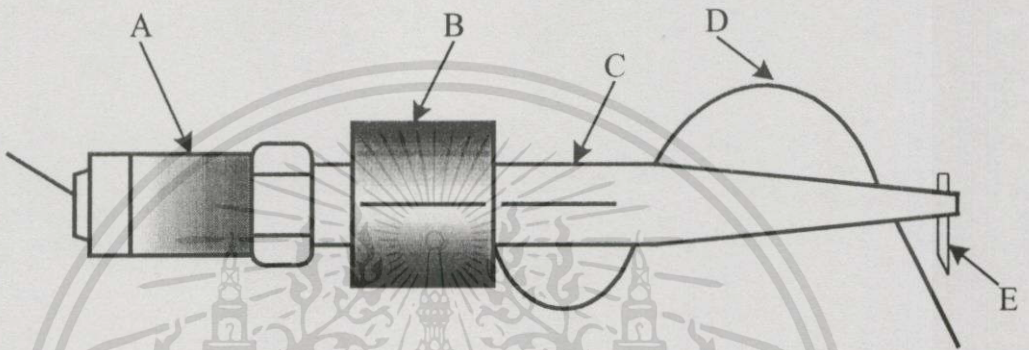
### 2.3 การเชื่อมต่อแบบ Ultrasonic Wedge Bonding

Ultrasonic (US) Wedge Bonding [3] ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์เมื่อประมาณปี ค.ศ. 1960 และครอบคลุมตลาดทางด้านแอสเซมบลีในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ จนกระทั่ง Gold Ball Bonding หรือ Gold Ball Thermosonic autobonders ถูกนำมาเข้าใช้ แทนที่ Ultrasonic (US) Wedge Bonding เป็นกระบวนการเชื่อมต่อที่ทำในอุณหภูมิห้อง(ถ้าให้ความร้อนจะกลายเป็นวิธีการ Thermosonic) เริ่มแรกวิธีการนี้ได้ถูกนำมาเชื่อมต่อลวดอลูมิเนียมกับ Au Pad Metallization แม้ว่าวิธีการนี้สามารถที่จะทำการเชื่อมต่อลวดทองคำได้แต่คุณภาพที่ได้จะไม่ดีเท่าที่ควรกล่าวคือจะเกิดเป็นร่องหรือรอยที่มีลักษณะหยาบบน Pad Metallization ตามทิศทางของการสั่นหัวเข็ม แต่ข้อดีของวิธีการนี้คือสามารถเชื่อมต่อลวดที่มีขนาดใหญ่เหมาะสำหรับพวก อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทกำลัง

#### 2.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ของระบบการเชื่อมต่อแบบอัลตราโซนิก

US ทรานควิวเซอร์ และเครื่องมือที่ใช้ในการเชื่อมจะเป็นโครงสร้างที่สร้างความสั่นสะเทือนผ่านส่วนต่างๆ ของเครื่องเชื่อมส่งไปยัง Capillary เพื่อทำให้วัสดุติดกัน ซึ่งความถี่ที่เลือกใช้จะต้องเป็นความถี่ที่เหมาะสมกันระหว่างส่วนประกอบทั้งสองกับขนาดโครงสร้างในการเชื่อม ถ้าความถี่สูงมากส่วนประกอบก็จะเล็กในขณะที่องค์ประกอบอื่นคงที่ ระบบที่ใช้ในปัจจุบันส่วนใหญ่ใช้ความถี่ที่ 60KHz ตัวอย่างรูปของทรานควิวเซอร์ที่ใช้ในการเชื่อมทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์

รวมไปถึง Capillary แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยทำการแบ่งส่วนประกอบออกเป็นสี่ส่วนหลักๆดังรูปที่ 2.2 คือ (A) ส่วนอุปกรณ์ทรานควิวเซอร์ (B) ตัวยึดจับอยู่ตลอดจากส่วนที่เป็นทรานควิวเซอร์ (C) เป็นส่วนของ Horn ทำหน้าที่ขยายคลื่นอัลตราโซนิค (D) รูปขนาดคลื่นอัลตราโซนิค (E) เป็นส่วนของ Capillary ถูกยึดติดกับ Horn ในลักษณะตั้งฉาก ดังนั้น Capillary จะถูกทำให้สั่นตามความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิค พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้ระบบได้จาก Power Supply ที่มีความเสถียรภาพสูงโดยถูกทำให้คงที่โดย วงจร Phase Lock Loop เพื่อรักษาความถี่ที่ได้จากการเรโซแนนท์ให้คงที่ในขณะที่ทำการใช้งาน



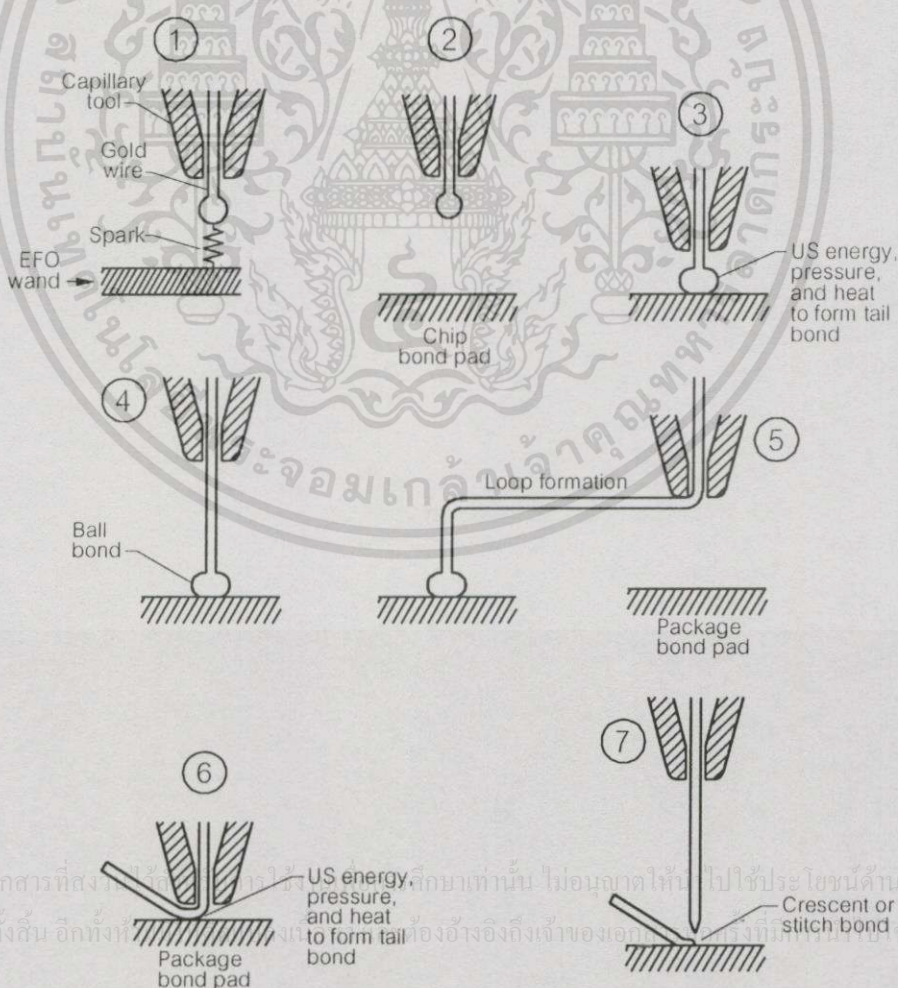
รูปที่ 2.2 อุปกรณ์ของระบบการเชื่อมต่อแบบอัลตราโซนิค [3]

การเชื่อมต่อแบบ US ทำขึ้นโดยการใช้พลังงาน US ซึ่งมาจาก อุปกรณ์ทรานควิวเซอร์และสัมพันธ์กับตัวเคลป์ในตำแหน่ง (B) ระบบ Wedge-Bonding จำเป็นจะต้องจัดแนวตรงระหว่าง จุดสัมผัสที่หนึ่งกับจุดสัมผัสที่สองก่อนที่จะทำการเริ่มเชื่อมต่อจุดสัมผัสที่หนึ่ง ซึ่งเป็นข้อด้อยของการเชื่อมต่อแบบ อัลตราโซนิค และจะทำให้เกิดความล่าช้าในกระบวนการเชื่อมต่อต่ำกว่า 50% เมื่อเทียบกับการเชื่อมต่อแบบ Thermosonic Ball Bonding การเชื่อมต่อลวดอลูมิเนียมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ จะถูกเชื่อมโดยวิธี Cold US Welding ที่มีความถี่อัลตราโซนิค 60 KHz ซึ่งก่อนหน้านี้มีการใช้ความถี่อัลตราโซนิคที่ 25 KHz โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดอลูมิเนียมที่มีขนาดใหญ่ ตั้งแต่ 75 – 100  $\mu\text{m}$  จนถึงมากกว่า 0.5 mm (3 – 30 mils) เส้นลวดมักทำด้วย Al 99.99% หรือ Al Mg 0.5% วิธีการเชื่อมแบบ US ได้ ถูกพัฒนาการโดย Orthodyne ทำให้จำกัดเส้นลวดให้อยู่ใน Parallel V-groove ในขณะที่ทำการเชื่อมต่อทำให้ช่วงคอของลวดอลูมิเนียมมีแรงยึดที่สูง และสามารถทดสอบได้ด้วยวิธี ดึงลวดและวิธีทดสอบด้วยแรงเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**2.4 การเชื่อมต่อแบบ Thermosonic Ball และ Wedge Bonding**  
 ในวารสารเอกสารฉบับ ออกทงห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี 1970 Coucoulas เป็นคนแรกที่ใช้วิธี Thermosonic Ball Bonding [3] หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งคือ Gold Ball Bonding โดยรวมกับการใช้ พลังงาน US กับความร้อนเข้าด้วยกัน ด้วยเหตุนี้

เขาจึงเป็นบิดาของการเชื่อมแบบ Thermosonic Ball Bonding ซึ่งเขาเรียกวิธีนี้ว่า Hot Work US Bonding ในปัจจุบันการเชื่อมต่อบนวงจรรวมส่วนใหญ่จะใช้วิธี Au Thermosonics (TS) Ball Bonding หรือมีบางส่วนที่ใช้ Au Wedge-Wedge Bonding วิธีการเชื่อมแบบ (TS) เป็นวิธีการเชื่อมต่อที่รวมเอาข้อดีของ US และ Thermocompression เข้าด้วยกัน TC Welding มักจะใช้อุณหภูมิสูงกว่า 300°C โดยอุณหภูมิที่สูงนั้นจะทำลายในส่วนของ Die Attach, วัสดุที่เป็นพลาสติกในการแพ็คเกจจิ้ง อย่างไรก็ตามการเชื่อมแบบ Thermosonic ball Bonding จะใช้อุณหภูมิที่ต่ำลงโดยจะอยู่ระหว่าง 125°C - 220 °C และการรวมกันระหว่าง US กับ TS เป็นการแก้ปัญหาและลดจุดบกพร่องของแต่ละวิธี กล่าวคือช่วงเริ่มต้นของการเชื่อมต่อแบบ Thermosonic ball Bonding จะเป็นการทำงานในส่วนที่เป็น US จะทำการขจัดหรือปิดสิ่งปนเปื้อนออกจาก พื้นผิวอลูมิเนียมและแรงกดกับ อุณหภูมิที่กระทำกับวัสดุทั้งสองทำให้ได้คุณภาพเชื่อมต่อที่สูง ข้อดีของการเชื่อมระบบนี้คือเส้นลวดจะมีขนาดเล็กและบรรจุอยู่ใน Capillary ได้เพื่อทำการก่อตัวให้เป็นลูกบอลแล้วทำการกดลงบน Bonding Pad รูปที่ 2.3 ประกอบ ในกระบวนการเชื่อมต่อแบบ Thermosonic ball Bonding สามารถพิจารณาจากรูปที่ 2.3 สามารถอธิบายได้ 7 ขั้นตอนดังนี้



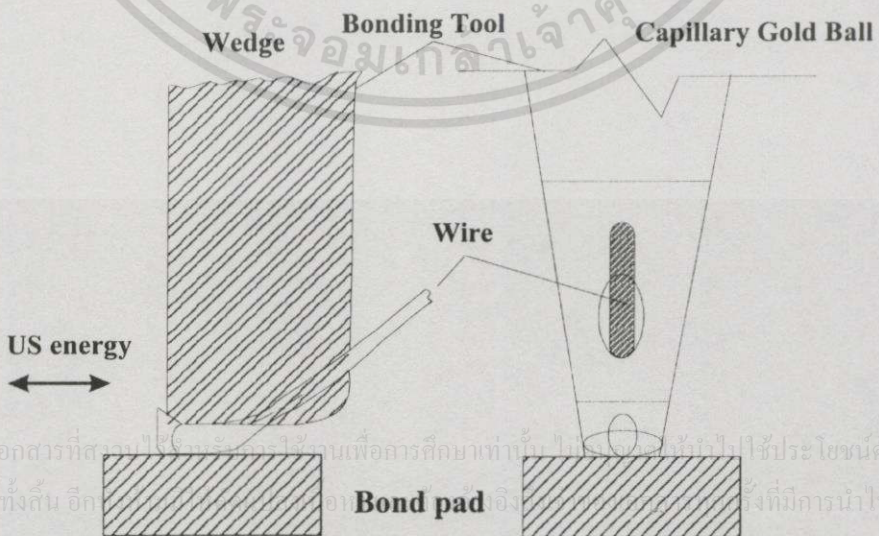
รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการเชื่อมต่อระหว่างลวดทองคำกับพื้นที่อลูมิเนียมด้วยวิธี Gold Ball Bonding

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้เฉพาะภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ที่ผลิตและเผยแพร่

พิจารณาจากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่า ในขั้นตอนที่ 1 ปลายของลวดทองคำจะถูกอาร์คด้วยแรงดันไฟฟ้าที่มีปริมาณสูงซึ่งเป็นโพลจะทำให้เกิดการหลอมที่ปลายของลวดทองคำมีลักษณะทรงกลมเรียกว่าลูกบอลทองคำ(Gold ball) เป็นการเตรียมเพื่อที่จะทำการเชื่อมต่อ ในขั้นตอนที่ 2 หัวจับหรือหลอดที่บรรจุลวดทองคำ (Capillary) จะทำการเลื่อนมายังตำแหน่งพื้นที่ลูมินัมบนวงจรรวมที่ได้เตรียมไว้โดยอัตโนมัติ ขั้นตอนที่ 3 (First Bonding) หลอดบรรจุลวดทองคำจะทำการกดลูกบอลทองคำลงบนพื้นที่ลูมินัมในขั้นตอนนี้จะเกิดการกระทำ 3 อย่างบนพื้นที่ลูมินัมในขณะที่ทำการเชื่อมต่อได้แก่ 1. แรงที่หลอดบรรจุลวดทองคำกระทำการกดลง (Bond Force) 2. แรงที่หลอดบรรจุทำการสั่น (Ultrasonic Force) และ 3. เวลาที่กำหนดให้หลอดบรรจุลวดทองคำใช้ในการสั่นลูกบอลทองคำ และอุณหภูมิที่ให้กับแผ่นวงจรรวมเพื่อใช้ในการเชื่อมต่อขั้นตอนที่ 4 หลอดที่บรรจุลวดทองคำทำการยกขึ้นและดึงลวดทองคำออกไปยึดติดกับเฟรมทองแดงในขั้นตอนที่ 5 ส่วนในขั้นตอนที่ 6 จะทำคล้ายกับขั้นตอนที่ 3 หรือเรียกว่า Second Bonding ซึ่งต่างกับขั้นตอนที่ 3 ตรงที่ไม่มีการฟอร์มลูกบอลทองคำขึ้นมาโดยการยึดติดระหว่างลวดทองคำกับ Lead Frame ในขั้นตอนนี้จะเป็นลักษณะ Wedge และลวดทองคำจะถูกตัดออกในขั้นตอนที่ 7 หลังจากนั้นเครื่องเชื่อมลวดทองคำจะดำเนินการใหม่จากขั้นตอนที่ 1-7 ในจุดอื่น ๆ ต่อไปบนชิปวงจรรวมจนครบทุกตำแหน่งซึ่งเป็นการทำงานแบบอัตโนมัติทั้งหมด

จากขั้นตอนการเชื่อมต่อที่กล่าวมาแล้วมีตัวแปรที่สำคัญทั้งหมด 4 ตัว ที่เป็นตัวบอกลักษณะคุณภาพของการเชื่อมต่อโดยที่คุณภาพการเชื่อมต่อจะเกิดจากแรงยึดระหว่างผิวหน้าของพื้นที่ลูกบอลทองคำกับพื้นที่ลูมินัมซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

## 2.5 เปรียบเทียบ Bonding Tool ระหว่าง Gold Ball Bonding กับ Wedge Bonding

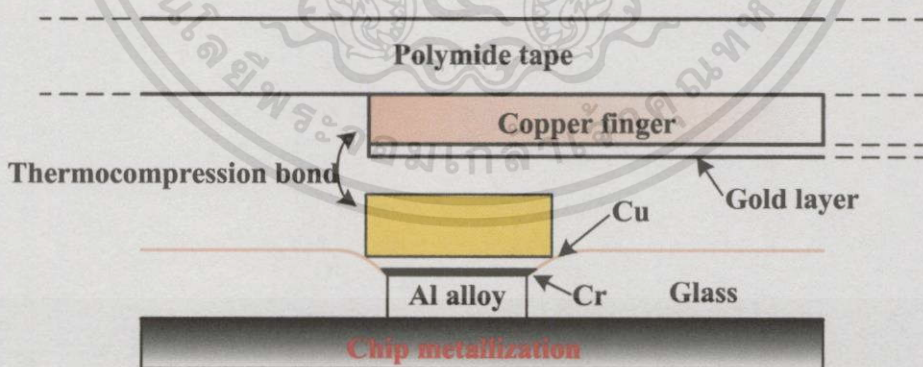


รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบตำแหน่งลวดและทิศทางการเคลื่อนที่ของ Bonding Tool

รูปที่ 2.5 เป็นการขยายส่วนของ Capillary ในการเชื่อมต่อด้วยวิธี Thermosonic ball Bonding และ Wedge Tool ในการเชื่อมต่อด้วยวิธี Wedge Bonding ในตำแหน่งที่ 1 เป็นทิศทางของลวดหรือตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ Capillary จะเห็นว่าการควบคุมจุดเชื่อมต่อในวิธีการเชื่อมต่อแบบ Wedge จะอยู่ในลักษณะลาดชันกว่าวิธี Ball Bonding และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวิธีการเชื่อมต่อแบบ Wedge จะมีขนาดใหญ่กว่าจึงไม่เป็นวิธีที่นิยมในปัจจุบัน เนื่องจากไม่สามารถสนับสนุนวงจรรวมประเภทที่มีระยะเชื่อมต่อแบบ Fine Pitch ได้

## 2.6 การเชื่อมต่อด้วยวิธี TAB

ในขณะที่ความเร็วของชิปเพิ่มขึ้น และ Bonding Pitch ลดลงการเหนี่ยวนำระหว่าง ขานำ สัญญาณและการเกิด Cross Talk ในการเชื่อมต่อจะเป็นตัวจำกัดการใช้ รวมถึงความต้องการ ความหนาแน่นของวงจร บนชิปซิลิกอนที่สูงขึ้นกระบวนการเชื่อมต่อด้วยวิธีเดิมหรือการเชื่อมต่อที่ ต้องทำการฟอร์มลวดขึ้นมาเพื่อทำการเชื่อมต่อมาทดแทนการเชื่อมแบบวิธีเดิม วิธีการเชื่อมต่อแบบ ใหม่โดยอาศัยการเผาที่ลวดเพื่อทำการเชื่อมต่อ ได้ถูกพัฒนาขึ้น ไม่สามารถรองรับ ได้ในขณะที่กำลัง งานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนความหนาแน่นของวงจรที่อยู่บนชิปและแรงดันไฟฟ้าลดลงรวม ถึง ระยะ Fine Pitch ด้วยโดยการคาดการณ์ในปี ค.ศ. 2000 จะมีวงจรรวมที่มีประสิทธิภาพสูงๆ จะใช้ กระแสไฟฟ้าถึง 10A ซึ่งต้องใช้ขนาดลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25  $\mu\text{m}$  มากกว่า 100 เส้นในการ เชื่อมต่อเพื่อรองรับกำลังงานไฟฟ้าที่มากขึ้น ดังนั้นทางเลือกใหม่ในการเชื่อมต่อจะถูกนำมาใช้มากขึ้นในอนาคต รูปที่ 2.5 เป็นการเชื่อมต่อแบบเมทาวิธีหนึ่งเรียกว่า TAB



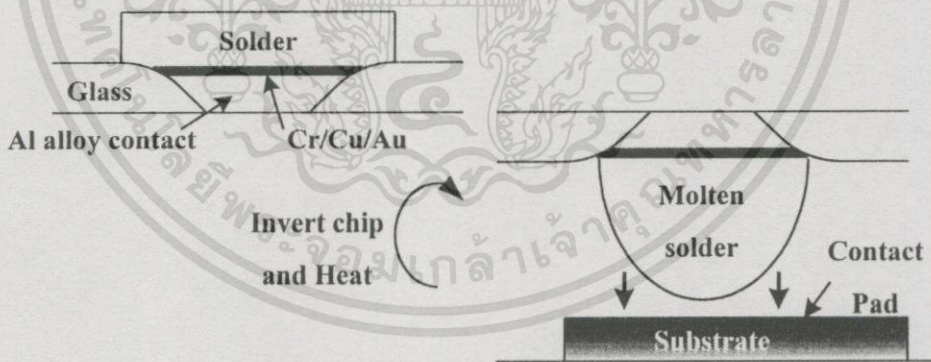
รูปที่ 2.5 การเชื่อมต่อด้วยวิธี TAB(Tape Automate Bond)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงนามไว้สำหรับการใช้งานเอกสารที่มอบหมายนั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ประกอบไปด้วย Cu Beams รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าถูกยึดไว้ด้วยเทปโพลีเมอร์ที่มีขนาดบางส่วนใหญ่จะ ไม่วางกรณใดๆทั้งนั้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกกรณีการนำไปใช้ Polynride ซึ่งจะมีความยาว 35mm โดยบีมจะเชื่อมอยู่กับ Au Bumps วางอยู่เหนือผิว Bond Pad บน ชิป วิธีการเชื่อมต่อด้วยวิธี TAB [4] ไม่เหมาะสมกับการเชื่อมต่อแบบ Area Array เหมือนวิธี Flip

Chip ข้อแตกต่างอีกอย่างหนึ่งก็คือ Lead ของ TAB จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมพื้นผ้าจะมีความต้านทานความถี่สูงต่ำกว่าเส้นลวดกลม กล่าวโดยรวมวิธีการเชื่อมต่อแบบ TAB มีราคาแพงและไม่มีความยืดหยุ่นและจะต้องเปลี่ยนตัว Tape ใหม่ทุกครั้งเมื่อเกิดมีการแก้ไขในกระบวนการเชื่อมต่อ และจะเกิดความคุ้มทุนจะต้องนำมาใช้กับการเชื่อมต่อที่มีปริมาณมากๆ และใช้ในวงจรรวมที่มีราคาแพง เช่น High Performance Microprocessor และ Flat Panel Display และมีแนวโน้มจะไม่นำมาใช้กับวงจรรวมที่มีตัวถังแบบพื้นฐาน เทคโนโลยีการเชื่อมต่อแบบ TAB อาจกล่าวได้ว่าอยู่ตรงกลางระหว่าง Wire Bonding กับ Flip Chip

## 2.7 การเชื่อมต่อด้วยวิธี Flip Chip

การเชื่อมต่อด้วยวิธี Flip Chip [1] หรือเรียกว่า C4 (Controlled Collaps Chip Connection-FC) เป็นทางเลือกใหม่ในการเชื่อมต่อในงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ถูกคิดโดยบริษัท IBM โดยเทคโนโลยีนี้เกิดขึ้นเมื่อกลางศตวรรษที่ 1960 FC มีค่าการเหนี่ยวนำระหว่างขาใช้งานที่อยู่ใกล้กันต่ำที่สุด ( $\sim 0.05 - 0.1$  nH ในขณะที่วิธีการอื่น  $\sim 1$  nH/mm) สำหรับเส้นลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $25 \mu\text{m}$  นอกจากนี้ยังมี Cross talk และ Switching Noise ที่ต่ำ FC เทคโนโลยีจะถูกนำไปใช้ในวงจรรวมที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งมันสามารถเรียงชิดติดกันด้วยขนาด  $125 \mu\text{m}$



รูปที่ 2.6 การเชื่อมต่อด้วยวิธี Flip Chip

บนฐานล่องเซรามิกในตัวถังแบบเซรามิก Flip Chip จากรูปที่ 2.6 จำเป็นต้องมีช่องว่างระหว่าง Substrate อย่างน้อย  $0.5$  mm และปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่านไปยังพื้นผิวของชิปด้านบนและถูกส่งผ่านไปบน Package และด้านล่างจะถูกส่งผ่านทางชุดเชื่อมต่อหรือ Solder Bumps อย่างไรก็ตาม ความร้อนที่สูงมากจะเคลื่อนออกจากด้านหลังของ Die เป็นเหตุให้ต้องใช้ Heat Conducting Roads ที่มีราคาแพงแต่มีวิธีทางเลือกอื่นคือใช้ Heat Sink ติดกับ Silicone Grease หรือ

Polymer ได้มีการทดลองใช้ FC บนฐานลองที่เป็นลามิเนทกับโพลีเมอร์ การใช้โพลีเมอร์เป็นฐานลองจะช่วยลดค่าลดต้นทุน แต่มีข้อจำกัดในด้านการถ่ายเทความร้อนออกจากตัวชิป

## 2.8 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีการเชื่อมต่อแบบต่างๆ

เนื่องจากการเชื่อมต่อแต่ละวิธี มีการพัฒนาให้ใช้กับการเชื่อมต่อที่มีลักษณะเฉพาะดังนั้นการเลือกใช้งานให้เหมาะสมและเกิดปัญหาในการนำมาใช้งานน้อยที่สุดโดยพิจารณาวิธีการเชื่อมต่อแต่ละวิธีได้จากตารางที่ 2.1 ถึง ตารางที่ 2.3 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีการเชื่อมแบบ TC

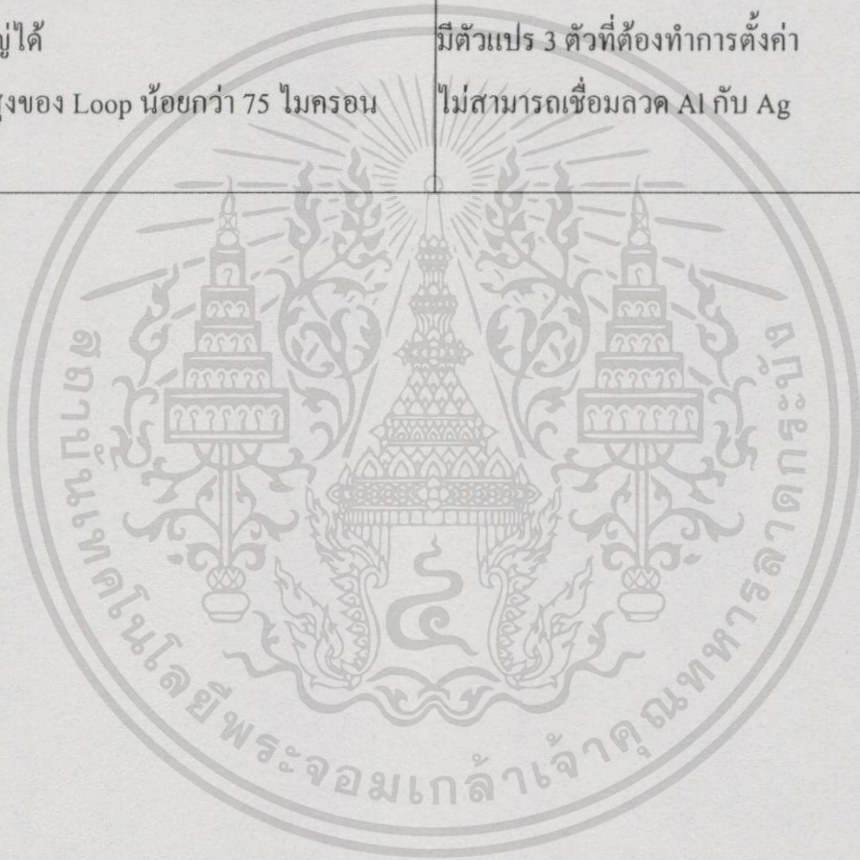
การเชื่อมต่อด้วยวิธี Thermocompression (TC)	
ข้อดี	ข้อเสีย
สามารถเชื่อมต่อระหว่าง Au-Au ได้ดี มีตัวแปร 2 ตัวในตั้งค่า สามารถเชื่อมได้ทุกทิศทุกทาง เชื่อมต่อแบบอัตโนมัติจะเร็วกว่าแบบการเชื่อมแบบ Wedge ไม่มี Cratering เมื่อเทียบกับวิธี TS และ US	ต้องใช้อุณหภูมิในการเชื่อมต่อสูง(>300°C) เกิดการปนเปื้อนได้ง่าย Bond Pad มีขนาดใหญ่ เกิดการรบกวนจากกระบวนการเชื่อมต่อได้ง่าย ความน่าเชื่อถือในการผลิตต่ำกว่าการเชื่อมต่อด้วยวิธี US หรือ TS

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีการเชื่อมแบบ TS

การเชื่อมต่อด้วยวิธี Termosonic Ball Bonding (TS)	
ข้อดี	ข้อเสีย
ใช้อุณหภูมิในการเชื่อมต่อต่ำ ใช้พลังงาน US น้อยกว่าวิธีการเชื่อมต่อแบบ US เพียงอย่างเดียว สามารถเชื่อมได้ทุกทิศทุกทาง เมื่อทำการเชื่อมต่อแบบอัตโนมัติจะมี ความเร็วกว่าวิธีอื่น สามารถเชื่อมต่อระหว่าง Au - Au ได้ Cratering น้อยกว่าวิธีอื่นๆ	มีการปนเปื้อนมากกว่าUS และ น้อยกว่าTC มีตัวแปร 4 ตัวที่ต้องทำการตั้งค่า Bond Pad มีขนาดใหญ่ เกิดการรบกวนจากกระบวนการเชื่อมต่อได้ง่าย

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีการเชื่อมแบบ US

การเชื่อมต่อด้วยวิธี Ultrasonic Wedge (US)	
ข้อดี	ข้อเสีย
มีการปนเปื้อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น	การเชื่อมต่อบนอะตอมจะช้ากว่าแบบอื่น 50%
สามารถทำการเชื่อมต่ได้ในอุณหภูมิห้อง	ไม่สามารถเชื่อมต่ได้ทุกทิศทุกทาง
สามารถทำการเชื่อมต่อระหว่าง Al กับ Al ได้	ต้องใช้เครื่องมือพิเศษในการเชื่อมต่อระหว่าง
สามารถเชื่อมต่อเส้นลวดที่มีขนาดเส้นผ่าน	Au - Au
ศูนย์กลางใหญ่ได้	มีตัวแปร 3 ตัวที่ต้องทำการตั้งค่า
มีความสูงของ Loop น้อยกว่า 75 ไมครอน	ไม่สามารถเชื่อมลวด Al กับ Ag



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# คุณสมบัติและลักษณะของวัสดุตัวนำไฟฟ้า

การเชื่อมต่อระหว่างลวดทองคำกับพื้นทีอลูมิเนียมบนวงจรรวมด้วยวิธี Thermosonic Ball Bonding นั้นเป็นการอาศัยความร้อนและ พลังงานอุลตราโซนิครวมถึงแรงกด ช่วงเวลาที่ใช้ในการทำให้วัสดุทั้งสองติดกัน โดยการติดกันหรือเชื่อมต่อกันของวัสดุทั้งสองจะต้องมีคุณสมบัติเป็น Ohmic Contact ดังนั้นการนำวัสดุมาใช้ในการเชื่อมต่อทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์ จะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบหลายประการ โดยเฉพาะในส่วนของ การส่งผ่านการทำงานออกไปสู่วงจรรายนอก เช่น I/O ในวงจรรวมประเภทซีมอสที่เป็นการทำงานทางด้านดิจิทัล จะมีการสูญเสียกำลังงานไฟฟ้าในช่วงที่ซีมอสเปลี่ยนสภาวะการทำงานจากลอจิก “0” เป็นลอจิก “1” หรือลอจิก “1” เป็นลอจิก “0” หรือในสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่เป็นประเภทกำลังจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวสิ่งประดิษฐ์นั้นมีค่าสูงเป็นต้น การเลือกประเภทของวัสดุจะต้องดูความเหมาะสมต่อการใช้งาน

### 3.1 คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุที่ทำหน้าสัมผัสทางไฟฟ้า

- มีค่าความนำไฟฟ้าสูง ( $\delta = 1/\rho$ )
- มีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของความต้านทานต่ำเพื่อให้หน้าสัมผัสมีความต้านทานคงที่
- มีค่านำสภาพความร้อนสูงเพื่อให้สามารถระบายความร้อนจากผิวหน้าสัมผัสได้เร็วลดสภาพการเกิดการรวมตัวกับออกซิเจน
- มีจุดหลอมเหลวสูงเพื่อป้องกันหน้าสัมผัสยึดติดกันเกิดการสูญเสียผิวหน้าและหน้าสัมผัสเกิดเป็นหลุม
- มีจุดเดือดสูงเพื่อป้องกันการระเหยของผิวหน้าเป็นจุดๆซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียวัสดุขณะเกิดการอาร์ค
- มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง เพื่อป้องกันไม่ให้หน้าสัมผัสมีความต้านทานสูงขึ้น
- คุณสมบัติการเชื่อมตัวกันยากไม่ติดกัน
- มีความแข็งและความเหนียวสูงเพื่อป้องกันการสึกหรอ และการแตกร้าวเมื่อใช้งานที่ความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุเชื่อมต่อ

Properties	Units	Au	Pd	Pt	Ag	Al	Cu
Melting point	$^{\circ}\text{C}$	1063	1552	1770	961	658	1083
Density	$\text{g/cm}^3$	19.32	12.02	21.45	10.5	2.7	8.92
Lattice Constant at $20^{\circ}\text{C}$	Angstrom	4.0786	3.9807	3.9231	4.0774	4.049	3.6153
Specific Heat at $25^{\circ}\text{C}$	$\text{Cal/g.}^{\circ}\text{C}$	0.0308	0.584	0.03136	0.056	0.215	0.092
Lattice Structure		FCC	FCC	FCC	FCC	FCC	FCC
Heat Conductivity	$\text{Cal/cm.sec.}^{\circ}\text{C}$	0.744	0.18	0.174	1	0.53	0.941
Coeff of Linear Expansion (0-100 $^{\circ}\text{C}$ )	$10^{-6} \text{ m/m.}^{\circ}\text{C}$	14.16	11.1	9.1	19.17	23.6	16.5
Specific Electrical Resistivity	$\text{Ohm.mm}^2/\text{m}$	0.022	0.11	0.107	0.016	0.027	0.017
Electrical Conductivity at $20^{\circ}\text{C}$	% IACS*	78	16	18	108	64	101
Hardness	$\text{N/mm}^2$	220	400	400	260	2 0 0 - 500	400- 1100
Modulus of Elasticity	$\text{N/mm}^2$	79000	123600	173200	82500	70500	123000
Tensile Strength	$\text{N/mm}^2$	135	180	130	138	1 0 0 - 200	2 1 0 - 370

## 3.2 การนำไฟฟ้าในโลหะ

### 3.2.1 กระแสไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า

พิจารณาการนำไฟฟ้าของตัวนำ เช่น โลหะ โดยจะกล่าวถึงสมการกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อตัวนำได้รับสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่และทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระสมการสภาพนำ (Conductivity:  $\sigma$ ) ,สภาพต้านทาน(Resistivity:  $\rho$ ) สมการความต้านทาน(Resistance:  $R$ ) และความนำ (Conductivity:  $G$ ) เป็นต้น

จากกฎของโอห์ม ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจะแปรโดยตรงกับสนามไฟฟ้าที่ตัวนำได้รับ และเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$J = \sigma E \quad (3.1)$$

โดย  $J$  คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

$\sigma$  คือ สภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) ของตัวนำ เป็นค่าคงที่ของตัวนำแต่ละชนิดมีหน่วยเป็น โหมห์ต่อเซนติเมตรหรือ  $1 / \text{โอห์ม.เซนติเมตร}$

$E$  คือ สนามไฟฟ้าที่ให้แก่ตัวนำมีหน่วยเป็น โวลต์ต่อเซนติเมตร

เมื่อพิจารณาแท่ง โลหะแท่งหนึ่งซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด  $A$  มีความยาวเป็น  $L$  มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเป็น  $n$  และถูกให้สนามไฟฟ้า  $E_x$  ในทิศทาง  $x$  ดังแสดงในรูปที่ 3.1 จะพบว่าเนื่องจากสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดมีแรงกระทำต่ออิเล็กตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าลบ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่แบบดริฟท์ (Drift) ด้วยความเร็ว ( $V_x$ ) ค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า “ความเร็วดริฟท์” (Drift Velocity) โดยมีทิศทางตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้าคือทิศลบ  $x$  การเคลื่อนที่ของประจุอิเล็กตรอนทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในทิศตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน หรือก็คือมีกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียวกันกับ ทิศของสนามไฟฟ้า ดังนั้นสมการความหนาแน่นกระแสคือ

$$J = \frac{Q}{tA} \quad (3.2)$$

โดย  $Q$  คือ ประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่มีหน่วยเป็นคูลอมบ์

โดย  $t$  คือ เวลาที่ประจุใช้ในการเคลื่อนที่มีหน่วยเป็นวินาที

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแท่งโลหะมีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร

จากรูปที่ 3.1 ประจุไฟฟ้าทั้งหมดในแท่งโลหะที่เกิดจากอิเล็กตรอนคือ

$$Q = n \cdot q \cdot A \cdot L \quad (3.3)$$

แทนสมการที่ 3.2 ลงใน 3.1 ดังนั้น

$$J = \frac{nqAL}{tA} = \frac{nqL}{t} \quad (3.4)$$

หรือ  $J = nqv_D$  สมการที่ 3.4

โดย  $v_D$  คือ ความเร็วครีฟท์ของอิเล็กตรอน

$q$  คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน  $= -1.6 \times 10^{-19}$  คูลอมบ์

เนื่องจากอิเล็กตรอนมีประจุเป็นลบ และความเร็วก็มีทิศทางเป็นบวกดังนั้นสมการ 3.4 จะมีค่าเป็นบวก ซึ่งหมายถึงกระแสมีทิศทางเป็นบวก  $x$  เมื่ออิเล็กตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้า  $-q$  คูลอมบ์ ได้รับสนามไฟฟ้า  $\mathcal{E}_x$  ทำให้เกิดแรงกระทำต่ออิเล็กตรอน  $F$  โดยจะได้ว่า

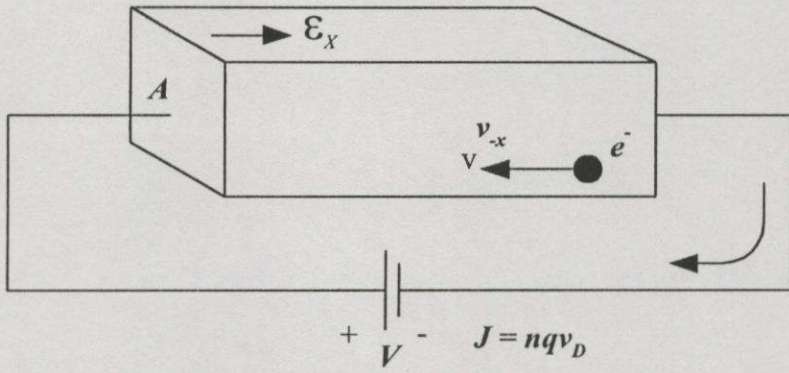
$$F = -q\mathcal{E}_x \quad (3.5)$$

และจากการทดลอง พบว่าความเร็วของอิเล็กตรอนในสมการที่ (3.4) แปรโดยตรงกับค่าของสนามไฟฟ้า ที่ได้รับนั่นคือ  $v \propto -\mathcal{E}$  หรือ

$$v_d = -\mu\mathcal{E}_x \quad (3.6)$$

โดย  $\mu$  คือค่าคงที่ซึ่งเรียกว่า “สภาพคล่อง” (Mobility) และอาจหมายถึงความเร็วต่อหนึ่งหน่วยสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงการนำกระแสของอิเล็กตรอนในโลหะ

แทนสมการ (3.6) ในสมการ (3.4) จะได้

$$\text{ความหนาแน่นกระแส} \quad J = nq\mu E \quad (3.7)$$

จากการเปรียบเทียบสมการที่ (3.1) และ (3.7) จะได้ว่า

$$\text{สภาพนำ(Conductivity)} \quad \sigma = nq\mu \quad (3.8)$$

$$\text{และถ้ากำหนดให้สภาพต้านทาน} \quad \rho = \frac{1}{\sigma} \quad (3.9)$$

$$\text{ดังนั้น สภาพต้านทาน(Resistivity)} \quad \rho = \frac{1}{nq\mu} \quad (3.10)$$

นอกจากนี้สมการที่ (3.1) อาจเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{I}{A} = \sigma \frac{V}{L} \quad (3.11)$$

โดย  $I$  คือ กระแสที่ไหลผ่านมาจากแท่งโลหะ มีหน่วยเป็น แอมแปร์

$V$  คือ แรงดันที่ให้แก่แท่งโลหะ มีหน่วยเป็น โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีหรือทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา  $I = \sigma \frac{A}{L} V$  ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (3.12)

และอาจเขียนใหม่เป็น  $I = GV$  (3.13)

โดย  $G = \sigma \frac{A}{L}$  (3.14)

ซึ่งในที่นี้  $G$  ถูกเรียกว่า “ความนำ” หรือ Conductance มีหน่วยเป็น โมห์ (Mho)  
ถ้ากำหนดให้  $R$  คือความต้านทาน(Resistance) และมีค่าเป็นส่วนกลับของความนำดังนั้น

$$R = \frac{1}{G} = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{A} \quad (3.15)$$

หรือ  $R = \rho \frac{L}{A}$  (3.16)

โดยที่  $R$  คือความต้านทาน มีหน่วยเป็น โอห์ม ( $\Omega$ )  
ดังนั้นสมการที่(3.11)เขียนใหม่ได้ว่า

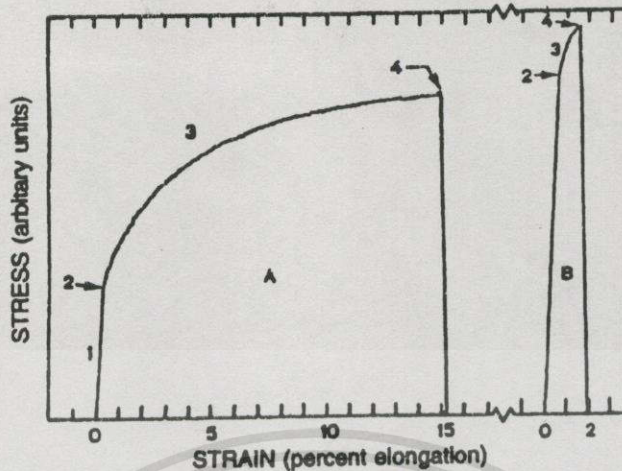
$$I = \frac{V}{R} \quad (3.17)$$

ซึ่งเป็นสมการที่รู้จักดีตามกฎของ โอห์ม โดยที่  $R$  คือความต้านทานมีหน่วยเป็น โอห์ม

### 3.3 คุณสมบัติทางกลของวัสดุทางวิศวกรรม

#### 3.3.1 คุณลักษณะความเค้น-ความเครียดของลวดเชื่อม

โดยทั่วไปแล้วลวดเชื่อมจะมีลักษณะเฉพาะตัวทั้งการยืดออก (Elongation) และการทนต่อการแตกหัก (Breaking Load) โดยสัมพันธ์กับความสม่ำเสมอ, พื้นผิวและความแข็ง โครงสร้างผลึก การให้ความร้อนและอื่นๆของเส้นลวด คุณสมบัติความเค้น-ความเครียดทางโลหะพื้นฐานของเส้นลวดเชื่อมแสดงดังรูปที่ 3.2 ตามมาตรฐานของ ASTM F219 โดยดึงลวดที่มีความยาว 25.4 cm (10 นิ้ว) แล้วบันทึกผลอย่างต่อเนื่องทั้งในเรื่องของการยืดออกและแรงที่ทำให้เกิดการแตกหัก แกนตั้งแทนความเค้นแทนแรงที่ให้ ในขณะที่แกนนอนคือความเครียดแทนการตอบสนองของเส้นลวดต่อความเค้นดึงหรือแรงดึงและแสดงเป็นความยืดหยุ่นของเส้นลวด โดยกราฟนี้เป็นข้อมูลจากการใช้ลวดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่เท่ากันทั้งสองสภาวะการแอนนีสที่ต่างกัน



รูปที่ 3.2 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความเค้นของลวดกับค่าความยืดหยุ่น A แอนนีลอย่างสมบูรณ์ B แอนนีลเพียงเล็กน้อย

อย่างไรก็ตามกราฟนี้จะถูก Normalized ทำให้มีหน่วยเป็น a.u. กราฟของ Stress-Relieved ไม่มีความเค้นหรือความเค้นน้อยมากเป็น 2-3 เท่าของชิ้นที่ไม่ได้แอนนีล จากกราฟ A คือการแอนนีลอย่างสมบูรณ์ ส่วน B มีการแอนนีลเพียงเล็กน้อยโดยบริเวณ 3 แสดงถึงการผิดรูปไปในลักษณะของการยืดตัวแบบพลาสติก เป็นบริเวณที่เส้นลวดยืดออกอย่างถาวร จุด 4 จะเป็นจุด Breaking Load ของลวดเชื่อม สังเกตว่าลวดทองคำที่ใช้ในการเชื่อมแบบสั้นด้วยความร้อน (TS) และแบบอัดด้วยความร้อน (TC) ที่ถูกแอนนีลจะมีคุณลักษณะความเค้น- ความเครียดใกล้เคียงกราฟ A ในรูปที่ 3.2 ถ้าต้องการให้เส้นลวดไม่มีโครงสร้างที่ผิดรูปไปจากการดึง (NDPT; Nondestructively Pulled) ต้องใช้แรงไม่เกินข้อจำกัดการยืดหยุ่น (Elastic Limit) จุดที่ 2 ในกราฟซึ่งทำให้เส้นลวดเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างผันกลับไม่ได้

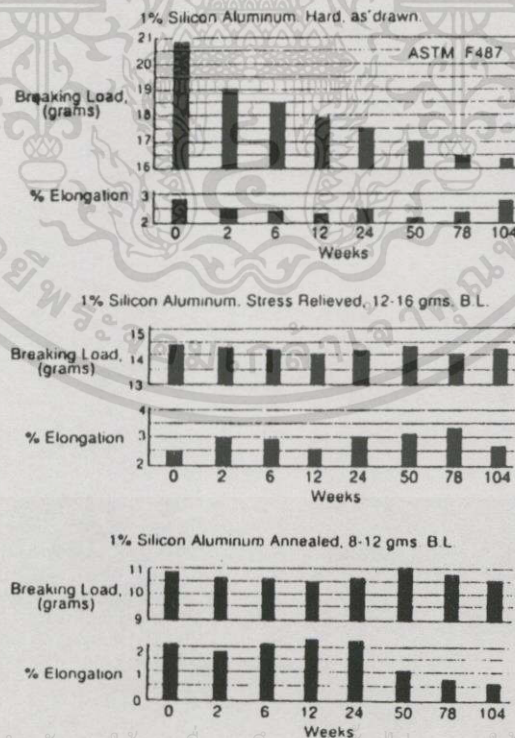
### 3.4 อายุของลวดเชื่อม

ในระบบการเชื่อมต่อขนาดเล็กนั้นไม่เพียงแต่จะต้องใช้ลวดเชื่อมชนิดพิเศษเท่านั้น ยังต้องคำนึงถึงเรื่องคุณสมบัติอายุของลวดเชื่อมด้วยลวดที่ถูกทิ้งไว้ระยะเวลาหนึ่ง มีโอกาสเสี่ยงต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของโลหะซึ่งจะกระทบกับผลผลิต ได้มีหลายบริษัททางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ทำการศึกษาคุณสมบัติอายุแท้จริงของลวดเชื่อม โดยใช้ลวดเชื่อมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25  $\mu\text{m}$  ชนิดต่างๆ มาเก็บไว้ในลักษณะเป็นม้วน 5 cm ที่อุณหภูมิ  $22.8 \pm 1.6^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 2 ปี แล้วทำการทดสอบเป็นช่วงๆ ตลอดระยะเวลา 2 ปี พบว่าคุณลักษณะโดยทั่วไปของลวดเชื่อมยังใช้ได้ แม้ว่าคุณสมบัติทางโลหะเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะลวดทองคำที่ใช้การเชื่อมต่อแบบ (TS) Breaking Load ของลวดแข็งจะลดลงอย่างรวดเร็ว (จาก 5-10%) ภายใน 6 สัปดาห์หลังจากการผลิตดังนั้นลวด

แข็งจึงไม่นิยมนำมาใช้สำหรับการผลิตที่มีปริมาณ และความแข็งจะลดลงอย่างต่อเนื่องแต่จะช้ามาก ในช่วงระยะเวลา 2 ปี ยกเว้นลวดที่เป็น Al 1% Mg ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงเวลากการทดสอบ ส่วนลวดที่ความเค้นน้อยและถูกแอนนีสทั้งลวดชนิด Au และ Al ยังคงอยู่ในสเปค Breaking Load เดิมแม้ว่าคุณลักษณะของการบีดออกจะมีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นและลดลงแต่ยังคงอยู่ในสเปคที่ใช้ได้

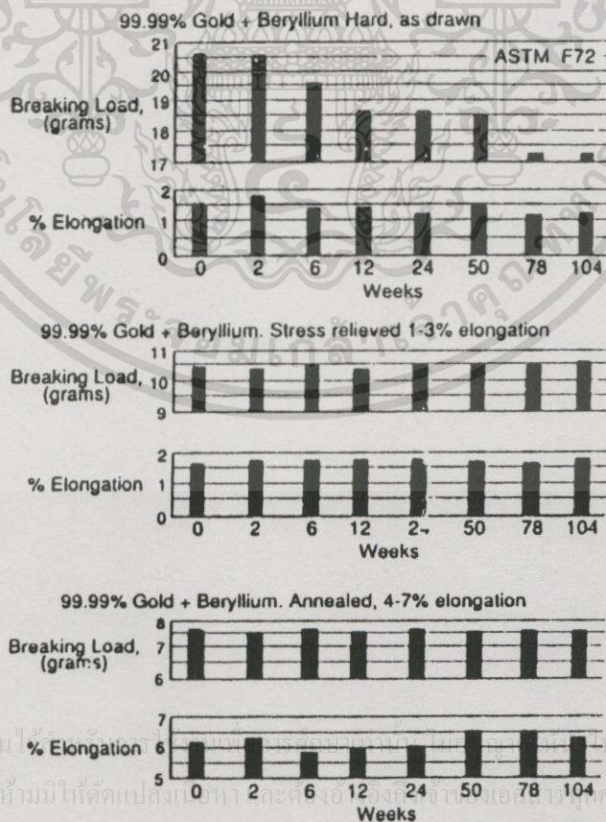
### 3.5 ผลของขั้ว EFO ต่อลวดทองคำ

ประมาณปี 1984 อุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้เริ่มเปลี่ยนแปลงจากการใช้ Positive Electronic Flame off Spark(EFO) เป็น Negative EFO สำหรับการฟอร์มตัวของลูกบอลทองคำมีเหตุผลหลายประการที่ทำให้เปลี่ยนมาใช้ Negative EFO เนื่องมาจากทำให้การฟอร์มตัวของลูกบอลทองคำสม่ำเสมอมากขึ้นซึ่งมีความสำคัญมากในอุตสาหกรรมปัจจุบันที่มีระยะ Fine Pitch แคบๆ อีกเหตุผลคืออนุภาคที่เป็นคาร์บอนไม่ถูกดึงดูไปที่ลวดและ Capillary ลูกบอลทองคำจะไม่ถูกสปัดเตอร์รีง ออกจากลวดและไม่ก่อตัวขึ้นบน Capillary ด้วยดังนั้น Negative EFO จึงช่วยยืดอายุ Capillary และนอกจากนี้ จากการศึกษายังพบว่า Negative EFO มีประสิทธิภาพมากกว่าและมีการส่งผ่านความร้อนที่สม่ำเสมอกว่าจากการสปาร์คมายังลวด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 3.3** อายุลวดเชื่อมอลูมิเนียมที่มีการแอนนีสและไม่มีการแอนนีสที่เวลาต่างกัน

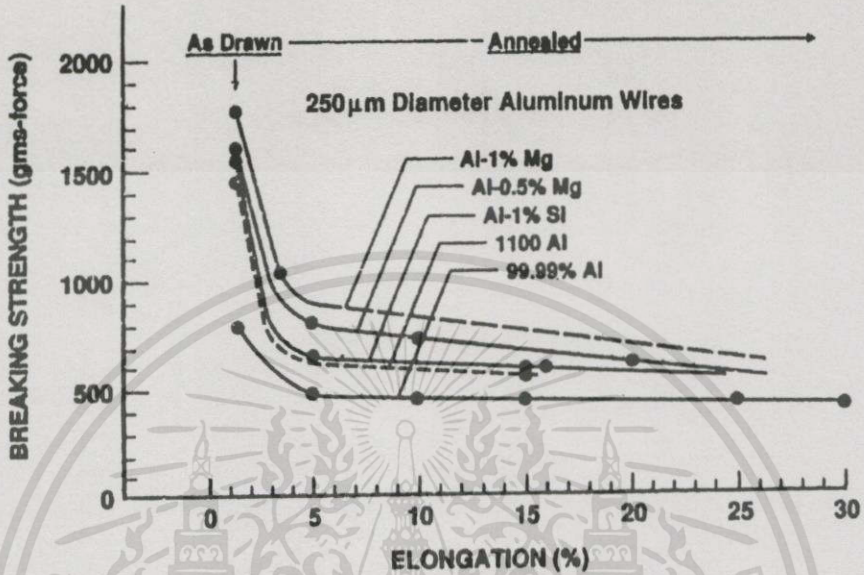
ข้อสรุปที่ได้จากการศึกษาช่วงอายุของลวดที่ใช้ในการเชื่อมต่อ โดยทั่วไปแล้วเส้นลวดที่ถูกแอนนีสที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กหรือเส้นลวดที่มีความเค้นน้อยสามารถเก็บไว้ใช้ได้นาน 2 ปีโดยมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดเพียง Breaking Load เท่านั้นแม้ว่าการยืดออกของลวดจะแปรผันเปลี่ยนแปลงเหนือช่วงสเปคที่เข้ามาในตอนแรก ดังนั้นจึงต้องเก็บลวดไว้ที่อุณหภูมิคงที่หลีกเลี่ยงการโดนแสงวางไว้ในที่โล่งหรือหลีกเลี่ยงแหล่งความร้อนที่เป็นไปได้ ถึงแม้ว่าจะมีการตรวจสอบโดย ASTM แล้วผู้ใช้งานบางส่วนยังคงกำหนดให้ใช้ภายในช่วงเวลา 6 เดือนเนื่องจากบรรยากาศที่อยู่ล้อมรอบและ จุลศาสตร์โลหะของลวดที่เปลี่ยนไปทำให้ไม่สามารถรับประกันได้ตลอดช่วงระยะเวลา 2 ปี ลวดอลูมิเนียมขนาดใหญ่ตั้งแต่ 100µm หรือประมาณ 4 mil ซึ่งใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังนั้นเป็นอลูมิเนียม 99.99% หรือประกอบด้วยแมกนีเซียม Mg 0.5% มักถูกแอนนีสทำให้สามารถยืดออกได้มากกว่า 15% พื้นฐานในการทดสอบอายุข้างต้น สำหรับลวดเชื่อมผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กสามารถสมมุติได้ว่า Breaking Load ไม่เหมือนกันกันตลอดช่วงเวลา 2 ปี และการยืดออกได้เริ่มต้นมีค่าน้อยกว่า 10% บางครั้งสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยทั่วไปแล้วมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการเชื่อมต่อแบบอุลตราโซนิค ตัวอย่างหนึ่งของ Breaking Load และ Elongation ของลวดขนาดใหญ่คือกราฟรูปที่ 3.5



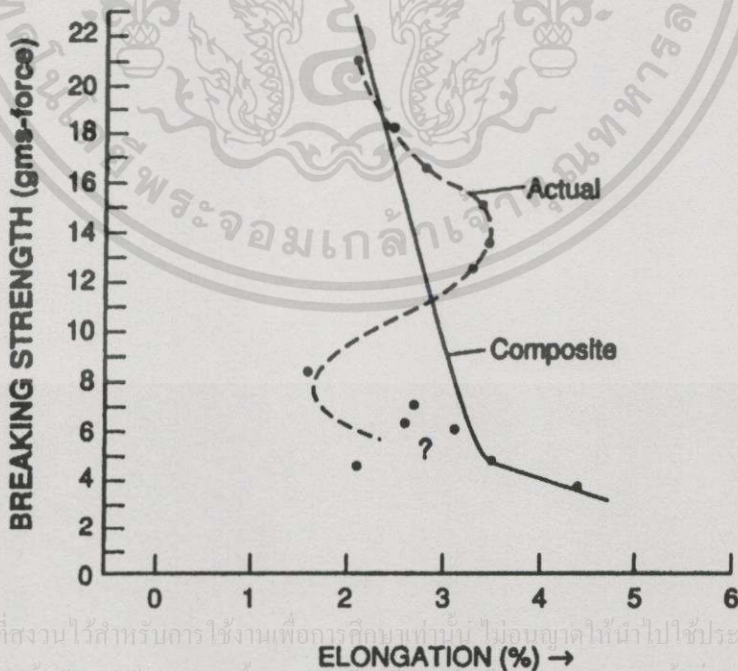
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทนเพื่อประเทศไทย ซึ่งใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทนเพื่อประเทศไทย

รูปที่ 3.4 อายุลวดเชื่อมทองคำที่มีการแอนนีสและไม่มีแอนนีสที่เวลาต่างกัน

ทางด้านซ้ายของกราฟจะเป็นอุณหภูมิและเวลาในการแอนนีสที่ต่ำกว่า ส่วนรูปที่ 3.6 ได้จากการใช้ ลวด Al, 1% ซิลิกอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 mil พบว่ากราฟที่ได้มีการสวิงโดยรูปที่แน่นอนของ กราฟสำหรับลวดชนิดนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการแอนนีส การระบายความร้อนและกระบวนการ ผลิต



รูปที่ 3.5 ผลเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของลวดกับค่าความเค้นของลวดอลูมิเนียมที่ไม่มีการแอนนีส

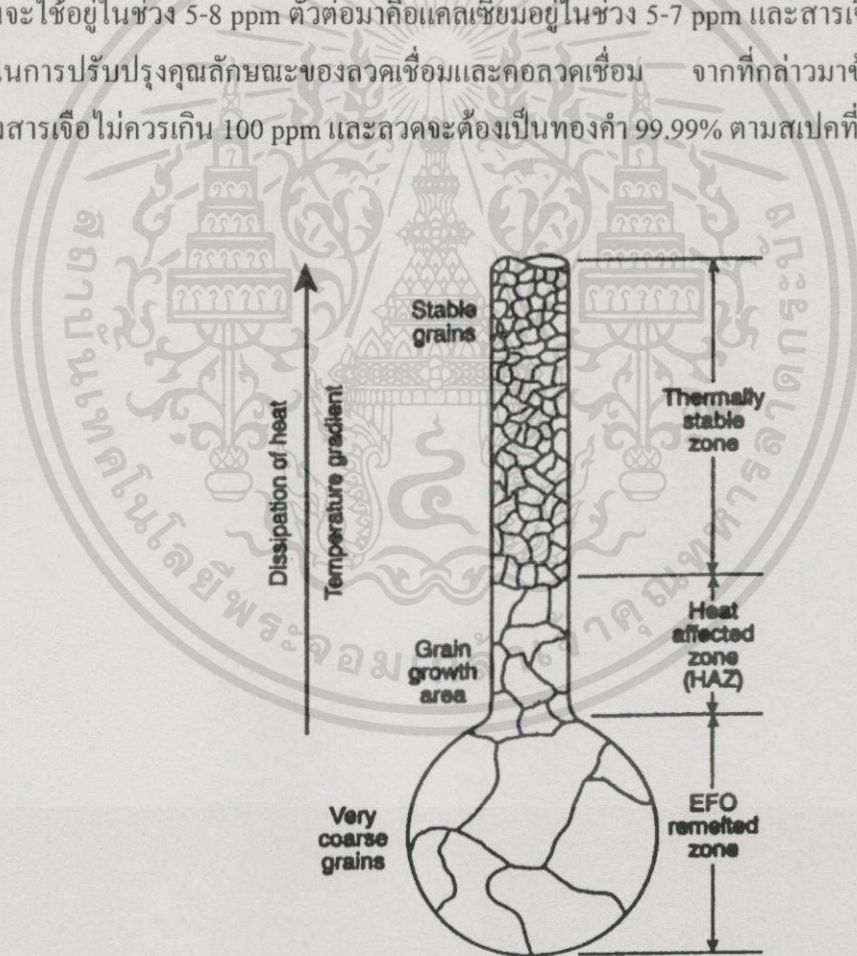


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาร่วมกัน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลีลิ่งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.6 ผลเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของลวดอลูมิเนียม 1% ซิลิกอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 μm กับค่าความเค้นของลวดที่มีการแอนนีส

### 3.6 ลักษณะทั่วไปของลวดทองคำ

ลวดทองคำที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสำหรับการเชื่อมต่อแบบ TS มี 2 ชนิดที่แตกต่างกัน ชนิดแรกใช้ในช่วงเริ่มต้นโดยใช้มือทำการเชื่อมมี Breaking Load อยู่ในช่วง 6-8g เมื่อแอนนีย์มีการ ยืดออกได้ประมาณ 4-7% (สำหรับลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 mil) ลวดชนิดนี้ปกติแล้วจะเติม ทองแดงหรือเงินเข้าไปที่น้อยกว่า 100 ppm โดยน้ำหนัก แต่สำหรับเครื่องเชื่อมต่อลวดแบบอัตโนมัติ ที่มีความเร็วสูงต้องใช้ลวดที่มีความแข็งแรงมากเพื่อป้องกันการหักหรือ การเหยียดตัวของลวดทองคำ เมื่อลวดถูกดึงออกอย่างรวดเร็วจาก Capillary และโดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อให้มีความแข็งแรงของ บริเวณคอดลวดบริเวณเหนือลูกบอล เพื่อให้รูปร่างของลูกและประสิทธิภาพการระบายความร้อนรอบๆ คอดลวดดีขึ้นความแข็งแรงของลวดที่มีค่าสูงขึ้นทำให้ความต้านทานการลัดของลวดสูงขึ้นตามดังนั้น สารที่นำมาเติมเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของลวดในช่วงแรกๆ ได้แก่เบริลเรียมในช่วง 10-100 ppm แต่ในปัจจุบันจะใช้อ้อยู่ในช่วง 5-8 ppm ตัวต่อมาก็คือแคลเซียมอยู่ในช่วง 5-7 ppm และสารเจืออื่นๆ ซึ่งมีคุณสมบัติในการปรับปรุงคุณลักษณะของลวดเชื่อมและคอดลวดเชื่อม จากที่กล่าวมาข้างต้นแล้วความ เข้มของสารเจือ ไม่ควรเกิน 100 ppm และลวดจะต้องเป็นทองคำ 99.99% ตามสเปคที่กำหนด



**รูปที่ 3.7** คุณลักษณะทางกายภาพของลวดทองคำในส่วนต่างๆหลังจากการฟอร์มลูกบอล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ในอนาคตการเติมสารเจืออาจมีมากกว่านี้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของลวดหรือเพิ่มความแข็งแรงของ คอดลูกบอล และความบริสุทธิ์ของลวดทองคำอาจลดลงเป็นประมาณ 99.9% ลวดทองคำที่ใช้ใน

ระบบการเชื่อมต่อแบบ TS จำเป็นต้องได้รับการแอนนีสล เพราะถ้าเส้นลวดแข็งส่วนที่อยู่เหนือลูกบอลจะได้รับความร้อนทันทีทันใดในการฟอร์มลูกบอล ทำให้บริเวณนี้อ่อนกว่าบริเวณอื่นเกิดการงอของลวด ปรากฏการณ์นี้ทำให้บริเวณของง่ายต่อการแตกหัก ซึ่งการเติมสารลงไปเพื่อปรับปรุงความแข็งแรงและความยาวของคอลวด แต่บริเวณนี้ก็ยังคงเป็นส่วนที่อ่อนของระบบเชื่อมต่อลวด โดยเรียกบริเวณนี้ว่าช่วง HAZ “Heat Affected Zone” ก็มีความแข็งแรงประมาณ 20% โครงสร้างเกรนหลังจากอยู่ในฟอร์มของลูกบอลแล้ว แสดงได้ดังรูป 3.7 สังเกตว่า HAZ มีโครงสร้างเกรนที่ใหญ่กว่าเกรนของลวดระยะพัก ได้มีการวิจัยอย่างต่อเนื่องโดยผู้ผลิตลวดเชื่อมโดยเพิ่มความแข็งแรงบริเวณนี้เพื่อปรับปรุงความต้านทานการล้าของลวดให้สูงขึ้น ปัญหาทางโลหะอีกส่วนหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมต่อคือ ลูกบอลไม่สมมาตรหลังจากการฟอร์มลวดหรือไม่อยู่ตรงกลางลวด การโตของเกรนและความอ่อนของลวดเหนือลูกบอล รอยขีดข่วนของลวดได้มีการแก้ปัญหาต่างๆที่กล่าวไปสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปัญหาและการแก้ปัญหาที่เกิดจากการฟอร์มลวดโดยพิจารณาจากคุณลักษณะลวด

ปัญหา	การแก้ปัญหา
ลูกบอลไม่อยู่กลางลวด	เพิ่มความยาวของปลายลวดหรือใช้ EFO ที่ต่ำลง
การโตของเกรนและความอ่อนของคอลูกบอล	ใช้เวลาในการอาร์คลวดน้อยลง
รอยขีดข่วนของลวด	ทำความสะอาดหรือเปลี่ยน Capillary

### 3.7 ความเค้นและความเครียดของวัสดุที่ใช้เชื่อมต่อ

การยืดออกของวัสดุต่างๆสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ Elastic และ Plastic Deformation ดังนั้นถ้านำโลหะมาดึงออกในทิศทางเดียวจะทำให้โลหะเปลี่ยนรูปได้และถ้าเลิกดึงแล้วโลหะนั้นกลับมามีอยู่ในสภาพเดิมเรียกว่า Elastic Deformation แต่ถ้ากลับสู่สภาพเดิมไม่ได้ 100% เรียกว่าเกิด Plastic Deformation ในระหว่างการเปลี่ยนรูปนี้จะตอมจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่ การเปลี่ยนในลักษณะนี้บางครั้งมีความต้องการมากเพราะสามารถนำไปผลิตสิ่งของต่างๆได้ถ้าไม่มีการแตกหักและเป็นไปตามที่ต้องการ

#### 3.7.1 ความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering Stress)

ถ้านำเส้นลวดโลหะที่มีความยาวและมีพื้นที่หน้าตัด  $A$  ดึงด้วยแรง  $F$  จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 “ความเค้น” ทั้งหมดอีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลง  $(\sigma) = \frac{F}{A}$  อย่างอึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไป (3.18)

$F$  คือ แรงที่ดึงลวด,  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของลวด

### 3.7.2 ความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Strain)

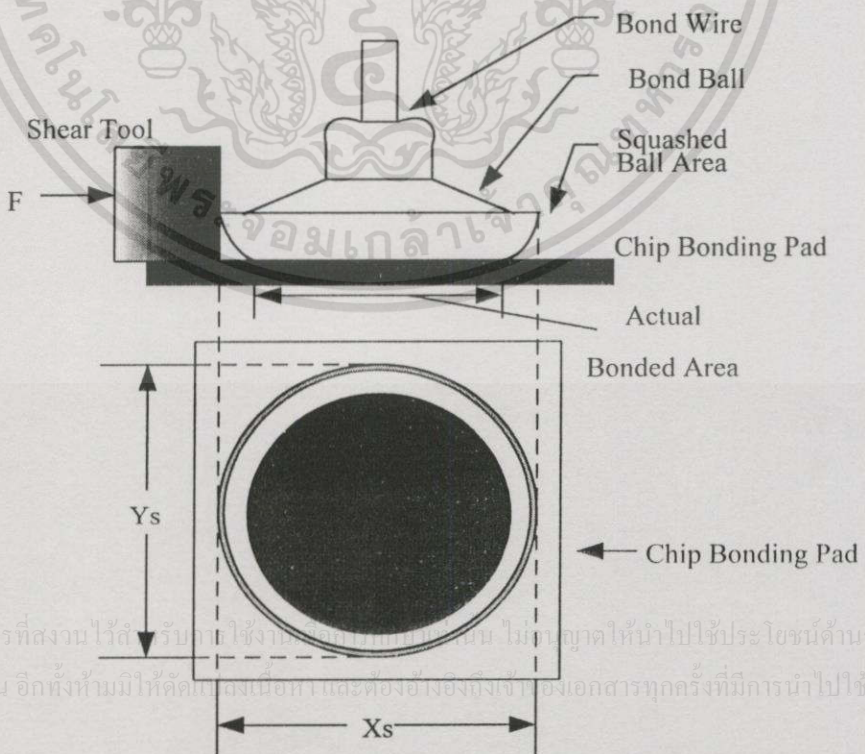
เมื่อแท่งโลหะถูกดึงออกในทิศทางเดียว ทำให้แท่งโลหะยาวขึ้นในทิศทางที่แรงกระทำ ความยาวที่เพิ่มขึ้นนี้เรียกว่าความเครียด จากคำนิยามของคำว่า Engineering Strain หมายถึง ความเครียดทางวิศวกรรมที่เกิดจากแรงดึงโลหะซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม

$$\text{ความเครียด} \quad (\epsilon) = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (3.19)$$

$$(\epsilon) = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{\text{ความยาวที่เปลี่ยนไป}}{\text{ความยาวเดิม}} \quad (3.20)$$

### 3.8 การทดสอบการเชื่อมต่อด้วยวิธีใช้แรงเฉือนที่กระทำกับลูกบอลทองคำ

การทดสอบคุณภาพการเชื่อมต่อของวัสดุต่าง ๆ มีด้วยกัน 2 วิธีหลักๆ วิธีแรกเป็นการทดสอบความเครียดของลวดโดยวิธีการดึงและ วิธีที่สองเป็นการทดสอบแรงเค้นเนื่องการทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวถูกพัฒนาโดย Jellison และ Shimada ทั้งสองคนได้ทำการออกแบบและนำไปทดลองใช้ในห้องปฏิบัติการเป็นครั้งแรกราวปี 1978 และถูกพัฒนาต่อมาเพื่อใช้งานไมโครอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีการผลิตออกมาเป็นเครื่องจักรเพื่อใช้ทดสอบแรงเฉือน โดยเฉพาะ



รูปที่ 3.8 ลักษณะของลูกบอลทองคำและทิศของแรง Shear ที่กระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหากันและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8.1 การหาค่าแรงเค้นเดือน

พิจารณาจากรูปที่ 3.8 แรงเค้นเดือนหาได้ดังนี้

$$SS = \left[ \frac{SF}{\frac{\pi (d_x + d_y)^2}{4}} \right] \quad (3.21)$$

$d_x$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแกน X

$d_y$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแกน Y

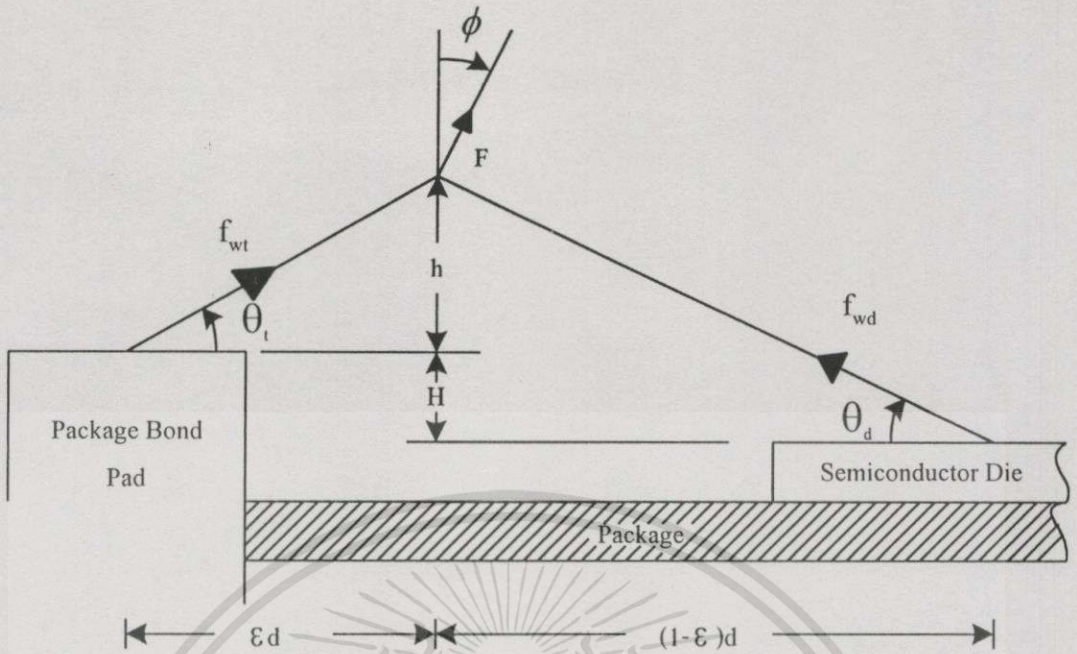
เมื่อขนาดของลูกบอลมีลักษณะกลมดังนั้น  $d_x, d_y$  สามารถทำการวัดขนาดได้ในระนาบเดียวโดยกำหนดให้เป็น D เขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$SS = \left[ \frac{SF \times 4}{\pi \times D^2} \right] \quad (3.22)$$

จากสมการที่ 3.22 ค่าแรงเค้นเดือนจะมีค่าสูงจำเป็นต้องมีพื้นที่ในการยึดมาก ดังนั้นการทดสอบด้วยวิธีการนี้จึงเป็นวิธีที่นิยมในปัจจุบันที่ใช้ทดสอบควบคู่กันวิธีการดึงลวด คุณภาพการเชื่อมต่อที่สูงจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความน่าเชื่อถือรวมถึงลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิต

### 3.9 การทดสอบการเชื่อมต่อด้วยวิธีการดึง(Bond Pull Test)

การทดสอบด้วยวิธีการดึงเป็นมาตรฐานการยอมรับที่ใช้กันโดยทั่วไป ในหลักการของการทดสอบแรงดึงซึ่งทำให้สามารถควบคุมคุณภาพของการเชื่อมต่อได้ กล่าวคือเป็นการทดสอบความเครียดของเส้นลวดทองคำในการแอสเซมบลีของอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ได้เริ่มใช้ในปี 1960 และใช้ทดสอบกันอย่างแพร่หลายในเทคโนโลยีการเชื่อมต่อหลายๆ วิธีด้วยกันโดยการทดสอบด้วยวิธีการดึงลวดมีตัวแปรที่จำเป็นต้องศึกษา และทดสอบเพื่อให้เข้าใจถึงปัญหาต่างๆ ในกระบวนการทดสอบและข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น ตัวแปรในวิธีการตรวจสอบด้วยวิธีดึงลวดได้มีหลายงานวิจัยได้กล่าวถึงวิธีการนี้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเป็นการนำเสนอหลักการที่ใช้ในการทดสอบด้วยวิธีดึงลวดโดยจะไม่กล่าวรวมไปถึงขั้นตอนของการวิเคราะห์ของ การที่จะเข้าใจในหลักการทดสอบเชื่อมต่อลวดทองคำจำเป็นที่จะต้องทราบลักษณะทางกายภาพของการเชื่อมต่อลวดทองคำด้วย



รูปที่ 3.9 โครงสร้างและทิศทางของตำแหน่งแรงดึงลวดเพื่อทดสอบค่าความยืดหยุ่นของลวด

$$f_{wt} = F \left[ \frac{(h^2 + \epsilon^2 d^2)^{1/2} \left( (1 - \epsilon) \cos \phi + \frac{h + H}{d} \sin \phi \right)}{h + \epsilon H} \right] \quad (3.23)$$

$$f_{wd} = F \left[ \frac{\left( 1 + \frac{(1 - \epsilon)^2 d^2}{(H + h)^2} \right)^{1/2} (h + H) \left( \epsilon \cos \phi - \frac{h}{d} \sin \phi \right)}{h + \epsilon H} \right] \quad (3.24)$$

จากสมการที่ 3.11 และ 3.12 ถ้าขนาดของตำแหน่ง F หรือตำแหน่งที่ Hook เกี่ยวมีค่าใกล้เคียง 1 สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$f_{wt} = f_{wd} = \frac{F}{2} \sqrt{1 + \left( \frac{d}{2h} \right)^2} = \frac{F}{2 \sin \theta} \quad (3.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
เมื่อ  $\theta_t = \theta_d = \theta$   
ไม่มีการแจ้งค่าลิขสิทธิ์ อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3.23 เป็นสมการทั่วไปในการทดสอบแรงดึงเมื่อ  $h/d$  มีค่าสูงทำให้ค่าความเครียดเส้นลวดมีค่าสูงและ ค่า  $F$  ที่เป็นแรงดึงลวดจะมีค่าสูงด้วยสามารถเขียนเป็นสมการระหว่างมุม  $\theta_t$ ,  $\theta_d$  และแรง  $F$  คือ

$$f_{wt} = \frac{F}{\sin \theta_t + \theta_t \tan \theta_d} \quad (3.26)$$

$$f_{wd} = \frac{F}{\sin \theta_d + \cos \theta_d \tan \theta_t} \quad (3.27)$$

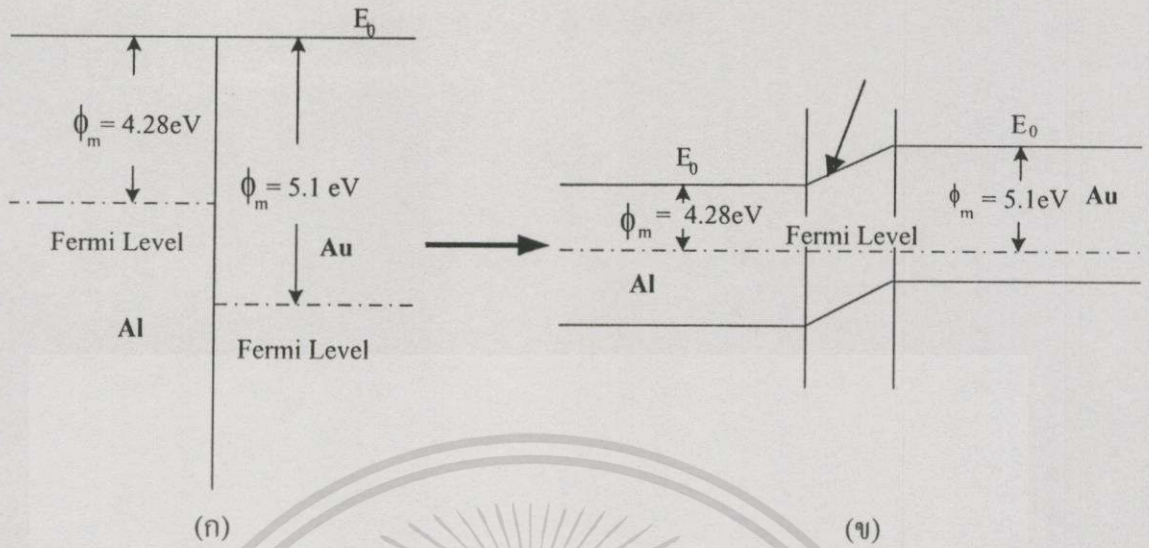
### 3.10 ลักษณะรอยสัมผัสต่างๆ ที่ใช้ในงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์

#### 3.10.1 รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับโลหะ (Au กับ Al)

รอยต่อที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นรอยต่อระหว่างโลหะที่เป็นลวดทองคำกับโลหะที่เป็นอลูมิเนียม โดยทั่วไปรอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำกับโลหะจะมี 2 ชนิด คือ รอยสัมผัสที่เป็นแบบเรกติไฟร์ และ รอยสัมผัสที่เป็นแบบโอห์มิก หรือ รอยสัมผัสที่เป็นเสมือนไร้รอยต่อเพื่อทำการส่งถ่ายกำลังงานหรือสัญญาณออกสู่วงจรภายนอกได้ดีที่สุด นั่นคือส่วนรอยสัมผัสที่เกิดขึ้นบนชิปหรือบนโครงสร้างวงจรรวม แต่ยังมีรอยสัมผัสอีกรอยสัมผัสหนึ่งที่เกิดขึ้นจากพื้นที่ อลูมิเนียม กับวัสดุตัวนำที่ทำการเชื่อมต่อออกสู่จอร์อิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์ภายนอก ซึ่งวัสดุที่เป็นตัวนำนี้จะมีด้วยกันหลายชนิดเช่น อลูมิเนียม ทองแดง ทองคำ เป็นต้น การนำเอาวัสดุที่เป็นตัวนำมาใช้ในการเชื่อมต่อขึ้นอยู่กับ ลักษณะของกระบวนการเชื่อมต่อประเภทของวงจรรวมและสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ในกระบวนการเชื่อมต่อแบบเทอร์โมโซนิคนั้นจะใช้ลวดทองคำเป็นวัสดุในการเชื่อมต่อ เพื่อนำคุณสมบัติของวงจรรวมที่สร้างขึ้น ไปใช้งาน เนื่องจากทองคำเป็นวัสดุที่ไม่เกิดออกไซด์และไม่ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับความร้อน จึงเป็นที่นิยมนำมาใช้ ดังนั้นรอยสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างลวดทองคำกับพื้นที่อลูมิเนียมจะต้องมีคุณสมบัติเป็น โอห์มิกด้วยจากฟังก์ชันของวัสดุทั้งสองมีค่าดังนี้ ฟังก์ชันงานของทองคำมีค่าเท่ากับ 5.1 eV และ อลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 4.28 eV โดยเขียนออกมาในรูปของแถบพลังงานได้ดังรูป 3.10 (ก) และ 3.10(ข) โดยในรูป 3.10(ก)เป็นลักษณะแถบพลังงานก่อนสัมผัสและ 3.10(ข) ลักษณะแถบพลังงานหลังสัมผัส เป็นที่ทราบโดยทั่วกันว่าในโลหะนั้นประจุพาหะข้างมากได้แก่อิเล็กตรอน ดังนั้นจะไม่เกิดรอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ที่บริเวณรอยสัมผัสระหว่าง

อลูมิเนียมกับทองคำานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

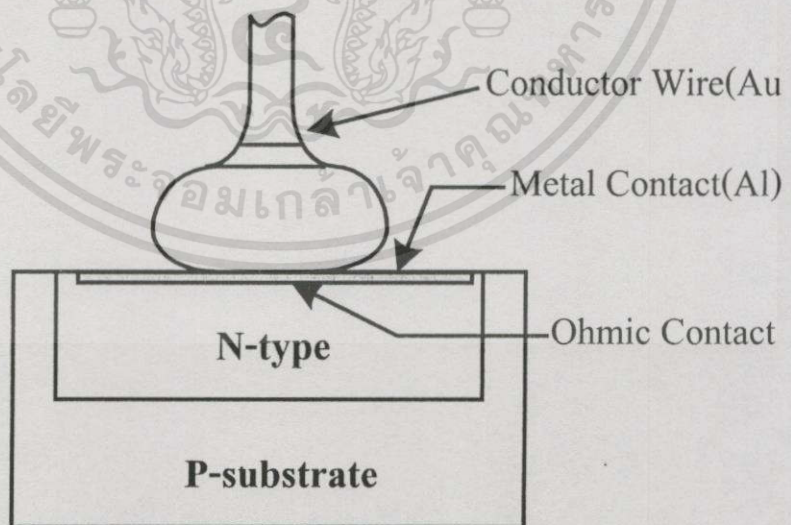
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ลักษณะแถบพลังงานระหว่าง Au กับ Al ที่ลักษณะเป็น Ohmic Contact

### 3.10.2 รอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำ - โลหะ - โลหะ

รอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำและโลหะที่สร้างขึ้น เพื่อสะดวกแก่การนำรอยต่อพี-เอ็น ไปประกอบใช้งานร่วมกับสิ่งประดิษฐ์ชนิดอื่น ดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยที่ไม่ทำให้คุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นเกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ



รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะ โครงสร้างของรอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำ - โลหะ - โลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกร ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นรอยสัมผัสนี้จะต้องมีค่าความนำสูง ไม่มีผลหรือเกี่ยวข้องกับทิศทางการไหลของกระแสและรอยสัมผัสซึ่งมี คุณสมบัติดังกล่าวนี้เรียกว่า รอยสัมผัสโอห์มิก (Ohmic Contact) โดยปกติทั่วไปที่ปลายทั้งสองด้านของไดโอดจะถูกสร้างรอยสัมผัสโอห์มิกเพื่อการต่อเส้นลวดความนำ ออกรอยสัมผัสโอห์มิกสร้างขึ้นได้โดย อาศัยการสัมผัสกันระหว่างวัสดุสารกึ่งตัวนำและโลหะ เช่น อะลูมิเนียมเป็นต้น แต่อย่างไรก็ดี รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ อาจจะไม่ใช่รอยสัมผัสโอห์มิกก็ได้ เช่นบางครั้งอาจแสดงคุณสมบัติในการเรกติไฟร์ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและสารกึ่งตัวนำ ที่สัมผัสกัน นอกจากนี้จะเห็นว่า ไม่ว่าจะรอยสัมผัสหรือรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ จะมีคุณสมบัติเป็นรอยสัมผัสโอห์มิกหรือรอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ก็ตาม ต่างก็ถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นในรูปที่ 3.11 แสดงให้เห็นว่าสัญญาณไฟฟ้าที่เดินทางออกจากวงจรรวมที่เป็นผ่านจุดสัมผัสแรกที่เป็นอะลูมิเนียมต่อไปยังจุดสัมผัสที่สองที่เป็นลวดทองคำจะต้องมีลักษณะโอห์มิกตลอดทางเดินของสัญญาณไฟฟ้า ดังนั้นการพิจารณาในทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์อาจแบ่งการพิจารณาโดยรวมออกเป็นสองส่วนใหญ่คือ 1. ทางด้านFabrication 2. ทางด้านแอสเซมบลี โดยในส่วนของงานวิจัยนี้จะเน้นการศึกษาในส่วนของแอสเซมบลีเป็นหลักโดยพิจารณาคูสมบัตินำไฟฟ้าของลวดตัวนำในหัวข้อถัดไป

### 3.11 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของลวดตัวนำ

ความนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนลวดทองคำสามารถกำหนดได้จากสมการดังนี้

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3.31)$$

R คือ ความต้านทาน

$\rho$  คือ สภาพความต้านทาน

L คือ ความยาวลวดทองคำ

A คือ เส้นผ่านศูนย์กลางลวดทองคำ

และสมการกำลังทางไฟฟ้า คือ

$$P = I^2 R \quad (3.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

P คือ กำลังงานไฟฟ้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I คือ กระแส

R คือ ความต้านทาน

ความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ 3.31 และ 3.32 สามารถนำอธิบายการกำหนดค่าความต้านทานไฟฟ้าของลวดที่ใช้ในการเชื่อมได้กล่าวคือ พลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในเส้นลวดหรือความร้อนที่เกิดขึ้นกับเส้นลวดเป็นผลจากผลคูณของ กระแสไหลผ่านเส้นลวดตัวนำยกกำลังสองกับค่าความต้านทานเส้นลวดดังนั้นจากสมการที่ 3.31 ถ้ากำหนดอัตราส่วนระหว่างความยาวของเส้นลวดกับพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดให้มีค่าเหมาะสมจะทำให้ควบคุมพลังงานที่สูญเสียในรูปความร้อนได้ ในปัจจุบันวงจรรวมที่ใช้งานมีความหนาแน่นสูงความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นผลที่เกิดขึ้นตามมา ดังนั้นผลจากงานวิจัยนี้เป็นแนวทางที่นำไปใช้ในการกำหนดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางลวดทองคำลาง และความยาวของลวด เพื่อควบคุมพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นบนเส้นลวด โดยนำไปใช้ในวงจรรวมประเภทซิมอสและทำงานในระดับลอจิกเนื่องจากวงจรรวมประเภทดังกล่าวกินกระแสต่ำ และเป็นวงจรรวมที่มีการใช้งานมากที่สุดในปัจจุบัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของพารามิเตอร์

### 4.1 การกำหนดวิธีการทดลองโดยอาศัยหลักการทางสถิติ

ในการทดลองทางวิทยาศาสตร์ หรือวิศวกรรมศาสตร์ที่เกี่ยวกับข้องกับพารามิเตอร์ จำนวน หลายๆตัวซึ่งในแต่ละพารามิเตอร์มีค่าหลายระดับ ดังนั้นสามารถกำหนดเงื่อนไขการทดลองจากจำนวนพารามิเตอร์ทั้งหมดยกกำลังกับจำนวนระดับข้อมูลของพารามิเตอร์ที่ทำการแบ่งออก ซึ่งจะได้เงื่อนไขครอบคลุมการทดลองทั้งหมด โดยที่ระดับการทดลองที่มีมากขึ้นกับจำนวนพารามิเตอร์และระดับของข้อมูลยกตัวอย่างได้เช่น  $2^k$  การทดลองโดยที่  $k$  แทนจำนวนพารามิเตอร์  $= X_1, X_2, \dots, X_n$ , ค่า  $X$  หรือจำนวนพารามิเตอร์ที่มีมากขึ้นเป็นผลให้จำนวนการทดลองมีมากขึ้นตามจำนวนพารามิเตอร์ ดังนั้นการกำหนดช่วงของพารามิเตอร์จะทำให้เงื่อนไขการทดลองลดลงและสูญเสียเวลาในการเก็บข้อมูลน้อยลง รวมถึงปริมาณของวัสดุที่ใช้ในการเก็บข้อมูลที่ใช้ลดลงและได้ค่าของผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด ตัวอย่างเช่น แบ่งจำนวนข้อมูลออกเป็นสองระดับและมีแปดพารามิเตอร์จะได้รับการทดลองทั้งหมดเท่ากับ  $2^8 = 256$  เงื่อนไขการทดลอง จากตัวอย่างดังกล่าวสามารถกำหนดกลุ่มการสร้างเงื่อนไขการทดลองได้ 2 แบบดังนี้

1. Two-Level Factorial Experiment
2. Three-Level Factorial Experiment

#### 4.1.1 การออกแบบการทดลองที่มีสองพารามิเตอร์สองระดับข้อมูล

เป็นวิธีการออกแบบการทดลองระดับพื้นฐาน ที่มีจำนวนระดับของข้อมูลเพียงสองพารามิเตอร์และสองระดับหรือ  $2^2$  จะได้จำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 4 โดยกำหนดให้พารามิเตอร์เป็น  $X_1, X_2$  แต่ละพารามิเตอร์มีสองระดับข้อมูล (-, +) เงื่อนไขการทดลองดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการทดลองแบบ 2 พารามิเตอร์ 2 ระดับ ( $2^2$  Factorial Experiment)

Condition	$X_1$	$X_2$	Total
1	-	-	(1)
2	+	-	a
3	-	+	b
4	+	+	ab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและหรืออ้างอิงถึงเจ้าเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Two-Level Factorial Experiment [8] เป็นวิธีการสร้างการทดลองแบบพื้นฐาน โดยมีพารามิเตอร์เพียงสองพารามิเตอร์ โดยทางปฏิบัติเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่แม่นยำและนำมาวิเคราะห์ผลที่ถูกต้องสามารถที่จะเก็บข้อมูลทั้งหมดของเงื่อนไขได้เนื่องจากมีเพียงสี่เงื่อนไขการทดลอง

#### 4.1.2 การออกแบบการทดลองที่มีมากกว่าสองพารามิเตอร์และมีสองระดับข้อมูล

เป็นหลักการออกแบบที่มีจำนวนพารามิเตอร์มากกว่าสองพารามิเตอร์ขึ้นไป โดยนิยามได้คือ  $2^k$  Factorial Experiment โดยที่  $k = X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_n$ , โดยที่แต่ละพารามิเตอร์  $X$  将有ระดับข้อมูลเพียงสองระดับโดยกำหนดให้เป็น (-, +)

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขการทดลองที่มีมากกว่าสองพารามิเตอร์และมีสองระดับข้อมูล

Treatment	$X_1$	$X_2$	$X_3$	.....	$X_n$
1	-	-	-	....	-
2	+	-	-	....	-
3	-	+	-	....	-
4	+	+	-	....	-
:	:	:	:	....	:
$2^k$	+	+	+	....	+

#### 4.1.3 การออกแบบการทดลองที่มีมากกว่าสองพารามิเตอร์และมีมากกว่าสองระดับข้อมูล

Three-Level Factorial Experiment เป็นการขยายผลการสร้างเงื่อนไขการทดลองจากวิธีการแรก ได้พัฒนาขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1959 โดย Connor และ Zelen โดยทั้งสองคนได้นำวิธีการนี้ไปออกแบบการทดลองที่มีพารามิเตอร์ 4-10 ตัว โดยหลักนี้เป็นการสร้างเงื่อนไขการทดลองที่ต้องการที่มีพารามิเตอร์หลายตัวและต้องการความเที่ยงตรงของข้อมูลสูง จำเป็นที่จะต้องมีระดับของข้อมูลที่หลายระดับ กล่าวคือระดับของข้อมูลที่มีความละเอียดมากความน่าเชื่อถือในการวิเคราะห์ข้อมูล จะมีความแม่นยำสูงตามไปด้วย ดังนั้นเมื่อมีระดับ ของข้อมูลที่เพิ่มขึ้น วิธีการออกแบบการทดลองแบบพื้นฐานหรือ Two-Level Factorial Experiment ไม่สามารถครอบคลุมเงื่อนไขต่างๆ ได้ทั้งหมด ดังนั้นวิธี Three-Level Factorial Experiment เป็นวิธีลดข้อจำกัดของการสร้างเงื่อนไขการทดลองในงานวิจัยนี้จะใช้การออกแบบการทดลองแบบ  $3^4$  เงื่อนไขการทดลองโดยประยุกต์โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติเข้ามาช่วยในการ ออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผล โดยแสดงในหัวข้อถัดไป

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ตอบสนองแบบพื้นผิว RSM (Response Surface

### Methodology)

RSM [9] เป็นวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลของผลตอบสนองตามความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ อินพุตทั้งสี่ตัวเปรียบเทียบกัน โดย แสดงผลออกมาในลักษณะ Contour Chart และ 3D Chart โดย อาศัยคณิตศาสตร์ เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์แก้ปัญหา การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธี RSM จำเป็นต้อง อาศัยการสร้างเงื่อนไขการทดลองแบบ  $2^k$  การทดลองหรือ  $3^k$  โดยกำหนดให้  $Y$  เป็นพารามิเตอร์ ควบคุมและเรียกพารามิเตอร์นี้ว่าพารามิเตอร์ตอบสนองและถูกควบคุมโดยพารามิเตอร์อิสระซึ่ง กำหนดให้เป็น  $X_1, X_2, \dots, X_k$  ถ้าพารามิเตอร์ทั้งหมดถูกกำหนดให้ทำการหาค่าผลตอบสนองของ  $Y$  กล่าวคือ  $Y$  จะเป็นฟังก์ชันของ  $X_1, X_2, \dots, X_k$  และเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 4.1 ดังนั้นเงื่อนไข การทดลองจะทำให้เกิดระนาบของพารามิเตอร์ โดยระนาบที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นสามมิติแกน  $z$  จะเป็นแกนของ  $Y$  ที่ต้องการหาค่า แกน  $x$  และ  $y$  เป็นระนาบของพารามิเตอร์อิสระ ข้อมูลถูกที่พล็อตในระนาบ  $x, y$  จะนำมาเข้ากระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งมีด้วยกันหลายวิธีการเช่น การ วิเคราะห์ผลแบบ ANOVA, การวิเคราะห์ผลแบบ RSM โดยงานวิจัยนี้เลือกวิธีการวิเคราะห์ผลแบบ RSM เนื่องจากเป็นการแสดงผลเป็นลักษณะ Contour Chart โดยทำการสร้างเป็น โมเดลสามมิติและ วิเคราะห์ผลพารามิเตอร์กับผลตอบสนองของพารามิเตอร์บน โมเดลที่ถูกสร้างขึ้น สามารถยกตัวอย่าง ประกอบได้ดังนี้ กำหนดให้มีพารามิเตอร์  $X_1$  คือ ค่าของอุณหภูมิ และ  $X_2$  คือค่าแรงดัน โดยค่าที่ ขอมรับได้ในกระบวนการกำหนดให้เป็น  $Y$  โดยที่  $Y$  เป็นฟังก์ชันของระดับอุณหภูมิกับแรงดันเขียน เป็นสมการได้ดังสมการที่ 4.2

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \mathcal{E} \quad (4.1)$$

$$y = f(x_1, x_2) + \mathcal{E} \quad (4.2)$$

โดยที่  $\mathcal{E}$  คือค่ารบกวนต่างๆ หรือค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบ เขียนสมการใหม่โดย กำหนดให้  $E(y)$  แทนผลของการตอบสนองจะได้

$$E(y) = f(x_1, x_2) = \eta \quad (4.3)$$

โดยเรียกสมการที่ 4.3 ว่าผลตอบสนองพื้นผิว โดยปกติการนำเสนอผลการตอบสนองของ พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในลักษณะที่เป็นรูปภาพแสดงดังรูปที่ 4.2 โดยให้  $\eta$  ถูกพล็อตร่วมกับพารามิเตอร์  $X_1, X_2$  เป็นลักษณะการพล็อตที่มีสามแกนหรือสามมิติ โดยรูปร่าง

ของโมเดลที่เกิดจะเป็นการสร้างจากการออกแบบการทดลองแบบ Factorial เมื่อทำการพล็อตค่าลงในกราฟจะได้ระนาบของพารามิเตอร์  $X_1, X_2$  แสดงดังรูป 4.3 โดยที่เส้นบน Contour คือค่าที่ลากผ่านบนระนาบของพารามิเตอร์  $X_1, X_2$  เพื่อหาจุดตัดอยู่ที่ค่าสูงสุดบนระนาบพารามิเตอร์  $X_1, X_2$  โดยสามารถพิจารณาพื้นผิวบนระนาบ Contour หรือเห็นประโยชน์ของการสร้างรูปร่าง Contour ขึ้นมา ปัญหาที่สำคัญที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์พารามิเตอร์แบบ RSM คือความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองกับพารามิเตอร์อิสระที่ไม่ทราบค่า ซึ่งเป็นผลทำให้ช่วงข้อมูลเกิดการคลาดเคลื่อนจากที่เป็นจริงและมีผลกระทบโดยตรงกับค่าที่ยอมรับได้ในระบบ ดังนั้นการประมาณค่าที่ยอมรับได้ในระบบและการกำหนดช่วงพารามิเตอร์อิสระที่ถูกต้องมีส่วนสำคัญที่จะทำให้การออกแบบดีขึ้น เป็นไปอย่างถูกต้องที่สุดเมื่อได้ผลตอบสนองอยู่ในฟังก์ชันของพารามิเตอร์อิสระที่ลิเนียร์แล้ว สามารถประมาณฟังก์ชันเป็นสมการ โพลีโนเมียลกำลังหนึ่งได้ตามสมการที่ 4.4 เมื่อนำมาพล็อตลงในกราฟ Contour แล้วทำการออกแบบการทดลองทำให้เราสามารถทราบแนวโน้มของข้อมูลที่เราทำการศึกษา ซึ่งงานวิจัยนี้ต้องการทราบถึงค่าแรงเค้นเฉือน, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทองคำที่เหมาะสมหลังจากผ่านขั้นตอนการเชื่อมต่อกับขนาดพื้นที่อุณหภูมิและค่าอื่น ๆ เมื่อเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทองคำให้เล็กลง

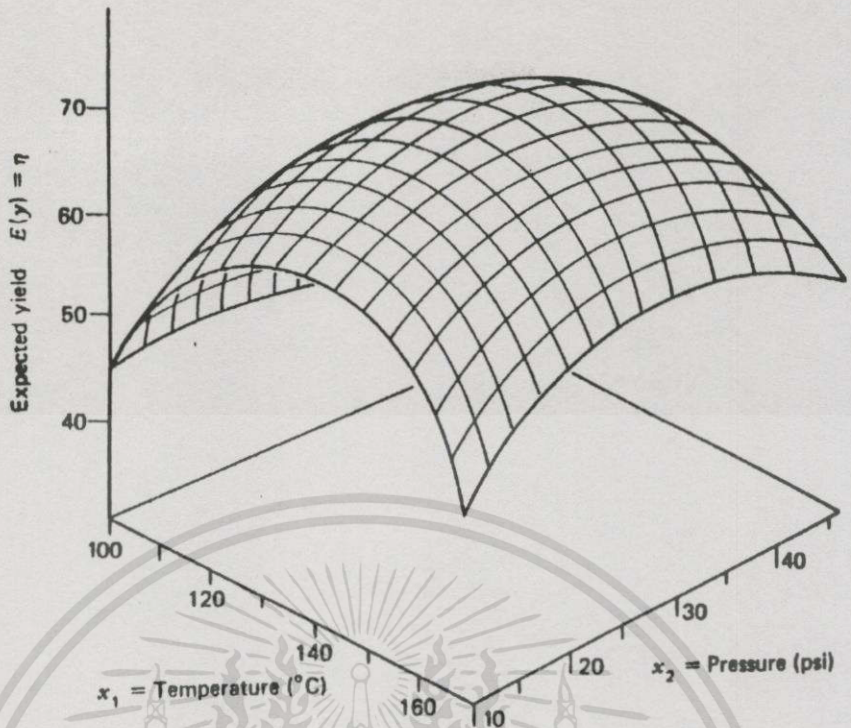
#### 4.2.1 การวิเคราะห์พารามิเตอร์อิสระที่มีลักษณะกลุ่มข้อมูลแบบลิเนียร์

การวิเคราะห์ผลแบบ RSM ที่มีเงื่อนไขการออกแบบเป็น  $2^2$  เงื่อนไขสามารถเขียนเป็นสมการ โพลีโนเมียลอันดับที่หนึ่งได้คือ

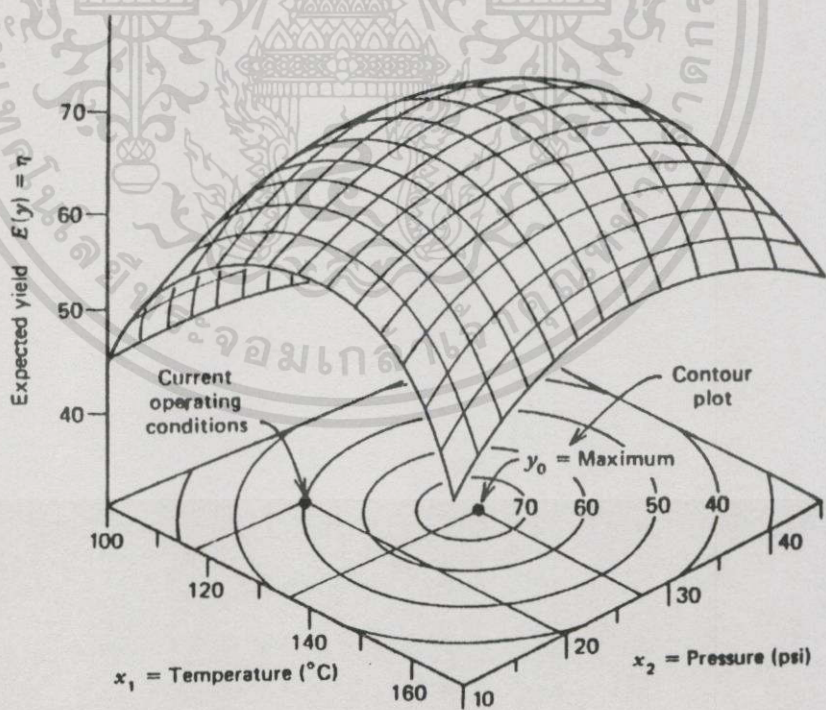
$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \epsilon \quad (4.4)$$

จากสมการที่ 4.3 เป็นการวิเคราะห์ผลการทดลองที่อยู่ในเงื่อนไขของการออกแบบการทดลองแบบ  $2^2$  หรือสองพารามิเตอร์สองระดับจากตัวอย่าง เมื่อทำการการสร้างเป็นกราฟ Contour แสดงในรูปที่ 4.1 ถูกพล็อตพารามิเตอร์  $X_1$  และ  $X_2$  อยู่ในระนาบ  $x, y$  จากสมการที่ 4.4 จะได้ลักษณะกราฟ ดังรูปที่ 4.2 ค่า  $\beta_0$  สามารถประมาณจากค่าเฉลี่ยของผลที่ได้จากการทดลอง เมื่อในระบบที่ทำการออกแบบมีจำนวนระดับการทดลองที่มากขึ้นและเกิดความซับซ้อนขึ้นในระบบ กล่าวคือเกิดเส้นบนระนาบของพารามิเตอร์ที่ไม่ใช่ลักษณะที่เป็นลิเนียร์ในระบบที่ ทำการวิเคราะห์ทำให้สมการที่เป็นโพลีโนเมียลอันดับหนึ่งไม่สามารถใช้ได้จำเป็นต้องสมการ โพลีโนเมียลที่มีดีกรีสูงกว่าหรือ Second Order Model ดังสมการที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ภาพสามมิติของการวิเคราะห์แบบ RSM โดยแกน z เป็นสิ่งที่ต้องการทราบค่าจากการออกแบบและแกน x และแกน y เป็นระนาบพารามิเตอร์อิสระ

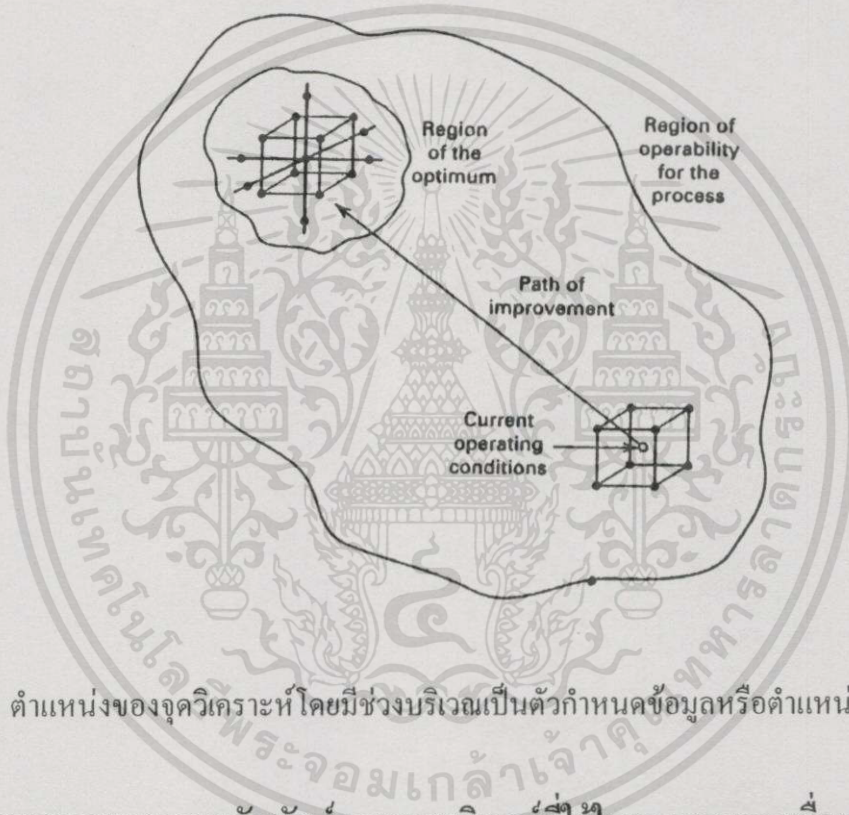


รูปที่ 4.2 รูปแสดง Contour ของการการวิเคราะห์ด้วยวิธี RSM โดยอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์อิสระที่มีกลุ่มข้อมูลแบบนอนลิเนียร์

จากการวิเคราะห์ผลพารามิเตอร์ตอบสนองจากหัวข้อที่ 4.1.1 เป็นการวิเคราะห์ที่มีข้อจำกัดในเรื่องของเงื่อนไขการออกแบบซึ่งมีเพียงสี่เงื่อนไขการทดลอง แต่ในงานการทดลองอื่นๆที่มีพารามิเตอร์

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4.5)$$



รูปที่ 4.3 ตำแหน่งของจุดวิเคราะห์โดยมีช่วงบริเวณเป็นตัวกำหนดข้อมูลหรือตำแหน่งออปติ멈

#### 4.3 ความหมายและความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมต่อแบบ

##### Thermosonic Ball Bonding

ในกระบวนการเชื่อมต่อแบบ Ball Bonding มีพารามิเตอร์ที่สำคัญสี่ตัวได้แก่

1. Bond\_Force (แรงที่ทำการกดลูกบอลทองลงบนจุดสัมผัสอลูมิเนียม)
2. Bond\_Power (แรงต้นขณะที่ถูกกดลงบนจุดสัมผัสอลูมิเนียม)
3. Bond\_Time (เวลาที่ทำการสั้น Capillary)
4. Temperature (อุณหภูมิบน Heater Box)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยพารามิเตอร์ทั้งสี่ตัวมีนัยสำคัญซึ่งกันและกัน กล่าวคือการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ทั้งสี่มีผลต่อคุณภาพของการเชื่อมต่อ การศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ทั้งสี่จะสามารถควบคุมหรือเลือกจุดที่เหมาะสมในการเชื่อมต่อ

#### 4.4 การออกแบบแผนการทดลองแบบ $3^4$ เงื่อนไขด้วยโปรแกรมทางสถิติ

การออกแบบการทดลองในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบโดยแบ่ง ระดับข้อมูลสามระดับ และมีพารามิเตอร์ที่เป็นอินพุตสี่ตัวคือ Bond\_Force, Bond\_Power, Bond\_Time, Temperature ดังนั้นจะได้จำนวนลำดับการทดลองหรือเงื่อนไขการเก็บข้อมูลในการทดลองเท่ากับ 81 เงื่อนไขการทดลองหลังจากนั้นทำการกำหนดช่วงข้อมูลของการทดลองได้ดังนี้

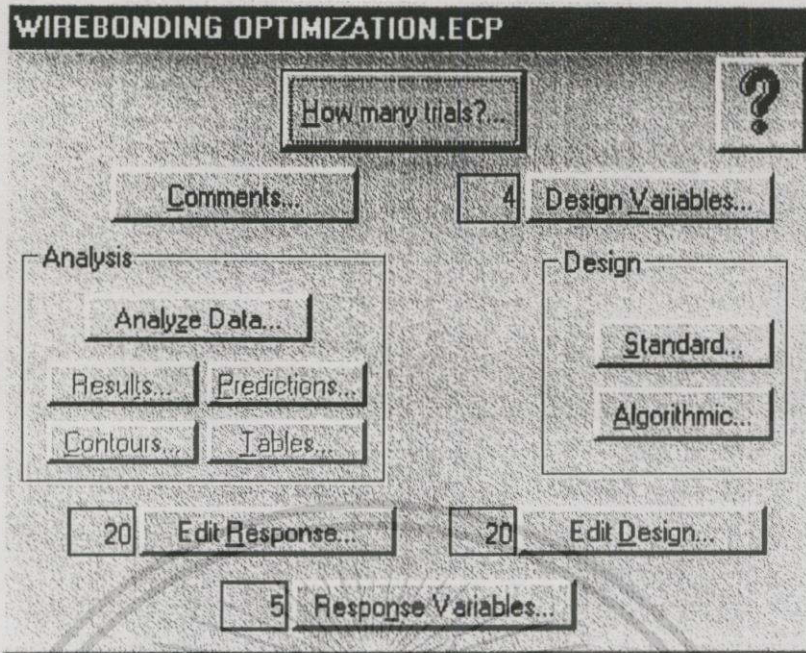
1. Bond\_Force : 10 - 20 gf
2. Bond\_Power : 50 - 90 mW
3. Bond\_Time : 20 - 40 sec
4. Temperature : 180°C - 230°C

การวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยนี้เป็นการนำหลักการหาค่าพารามิเตอร์และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธี RSM มาใช้ เนื่องจากกระบวนการเชื่อมต่อแบบเทอร์โซนิกมีพารามิเตอร์ในการศึกษาหลายตัวซึ่งเป็นการรวมข้อดีของวิธีการเชื่อมต่อแบบอื่นๆเข้าด้วยกันโดยแยกกลุ่มข้อมูลออกเป็นสองกลุ่มคือ

1. กลุ่มพารามิเตอร์อิสระ(Independent Variable) ได้แก่ Bond\_Force, Bond\_Power, Bond\_Time, Temperature
2. กลุ่มพารามิเตอร์ตาม(Dependent Variable) ได้แก่ Shear Force, Pull Force, Ball Size, Ball Thickness, Loop Height

กลุ่มพารามิเตอร์ทั้งสองกลุ่มจะถูกกำหนดใน โปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อทำการสร้างตารางการทดลองและวิเคราะห์ผลต่อไป โดยจากรูปที่ 4.4 เป็นการกำหนดจำนวนพารามิเตอร์ของการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

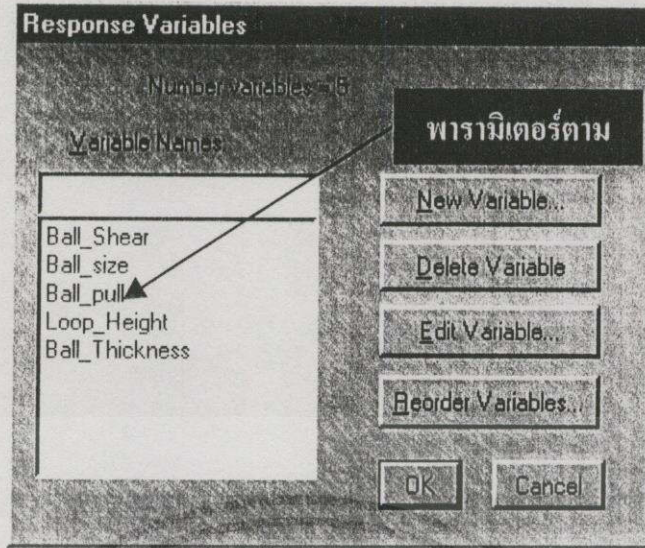


รูปที่ 4.4 แสดงภาพรวมการกำหนดเงื่อนไขการออกแบบการทดลอง



รูปที่ 4.5 แสดงการกำหนดพารามิเตอร์อิสระเพื่อสร้างตารางการทดลอง

รูปที่ 4.5 แสดงจำนวนพารามิเตอร์อิสระ 4 โดยที่ตัวอักษร C หน้าพารามิเตอร์อิสระแต่ละตัวเป็นการกำหนดให้ระดับของพารามิเตอร์มีจำนวนของระดับข้อมูลตามข้อจำกัดการทดลอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงการกำหนดจำนวนพารามิเตอร์ตามที่ทำกรวิเคราะห์

รูปที่ 4.6 แสดงจำนวนของชุดพารามิเตอร์ตามทั้งหมด 5 ตัวโปรแกรมจะทำการสร้างตารางจากพารามิเตอร์ทั้งหมด 5 ตัวเพื่อเตรียมเก็บข้อมูลจากชุดการทดลองของ พารามิเตอร์อิสระที่ได้จากตารางแสดงดังรูปที่ 4.7

TRIAL	B Time	B Power	B Force	Temp
1	10	50	20	180
2	20	50	30	180
3	20	50	40	180
4	10	70	40	180
5	15	90	20	180
6	20	90	20	180
7	10	90	40	180
8	20	50	20	205
9	10	50	40	205
10	10	90	20	205
11	20	90	40	205
12	10	50	20	230
13	10	50	30	230
14	20	50	40	230
15	10	70	20	230
16	20	70	30	230
17	15	70	40	230
18	20	90	20	230
19	15	90	30	230
20	10	90	40	230

รูปที่ 4.7 แสดงตารางเงื่อนไขการทดลองของพารามิเตอร์อิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีได้รูปที่ 4.7 แสดงตารางชุดข้อมูลจำนวน 20 ชุด ถึงเจ้าของจากชุดการทดลองทั้งหมด 81 ชุดที่ได้จากพารามิเตอร์อิสระ 4 ตัวโดยแต่ละตัวแบ่งออกเป็น 3 ระดับ จาก 20 ชุดข้อมูลที่ได้เป็นการสุ่มตัวอย่างจากจำนวนทั้งหมดโดยโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ

TRIAL	Ball Speed	Ball Size	Ball Rot	Loop Height	Ball Thickness
1	13.55	2.67	9.61	9.54	1.19
2	32	2.72	11.61	9.05	1.12
3	35.24	2.88	12.03	9.62	1.02
4	39.04	2.92	12.62	9.26	1.04
5	41.65	3.09	13.28	9.08	0.95
6	44.14	3.12	11.65	9.49	0.89
7	49.14	3.11	12.79	9.34	0.81
8	30.47	2.68	12.40	9.20	1.12
9	28.28	2.71	12.25	9.05	1.06
10	38.56	2.98	11.84	9.36	0.94
11	56.18	3.64	11.87	9.16	0.66
12	24.71	2.96	13.25	9.42	1.19
13	26.86	2.68	10.80	9.40	1.21
14	44.82	2.99	11.47	9.36	1.06
15	36.11	2.83	11.33	9.56	1.10
16	56.36	3.15	11.01	9.83	0.89
17	57.40	3.21	10.96	9.78	0.86
18	54.98	3.30	11.80	9.93	0.88
19	57.78	3.25	11.75	9.85	0.79
20	58.38	3.28	11.51	9.81	0.86

รูปที่ 4.8 แสดงตารางข้อมูลของพารามิเตอร์ตามที่ได้จากการทดลองจริงเพื่อนำมาวิเคราะห์

รูปที่ 4.8 แสดงชุดข้อมูลของพารามิเตอร์ตามที่ได้จากการทดลองจริงค่าที่ได้ทั้งหมดจะถูกสร้างเป็นกราฟ Contour แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์อิสระกับพารามิเตอร์ตามและวิเคราะห์ผลโดยการออกแบบเชิงซ้อนด้วยเทคนิค RSM

**Standard Design**

Number continuous variables = 4

Design Type

Screening  Response Surface

Mixture

QUADRATIC

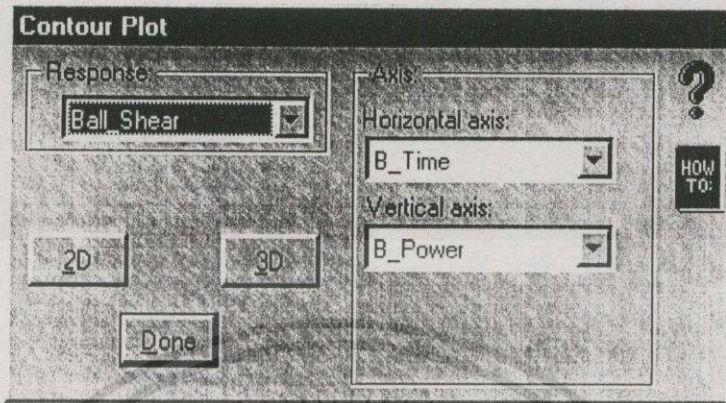
0 Replicates

Make Design Cancel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.9 แสดงการกำหนดวิธีวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Response Surface Methodology

รูปที่ 4.9 แสดงการกำหนดวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลพารามิเตอร์ตามโดยงานวิจัยนี้เลือกการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแบบ RSM

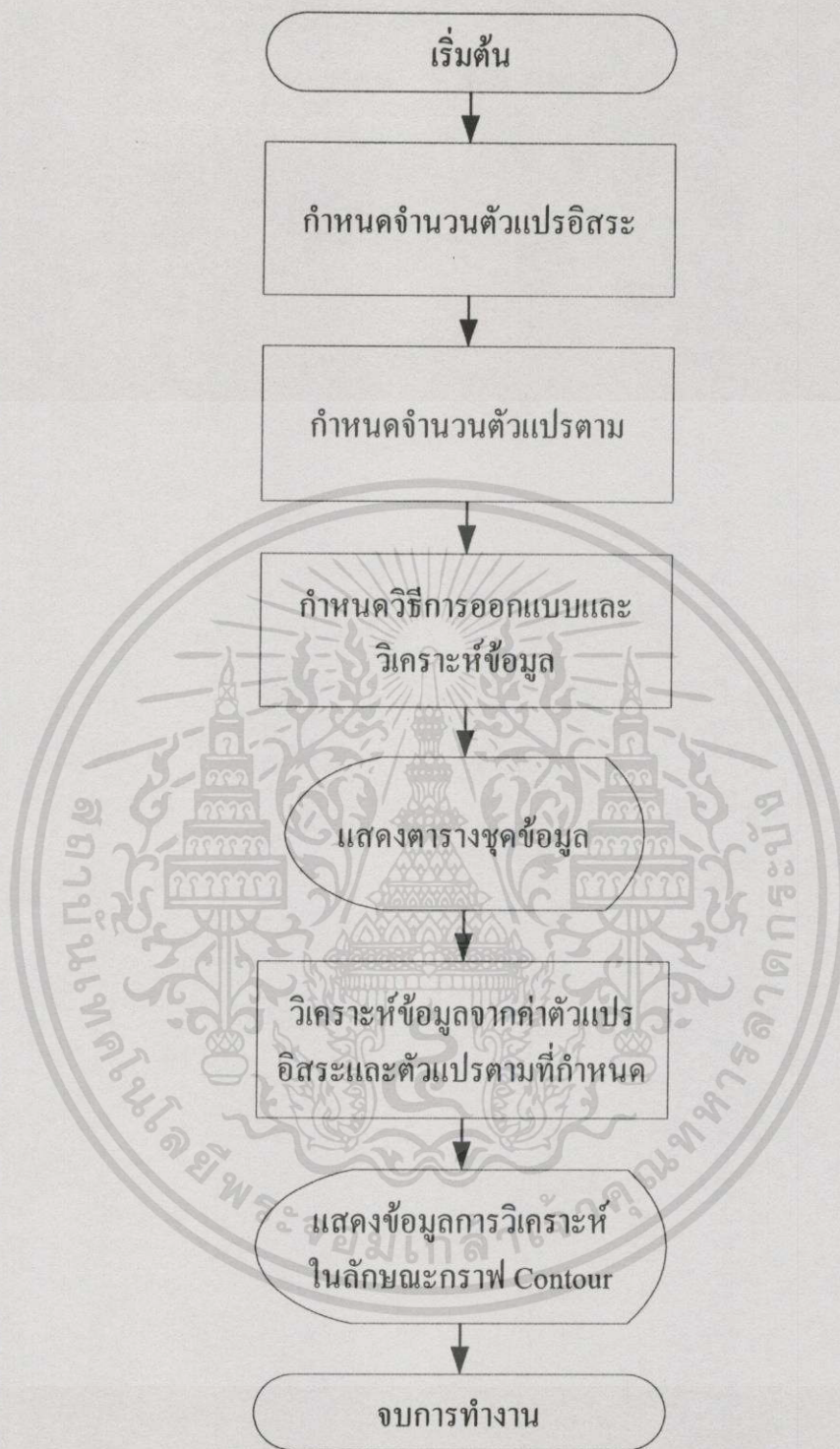


รูปที่ 4.10 แสดงรูปการกำหนดผลการวิเคราะห์ข้อมูลพารามิเตอร์ตามเทียบกับพารามิเตอร์อิสระ

รูปที่ 4.10 แสดงการกำหนดวิธีแสดงผลของการวิเคราะห์ข้อมูลโดยทำการแสดงผลแบบกราฟ Contour ที่มีลักษณะสองมิติโดยทำการสร้างกราฟเทียบระหว่างแกนตั้งเป็นค่า B\_Force และแกนนอนเป็น B\_Power โดยทำการเปลี่ยนชุดของพารามิเตอร์ในช่องแกนตั้งและแกนนอน

จากกระบวนการจัดการทางโปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติสามารถนำมาเขียนเป็นไฟล์ชาร์ตเรียงลำดับขั้นตอนการใช้งานของโปรแกรมวิเคราะห์ผลโดยแสดงในรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 โฟลชาร์ตการใช้งานของโปรแกรมวิเคราะห์ด้วยวิธี RSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลการทดลองและวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งเป็นการทำออปติไมเซชันพารามิเตอร์จากเงื่อนไขการทดลอง โดยนำเทคนิค RSM มาช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลแล้วนำข้อมูลที่ได้จากการ ออปติไมเซชันมาทำการยืนยันผลการวิเคราะห์ ส่วนที่สองทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ตอบสนองได้แก่ แรงเหวี่ยงและแรงดึงลวด กับพารามิเตอร์อิสระทั้ง 4 ตัวโดยนัยสำคัญของพารามิเตอร์การเชื่อมต่อแต่ละตัว จะเป็นตัวกำหนดคุณภาพของการเชื่อมต่อในกระบวนการต่อไป

#### 5.1 อุปกรณ์การทดลอง

- เครื่องเชื่อมลวดทองคำ ASM AB339(ผนวก ก)
- เครื่องทดสอบแรงเหวี่ยง Royce 550
- เครื่องทดสอบแรงดึง UNITEK Micropull
- เครื่องวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Hisomet Union85210
- เฟรมทองแดงแบบตัวถัง SOIC
- ชิปวงจรรวมที่มีขนาดพื้นที่ลูมินัม 4mil x 4mil
- ลวดทองคำ TANAKA GPG TYPE, EL. 2-6%, T.S 6-10 gm 0.8mil
- หลอดบรรจุลวดทองคำ Microswiss 414FC-2009 -R3M, H10, CD13, T28 OR5
- SEM Leica Stereo Scan 440

#### 5.2 ขั้นตอนการทดลอง

ทำการสร้างเงื่อนไขการทดลองจากพารามิเตอร์อิสระในการเชื่อมต่อทั้ง 4 ตัวโดยแบ่งระดับของแต่ละพารามิเตอร์ออกเป็นสามระดับ ดังนั้นจะได้เงื่อนไขการทดลองเท่ากับ  $3^4$  หรือ 81 ระดับการทดลองโดยพารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัวคือ

1. Bond\_Force : 20, 30, 40 gf
2. Bond\_Power : 50, 75, 90 mW
3. Bond\_Time : 10, 15, 20 sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด 4. Temperature : 180°C, 215°C, 230°C อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากระดับการทดลองทั้งหมดถูกกำหนดจากจำนวนพารามิเตอร์ที่มี กับจำนวนระดับข้อมูลของตัวแปรที่แบ่งออกเป็นสามระดับ ดังนั้นจำนวนการทดลองที่มีมากทำให้ต้องใช้จำนวนวัสดุที่เพิ่มขึ้น

รวมถึงเวลาที่ทำการเก็บข้อมูล ซึ่งการเก็บข้อมูลทั้งหมดตามเงื่อนไขที่ได้จากการคำนวณอาจจะมีบางช่วงข้อมูลไม่มีนัยสำคัญในการวิเคราะห์ ในงานวิจัยนี้จึงทำการเลือกเพียง 20 ชุดข้อมูลตามตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงเงื่อนไขการทดลองจาก 4 พารามิเตอร์และแบ่งช่วงข้อมูล 3

Run	B_Time(gf)	B_Power(mW)	B_Force(gf)	Temp (°C)
1	10	50	20	180
2	10	70	40	230
3	10	90	30	205
4	15	50	40	205
5	15	70	30	180
6	15	90	20	205
7	20	50	30	230
8	20	70	20	205
9	20	90	40	180
10	20	50	20	180
11	20	70	40	230
12	20	90	30	205
13	10	50	40	205
14	10	70	30	180
15	10	90	20	230
16	15	50	20	230
17	15	70	20	205
18	15	90	40	180
19	10	50	40	180
20	10	70	30	230
21	10	90	20	205
22	15	50	30	205
23	15	70	20	180
24	15	90	40	230

ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

Run	B_Time(gf)	B_Power(mW)	B_Force(gf)	Temp( $^{\circ}$ C)
51	15	90	20	180
52	20	50	30	180
53	20	50	30	230
54	20	90	40	205
55	10	90	20	180
56	10	50	40	230
57	10	70	30	205
58	10	90	40	205
59	15	50	30	180
60	15	70	20	230
61	20	90	30	230
62	20	50	20	205
63	20	70	30	180
64	10	50	30	180
65	10	70	20	230
66	10	90	40	205
67	15	50	30	205
68	15	70	40	180
69	15	90	30	230
70	20	50	40	230

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกร ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

Run	B_Time(gf)	B_Power(mW)	B_Force(gf)	Temp (°C)
71	20	70	30	205
72	20	90	20	180
73	10	70	30	180
74	10	90	40	230
75	10	50	30	205
76	15	70	40	205
77	15	90	30	180
78	15	50	20	230
79	20	70	30	230
80	20	90	20	180
81	20	50	40	180

จากตารางที่ 5.1 เป็นการแสดงเงื่อนไขการทดลองของพารามิเตอร์อิสระทั้งสี่ตัวโดยมีจำนวนทั้งหมด 81 การทดลอง ในแถบสีเทาของตารางแสดงเงื่อนไขการทดลอง เป็นชุดที่นำมาทดลองเก็บข้อมูลจริงโดยทำการสุ่มตัวอย่างหนึ่งในสี่ของจำนวนตัวอย่างทั้งหมด ในหลักการสุ่มชุดทดลอง จะให้มีการเฉลี่ยของระดับการทดลองข้อมูลมีลักษณะผสมกันไป ดังนั้นสามารถนำมาสร้างเป็นตารางใหม่โดยแสดงในตารางที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่จำกัดใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 ชุดข้อมูลการทดลองของพารามิเตอร์อิสระทั้ง 4 ตัวที่ได้จากการสุ่มชุดตัวอย่างการทดลองจากตารางที่ 5.1

Run	B_Time(sec)	B_Power(mW)	B_Force(gf)	Temp ( $^{\circ}$ C)
1	10	50	20	180
2	20	50	30	180
3	20	50	40	180
4	10	70	40	180
5	15	90	20	180
6	20	90	20	180
7	10	90	40	180
8	20	50	20	205
9	10	50	40	205
10	10	90	20	205
11	20	90	40	205
12	10	50	20	230
13	10	50	30	230
14	20	50	40	230
15	10	70	20	230
16	20	70	30	230
17	15	70	40	230
18	20	90	20	230
19	15	90	30	230
20	10	90	40	230

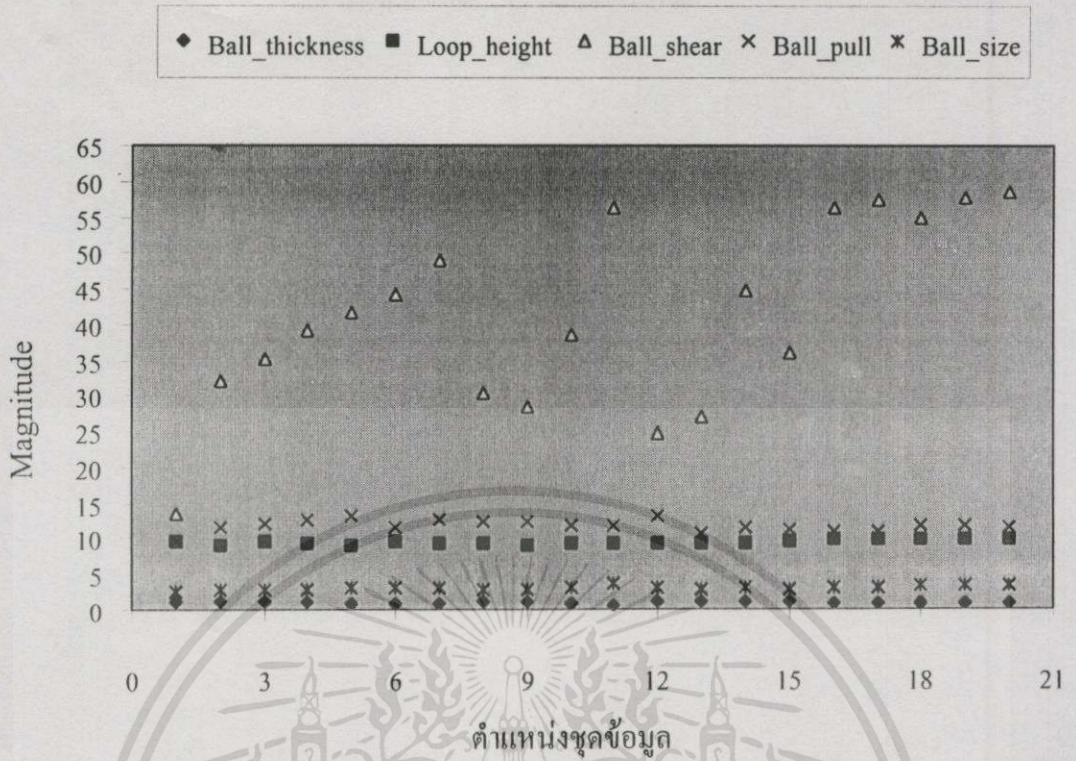
ตารางที่ 5.2 เป็นชุดข้อมูลที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างจากชุดข้อมูลทั้งหมด 81 ชุด ค่าตัวแปรอิสระที่แสดงในตารางจะถูกนำไปตั้งค่าให้กับเครื่องเชื่อมต่อเพื่อทำการเชื่อมต่อจริงทั้งหมด 20 ชุด การทดลอง หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบค่าตัวแปรตามต่อไปโดยแสดงค่าการทดสอบทั้งหมดในตารางที่ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ตามจำ 5 ตัวจากการตั้งค่าตัวแปรอิสระให้กับเครื่องเชื่อม  
 ต่อตามตารางที่ 5.2

Run	Ball Shear (gf)	Ball_Size (mil)	Ball_Pull (gf)	Ball Thickness (mil)	Loop Height (mil)
1	13.55	2.67	9.61	1.19	9.54
2	32	2.72	11.61	1.12	9.05
3	35.24	2.88	12.03	1.02	9.62
4	39.04	2.92	12.62	1.04	9.26
5	41.65	3.09	13.28	0.95	9.08
6	44.14	3.12	11.65	0.89	9.49
7	49.14	3.11	12.79	0.81	9.34
8	30.47	2.68	12.4	1.12	9.2
9	28.28	2.71	12.25	1.06	9.05
10	38.56	2.98	11.84	0.94	9.36
11	56.18	3.64	11.87	0.66	9.16
12	24.71	2.96	13.25	1.19	9.42
13	26.86	2.68	10.8	1.21	9.4
14	44.82	2.99	11.47	1.06	9.36
15	36.11	2.83	11.33	1.1	9.56
16	56.36	3.15	11.01	0.89	9.83
17	57.4	3.21	10.96	0.86	9.78
18	54.98	3.3	11.8	0.88	9.93
19	57.78	3.25	11.75	0.79	9.85
20	58.38	3.28	11.51	0.86	9.81

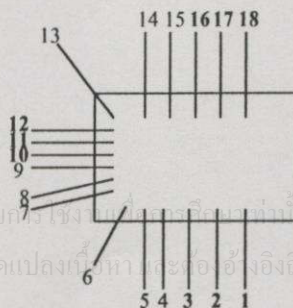
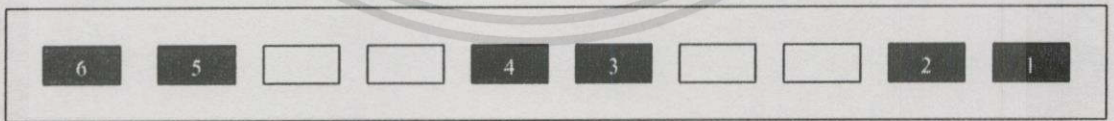
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะวิธีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลกับผลเอ้าท์พุทการทดลอง

เมื่อนำผลจากการทดลองมาพล็อตกราฟ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ตบสองแต่ละตัวดังรูปที่ 5.1 ค่าแรงเดือนในรูปแบบจะมีความแปรปรวนของข้อมูลการเลือกชุดข้อมูลจึงเป็นการอุปถัมภ์พารามิเตอร์อิสระที่เกิดขึ้น เพื่อให้ได้ค่าของตัวแปรที่จะนำไปใช้งานอย่างถูกต้องและเหมาะสม

5.2.1 การกำหนดตำแหน่งของชิ้นงานในการเก็บข้อมูลบนสตริป Lead Frame



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาใดๆของเอกสารนี้ส่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

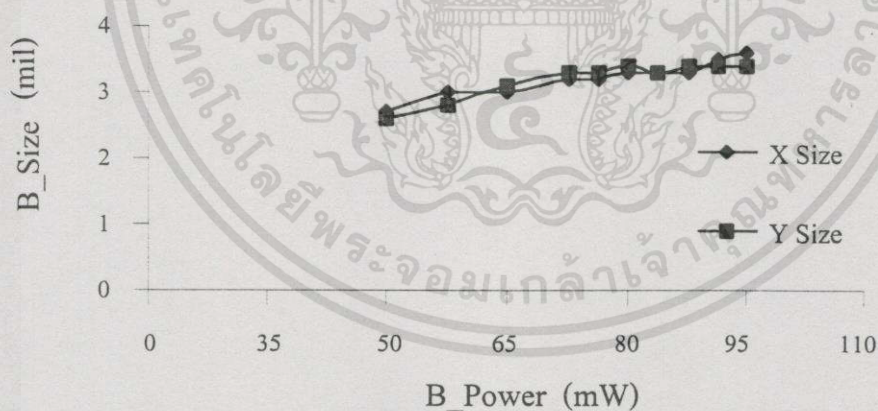
รูปที่ 5.2 ตำแหน่งของชิ้นงานสตริปและตำแหน่งของลวดทองกำบนชิ้นงาน

การกำหนดตำแหน่งชิ้นงานบนสตริป และการเลือกใช้ตำแหน่งของลวดที่ทำวัดค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.2 โดยการกำหนดให้ตำแหน่งชิ้นงานที่ 1,2,3,5,6,9,10 บนสตริปเป็นส่วนที่ใช้งาน โดยทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอลทองคำ ขนาดความหนาของลูกบอลทองคำ และความสูงของลูป หลังจากนั้นทำการวัดค่าแรงเฉือนแรงดึงลวด ซึ่งตำแหน่งลวดที่ทำการวัดเป็นตำแหน่งที่ 1,2,3 - 10,11,12 - 16,17,18 บนชิปวงจรรวม

### 5.3 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อ

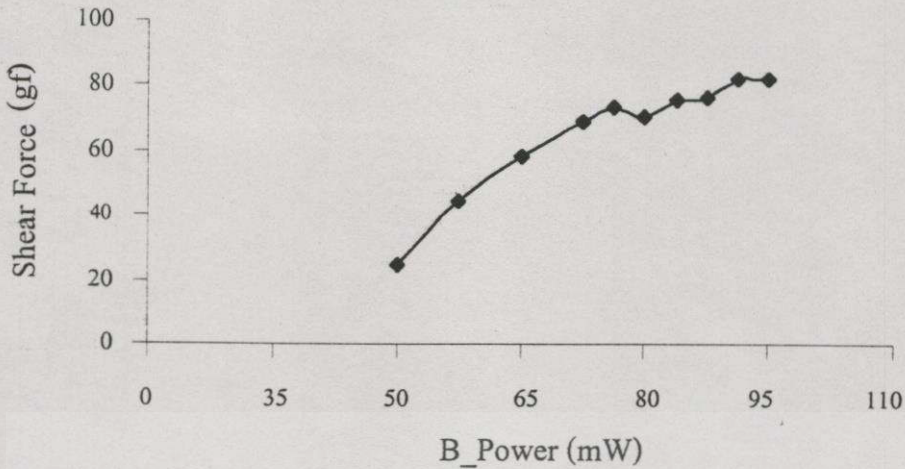
#### 5.3.1 ผลเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอลทองคำกับค่าแรงกั้นเฉือน

พลังงานจากการสั่นเป็นการทำให้อะตอมทองคำแพร่ซึมเข้าไปในอลูมิเนียม เกิดการเชื่อมต่อกันเป็นลักษณะโอห์มิกขึ้น ดังนั้นแรงยึดระหว่างอะตอมทั้งสองจะมีค่าสูงได้จำเป็นต้องให้พลังงานการสั่นมีค่าๆ หนึ่งซึ่งสัมพันธ์ระหว่างขนาดพื้นที่อลูมิเนียมบนวงจรรวม กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดทองคำ จากกราฟ 5.3 เป็นกราฟแสดงค่า B\_Power ในช่วง 50-90mW เมื่อค่าพลังงานการสั่นเพิ่มขึ้นทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามในทิศทางทั้งแกน x และแกน y โดยพิจารณาจากค่าแรงเฉือนที่มีค่าสูงในกราฟรูปที่ 5.4 จากค่าออปติไมเซชันบน Contour Chat จะได้ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 3.10 mil ที่ B\_Power = 70 mW จากลักษณะกราฟเปรียบเทียบในรูป 5.3 เมื่อเพิ่ม



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดทองคำกับค่าพลังงานการสั่น

ขนาดของพลังงานการสั่นขึ้นจะไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด ดังนั้นการพิจารณาค่าที่เหมาะสมของพลังงานในการสั่นจะขึ้นอยู่กับค่าแรงเฉือนที่สูงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทองคำที่ทำการสัมผัสกับจุดเชื่อมต่อที่เป็นอลูมิเนียมของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

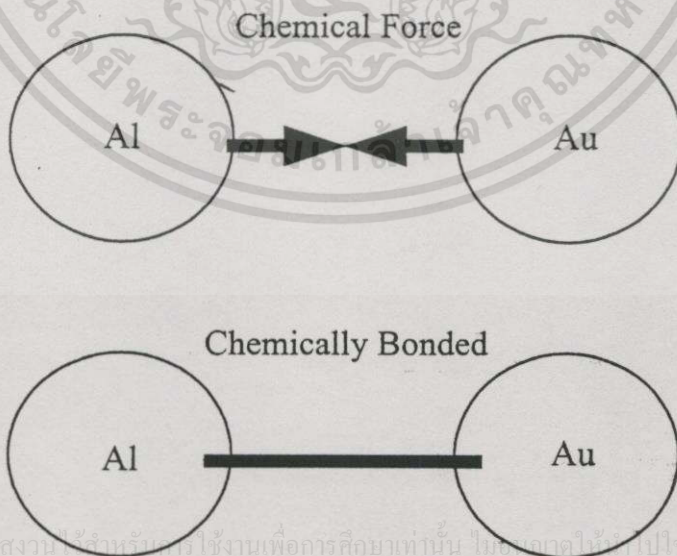


รูปที่ 5.4 กราฟแสดงค่าแรงเค้นเฉือนกับขนาดพลังงานการสั่น

เมื่อเทียบรูป 5.3 และ 5.4 ค่าแรงเค้นเฉือน จะมีค่าสูงขึ้นตามขนาดพลังงานการสั่นที่เพิ่มขึ้นจากผลการออปติไมเซชันทำให้ประมาณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 3.10 mil และ ได้ค่าแรงเค้นเฉือน 54.56 gf ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

### 5.3.2 ผลเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอลทองคำกับค่าแรงกด

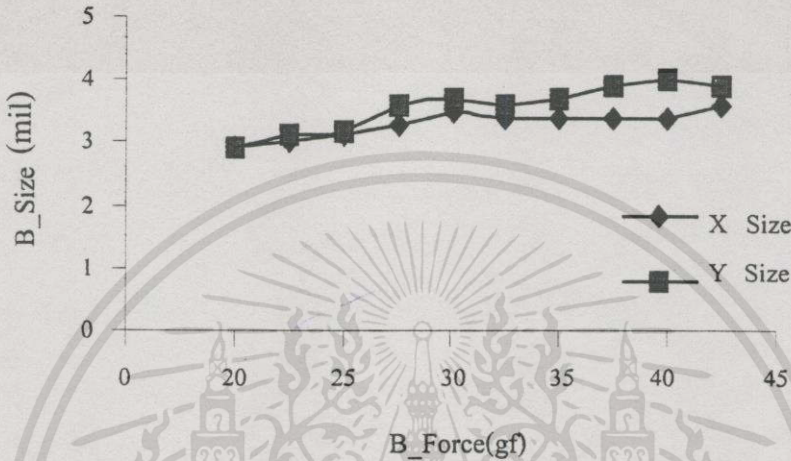
แรงกดเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ทำให้เกิดแรงยึดระหว่างอะตอมของวัสดุทั้งสองจากรูปที่ 5.5 เป็นการแสดงแบบจำลองแรงยึดของอลูมิเนียมกับทองคำก่อนทำการเชื่อมต่อและหลังทำการเชื่อมต่อ



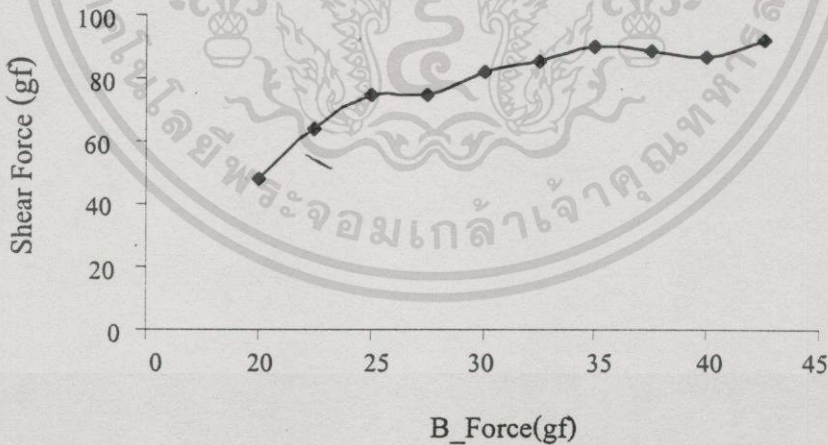
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.5 แสดงโครงสร้างแรงยึดทางเคมีของอลูมิเนียมกับลวดทองคำ

แรงกดที่กระทำลวดทองคำเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ทำให้ คุณภาพของการเชื่อมต้อมีค่าสูง ขึ้นหรือต่ำลง เมื่อทำการเปรียบเทียบกราฟรูปที่ 5.6 และ 5.7 ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางลวดทองคำที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับค่าแรงเฉือนในรูปที่ 5.7 ดังนั้นการพิจารณาจะขึ้นอยู่กับค่าแรงเฉือน ที่สูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทองคำที่เหมาะสมกับพื้นที่อูมิเนียม



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดทองคำกับค่าแรงกด

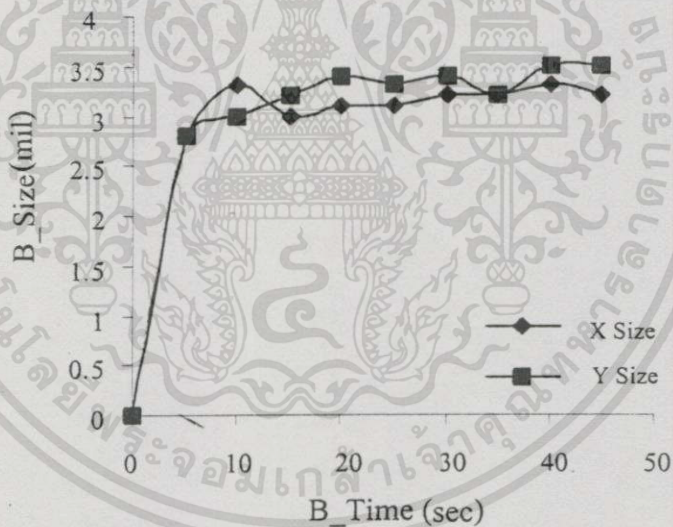


รูปที่ 5.7 กราฟแสดงค่าแรงเค้นเฉือนกับค่าแรงกดที่กระทำกับลวดทองคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่จํากรณใดจําทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

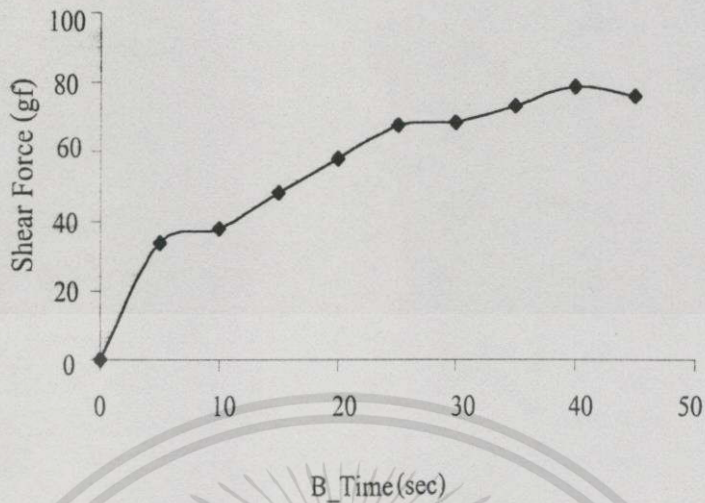
### 5.3.3 ผลเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอลทองคำกับค่าเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อ

เวลาที่ใช้ในการเชื่อมตอลูกบอลทองคำมีความสำคัญ ต่อปริมาณของจำนวนชิ้นงานที่ได้ หรือจำนวนผลผลิตที่ได้ ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการลดไซเคิลไทม์ของการผลิต การใช้เวลาในการเชื่อมต่อที่นานไม่สามารถทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอลทองคำมีขนาดใหญ่ขึ้นจากรูปที่ 5.8 เป็นกราฟแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอลทองคำเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นแสดงว่าไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแต่อย่างใด จากรูปมีแนวโน้มของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาเพิ่มเป็น 50 sec แต่ค่าเวลาที่เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อแรงดันเนื่องจากรูปที่ 5.8 เนื่องจากหัว Capillary มีเวลามากในการใช้พลังงานในการสั่นจากการเชื่อมต่อค่าที่เหมาะสมในการเลือกคือ 20 sec เป็นค่าที่เหมาะสมโดยค่าที่ต่ำกว่าโอกาสที่จะไม่เกิดเสถียรในการเชื่อมตอมีสุง จากค่าเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อที่ 20 sec จะให้ค่าแรงดันที่สูงด้วยเช่นกัน



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอลทองคำกับค่าเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อ

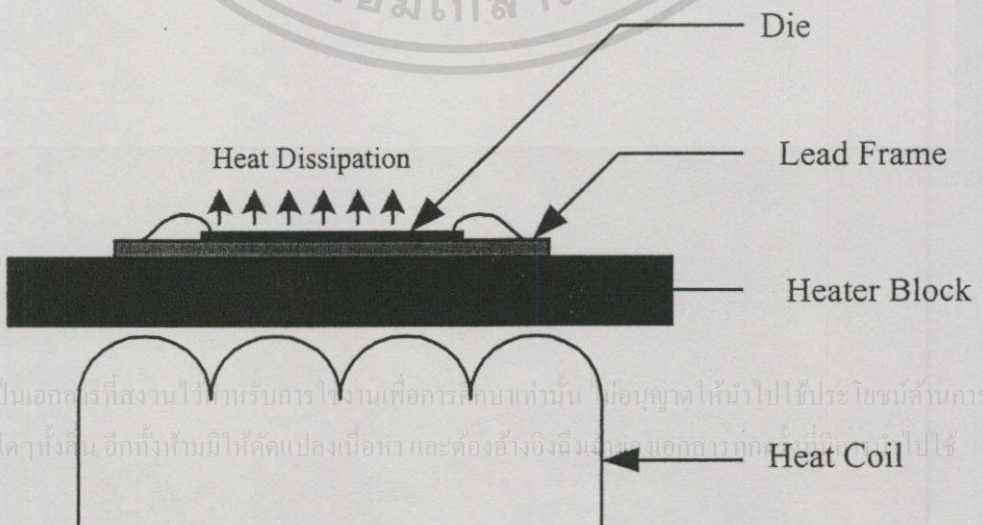
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำมาใช้



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงค่าแรงเค้นเฉือนกับค่าเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อ

#### 5.3.4 ผลเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอลทองคำกับอุณหภูมิ

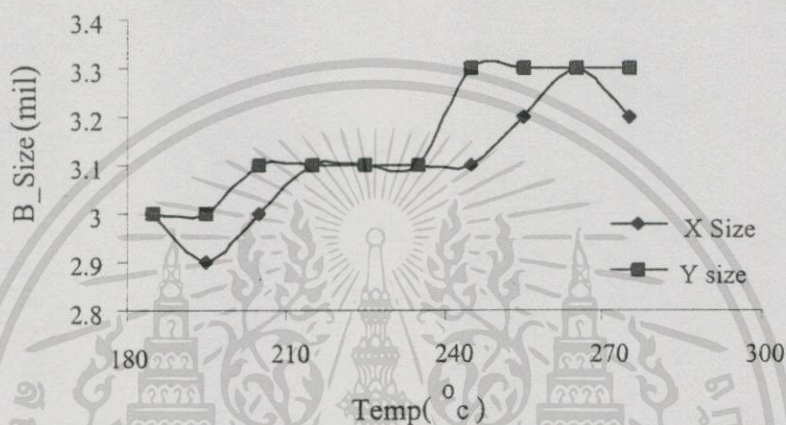
จากรูปที่ 5.10 เป็นการส่งผ่านความร้อนจากขดลวดความร้อนผ่านฮีตเตอร์บล็อกซึ่งมีแผ่นวงจรรวมที่ติดกับเฟรมทองแดงวางอยู่บนฮีตเตอร์บล็อก ความร้อนจะกระจายขึ้นสู่บนวงจรรวมที่ติดกับเฟรมทองแดงเพื่อรอทำการเชื่อมต่อ ความร้อนที่ใช้จะต้องมีค่าไม่สูงมากเนื่องจากจะทำให้เกิดผลเสียต่อจุดเชื่อมต่อที่เป็นลิวินัมบนวงจรรวม เป็นผลให้เกิดการออกซิเดชันบนเฟรมทองแดงและเกิดคราบ ออกไซด์ขึ้นที่เฟรมทองแดงเมื่อนำแผ่นชิปดังกล่าวไปทำการขึ้นรูปตัวถังและผ่านกระบวนการทดสอบทางด้านเชิงกลของตัวถังทำให้ออกไซด์เกิดการขยายตัวขึ้นอีกครั้ง เนื่องจากความร้อนในขั้นตอนของ การทดสอบตัวถังเป็นผลให้ตัวถังที่เป็นพลาสติกเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการเกิดออกไซด์ที่ต่อเนื่องและไม่สามารถนำมาใช้งานได้



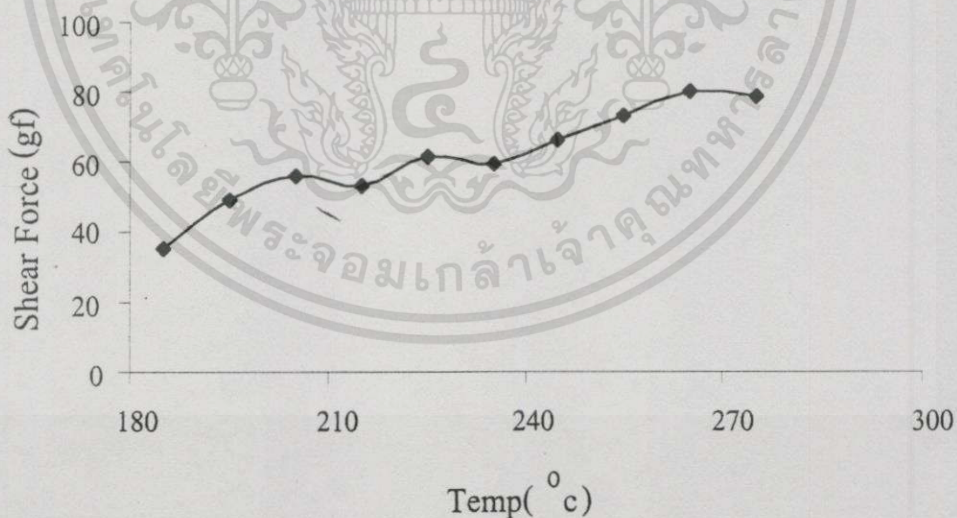
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงแหล่งเอกสารทุกครั้งที่นำไปใช้

รูปที่ 5.10 การส่งผ่านความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมต่อไปสู่วงจรรวม

ดังนั้นการกำหนดอุณหภูมิจึงเป็นพารามิเตอร์ที่มีค่าจำกัด และ จะต้องเลือกค่าที่เหมาะสม ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นอีกประการหนึ่งของกระบวนการเชื่อมต่อแบบเทอร์โมโซนิค จากรูปที่ 5.11 เป็นกราฟที่ทำการพล็อตเพื่อผลของอุณหภูมิกับขนาดลูกบอลทองคำและรูปที่ 5.12 เป็นกราฟที่แสดงผลของแรงเฉือนเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเชื่อมต่ออยู่ที่  $230^{\circ}\text{C}$  จากการกำหนดค่าอุณหภูมิที่ฮิตเตอร์



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอลทองคำกับผลของอุณหภูมิ



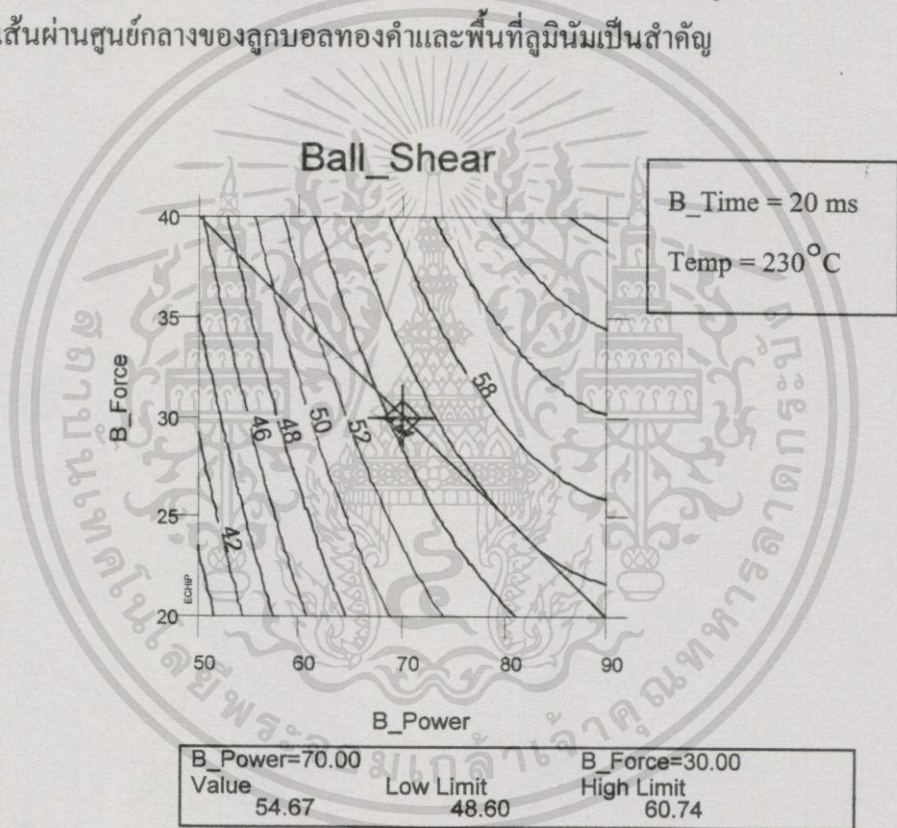
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงค่าแรงเฉือนกับผลของอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 การวิเคราะห์ผลโดยการออปติไมเซชันพารามิเตอร์

### 5.4.1 ผลวิเคราะห์ผลแรงเฉือนที่กระทำกับลูกบอลทองคำที่ได้จากการออปติไมเซชัน

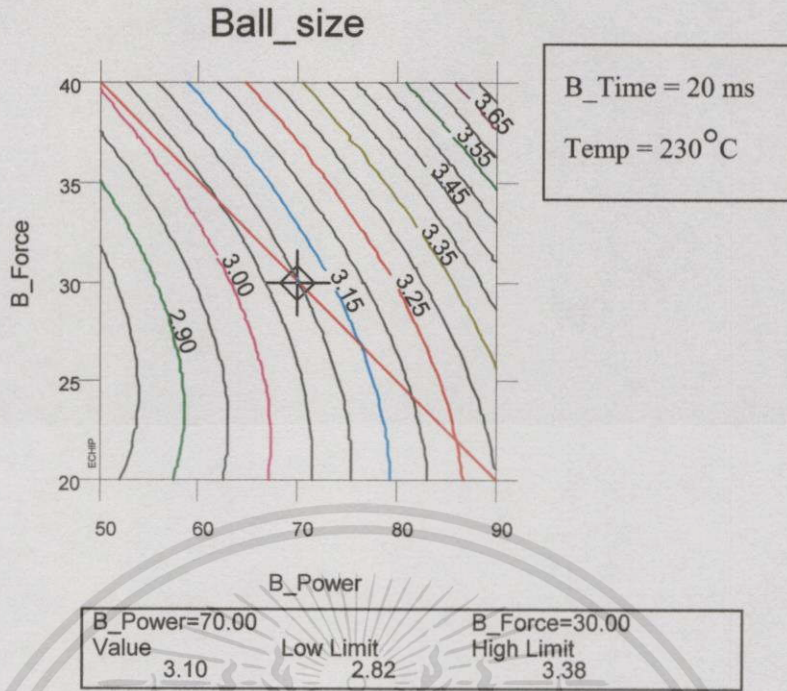
รูปที่ 5.13 แสดง Contour Chart ของแรงเค้นเฉือนที่กระทำกับลวดทองคำหลังการเชื่อม ต่อโดยลักษณะกราฟที่ได้เป็นการกำหนดค่าคงที่ให้กับอุณหภูมิและ เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อการศึกษาค้นคว้าวิจัยสำคัญของการเชื่อมขึ้นกับผลของแรงกดและ พลังงานในการสั่นเป็นสำคัญโดย ค่าแรงเค้นเฉือนที่ได้มีค่าเท่ากับ 54.67 gf ในขณะที่มาตรฐานของโรงงานผู้ผลิตกำหนดค่าแรงเค้นเฉือนต่ำสุดที่ 35 gf เมื่อพิจารณาจากกราฟ Contour สามารถกำหนดค่าแรงเค้นเฉือนที่ต้องการได้ โดยการเลื่อนจุดออปติไม้มไปบนเส้นหรือบนพื้นที่ในกราฟได้โดยขึ้นอยู่กับการพิจารณาควบคู่ไป กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอลทองคำและพื้นที่ลูมินัมเป็นสำคัญ



รูปที่ 5.13 ผลการออปติไมเซชันค่าแรงเค้นเฉือนที่กระทำกับลูกบอลทองคำ

### 5.4.2 ผลวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอลทองคำที่ได้จากการออปติไมเซชัน

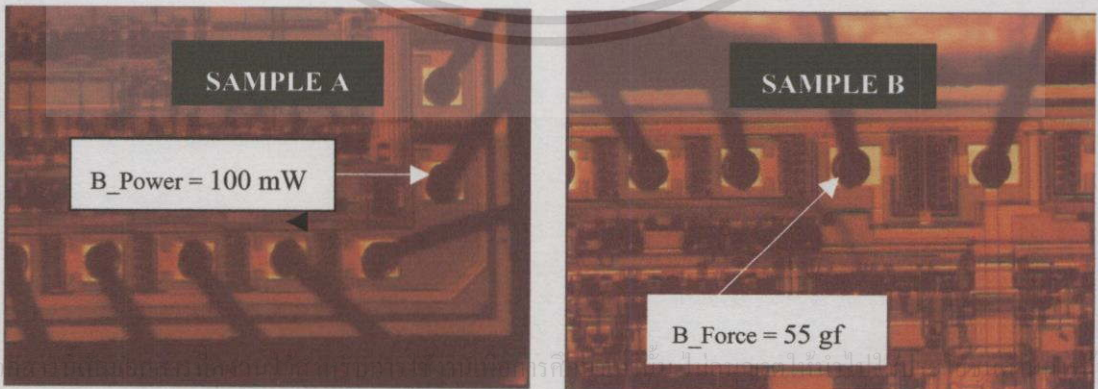
จากรูปที่ 5.14 แสดงผลการออปติไมเซชันเส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอลทองคำที่ได้จาก กราฟ Contour โดยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้มีค่าเท่ากับ 3.10 mil ทำการเชื่อมต่อกับพื้นที่ลูมินัม ขนาด 110 $\mu$ m การที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 ผลการอปติไมเซชันเส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอลทองคำที่ขนาดพื้นที่อลูมิเนียม 110  $\mu\text{m}$

5.4.3 ผลวิเคราะห์ผลขนาดลูกบอลทองคำด้วยกล้องจุลทรรศน์

จากผลการศึกษาโดยการอปติไมเซชันตัวแปรต่างๆ ทำให้ทราบว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอลทองคำได้แก่ B\_Power และ B\_Force จากรูปที่ 5.15 เป็นรูปจากกล้องกำลังขยายสูงในรูป (a) เป็นการเพิ่มค่าพลังงานในการสั่นมากกว่าค่าที่ได้จากการอปติไมเซชันหรือมากกว่า 70 mW ทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางมีการขยายออกทางด้านแกน Y และ รูป (b) ทำการเพิ่มค่า B\_Force สูงขึ้นไปทำให้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางขยายออกนอกกรอบพื้นที่อลูมิเนียม



ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง (a) มิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร (b) ที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.15 แสดงภาพถ่ายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยกล้องจุลทรรศน์โดยรูป a เพิ่ม B\_Power มากกว่าค่าอปติไม้ม (b) เพิ่ม B\_Force มากกว่าค่าอปติไม้ม

การขยายออกของลูกบอลทองคำจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีก 4 % เนื่องจากค่าผิดพลาดของเครื่องเชื่อมต่อ ลวดทองคำ จากรูปที่ 5.16 (a) เป็นตัวอย่างชิ้นงาน A ที่ทำการเชื่อมต่อลวดทองคำด้วยพารามิเตอร์ ที่ได้จากการออปติไมเซชันทั้งหมด (b) เป็นตัวอย่างชิ้นงาน B ที่ทำการเชื่อมต่อด้วยค่าพารามิเตอร์ ที่ได้จากการออปติไมเซชันเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปที่ 5.5 และ 5.6 นัยสำคัญสูงสุดของพารามิเตอร์ ที่ใช้ในการเชื่อมต่อคือ ค่า B\_Force, B\_Power โดยผลกระทบของพารามิเตอร์ส่วนที่เหลือถูก กำหนดให้เป็นค่าคงที่เนื่องจากมีผลกระทบข้างเคียงสูงต่อกระบวนการเชื่อมต่อและวัสดุที่ใช้ ประกอบในการเชื่อม

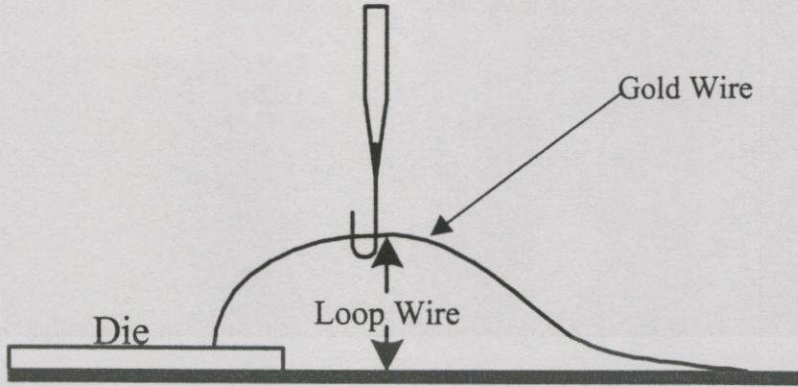


รูปที่ 5.16 (a) ภาพถ่ายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากการออปติไมซ์ตัวอย่างชิ้นงาน A และ (b) ภาพถ่ายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากการออปติไมซ์ตัวอย่างชิ้นงาน B

#### 5.4.4 ผลวิเคราะห์ผลแรงดึงที่กระทำกับลวดทองคำ

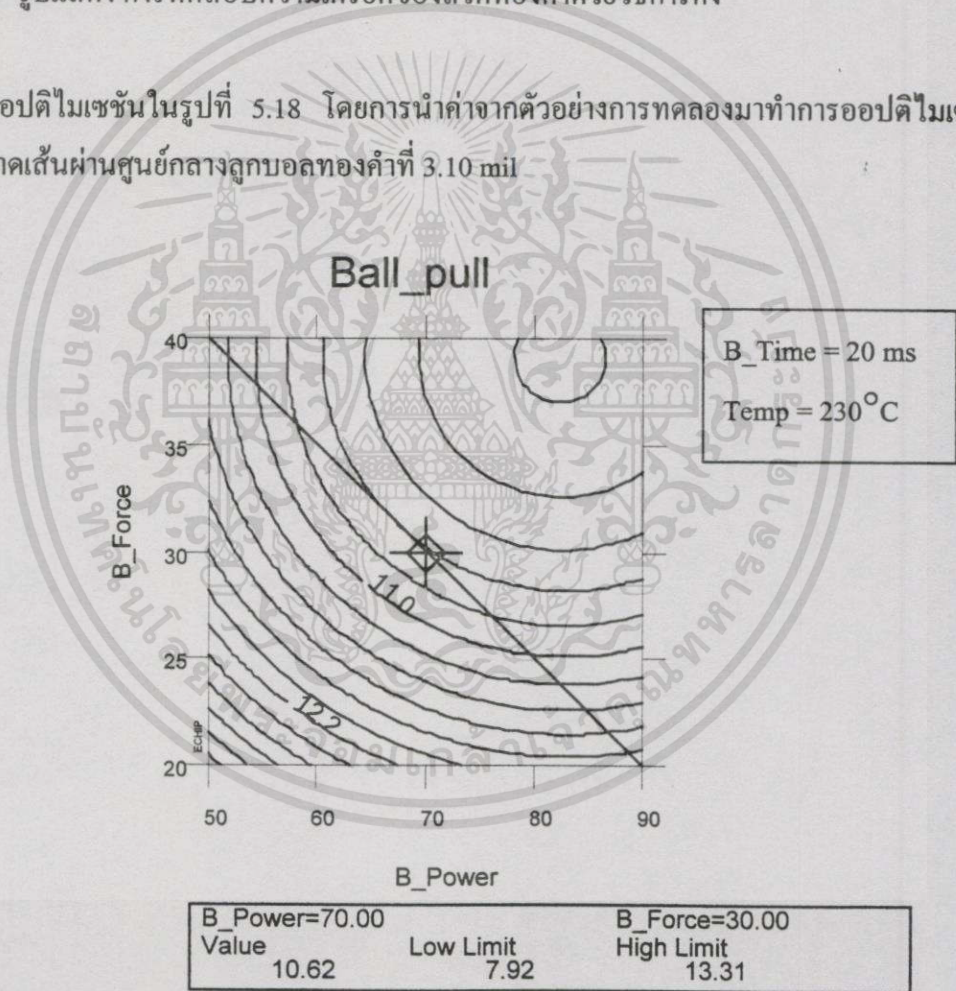
จากการศึกษาผลของแรงดึงลวดโดยใช้ Pull Tester เป็นการใช้เข็มที่มีปลายโค้งงอทำการ เกี่ยวลูปของลวดให้ขาดแสดงดังรูปที่ 5.17 กล่าวคือเป็นการทดสอบค่าความเครียดที่เกิดขึ้นกับลวด ทองคำที่มีจุดยึดสองจุดบนวงจรรวมและบนตัวถัง ดังรายละเอียดในบทที่ 3 แรงยึดของจุดทั้งสองค่า จำเป็นต้องมีค่าที่สูง เนื่องจากค่าแรงดึงที่สูงจะมีแรงยึดระหว่างวัสดุทั้งสองสูงด้วยเป็นผลทำให้คุณภาพในการเชื่อมมีค่าสูงตาม จากผลการศึกษาระหว่างพารามิเตอร์อิสระและพารามิเตอร์ตาม โดย การออปติไมเซชันจะได้ค่าแรงดึงที่ 10.62 gf ปัญหาที่พบจากการทดสอบด้วยวิธีการดึงลวดคือ การ หลุดออกตรงส่วนที่เป็นลูกบอลทองคำจากพื้นที่อูมิเนียมหรือการเกิด Intermetallic สาเหตุของ การเกิดมีด้วยกันหลายประการคือ พื้นที่อูมิเนียมที่ทำการเชื่อมต่อมีความสกปรก หรือการกำหนด ค่าพารามิเตอร์อิสระไม่เหมาะสมโดยมีค่า B\_Force หรือ B\_Power น้อยเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 รูปแสดง การทดสอบความเครียดของลวดทองคำด้วยวิธีการดึง

จากการออปติไมเซชันในรูปที่ 5.18 โดยการนำค่าจากตัวอย่างการทดลองมาทำการออปติไมเซชัน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดทองคำที่ 3.10 mil

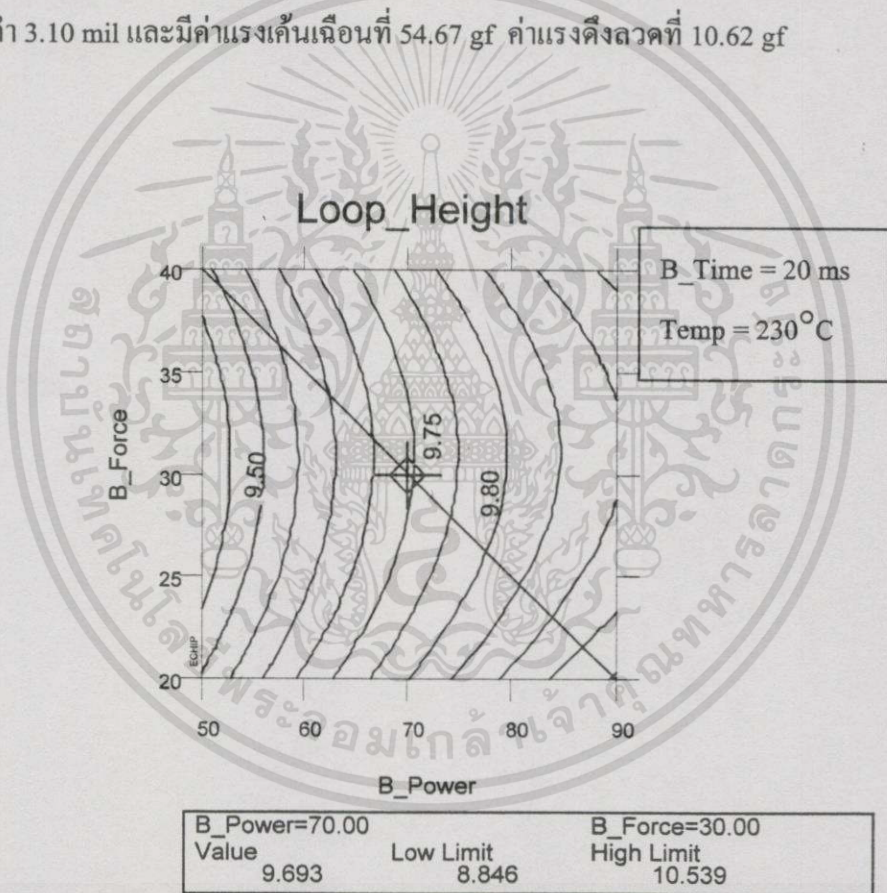


รูปที่ 5.18 ผลออปติไมเซชันแรงดึงลวดทองคำที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดทองคำ 3.1 mil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.4.5 ผลวิเคราะห์ความสูงของลวดทองคำ

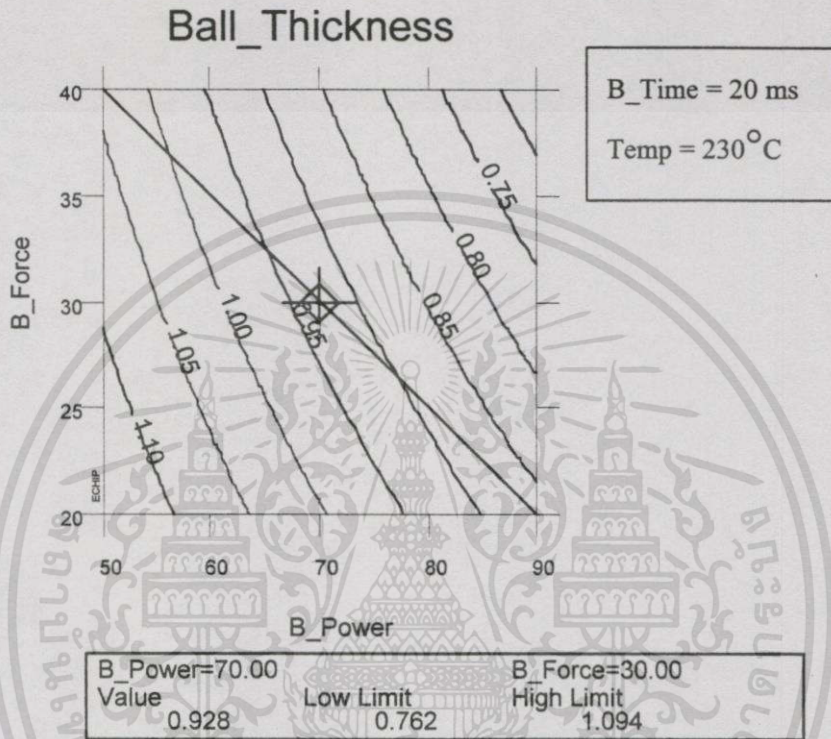
ความสูงของลวดทองจากการเชื่อมต่อ ด้วยวิธีการเชื่อมต่อด้วยวิธีเทอร์โมโซนิกจะทำให้เกิดลูปดีฟอรัมเมชันขึ้นกล่าวคือเกิดการขีดตัวของลวดทองคำ ดังนั้นจึงได้นำคุณสมบัติของการขีดตัวกล่าวมาใช้งาน การขีดตัวของลวดมีผลทำให้ความแข็งแรงของลวดลดลง การเชื่อมต่อที่ความสูงมากๆ จะไม่เกิดผลดีหลายประการเช่น เกิด Wire Sweep จากการล่องขึ้นรูปตัวถังคอมปาวด์ที่ฉีดเข้าที่บล็อกขึ้นรูปตัวถังจะทำการพัดให้ลวดทองคำการการล้มทับกัน ความยาวของลวดเกินความจำเป็นซึ่งมีผลโดยตรงกับค่าความนำไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการเชื่อมต่อ การจำกัดค่าความสูงของลวดจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการเชื่อมต่อด้วยวิธีเทอร์โมโซนิก การกำหนดตัวแปรที่ให้ค่าความสูงของลวดแสดงดังรูปที่ 5.19 ซึ่งได้ความสูงที่ 9.693 mil ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดทองคำ 3.10 mil และมีค่าแรงเค้นเฉือนที่ 54.67 gf ค่าแรงดึงลวดที่ 10.62 gf



รูปที่ 5.19 ผลการอปติไมเซชันความสูงลวดทองคำที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดทองคำ 3.1 mil และแรงเค้นเฉือนที่ 54.67 gf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.21 เป็นการเชื่อมต่อที่ไม่สมบูรณ์ระหว่างวัสดุทั้งสองก็มีค่าแรงดึงลวดคัตเนื่องมาจากความหนาของลูกบอลมีค่าสูงที่เกิดจากค่าตัวแปรอิสระไม่เหมาะสม ทำให้บริเวณผิวสัมผัสได้ลูกบอลมีพื้นที่สัมผัสน้อย โดยค่าออปติไมเซชันที่เหมาะสมของพารามิเตอร์อิสระแสดงดังรูปที่ 5.22 โดยให้ความหนาที่ 0.928 mil



รูปที่ 5.22 ผลการออปติไมเซชันความหนาลูกบอลของค่าที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอลของค่า 3.1 mil และแรงเส้นเดือนที่ 54.65 gf

## 5.5 ผลเปรียบเทียบค่าออปติไมเซชันของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อ

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าจุดออปติไมซ์ต่างๆ บนรูป Contour โดยให้ค่าที่สูงกว่าและต่ำกว่าของจุดอ้างอิง

B_Power	B_Force	B_Time	Temp	B_Shear	B_Size	B_Thickness	B_Pull	Loop_Hight
80	35	20	230	58.2	3.37	0.804	10.07	9.818
70	35	20	230	47.05	3.2	0.891	10.27	9.707
70	30	20	230	54.67	3.1	0.928	10.62	9.693
70	25	20	230	41.94	3.04	0.966	11.23	9.722
80	25	20	230	45.93	3.18	0.89	11.02	9.836

ตารางที่ 5.5 อธิบายนัยสำคัญที่ได้จากตารางที่ 5.4 โดยแสดงเป็นค่าและค่าสูงของจุดออปติ้มับต่างๆ

B_Power	B_Force	B_Time	Temp	B_Shear	B_Size	B_Thickness	B_Pull	Loop_Hight
80	35	20	230	O	X	O	X	X
70	35	20	230	X	X	O	X	X
70	30	20	230	O	O	X	O	O
70	25	20	230	X	O	X	O	X
80	25	20	230	X	X	O	O	X

O คือ ค่าที่มีนัยสำคัญสูง

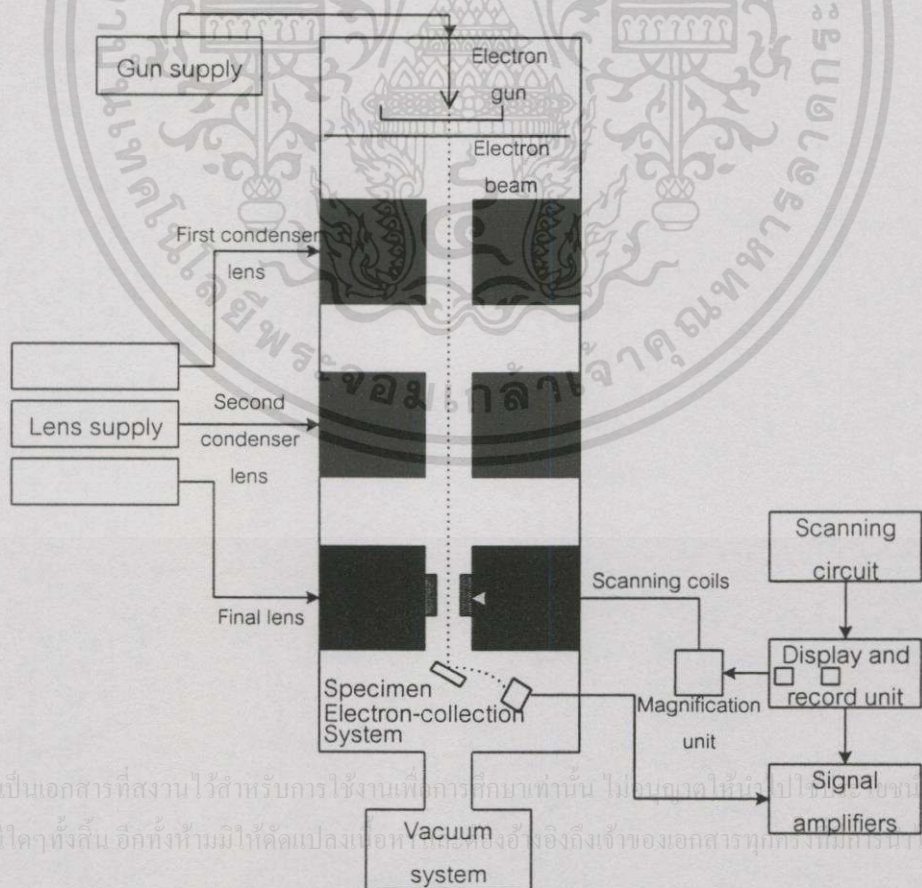
X คือ ค่าที่มีนัยสำคัญต่ำ

ผลจากการสรุปจุดต่างๆบน Contour กราฟโดยให้มีค่าที่สูงกว่าและต่ำกว่าจากจุดอ้างอิงบนเส้นโหนดสามารถเขียนสรุปเป็นตารางที่ 5.4 และ 5.5 ได้ว่าค่าที่เหมาะสมในแต่ละพารามิเตอร์คือ ค่าแรงเฉือนต้องมีค่าสูง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดต้องมีขนาดเล็กและเหมาะสมกับขนาดพื้นที่อลูมิเนียม ความหนาของลวดทองคำจะต้องมีค่าต่ำ ค่าแรงดึงลวดจะต้องมีค่าสูงและความสูงของลวดต้องมีค่าต่ำ ผลที่ได้จากการออปติไมเซชันจะให้ค่าค่าแรงเฉือนที่สูง(O) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดต้องมีขนาดเล็ก(O) แรงดึงลวดมีค่าสูง(O) ความสูงของลวดต้องมีค่าสูง(O) ในขณะที่ให้ผลของความหนาของลวดทองคำที่ไม่ดี(X) ดังนั้นจะได้ค่าที่ดี 4 ค่าและค่าที่ไม่ดี 1 ที่พารามิเตอร์อิสระ B\_Power = 70 mW, B\_Force=30 gf, B\_Time=20 sec, Temp = 230°C เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์อิสระชุดอื่นๆ แล้วจะให้ค่าที่สูงถึง 4 ค่าในขณะที่พารามิเตอร์ชุดอื่นมีเพียงค่าที่ดีที่สุดเพียง 2 ค่า

## 5.6 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วย SEM

Scanning Electron Microscopy (SEM) เป็นเทคนิคที่ใช้ดูลักษณะของพื้นผิวของผลิตภัณฑ์มีขนาดระดับไมครอน เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการดูลักษณะ โครงสร้างพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ ทำงานด้วยการยิงลำอิเล็กตรอนให้ไปโฟกัสตกเป็นจุดเล็ก ๆ บนเป้าซึ่งเป็นชิ้นงานตัวอย่าง แล้วเก็บรวบรวมและแสดงสัญญาณอิเล็กตรอนิกส์ ซึ่งปล่อยออกมาโดยวัสดุที่ใช้เป้าแล้วขยายเป็นภาพบนหลอดรังสีแคโทด (CRT ; Cathode-Ray Tube) ดังแผนภาพแสดงการทำงานของ Scanning electron microscope ในรูปที่ 5.23 ซึ่งแสดงรายละเอียดการทำงานโดยเริ่มจากปืนอิเล็กตรอนจะผลิตอิเล็กตรอนในช่วงว่างขนาด 10-20 mm แล้วควบคุมให้พุ่งมากระทบเป้า ขดลวดสแกนจะปล่อยให้ลำอิเล็กตรอนแยกภาพพื้นที่เล็ก ๆ ของพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่าง อิเล็กตรอนที่

กระเจิงกลับด้วยมุมเล็ก ๆ จะทำอันตร-กิริยา (interact) กับส่วนที่นูนของพื้นผิว และทำให้เกิดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับลำดับที่สอง เพื่อสร้างสัญญาณของอิเล็กตรอน ความสว่างหรือความเข้มของการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สองจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง และอิเล็กตรอนลำดับสองนี้จะเป็นตัวสร้างสัญญาณทำให้เกิดภาพขึ้น SEM มีข้อได้เปรียบกว่ากล้องจุลทรรศน์ทั่วไปอยู่มากเนื่องจากมีกำลังขยายที่สูงกว่ามาก (ปกติอยู่ในช่วง 50-40,000 เท่า) มีความละเอียดสูง (2.5-10 nm) มีความลึกสนามมากกว่า 500 เท่า และเพื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับเทคนิค TEM (Transmission electron microscopy) ซึ่งต้องใช้ชิ้นงานตัวอย่างที่มีความบางพอเพื่อให้อิเล็กตรอนผ่านไปได้ แต่ SEM ใช้ได้แม้กับชิ้นงานที่เป็นก้อนแข็ง ชิ้นงานที่มีความนำจะถูกวิเคราะห์ได้ด้วยเงื่อนไขตามปกติ ส่วนชิ้นงานที่ไม่มีควมนำโดยทั่วไปแล้วจำเป็นต้องมีการเคลือบด้วยวัสดุที่มีความนำเช่น ทองหรือคาร์บอน บาง ๆ ก่อน ยกตัวอย่างฟิล์มเพชรที่ปลูกบนซิลิกอนไดออกไซด์จำเป็นต้องเคลือบด้วยทองก่อน ขณะที่ฟิล์มเพชรที่ปลูกขึ้นบนซิลิกอนสามารถดูได้โดยตรงทันทีโดยไม่ต้องมีการเคลือบ อย่างไรก็ตามการใช้แรงดันและกระแสค่าต่ำจะเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยหลีกเลี่ยงการประจุบนฟิล์ม

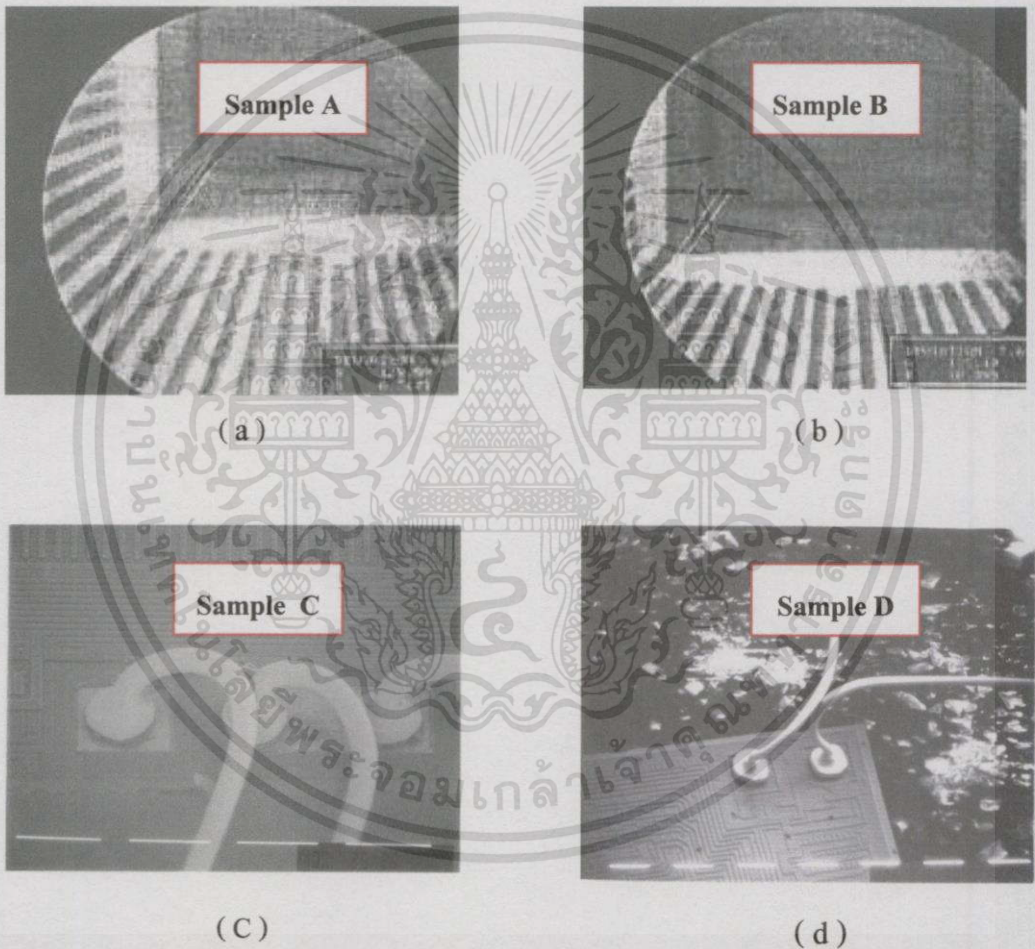


รูปที่ 5.23 แผนภาพการทำงานของ scanning electron microscope (SEM)

จากการศึกษาพื้นผิวและลักษณะของลูกบอลทองคำเพื่อดูการหักของส่วนบนลูกบอลทองคำหรือคอขวดและ การตรวจสอบลักษณะการลึ้มของลวดทองคำหลังผ่านการหล่อขึ้นรูปตัวถึงการดูผลความหนาลูกบอลทองคำจำเป็นต้องตรวจสอบด้วย SEM

### 5.6.1 ผลวิเคราะห์ลักษณะลูกบอลทองคำด้วย SEM

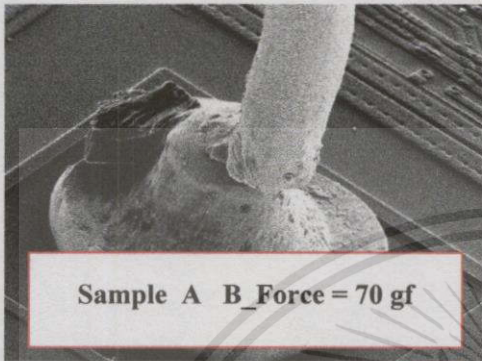
ผลจากการตรวจสอบภาพถ่าย SEM และภาพถ่ายจากการ X-RAY เพื่อศึกษาถึงผลของการออปติไมเซชันตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมต่อดัวยวิธีเทอร์โมโซนิก



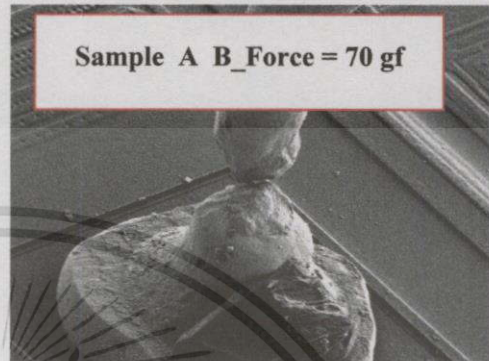
รูปที่ 5.24 ภาพถ่าย X-RAY และ SEM เปรียบเทียบลักษณะตัวอย่างของลวดที่ไม่มีการลึ้มทับของลวดในตัวอย่าง A และ B กับการเชื่อมต่อที่มีการลึ้มทับของทองคำในตัวอย่าง C และ D

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการขึ้นงานที่มอบหมายให้ไปประยุกต์ใช้กับ  
 ในรูปที่ 5.24 (a) และ (b) เป็นตัวอย่างชิ้นงานที่มีค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมต่อที่ได้จากการ  
 ไม่มีการดีโกลที่เส้นลึ้มทับทำให้เกิดเปล่งเนื้อหา และตัวอย่างจึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีสารนำไปใช้  
 การออปติไมเซชัน ที่ตำแหน่งของลวดจากมุมล่างด้านซ้าย เป็นแนวของลวดตรงไม่เกิดการชนกันที่  
 ตำแหน่งดังกล่าวเป็นทิศทางของ Compound ซึ่งถูกฉีดเข้าไปเพื่อทำการขึ้นรูปตัวถัง จากรูปที่

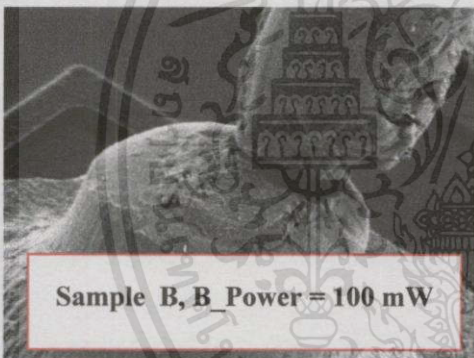
5.24 (c) และ (d) อธิบายถึงการล้มทับของลวดเชื่อมต่อบนตำแหน่งที่อยู่บนชิปวงจรรวมการล้มทับกันเกิดจากความสูงของลวดลวดทองคำเนื่องจากการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ในการเชื่อมต่อไม่เหมาะสม



(a)



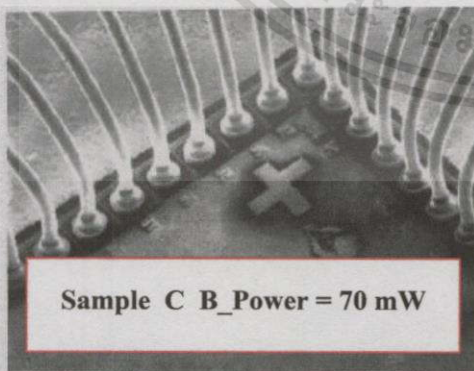
(b)



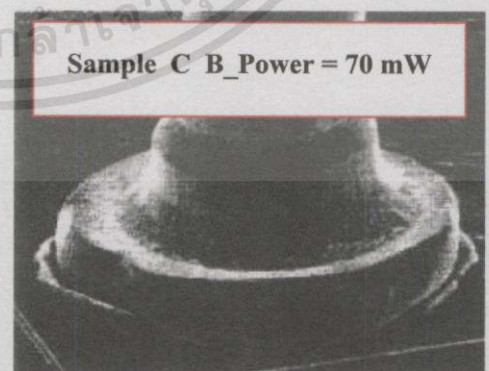
(d)



(e)



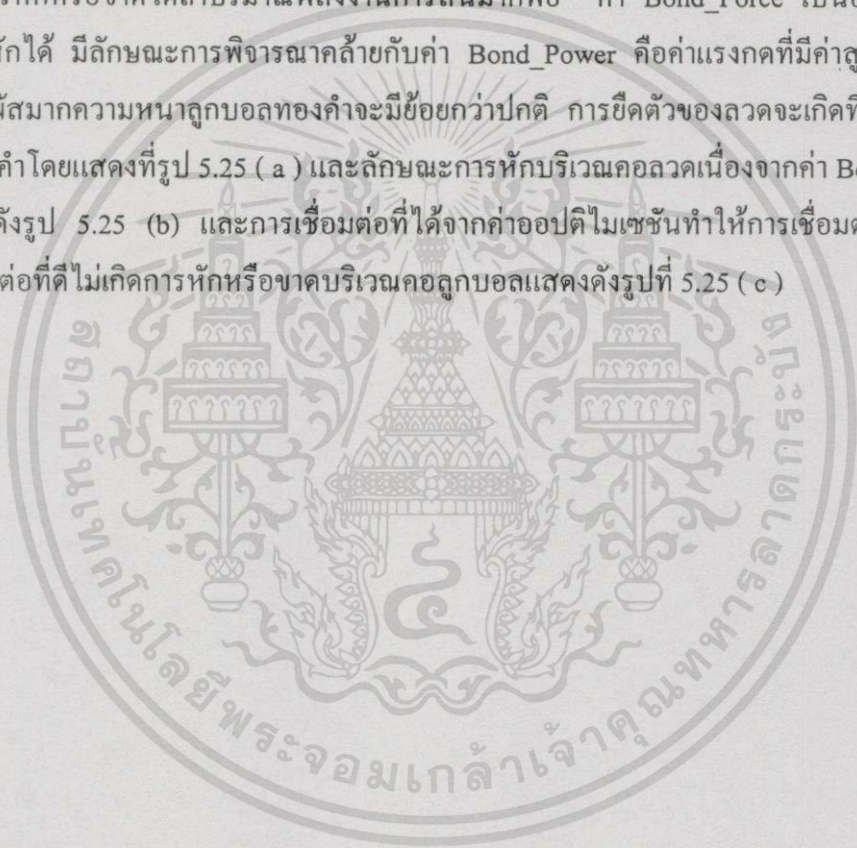
(f)



(g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 5.25 ภาพถ่าย SEM (a) ลักษณะของลวดทองคำที่มีการหักบริเวณคอลูกบอลเนื่องจากค่า B\_Force สูงลูกบอลทองคำ (b) ลักษณะของลวดทองคำที่มีการหักบริเวณคอลูกบอลเนื่องจากค่า B\_Power สูง (c) ลักษณะการเชื่อมต่อที่อยู่ในช่วงออปติไมเซชัน

การตรวจสอบคุณลักษณะของจุดเชื่อมต่อด้วยวิธีการถ่ายภาพ SEM เป็นวิธีตรวจสอบที่สามารถมองเห็นจุดสำคัญบริเวณคอขวดของค่าซึ่งเป็นจุดที่มีเกรนของวัสดุที่ใหญ่เนื่องจากถูกทำให้ยึดตัวออกโดยวิธีการดึง การเชื่อมต่อที่ให้พลังงานในการสั่นหรือค่า Bond\_Power ที่สูงคือปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการหักหรือการยึดตัวที่มีลักษณะคอขวดบริเวณส่วนที่เป็นคอลูกบอลของค่าเนื่องจากเกิดการสั่นที่ทำให้ลักษณะของลูกบอลใหญ่เกิดขนาดของพื้นที่ที่ลูมิเนียมและมีพื้นที่หน้าสัมผัสบริเวณใต้ลูกบอลมากเกินไป ดังนั้นการสร้างรูปของลวดจะเกิดการดึงจากตำแหน่งที่เป็นจุดเชื่อมต่อที่หนึ่งบริเวณพื้นที่ที่ลูมิเนียมของวงจรรวมเกิดการยึดตัวของความหนาลูกบอลของค่าน้อยกว่าการยึดตัวบริเวณที่เป็นคอขวด ซึ่งการยึดตัวบริเวณคอขวดมากกว่าค่าปกติจนถึงขนาดที่สามารถทำให้เกิดการหักหรือขาดได้ถ้าปริมาณพลังงานการสั่นมากพอ ค่า Bond\_Force เป็นอีกหนึ่งสาเหตุของการหักได้ มีลักษณะการพิจารณาคล้ายกับค่า Bond\_Power คือค่าแรงกดที่มีค่าสูงจะทำให้เกิดพื้นที่สัมผัสมากความหนาลูกบอลของค่าจะมีน้อยกว่าปกติ การยึดตัวของลวดจะเกิดที่บริเวณคอลูกบอลของค่าโดยแสดงที่รูป 5.25 (a) และลักษณะการหักบริเวณคอขวดเนื่องจากค่า Bond\_Power ที่สูงแสดงดังรูป 5.25 (b) และการเชื่อมต่อที่ได้จากค่าอปติไมเซชันทำให้การเชื่อมต่อที่มีคุณภาพการเชื่อมต่อที่ดีไม่เกิดการหักหรือขาดบริเวณคอลูกบอลแสดงดังรูปที่ 5.25 (c)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ตามและพารามิเตอร์อิสระ ที่ใช้ในการเชื่อมต่อลวดทองคำ การควบคุมค่าพารามิเตอร์อิสระให้เหมาะสมหรือการออปติไมเซชันพารามิเตอร์อิสระที่ใช้ในการเชื่อมต่อทั้ง 4 ตัว คือ Bond\_Force, Bond\_Power, Bond\_Time, และ Temperature โดยกลุ่มพารามิเตอร์อิสระจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ดังนั้นจะได้จำนวนการทดลองที่มีมากถึง 81 การทดลอง ดังนั้นการนำเทคนิคทางสถิติและวิเคราะห์ผลแบบ RSM มาใช้มีความสำคัญสองประการ คือประการที่หนึ่งเป็นการกำหนดการทดลองที่น้อยลงซึ่งจำเป็น ในกระบวนการเชื่อมต่อเพื่อลดรอบเวลาและค่าใช้จ่ายในการผลิต ดังนั้นการนำเทคนิคการวิเคราะห์ตัวแปรด้วยวิธี RSM เข้ามาช่วยในการหาเงื่อนไขที่สมบูรณ์ของตัวแปรเป็นสิ่งที่จะลดข้อจำกัดดังกล่าวลง ผลของการวิเคราะห์แสดงเป็นระนาบ Contour โดยผลที่ได้เป็นการเปรียบเทียบระหว่างพารามิเตอร์อิสระที่มีผลกระทบสูงสุดระหว่าง Bond\_Force กับ Bond\_Power และคงที่ Bond\_Time และ Temperature เนื่องจากศึกษาพบว่า Bond\_Time และ Temperature ไม่มีผลต่อคุณภาพการเชื่อมต่อโดยที่ยังให้ค่าแรงเค้นเฉือนและแรงดึงลวดที่สูงกว่ามาตรฐานหรือนำมากำหนดเป็นมาตรฐานของวงจรรวมชนิดนั้น ประการที่สองทำให้ทราบถึงคุณภาพและประสิทธิภาพสูงสุดของเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมต่อ สนับสนุนเทคโนโลยีวงจรรวมขั้นต้นที่ระดับ VLSI และเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาเทคนิคเชื่อมต่อระดับ ULSI ในอนาคตรวมถึงเป็นข้อมูลสำหรับวิศวกรหรือช่างเทคนิคในอุตสาหกรรมทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์แพคเกจจิ้ง ใช้สำหรับในการวิเคราะห์ผลของความต้านทานไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนขนาดไปหรือหาความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับค่าแรงเฉือนและแรงดึงลวดซึ่งเป็นตัวบ่งบอกคุณสมบัติของการเชื่อมต่อ แนวทางในการดำเนินวิจัยต่อสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับหาเงื่อนไขของพารามิเตอร์อิสระของวงจรรวมแบบ Multi Chip Module ได้หรือศึกษาเพิ่มเติมในกระบวนการวิเคราะห์ผลกระทบของการเชื่อมต่อเมื่อเปลี่ยนวัสดุเชื่อมเป็นลวดทองแดง

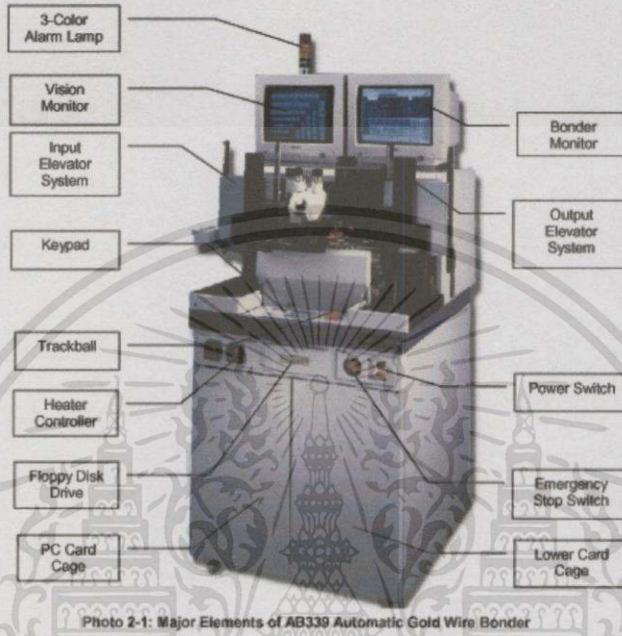
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Robert J. Hannemann. **Semiconductor Packaging**. New York : John Wiley&son. 1994.
- [2] Phil P. Marcoux. **Fine Pitch Surface Mount Technology**. New York : Van Nostrand Reinhold. 1992.
- [3] George G. Harman. **Wire Bonding in Microelectronics**. 2<sup>nd</sup>.ed. New York : McGraw Hill. 1997.
- [4] John H. Lau. **Hand Book of TAB Automated Bonding**. New York : Van Nostrand Reinhold. 1992.
- [5] สมเกียรติ สุกเดช. **สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ**. กรุงเทพมหานคร : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2535.
- [6] William F. Smith. **Principles of Materials Science and Engineering**. New York : McGraw Hill. 1998.
- [7] Charles R. Hicks, Kenneth V. Turner, Jr. **Fundamental Concepts in the Design of Experiments**. 5<sup>th</sup>.ed. New York : Oxford University Press. 1999.
- [8] Alberto Garcia-Diaz., Don T. Phillips. **Principles of Experimental Design and Analysis**. London : Chapman&Hall. 1995.
- [9] Douglas C. Montgomery. **Design and Analysis of Experiments**. 4<sup>th</sup>.ed. New York : John Wiley & sons. 1997.
- [10] Bob Wheeley. **ECHIP Reference Manual**. Hockession : Echip. 1998.
- [11] สันติ ชาติรุประชีวิน, นพดล สิทธิพล, อธิธิพล แจ่มชัด และวิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง. “ การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมต่อวงจรรวมกับลวดทองคำโดยการทดลองและวิเคราะห์ผลทางสถิติ” การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่38, 1-4 กุมภาพันธ์ 2543. หน้า 367-373.
- [12] Chatrurachewin S., Titiroongruang W. “Fine Pitch Gold Ball Bonding Development Using RSM Optimozation.” Proc. First International Conference on Mechatronic ICOM’01, kuala Lumpur, MALAYSIA, 12-13 FAB, 2001. pp. 24-30.
- [13] ASM Technology. 1999. **Preventive Maintenance Manual Software**. [CD-ROM]. Singapore : ASM Technology.

ภาคผนวก

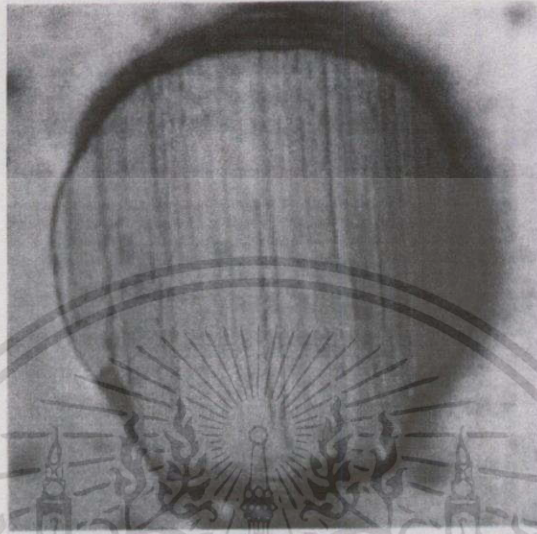
ภาคผนวก ก.



รูปที่ ก-1 เครื่องเชื่อมต่อเทอร์โมโซนิกแบบอัตโนมัติ รุ่น AB339 ของบริษัท ASM Technology



รูปที่ ก-2 ลวดทองคำที่ใช้ในการเชื่อมต่อนานาเส้นผ่านศูนย์กลางของบริษัท TANAKA



รูปที่ ก-3 บริเวณส่วนลวดทองคำที่ผ่านการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงเฉือน Royce 550



รูปที่ ก-4 พื้นที่ลุมินีบบนวงจรรวมขนาดใหญ่ก่อนทำการเชื่อมต่อดัวยวิธีเทอร์โมโซนิก

เอ็กซเรย์แบบเอ็กซเรย์พลังงานรังสีที่กรมการช่างานเพื่อการศึกษาที่เนชั่น เมื่ออยู่ที่นี่ในเชียงใหม่ ซึ่งเป็นการค้า  
 "ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

## ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการเรื่อง “Fine Pitch Gold Ball Bonding Development Using RSM Optimization” ที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมทางวิชาการ FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS (ICOM'01) KUALALUMPUR, MALAYSIA, 12-13 FEBRUARY 2001.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



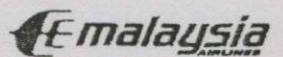
# Proceedings of the FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS - ICOM '01

## MECHATRONICS - AN INTEGRATED ENGINEERING FOR THE NEW MILLENNIUM



Kuala Lumpur, Malaysia  
12-13 February 2001

Sponsored by:



Organized by:



Faculty of Engineering  
International Islamic University Malaysia

Co-organized by:



CONTENTSVOLUME I

## MODELING AND SIMULATION

MS-1	Plastic Flow Simulation Of Plastic Injection Molding Process <i>M.K.A. Mohd Ariffin, S.Sulaiman, M.M.H.Megat Ahmad,- Universiti Putra Malaysia, Malaysia</i>	1
MS-2	Deflection Of Composite U – Channels Subjected To Axial And Bending Loads <i>Yousif A. Khalid, Barkawi B. Sahari and Megat M. Hamdan,- University Putra Malaysia, Malaysia</i>	11
MS-3	Fine Pitch Gold Ball Bonding Development Using RSM Optimization <i>Santi Chatrurachewin, Wisut Tiitroongruang,- King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand</i>	24
MS-4	Optimisation Of Solder Paste Printing Process Parameters Using Multi-Objective Genetic Algorithm Approach <i>Hee Kim Yii, Norhashimah Morad And Muhammad Suzuri Hitam,- University Sains Malaysia, Malaysia</i>	32
MS-5	Numerical Simulation For Quenching Of Steel Bar At Elevated Temperature <i>Mohamed Elshayeb, Rosalam Haji Sarbatly, K. S. Kannan, and Yeoh Chuan Shuan,- Unversiti Malaysia Sabah, Malaysia</i>	41
MS-6	FMEA Risk Ranking Using A Combination Of Quantitative And Qualitative Ranking Information <i>Suresh A/L Gobee, Khairanum Subari and Muhammad Suzuri Hitam,- Universiti Sains Malaysia, Malaysia.</i>	53
MS-7	Heart Rate Variability Analysis System <i>V. Jitvutichot, K. Chitsakul, and M. Sangworasil,- King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand</i>	64
MS-8	New Approach For Prediction Of Salt Contamination Of High Voltage Insulators During The Dry Season In The East Coast Of Peninsular Malaysia <i>Ahmad S. Ahmad, Mohd N. Abdulkadir, Ismail Said, Abdul Rahim Ahmad, and Zahrul F. Hussien,- Universiti Tenaga Nasional, Malaysia</i>	69

# Fine Pitch Gold Ball Bonding Development Using RSM Optimization

Santi Chatrurachewin, Assoc.Prof.Dr. Wisut Titiroongruang  
Electronics Research Center., Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
S1061175@kmitl.ac.th, ktwisut@kmitl.ac.th

## ABSTRACT

This paper describes to develop a fine pitch assembly especially for pad limited microelectronic dice. VLSI how designed with pad pitches ranging from 5 mil down to 3 mil, suitable for evaluating gold ball bonding. Response surface methodology(RSM) was used to characterize a state-of-the-art wire bonder with a bottle neck capillary for fine pitch bonding. Regression analysis generated mathematical model to plot 3-D charts and contour charts to optimize bonding parameters. Bonding windows were identified by using bonding specification requirements and material/process constrains as boundary conditions. Specific ball shear force, ball shear force per unit bonded area, was introduced for characterizing bonding quality across all ball sizes. In semiconductor manufacturing, cost reduction and increasing performance are two constant demands. Up to now these demands were successfully fulfilled by reducing die size through line width reduction with fab processing. However, improvements in fab technology along can no longer meet these requirement. Assembly technology, especially wire bond technology has become a limiting factor in die size reduction. Die size cannot be further reduced unless wire bonder can make reliable bonds on the ever shrinking bond pads. Millions of dollars of potential cost saving are at stake.

## KEYWORDS

RSM, Bonding Windows, Fine Pitch, Ball Size

## 1. INTRODUCTION

In this keen global environment, cost reduction is the very key to survival. At present, die size is still the deciding factor in packaged devices cost, Often a difference of one mil in die size can mean profit or loss for a given device. Therefore there is immense pressure to reduce die size. Die size is closely linked to pad pitch. It is even more so for 0.6/0.5 micron technology. When migrating to this smaller line width, a whole generation of 0.8 micron devices suddenly becomes "pad limited". In a pad limited design, circuitry is much smaller then he die, leaving expensive empty space between bond pad and the core of the circuitry. Die size cannot be reduced because of the assembly limitation on bond pad size and pad pitch. It is therefore extremely critical to be a able to reduce bond pad pitch to minimize die size and to achieve maximum cost reduction and competitiveness.

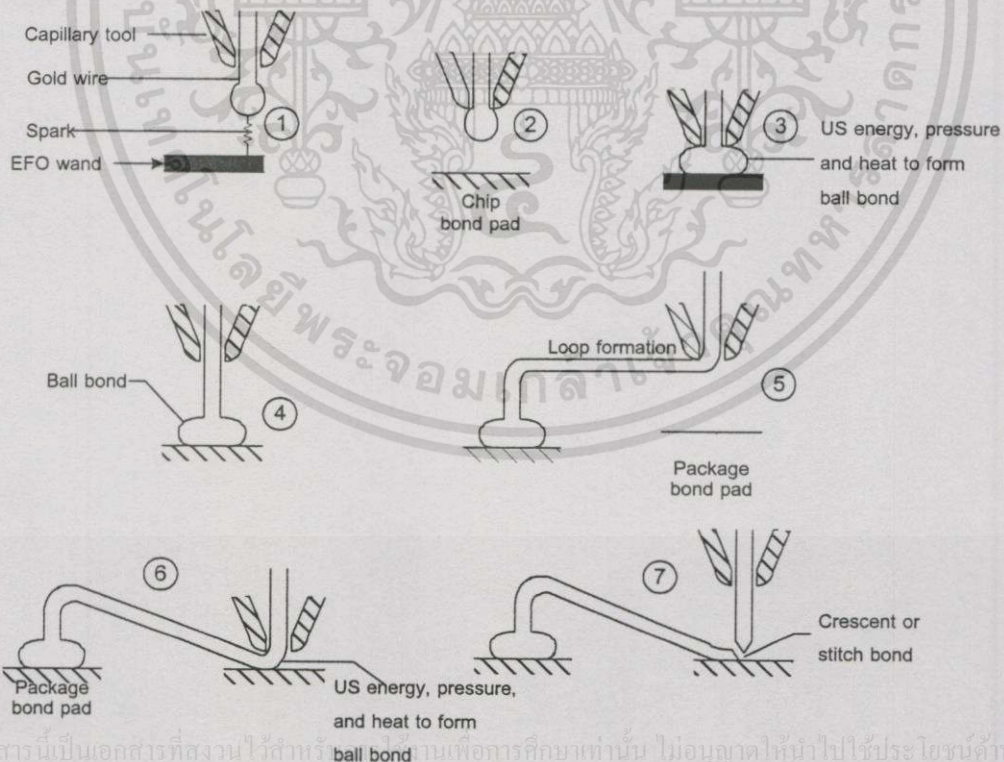
As the bond ball size reduces with the bond pad pitch, a practical and valid question often being asked by assembly engineers, wire bonder manufacturers, wire makers, and assembly subcontractors alike, that is, what should be the minimum allowable ball shear force?. As pad pitch is reduced, so it the bond ball size and the actual bond line. How could one know whether the reduction in ball shear force was due to reduction of gold ball-to-aluminum pad contact area, or was it due to improper bonding parameter setup on the wire bonder, or was it due to some contamination on the bond pad?. What is the absolute minimum ball shear that will still prevent the bond wire from lifting off the bond pad during molding?.

These are but a few of the questions that need to be addressed as the industry continues into finer and finer bond pad pitches. This paper concentrates on addressing the issue of creating the best possible bond line quality for fine pad pitch small ball application, and presents a statistical approach to characterize and optimize a bonding system which consists a given bonder, capillary bond tool, gold wire and bond pad metallization.

### 1.1. Thermosonic Ball Bonding Technology

Coucoulas was the first to combine ultrasonic energy with heat to produce thermosonic bonding in 1970. Today, the vast majority of interconnections to integrated circuits are made with Au thermosonic (TS) ball bonding. It is also occasionally used for Au wedge-wedge bonding. This bonding method is a combination of ultrasonic and thermocompression welding that optimizes the best qualities of each for microelectronic usage. TC welding usually requires interfacial temperatures in the order of  $>300^{\circ}\text{C}$ . This temperature can damage some die-attach plastics, packaging materials, and laminates, as well as some sensitive chips. However, in thermosonic welding, the interface temperature can be much lower, typically between  $125$  and  $220^{\circ}\text{C}$  which avoids such problems. The ultrasonic energy helps disburse contaminants during the early part of the bonding cycle and helps mature the weld in combination with the thermal energy. This combination also allows the US energy to be kept small enough to minimize cratering damage to the semiconductor chip. For ball bonding, the wire is threaded through a capillary-shaped tool, and a spark melts the end of the wire forming a ball at the bottom of the tool. The bond is formed when the tool under load presses the ball against the bonding pad and ultrasonic energy, plus heat from the work holder, is applied.

### 1.2. Thermosonic Ball Bonding Process



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 Fig. 1 Simplified procedure for making a ball-stitch wire interconnection with a capillary tool.

(1) Gold wire is fed through the capillary, and an EFO spark melts the wire. A gold ball forms at the end of the wire (2) The wire is retracted so that the ball is positioned against the bottom of the capillary. (3)The tool is lowered to the bond pad, and the Au ball is pressed against it. The interface rises to the bonding temperature US energy is applied, and the ball bond is formed. (4) The tool is raised, leaving the ball welded to the surface, and forming the wire loop as is moves to ward the second bond position.(5)The bond pad is positioned beneath the bonding tool(or capillary).(6)The tool is lowered, as in (3), to make a bond. This bond is called a stitch bond. Sometimes the final bond is called the crescent bond because of its shape. (7) After the stitch bond is made, the capillary tool is raised, and a wire clamp above the capillary tool pulls and breaks the wire free. The tool rises up, the clamp lowers the wire sufficiently to allow another ball to be made, and the bonder is ready to repeat the bonding cycle.

## 2. EXPERIMENT

### Response Surface Methodology

This study was done on a state-of-the-art Shinkuwa UTC200B1 A gold ball bonder with a ceramic bottleneck capillary. Silicon dice were Ag-epoxy die attached on 28 SOIC (Plastic Small Outline ICs)copper lead frame. Bond wire used was 0.8 mil diameter gold wire. Major bonding parameters investigated include first-bond force, first-bond power, first-bond time and bond temperature(bonder heater block temperature). All samples were preheated to bond temperature on the bonder before wire bond experiment.

The experiment design was a 20-run Central Composite Inscribed(CCI) design base on response surface methodology.

RUN#	B_TIME (ms)	B_POWER (mW)	B_FORCE (g)	TEMP (°C)
1	10	50	20	180
2	20	50	30	180
3	20	50	40	180
4	10	70	40	180
5	15	90	20	180
6	20	90	20	180
7	10	90	40	180
8	20	50	20	205
9	10	50	40	205
10	10	90	20	205
11	20	90	40	205
12	10	50	20	230
13	10	50	30	230
14	20	50	40	230
15	10	70	20	230
16	20	70	30	230
17	15	70	40	230
18	20	90	20	230
19	15	90	30	230
20	10	90	40	230

**Table1.By-Run Bonding Parameter Setting Per Central Composite Design**

Each variable has five experiment levels. Therefore it is suitable for building quadratic mathematical models. Table 1. lists the bonding parameters for each experiment run. The experiment design and data analysis were done on ECHIP software published by ECHIP, Inc. Three dimensional charts and contour charts.

In each run, 20 bond balls were measured for ball size along the X-direction and Y-direction, respectively. Ball size is defined by the outermost edge of the smashed ball area as depicted in figure 2. Ball size were measured on a 500X high power optical microscope with a Hisomet Union85088 digital read out box.

Ball shear test was performed on the same 20 balls used for ball size measurement. Ball Shear force was measured on a Dage BT-24 ball shear tester.

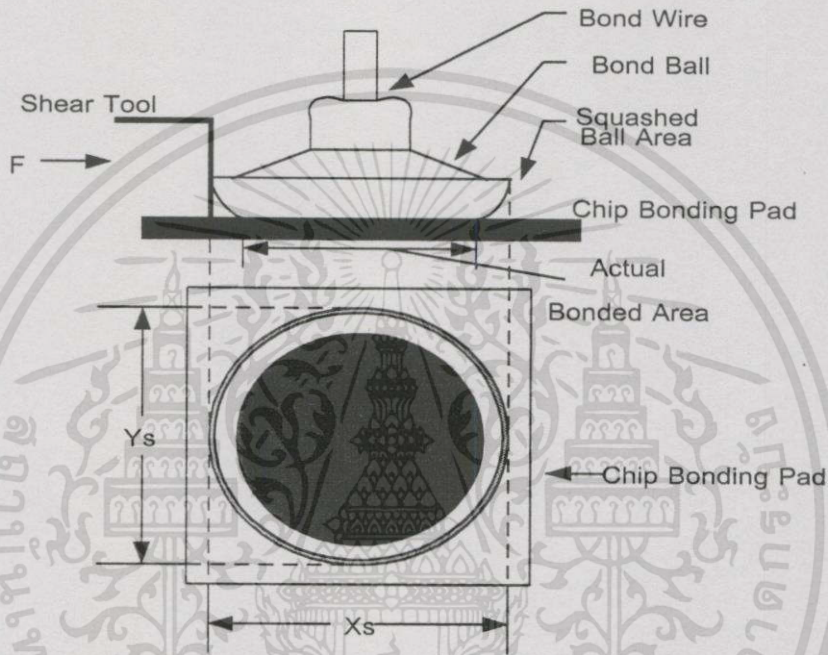


Fig. 2 Ball Size Definition

### 3. Ball Shear Stress

Ball shear stress, also known as “specific ball shear force”, is defined as ball shear force per unit bonded area. In this study, bonded area is treated as an ellipse, and is calculated as  $\pi/4(X_s * Y_s)$ . Here  $X_s$  = ball size in the X-direction,  $Y_s$  = ball size in the Y-direction. This treatment is an over estimate of the true bonded area, because  $X_s$  and  $Y_s$  measure the squashed ball dimension observed from directly above the ball, while the actual gold to aluminum contact area is smaller than the squashed ball diameter as shown in Figure 2. Therefore, ball shear stress calculated with this “apparent” bonded area provides a conservative under estimate of the quality of the gold-to-aluminum intermetallic bond line. The actual ball shear stress is higher than the calculated value.

#### 3.1. Contour Chart

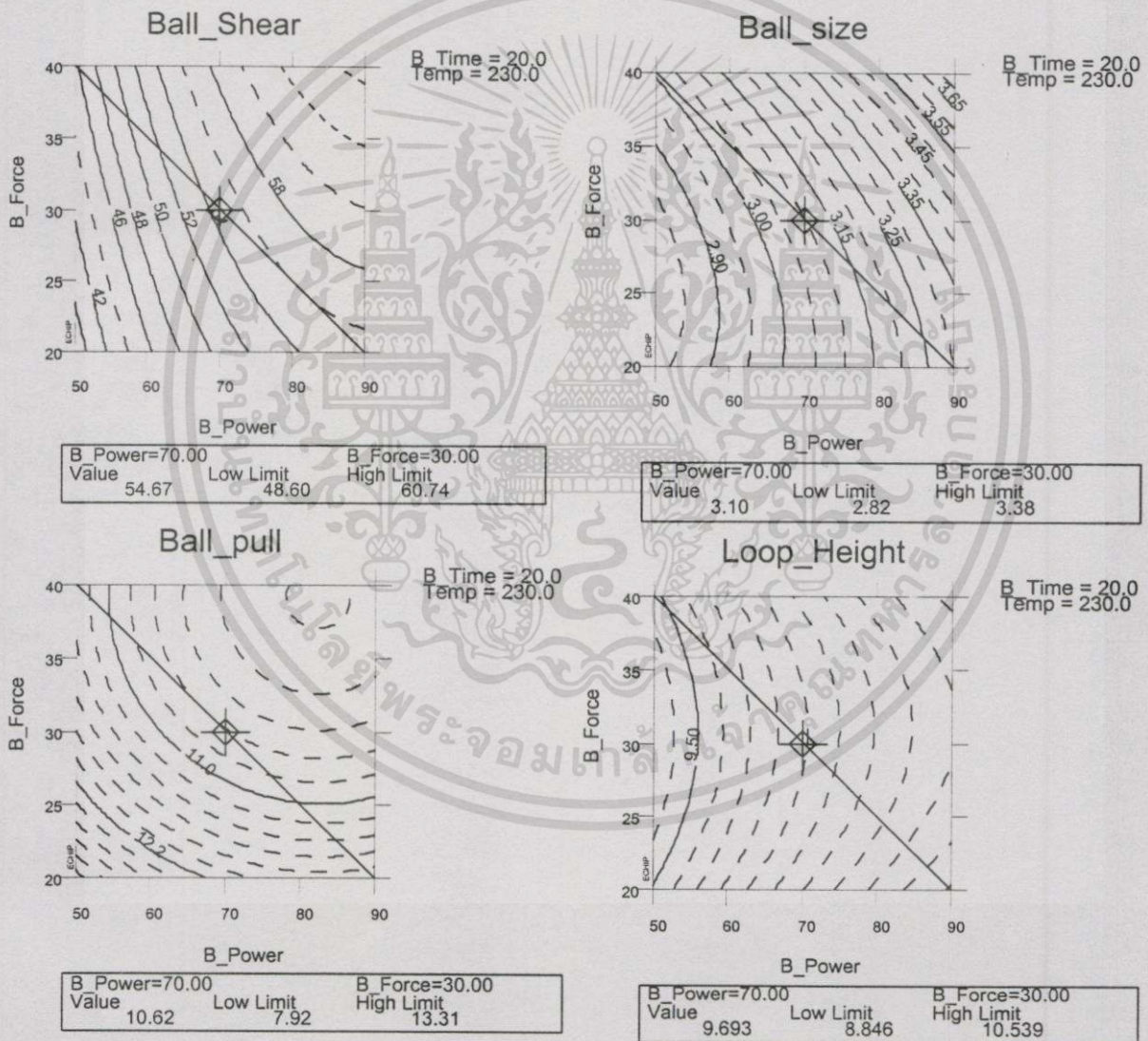
While 3D charts in an array provide a semi-quantitative overview of the response space, contour charts group several responses into a single plot to provide quantitative information of the responses space figure 3. shows an array of contour charts for  $X_s$ ,  $Y_s$ , and

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ball shear force as a function of temperature and time while keeping bond power and bond force at specific values on top of each individual contour charts.

### 3.2. Wire Bonding Optimization

Up to now there is a general acceptance that higher the ball shear force, the better the bond quality. Therefore, a typical bonding specification uses ball shear force as a measure of bond quality and stipulates a minimum allowable level. However, there is no general understanding as how good a bond line quality could be in terms of ball shear force. Because ball shear force, though easy to measure, is highly dependant on ball size a high shear force reading could be a result of an inferior bond line with large ball size. Therefore ball shear force does not truly measure bond line quality and is not a suitable parameter for wire bond optimization. Ball shear stress, on the other hand, is an intrinsic property of the bond line, independent of ball size. Therefore, for fine pad pitch wire bond optimization the author proposes using ball shear stress as a better parameter.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 Fig. 3 Contour Charts for ball size and ball shear force as a function of Bond Power, Bond Force, Time and Temp.

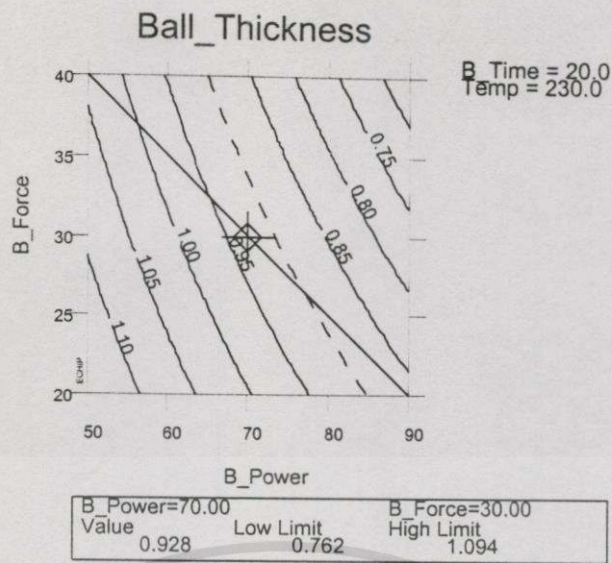


Fig. 3 Contour Charts for ball size and ball shear force as a function of Bond Power, Bond Force, Time, and Temp.

An “Ideal” bond ball should have the best bond line quality with ball size proper of the bond pad. There the first step in optimizing the wire bond parameters is to find out what is the best bond line quality as reflected by the highest ball shear force on the response surface. A visual scanning through the contour chart arrays reveals that the maximum ball shear force 54.65 g. In Figure 3, The regions defined by 54.65 g contour line is found in the following charts: Power=70mW, Force=30gf, Time=20ms, Temp=230°C Respectively. For a bond pad with 3.5 mil pad opening, wire bond parameters inside any of these regions should be adequate. However other than the ball size requirements, often there are additional material and process constrains. For example, a copper lead frame has high thermal expansion coefficient. Too high a bonding temperature may cause the lead frame to flex and bow on the bonder heater block, and may cause the lead frame feeder to lose tolerance and jam the bonder. Therefore for copper lead frames, there may be a cap on bond temperature, say 230° C. Futher more, production through put it inversely propotional to bond time. To ensure productivity, there could be a cap on the bond time say 20 ms. Under these additional constrains, one may no longer achieve the best bond quality. Instead, one should add all the constrains on the contour charts, then locate the highest ball shear stress 10.62 gf/mil<sup>2</sup> is found in Power=70mW Force=30g Time=20ms Temp 230°C. Under condition 3.10 mil ball diameter and shear force 54.65 g.

#### 4. CONCLUSION

The “ideal” fine pitch wire bond is one that fits the bond pad and at the same time has the best bond quality in terms of ball shear stress. Ball shear stress, defined as ball force per unit area, is an intrinsic property of gold-to-aluminum metallization. Therefore ball shear stress is a batter parameter for bond optimization than ball shear force. This study demonstrated that Response Surface Methodology is an effective means for characterizing a wire bonding system which consists of a given bonder, capillary bond tool, gold wire and bond pad metallization. 3D chart arrays were used to visualize the overall characteristic of the response surface. Contour chart arrays were used to quantify wire bond results in terms of bonding parameters.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

To optimize for fine pitch bonding, the author recommends using the contour chart to locate wire bonding windows that produce the best ball shear stress, or at least, the best possible ball shear stress when under additional dimensional, material, or process constraints.

## References

1. Santi C., Nopphadol S., Dr. Ittipol J., and Assoc. Prof. Dr. Wisut T., "Gold ball bonding optimization using statistical design of experiment", The 38th Kasetsart University Annual Conference 1-4 February (2000), pp. 367-373.
2. George G. Harman., Wire bonding in Microelectronics, New York, McGraw-Hill, 1997.
3. Bob Wheeler., ECHIP Reference Manual, 724 Yorklyn, ECHIP Inc, 1998.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายสันติ ชาติประชีวิน เกิดเมื่อวันที่ 18 มีนาคม 2516 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุนทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2538

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

1. การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมต่อวงจรรวมกับลวดทองคำโดยวิธีการทดลอง และวิเคราะห์ผลทางสถิติ การประชุมทางวิชาการครั้งที่ 38 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ. 2543
2. Fine Pitch Gold Ball Bonding Development Using RSM Optimization  
FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS (ICOM'01)  
KUALA LUMPUR MALAYSIA FEBRUARY 2001

ประสบการณ์การทำงาน พ.ศ. 2538-2540 ตำแหน่ง PRODUCT ENGINEER บริษัท ALPHATEC ELECTRONIC PUBLIC Co., Ltd.(CYPRESS SEMICONDUCTOR) ตำแหน่งหน้าที่การงานใน ปัจจุบัน วิศวกร บริษัท วิทยูการบินแห่งประเทศไทย จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้