

ผลกระทบของปัจจัยการเชื่อมเลเซอร์ที่มีต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม
ในแขนจับหัวอ่านสำหรับจานแม่เหล็กแบบแข็ง



นาย นิพนธ์ บัวแก้ว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

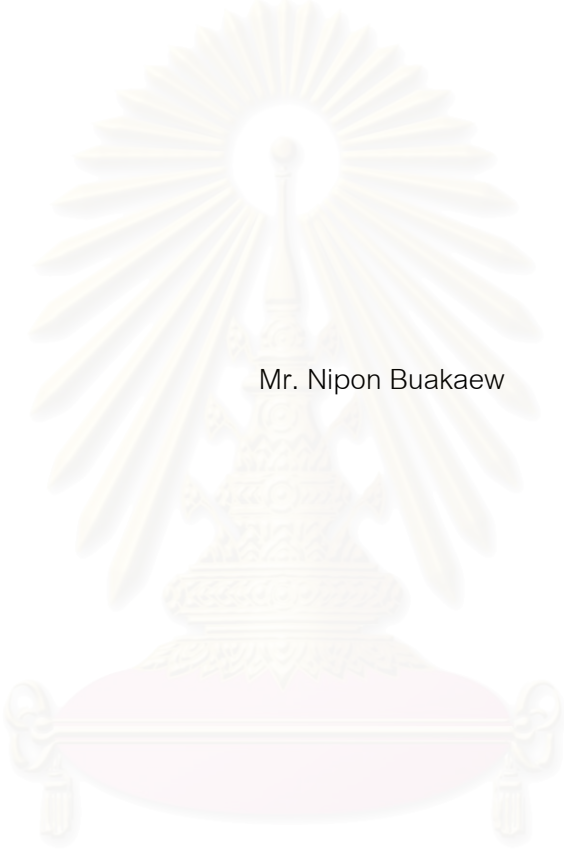
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1722-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INFLUENCE OF LASER WELDING FACTORS ON WELDING STRENGTH
IN HARD DISK DRIVE SUPENSION



Mr. Nipon Buakaew

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17 -1722-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของปัจจัยการเชื่อมเลเซอร์ที่มีต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม
ในแขนจับหัวอ่านสำหรับจานแม่เหล็กแบบแข็ง
โดย นาย นิพนธ์ บัวแก้ว
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น ส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย วิจารณ์ช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุทัศน์ รัตนเกื้อวงวาน)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตรา ฐิติการพาณิชย์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นิพนธ์ บัวแก้ว : ผลกระทบของปัจจัยการเชื่อมเลเซอร์ที่มีต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม
ในแขนจับหัวอ่านสำหรับจานแม่เหล็กแบบแข็ง. (INFLUENCE OF LASER WELDING
FACTORS ON WELDING STRENGTH IN HARD DISK DRIVE SUSPENSION) อ.
ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร, 113 หน้า. ISBN 974-17-
1722-9.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงปัจจัยการเชื่อมเลเซอร์ที่มีต่อกำลังเลเซอร์ (Power)
ขนาดของรอยเชื่อม ความลึกของรอยเชื่อม (Penetration) แรงฉีกของรอยเชื่อม และความ
แข็งแรงของรอยเชื่อม

การวิจัยใช้เครื่องเชื่อมแบบนีโอดีเมียมแยกเลเซอร์ (Nd:YAG Laser) โดยทำการเชื่อมส
แตนเลส 304 ที่มีความหนา 51,102 และ 200 ไมครอน จำนวนสองแผ่นเข้าด้วยกัน โดย
แปรเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าและค่าระยะเวลาในการเชื่อม โดยที่ปัจจัยอื่นๆ เช่น ระยะรวมแสง
(Focal Length) ขนาดของสายไฟเบอร์ออปติก กระจกต่างๆ และแรงกดอุปกรณ์จับยึด
(Clamping Force) ถูกกำหนดให้คงที่ตลอดการวิจัย ผลทดลองได้ตรวจสอบกำลังของเลเซอร์
ขนาดของรอยเชื่อม ความลึกของรอยเชื่อม แรงฉีก (Peel Force) และความแข็งแรงของรอย
เชื่อม

ผลการวิจัยพบว่า (1) ระยะเวลาของการเชื่อมเพิ่มขึ้น มีผลให้การทนต่อแรงฉีกขาดและ
ความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงขึ้น (2) ระยะลึกของรอยเชื่อมแปรผันตามแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการ
เชื่อม ขณะที่ระยะเวลาการเชื่อมคงที่ (3) ขนาดของรอยเชื่อมแปรผันตามระยะเวลาของการเชื่อม
ขณะที่แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมคงที่ (4) กำลังเลเซอร์แปรผันตามระยะเวลาและแรงดันไฟฟ้า
โดยระยะเวลาของการเชื่อมมีอิทธิพลสูงกว่า (5) เงื่อนไขของปัจจัยที่ 476 โวลท์และระยะเวลาการ
เชื่อมที่ 1.1 มิลลิวินาที ให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงสุดคือ 8.76 kg/mm^2

ภาควิชา.....วิศวกรรมอุตสาหการ..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมอุตสาหการ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา...2545..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....-

4371438321 INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORD: LASER WELDING/HDD SUSPENSION

NIPON BUAKAEW : INFLUENCE OF LASER WELDING FACTORS ON WELDING STRENGTH
IN HARD DISK DRIVE SUSPENSION THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR

SOMCHAI PUJINDANATE, Ph.D. 113 p. ISBN 974-17-1722-9

The objective of this thesis was to study laser welding factors that influence on laser power, welding diameter, welding penetration, peel force and welding strength.

Nd:YAG laser was used in the experiment to weld SUS 304 stainless steel sheet with the thickness of 51, 102 and 200 micron. Welding time and electrical voltage were varied whereas focal length, fiber optics diameter, mirror and clamping force were fixed.

The experimental results found that (1) Increasing welding time increased peel force and welding strength (2) Welding penetration varied on electrical voltage whereas welding time was constant. (3) Welding diameter was dependent on welding time with constant electrical voltage (4) Laser power consumption was dependent on electrical voltage and welding time, and welding time was more effective than electrical voltage (5) Electrical voltage of 476 volt and welding time of 1.1 millisecond provided the maximum welding strength of $8.76 \text{ kg}_f / \text{mm}^2$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DepartmentIndustrial Engineering... Student's name

Field of studyIndustrial Engineering ... Advisor's signature

Academic year2002.....Co-advisor's signature-.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความอนุเคราะห์ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ทั้งคำแนะนำและกำลังใจแก่ผู้เขียน ตลอดจนการจัดทำวิทยานิพนธ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย วิจิรวณิช ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุทัศน์ รัตนเกื้อกังวาน และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตรา รุ่งกิจการพานิช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและตรวจสอบความถูกต้องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณผู้บังคับบัญชาที่เข้าใจในระยะเวลาของการศึกษาเล่าเรียนตลอดการศึกษา ขอขอบคุณวิศวกรและวิศวกรอาวุโส บริษัท เคอาร์พีริชชั่น จำกัด (มหาชน) ที่ช่วยเหลือสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณครอบครัว ภรรยาและบุตร ตลอดจนเพื่อนๆ ที่เป็นกำลังใจและสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา

ท้ายสุดนี้ หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีส่วนส่งเสริมความรู้ การวิจัย และการประยุกต์ใช้ ขอขอบคุณความดีทั้งหลายให้แก่อาจารย์ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชา ครอบครัว และผู้มีส่วนสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้ทุกท่าน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1	บทนำ
1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1
1.2	วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....5
1.3	ขอบเขตของการวิจัย.....5
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....6
บทที่ 2	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2.1	หลักการพื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....7
2.1.1	ประวัติคอมพิวเตอร์.....7
2.1.2	ฮาร์ดดิสก์.....11
2.1.3	แสง.....18
2.1.4	เลเซอร์..... 19
2.1.5	การเชื่อมเลเซอร์.....23
2.1.6	หลักความปลอดภัยเกี่ยวกับเลเซอร์..... 27
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....31
บทที่ 3	วิธีการดำเนินการวิจัย
3.1	วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....35
3.2	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....36
3.2.1	การเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....36
3.2.2	การตั้งเครื่องเชื่อมเลเซอร์และเงื่อนไขการทดลอง.....36
3.2.3	การวัดพลังงานเลเซอร์.....36
3.2.4	วิธีการเชื่อมชิ้นงานทดสอบ..... 36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.5 การตรวจสอบทางกายภาพ.....	36
3.2.6 การทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม.....	37
3.2.7 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม.....	37
3.2.8 การตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในรอยเชื่อม.....	37
3.3 การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ.....	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์	
4.1 ผลการทดลอง.....	44
4.2 ผลการตรวจสอบพลังงานเลเซอร์.....	45
4.3 ผลการตรวจสอบทางกายภาพ.....	45
4.3.1 ลักษณะของรอยเชื่อม.....	45
4.3.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง.....	45
4.3.3 ภาควัดขวางของรอยเชื่อม.....	46
4.4 ผลการศึกษาความแข็งแรงของรอยเชื่อม.....	46
4.5 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม.....	48
4.6 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในรอยเชื่อม.....	48
4.7 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ.....	66
บทที่ 5 วิจัยกรณีผลการทดลอง	
5.1 อุปกรณ์จับยึดในการเชื่อม.....	74
5.2 ความแข็งแรงของรอยเชื่อม.....	75
5.3 การถ่ายภาพตัดขวางของรอยเชื่อม.....	75
5.4 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม.....	75
5.5 องค์ประกอบธาตุในรอยเชื่อม.....	76
5.6 การทดสอบทางสถิติ.....	76
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	80
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	81

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง.....	82
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก.....	84
ภาคผนวก ข.....	94
ภาคผนวก ค.....	98
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	113



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองสำหรับการเชื่อมชิ้นงานความหนา 102 ไมครอน สองแผ่นเข้าด้วยกัน.....	43
4.1	ตารางสรุปผลการทดลองของการเชื่อมชิ้นงานความหนา 102 ไมครอน จำนวนสอง แผ่นเข้าด้วยกัน.....	49
4.2	ผลการศึกษากการเชื่อมชิ้นงานความหนา 51 และ 200 ไมครอนเข้าด้วยกัน โดยให้ 51ไมครอนอยู่ด้านบน.....	50
4.3	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดย Minitab.....	67
4.4	สมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอย.....	69
4.5	ผลการวิเคราะห์การถดถอยของกำลังโดยโปรแกรม JMP.....	70
4.6	ผลการวิเคราะห์การถดถอยของขนาดรอยเชื่อมโดยโปรแกรม JMP.....	71
4.7	ผลการวิเคราะห์การถดถอยของแรงฉีกโดยโปรแกรม JMP.....	72
4.8	สรุปผลการทดสอบทางสถิติ.....	73

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 แสดงภาพจานแม่เหล็กแบบแข็งหรือฮาร์ดดิสก์.....	3
1.2 แสดงการพยากรณ์พัฒนาการของฮาร์ดดิสก์.....	3
1.3 แสดงการพยากรณ์ตลาดของฮาร์ดดิสก์.....	4
1.4 แสดงภาพแขนจับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์.....	4
2.1 แสดงแผนภาพของฮาร์ดดิสก์.....	13
2.2 แสดงภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์.....	15
2.3 แสดงภาพหัวอ่านเขียนที่ประกอบลงบนแขนจับหัวอ่านเขียน.....	15
2.4 แสดงภาพชุดของหัวอ่านเขียนที่ติดตั้งบนแขนจับ (HSA).....	16
2.5 แสดงภาพ HSA ที่ประกอบลงใน HDD.....	16
2.6 แสดงภาพแสง Coherent และ Incoherent.....	20
2.7 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานของเลเซอร์.....	21
2.8 แสดงการปล่อยโฟตอนออกมาเอง.....	21
2.9 แสดงการปล่อยโฟตอนออกมาโดยการถูกกระตุ้น.....	22
2.10 แสดงการสะท้อนกลับของโฟตอนโดยกระจก.....	22
2.11 แสดงลักษณะพื้นฐานของลำแสงที่เกิดจากต่างเลเซอร์กัน.....	23
2.12 แสดง Nd:YAG เลเซอร์ขนาด 1 Kw.....	25
2.13 แสดงแผนภาพของ Nd:YAG เลเซอร์.....	26
3.1 แสดงภาพชิ้นงานทดสอบสเตนเลส 304	38
3.2 แสดงภาพเครื่องมือแยกเลเซอร์แบบจุด.....	38
3.3 แสดงภาพอุปกรณ์จับยึดในการเชื่อมเลเซอร์.....	39
3.4 แสดงภาพเครื่องมือวัดพลังงาน.....	39
3.5 แสดงภาพเครื่องทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม.....	40
3.6 แสดงกล้องถ่ายภาพกำลังขยายสูง.....	40
3.7 เครื่องมือวัด MTM สำหรับใช้วัดขนาดรอยเชื่อม.....	41
3.8 แสดงภาคตัดขวางของรอยเชื่อมซึ่งหล่ออยู่ในเรซิน.....	41
3.9 เครื่อง SEM & EDX.....	42
4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและแรงดันไฟฟ้า.....	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและเวลา.....	52
4.3 แสดงรอยเชื่อมด้านหน้าที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	53
4.4 แสดงรอยเชื่อมด้านหลังที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	53
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรอยเชื่อมและแรงดันไฟฟ้า.....	54
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรอยเชื่อมและเวลา.....	55
4.7 แสดงภาคตัดขวางรอยเชื่อมของสแตนเลสหนา 102 ไมครอน.....	56
4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉีกและแรงดันไฟฟ้า.....	56
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงรอยเชื่อมและแรงดันไฟฟ้า.....	57
4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉีกรอยเชื่อมและเวลา.....	58
4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงรอยเชื่อมและเวลา.....	59
4.12 ภาพถ่ายจาก SEM ของสแตนเลส 304 ก่อนถูกเชื่อม.....	60
4.13 ภาพถ่ายจาก SEM ของรอยเชื่อมที่ 473 โวลท์และ 0.8 มิลลิวินาที	61
4.14 ภาพถ่ายจาก SEM ของรอยเชื่อมที่ 473 โวลท์และ 1.0 มิลลิวินาที.....	62
4.15 ภาพถ่ายจาก SEM ของรอยเชื่อมที่ 476 โวลท์และ 1.1 มิลลิวินาที	63
4.16 ภาพถ่ายจาก SEM บริเวณรอยต่อของเส้นรอบวงรอยเชื่อม.....	64
4.17 องค์ประกอบธาตุในสแตนเลส เกรด 304 ก่อนทำการเชื่อม จาก EDX.....	65
4.18 องค์ประกอบธาตุในสแตนเลส เกรด 304 ในรอยเชื่อม จาก EDX.....	65
5.1 แสดงรูปของ Spacer.....	77
5.2 แสดงทิศทางการแรงกดขึ้นงานในอุปกรณ์จับยึด.....	77
5.3 แสดงจุดเชื่อมในแขนจับหัวอ่าน.....	78

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สิ่งที่ทราบกันว่ายุคนี้คือยุคของข้อมูลข่าวสาร หรือที่เรียกกันว่ายุคไอที (Information Technology Age) เทคโนโลยีต่างๆทางการสื่อสารมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับงานแม่เหล็กแบบแข็งหรือฮาร์ดดิสก์ (แสดงในรูปที่ 1.1) มีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วมาก ในรูปที่ 1.2 แสดงการพยากรณ์พัฒนาการของฮาร์ดดิสก์จนทำให้มีการแข่งขันอย่างสูงในธุรกิจอุตสาหกรรมต้นน้ำของผลิตภัณฑ์นี้ แน่ใจว่าการเจริญเติบโตของธุรกิจอินเทอร์เน็ต (Internet) ก็เป็นอีก หนึ่งปัจจัยที่ยิ่งทำให้เทคโนโลยีทางด้านข้อมูลข่าวสารไม่สามารถหยุดนิ่งอยู่กับที่ได้ รูปที่ 1.3 แสดงถึง การพยากรณ์การเติบโตของตลาดฮาร์ดดิสก์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญยิ่งควบคู่ไปกับความก้าวหน้าของ เทคโนโลยีข้อมูลข่าวสาร

แขนจับหัวอ่านสำหรับงานแม่เหล็กแบบแข็ง (Hard Disk Drive Suspension) ดังแสดงในรูปที่ 1.4 ก็เป็นอีกหนึ่งผลิตภัณฑ์ต้นน้ำของอุตสาหกรรมประกอบฮาร์ดดิสก์ ที่มีการแข่งขันรุนแรงมาก เนื่องจากอุตสาหกรรมนี้มีผู้ผลิตเพียง 4 รายใหญ่สำหรับตลาดฮาร์ดดิสก์ทั้งหมดในโลก โดยส่วนแบ่ง ตลาดโลก 80% เป็นของบริษัทอเมริกัน (รายหนึ่ง 70% อีกรายหนึ่ง 10%) อีก 20% ที่เหลือเป็นของ บริษัทญี่ปุ่นและไทย โดยแบ่งกันไปรายละ 10% โดยทั่วไปบริษัทที่เป็นลูกค้าของบริษัทผลิตแขนจับหัว อ่านจะซื้อผลิตภัณฑ์จากผู้ผลิตเพียงสองรายเท่านั้น เพื่อป้องกันความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นจากการจัดส่ง หากมีเพียงรายเดียว และการที่จะมีโอกาสได้รับยอดสั่งซื้อขึ้นอยู่กับความเร็วในการจัดส่งผลิตภัณฑ์ต้น แบบ (Prototype) และคุณภาพเป็นสำคัญ บริษัทที่สามารถจัดส่งผลิตภัณฑ์ต้นแบบได้เร็วกว่าและคุณภาพดีกว่าคือผู้ที่มีโอกาสในการได้รับการพิจารณาคัดเลือก (Qualify) ก่อน หลังจากที่ได้รับยอดสั่งซื้อ แล้ว ในระหว่างการผลิตให้และจัดส่งก็จะมีกรายงานคุณภาพตลอดเวลาจากวิศวกรคุณภาพผู้ผลิต (Supplier Quality Engineer, SQE) ซึ่งเป็นวิศวกรของบริษัทลูกค้าเพื่อให้ผู้ผลิตรับทราบปัญหาและมี การพัฒนาอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา (Continuous Improvement) โดยทั่วไปคุณภาพจะวัดกันที่ค่า $Cpk > 1.5$ สำหรับคุณภาพทางด้านข้อมูลวัด (Variable Data) สำหรับคุณภาพทางด้านกายภาพ (Attribute Data) ก็จะวัดกันเป็นจำนวนชิ้นในหนึ่งล้านชิ้น (Defect Parts Per Million, DPPM) ทุกๆไตรมาสจะมี การประเมินผู้ผลิต (Quarterly Business Review, QBR) เพื่อทำการเปรียบเทียบจัดลำดับผู้ผลิต เพื่อเป็น

ข้อมูลในการตัดสินใจสั่งซื้อในไตรมาสต่อไป โดยทั่วไปเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินในรอบไตรมาสจะประกอบไปด้วยคุณภาพ (Quality) ราคา (Price) การจัดส่ง (Delivery) การบริการ (Service) และเทคโนโลยี (Technology) โดยคุณภาพจะมีการให้น้ำหนักมากที่สุด ในลูกค้าบางรายให้ถึง 50%

คุณภาพของแขนจับหัวอ่าน (Suspension) โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ได้แก่

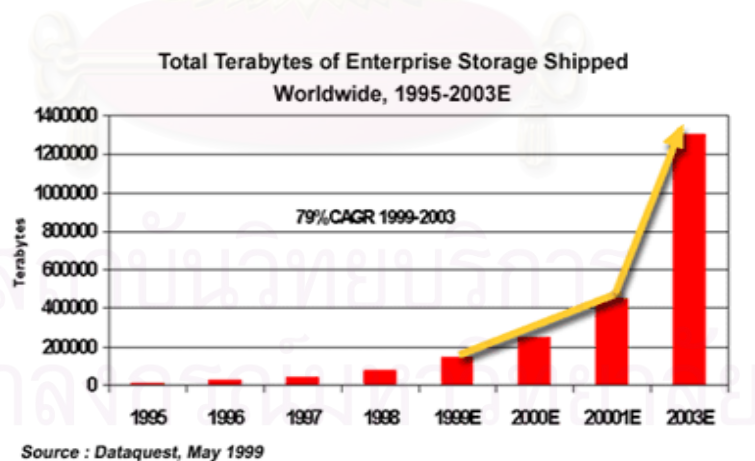
1. คุณภาพที่ไม่มีผลต่อการใช้งาน (Non-functional Quality) คือผลิตภัณฑ์ที่มีรอยตำหนิที่เกิดจากกระบวนการผลิตแต่ไม่มีผลต่อการใช้งาน ได้แก่รอยเปื้อนที่ไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน รอยกดจากการขึ้น รูป หรือจากการตัด เป็นต้น
2. คุณภาพที่มีผลต่อการใช้งาน (Functional Quality) คือผลิตภัณฑ์ที่มีรอยตำหนิหรือไม่มีรอยตำหนิ ใดๆเลยก็ได้ แต่มีผลต่อการใช้งานในฮาร์ดดิสก์หรือกระบวนการผลิตของลูกค้าตัวอย่างของผลิต ภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพทางด้านการใช้งานได้แก่ การไม่ผ่านการทดสอบทางการก้ำทอน (Resonance Test) การมีคุณสมบัติเชิงกลต่างๆไม่ตรงตามข้อกำหนด (Specification) และการที่ชิ้นส่วนของผลิต ภัณฑ์หลุดออกจากกันเนื่องจากความแข็งแรงของรอยเชื่อม เป็นต้น

ดังกล่าวข้างต้น “การที่ชิ้นส่วนของผลิต ภัณฑ์หลุดออกจากกันเนื่องจากความแข็งแรงของรอย เชื่อม” เป็นสิ่งที่อันตรายอย่างยิ่งต่อธุรกิจอุตสาหกรรมประเภทนี้เนื่องจากแขนจับหัวอ่านเป็นอุปกรณ์ที่ จะต้องเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงอยู่ในฮาร์ดดิสก์ หากต้องหลุดออกจากกันเป็นชิ้นๆ ขณะทำหน้าที่คงไม่ ต้องบอกว่าจะเกิดขึ้นอะไรขึ้นกับบริษัทผู้ผลิต เนื่องจากว่าหากต้องแสดงความรับผิดชอบในการซื้อคืน นั้นหมายความว่าต้องจ่ายเงินมากกว่า 25 เท่าของรายรับที่ได้มาเพื่อเรียก ความเชื่อถือได้ของผลิต ภัณฑ์ และชื่อเสียงของบริษัท ซึ่งความรุนแรงของเหตุการณ์นี้สามารถทำให้ธุรกิจต้องปิดตัวลงได้อย่างแน่นอน

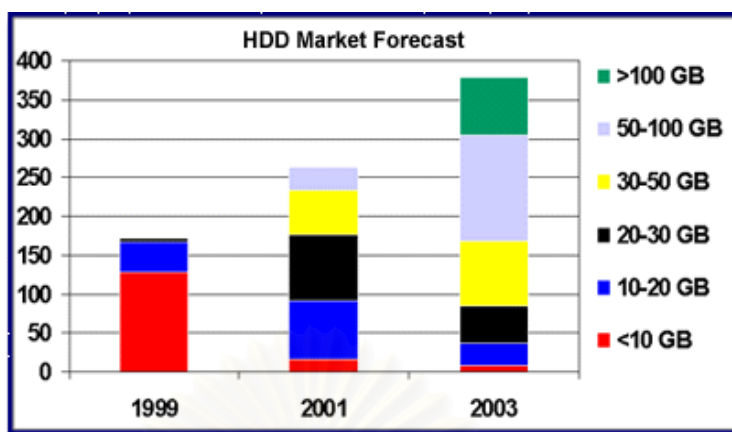
ดังนั้นการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อรอยเชื่อมในอุตสาหกรรมผลิตแขนจับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในประเทศไทยความรู้ในด้านนี้ยังไม่แพร่หลายมากนักอัน จะช่วยส่ง ผลเกื้อหนุนต่อธุรกิจอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต



รูปที่ 1.1 งานแม่เหล็กแบบแข็งหรือฮาร์ดดิสก์ (Hard Disk Drive) จาก www.pcguide.com



รูปที่ 1.2 แสดงการพยากรณ์พัฒนาการของฮาร์ดดิสก์ (จาก KR Precision Annual Report 2000 ใน www.krprecision.com)



Source : TrendFocus

รูปที่ 1.3 แสดงการพยากรณ์ตลาดของฮาร์ดดิสก์ (จาก KR Precision Annual Report 2000
www.krprecision.com)



รูปที่ 1.4 แขนจับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ (HDD Suspension) จาก www.krprecision.com

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัยเพื่อศึกษาปัจจัยการเชื่อมเลเซอร์สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าและระยะเวลาในการเชื่อม ที่มีต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม สำหรับสแตนเลส เกรด 304

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานศึกษาวิจัยมีขอบเขตการศึกษาดังนี้

- 1.3.1 ปัจจัยอิสระ (Independent Variables) ที่ทำการศึกษาได้แก่
 - แรงดันไฟฟ้า (Volt) ของการเชื่อม
 - ระยะเวลาในการเชื่อมหรือระยะเวลาในการยิงแสงเลเซอร์ (Time, ms.)
- 1.3.2 ปัจจัยคงที่ (Fixed Variables) ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่
 - การเชื่อมจะเป็นแบบจุดเดียว (Spot Welding)
 - ความดันระบบนิวแมติกส์ที่ใช้ในอุปกรณ์จับยึดมีค่าคงที่ที่ 5 บาร์
 - กำหนดให้อัตราการไหลและแรงดันของไนโตรเจนที่ใช้ในการปกคลุมรอยเชื่อมคงที่ที่ 30 ลิตรต่อนาทีและ 2 บาร์ ตามลำดับ
 - อุปกรณ์เกี่ยวกับแสงต่าง (Optics Equipment) เช่น เลนส์ สายใยแก้วนำแสง (Fiber Optics Cable) และ Flash Lamp เป็นต้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดการศึกษา
- 1.3.3 ผลลัพธ์หรือตัวแปรที่ได้จากการศึกษาปัจจัย คือ
 - พลังงานของเลเซอร์ซึ่งวัดในรูปของกำลัง มีหน่วยเป็นวัตต์
 - แรงดึงในการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม มีหน่วยเป็น kg_f
 - ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม (mm)
 - รูปถ่ายภาคตัดขวางแสดงความลึกของรอยเชื่อม (Weld Penetration) ที่กำลังขยาย 500 เท่า
 - ภาพถ่ายจาก Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า
 - องค์ประกอบธาตุในรอยเชื่อมซึ่งทดสอบได้จากเครื่อง Electron Discharge X-Ray (EDX)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงปัจจัยทางแรงดันไฟฟ้าและระยะเวลาการเชื่อมที่มีต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม
- 1.4.2 ทราบถึงปัจจัยทางแรงดันไฟฟ้าและระยะเวลาการเชื่อมที่มีต่อกำลังของเลเซอร์
- 1.4.3 ทราบถึงปัจจัยทางแรงดันไฟฟ้าและระยะเวลาการเชื่อมที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรอยเชื่อม
- 1.4.4 ทราบถึงปัจจัยทางแรงดันไฟฟ้าที่มีต่อความลึกของรอยเชื่อม
- 1.4.5 ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของรอยเชื่อม
- 1.4.6 เป็นแนวทางสำหรับการปรับ (Set Up) ค่าแรงดันไฟฟ้าและระยะเวลาการเชื่อมเพื่อให้ได้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ต้องการ
- 1.4.7 เป็นประโยชน์สำหรับการค้นคว้าศาสตร์นี้ต่อไป

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการพื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ประวัติคอมพิวเตอร์

คอมพิวเตอร์ในยุคเริ่มแรกได้แก่เครื่องจักรกลหรือสิ่งประดิษฐ์ที่ทำขึ้นเพื่อช่วยในการคำนวณ โดยที่ยังไม่มีการนำวงจรรวมหรือไมโครโพรเซสเซอร์เข้ามาใช้ประโยชน์ร่วมด้วย ลำดับของการประดิษฐ์เครื่องมือขึ้นมาดังนี้

ในระยะ 5,000 ปีที่ผ่านมามนุษย์เริ่มรู้จักการใช้นิ้วมือและนิ้วเท้าของตนเพื่อช่วยในการคำนวณและพัฒนามาใช้อุปกรณ์อื่นๆ เช่น ลูกหิน ใช้เชือกร้อยลูกหินคล้ายลูกคิด ต่อมาประมาณ 2,600 ปีก่อนคริสตกาล ชาวจีนได้ประดิษฐ์เครื่องมือเพื่อใช้ในการคำนวณขึ้นมาชนิดหนึ่งเรียกว่าลูกคิด ซึ่งถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยการคำนวณที่เก่าแก่ที่สุดในโลกและคงยังใช้งานมาจนถึงปัจจุบัน

พ.ศ. 2158 นักคณิตศาสตร์ชาวสก็อตแลนด์ชื่อ John Napier ได้ประดิษฐ์อุปกรณ์ที่ใช้ช่วยการคำนวณขึ้นมาเรียกว่า Napier's Bones เป็นอุปกรณ์ที่ลักษณะคล้ายกับตารางสูตรคูณในปัจจุบัน เครื่องมือชนิดนี้ช่วยให้สามารถทำการคูณและหารได้ง่ายเหมือนกับทำการบวกหรือลบโดยตรง

พ.ศ. 2185 นักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ Blaise Pascal ซึ่งในขณะนั้นมีอายุเพียง 19 ปี ได้ออกแบบเครื่องมือในการคำนวณโดยใช้หลักการหมุนของฟันเฟืองหนึ่งอันถูกหมุนครบ 1 รอบ ฟันเฟืองอีกอันหนึ่งซึ่งอยู่ทางด้านซ้ายจะถูกหมุนไปด้วยในเศษ 1 ส่วน 10 รอบ เครื่องมือของปาสคาลนี้ถูกเผยแพร่ออกสู่สาธารณะชนเมื่อ พ.ศ. 2188 แต่ไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควรเนื่องจากราคาแพงและเมื่อใช้งานจริงจะเกิดเหตุการณ์ที่ฟันเฟืองติดขัดบ่อยๆ ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ไม่ค่อยถูกต้องตรงความเป็นจริง เครื่องมือของปาสคาลสามารถใช้ได้ดีในการคำนวณการบวกและลบ ส่วนการคูณและหารยังไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นในปี พ.ศ. 2216 นักปราชญ์ชาวเยอรมันชื่อ Gottfried Von Leibnitz ได้ปรับปรุงเครื่องคำนวณของปาสคาลให้สามารถทำการคูณและหารได้

โดยตรงโดยที่การคูณใช้หลักการบวกกันหลายๆครั้ง และการหารก็คือการลบกันหลายๆครั้ง แต่เครื่องมือของ Leibnitz ยังคงอาศัยการหมุนวงล้อของเครื่อง นับว่าเป็นเครื่องมือที่ช่วยให้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่อยู่ยากกลับเป็นเรื่องที่ง่ายขึ้น

พ.ศ. 2344 นักประดิษฐ์ชาวฝรั่งเศสชื่อ Joseph Marie Jacquard ได้พยายามพัฒนาเครื่องทอผ้าโดยใช้บัตรเจาะรูในการบันทึกคำสั่งควบคุมเครื่องทอผ้าให้ทำตามแบบที่กำหนดไว้ และแบบดังกล่าวสามารถนำมาสร้างซ้ำได้อีกหลายครั้ง ความพยายามของ Jacquard สำเร็จลงใน พ.ศ. 2348 เครื่องทอผ้านี้ถือว่าเป็นเครื่องทำงานตามโปรแกรมคำสั่งเป็นเครื่องแรก

พ.ศ. 2373 Chales Babbage ถือกำเนิดที่ประเทศอังกฤษเมื่อพ.ศ. 2334 จบการศึกษาทางด้านคณิตศาสตร์จากมหาวิทยาลัยแคมบริดจ์ และได้รับตำแหน่ง Lucasian Professor ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ Isaac Newton เคยได้รับมาก่อน ในขณะที่กำลังศึกษาอยู่นั้น Babbage ได้สร้างเครื่องหาผลต่าง (Difference Engine) ซึ่งเป็นเครื่องที่ใช้คำนวณและพิมพ์ตารางทางคณิตศาสตร์อย่างอัตโนมัติ จนกระทั่งปี พ.ศ. 2373 เขาได้รับความช่วยเหลือจากรัฐบาลอังกฤษเพื่อสร้างเครื่อง Difference Engine ขึ้นมาจริงๆ แต่ในขณะที่ Babbage ทำการสร้างเครื่อง Difference Engine อยู่ นั้น ได้พัฒนาความคิดไปถึงเครื่องมือในการคำนวณที่มีความสามารถสูงกวานี้ ซึ่งก็คือเครื่องที่เรียกว่าเครื่องวิเคราะห์ (Analytical Engine) และได้ยกเลิกโครงการสร้างเครื่อง Difference Engine ลง แล้วเริ่มทำงานใหม่ คืองานสร้างเครื่องวิเคราะห์ในความคิดของเขา โดยที่เครื่องดังกล่าวประกอบไปด้วยชิ้นส่วนที่สำคัญ 4 ส่วน คือ

1. ส่วนเก็บข้อมูล เป็นส่วนที่ใช้ในการเก็บข้อมูลนำเข้าและผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ
2. ส่วนประมวลผล เป็นส่วนที่ใช้ในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์
3. ส่วนควบคุม เป็นส่วนที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายข้อมูลระหว่างส่วนเก็บข้อมูล และส่วนประมวลผล
4. ส่วนรับข้อมูลเข้าและแสดงผลลัพธ์ เป็นส่วนที่รับทราบข้อมูลจากภายนอกเครื่องเข้าสู่ส่วนเก็บ และแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณให้ผู้ใช้ได้รับทราบ

เป็นที่น่าสังเกตว่า ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่อง Analytical Engine มีลักษณะใกล้เคียงกับส่วนประกอบของระบบคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน แต่น่าเสียดายที่เครื่อง Analytical Engine ของ Babbage นั้นไม่สามารถสร้างให้สำเร็จขึ้นมาได้ทั้งนี้เนื่องจากเทคโนโลยีสมัยนั้นไม่สามารถสร้างส่วนประกอบต่างๆดังกล่าว และอีกประการหนึ่งก็คือสมัยนั้นไม่มีความจำเป็นต้องใช้เครื่องที่มีความสามารถสูงขนาดนั้น ดังนั้นรัฐบาลอังกฤษจึงหยุดให้ความสนับสนุนโครงการของ Babbage ในปี พ.ศ. 2385 ทำให้ไม่มีทุนที่จะทำการวิจัยต่อไป สืบเนื่องจากมาจากแนวความคิด

ของ Analytical Engine เช่นนี้จึงทำให้ Charles Babbage ได้รับการยกย่องให้เป็นบิดาของเครื่องคอมพิวเตอร์

พ.ศ. 2385 ชาวอังกฤษ ชื่อ Lady Augusta Ada Byron ได้ทำการแปลเรื่องราวเกี่ยวกับเครื่อง Analytical Engine จากภาษาฝรั่งเศสเป็นภาษาอังกฤษ ในระหว่างการแปลทำให้ Lady Ada เข้าใจถึงหลักการทำงานของเครื่อง Analytical Engine และได้เขียนรายละเอียดขั้นตอนของคำสั่งให้เครื่องนี้ทำการคำนวณที่ย่างยากซับซ้อนไว้ในหนังสือทางคณิตศาสตร์เล่มหนึ่ง ซึ่งถือว่าเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์โปรแกรมแรกของโลก และจากจุดนี้จึงถือว่า Lady Ada เป็นโปรแกรมเมอร์คนแรกของโลก (มีภาษาที่ใช้เขียนโปรแกรมที่เก่าแก่อยู่หนึ่งภาษาคือภาษา Ada มาจากชื่อของ Lady Ada) นอกจากนี้ Lady Ada ยังค้นพบอีกว่าชุดบิตตรजेरु ที่บรรจุคำสั่งไว้สามารถนำกลับมาทำงานซ้ำได้ถ้าต้องการ นั่นคือหลักของการทำงานวนซ้ำหรือเรียกว่า Loop เครื่องมือที่ใช้ในการคำนวณที่ถูกพัฒนาขึ้นในศตวรรษที่ 19 นั้น ทำงานกับเลขฐานสิบ (Decimal Number) แต่เมื่อเริ่มต้นของศตวรรษที่ 20 ระบบคอมพิวเตอร์ได้ถูกพัฒนาขึ้นจึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงมาใช้เลขฐานสอง (Binary Number) กับระบบคอมพิวเตอร์ที่เป็นผลสืบเนื่องมาจากหลักของพีชคณิต

พ.ศ. 2397 นักคณิตศาสตร์ชาวอังกฤษ George Boole ได้ใช้หลักพีชคณิตเผยแพร่กฎของ Boolean Algebra ซึ่งเป็นคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายเหตุผลของตรรกวิทยาที่ตัวแปรมีค่าได้เพียง "จริง" หรือ "เท็จ" เท่านั้น (ใช้สภาวะเพียงสองอย่างคือ 0 กับ 1 ร่วมกับเครื่องหมายในเชิงตรรกพื้นฐานคือ AND, OR และ NOT) สิ่งที่ George Boole คิดค้นขึ้นนับว่ามีประโยชน์ต่อระบบคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันอย่างยิ่ง เนื่องจากการยากที่จะใช้กระแสไฟฟ้าซึ่งมีเพียง 2 สภาวะคือเปิดกับปิดในการแทนเลขฐานสิบซึ่ง มีอยู่ถึง 10 ตัว คือ 0 ถึง 9 แต่เป็นการง่ายกว่าเราแทนด้วยเลขฐานสอง คือ 0 กับ 1 จึงถือว่าสิ่งนี้เป็นรากฐานที่สำคัญของการออกแบบวงจรระบบคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน

พ.ศ.2423 Dr.Herman Hollerith นักสถิติชาวอเมริกันได้ประดิษฐ์เครื่องประมวลผลทางสถิติซึ่งใช้กับบัตรजेरु เครื่องนี้ได้รับการพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นและมาใช้งานสำรวจสำมะโนประชากร ของสหรัฐอเมริกาในปี พ.ศ. 2433 และช่วยให้การสรุปผลสำมะโนประชากรเสร็จสิ้นภายในระยะเวลา 2 ปีครึ่ง (โดยก่อนหน้านั้นต้องใช้เวลาถึง 7 ปีครึ่ง) เรียกบัตรजेरुนี้ว่า “บัตรฮอลเลอร์ริท” และชื่ออื่นๆ ที่ใช้เรียกบัตรนี้ก็คือ “บัตรไอบีเอ็ม” หรือ “บัตร 80 คอลัมน์” เพราะผู้ผลิตคือบริษัท IBM

เครื่องมือทั้งหลายที่ถูกประดิษฐ์ขึ้นมาในยุคก่อนนั้นส่วนมากประกอบด้วยฟันเฟือง รอก คาน ซึ่งเป็นวัสดุที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากทำให้การทำงานล่าช้าและผิดพลาดอยู่เสมอ ดังนั้นในยุคต่อมาจึงพยายามพัฒนาเครื่องมือให้มีขนาดเล็กลงแต่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ดังนี้

พ.ศ.2480 ศาสตราจารย์ Howard Aiken แห่งมหาวิทยาลัยฮาร์วาร์ดได้พัฒนาเครื่องคำนวณตามแนวคิดของ Babbage ร่วมกับวิศวกรของบริษัท IBM สร้างเครื่องคำนวณตามความคิดของ Babbage ได้สำเร็จโดยเครื่องดังกล่าวทำงานแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้า และใช้บัตรเจาะรูเป็นสื่อ ในการนำเข้าสู่ข้อมูลสู่เครื่องเพื่อทำการประมวลผล การพัฒนาดังกล่าวมาเสร็จสิ้นในปีพ.ศ. 2487 โดย เครื่องมือนี้มีชื่อว่า MARK 1 และเนื่องจากเครื่องนี้สำเร็จได้จากการสนับสนุนด้านการเงินและบุคลากรจากบริษัท IBM ดังนั้นจึงมีอีกชื่อหนึ่งว่า IBM Automatic Sequence Controlled Calculator และนับ เป็นเครื่องคำนวณแบบอัตโนมัติเครื่องแรกของโลก

พ.ศ.2486 ซึ่งเป็นช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 ศูนย์วิจัยของกองทัพบกสหรัฐอเมริกา มีความจำเป็นที่จะต้องคิดค้นเครื่องช่วยคำนวณเพื่อใช้คำนวณหาทิศทางและระยะทางในการส่งขีปนาวุธ ซึ่งถ้าใช้เครื่องคำนวณที่มีอยู่ในสมัยนั้นจะต้องใช้เวลาถึง 12 ชั่วโมงในการคำนวณการยิง 1 ครั้ง ดังนั้นกองทัพจึงให้กองทุนอุดหนุนแก่ John W. Mauchly และ Persper Eckert จากมหาวิทยาลัยเพนซิลวาเนียในการสร้างคอมพิวเตอร์จากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขึ้นมาโดยนำหลอดสุญญากาศ (Vacuum Tube) จำนวน 18,000 หลอด มาใช้ในการสร้างซึ่งข้อดีคือทำให้เครื่องมีความเร็วและมีความถูกต้องแม่นยำในการคำนวณมากขึ้น ในด้านของความเร็วนั้นเครื่องจักรกลมีความเฉื่อยของการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนประกอบ แต่คอมพิวเตอร์อิเล็กทรอนิกส์จะใช้อิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวเคลื่อนที่ทำให้สามารถส่งข้อมูลด้วยกระแส ไฟฟ้าได้ด้วยความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วของแสง ส่วนความถูกต้องแม่นยำในการทำงานของเครื่อง จักรกลอาศัยฟันเฟือง รอก คาน ในการทำงาน ทำให้ทำงานได้ช้าและเกิดความผิดพลาดได้ง่าย

พ.ศ. 2489 เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ Mauchly และ Eckert คิดค้นขึ้นได้มีชื่อว่า ENIAC ย่อมาจาก (Electronic Numerical Integrated And Calculator) ประสบความสำเร็จในปี พ.ศ. 2489 ถึง แม้ว่าจะไม่ทันใช้ในสงครามโลกครั้งที่สอง แต่ความเร็วในการคำนวณของ ENIAC ทำให้วงการคอมพิวเตอร์ขณะนั้นยอมรับความสามารถของเครื่องคอมพิวเตอร์อิเล็กทรอนิกส์แต่อย่างไรก็ตาม ENIAC ทำงานด้วยไฟฟ้าทั้งหมดทำให้ในการทำงานแต่ละครั้งจึงทำให้เกิดความร้อนสูงมาก จำเป็นต้องติดตั้ง ไว้ในห้องที่มีเครื่องปรับอากาศด้วย นอกจากนี้ ENIAC ยังเก็บได้เฉพาะข้อมูลที่เป็น ตัวเลขขนาด 10 หลักและเก็บได้เพียง 20 จำนวนเท่านั้น ส่วนชุดคำสั่งนั้นยังไม่สามารถเก็บไว้ในเครื่องได้ การส่งชุดคำสั่ง เข้าเครื่องจะต้องใช้วิธีการเดินสายไฟสร้างวงจร ถ้ามีการแก้ไขโปรแกรมก็ต้องมีการเดินสายไฟกันใหม่ซึ่งใช้เวลาเป็นวัน

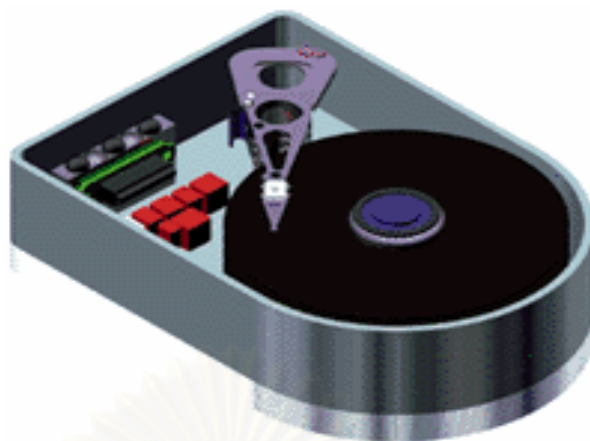
ความคิดต่อมาในการพัฒนาเครื่องคอมพิวเตอร์ให้ดีขึ้นก็คือการค้นหาวีธีการเก็บโปรแกรมไว้ใน เครื่องเพื่อลดความยุ่งยากของขั้นตอนการป้อนคำสั่งเข้าเครื่อง มีนักคณิตศาสตร์เชื้อสายฮังการีเรียนชื่อ Dr.JohnVon Neumann ได้พบวิธีการเก็บโปรแกรมไว้ในหน่วยความจำของเครื่อง เช่นเดียวกับการเก็บข้อมูลและต่อวงจรไฟฟ้าสำหรับการคำนวณและการปฏิบัติการพื้นฐาน

ไว้ให้เรียบร้อยภายในเครื่องแล้ว เรียกกวางจรเหล่านี้ด้วยรหัสตัวเลขที่กำหนดไว้ เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ ถูกพัฒนาขึ้นตามแนว ความคิดนี้ได้แก่ EVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer) ซึ่งสร้างเสร็จใน พ.ศ. 2492 และนำมาใช้งานจริงในปี พ.ศ. 2494 และในเวลาใกล้เคียงกันที่มหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ ประเทศอังกฤษ ได้มีการสร้างคอมพิวเตอร์มีลักษณะคล้ายกับ เครื่อง EVAC และให้ชื่อว่า EDSAC (Electronic Delay Storage Automatic Calculator)

2.1.2 ฮาร์ดดิสก์ (Hard Disk)

ฮาร์ดดิสก์เป็นอุปกรณ์ที่รวมเอาองค์ประกอบทั้งกลไกการทำงานและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้าไว้ด้วยกัน (ดังแสดงในรูปที่ 2.1) ได้ชื่อว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนที่สุดในด้านอุปกรณ์ที่มีการเคลื่อนไหว แต่ในความเป็นจริงแล้วการอธิบายการทำงานของฮาร์ดดิสก์นั้น ถือว่าได้ง่าย ภายในฮาร์ดดิสก์นั้นจะมีแผ่น Aluminum Alloy Platter หลายแผ่นหมุนอยู่ด้วยความเร็วสูง โดยจะมีจำนวนแผ่นขึ้นอยู่กับแต่ละรุ่นแต่ละยี่ห้อต่างกันไป เมื่อผู้ใช้พิมพ์คำสั่งให้คอมพิวเตอร์ทำงาน แขนกลของฮาร์ดดิสก์จะรอบรับคำสั่งและเคลื่อนที่ไปยังส่วนที่ถูกต้องของ Platter เมื่อถึงที่หมายก็จะทำการอ่านข้อมูลลงบนแผ่นดิสก์นั้น หัวอ่านจะอ่านข้อมูลแล้วส่งไปยังซีพียู จากนั้นไม่นานข้อมูลที่ต้องการก็จะปรากฏการทำงานเขียนอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์จะมีการทำงานคล้ายกับการทำงานของของเทปคาสเซ็ทแพลิตเตอร์ของฮาร์ดดิสก์นั้นจะเคลื่อนไปด้วยวัตถุจำพวกแม่เหล็กที่มีขนาดความหนาเพียง 2-3 ในล้านส่วนของนิ้ว แต่จะต่างจากเทปทั่วไปคือฮาร์ดดิสก์นั้นจะใช้หัวอ่านเพียงหัวเดียวในการทำงานทั้งอ่าน และเขียนข้อมูลบนฮาร์ดดิสก์ การเขียนข้อมูลลงบนฮาร์ดดิสก์นั้นหัวอ่านจะได้รับกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าสู่คอยล์ (Coil) ของหัวอ่าน เพื่อสร้างรูปแบบแม่เหล็กบนสื่อที่เคลือบอยู่บนแพลิตเตอร์ ซึ่งเท่ากับเป็นการเขียนข้อมูลลงบนฮาร์ดดิสก์ การอ่านนั้นก็จะเป็นการแปลงสัญญาณรูปแบบแม่เหล็กที่ได้บันทึกอยู่บนฮาร์ดดิสก์กลับแล้วเพิ่มสัญญาณและทำการประมวลผลให้กลับมาเป็นข้อมูลอีกครั้งอีกจุดที่แตกต่างกันของการเก็บข้อมูลระหว่างฮาร์ดดิสก์กับฮาร์ดดิสก์นั้นก็คือเทปจะเก็บข้อมูลในรูปแบบของสัญญาณอนาล็อก (Analog) แต่สำหรับฮาร์ดดิสก์นั้นจะเก็บในรูปแบบสัญญาณดิจิทัล (Digital) โดยจะเก็บเป็นเลขฐานสองคือ 0 และ 1 ฮาร์ดดิสก์จะเก็บข้อมูลไว้ใน Track หรือ เส้นวงกลม โดยจะเริ่มเก็บข้อมูลที่ด้านนอกสุดของฮาร์ดดิสก์ก่อน จากนั้นจึงไล่เข้ามาด้านในสุดโดยฮาร์ดดิสก์จะเป็นอุปกรณ์ที่สามารถสุ่มเข้าถึงข้อมูลได้คือการที่หัวอ่านสามารถเคลื่อนที่ไปอ่านข้อมูลบนจุดใดของฮาร์ดดิสก์ก็ได้ ไม่เหมือนกับเทปเพลงที่หากจะต้องการฟังเพลงถัดไป เราก็ต้องกรอเทปไปยังจุดเริ่มต้นของ

เพลงนั้นหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์นั้นสามารถบินอยู่เหนือพื้นที่จัดเก็บข้อมูลทันทีที่ได้รับตำแหน่งมาจากซีพียู ซึ่งการเข้าถึงข้อมูลแบบสุ่มนี้เป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้ฮาร์ดดิสก์สามารถแทนที่เทปในการเก็บข้อมูลหลักของคอมพิวเตอร์ ฮาร์ดดิสก์นั้นสามารถเก็บข้อมูลได้ทั้ง 2 ด้านของเพลตเตอร์ ถ้าหัวอ่านเขียนนั้นอยู่ทั้ง 2 ด้าน ดังนั้นฮาร์ดดิสก์ที่มีเพลตเตอร์ 2 แผ่นนั้นสามารถมีพื้นที่ในการเก็บข้อมูลได้ถึง 4 ด้าน และมีหัวอ่านเขียน 4 หัว การเคลื่อนที่ของหัวอ่านเขียนนี้จะมีการเคลื่อนที่ไปพร้อมๆกันโดยจะมีการเคลื่อนที่ที่ตรงกัน Track วงกลมนั้นจะถูกแบ่งออกเป็นหน่วยย่อยๆ เรียกว่า Sector การเขียนข้อมูลลงบนฮาร์ดดิสก์นั้นจะเริ่มเขียนจากรอบนอกสุดของฮาร์ดดิสก์ก่อน จากนั้นเมื่อข้อมูลใน Track นอกสุดถูกเขียนจนเต็มหัวอ่านก็จะเคลื่อนมายังแทร็คถัดมาที่ว่างแล้วทำการเขียนข้อมูลต่อไป ซึ่งก็ด้วยวิธีการนี้ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงเป็นอย่างมากเพราะหัวอ่านเขียนสามารถบันทึกข้อมูลได้มากกว่าในตำแหน่งหนึ่งก่อนที่จะเคลื่อนที่ไปยังแทร็คถัดไป ตัวอย่างเช่น ถ้าเรามีฮาร์ดดิสก์แบบ 4 เพลตเตอร์อยู่และหัวอ่านเขียนอยู่ที่แทร็ค 15 ไดรฟ์จะเขียนข้อมูลลงในแทร็ค 15 บนทั้ง 2 ด้านของเพลตเตอร์ทั้ง 4 จนเต็ม จากนั้นจึงเคลื่อนเข้าไปหาที่แทร็ค 16 ต่อไป การหมุนของเพลตเตอร์นั้นนับได้ว่าเร็วมาก ความเร็วต่ำสุดก็เท่ากับ 3,600 รอบต่อนาที และปัจจุบันสูงสุดนับหมื่นรอบ ซึ่งเป็นการทำงานที่เร็วกว่าฟลอปปีดิสก์ (Floppy Disk) หรือเทปมาก ด้วยความเร็วขนาดนี้ทำให้หัวอ่านเขียนขนาดเล็กสามารถลอยหรือบินอยู่เหนือพื้นผิวได้หัวอ่านเขียนนั้นได้รับการออกแบบให้บินอยู่เหนือแผ่นเพลตเตอร์ที่กำลังหมุนอยู่ด้วยความเร็วสูงนี้ในความเสี่ยงเพียง 2 ในล้านส่วนของนิ้วซึ่งเท่ากับว่าระยะห่างระหว่างหัวอ่านเขียนและเพลตเตอร์นั้นมีขนาดเล็กกว่าเส้นผมของคนเราหรือแม้กระทั่งฝุ่นมากหากเกิดการกระแทกอย่างรุนแรงขึ้นกับฮาร์ดดิสก์จนทำให้หัวอ่านเขียนสัมผัสกับแผ่นเพลตเตอร์ก็จะทำให้พื้นผิวหรือหัวอ่านเขียนเกิดการเสียหาย ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาข้อมูลเสียหาย หรือถ้าโชคร้ายก็คือฮาร์ดดิสก์พังอย่างแก้ไขไม่ได้ อย่างไรก็ตามปัญหานี้มักจะไม่เกิดกับฮาร์ดดิสก์ในปัจจุบัน ทั้งนี้เพราะฮาร์ดดิสก์ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีการผลิตที่สูงขึ้นและได้รับการป้องกันเป็นอย่างดีโดยถูกสร้างให้สามารถรับแรงกระแทกได้สูงถึง 70-100 เท่าของแรงดึงดูด (70-100G)



รูปที่ 2.1 แผนภาพของฮาร์ดดิสก์

2.1.2.1 การจัดเรียงข้อมูลบนฮาร์ดดิสก์

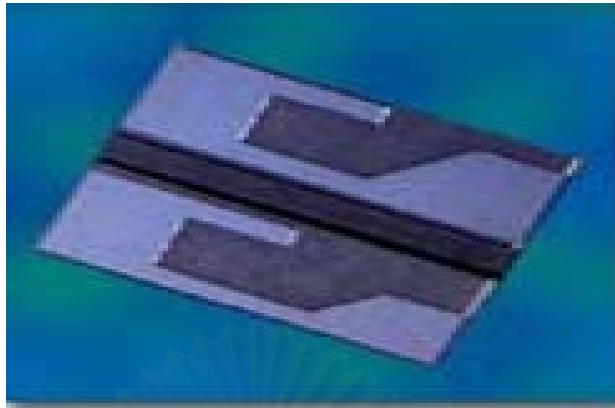
การจัดเรียงข้อมูลบนฮาร์ดดิสก์นั้นมีลักษณะเดียวกับแผนที่ข้อมูลจะถูกจัดเก็บไว้ในแตร็คบนแพล็ตเตอร์ ดิสก์ไดร์ฟทั่วไปจะมีแตร็คประมาณ 2,000 แตร็คต่อนิ้ว (TPI, Track Per Inch) Cylinder จะหมายถึงกลุ่มของ Track ที่อยู่บริเวณหัวอ่านเขียนบนทุกๆแพล็ตเตอร์ ในการเข้าอ่านข้อมูลนั้นแต่ละแตร็คจะถูกแบ่งออกเป็นหน่วยย่อยๆ เรียกว่า Sector กระบวนการในการจัดการดิสก์ให้มีแตร็คและเซกเตอร์เรียกว่า “การฟอร์แมตฮาร์ดดิสก์” ในปัจจุบันส่วนใหญ่จะได้รับการฟอร์แมต (Format) มาจากโรงงานเรียบร้อยแล้ว ในเครื่องคอมพิวเตอร์โดยปกติเซกเตอร์จะมีขนาดเท่ากับ 512 ไบต์ คอมพิวเตอร์จะใช้ข้อมูลที่ได้รับการฟอร์แมตนี้เหมือนกับที่นักท่องเน็ตใช้แผนที่ในการเดินทางคือใช้ระบุว่าข้อมูลใดอยู่ที่ตำแหน่งใดบนฮาร์ดดิสก์ ดังนั้นหากฮาร์ดดิสก์ไม่ได้รับการฟอร์แมต เครื่องคอมพิวเตอร์จะก็ไม่ว่าข้อมูลถูกเก็บไว้ที่ใดและจะนำข้อมูลมาได้จากที่ไหน ในการออกแบบฮาร์ดดิสก์แบบเก่าที่จำนวนเซกเตอร์ต่อแตร็คจะถูกกำหนดตายตัว เนื่องจากพื้นที่แตร็คบริเวณขอบนอกนั้นมีขนาดใหญ่กว่าบริเวณขอบในของฮาร์ดดิสก์ ดังนั้นพื้นที่สิ้นเปลืองของแตร็คด้านนอกจึงมีมากกว่า แต่ในปัจจุบันได้มีการใช้เทคนิคการฟอร์แมตรูปแบบใหม่ที่เรียกว่า Multiple Zone Recording เพื่อบีบข้อมูลได้มากขึ้น ในการนำมาจัดเก็บบนฮาร์ดดิสก์ได้ Multiple Zone Recording จะอนุญาตให้พื้นที่แตร็คด้านนอกสามารถปรับจำนวนคลัสเตอร์ (Cluster) ได้ ทำให้พื้นที่แตร็คด้านนอกสุดมีจำนวนเซกเตอร์มากกว่าด้านในและด้วยการแบ่งให้พื้นที่แตร็คด้านนอกสุดมีจำนวนเซกเตอร์มากกว่าด้านใน

ข้อมูลสามารถจัดเก็บได้ตลอดทั้งฮาร์ดดิสก์ทำให้มีการใช้เนื้อที่บนแพลตฟอร์มได้อย่างคุ้มค่าและเป็นการเพิ่มความจุโดยใช้จำนวนแพลตฟอร์มน้อยลงจำนวนของเซกเตอร์ต่อแทร็คในดิสก์ขนาด 3.5 นิ้วแบบปกติจะมีอยู่ประมาณ 60 ถึง 120 เซกเตอร์ภายใต้การจัดเก็บแบบ Multiple Zone Recording

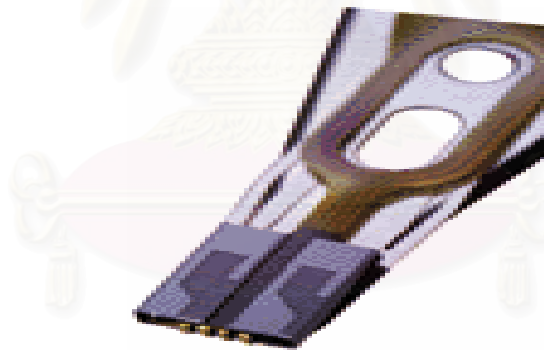
2.1.2.2 การทำงานของหัวอ่านเขียน

หัวอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์ (ดังแสดงในรูปที่ 2.2, 2.3, 2.4 และ 2.5) นับเป็นชิ้นส่วนที่มีราคาแพงที่สุดและลักษณะของมันก็มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของฮาร์ดดิสก์โดยรวมหัวอ่านเขียนจะเป็นอุปกรณ์แม่เหล็กมีรูปร่างคล้ายๆ ตัว "C" โดยมีช่องว่างอยู่เล็กน้อย โดยจะมีเส้นคอยล์พันอยู่รอบหัวอ่านเขียนนี้เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าการเขียนข้อมูลจะใช้วิธีการส่งกระแสไฟฟ้าผ่านคอยล์ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กซึ่งจะส่งผลให้เกิดความเปลี่ยนแปลงที่แพลตฟอร์ม ส่วนการอ่านข้อมูลนั้นจะรับค่าความเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กผ่านคอยล์ที่อยู่หัวอ่านเขียนแล้วแปลงค่าที่ได้เป็นสัญญาณส่งไปยังซีพียูต่อไป เมื่อเทคโนโลยีพัฒนาไปความหนาแน่นของข้อมูลก็ยิ่งเพิ่มขึ้น ในขณะที่เนื้อที่สำหรับเก็บข้อมูลก็จะลดขนาดลงขนาดบิตของข้อมูลที่เล็กนี้ทำให้สัญญาณที่เกิดขึ้นแล้วส่งไปยังหัวอ่านนั้นอ่อนลงและอ่านได้ยากขึ้น ด้วยเหตุนี้ทางผู้พัฒนาจึงจำเป็นต้องวางหัวอ่านให้ใกล้กับสื่อ (Media) มากขึ้นเพื่อลดการสูญเสียสัญญาณ จากเดิมในปี 1973 ที่หัวอ่านเขียนบินอยู่ห่างสื่อประมาณ 17 ไมครอน มาในปัจจุบันนี้หัวอ่านเขียนบินอยู่เหนือแผ่นแพลตฟอร์มเพียง 2 ไมครอนเท่านั้น เหมือนกับการนำเครื่องบินโบอิ้ง 747 มาบินด้วยความเร็วสูงสุดโดยให้บินห่างพื้นเพียง 1 ฟุต แต่ที่สำคัญก็คือหัวอ่านเขียนนั้นไม่เคยสัมผัสกับแผ่นแพลตฟอร์มที่กำลังหมุนอยู่เลย เมื่อเครื่องคอมพิวเตอร์ถูกปิดฮาร์ดดิสก์จะหยุดหมุนแล้วหัวอ่านเขียนจะเคลื่อนที่ไปยังพื้นที่ที่ปลอดภัยและหยุดอยู่ตรงนั้น ซึ่งแยกอยู่ต่างหากจากพื้นที่ที่ใช้เก็บข้อมูล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 หัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์



รูปที่ 2.3 หัวอ่านเขียนที่ประกอบลงบนแขนจับหัวอ่านเขียน



รูปที่ 2.4 ชุดของหัวอ่านเขียนที่ติดตั้งบนแขนจับซึ่งพร้อมจะประกอบในฮาร์ดดิสก์ หรือที่เรียกว่า Head Stack Assembly, HSA



รูปที่ 2.5 HSA ที่ประกอบลงใน HDD

2.1.2.3 Seek Time คือระยะเวลาที่แขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ (Suspension) เคลื่อนย้ายหัวอ่านเขียนไประหว่างแทร็คของข้อมูลบนฮาร์ดดิสก์ ซึ่งในปัจจุบันฮาร์ดดิสก์จะมีแทร็คข้อมูลอยู่ประมาณ 3,000 แทร็คในแต่ละด้านของเพลตเตอร์ขนาด 3.5 นิ้ว ความสามารถในการเคลื่อนที่จากแทร็คที่อยู่ไปยังข้อมูลในบิตต่อไปอาจเป็นการย้ายตำแหน่งไปเพียงอีกแทร็คเดียวหรืออาจย้ายตำแหน่งไปมากกว่า 2,999 แทร็คก็เป็นได้ Seek Time จะวัดโดยใช้หน่วยเวลาเป็นมิลลิวินาที ค่าของ SeekTime ของการย้ายตำแหน่งของแขนจับหัวอ่านเขียนไปในแทร็คถัดๆไปในแทร็คที่อยู่ติดๆกันอาจใช้เวลาเพียง 2 ms ในขณะที่การย้ายตำแหน่งจากแทร็คที่อยู่นอกสุดไปหาแทร็คที่อยู่ล่าสุดหรือตรงกันข้ามจะต้องใช้เวลามากถึงประมาณ 20 ms ส่วน Average Seek Time จะเป็นค่าระยะเวลาเฉลี่ยในการย้ายตำแหน่งของหัวเขียนอ่านไปมาแบบสุ่ม (Random) ในปัจจุบันค่า Average Seek Time ของฮาร์ดดิสก์จะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 8 ถึง 14 ms แม้ว่าค่า seek จะระบุเฉพาะคุณสมบัติในการทำงานเพียงด้านกว้างและยาวของแผ่นดิสก์ แต่ค่า Seek Time มักจะถูกใช้ในการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านความเร็วของฮาร์ดดิสก์เสมอ

ปกติแล้วมักมีการเรียกรุ่นของฮาร์ดดิสก์ตามระดับความเร็ว Seek Time ของตัวฮาร์ดดิสก์เอง เช่น มีการเรียกฮาร์ดดิสก์ที่มี Seek Time 14 ms ว่า “ฮาร์ดดิสก์ 14 ms” ซึ่งก็แสดงให้เห็นทราบว่าฮาร์ดดิสก์รุ่นนั้นๆมีความเร็วของ Seek Time ที่ 14 ms อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการใช้ค่าความเร็ว Seek Time กำหนดระดับชั้นของฮาร์ดดิสก์จะสะดวก แต่ค่า Seek Time ก็ยังไม่สามารถแสดงให้เห็นประสิทธิภาพทั้งหมดของฮาร์ดดิสก์ได้ จะแสดงให้เห็นเพียงแต่การค้นหาข้อมูลในแบบสุ่มของตัวไดรฟ์เท่านั้นไม่ได้แสดงในแง่ของการอ่านข้อมูลแบบเรียงลำดับ (Sequential) ดังนั้นให้ใช้ค่า Seek Time เป็นเพียงส่วนหนึ่งในการตัดสินประสิทธิภาพของฮาร์ดดิสก์เท่านั้น

2.1.2.4 Head Switch Time เป็นเวลาสลับการทำงานของหัวอ่านเขียน แขนจับหัวอ่านเขียน (Suspension) จะเคลื่อนย้ายหัวอ่านเขียนไปบนเพลตเตอร์ที่อยู่ในแนวตรงกันอย่างไรก็ตามหัวอ่านเขียนเพียงหัวเดียวเท่านั้นที่อ่านหรือบันทึกข้อมูลในเวลาใดเวลาหนึ่ง ระยะเวลาในการสลับกันทำงานของหัวอ่านเขียนจะวัดด้วยเวลาเฉลี่ยที่ตัวไดรฟ์ใช้สลับระหว่างหัวอ่านเขียนสองหัวในขณะอ่านบันทึกข้อมูล เวลาสลับหัวอ่านเขียนจะวัดด้วยหน่วยมิลลิวินาที (ms)

2.2.2.3 Cylinder Switch Time เป็นเวลาในการสลับไซลินเดอร์ (Cylinder) สามารถเรียกได้อีกแบบว่าการสลับแทร็ค (Track Switch) ในกรณีนี้แขนจับหัวอ่านเขียนจะวางตำแหน่งของหัวอ่านเขียนเหนือไซลินเดอร์ข้อมูลอื่นๆ แต่มีข้อแม้ว่าแทร็คข้อมูลทั้งหมดจะต้องอยู่ในตำแหน่งเดียวกันของเพลตเตอร์อื่นๆด้วย เวลาในการสลับระหว่างไซลินเดอร์จะวัดด้วยระยะเวลาเฉลี่ยที่ตัวไดรฟ์ใช้ในการสลับจากไซลินเดอร์หนึ่งไปยังไซลินเดอร์อื่นๆ เวลาในการสลับไซลินเดอร์จะวัดด้วยหน่วยมิลลิวินาที (ms)

2.1.2.5 Rotational Latency เป็นช่วงเวลาในการรอคอยการหมุนของแผ่นดิสก์ภายในการหมุนภายในฮาร์ดดิสก์จะเกิดขึ้นเมื่อหัวอ่านเขียนวางตำแหน่งอยู่เหนือแทร็คข้อมูลที่เหมาะสม ระบบการทำงานของหัวอ่านเขียนข้อมูลจะรอให้ตัวไดรฟ์หมุนแพลิตเตอร์ไปยังแทร็คเตอร์ที่ถูกต้อง ช่วงระยะเวลาที่รอคอยนี้เองที่ถูกระบุว่า Rotational Latency ซึ่งจะวัดด้วยหน่วย ms เช่นเดียวกัน แต่ระยะเวลาก็ตีขึ้นอยู่กับ RPM (จำนวนรอบต่อนาที) ด้วยเช่นกัน

2.1.3 แสง (Light)

แสงตามธรรมชาติที่เราเห็นเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญจากดาวเคราะห์ที่มีมายาวนานนับควมคุมการเติบโตของพืช ภูมิประเทศและลมฟ้าอากาศ รังสีจากดวงอาทิตย์ซึ่งเดินทางด้วยความเร็วประมาณ 300,000 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และใช้เวลาประมาณ 8.5 นาทีถึงผิวโลก ตามธรรมชาติเมื่อโมเลกุลของสสารได้รับคลื่นแสงที่บางความยาวคลื่นมันจะถูกกระตุ้นให้โมเลกุลสั่นและให้ความร้อนออกมา นอกจากนี้เมื่อวางแผ่นเหล็กไว้ข้างหลังแผ่นกระจกอบในวันที่แดดแรงของฤดูร้อน แผ่นเหล็กจะดูดกลืนพลังงานมากกว่าแผ่นกระจก แผ่นเหล็กจะร้อนจนไม่สามารถสัมผัสได้แต่แผ่นกระจกจะไม่ร้อนกว่าอากาศรอบๆมัน กระจกดูดกลืนพลังงานน้อยกว่าเพราะว่ามันโปร่งแสง (Transparent) ต่อความยาวคลื่นเกือบทั้งหมด จากผลของการเปรียบเทียบดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงได้หากความยาวคลื่นถูกสร้างเทียมขึ้นมาใหม่ ยกตัวอย่างเช่น เหล็กโปร่งแสงบางส่วน (Partial Transparent) ต่อเอกซเรย์ (X-rays) รังสีเทียม (Artificial Rays) เหล่านี้เป็นชนิดเดียวกับแสงแต่มีความยาวคลื่นสั้นกว่ามากๆ

ความยาวของคลื่นแสงที่แตกต่างกันสามารถให้พลังงานความร้อนต่างกันเมื่อถูกดูดกลืนโดยสสารชนิดต่างๆ จากความจริงสองประการของแสงที่สามารถส่งผ่านไปได้ในระยะทางไกลๆ และสามารถทำให้เป็นจุดเล็กๆได้ทำให้ความหนาแน่นกำลังเพิ่มขึ้น (Power Density) เป็นสิ่งชักจูงให้นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรหันมาพัฒนาเครื่องผลิตแสงชนิดพิเศษที่เรียกว่าเลเซอร์ (Laser)

2.1.4 เลเซอร์ (Laser)

เลเซอร์เป็นลำแสงขนาน (Collimated) ที่มีเฟสเดียวกันและความยาวคลื่นเดียวกันทั้งหมด (Coherent) ลำแสงชนิดนี้ต่างจากแสงที่ไม่เป็นเฟสเดียวกัน (Incoherent Light) ของแสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งแผ่รังสีทุกทิศทางจากแหล่งของมัน เกือบทั้งหมดของลำแสงขนานที่มีความยาวคลื่นเดียวกันสามารถรวมแสง (Focus) ให้เป็นจุดเล็กๆซึ่งมีพลังงานสูงได้มากกว่ารังสีจากดวงอาทิตย์ดังนั้นเลเซอร์จึงเป็นทางเลือกของแหล่งพลังงานสูงที่มีประสิทธิภาพ

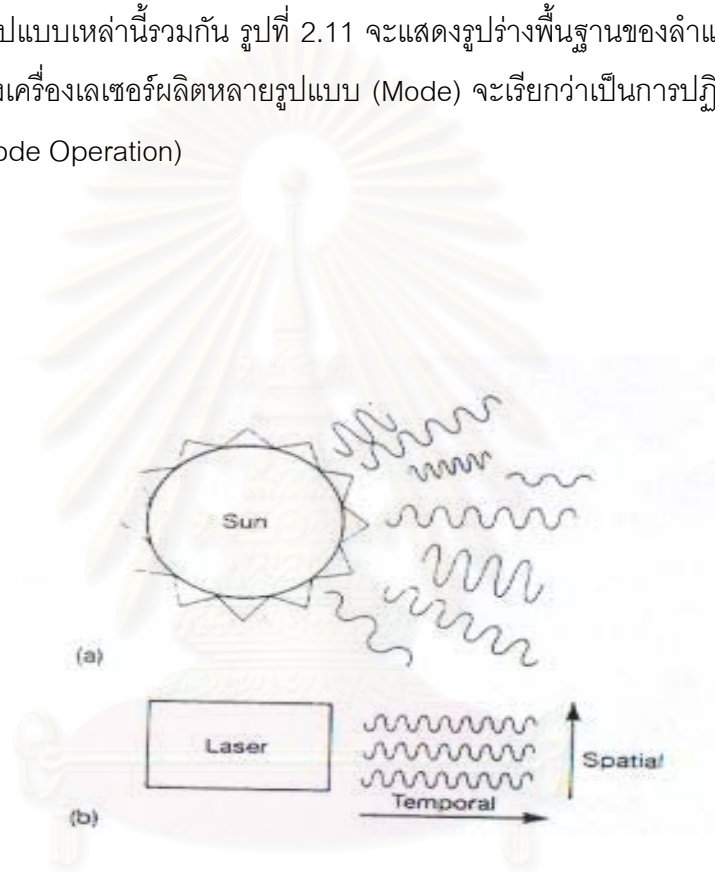
เลเซอร์เป็นคำผสมของคำว่า Light Amplification Stimulated by Emission of Radiation ซึ่งเป็นชื่อที่กล่าวถึงการเกิดของมัน เลเซอร์ทั้งหมดเกิดขึ้นโดยการกระตุ้น active medium ซึ่งวางอยู่ระหว่างกระจกสองอัน ซึ่งอันหนึ่งจะส่งผ่านแสงได้บางส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 Active Medium เป็นที่เก็บของอะตอมชนิดพิเศษ โมเลกุลหรือไอออน ซึ่งอยู่ได้ทั้งในรูปของก๊าซของเหลวและของแข็ง การกระตุ้นของแข็งและของเหลวทำได้โดยให้แสงกระตุ้นจากหลอดไฟกระพริบ (Flash Lamp) สำหรับก๊าซกระตุ้นได้โดยการปล่อยพลังงานไฟฟ้าให้มัน

คำว่าโฟตอน (Photon) ถูกใช้แทนคำว่าคลื่นแสงเมื่ออธิบายถึงการผลิตแสงเลเซอร์ เพราะว่าโฟตอนหมายถึงก้อนพลังงานซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความยาวคลื่นของมัน

Active Medium ประกอบไปด้วยอะตอม โมเลกุล หรือ ไอออน เป็นพันๆล้านตัว และมันจะดูดกลืนพลังงานเมื่อถูกกระตุ้น ซึ่งมันจะเก็บพลังงานไว้ในช่วงเวลาที่ยาวนานๆ โดยไม่มีช่วงเวลาที่ยาวนาน เมื่อถึงเวลามันก็จะปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน และจะกลับคืนสู่สภาพเดิมอีกครั้งจนกระทั่งถูกกระตุ้นอีกครั้งหนึ่งการปล่อยโฟตอนนี้ถูกเรียกว่าเป็นการปล่อยออกมาเองโดยธรรมชาติ (Spontaneous Emission) โฟตอนจะถูกปล่อยออกมาในทุกๆทิศทางโดยสัมพันธ์กับแกนของแผ่นกระจกทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เมื่อโฟตอนตัวหนึ่งเกิดชนกับอะตอมตัวหนึ่ง จะทำให้เกิดการปล่อยโฟตอนตัวหนึ่งออกมาก่อนกำหนดและโฟตอนทั้งสองตัวก็จะเดินทางในเฟสเดียวกันจนกระทั่งเกิดการชนครั้งต่อไป ซึ่งเป็นการสร้างลำแสงโฟตอนที่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังในรูปที่ 2.9 ภาวะการณ์ที่มีการปล่อยโฟตอนออกมาก่อนกำหนดถูกเรียกว่า การปล่อยพลังงานโดยการถูกกระตุ้น (Stimulated Emission) โฟตอนตัวที่ไม่เดินทางขนานกับแกนของกระจกจะหายไปจากระบบอย่างรวดเร็ว

สำหรับตัวที่เดินทางขนานกับแกนจะมีความยาวของทางเดิน (path length) มากขึ้น โดยมีการสะท้อนกลับโดยกระจกก่อนออกจากชุดเลเซอร์จะผ่านกระจกที่แสงผ่านได้บางส่วน (Partially Transmitting Mirror) ดังในรูปที่ 2.10 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ไม่ได้เพียงแต่ได้ปริมาณของพลังงานที่ต้องการ แต่ยังให้ลำแสงขนานที่มีเฟสเดียวกันและความยาวคลื่นเดียวกัน (Collimated Coherent Light Beam) ซึ่งทำให้เลเซอร์มีประโยชน์อย่างมาก

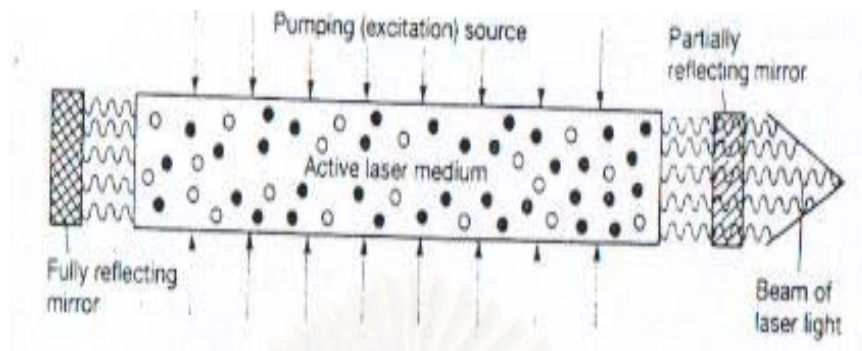
ความหนาแน่นกำลัง (Power Density) ที่ออกมาจากชุดเลเซอร์ (Laser Output) มีความไม่สม่ำเสมอโดยขึ้นกับ active medium ซึ่งก็คือขนาดของมัน การออกแบบระบบการสะท้อน และระบบการกระตุ้นที่ใช้ ภาพตัดขวางของลำแสงเลเซอร์ซึ่งแสดงการกระจายของพลังงาน เราจะเรียกว่า TEM (Transverse Electromagnetic Mode) เราแยกความแตกต่างของ TEM โดยตัวเลข โดยทั่วไปยิ่งตัวเลขมากขึ้นเราจะยิ่งไม่สามารถรวมแสงให้เป็นจุดเล็กๆได้เพื่อให้ได้ความหนาแน่นกำลังสูงๆได้ โดยทั่วไปจะมีการใช้รูปแบบ (Mode) ดังนี้ TEM 00, TEM 01, TEM 10, TEM 11, TEM 20 หรือในรูปแบบเหล่านี้รวมกัน รูปที่ 2.11 จะแสดงรูปร่างพื้นฐานของลำแสงเลเซอร์ของรูปแบบดังกล่าว บางเครื่องเลเซอร์ผลิตหลายรูปแบบ (Mode) จะเรียกว่าเป็นการปฏิบัติงานที่มีหลายรูปแบบ (Multi-mode Operation)



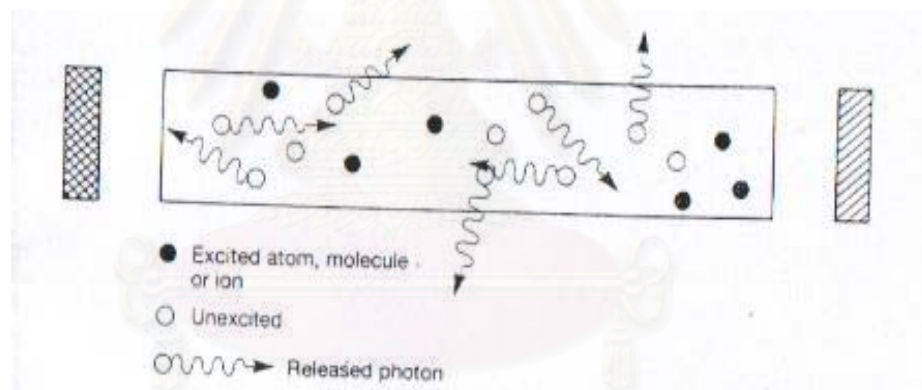
รูปที่ 2.6 แสง Coherent และ Incoherent

(a) คลื่นแสงจากดวงอาทิตย์เป็นแสง Incoherent

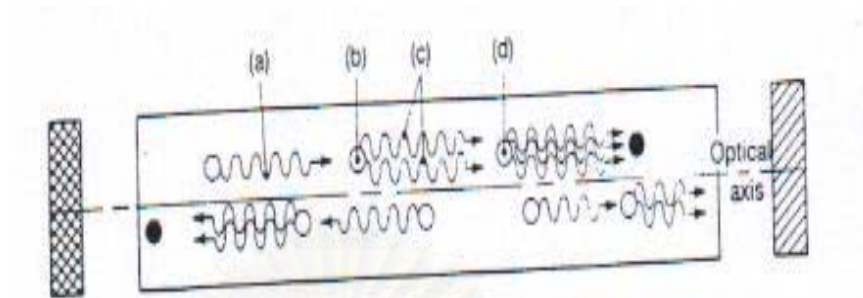
(b) คลื่นแสง Coherent จากเลเซอร์



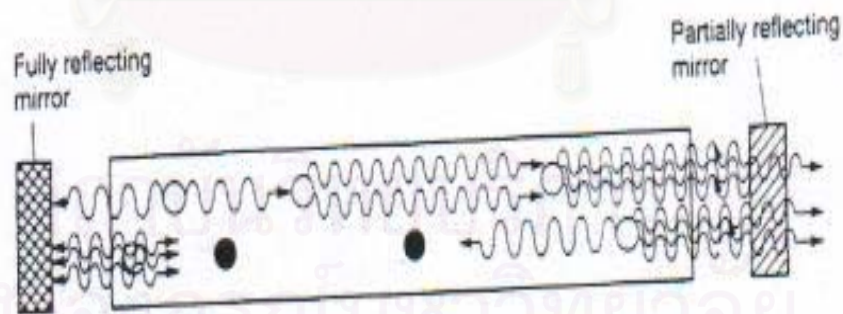
รูปที่ 2.7 องค์ประกอบพื้นฐานของเลเซอร์



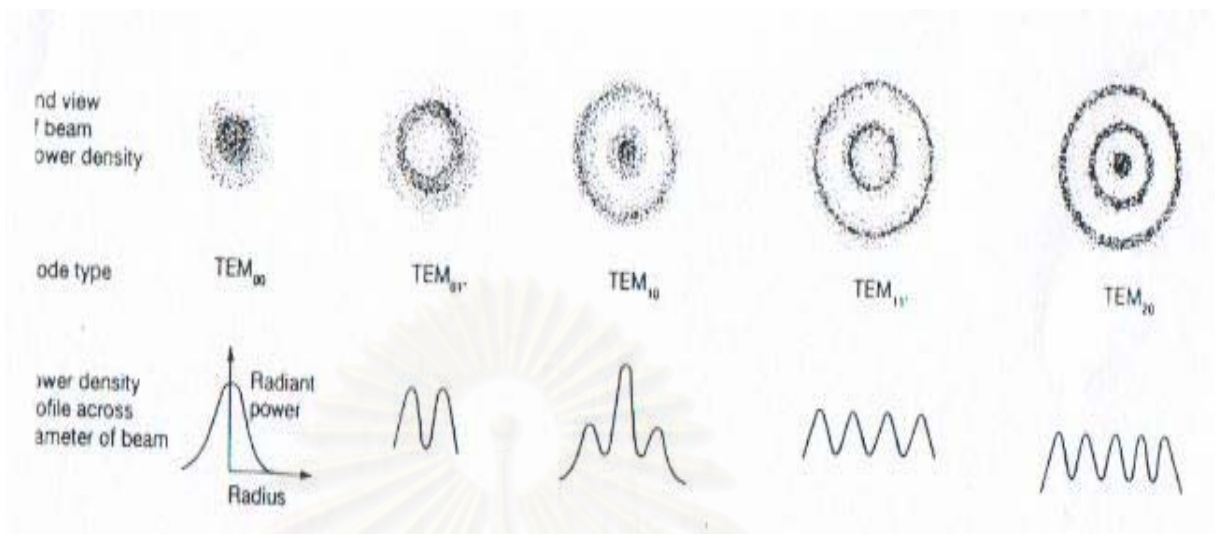
รูปที่ 2.8 การปล่อยโฟตอนออกมาเองของ active medium ที่ถูกกระตุ้น
นับเป็นพื้นฐานของอะตอม โมเลกุล และไอออน ที่ถูกกระตุ้นและ
ปล่อยโฟตอนออกมาในทุกทิศทาง



รูปที่ 2.9 การปล่อยโฟตอนออกมาโดยการถูกกระตุ้น โฟตอนตัวหนึ่งเกิดชนกับอะตอมที่ถูกกระตุ้นจะทำให้มันปล่อยโฟตอนออกมาก่อนจะเกิดปล่อยโฟตอนด้วยตัวเอง (Spontaneous Emission) ดังนั้นจะมีโฟตอน 2 ตัว มันจะเคลื่อนที่ด้วยเฟสเดียวกันจนกระทั่งเกิดการชนครั้งต่อไป เกิดการปล่อยโฟตอนออกมาจากการถูกกระตุ้น ซึ่งมันจะเดินทางขนานกับแกนของกระจกเลนส์



รูปที่ 2.10 การสะท้อนกลับของโฟตอนโดยกระจกซึ่งจะเพิ่มระยะทางสำหรับ Stimulated Emission และเพิ่มกำลังของเลเซอร์



รูปที่ 2.11 ลักษณะพื้นฐานของลำแสงซึ่งเกิดจากต่างเลเซอร์กัน บางเลเซอร์เป็นการรวมกันของลักษณะเหล่านี้

2.1.5 การเชื่อมเลเซอร์ (Laser Welding)

การเชื่อมเลเซอร์ในปัจจุบันนี้สามารถทำได้ทั้งการตัดและยึดติดวัสดุ สำหรับสื่อกระตุ้น (Active Medium) ก็เป็นได้ทั้งในสถานะของแข็งและก๊าซดังนั้นจึงได้แบ่งเครื่องเชื่อมเลเซอร์ออกเป็นสองชนิดคือเลเซอร์ชนิดของแข็ง (Solid Laser) และเลเซอร์ชนิดก๊าซ (Gas Laser)

หนึ่งในเลเซอร์ชนิดของแข็งที่นิยมใช้กันมากก็คือ Nd:YAG (Neodymium Yttrium Aluminum Garnet) ซึ่งสามารถให้ความยาวคลื่นที่ 1.064 ไมครอนสามารถให้กำลังที่สูงภายใต้ช่วงเวลาการปฏิบัติงานที่ยาวนานโดยปราศจากการเกินภาระทางความร้อน (Overheat) ด้วยข้อดีของ Nd:YAG ดังกล่าว จึงจะขอก้าวถึงเลเซอร์ชนิดของแข็งที่เป็น Nd:YAG เป็นหลัก

เลเซอร์ชนิดก๊าซที่ใช้ในงานเชื่อมโดยทั่วไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ (Carbon Dioxide Laser) ซึ่งมีความยาวคลื่น 10.6 ไมครอน เป็นชนิดที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีในการเชื่อมเช่นกัน อย่างไรก็ตามคาร์บอนมอนอกไซด์เลเซอร์ (Carbon monoxide Laser) ซึ่งมีความยาวคลื่น 5.3 ไมครอน ก็ยังอยู่ในระหว่างการพัฒนาอยู่

2.1.5.1 Nd:YAG เลเซอร์ (Nd:YAG laser)

Nd:YAG เลเซอร์ที่ใช้กันในการค้ามีกำลังเฉลี่ยตั้งแต่ 100 วัตต์ ไปจนถึงมากกว่า 1,000 วัตต์ สำหรับกำลังขนาด 2,000 ถึง 3,000 วัตต์ กำลังอยู่ระหว่างการพัฒนาอยู่ Nd:YAG เลเซอร์ขนาดกำลัง 1,000 วัตต์ แสดงในรูปที่ 2.12 ถึงแม้ว่ากำลังเฉลี่ยของ Nd:YAG เลเซอร์จะต่ำกว่าคาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ แต่มันก็สามารถให้กำลังสูงสุด (Peak Power) ได้ถึง 10,000 วัตต์ ประสิทธิภาพของ Nd:YAG ขนาดกำลัง 150 วัตต์ สามารถที่จะเชื่อมต่อ (Butt Weld) ชิ้นงานขนาดความหนา 0.5 มม. ด้วยอัตราเร็ว 0.3 เมตรต่อนาที และประสิทธิภาพของ Nd:YAG ขนาดกำลัง 1,000 วัตต์ สามารถที่จะเชื่อม (butt weld) ชิ้นงานขนาดความหนา 4 มม. ได้ด้วยอัตราเร็วเดียวกัน

ลักษณะที่สำคัญที่สุดของ Nd:YAG ก็คือเอาต์พุต (Output) ความยาวคลื่นขนาด 1.06 มม. สามารถที่จะส่งผ่านได้โดยสายใยแก้วนำแสง (Fiber Optic Cable) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ Nd:YAG เป็นที่ดึงดูดใจสำหรับการผลิตที่ต้องการอัตราเร็วของการเชื่อมสูงและระบบอัตโนมัติ (Automation) อย่างไรก็ตามก็ควรระมัดระวังเป็นพิเศษเนื่องจากมันเป็นคลื่นความยาวสั้น (Short Wave Length)

ลักษณะของ Nd:YAG เลเซอร์แสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งจะแสดงให้เห็นหลอดไฟแฟลช (Flash Lamp) แท่งเลเซอร์ (Laser Rod) ตัวสะท้อน (Reflector) และกระจก (Mirror) ซึ่งมักเรียกว่า Optical Cavity หรือ Resonator แท่งเลเซอร์ประกอบไปด้วยผลึกของยิตเรียม (Yttrium) อลูมิเนียม และ โกเมน (Garnet) ซึ่งผสมกับอะตอมของนีโอดีเมียม (Nd)

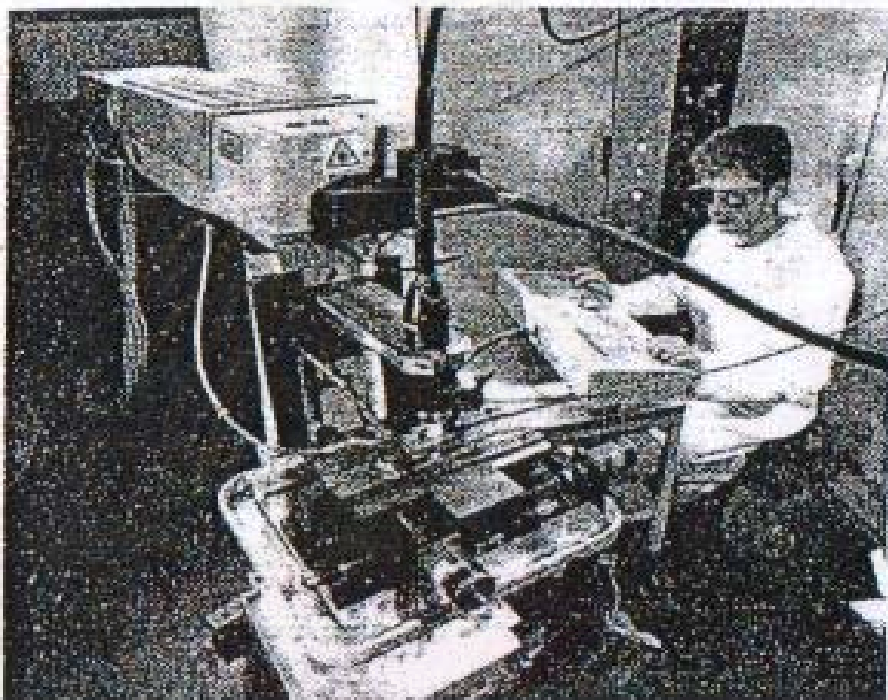
แท่งเลเซอร์จะถูกกระตุ้นด้วยหลอดไฟแฟลชและโฟตอนจะเกิดขึ้นเมื่ออะตอมของ Nd ถูกกระตุ้น แท่งเลเซอร์ หลอดไฟแฟลช และตัวสะท้อนจะถูกจุ่มอยู่ในน้ำหล่อเย็น (Cooling Water) ในห้องแชมเบอร์ (Chamber) ซึ่งเป็นชุดของรีโซเนเตอร์ (Resonator) เหตุที่แท่งเลเซอร์ต้องเย็นตลอดเวลา ก็เพื่อป้องกันการบิดตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal Distortion) ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของเลเซอร์ลดลง และเพื่อไม่ให้แท่งเลเซอร์แตกด้วย

กระจกสะท้อน 100% (Fully Reflecting Mirror) และกระจกสะท้อนบางส่วน (Partially Transmitting Mirror) ที่ถูกใช้ใน Nd:YAG เลเซอร์รีโซเนเตอร์ทำมาจากกระจกซึ่งถูกเคลือบด้วยสารไดอิเล็กตริกเพื่อให้เกิดการสะท้อน (Dielectric Reflecting Coating)

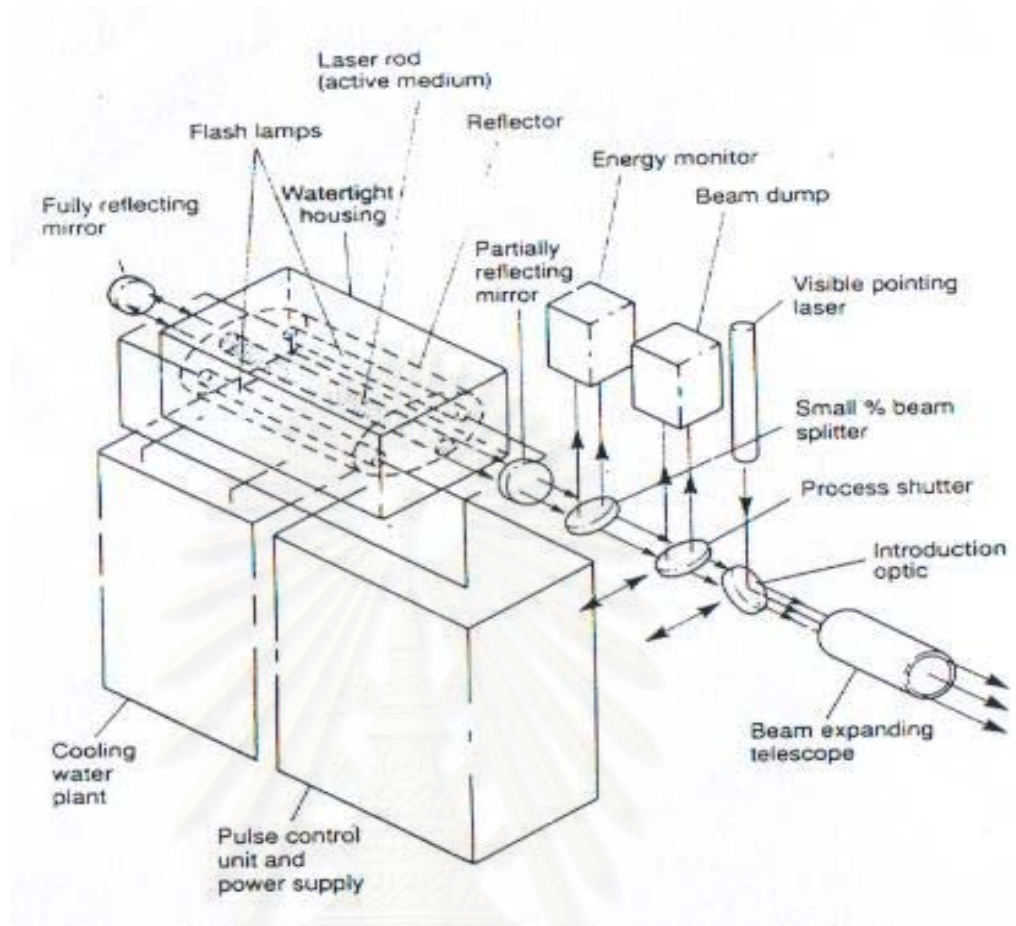
ชุดจ่ายกำลัง (Power Supply) เพื่อสร้างกระแสพัลส์ (Current Pulse) ด้วยช่วงกว้างของคลื่น (Amplitude) และระยะเวลาที่ได้กำหนดและปล่อยมันเข้าไปในหลอดไฟแฟลช หลอดไฟแฟลชจะเปลี่ยนกระแสของพัลส์ให้เป็นพัลส์ของแสงขาว (Pulse of White Light) แสงขาวจะเข้าไปในแท่งเลเซอร์ด้วยความช่วยเหลือของชุดสะท้อน (Reflector Assembly) ซึ่งจะกระตุ้น

อะตอมของ Nd ให้ผลิตแสงด้วยตัวเอง (Spontaneous Emission) และแสงที่เกิดจากการกระตุ้น (Stimulated Emission) ผลของพัลส์ที่กระตุ้นแท่งเลเซอร์ทำให้เกิดพัลส์ของแสงเลเซอร์ (Pulse of Laser Light) ซึ่งมีช่วงพัลส์ (Pulse Duration) เท่ากับพัลส์จากชุดจ่ายกำลัง

โดยทั่วไปช่วงพัลส์ของการเชื่อมด้วย Nd:YAG จะอยู่ระหว่าง 0.5 – 20 msec. และอัตราซ้ำ (Repetition Rate) จะอยู่ระหว่าง 5 – 500 เฮิรท์



รูปที่ 2.12 Nd:YAG เลเซอร์ขนาด 1 kW ลำแสงถูกส่งผ่านจากเลเซอร์โดยสายใยแก้วนำแสงผ่านมาที่ปืนเลเซอร์ (Laser Gun) ซึ่งอยู่ตรงกลางภาพ ส่วนข้างหลังเครื่องเลเซอร์และผู้ปฏิบัติงานเป็นตู้จ่ายกำลัง (Laser Power Supply Cabinets)



รูปที่ 2.13 แผนภาพของ Nd:YAG เลเซอร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.6 หลักความปลอดภัยเกี่ยวกับเลเซอร์

นับตั้งแต่เริ่มมีการใช้เลเซอร์ในห้องทดลองในช่วงปี ค.ศ. 1960 ก็มีการพิจารณาถึงความปลอดภัยในการใช้เลเซอร์ ซึ่งอันตรายจากเลเซอร์มี 3 ส่วนหลักๆ คือ

1. อันตรายจากลำแสงเลเซอร์ ซึ่งจะมีผลต่อนัยน์ตาของคนเรามากกว่าส่วนอื่นของร่างกาย
2. อันตรายจากความต่างศักย์สูงที่อยู่ในเลเซอร์และแหล่งจ่ายไฟ
3. อันตรายจากสารเลเซอร์ในเลเซอร์บางชนิด เช่น ดายเลเซอร์ Excimer Laser เป็นต้น

ลำแสงเลเซอร์กำลังสูง เช่นที่ใช้ในการตัดเหล็ก หรือแม้กระทั่งแกะสลักไม้ ก็สามารถทำอันตรายผิวหนังได้ แต่ที่อันตรายที่สุดคือเมื่อลำแสงเลเซอร์เข้าตา เพราะตาเป็นส่วนที่ไวแสงมากที่สุดนอกจากนี้เลนส์แก้วตายังรวมแสงให้โฟกัสบนเรตินา ทำให้ความเข้มแสงสูงมากขึ้นกว่าที่ตกบนแก้วตาประมาณ 1 แสนเท่า หลายคนคงทราบว่าการจ้องมองดวงอาทิตย์ตอนกลางวันเพียงครู่หนึ่งสามารถทำให้ตามองไม่เห็นได้ชั่วคราว และการให้ลำแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มมากพอเข้าสู่ตาสามารถทำให้ตาบอดได้ แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างไม่เพียงแต่ความเข้มแสงเท่านั้น ยังขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสง ช่วงเวลาที่ได้รับ เป็นต้น โดยเรื่องความยาวคลื่นเป็นเรื่องที่ค่อนข้างสำคัญที่ต้องทำความเข้าใจแม้ว่าตาของมนุษย์เราสามารถเห็นแสงที่มีความยาวคลื่นได้เฉพาะช่วง 400-700 nm แต่ไม่ว่าแสงความยาวคลื่นช่วงไหนทั้งที่มองเห็นและมองไม่เห็น ถ้าเข้าถึงตาก็สามารถทำอันตรายอย่างมากได้

โดยทั่วไปแล้วแสงในช่วง 400 - 1500 nm ซึ่งครอบคลุมช่วงที่ตาเรามองเห็น และช่วงที่เป็นอินฟราเรดจะสามารถผ่านเลนส์ตาเข้าไปถึงเรตินาได้ ซึ่งช่วงที่เป็นอินฟราเรดไม่ว่าจะความเข้มมากขนาดไหนเราก็ไม่สามารถเห็นได้ แต่จะสามารถทำอันตรายต่อเรตินาเราได้แบบเดียวกับคาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ที่อยู่ในช่วงที่เป็นอินฟราเรดก็สามารถตัดผ้าหรือเจาะไม้ได้ ส่วนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (ความยาวคลื่นประมาณ 100 - 400 nm) แม้ว่าจะผ่านไปถึงเรตินาได้ไม่ดีเท่ากับช่วง 400 - 1500 nm แต่สามารถทำอันตรายต่อแก้วตาและเลนส์ตาส่วนนอกได้ ซึ่งจะทำให้ตาบอดถาวรได้เช่นกัน ซึ่งการจะเข้าใจรายละเอียดในเรื่องเหล่านี้ก็ต้องเข้าใจว่าตามีส่วนประกอบเป็นอย่างไร และมีสมบัติเชิงแสง เช่น ค่าการดูดกลืนแสงเป็นอย่างไร แต่ถ้าจะสรุปโดยง่ายคือเลเซอร์ไม่ว่าช่วงความยาวคลื่นไหนๆก็สามารถทำอันตรายต่อตามนุษย์ถึงขนาดทำให้ตาบอดได้ ชนิดของการปล่อยเลเซอร์ที่เป็นพัลส์และต่อเนื่องก็มีอันตรายแตกต่างกันเลเซอร์ชนิดพัลส์ โดยเฉพาะที่มีช่วงเวลาของพัลส์น้อยกว่ามิลิวินาที เพียงแค่พัลส์เดียวก็อาจจะทำให้ตาบอดได้ แต่ถ้าเป็นแบบต่อเนื่องก็จะต้องใช้เวลานานกว่านี้ในการทำอันตรายต่อตา ระยะห่างจากแหล่งกำเนิด

เน็ดแสงเป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งต้องทำความเข้าใจให้ดี โดยถ้าลำแสงเลเซอร์เข้าตาไม่ว่าเราจะอยู่ห่างเท่าใดก็ยังมีอันตรายค่อนข้างสูง เพราะแสงที่ออกจากเลเซอร์มีสมบัติประการสำคัญที่แตกต่างจากแสงจากแหล่งอื่นๆคือแสงจะคงสภาพเป็นลำแสงค่อนข้างดี ไม่ค่อยบานออกมากนัก ทำให้ความเข้มแสงของแสงเลเซอร์ที่ระยะต่างๆไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนถ้าเป็นกรณีที่แสงเลเซอร์ไปตกกระทบบนหรือสะท้อนผิววัสดุที่ขรุขระก่อนอาจทำให้แสงที่สะท้อนออกมาลดสภาพการเป็นลำแสงลงไปบ้าง โดยแสงจะบานออกค่อนข้างเร็ว นั่นคือถ้าอยู่ห่างจากจุดที่สะท้อนก็จะลดอันตรายจากแสงได้เพราะแสงมีความเข้มน้อยลง แต่ถ้าแสงสะท้อนจากวัสดุที่เป็นกระจกหรือโลหะเรียบๆก็ยังคงมีสภาพเป็นลำแสง และมีความเข้มสูงซึ่งเป็นอันตรายเหมือนกับเรามองลำแสงโดยตรงที่ไม่ได้สะท้อนอะไรเลย

ส่วนกรณีที่แสงเลเซอร์ตกกระทบบนผิวหนึ่ง ก็ยังมีอันตรายอยู่ แม้ว่าจะน้อยกว่ากรณีที่แสงเข้าตาเพราะผิวหนึ่งจะสามารถสะท้อนแสงได้ส่วนหนึ่ง และส่วนใหญ่จะไม่ไวต่อแสงมากนัก แต่ถ้าความเข้มสูงพอก็อาจตัดหรือทะลุ ทำให้เป็นแผลได้ และมีเรื่องที่ต้องระวังในกรณีที่เป็นแสงเลเซอร์ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต เพราะแสงในช่วงนี้สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างของเซลล์ได้ ซึ่งอาจทำให้เกิดเป็นมะเร็งได้

จากอันตรายที่ได้กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่าแสงเลเซอร์ไม่ว่าจะมีประโยชน์มากเพียงใด ก็ยังสามารถเป็นอันตรายต่อมนุษย์ได้ ดังนั้นจึงควรจะต้องมีความระมัดระวังในการใช้งาน ผู้ที่เกี่ยวข้องควรจะต้องมีความเข้าใจในเลเซอร์ที่ใช้อยู่ โดยอาจสรุปเป็นข้อๆได้ดังนี้

1. อย่าให้เลเซอร์เข้าตา คงไม่มีใครอยากจะทำจ๋องลำแสงเลเซอร์ตรงๆ แต่แสงเลเซอร์อาจจะเข้าตาเราได้โดยที่เราคาดไม่ถึง เช่น เกิดจากการสะท้อน หรือเป็นช่วงที่เรามองไม่เห็น ดังนั้นการป้องกันเรื่องนี้ทำได้ ดังนี้
 - 1.1 จัดทางเดินของแสงให้เหมาะสม เช่น ไม่ให้อยู่ในระดับสายตาพอดี (ควรสูงกว่าตาหรือต่ำกว่าตา) พยายามกำจัดสิ่งต่างๆ ที่อาจทำให้เกิดการสะท้อนมาเข้าตา โดยที่เราคาดไม่ถึง
 - 1.2 มีเครื่องป้องกันแสงส่วนที่ไม่ต้องการออกจากเลเซอร์ หรืออุปกรณ์ที่เราใช้งาน เช่น มีฉากกันแสงเพื่อกันแสงทั้งที่สะท้อนหรือลำแสงโดยตรงซึ่งอาจจะออกมาได้
 - 1.3 ใส่แว่นตาพิเศษ ซึ่งเป็นการป้องกันที่ตัวเราเอง โดยแว่นนี้จะลดความเข้มแสงลงจนอยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อตาของเรา ซึ่งแว่นตานี้ก็จะเป็นชนิดไหนลักษณะอย่างไรก็ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและความเข้มของแสงเลเซอร์ที่ออกมา โดยควรที่จะใส่แว่นตานี้ทุกครั้งที่ทำงานหรือเข้าไปในบริเวณที่มีการใช้แสงเลเซอร์

- 1.4 ให้ระวางมากขึ้นเป็นพิเศษถ้าเลเซอร์ที่เราใช้งานเป็นแสงในย่านที่มองไม่เห็น เช่น อินฟราเรด หรืออัลตราไวโอเล็ต เพราะแสงที่มองไม่เห็นก็ทำให้ตาบอดได้
2. คิดอยู่เสมอว่าเลเซอร์เป็นของอันตรายถ้าใช้ไม่ระมัดระวัง โดยอาจป้องกันได้ดังนี้
 - 2.1 กั้นบริเวณการใช้งานเลเซอร์ออกจากบริเวณอื่น เช่น มีห้องเป็นสัดส่วน
 - 2.2 มีป้ายเตือนทั้งที่ตัวเลเซอร์และบริเวณห้อง หรือสถานที่ใช้งาน เพื่อให้บุคคลทั่วไป รู้ว่ามีแสงเลเซอร์ในบริเวณนั้น
3. สร้างจิตสำนึกว่าเลเซอร์เป็นของอันตราย ถ้าใช้อย่างไม่ระมัดระวัง ซึ่งจะต้องควบคู่กับการสร้างความเข้าใจว่าเลเซอร์คืออะไร แสงเลเซอร์มีลักษณะพิเศษอย่างไร มีอันตรายอย่างไร

เนื่องจากเลเซอร์มีมากมายหลายชนิด แต่ละชนิดก็มีหลายแบบ กำลังความเข้มก็แตกต่างกัน อันตรายที่เกิดจากการใช้ก็แตกต่างกันไปมากบ้างน้อยบ้างหรือบางอันอาจจะไม่เกิดอันตรายเลย แม้จะจ้องลำแสงซัก 5 นาที แต่บางชนิดแค่แสงสะท้อนจากขอบแผ่นพลาสติกก็อาจทำให้ตาบอดได้ ดังนั้นระดับของความระมัดระวัง การป้องกันต่างๆก็จะแตกต่างกันไป ไม่ใช่ว่าเลเซอร์อะไรก็มีมาตรการป้องกันเข้มงวดที่สุดเหมือนกันหมด เช่น ถ้าใช้ฮีเลียมนีออนขนาด 1 ไมโครวัตต์ก็ไม่ต้องสร้างห้องพิเศษ ไม่ต้องใส่แว่นตาป้องกัน ด้วยเหตุนี้จึงมีการแบ่งระดับความอันตรายของเลเซอร์ โดยแบ่งเป็น 4 ระดับ (Class)

ระดับ 1 (Class 1) เป็นเลเซอร์หรือระบบเลเซอร์ที่ให้แสงเลเซอร์กำลังต่ำที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายใดๆ จึงเป็นเลเซอร์ที่ไม่ต้องอยู่ภายใต้การควบคุมใดๆ ในการใช้งาน เช่น เลเซอร์ในเครื่องอ่านซีดี และเลเซอร์ในเครื่องพิมพ์เลเซอร์ (laser printer)

ระดับ 2a (Class 2a) เป็นเลเซอร์หรือระบบเลเซอร์ที่ให้แสงเลเซอร์กำลังต่ำและอยู่ในช่วงคลื่นที่ตามองเห็น ซึ่งภายใต้ภาวะการใช้งานตามปกติจึงไม่ทำให้เกิดอันตรายใดๆ เมื่อมองดูโดยตรงเป็นเวลาไม่เกิน 0.25 วินาที

ระดับ 2 (Class 2) เป็นเลเซอร์หรือระบบเลเซอร์กำลังไม่เกิน 1 มิลลิวัตต์ และอยู่ในช่วงที่ตามองเห็น มีกำลังมากกว่าเลเซอร์ในชั้น 2a ในการใช้งานตามปกติจะไม่ทำให้เกิดอันตรายใดๆ แต่อาจจะเกิดอันตรายขึ้นได้ ถ้ามองดูโดยตรงเป็นเวลานานๆ เลเซอร์ที่อยู่ในชั้นนี้ เช่น เลเซอร์ไดโอด

ระดับ 3a (Class 3a) เป็นเลเซอร์หรือระบบเลเซอร์ที่ให้แสงเลเซอร์กำลังระหว่าง 1 - 5 มิลลิวัตต์ อาจจะอยู่ในช่วงอินฟราเรด ตามองเห็น หรืออัลตราไวโอเล็ต ซึ่งโดยปกติแล้วจะไม่ก่อให้เกิด

อันตรายเมื่อมองดูด้วยตาเปล่าเพียงช่วงหนึ่ง แต่อาจจะเกิดอันตรายเมื่อมองผ่านเลนส์รวมแสง (แว่นตาหรือกล้องขยาย เลเซอร์ที่อยู่ในชั้นนี้ เช่น เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน

ระดับ 3b (Class 3b) เป็นเลเซอร์หรือระบบเลเซอร์ที่ให้แสงเลเซอร์กำลังระหว่าง 5 - 500 มิลลิวัตต์ อาจอยู่ในช่วงคลื่นอินฟราเรด ตามองเห็นหรืออัลตราไวโอเล็ต ถ้ามองดูโดยตรงหรือมองดูลำแสงสะท้อนจากกระจกทำให้เกิดอันตราย แต่ถ้ามองดูแสงสะท้อนที่กระจายออกเป็นมุมกว้างจะไม่เกิดอันตราย

ระดับ 4 (Class 4) เป็นเลเซอร์หรือระบบเลเซอร์ที่ให้แสงเลเซอร์กำลังมากกว่า 500 มิลลิวัตต์ขึ้นไป การมองดูลำแสงโดยตรงหรือลำแสงสะท้อนจากกระจก รวมทั้งการมองดูแสงสะท้อนที่กระจายออกเป็นมุมกว้างด้วยจะทำให้เกิดอันตราย นอกจากนี้เลเซอร์ในชั้นนี้ยังอาจจะทำให้เกิดอันตรายต่อผิวหนังหรืออาจจะทำให้เกิดไฟไหม้ได้ เลเซอร์ที่อยู่ในชั้นนี้ เช่น เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์

ความปลอดภัยเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้าจากเลเซอร์

ถ้าหากจะมีคนตายจากเลเซอร์ ก็คงไม่ใช่สาเหตุจากลำแสง แต่คงเป็นเพราะถูกไฟดูดทั้งจากตัวเลเซอร์ และที่เกิดจากแหล่งจ่ายไฟให้แก่เลเซอร์ ทั้งนี้ก็เพราะเลเซอร์บางชนิดจะทำงานที่ความต่างศักย์สูงมากเป็นกิโลโวลต์ และกระแสไฟที่มากพอสมควรจนสามารถทำให้เสียชีวิตได้ เช่น เลเซอร์ CO_2

นอกจากนี้เลเซอร์ชนิดพัลส์ ยังมีการใช้ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ขนาดใหญ่มากเพื่อจะทำหน้าที่ให้พลังงานจำนวนมากในช่วงเวลาสั้นๆ แก่หลอดแฟลช และตัวเก็บประจุจะเป็นสาเหตุของอันตรายหลายอย่างที่เกิดขึ้น เช่น การไปสัมผัสแล้วเกิดการคายประจุผ่านผู้ไปสัมผัส การระเบิดของตัวเก็บประจุ เป็นต้น

ดังนั้นในการทำงานเกี่ยวกับเลเซอร์ อาจจะมีปัญหาหรืออันตรายจากกระแสไฟฟ้า ต้องอาศัยความระมัดระวัง โดยหลักในการทำงานทั่วไปมีดังนี้

1. ในการทำงานเกี่ยวกับเลเซอร์ ก่อนจะจับหรือทำอะไร คิดก่อนว่า มือของเราจะไปถูกอะไรหรือไม่
2. เมื่ออยู่ในห้องของคนอื่นที่มีการใช้งานเกี่ยวกับเลเซอร์ อย่าคิดว่าทุกอย่างจะปลอดภัยเพราะอาจจะมี สายไฟที่เปลือยไว้แต่มีไฟ ควรถามก่อนจับอะไรในห้องทดลองคนอื่น

3. จำไว้เสมอว่าเลเซอร์ที่ออกจากผู้ผลิตและเลเซอร์ที่มาอยู่ในห้องของผู้ใช้อาจมีสภาพแตกต่างกันแล้ว เช่น ระบบ Interlock ซึ่งเป็นระบบป้องกันอาจจะถูกตัดวงจร โดยผู้ใช้เพื่อความสะดวกในการซ่อมแซมหรือปรับปรุง เพราะฉะนั้นเมื่อเกิดปัญหา เลเซอร์ก็อาจไม่ปิดเองเพราะไม่มีระบบ Interlock ที่ดีแล้ว
4. ไม่ควรทำงานคนเดียว ถ้าต้องทำงานกับเลเซอร์กำลังสูง เพราะการมีเพื่อนอยู่ด้วยจะช่วยเราทั้งเตือนเราก่อนเกิดปัญหาและช่วยเราเมื่อเกิดปัญหาแล้ว
5. ถ้าเกิดปัญหาขึ้นแล้ว เช่น เพื่อนถูกไฟดูดให้ตัดกระแสไฟก่อน แล้วดึงเพื่อนออกจากสายไฟ โดยการใช้นวนฉนวนหรือดึงเพื่อนออกมา ระวังอย่าให้เราถูกไฟดูดด้วย แล้วรีบส่งโรงพยาบาลทันที
6. ถ้าเลเซอร์มีระบบหล่อเย็น ระวังกรณีไฟรั่วลงน้ำ หรือน้ำรั่วไปหาไฟ เพราะเกิดขึ้นได้ง่าย โดยเฉพาะเลเซอร์ที่ใช้มานานๆ ซึ่งระบบ Seal ต่างๆ เริ่มเสื่อมสภาพแล้ว
7. ถ้ามีตัวเก็บประจุ อย่าลืมหายประจุก่อนทำงานต่างๆ ทุกครั้ง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มลฤดี ผิวขำ (2542) ศึกษาคุณสมบัติของนีโอดีเมียมแฉกเลเซอร์แบบลำแสงต่อเนื่อง นีโอดีเมียมแฉกเลเซอร์เป็นเลเซอร์ของแข็งชนิดหนึ่ง โดยการกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานในผลึกแฉกจะต้องใช้พลังงานแสงเท่านั้นและเทคโนโลยีใหม่ของนีโอดีเมียมแฉกเลเซอร์คือนีโอดีเมียมแฉกเลเซอร์แบบลำแสงต่อเนื่องที่กระตุ้นด้วยเลเซอร์ไดโอดซึ่งให้แสงที่มีความยาวคลื่น 808 nm เนื่องจากแสงที่มีความยาวคลื่น 808 nm สามารถใช้กระตุ้นให้ออกอน Nd(3+) ในผลึกแฉกให้เปลี่ยนระดับพลังงานไปอยู่ในสถานะกึ่งเสถียร ($(^4)F(,3/2)$) มากที่สุด หลังจากนั้นเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานจาก $(^4)F(,3/2)$ มายังระดับพลังงาน $(^4)I(,11/2)$ แล้วทำให้เกิดลำแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 1064 nm ออกมานีโอดีเมียมแฉกเลเซอร์แบบกระตุ้นด้วยเลเซอร์ไดโอดเป็นระบบเลเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงและมีขนาดเล็กมาก เมื่อเปรียบเทียบกับนีโอดีเมียมแฉกเลเซอร์ที่กระตุ้นด้วยต้นกำเนิดแสงอื่นๆ เช่น หลอดไฟแฟลช ยิ่งไปกว่านั้นการเกิดฮาร์มอนิกที่สองของเลเซอร์ระบบนี้ จะใช้ผลึก KTP วางอยู่ภายในเลเซอร์ควาดีเพื่อให้ได้แสงสีเขียวความยาวคลื่น 532 nm ที่มีประสิทธิภาพสูง

ชนม์เจริญ ทิพย์สุวรรณ (2540) ศึกษาและสร้างนีโอติเมียมแก็กเลเซอร์ นีโอติเมียมแก็กเลเซอร์เป็นเลเซอร์ชนิดของแข็งให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่น 1.064 ไมครอน โดยได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอุตสาหกรรมอย่างมากทั้งทางด้านงานตัดและงานเจาะ ระบบนีโอติเมียมแก็กเลเซอร์มีส่วนประกอบสำคัญ 6 ส่วนคือ แท่งผลึกนีโอติเมียมแก็ก หลอดแฟลช ตัวสะท้อนแสง กระจกเลเซอร์ ระบบน้ำสำหรับระบายความร้อน และแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่หลอดแฟลช จากการศึกษาที่ระบบนีโอติเมียมแก็กเลเซอร์เป็นเลเซอร์ชนิดของแข็งการสร้างจึงง่ายและใช้อุปกรณ์ต่อพ่วงน้อยกว่าระบบเลเซอร์ชนิดอื่น ดังนั้นระบบจึงมีขนาดกระทัดรัดและสะดวกต่อการเคลื่อนย้าย ระบบนีโอติเมียมแก็กเลเซอร์ที่สร้างนี้ให้กำลังงานสูงสุดประมาณ 6.6 กิโลวัตต์ต่อพัลส์ มีค่าพลังงาน เท่ากับ 672 มิลลิจูล ค่าความกว้างของช่วงคลื่นเลเซอร์ 102 ไมโครวินาที และมีประสิทธิภาพเท่ากับ 0.9 เปอร์เซนต์

Alexander Huber (2001) ได้ศึกษาการใช้ Nd:YAG เลเซอร์ในการตัดชิ้นงานสำหรับกระบวนการที่เรียกว่าเป็นไมโครเทคโนโลยีการตัดชิ้นงานด้วยเลเซอร์เป็นกระบวนการใหม่ที่ให้ความถูกต้องแม่นยำสูงและไม่มีการสัมผัสกับชิ้นงานงานวิจัยนี้กล่าวถึงพื้นฐานของการใช้ Nd:YAG เลเซอร์ตัดชิ้นงานการคำนวณทางกลและความร้อนถูกคำนวณบนพื้นฐานของไฟไนต์อีลิเมนต์และสร้างรูปแบบขึ้นมาสำหรับการตัดเพื่อที่จะสามารถเข้าใจกระบวนการได้ดียิ่งขึ้น งานวิจัยยังได้กล่าวถึงปัจจัยที่มีผลต่อการตัดทั้งส่วนของเลเซอร์และตำแหน่งในการตัดเพื่อให้ได้ความถูกต้องในการตัดซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในการบวนการตัดเลเซอร์อัตโนมัติในกระบวนการผลิตที่ต้องการความแม่นยำสูง

Jez Weston (1996) ได้ศึกษาการใช้เลเซอร์เชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียม สืบเนื่องมาจากภาวะการแข่งขันทางการตลาดและการเมืองในการลดอัตราการใช้พลังงานและการเพิ่มขึ้นของยานยนต์ การลดน้ำหนักของยานยนต์ดูเหมือนว่าจะจะเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถบรรลุเป้าหมายในการลดอัตราการใช้เชื้อเพลิงได้ ซึ่งการใช้อลูมิเนียมเป็นตัวถังของยานยนต์สามารถลดน้ำหนักของยานยนต์ได้ อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมการผลิตยานยนต์ต้องการความเร็วในการผลิตและระบบอัตโนมัติ กระบวนการหนึ่งที่สามารถทำได้ในการเชื่อมอลูมิเนียมคือการเชื่อมด้วยเลเซอร์ การเชื่อมเลเซอร์สามารถทำกระบวนการผลิตเกิดความรวดเร็ว ง่ายต่อระบบการผลิตแบบอัตโนมัติ และมีการบิดตัวของชิ้นงานน้อย แต่ปัญหาอย่างหนึ่งที่พบและยังไม่สามารถแก้ไขได้ก็คือการแตกหักขณะเชื่อม

ในการวิจัยได้ทำการเชื่อมอลูมิเนียมผสม 5 ชนิดที่แตกต่างกัน โดยใช้เลเซอร์จากสามแหล่ง คือ Co_2 , Co และ Nd:YAG (เชื่อมอย่างต่อเนื่อง) พบว่าความแข็งแรงของโลหะที่ได้จากการเชื่อมขึ้นอยู่กับความเร็วในการเชื่อม ความเร็วในการเชื่อมสูงจะช่วยลดการสูญเสียของโลหะผสมและทำให้ได้โครงสร้างทางจุลภาคที่ดี ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงขึ้น มีการศึกษาการแตกระหว่างการเชื่อมโดยการศึกษาพฤติกรรมในการแตกว่ามีความสัมพันธ์กับวัสดุและปัจจัยการผลิตหรือไม่ และยังไม่มีการศึกษาว่าพฤติกรรมในการแตกมีความเกี่ยวข้องกับช่วงอุณหภูมิความสมดุลของการการแตกหัก (Equilibrium Brittle Temperature Range) หรือไม่

ในส่วนการส่งถ่ายพลังงานลงสู่ชิ้นงานพบว่าแปรผกผันกับความยาวคลื่นของเลเซอร์ การส่งถ่ายพลังงานจะดีขึ้นเมื่อความยาวคลื่นสั้นลง และในการวิจัยครั้งนี้พบว่าการเชื่อมแบบต่อเนื่องด้วย Nd:YAG เลเซอร์ให้ความเร็วในการเชื่อมสูงที่สุด

Burkhard Müller ได้ศึกษาถึงการใช้เลเซอร์ในการตัดชิ้นงาน พบว่าในการตัดชิ้นงาน พลังงานของพัลส์ (Pulse Energy) และขนาดของลำแสง (Beam Dimensions) เป็นตัวแปรหลักที่สำคัญ ส่วนความยาวของพัลส์ (Pulse Length) รูปแบบของพัลส์ (Pulse Form) และความแตกต่างของการส่องสว่างทำให้ประสิทธิภาพแตกต่างกัน แต่ไม่สามารถใช้เป็นปัจจัยควบคุมได้ เนื่องจากมีผลกระทบเล็กน้อยต่อมุมในการตัด (Bending Angle)

Marion Merklein ได้ศึกษาผลของ Thermo-Mechanical Heat Treatment ที่มีต่อโลหะผสมอลูมิเนียมในระหว่างการขึ้นรูปด้วยเลเซอร์ (Laser Forming) มีการศึกษาถึงผลกระทบต่อโครงสร้างของเกรน โครงสร้างทางจุลภาค และคุณสมบัติทางกลด้วย

ในการวิจัยใช้ความหนาของชิ้นงานที่แตกต่างกันและปัจจัยของเลเซอร์ที่ต่างกันเพื่อศึกษาถึงระดับของผลกระทบ ในการที่จะสามารถแบ่งแยกผลกระทบทางโลหะวิทยาแบบปกติทั่วไปและที่เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้นๆ จำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์ความแตกต่างของกระบวนการขึ้นรูปด้วยเลเซอร์ (Laser Forming Mechanism) ความสัมพันธ์ของผลลัพธ์ที่ได้ทั้งหมดในการขึ้นรูปด้วยเลเซอร์จะแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะหากระบวนการผลิตวัสดุสำหรับทำการขึ้นรูปด้วยเลเซอร์

Thomas Pohl ได้ศึกษาคุณภาพของการเชื่อมและความสามารถในการขึ้นรูปของอลูมิเนียมผสมโดยการใช้อัลไซเบอร์ งานวิจัยนี้ได้มุ่งผลถึงการลดน้ำหนักของยานยนต์และได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของความพูน การแตกหัก การยึดตัว และความแข็งแรงแบบดึง (Tensile Strength) ของการเชื่อมด้วย

การวิจัยพบว่าถ้าใช้ตัวแปรในการเชื่อม (Welding Parameters) ที่เหมาะสมแล้วจะทำให้สามารถบรรลุคุณสมบัติที่ต้องการดังกล่าวข้างต้นได้ การวิจัยได้ศึกษาจากตัวถังรถที่ทำจากอลูมิเนียมผสมตระกูล 5xxx และ 6xxx ผลลัพธ์ที่ได้นำไปสู่การเชื่อมที่มีคุณภาพสูง และสามารถขึ้นรูปได้ดี รวมทั้งสามารถเชื่อมโดยไม่เป็นเส้นตรงได้

Nilsson, Klas (2001) ได้ศึกษาการพัฒนาเทคนิคของกระบวนการเชื่อมด้วยใช้อัลไซเบอร์ งานวิจัยนี้ได้แนะนำเกี่ยวกับการเชื่อมโดยใช้ CO₂ เลเซอร์ มีการวิเคราะห์กลไกทางเทคนิคของกระบวนการเชื่อมและการเติบโตทางการค้าในอนาคตด้วย

ในงานวิจัยได้ทดลองเชื่อมเหล็กกล้าซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมหนัก โดยใช้อัลไซเบอร์กำลังสูงถึง 17 กิโลวัตต์ และได้มีการทดสอบถึงลักษณะทางโลหะวิทยา และความแข็งแรงของรอยเชื่อมด้วย และได้ทดลองเชื่อมโลหะสามชนิดที่มีคุณสมบัติทางความร้อนต่างกันด้วย Co₂ เลเซอร์และแก๊กละเซอร์ พบว่าแก๊กละเซอร์ให้ประสิทธิภาพของการเชื่อมที่ดีกว่ามากๆ

Forsman, Tomas (2000) ได้ศึกษาการเชื่อมอลูมิเนียมอัลลอยด์ด้วยเลเซอร์โดยการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ และมีการศึกษาในหลายกรณี อลูมิเนียมอัลลอยด์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีทั้งตระกูล 5xxx และ 6xxx ซึ่งเป็นแบบเดียวกับที่ใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์

งานวิจัยพบว่า

1. สาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดรอยกระเด็นจากการเชื่อม (Splatter) เนื่องจากปริมาณของแมกนีเซียมในโลหะผสม
2. โลหะที่สามารถนำความร้อนได้ดี จะมีรอยเชื่อมที่ใหญ่และกว้างกว่าโลหะปกติ

งานวิจัยชิ้นนี้เชื่อว่าการเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียมด้วยเลเซอร์จะมีการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์มากขึ้นในอนาคต

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยมุ่งศึกษาถึงผลของการแปรเปลี่ยนปัจจัยทางด้านแรงดันไฟฟ้าและระยะเวลาในการเชื่อมสำหรับแฉีกเลเซอร์ (Nd:YAG Laser) ที่มีต่อกำลังเลเซอร์ ขนาดของรอยเชื่อม ความลึกของรอยเชื่อม และความแข็งแรงของรอยเชื่อม รวมถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบของธาตุ

การวิจัยประกอบไปด้วยการทดลอง 2 ส่วน คือ

1. การเชื่อมชิ้นงานความหนา 102 ไมครอน จำนวนสองแผ่นเข้าด้วยกัน เพื่อศึกษาปัจจัยของแรงดัน ไฟฟ้าและระยะเวลาที่มีต่อกำลังเลเซอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม ความแข็งแรงของรอยเชื่อม โครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบของธาตุในรอยเชื่อม
2. การเชื่อมชิ้นงานความหนา 51 และ 200 ไมครอน เข้าด้วยกันโดยให้ 51 ไมครอนอยู่ด้านบน เพื่อศึกษาถึงความลึกในการเชื่อม

3.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยมีดังนี้

- 3.1.1 แผ่นชิ้นงานทดสอบสเตนเลส เกรด 304 ขนาดความหนา 200, 102 และ 51

ไมครอน

- 3.1.2 เครื่องเชื่อมแฉีกเลเซอร์แบบจุด (Nd:YAG Spot Welder) ยี่ห้อ Miyachi ขนาดกำลัง 50 วัตต์ รุ่น ML-2331B
- 3.1.3 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานในการเชื่อม
- 3.1.4 เครื่องมือวัด MTM ยี่ห้อ Nikon รุ่น MM-11
- 3.1.5 เครื่องมือวัดพลังงาน (Calorie Meter) ยี่ห้อ Ophir รุ่น 30A-SH-V1
- 3.1.6 เครื่องทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม

- 3.1.7 กล้องถ่ายภาพกำลังขยายสูง ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX60 กำลังขยาย 50 – 2500 เท่า
- 3.1.8 เครื่องตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบธาตุ (SEM / EDX) ยี่ห้อ Leo รุ่น 1450 VPSE กำลังขยายสูงสุด 300,000 เท่า

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ เตรียมแผ่นสแตนเลส เกรด 304 ที่มีความหนา 200, 102 และ 51 ไมครอน ซึ่งเป็นวัสดุหนึ่งในการผลิตแขนจับหัวอ่านมาใช้เป็นชิ้นงานทดสอบ โดยมีขนาด 10x30 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.1

3.2.2 การปรับเครื่องเชื่อมเลเซอร์

3.2.2.1 ทำการปรับเครื่องเชื่อมเลเซอร์ (รูปที่ 3.2) เพื่อเชื่อมชิ้นงานความหนา 102 ไมครอนสองแผ่นเข้าด้วยกัน ตามเงื่อนไขดังตารางที่ 3.1

3.2.2.2 ทำการปรับตั้งเครื่องเชื่อมเลเซอร์เพื่อเชื่อมชิ้นงานความหนา 51 และ 200 ไมครอนเข้าด้วยกัน โดยให้ 51 ไมครอนอยู่ด้านบนและ 200 ไมครอนอยู่ด้านล่าง โดยกำหนดให้ปัจจัยด้านเวลาคงที่ที่ 1.42 มิลลิวินาที และแปรเปลี่ยนปัจจัยทางด้าแรงดันไฟฟ้าจาก 280 ถึง 320 โวลท์ โดยเพิ่มทีละ 10 โวลท์

3.2.3 การวัดพลังงานเลเซอร์ ทำได้โดยใช้เครื่องวัดพลังงาน (Calorie Meter) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 รับแสงเลเซอร์จากปลายสายไฟเบอร์ออปติก ค่าที่อ่านได้มีหน่วยเป็นวัตต์

3.2.4 วิธีการเชื่อมชิ้นงานทดสอบ หลังจากปรับเครื่องเชื่อมเลเซอร์และเก็บข้อมูลของพลังงานในการเชื่อมดังข้อที่ 3.2.3 แล้วจึงนำชิ้นงานมาใส่ในอุปกรณ์จับยึดดังแสดงในรูปที่ 3.3 แล้วเริ่มเชื่อมชิ้นงานแต่ละเงื่อนไขของการทดลอง

3.2.5 การตรวจสอบทางกายภาพ

3.2.5.1 การถ่ายภาพรอยเชื่อม ทำได้โดยใช้กล้องถ่ายภาพกำลังขยายสูง ถ่ายที่ 500เท่า ดังรูปที่ 3.6

3.2.5.2 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม ทำได้โดยใช้เครื่อง MTM ดังแสดงในรูปที่ 3.7

3.2.5.3 การภาพถ่ายตัดขวางของรอยเชื่อม ทำได้โดยนำชิ้นงานที่เชื่อมแล้วมาตัดที่กึ่งกลางรอยเชื่อม จากนั้นนำไปหล่อในเรซิน ดังในรูปที่ 3.8 แล้วนำไปถ่ายภาพความลึกของรอยเชื่อมด้วยกล้องถ่ายภาพกำลังขยายสูง

3.2.6 การทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม ทำได้โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 3.5 ชิ้นงานจะถูกจับยึดโดยอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน จากนั้นกดปุ่มเริ่มทำงานให้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนชิ้นงานแยกออกจากกัน ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดมีหน่วยเป็น Kgf

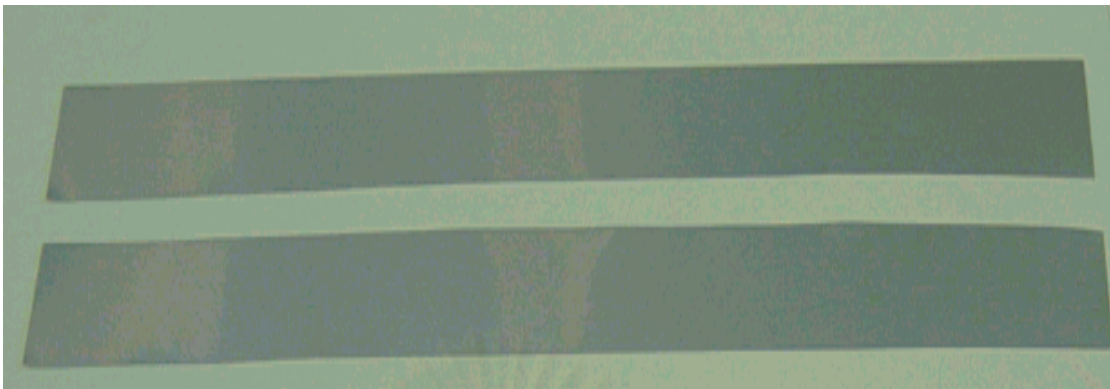
3.2.7 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม ทำได้โดยใช้เครื่อง Scanning Elec tron Microscope (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 3.9

3.2.8 การตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในรอยเชื่อม ทำได้โดยใช้เครื่อง Electron Dis-charge X-ray (EDX) ซึ่งอยู่ในเครื่องเดียวกับเครื่อง SEM

3.3 การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ

การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ ทำโดยใช้โปรแกรม Minitab และ JMP เพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (ANOVA) และการถดถอยของข้อมูล (Regression Analysis)

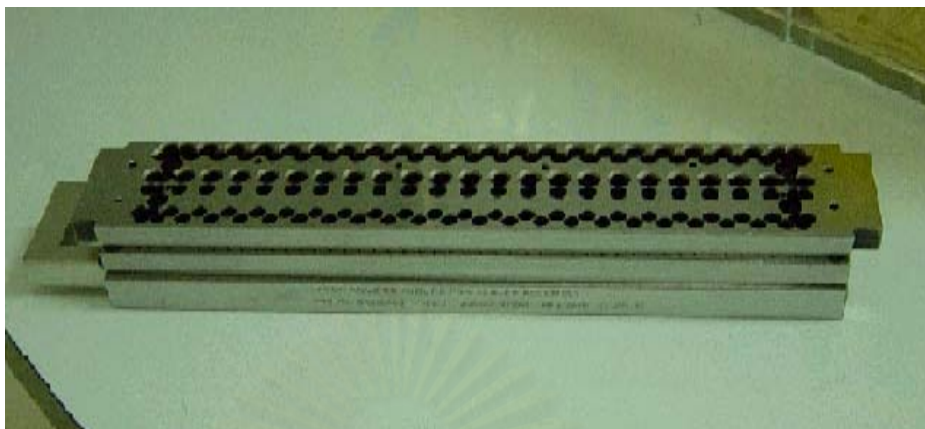
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 : ชิ้นงานทดสอบอบสแตนเลส เกรด 304 ขนาด 10*30 มม.



รูปที่ 3.2 : เครื่องเชื่อมแก๊กละเซอร์แบบจุด (Nd:YAG Spot Welding)



รูปที่ 3.3 : อุปกรณ์จับยึดในการเชื่อมเลเซอร์



รูปที่ 3.4 : เครื่องมือวัดพลังงาน (Calorie Meter)



รูปที่ 3.5 : เครื่องทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม



รูปที่ 3.6 : กล้องถ่ายภาพกำลังขยายสูง 2500 เท่า ซึ่งใช้สำหรับถ่ายภาพความลึกของรอยเชื่อมที่ตัดขวางแล้วหล่ออยู่ในเรซิน



รูปที่ 3.7 : เครื่องมือวัด MTM สำหรับใช้วัดขนาดของรอยเชื่อม



รูปที่ 3.8 : ภาคตัดขวางของรอยเชื่อมซึ่งหล่ออยู่ในเรซิน



รูปที่ 3.9 : เครื่อง SEM & EDX

ตารางที่ 3.1 : เงื่อนไขการทดลองในการเชื่อมชิ้นงานความหนา 102 ไมครอน จำนวนสองแผ่น
เข้าด้วยกัน

Time	Volt	Sample Size	Repeat	Power	Weld Dia.	Peel Force
0.8	468	3	2			
0.8	471	3	2			
0.8	473	3	2			
0.8	476	3	2			
0.8	479	3	2			
0.9	468	3	2			
0.9	471	3	2			
0.9	473	3	2			
0.9	476	3	2			
0.9	479	3	2			
1.0	468	3	2			
1.0	471	3	2			
1.0	473	3	2			
1.0	476	3	2			
1.0	479	3	2			
1.1	468	3	2			
1.1	471	3	2			
1.1	473	3	2			
1.1	476	3	2			
1.1	479	3	2			
1.2	468	3	2			
1.2	471	3	2			
1.2	473	3	2			
1.2	476	3	2			
1.2	479	3	2			

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. การเชื่อมชิ้นงานความหนา 102 ไมครอน จำนวนสองแผ่นเข้าด้วยกัน เพื่อศึกษาปัจจัยของแรงดันไฟฟ้าและระยะเวลาการเชื่อมที่มีต่อกำลังเลเซอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม ความแข็งแรงของรอยเชื่อม โครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบของธาตุในรอยเชื่อม
2. การเชื่อมชิ้นงานความหนา 51 และ 200 ไมครอน เข้าด้วยกันโดยให้ 51 ไมครอนอยู่ด้านบน เพื่อศึกษาถึงความลึกในการเชื่อม

4.1 ผลการทดลอง

ผลการศึกษากการเชื่อมชิ้นงานความหนา 102 ไมครอน จำนวนสองแผ่นเข้าด้วยกัน เป็นดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นตารางสรุปผลการทดลองที่ใช้จำนวนตัวอย่างเท่ากับ 3 และทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ค่าจากตารางที่ 4.1 เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 2 ครั้ง โดยแต่ละครั้งมีจำนวนตัวอย่างเท่ากับสาม สำหรับค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานก็เป็นของค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดแสดงไว้ในภาคผนวก

ผลการศึกษากการเชื่อมชิ้นงานความหนา 51 และ 200 ไมครอน เข้าด้วยกันโดยให้ 51 ไมครอนอยู่ด้านบน แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ค่าความลึกของรอยเชื่อมได้จากการประมาณโดยเปรียบเทียบกับความหนาของชิ้นงานทดลองซึ่งอยู่แผ่นล่าง

4.2 ผลการตรวจสอบพลังงานเลเซอร์

จากตารางที่ 4.1 พบว่า

1. ค่าพลังงานของเลเซอร์ซึ่งวัดในรูปของกำลังไฟฟ้าแปรผันโดยตรงกับค่าแรงดันไฟฟ้าในการปรับเครื่องเชื่อมเลเซอร์ ที่ทุกค่าของระยะเวลาการเชื่อม ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกำลังเลเซอร์ แสดงในรูปที่ 4.1 จะเห็นว่ามีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรง
2. ค่าพลังงานเลเซอร์ซึ่งวัดในรูปของกำลังแปรผันโดยตรงกับค่าระยะเวลาในการเชื่อม ที่ทุกค่าของการปรับแรงดันไฟฟ้า ความสัมพันธ์ของค่าระยะเวลาในการเชื่อมและกำลังเลเซอร์แสดงในรูปที่ 4.2 จะเห็นว่ามีสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรง

นั่นคือปัจจัยทางด้านแรงดันไฟฟ้าและระยะเวลาในการเชื่อมมีผลต่อกำลังเลเซอร์ โดยกำลังเลเซอร์จะแปรผันตามปัจจัยทั้งสอง แต่ปัจจัยทางด้านเวลาจะมีอิทธิพลมากกว่า

4.3 ผลการตรวจสอบทางกายภาพ

4.3.1 ลักษณะของรอยเชื่อม

รูปร่างของรอยเชื่อมแสดงด้านหน้าและด้านหลังเป็นดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นวงกลม เนื่องจากเครื่องเชื่อมเป็นแบบ Spot Welding และรอยเชื่อมด้านหน้ามีขนาดใหญ่กว่าด้านหลัง เนื่องจากเป็นบริเวณที่ได้รับแสงเลเซอร์โดยตรง โดยทั่วไปขนาดของรอยเชื่อมจะถูกวัดที่ด้านหน้าในรูปของเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม

4.3.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม

จากตารางที่ 4.1 รูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 พบว่า

(เกณฑ์ที่ใช้คือ หากค่ามากที่สุดและน้อยสุดต่างกันไม่เกิน 15 ไมครอน ถือว่าขนาดของรอยเชื่อมไม่มีการเปลี่ยนแปลง)

1. แรงดันไฟฟ้าไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของรอยเชื่อม
2. เมื่อระยะเวลาการเชื่อมเพิ่มขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะใหญ่ขึ้น

4.3.3 ภาคตัดขวางของรอยเชื่อม

ภาคตัดขวางของรอยเชื่อมเป็นความลึกของรอยเชื่อม (Welding Penetration) มีลักษณะคล้ายสามเหลี่ยมลึกกลงไปในชิ้นงาน แสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งได้จากการเชื่อมชิ้นงาน 102 ไมครอนเข้าด้วยกัน

4.3.4 ความลึกของรอยเชื่อม (Penetration)

ตารางที่ 4.2 เป็นผลการทดลองเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนาแตกต่างกันสองขนาดคือ 51 และ 200 ไมครอน โดยให้ 51 ไมครอนอยู่ด้านบน เพื่อแยกศึกษาถึงปัจจัยของแรงดันไฟฟ้าที่มีต่อความลึกของรอยเชื่อม การเชื่อมกระทำที่ 1.42 มิลลิวินาทีคงที่ แต่แปรเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าจาก 280 – 320 โวลท์ โดยเพิ่มทีละ 10 โวลท์ พบว่าความลึกในการเชื่อมแปรผันโดยตรงกับค่าแรงดันไฟฟ้าในการปรับเครื่องเชื่อม

4.4 ผลการศึกษาแรงฉีกและความแข็งแรงของรอยเชื่อม

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.8 – 4.11 พบว่า

1. ที่ 0.8 มิลลิวินาที เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น
 - แรงฉีกมีแนวโน้มที่ลดลง โดยช่วง 468-473 โวลท์ แรงฉีกมีแนวโน้มลดลง แต่ที่ช่วง 473-479 โวลท์ แรงฉีกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น
 - ความแข็งแรงมีแนวโน้มที่ลดลง โดยช่วง 468-473 โวลท์ ความแข็งแรงมีแนวโน้มลดลง แต่ที่ช่วง 473-479 โวลท์ ความแข็งแรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

2. ที่ 0.9 มิลลิวินาที เมื่อแรงดันฟ้าเพิ่มขึ้น
 - แรงฉีกมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น
 - ความแข็งแรงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย
3. ที่ 1.0 มิลลิวินาที เมื่อแรงดันฟ้าเพิ่มขึ้น
 - แรงฉีกมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น โดยช่วง 468-471 โวลท์ แรงฉีกมีแนวโน้มลดลง แต่ที่ช่วง 471-479 โวลท์ แรงฉีกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น
 - ความแข็งแรงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น โดยช่วง 468-471 โวลท์ ความแข็งแรงมีแนวโน้มลดลง แต่ที่ช่วง 471-479 โวลท์ ความแข็งแรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น
4. ที่ 1.1 มิลลิวินาที เมื่อแรงดันฟ้าเพิ่มขึ้น
 - แรงฉีกมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น
 - ความแข็งแรงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น
5. ที่ 1.2 มิลลิวินาที เมื่อแรงดันฟ้าเพิ่มขึ้น
 - แรงฉีกมีแนวโน้มที่ลดลงเล็กน้อย ถือได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง
 - ความแข็งแรงมีแนวโน้มลดลง
6. เมื่อระยะเวลาการเชื่อมมากขึ้น แรงฉีกมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น
7. ที่ 468 โวลท์ แรงฉีกมีแนวโน้มที่ลดลง
8. ที่ 471 โวลท์ แรงฉีกมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น โดยมีการเพิ่มและลดสลับกันไปตั้งแต่ 0.8-1.2 มิลลิวินาที
9. ที่ 473 โวลท์ แรงฉีกมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น
10. ที่ 476 โวลท์ แรงฉีกมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น โดยมีการลดลงที่ช่วง 1.1-1.2 มิลลิวินาทีเท่านั้น
11. ที่ 479 โวลท์ แรงฉีกมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น โดยช่วง 0.8-1.0 มิลลิวินาที แรงฉีกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ช่วง 1.0-1.2 มิลลิวินาที แรงฉีกมีแนวโน้มลดลง

จากทั้ง 11 ข้อดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า

1. แรงดันไฟฟ้าทำให้แรงฉีกและความแข็งแรงเปลี่ยนแปลงแต่ไม่มีแนวโน้มที่สามารถพยากรณ์ได้
2. ระยะเวลาการเชื่อมมีผลต่อแรงฉีก โดยมีแนวโน้มขึ้นแปรผันตามกัน
3. ระยะเวลาการเชื่อมทำให้ความแข็งแรงเปลี่ยนแปลง แต่ไม่มีแนวโน้มที่สามารถพยากรณ์ได้

4.5 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคที่กำลังขยาย 1000 เท่า ของชิ้นงานทดสอบก่อนการเชื่อมแสดงดังในรูปที่ 4.12 จะเห็นว่า มีลักษณะเกรนคล้ายวงรี โดยสามารถมองเห็นขอบเกรนได้ชัดเจน ภายหลังจากที่ถูกเชื่อมด้วยเลเซอร์ รูปทรงวงรีจะเปลี่ยนไป เห็นลักษณะเป็นเส้นและเกรนมีขนาดเล็กลงมาก ขอบเกรนจะไม่สามารถมองเห็นได้ชัดเจนเหมือนก่อนการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.13 – 4.15

จากรูปที่ 4.13 – 4.15 และตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมเพิ่มมากขึ้น ขนาดของเกรนจะมีขนาดเล็กลงและขอบเกรนจะหายไป เห็นเป็นเส้นและจุดเล็กๆ

รูปที่ 4.16 แสดงภาพจาก SEM ที่ 1000 เท่า ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณขอบเส้นรอบวงของรอยเชื่อม จะเห็นได้ว่าเป็นรอยต่อของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกรน ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ จากภาพแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงก่อนและหลังการเชื่อมได้เป็นอย่างดี

4.6 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในรอยเชื่อม


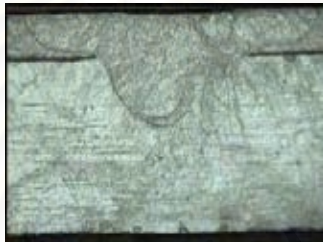



ผลในการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในรอยเชื่อมโดย EDX แสดงให้เห็นว่าไม่มีธาตุใดเกิดขึ้นในรอยเชื่อมหลังจากการเชื่อม เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนทำการเชื่อม รูปที่ 4.17 แสดงให้ทราบว่าสแตนเลสเกรด 304 ที่นำมาใช้ทดลองประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอน โครเมียม เหล็ก และนิกเกิล รูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังจากการเชื่อม องค์ประกอบของธาตุยังเป็นเช่นเดิม

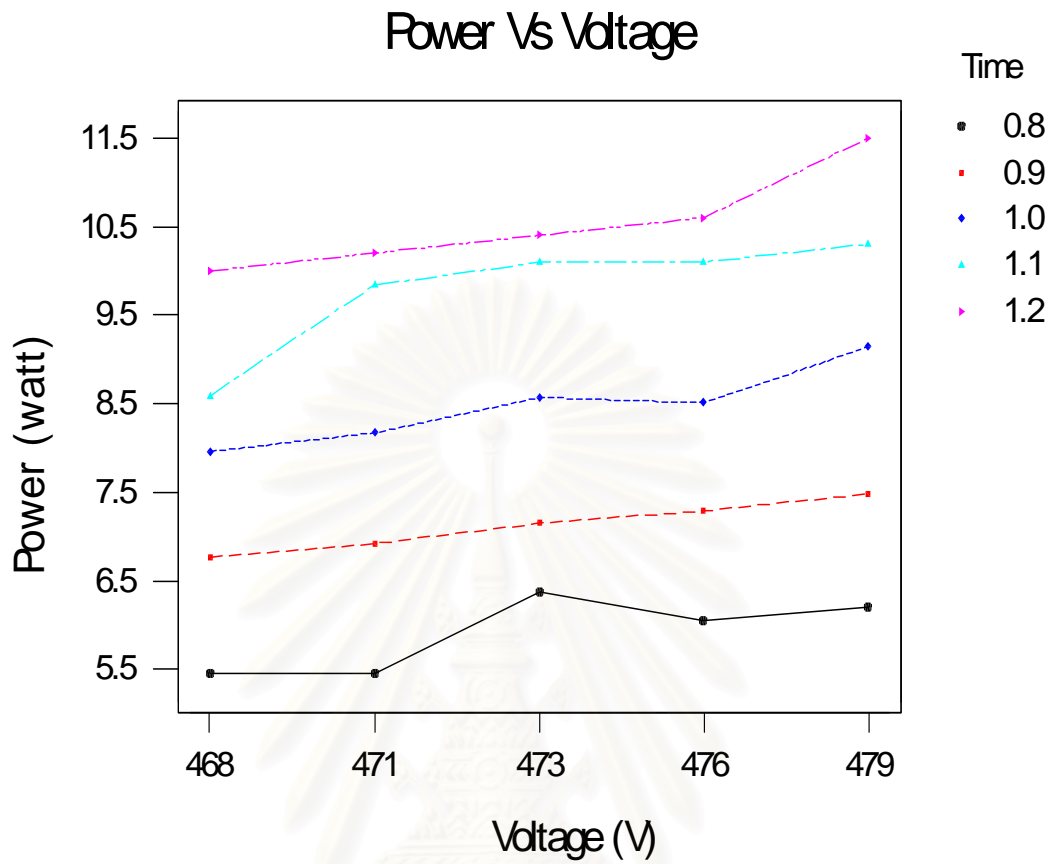
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ตารางสรุปผลการทดลองของการเชื่อมชิ้นงานความหนา 102 ไมครอน จำนวนสองแผ่นเข้าด้วยกัน

Time	Volt	Power		Weld Dia.		Peel Force		Peel Strength	
		Mean (Avg)	Stdev (Avg)	Mean (Avg)	Stdev (Avg)	Mean (Avg)	Stdev (Avg)	Mean (Avg)	Stdev (Avg)
0.8	468	5.45	0.06	0.483	0.002	1.57	0.04	8.58	0.32
0.8	471	5.46	0.00	0.485	0.002	1.22	0.03	6.61	0.08
0.8	473	6.37	0.69	0.488	0.001	1.06	0.01	5.65	0.02
0.8	476	6.05	0.06	0.483	0.008	1.14	0.02	6.24	0.34
0.8	479	6.21	0.07	0.491	0.001	1.30	0.02	6.89	0.11
0.9	468	6.77	0.05	0.508	0.001	1.43	0.05	7.06	0.25
0.9	471	6.93	0.06	0.497	0.002	1.46	0.03	7.52	0.10
0.9	473	7.15	0.14	0.504	0.000	1.45	0.00	7.26	0.01
0.9	476	7.29	0.02	0.498	0.000	1.50	0.02	7.72	0.10
0.9	479	7.48	0.08	0.511	0.004	1.60	0.00	7.79	0.14
1.0	468	7.97	0.02	0.514	0.001	1.66	0.00	8.00	0.06
1.0	471	8.17	0.02	0.523	0.000	1.39	0.01	6.48	0.08
1.0	473	8.57	0.04	0.524	0.006	1.50	0.02	6.94	0.09
1.0	476	8.51	0.09	0.513	0.001	1.67	0.01	8.11	0.00
1.0	479	9.15	0.02	0.513	0.001	1.76	0.02	8.52	0.12
1.1	468	8.59	0.02	0.530	0.007	1.65	0.04	7.48	0.03
1.1	471	9.84	0.13	0.523	0.005	1.69	0.00	7.88	0.14
1.1	473	10.07	0.03	0.532	0.003	1.69	0.00	7.61	0.07
1.1	476	10.14	0.14	0.518	0.002	1.84	0.02	8.76	0.14
1.1	479	10.35	0.06	0.530	0.004	1.73	0.02	7.85	0.23
1.2	468	10.01	0.04	0.536	0.004	1.73	0.02	7.66	0.21
1.2	471	10.19	0.01	0.534	0.003	1.62	0.00	7.24	0.10
1.2	473	10.37	0.01	0.529	0.004	1.67	0.00	7.59	0.09
1.2	476	10.62	0.04	0.542	0.001	1.67	0.00	7.21	0.03
1.2	479	11.52	0.09	0.542	0.001	1.63	0.00	7.09	0.04

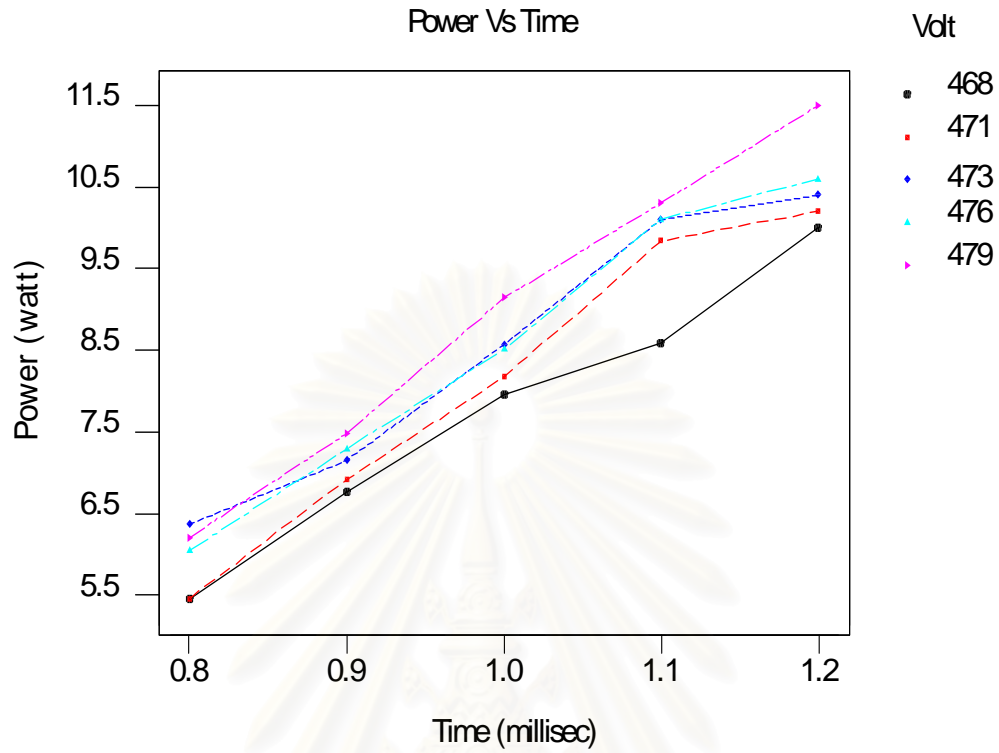
ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาการเชื่อมชิ้นงานความหนา 51 และ 200 ไมครอน เข้าด้วยกัน โดยให้ 51 ไมครอนอยู่ด้านบน

Set up Condition	Cross Section at 500X	Est. Penetration (Micron)
280 V & 1.42 ms		45
290 V & 1.42 ms		75
300 V & 1.42 ms		100
310 V & 1.42 ms		130
320 V & 1.42 ms		170



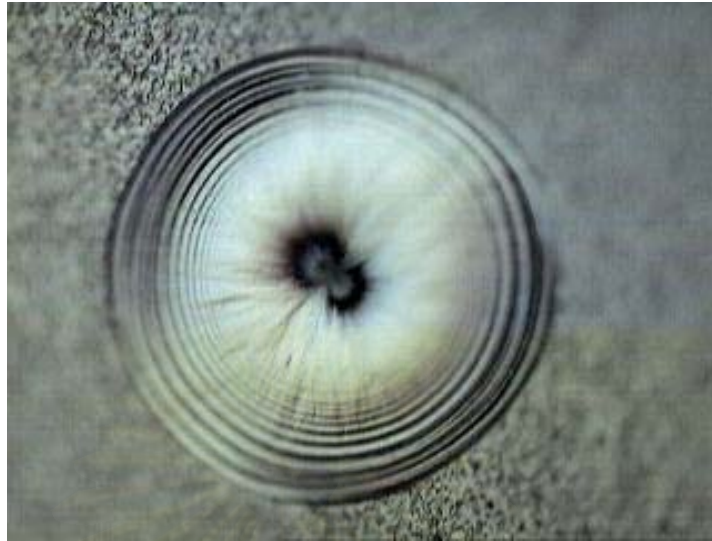
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเลเซอร์และค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ระยะเวลาเชื่อมเวลาต่างๆกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเลเซอร์และระยะเวลาการเชื่อม ที่โวลต์ต่างๆกัน

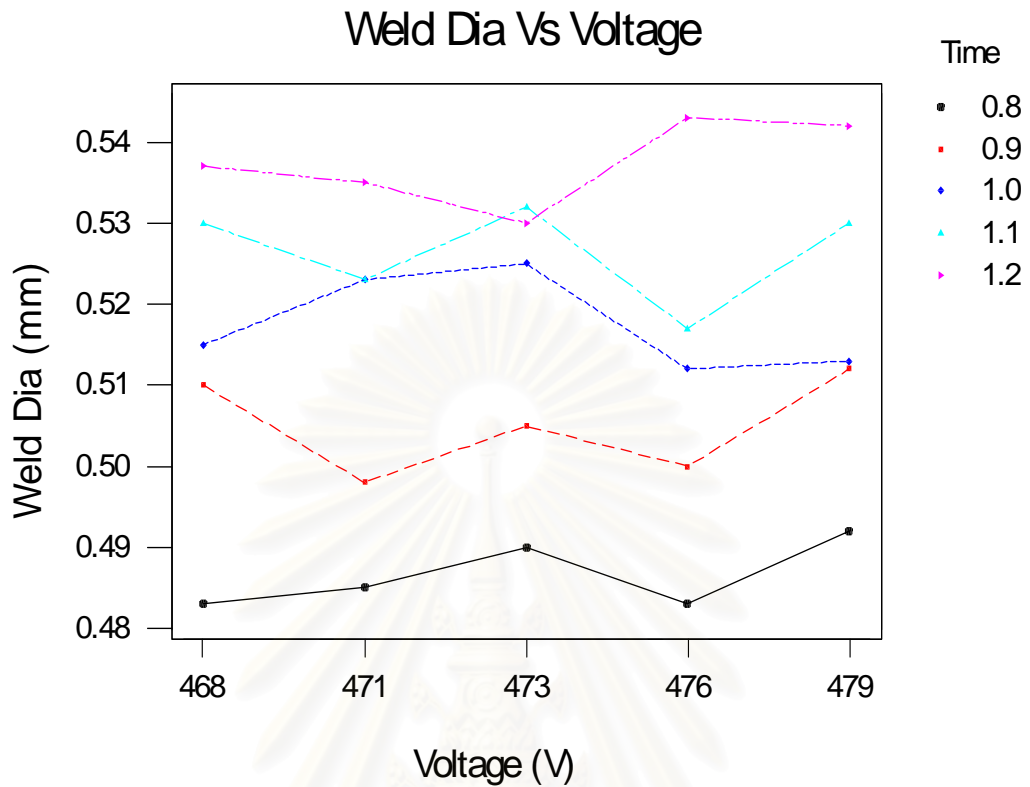
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



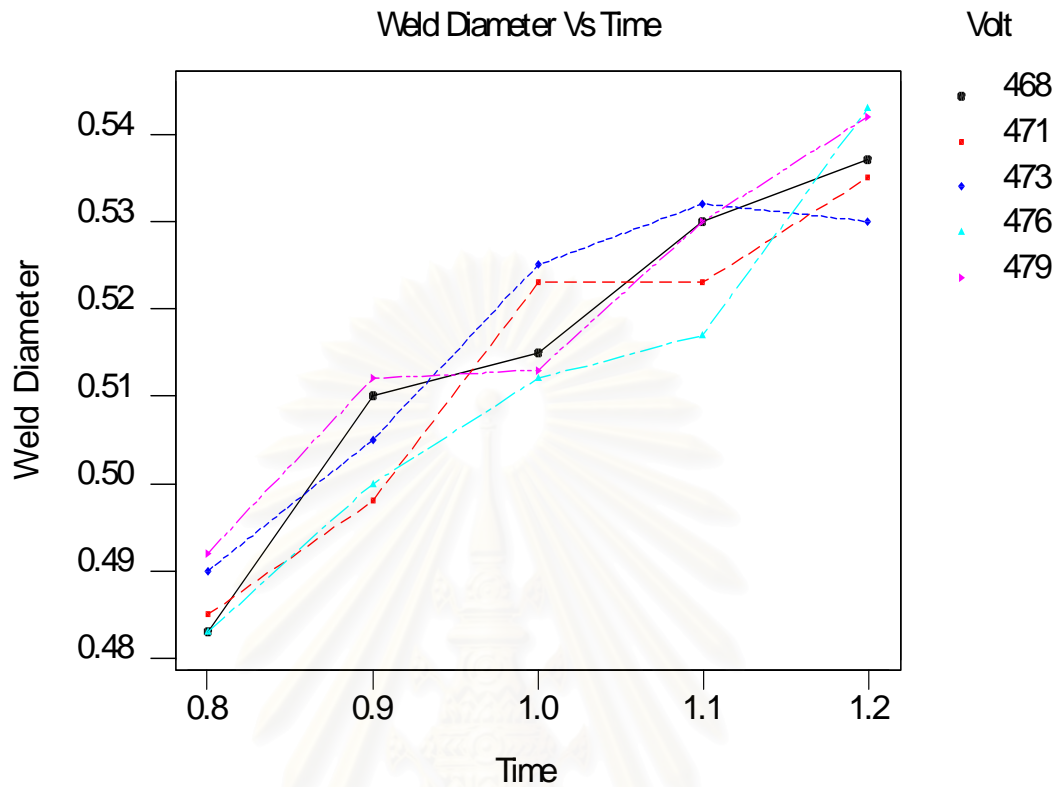
รูปที่ 4.3 รอยเชื่อมด้านหน้าที่กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.4 รอยเชื่อมด้านหลังที่กำลังขยาย 500 เท่า

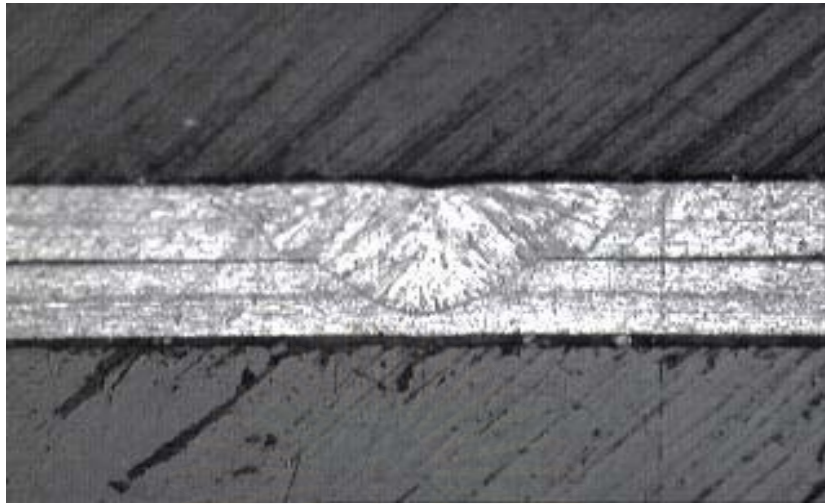


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรอยเชื่อมและแรงดันไฟฟ้า ที่ระยะเวลาการเชื่อมต่างๆ กัน

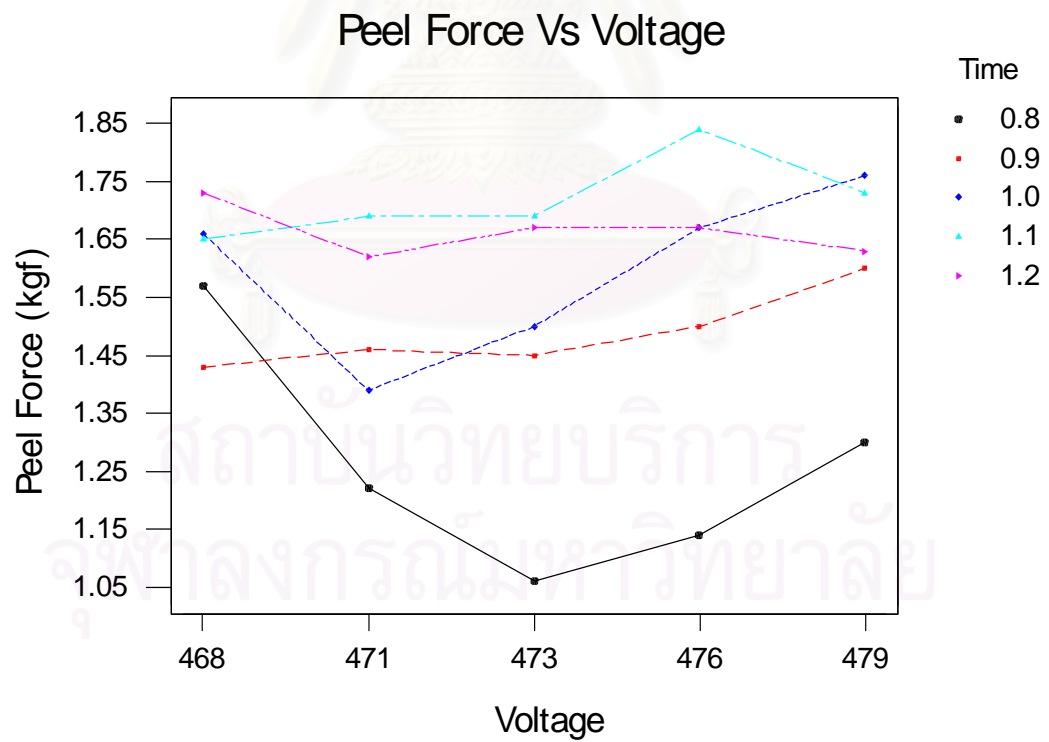


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรอยเชื่อมและระยะเวลาการเชื่อมที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ กัน

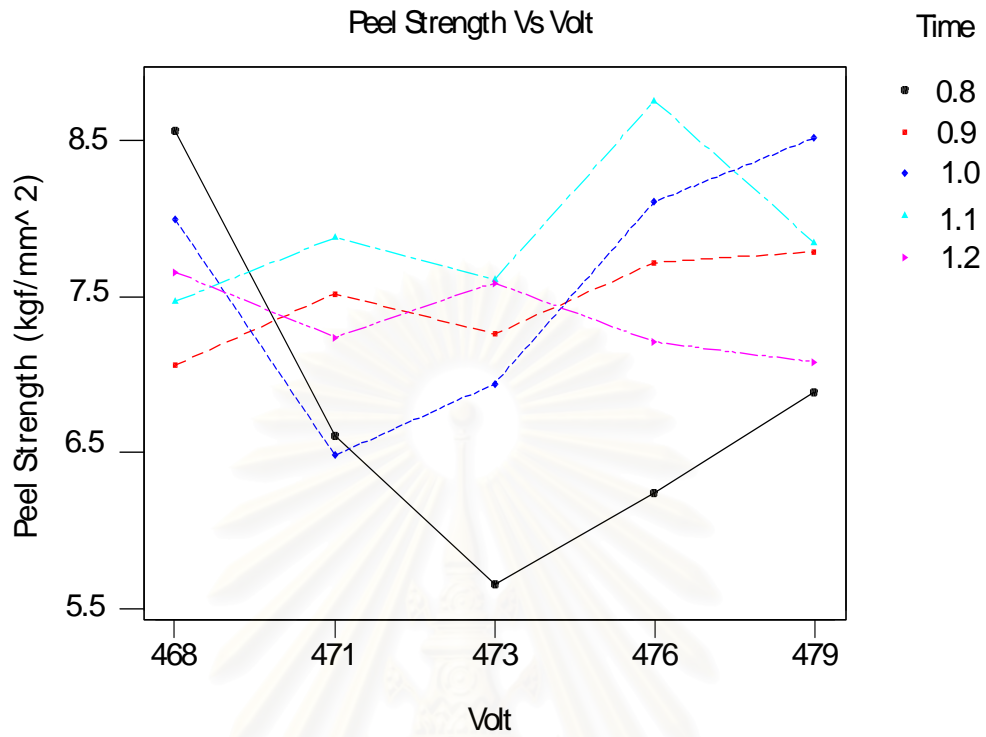
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



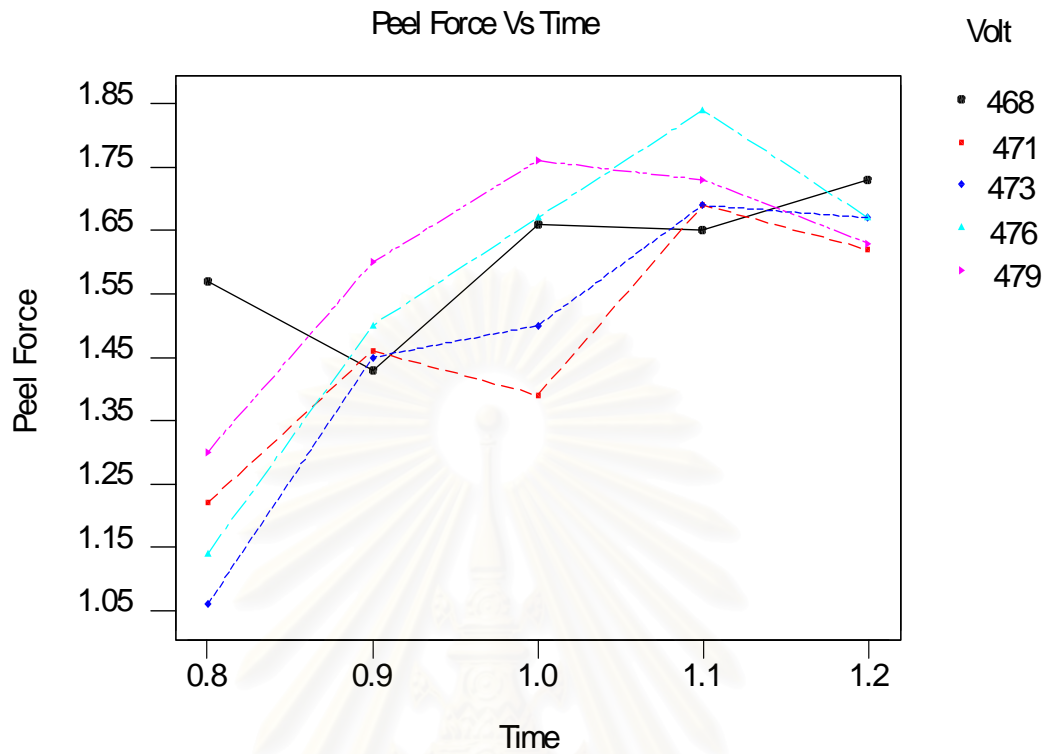
รูปที่ 4.7 ภาคตัดขวางรอยเชื่อมที่กำลังขยาย 500 เท่า ของสแตนเลสหนา 102 ไมครอน



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉีกและแรงดันไฟฟ้า ที่ระยะเวลาการเชื่อมต่างๆ กัน

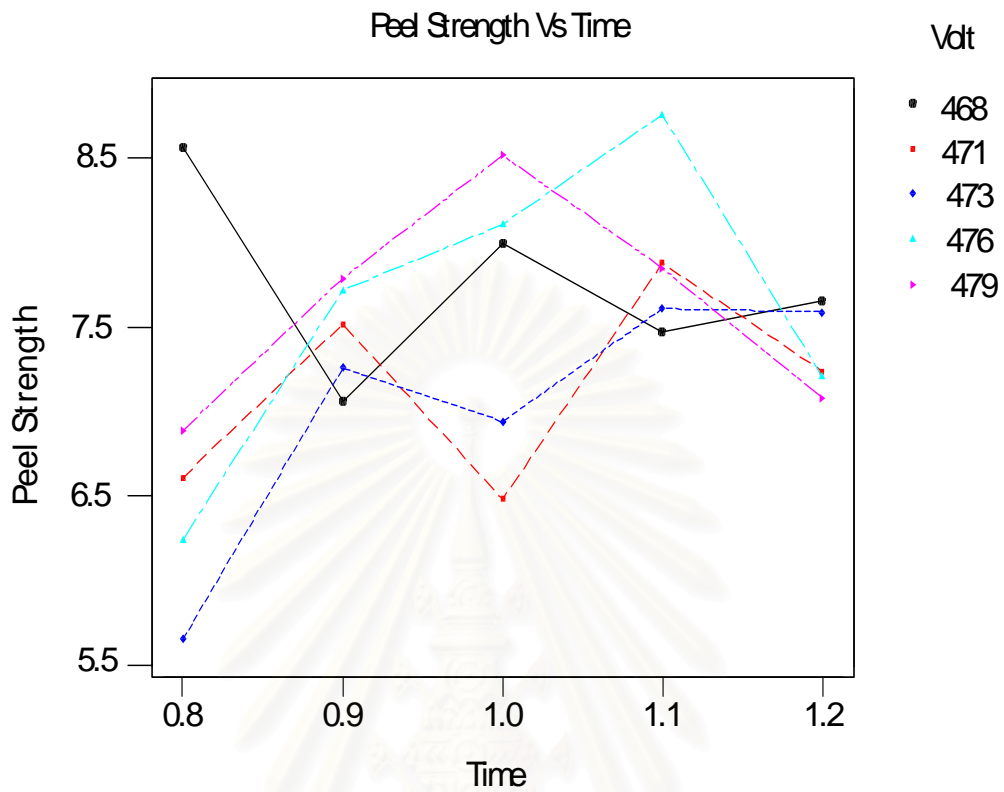


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงรอยเชื่อมและแรงดันไฟฟ้า ที่ระยะเวลาการเชื่อมต่างๆ กัน



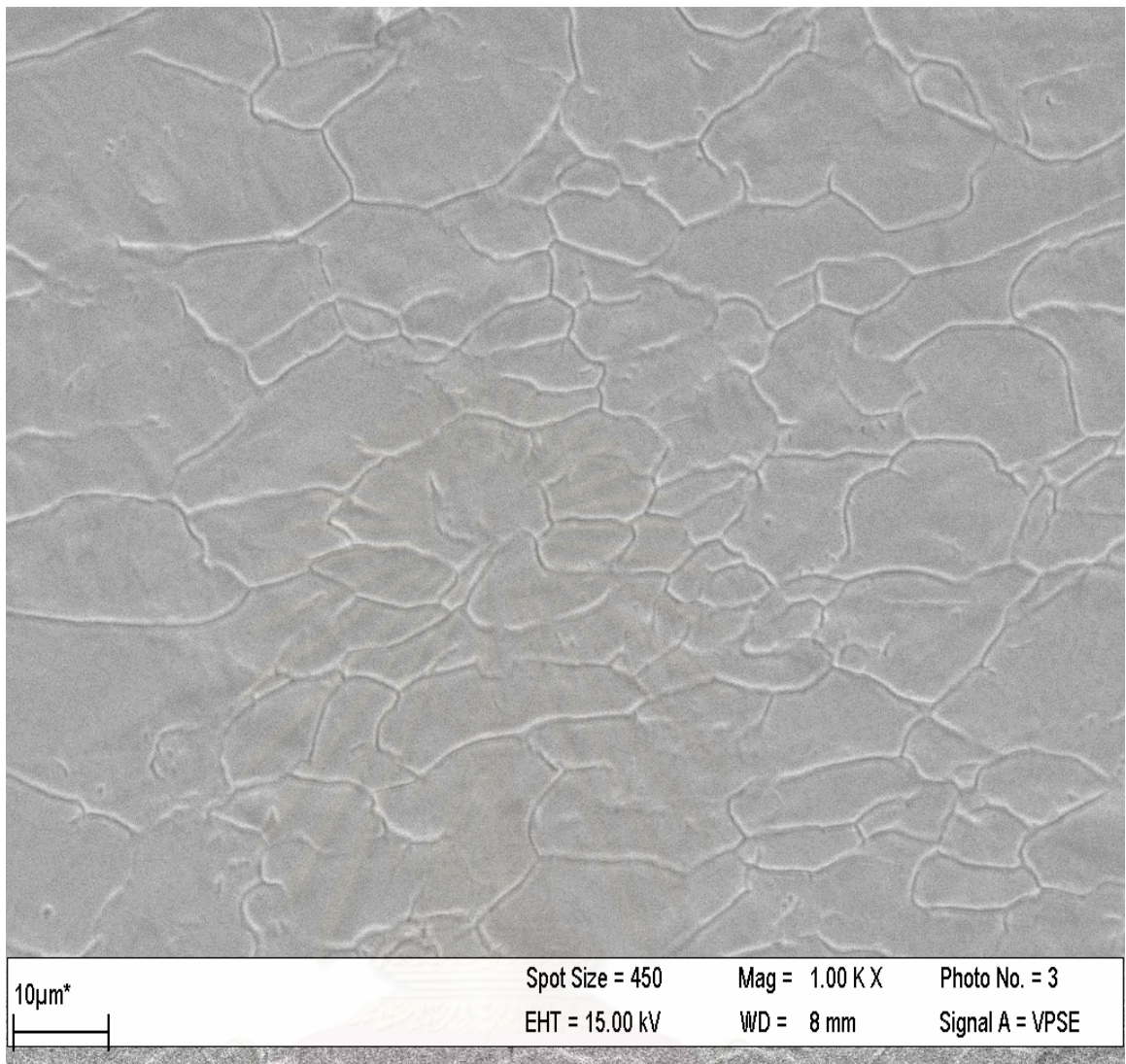
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉีกและระยะเวลาการเชื่อม ที่แรงดันไฟฟ้า
ต่างๆ กัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



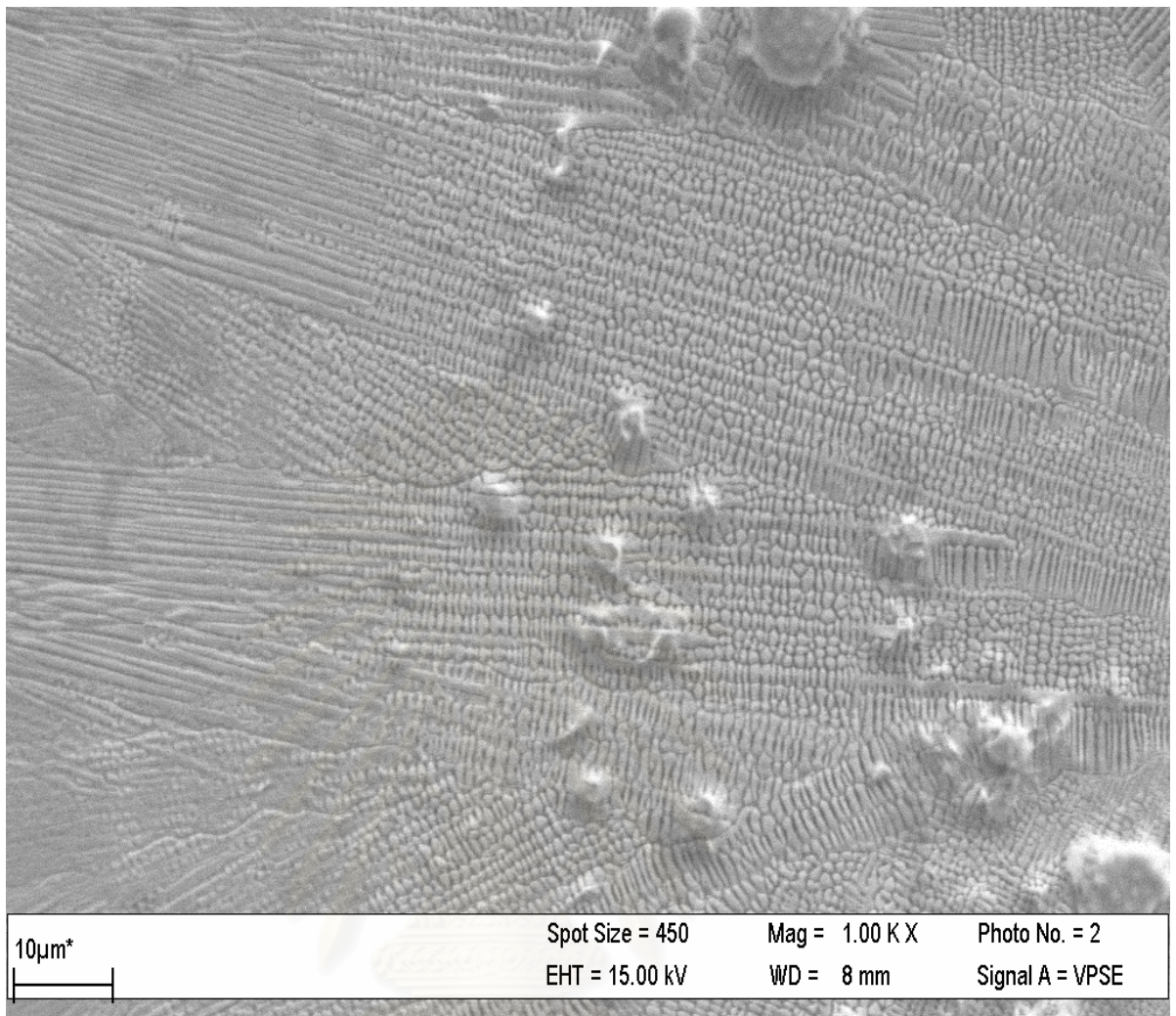
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงรอยเชื่อมและระยะเวลาการเชื่อม ที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ กัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



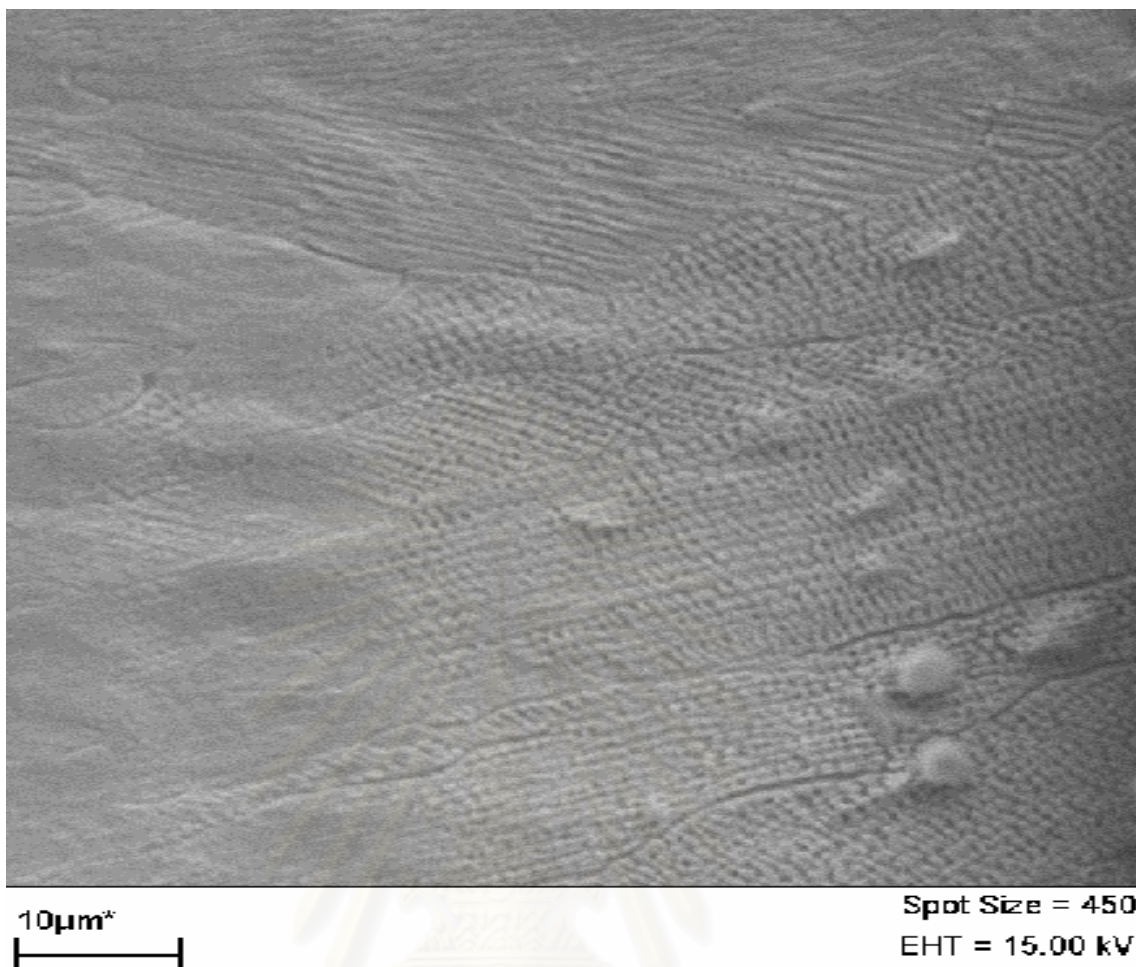
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ของสแตนเลส 304 ก่อนถูกเชื่อม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



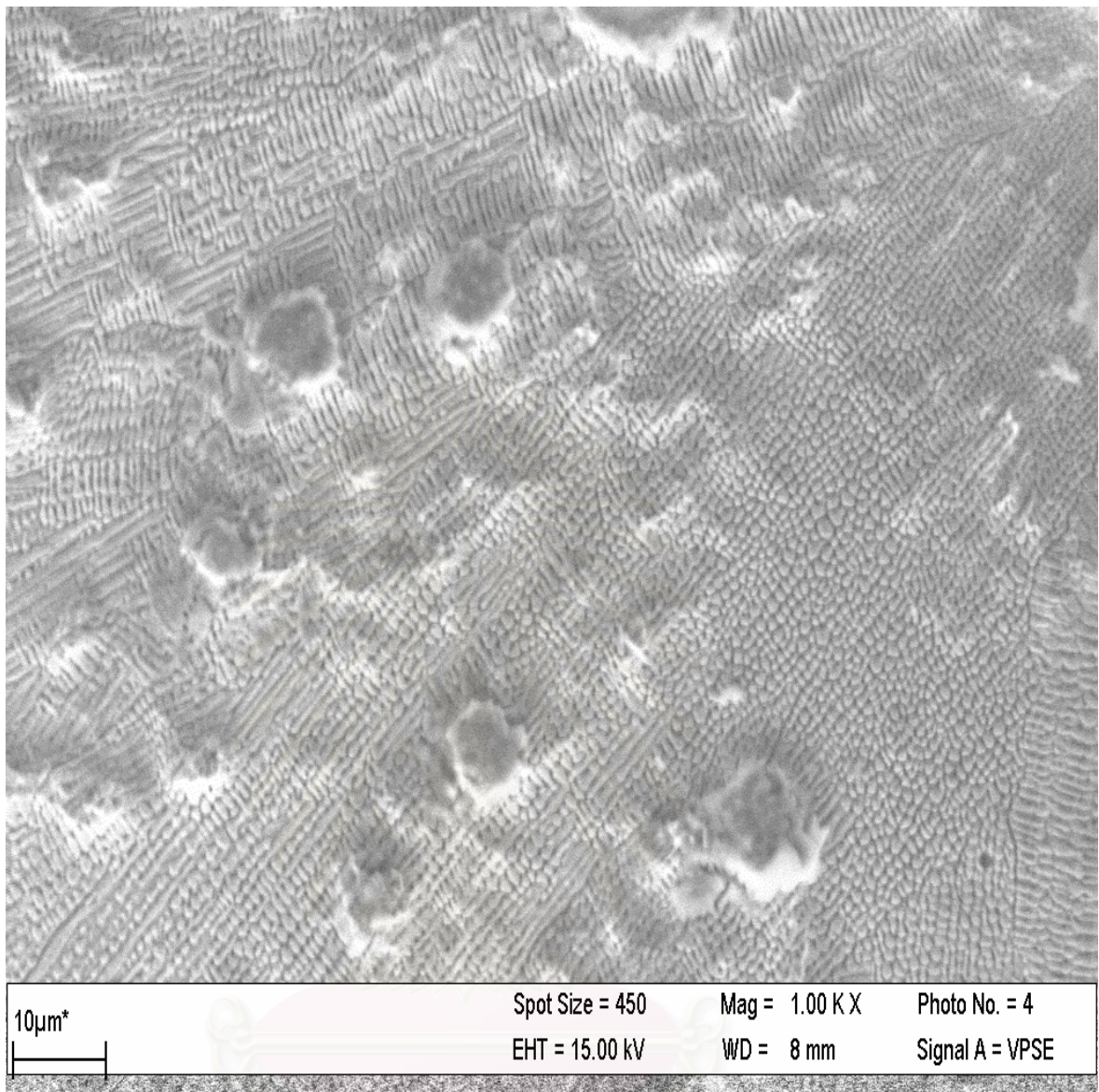
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายจาก SEM ของรอยเชื่อมที่กำลังขยาย 1000 เท่า ของสแตนเลส 304 ที่ 473 โวลต์ และ 0.8 มิลลิวินาที ความแข็งแรงของรอยเชื่อมเท่ากับ $5.65 \text{ kg}_f / \text{mm}^2$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



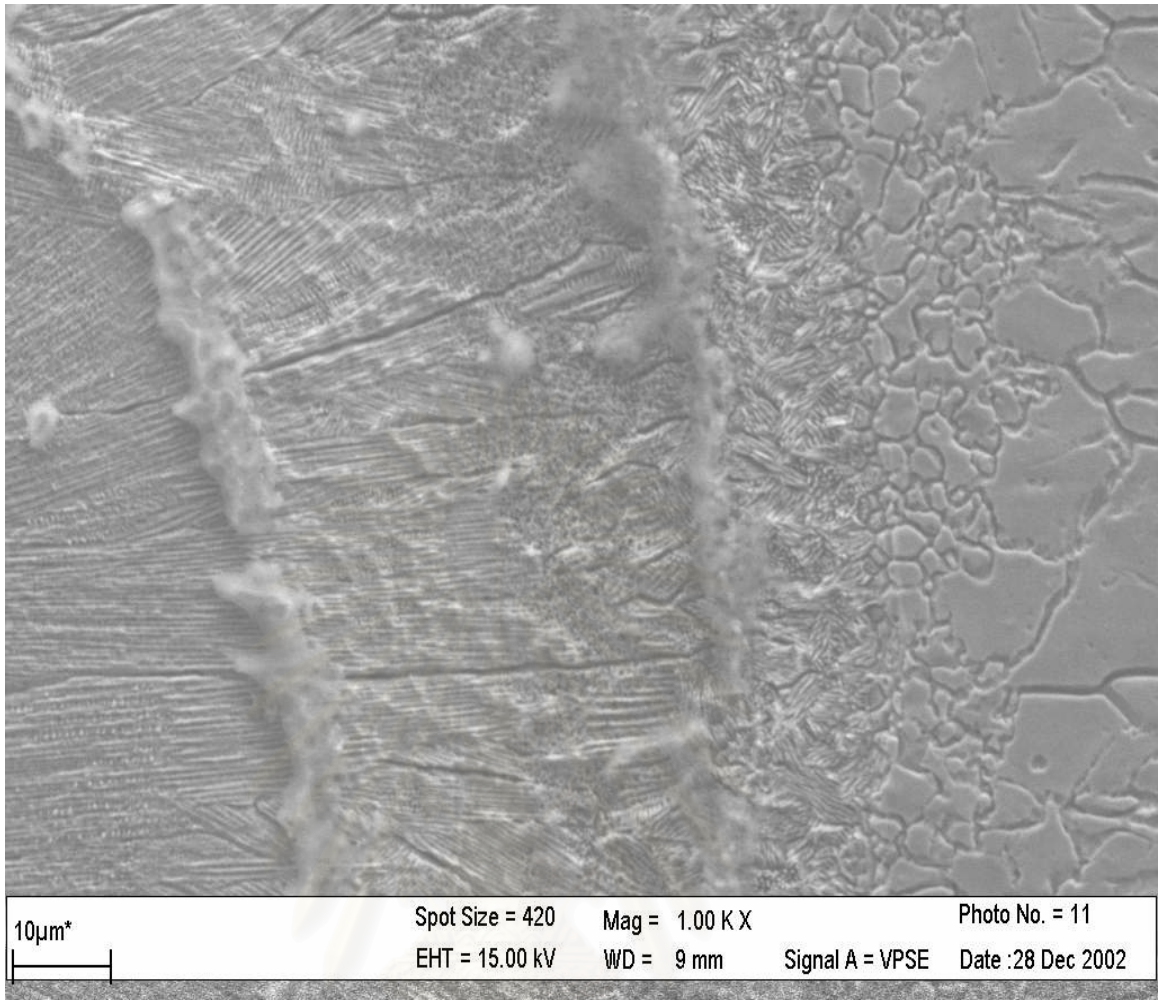
รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายจาก SEM ของรอยเชื่อมที่กำลังขยาย 1000 เท่า ของสแตนเลส 304 ที่ 473 โวลต์ และ 1.0 มิลลิวินาที ความแข็งแรงของรอยเชื่อมเท่ากับ $6.94 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



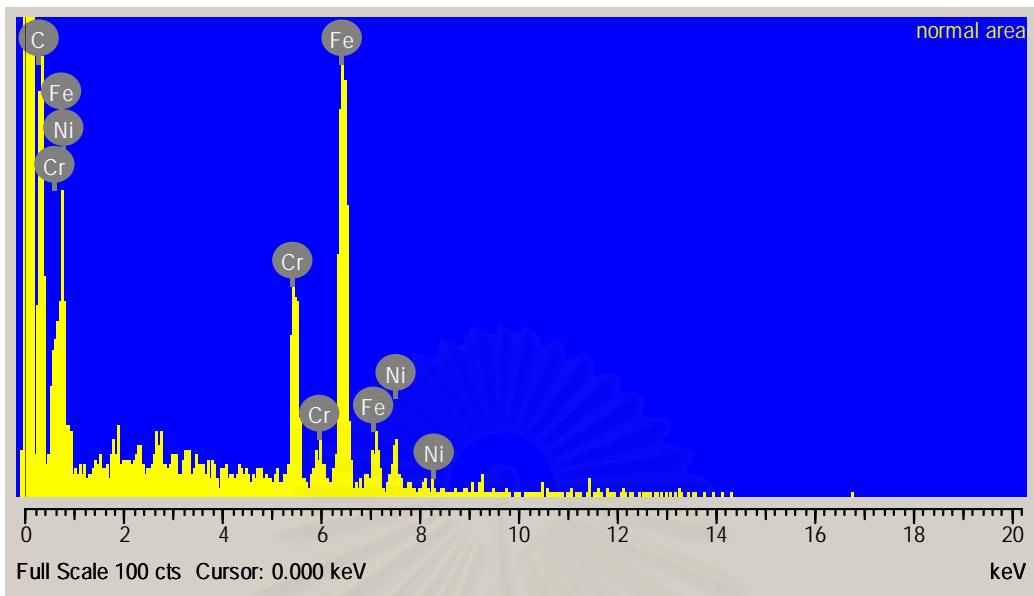
รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายจาก SEM ของรอยเชื่อมที่กำลังขยาย 1000 เท่า ของสแตนเลส 304 ที่ 476 โวลต์ และ 1.1 มิลลิวินาที ความแข็งแรงของรอยเชื่อมเท่ากับ $8.76 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

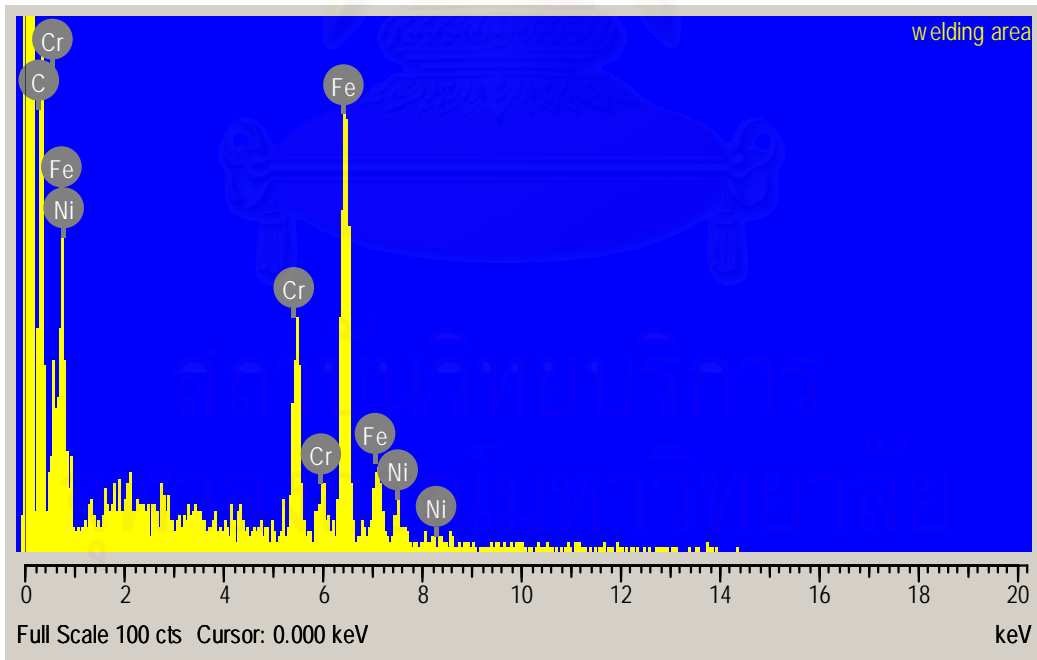


รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายจาก SEM บริเวณรอยต่อของเส้นรอบวงรอยเชื่อมที่กำลังขยาย 1000 เท่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.17 องค์ประกอบธาตุในสแตนเลส เกรด 304 ก่อนทำการเชื่อม จาก EDX



รูปที่ 4.18 องค์ประกอบธาตุในสแตนเลส เกรด 304 ในรอยเชื่อม จาก EDX

4.7 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

4.7.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่ากำลังจากเลเซอร์ ขนาดของรอยเชื่อม แรงฉีกในการทดสอบความแข็งแรง และความแข็งแรงของรอยเชื่อม แสดงดังตารางที่ 4.3 ซึ่งได้จากการใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังตารางที่ 4.3 พบว่า

1. แรงดันไฟฟ้าและเวลาการเชื่อมมีผลต่อกำลังเลเซอร์
2. เวลาการเชื่อมมีผลต่อขนาดของรอยเชื่อม
3. แรงดันไฟฟ้าไม่มีผลต่อขนาดรอยเชื่อม
4. เวลาการเชื่อมมีผลต่อแรงฉีก
5. แรงดันไฟฟ้าไม่มีผลต่อแรงฉีก
6. แรงดันไฟฟ้าและเวลาการเชื่อมไม่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม
7. ขนาดของรอยเชื่อมไม่มีผลต่อแรงฉีกและความแข็งแรงของรอยเชื่อม

สำหรับผลสรุปการวิเคราะห์ทางสถิติ แสดงในตารางที่ 4.8 โดยใช้การทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% โดยแสดงด้วยค่า P-Value หากค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่ามีความสำคัญของการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดย Minitab

Analysis of Variance for Power

Source	DF	SS	MS	F	P
Volt	4	3.9674	0.9919	13.84	0.000
Time	4	71.7139	17.9285	250.08	0.000
Error	16	1.1471	0.0717		
Total	24	76.8284			

Analysis of Variance for Welding Diameter

Source	DF	SS	MS	F	P
Volt	4	0.0001492	0.0000373	1.24	0.334
Time	4	0.0077212	0.0019303	64.13	0.000
Error	16	0.0004816	0.0000301		
Total	24	0.0083520			

Analysis of Variance for Peel Force

Source	DF	SS	MS	F	P
Volt	4	0.0881	0.0220	1.75	0.187
Time	4	0.6650	0.1663	13.25	0.000
Error	16	0.2007	0.0125		
Total	24	0.9538			

Analysis of Variance for Peel Strength

Source	DF	SS	MS	F	P
Volt	4	2.154	0.539	1.19	0.354
Time	4	3.404	0.851	1.87	0.164
Error	16	7.263	0.454		
Total	24	12.821			

Analysis of Variance for Peel Force

Source	DF	SS	MS	F	P
Weld Dia	19	0.8105	0.0427	1.49	0.351
Error	5	0.1434	0.0287		
Total	24	0.9538			

Analysis of Variance for Peel Strength

Source	DF	SS	MS	F	P
Weld Dia	19	9.000	0.474	0.62	0.795
Error	5	3.821	0.764		
Total	24	12.821			

4.7.2 การวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล

ผลการวิเคราะห์การถดถอย (Regression) ของค่ากำลังเลเซอร์ ขนาดของรอยเชื่อม และแรงดึง แสดงดังตารางที่ 4.5 – 4.7 ซึ่งได้จากการใช้โปรแกรม JMP ในการวิเคราะห์

จากผลการวิเคราะห์การถดถอยที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้สมการผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอย

ผลตอบสนอง	สัญลักษณ์	สมการ	R-Square
กำลังเลเซอร์	P	$11.940T + 0.102V - 51.827$	97.4%
ขนาดรอยเชื่อม	D	$0.123T + 0.391$	90.6%
แรงฉีก	F	$8.921T - 3.940T^2 - 3.787V + 0.004V^2 + 892.583$	75.7%

โดยที่

P = กำลังของเลเซอร์ มีหน่วยเป็นวัตต์

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

F = แรงฉีกในการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม มีหน่วยเป็น kg_f

T = เวลาในการยิงลำแสงเลเซอร์เพื่อเชื่อมชิ้นงาน มีหน่วยเป็นมิลลิวินาที

V = แรงดันไฟฟ้าในการปรับตั้งเครื่องเชื่อมสำหรับการเชื่อม มีหน่วยเป็นโวลท์

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของกำลังโดยโปรแกรม JMP

Response: Power

Summary of Fit

RSquare	0.973815
RSquare Adj	0.971435
Root Mean Square Error	0.302926
Mean of Response	8.367933
Observations (or Sum Wgts)	25

Parameter Estimates

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	-51.82663	7.50839	-6.90	<.0001
Time	11.939667	0.428402	27.87	<.0001
Volt	0.1019326	0.015834	6.44	<.0001

Effect Test

Source	Nparm	DF	Sum of Squares	F Ratio	Prob>F
Time	1	1	71.277820	776.7489	<.0001
Volt	1	1	3.802834	41.4413	<.0001

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของขนาดรอยเชื่อมโดยโปรแกรม JMP

Response: Weld Diameter

Summary of Fit

RSquare	0.906283
RSquare Adj	0.902208
Root Mean Square Error	0.005816
Mean of Response	0.5146
Observations (or Sum Wgts)	25

Parameter Estimate

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	0.3919333	0.008307	47.18	<.0001
Time	0.1226667	0.008225	14.91	<.0001

Effect Test

Source	Nparm	DF	Sum of Squares	F Ratio	Prob>F
Time	1	1	0.00752356	222.4187	<.0001

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของแรงฉีกโดยโปรแกรม JMP

Response: Force

Summary of Fit

RSquare	0.756906
RSquare Adj	0.708287
Root Mean Square Error	0.107556
Mean of Response	1.5446
Observations (or Sum Wgts)	25

Parameter Estimates

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
Intercept	892.58252	373.3821	2.39	0.0268
Time	8.9212857	2.575573	3.46	0.0025
Time*Time	-3.940476	1.285539	-3.07	0.0061
Volt	-3.787367	1.577016	-2.40	0.0262
Volt*Volt	0.0040023	0.001665	2.40	0.0260

Effect Test

Source	Nparm	DF	Sum of Squares	F Ratio	Prob>F
Time	1	1	0.13879556	11.9980	0.0025
Time*Time	1	1	0.10869147	9.3957	0.0061
Volt	1	1	0.06672232	5.7677	0.0262
Volt*Volt	1	1	0.06683543	5.7775	0.0260

ตารางที่ 4.8 สรุปผลการทดสอบทางสถิติ (จากการทดสอบที่ทุกระดับของปัจจัย)

Outcome	Factor	P-Value
Power	Time	0.000
	Voltage	0.000
Welding Diameter	Time	0.000
	Voltage	0.334
Peel Force	Time	0.000
	Voltage	0.187
Peel Strength	Time	0.164
	Voltage	0.354

บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 อุปกรณ์จับยึดในการเชื่อม (Laser Welding Fixture)

ในการเชื่อมเลเซอร์ อุปกรณ์จับยึดในการเชื่อมมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณภาพของการเชื่อม การบิดตัวของชิ้นงาน และตำแหน่งของรอยเชื่อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการผลิตแขนจับหัวอ่านซึ่งมีการควบคุมขนาด (Dimensions) ในระดับไมครอน

อุปกรณ์จับยึดในการเชื่อมเลเซอร์จะต้องถูกออกแบบมาให้มีขนาดของรูปพอเหมาะเพื่อให้แสงผ่านลงไปหลอมละลายโลหะได้สะดวก ไม่บดบังลำแสง ซึ่งจะทำให้ได้พลังงานไม่เต็มที่ เกิดการเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์เกิดขึ้น ควรคำนึงถึงการระบายออกของความร้อนในการเชื่อม ซึ่งถ้ามีความร้อนมากอาจบดบังรอยเชื่อม เกิดรอยเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์ได้เช่นกัน การออกแบบอุปกรณ์จับยึดที่ไม่ดีส่งผลให้การผลิตไม่มีประสิทธิภาพ PM บ่อย และ Down Time สูง ดังนั้นอุปกรณ์จับยึดจึงมีส่วนสำคัญมากในการผลิตแบบมวลรวม (Mass Production)

ในการวิจัย ไม่ได้ผลิตอุปกรณ์จับยึดสำหรับการนี้โดยเฉพาะเนื่องจากมีราคาที่สูงมาก โดยปกติที่ใช้ในการเชื่อมแขนจับหัวอ่านจะมีราคาประมาณ 700,000 – 800,000 บาทต่อหนึ่งตัว แต่อุปกรณ์จับยึดที่ใช้ได้มาจากอุปกรณ์จับยึดสำหรับการผลิต Spacer ซึ่งเป็นอุปกรณ์ช่วยในการจัดเก็บแขนจับหัวอ่านในขณะที่ยังเป็นแผ่น (Strip) อยู่ เพื่อป้องกันการเกี่ยวกันแล้วเกิดความเสียหายทางด้าน ขนาด (dimensions) หรือการบิดเบี้ยว (Bend) ของแขนจับหัวอ่าน Spacer มีลักษณะเป็นแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 5.1 คล้ายกับชิ้นงานที่ทำการวิจัย จึงนำมาประยุกต์ใช้ ซึ่งไม่พบปัญหาอะไรในการทดลอง เนื่องจากชิ้นงานทดสอบสามารถตัดให้มีขนาดพอเหมาะในการเข้าไปอยู่ในอุปกรณ์จับยึดได้ ทิศทางของแรงในการจับยึดแสดงในรูปที่ 5.2

5.2 ความแข็งแรงของรอยเชื่อม

การทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมในการวิจัย ใช้วิธีการที่เรียกว่าการทดสอบความแข็งแรงแบบลอกออก (Peel Test) ซึ่งเป็นการดึงชิ้นงานให้หลุดออกจากกัน โดยดึงชิ้นงานสองชิ้นในทิศทางตั้งฉากกัน ผลที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรงเป็นค่าแรงที่ใช้ในการดึงให้ชิ้นงานหลุดออกจากกัน มีหน่วยเป็นกิโลกรัมแรง (kg_f)

ในการวิจัยใช้การทดสอบความแข็งแรงโดยวัดเป็นหน่วยแรงเช่นเดียวกับที่ใช้ในอุตสาหกรรมของชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ทั่วไป ไม่ได้มีการวัดหรือคำนวณออกมาเป็น kg/mm² เนื่องจากในอุตสาหกรรมสนใจที่ความสามารถในการต้านทานต่อแรงฉีก แต่ถ้าจะว่าไปถึงแรงต่อพื้นที่ของรอยเชื่อมก็ไม่เป็นปัญหาแต่อย่างใด เนื่องจากมีการควบคุมขนาดของรอยเชื่อมอยู่แล้ว โดยทั่วไปมักเรียกรอยเชื่อมว่า “จุดเชื่อม” ด้วยเหตุที่ในการผลิตแขนจับหัวอ่านใช้ Pulse Welding หรืออาจเรียกว่า “Spot Welding” และรอยเชื่อมมีขนาดประมาณ 290 ไมครอน จึงได้เรียกว่าเป็นจุดเชื่อม ภาพของจุดเชื่อมในแขนจับหัวอ่านแสดงดังรูปที่ 5.3

ความแข็งแรงของรอยเชื่อมอาจมีค่ากระโดดไปจากกลุ่มได้ในบางครั้งของการเชื่อมที่เงื่อนไขเดียวกันแต่กระทำที่หลายตัวอย่าง เนื่องจากความไม่คงที่ของแหล่งจ่ายพลังงาน (Power Supply)

5.3 การถ่ายภาพตัดขวางของรอยเชื่อม

ในการถ่ายภาพตัดขวางของรอยเชื่อมอาจไม่ได้ความลึกที่แท้จริงของรอยเชื่อม เนื่องจากความไม่แม่นยำในการตัดชิ้นงาน ที่จะต้องตัดตรงกึ่งกลางของรอยเชื่อม แต่สามารถจะสังเกตเห็นได้เนื่อง จากความลึกของรอยเชื่อมจะมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยม ถ้าตัดที่กึ่งกลางจะมองเห็นปลายยอดของสามเหลี่ยม

5.4 การวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรอยเชื่อม

ใช้การวัดโดย MTM ซึ่งคนอาจวัดผิดพลาดได้ เนื่องจากแต่ละคนอาจกำหนดขอบของเส้นรอบวงต่างกัน แต่ไม่น่าจะมีผลแตกต่างกันมากนัก เนื่องจากขนาดของรอยเชื่อมสามารถ

มองเห็นได้ชัดจากกล้อง MTM หากต้องการความละเอียดสูงในการวัดควรใช้ระบบการวัดแบบอัตโนมัติ โดยอาจใช้เครื่อง Smart Scope

5.5 องค์ประกอบธาตุในรอยเชื่อม

ในการวิจัยใช้ EDX ในการตรวจสอบ ซึ่งพบว่าไม่มีธาตุใดเกิดขึ้นเพิ่มเติมในรอยเชื่อม ไม่ว่าจะเป็นไนโตรเจนซึ่งใช้ปกคลุมรอยเชื่อมและออกซิเจนซึ่งมีอยู่ในบรรยากาศ สามารถอธิบายได้ว่า ในการเชื่อมนั้นใช้ระยะเวลาเป็นมิลลิวินาที เร็วเกินไปที่ไนโตรเจนหรือออกซิเจนจะเกิดการรวมตัวหรือแทรกเข้าไปในรอยเชื่อมได้

5.5 การทดสอบทางสถิติ

การทดสอบทางสถิติเป็นเพียงเครื่องมือหนึ่งที่ช่วยในการยืนยันผลเพื่อความแน่ใจ อย่างไรก็ตาม การสรุปผลจะยึดตามหลักการทางทฤษฎีและ Professional Judgment เป็นหลัก เนื่องจากผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติจะขึ้นกับความแตกต่างที่เราต้องการจะดักจับ ซึ่งขึ้นกับจุดประสงค์และข้อจำกัดของการทดลองเป็นหลัก เช่น

1. แรงดันไฟฟ้ามีผลต่อแรงจิกและความแข็งแรงของรอยเชื่อม แต่จากการทดสอบทางสถิติได้ค่า P-Value เท่ากับ 0.187 และ 0.354 ตามลำดับ ซึ่งหมายถึงว่าแรงดันไฟฟ้าไม่มีผลต่อแรงจิกและความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ซึ่งขัดแย้งกับกราฟในรูปที่ 4.8-4.9 แต่หากสรุปตามข้อมูลที่เห็นจะพบว่ามีผล ดังกราฟที่แสดง ดังนั้นเมื่อดูที่ P-Value จะพบว่าจริงๆแล้วแรงดันไฟฟ้ามีผลต่อแรงจิกที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 80% และมีผลต่อความแข็งแรงที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 65% ดังนั้นหากทดสอบสมมติฐานที่ระดับ 65% ความเชื่อมั่นก็จะพบว่าแรงดันไฟฟ้ามีผลต่อทั้งแรงจิกและความแข็งแรงของรอยเชื่อมดังที่พบในกราฟ
2. ระยะเวลาการเชื่อมไม่มีผลต่อความแข็งแรงที่ 95% ความเชื่อมั่น แต่มีผลต่อความแข็งแรงที่ 80% ความเชื่อมั่นเนื่องจากมีค่า P-Value ที่ 0.164 ดังที่พบในกราฟรูปที่ 4.10-4.11
3. จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าที่ระยะเวลาการเชื่อม 0.8 และ 1.0 มิลลิวินาที แรงดันไฟฟ้าทำให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงจิกและความแข็งแรงเป็นอย่างมาก ซึ่งไม่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงดังแสดง จากการทดลองทดสอบอิทธิพลของแรงดันไฟฟ้าทางสถิติที่มีต่อแรงจิกและความแข็งแรงดังแสดงในตารางที่ 7ค และ 8ค ซึ่งอยู่ในภาคผนวกและเป็นการทดสอบที่ 95% ความเชื่อมั่น พบว่า

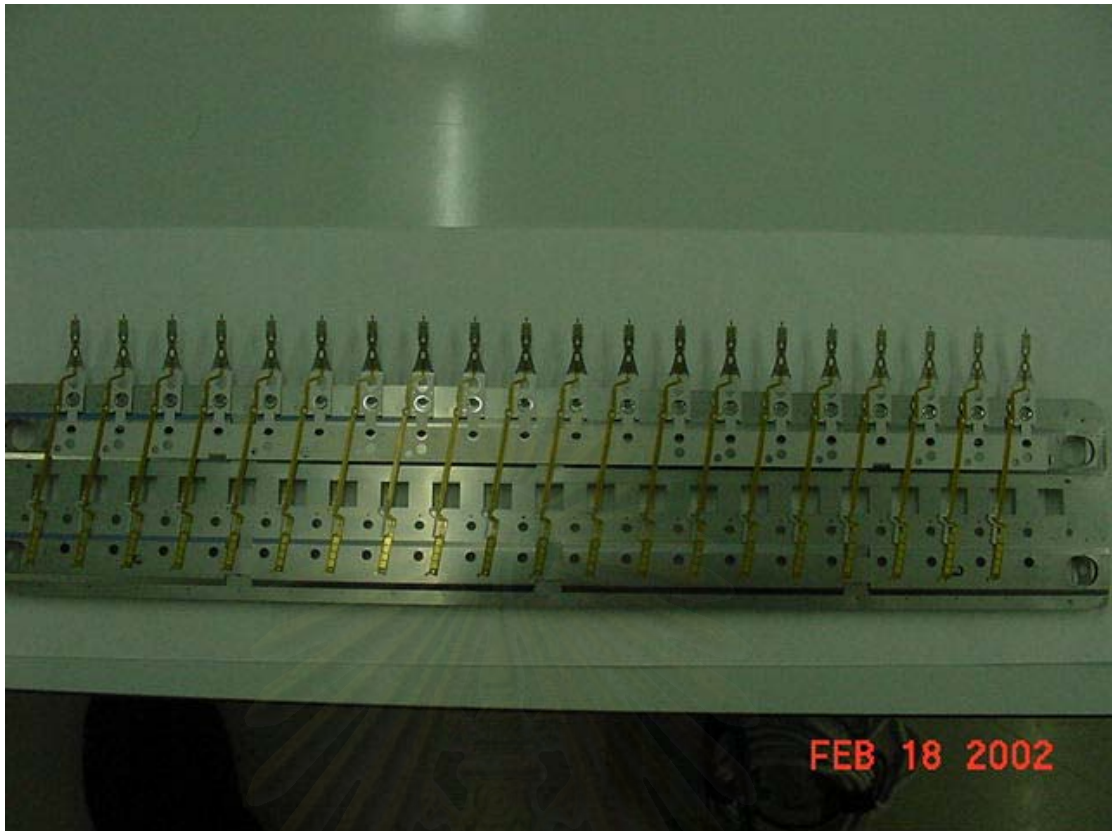
ระยะเวลาการเชื่อมมีผลต่อแรงฉีก ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าไม่มีผลต่อแรงฉีก ระยะเวลาการเชื่อม และแรงดันไฟฟ้าไม่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม ซึ่งทั้งหมดสอดคล้องกับผลสรุปในข้อที่ 4.7 และพบว่า การทดสอบทางสถิตินั้นเมื่อการเปลี่ยนแปลงไม่มีแนวโน้มหรือมีการแกว่งมาก ๆ ผลจากการทดสอบทางสถิตินั้นจะถือว่าไม่มีผลเพราะถือว่าไม่สามารถพยากรณ์ได้

4. จากตารางที่ 1ค-6ค ในภาคผนวก พบว่าที่ระยะเวลาการเชื่อมเท่ากับ 0.8 มิลลิวินาทีและที่การทดสอบโดยรวมที่ทุกระยะเวลาการเชื่อมโดยทดสอบที่ 95% ความเชื่อมั่น แรงดันไฟฟ้าไม่มีผลต่อขนาดของรอยเชื่อม สำหรับแต่ละระยะเวลาการเชื่อมที่ 0.9, 1.0, 1.1 และ 1.2 มิลลิวินาที แรงดันไฟฟ้ามีผลต่อขนาดของรอยเชื่อม โดยทิศทางของแนวโน้มเป็นดังนี้ ที่ 0.9 และ 1.1 มิลลิวินาที ไม่มีแนวโน้มในเชิงเส้นตรง มีการขึ้นและลงสลับกันไป ที่ 1.0 มิลลิวินาที มีแนวโน้มในเชิงเส้นตรงที่ลดลง ที่ 1.2 มิลลิวินาทีมีแนวโน้มในเชิงเส้นตรงที่เพิ่มขึ้น

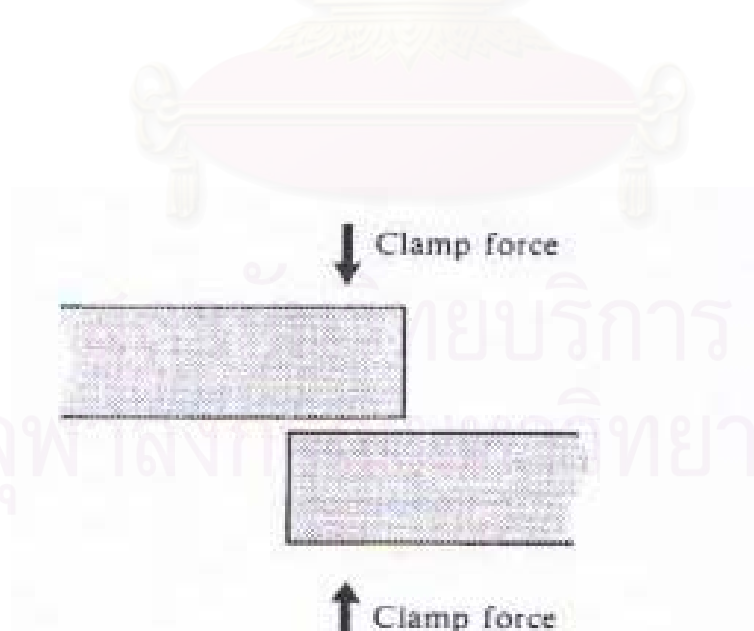
จากข้างต้น พบว่าในการที่จะบอกว่าปัจจัยตัวใดมีผลต่อผลตอบสนองนั้นหรือไม่ ขึ้นกับระดับความเชื่อมั่นที่ใส่ไปในการทดสอบ ซึ่งต้องดูข้อมูลที่ได้จริงประกอบด้วย โดยการทดสอบทางสถิตินั้นเป็นเพียงเครื่องมือ เมื่อมีความไม่แน่ใจเท่านั้น และในการที่จะบอกว่าปัจจัยใดมีผลหรือไม่ ขึ้นกับความแตกต่างที่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นจึงควรดูผลการทดสอบทางสถิติร่วมกับค่าที่เกิดขึ้นว่าอยู่ในช่วงที่ทำให้เกิดความแตกต่างขึ้นหรือไม่ โดยยึดหลักการและประสบการณ์ทางวิศวกรรมเป็นหลัก

ข้อควรระวังอย่างหนึ่ง ในการพิจารณารูปของสมการถดถอย (Regression Plot) ก็คือการที่ปัจจัยมีอิทธิพลหรือไม่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองในการทดสอบทางสถิติ ไม่ได้เกี่ยวข้องกับค่าของ R-Square เนื่องจากค่า R-Square เป็นค่าที่บอกว่าสมการนั้นหรือเส้นกราฟนั้นเหมาะสม (Fit) หรือไม่ ไม่ได้หมายความว่าหากปัจจัยมีอิทธิพลต่อผลตอบสนองจะต้องได้ค่า R-Square สูงเสมอไป ขึ้นอยู่กับกำลังในการ Fit สมการและปัจจัยครอบคลุมเพียงพอหรือไม่มากกว่า

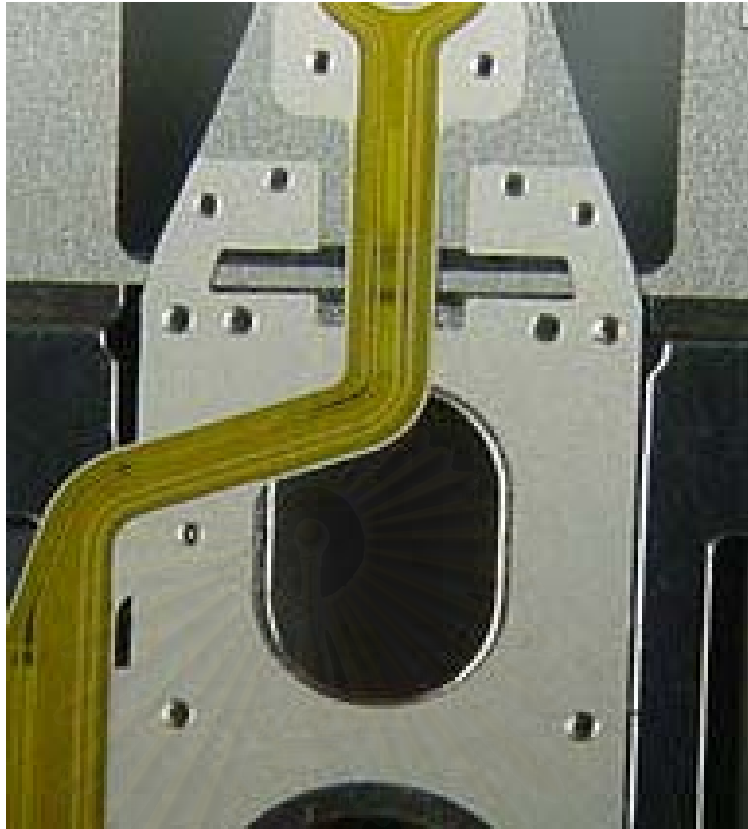
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.1 แสดงรูปของ Spacer ซึ่งรองแผงของแขนจับหัวอ่านอยู่ด้านล่าง
ในการวิจัยใช้อุปกรณ์จับยึดตัวเดียวกับที่ใช้ผลิต Spacer



รูปที่ 5.2 ทิศทางของแรงกดชิ้นงานในอุปกรณ์จับยึด



รูปที่ 5.3 แสดงจุดเชื่อมในแขนจับหัวอ่านซึ่งมีขนาดประมาณ 280 ไมครอน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาปัจจัยการเชื่อมด้วยแก็กเลเซอร์ของแรงดันไฟฟ้าและระยะเวลาในการเชื่อมต่อกำลังเลเซอร์ ขนาดของรอยเชื่อม ความลึกของรอยเชื่อม แรงฉีกและความแข็งแรงของรอยเชื่อม ได้ผลสรุปดังนี้

1. กำลังเลเซอร์ (P) แปรผันตรงกับระยะเวลาในการยิงเลเซอร์และแรงดันไฟฟ้า โดยปัจจัยทางด้านเวลา (T) มีอิทธิพลต่อกำลังเลเซอร์มากกว่าการปรับค่าแรงดันไฟฟ้า (V) ดังนั้นเมื่อปรับตั้งค่าเวลาหรือแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นจะส่งผลให้กำลังเลเซอร์สูงขึ้นดังสมการ $P = 11.940T + 0.102V - 51.827$ (R-Square = 97.4%)
2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม (D) แปรผันตามระยะเวลาการเชื่อม (T) เมื่อระยะเวลาการเชื่อมมากขึ้น จะทำให้รอยเชื่อมมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังสมการ $D = 0.123T + 0.391$ (R-Square = 90.6%)
3. เมื่อกำลังเลเซอร์สูงขึ้น ขนาดของรอยเชื่อมจะใหญ่ขึ้น
4. แรงฉีก (F) ในการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมแปรผันตามระยะเวลาการเชื่อม (T) เมื่อต้องการให้รอยเชื่อมทนต่อแรงฉีกได้มากขึ้น ต้องปรับเวลาในการเชื่อมให้มากขึ้น ดังสมการ $F = 8.921T - 3.940T^2 - 3.787V + 0.004V^2 + 892.583$ (R-Square = 75.7%)
5. ความแข็งแรงของรอยเชื่อมเมื่อแปรเปลี่ยนระยะเวลาการเชื่อมและแรงดันไฟฟ้าไม่มีแนวโน้มที่สามารถพยากรณ์ได้ชัดเจน
6. เงื่อนไขการเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงสุดคือที่แรงดันไฟฟ้า 476 โวลท์ และระยะเวลาการเชื่อม 1.1 มิลลิวินาที
7. ความลึกในรอยเชื่อมแปรผันตามแรงดันไฟฟ้า นั่นคือเมื่อต้องการเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนามากขึ้นหรือต้องการรอยเชื่อมที่ลึกขึ้น ต้องปรับค่าแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น
8. แรงฉีกมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อรอยเชื่อมมีขนาดใหญ่ขึ้น
9. เมื่อชิ้นงานถูกเชื่อม โครงสร้างทางจุลภาคจะเปลี่ยนไปโดยมีขนาดเกรนที่เล็กลงและมองเห็นแนวการเกิดผลึก (Dendrite) แต่องค์ประกอบของธาตุในรอยเชื่อมยังคงเป็นเช่นเดิม ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยครั้งต่อไปควรศึกษาเกี่ยวกับ

1. การบิดตัวของชิ้นงานเมื่อถูกเชื่อม เนื่องจากในการผลิตแขนจับหัวอ่านการบิดตัวเนื่องจากการเชื่อมเป็นสิ่งที่พึงหลีกเลี่ยงมากที่สุดสิ่งหนึ่ง
2. ปัจจัยอื่นๆ เช่น ระยะเวลาแสง (Focal Length) ความเร็วของแท่นเชื่อม เป็นต้น
3. อิทธิพลและลักษณะของกำลังเลเซอร์ต่อผลตอบสนองต่างๆ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

เจ. วิลเลียม และ เจ.เอฟ.เอ็ม. ฮอว์เคส. 2001. เลเซอร์ทฤษฎีและการประยุกต์. เรียบเรียงโดย สุรพล รักวิชัย. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์เพียร์สัน เอ็ดดูเคชัน อินโดไชนา .

พิเชษฐ ลิ่มสุวรรณ. 2546. การฝึกอบรมหลักสูตรเลเซอร์. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ภาษาอังกฤษ

B.H.Amsted, Philip F. Ostwald, Myron L. Begeman. 1987. Manufacturing Processes. 8 th ed. New York: John Wiley & Sons.

Christopher Dawes. 1994. Laser Welding / A Practical Guide. Bombay: Jaico Publishing House.

Simon L.Engel. 2000. Advanced Industrial laser Welding: California: HDE Technologies.

W.W.Duley. 1999. Laser Welding. University of Waterloo: John Wiley & Sons.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

ตารางที่ 1 ก ผลการเชื่อมสแตนเลส 304 ความหนา 102 ไมครอน จำนวนสองแผ่นเข้าด้วยกัน
เมื่อระยะเวลาการเชื่อมคงที่ที่ 0.8 มิลลิวินาที

Time	Volt	Part	Trial	Power	Weld Dia	Peel Force	Peel Strength
0.8	468	1	1	5.57	0.489	1.57	8.36
0.8	468	2	1	5.51	0.478	1.29	7.19
0.8	468	3	1	5.38	0.487	1.77	9.50
0.8	468	1	2	5.48	0.482	1.64	8.99
0.8	468	2	2	5.38	0.483	1.55	8.46
0.8	468	3	2	5.35	0.480	1.62	8.95
0.8	471	1	1	5.55	0.493	1.08	5.66
0.8	471	2	1	5.40	0.475	1.21	6.83
0.8	471	3	1	5.43	0.484	1.32	7.17
0.8	471	1	2	5.50	0.488	1.28	6.84
0.8	471	2	2	5.45	0.483	1.19	6.49
0.8	471	3	2	5.41	0.489	1.25	6.66
0.8	473	1	1	5.80	0.488	1.01	5.40
0.8	473	2	1	8.96	0.485	1.05	5.68
0.8	473	3	1	5.83	0.488	1.09	5.83
0.8	473	1	2	5.81	0.483	1.01	5.51
0.8	473	2	2	5.87	0.486	1.11	5.98
0.8	473	3	2	5.97	0.497	1.07	5.52

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ 1 ก (ต่อ)

Time	Volt	Part	Trial	Power	Weld Dia	Peel Force	Peel Strength
0.8	476	1	1	6.04	0.473	1.15	6.54
0.8	476	2	1	6.02	0.475	1.20	6.77
0.8	476	3	1	5.97	0.483	1.12	6.11
0.8	476	1	2	6.23	0.497	1.08	5.57
0.8	476	2	2	5.93	0.484	1.12	6.09
0.8	476	3	2	6.11	0.485	1.17	6.33
0.8	479	1	1	6.32	0.492	1.28	6.73
0.8	479	2	1	6.23	0.493	1.31	6.86
0.8	479	3	1	6.24	0.486	1.27	6.85
0.8	479	1	2	6.26	0.495	1.32	6.86
0.8	479	2	2	6.18	0.489	1.34	7.14
0.8	479	3	2	6.05	0.490	1.30	6.89

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ 2 ก ผลการเชื่อมสแตนเลส 304 ความหนา 102 ไมครอน จำนวนสองแผ่นเข้าด้วยกัน
เมื่อระยะเวลาการเชื่อมคงที่ที่ 0.9 มิลลิวินาที

Time	Volt	Part	Trial	Power	Weld Dia	Peel Force	Peel Strength
0.9	468	1	1	6.69	0.511	1.43	6.97
0.9	468	2	1	6.74	0.508	1.51	7.45
0.9	468	3	1	6.75	0.505	1.46	7.29
0.9	468	1	2	6.98	0.507	1.39	6.89
0.9	468	2	2	6.77	0.509	1.37	6.73
0.9	468	3	2	6.66	0.505	1.41	7.04
0.9	471	1	1	7.06	0.501	1.41	7.15
0.9	471	2	1	6.79	0.489	1.52	8.09
0.9	471	3	1	6.80	0.497	1.38	7.11
0.9	471	1	2	6.96	0.497	1.44	7.42
0.9	471	2	2	7.05	0.496	1.55	8.02
0.9	471	3	2	6.89	0.504	1.46	7.32
0.9	473	1	1	7.31	0.502	1.43	7.23
0.9	473	2	1	7.30	0.509	1.45	7.13
0.9	473	3	1	7.15	0.501	1.47	7.46
0.9	473	1	2	6.99	0.508	1.41	6.96
0.9	473	2	2	6.81	0.500	1.49	7.59
0.9	473	3	2	7.35	0.506	1.45	7.21

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ 2 ก (ต่อ)

Time	Volt	Part	Trial	Power	Weld Dia	Peel Force	Peel Strength
0.9	476	1	1	7.28	0.500	1.48	7.54
0.9	476	2	1	7.26	0.496	1.52	7.87
0.9	476	3	1	7.38	0.497	1.46	7.53
0.9	476	1	2	7.41	0.496	1.49	7.71
0.9	476	2	2	7.25	0.499	1.54	7.87
0.9	476	3	2	7.18	0.497	1.51	7.78
0.9	479	1	1	7.58	0.506	1.60	7.96
0.9	479	2	1	7.19	0.509	1.58	7.76
0.9	479	3	1	7.51	0.510	1.62	7.93
0.9	479	1	2	7.62	0.512	1.55	7.53
0.9	479	2	2	7.62	0.512	1.59	7.72
0.9	479	3	2	7.37	0.517	1.64	7.81

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ 3 ก ผลการเชื่อมสแตนเลส 304 ความหนา 102 ไมครอน จำนวนสองแผ่นเข้าด้วยกัน
เมื่อระยะเวลาการเชื่อมคงที่ที่ 1.0 มิลลิวินาที

Time	Volt	Part	Trial	Power	Weld Dia	Peel Force	Peel Strength
1.0	468	1	1	8.16	0.510	1.69	8.27
1.0	468	2	1	7.80	0.512	1.58	7.67
1.0	468	3	1	7.90	0.517	1.72	8.19
1.0	468	1	2	7.93	0.517	1.70	8.10
1.0	468	2	2	7.97	0.515	1.62	7.78
1.0	468	3	2	8.03	0.512	1.65	8.01
1.0	471	1	1	8.09	0.528	1.37	6.26
1.0	471	2	1	8.16	0.518	1.39	6.60
1.0	471	3	1	8.22	0.521	1.44	6.75
1.0	471	1	2	8.15	0.519	1.36	6.43
1.0	471	2	2	8.24	0.523	1.41	6.56
1.0	471	3	2	8.16	0.526	1.37	6.30
1.0	473	1	1	8.59	0.521	1.46	6.85
1.0	473	2	1	8.54	0.521	1.50	7.04
1.0	473	3	1	8.50	0.517	1.49	7.10
1.0	473	1	2	8.45	0.519	1.53	7.23
1.0	473	2	2	8.64	0.541	1.48	6.44
1.0	473	3	2	8.69	0.526	1.51	6.95

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ 3 ก (ต่อ)

Time	Volt	Part	Trial	Power	Weld Dia	Peel Force	Peel Strength
1.0	476	1	1	8.55	0.524	1.62	7.51
1.0	476	2	1	8.74	0.499	1.71	8.74
1.0	476	3	1	8.43	0.513	1.67	8.08
1.0	476	1	2	8.51	0.516	1.64	7.84
1.0	476	2	2	8.33	0.513	1.73	8.37
1.0	476	3	2	8.48	0.510	1.66	8.13
1.0	479	1	1	9.14	0.512	1.75	8.50
1.0	479	2	1	9.23	0.507	1.72	8.52
1.0	479	3	1	9.02	0.521	1.76	8.26
1.0	479	1	2	9.10	0.506	1.81	9.00
1.0	479	2	2	9.33	0.509	1.74	8.55
1.0	479	3	2	9.05	0.521	1.76	8.26

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ 4 ก ผลการเชื่อมสแตนเลส 304 ความหนา 102 ไมครอน จำนวนสองแผ่นเข้าด้วยกัน
เมื่อระยะเวลาการเชื่อมคงที่ที่ 1.1 มิลลิวินาที

Time	Volt	Part	Trial	Power	Weld Dia	Peel Force	Peel Strength
1.1	468	1	1	8.50	0.527	1.61	7.38
1.1	468	2	1	8.63	0.519	1.67	7.89
1.1	468	3	1	8.61	0.528	1.58	7.22
1.1	468	1	2	8.49	0.534	1.72	7.68
1.1	468	2	2	8.67	0.530	1.64	7.43
1.1	468	3	2	8.65	0.540	1.66	7.25
1.1	471	1	1	9.97	0.520	1.65	7.77
1.1	471	2	1	9.96	0.519	1.74	8.22
1.1	471	3	1	9.85	0.519	1.68	7.94
1.1	471	1	2	9.70	0.526	1.71	7.87
1.1	471	2	2	9.89	0.528	1.69	7.72
1.1	471	3	2	9.65	0.524	1.67	7.74
1.1	473	1	1	9.98	0.537	1.65	7.29
1.1	473	2	1	10.06	0.532	1.74	7.83
1.1	473	3	1	10.11	0.532	1.68	7.56
1.1	473	1	2	10.28	0.522	1.71	7.99
1.1	473	2	2	10.03	0.538	1.69	7.43
1.1	473	3	2	9.95	0.530	1.67	7.57

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ 4 ก (ต่อ)

Time	Volt	Part	Trial	Power	Weld Dia	Peel Force	Peel Strength
1.1	476	1	1	9.91	0.528	1.82	8.31
1.1	476	2	1	10.01	0.509	1.89	9.29
1.1	476	3	1	10.22	0.512	1.85	8.99
1.1	476	1	2	10.31	0.513	1.79	8.66
1.1	476	2	2	10.23	0.519	1.84	8.70
1.1	476	3	2	10.18	0.524	1.86	8.63
1.1	479	1	1	10.22	0.526	1.81	8.33
1.1	479	2	1	10.30	0.532	1.68	7.56
1.1	479	3	1	10.38	0.522	1.74	8.13
1.1	479	1	2	10.14	0.530	1.69	7.66
1.1	479	2	2	10.38	0.535	1.74	7.74
1.1	479	3	2	10.65	0.533	1.71	7.66

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ 5 ก ผลการเชื่อมสแตนเลส 304 ความหนา 102 ไมครอน จำนวนสองแผ่นเข้าด้วยกัน
เมื่อระยะเวลาการเชื่อมคงที่ที่ 1.2 มิลลิวินาที

Time	Volt	Part	Trial	Power	Weld Dia	Peel Force	Peel Strength
1.2	468	1	1	10.02	0.536	1.81	8.02
1.2	468	2	1	9.96	0.533	1.68	7.53
1.2	468	3	1	9.97	0.530	1.74	7.89
1.2	468	1	2	10.03	0.544	1.69	7.27
1.2	468	2	2	10.06	0.538	1.74	7.65
1.2	468	3	2	10.03	0.535	1.71	7.61
1.2	471	1	1	10.21	0.527	1.57	7.20
1.2	471	2	1	10.18	0.532	1.64	7.38
1.2	471	3	1	10.15	0.538	1.67	7.35
1.2	471	1	2	10.23	0.530	1.59	7.21
1.2	471	2	2	10.17	0.529	1.62	7.37
1.2	471	3	2	10.20	0.550	1.65	6.94
1.2	473	1	1	10.32	0.549	1.63	6.89
1.2	473	2	1	10.36	0.518	1.66	7.88
1.2	473	3	1	10.45	0.528	1.71	7.81
1.2	473	1	2	10.34	0.520	1.65	7.77
1.2	473	2	2	10.38	0.528	1.70	7.76
1.2	473	3	2	10.36	0.530	1.64	7.43

ภาคผนวก ก (ต่อ)

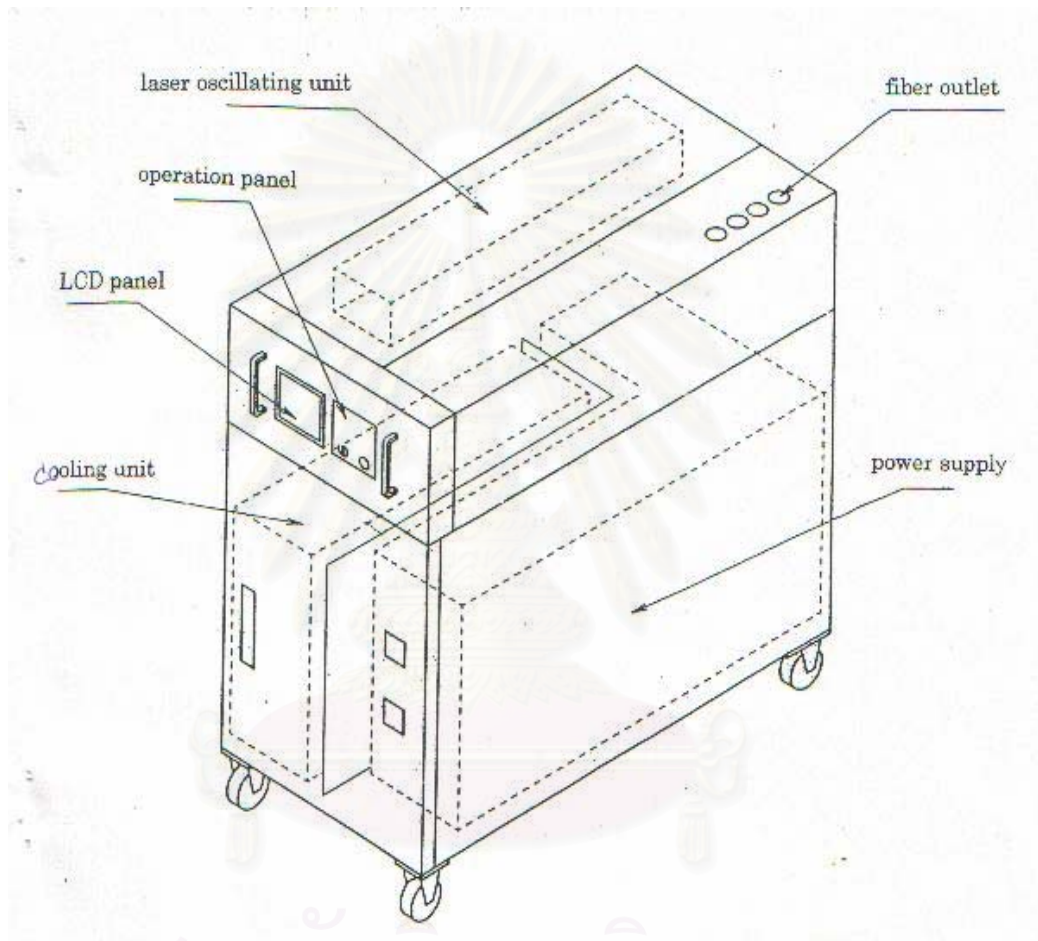
ตารางที่ 5 ก (ต่อ)

Time	Volt	Part	Trial	Power	Weld Dia	Peel Force	Peel Strength
1.2	476	1	1	10.40	0.539	1.63	7.14
1.2	476	2	1	10.93	0.547	1.66	7.06
1.2	476	3	1	10.62	0.539	1.71	7.49
1.2	476	1	2	10.52	0.544	1.65	7.10
1.2	476	2	2	10.57	0.547	1.70	7.23
1.2	476	3	2	10.67	0.537	1.64	7.24
1.2	479	1	1	11.45	0.551	1.60	6.71
1.2	479	2	1	11.30	0.544	1.63	7.01
1.2	479	3	1	11.61	0.534	1.67	7.46
1.2	479	1	2	11.64	0.535	1.64	7.30
1.2	479	2	2	11.77	0.538	1.62	7.13
1.2	479	3	2	11.32	0.550	1.64	6.90

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

เครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยและที่เกี่ยวข้อง



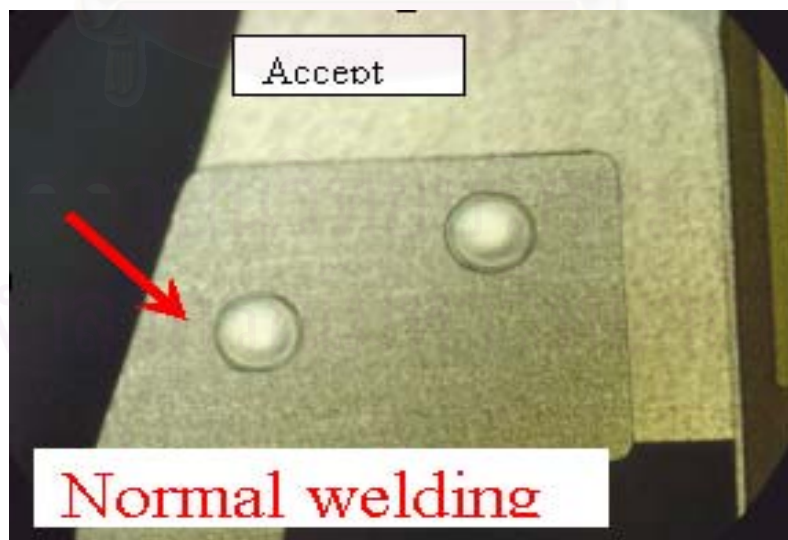
รูปที่ 1ข แผนภาพของเครื่องเชื่อมเลเซอร์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข (ต่อ)

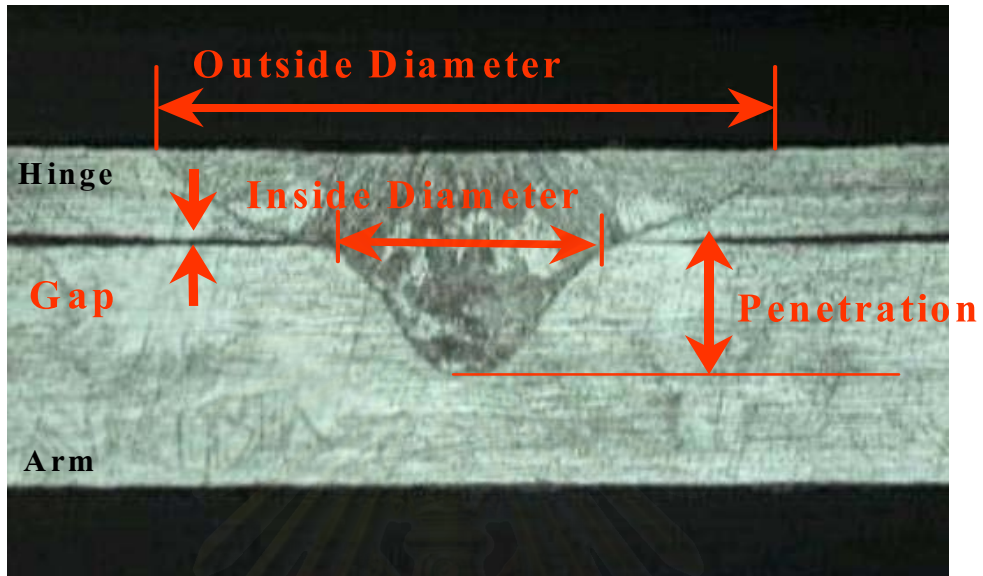


รูปที่ 2ข แสดงการปฏิบัติงานกับเครื่องเชื่อมแยกเลเซอร์

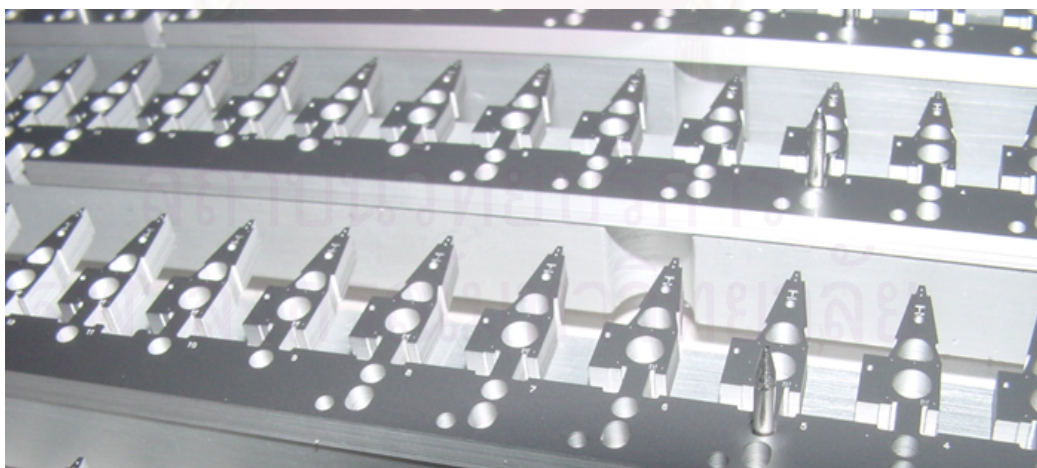


รูปที่ 3ข แสดงลักษณะของรอยเชื่อมปกติ

ภาคผนวก ข (ต่อ)

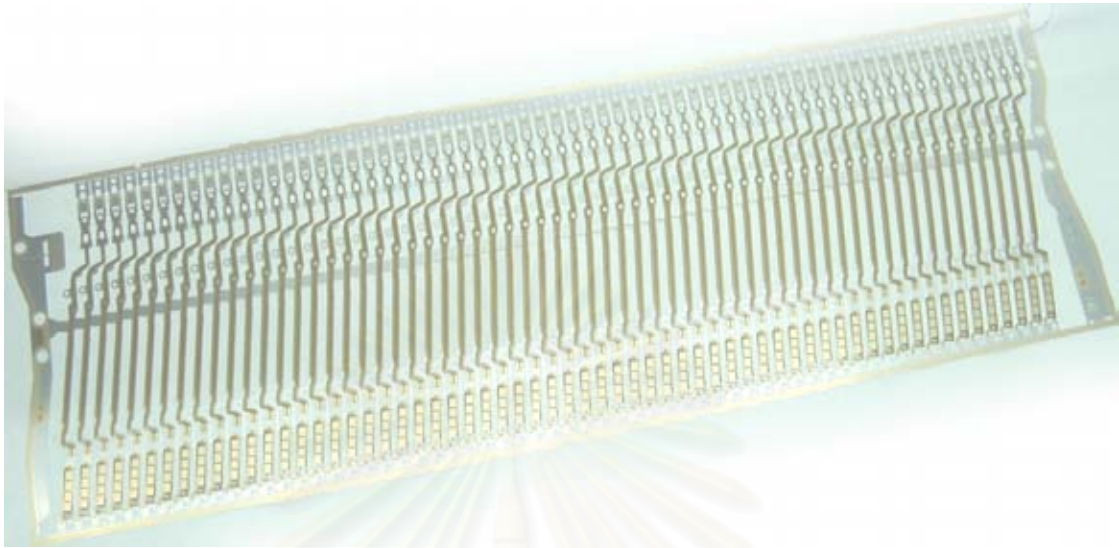


รูปที่ 4ข แสดงภาคตัดขวางของรอยเชื่อมที่กำลังขยาย 500 เท่า

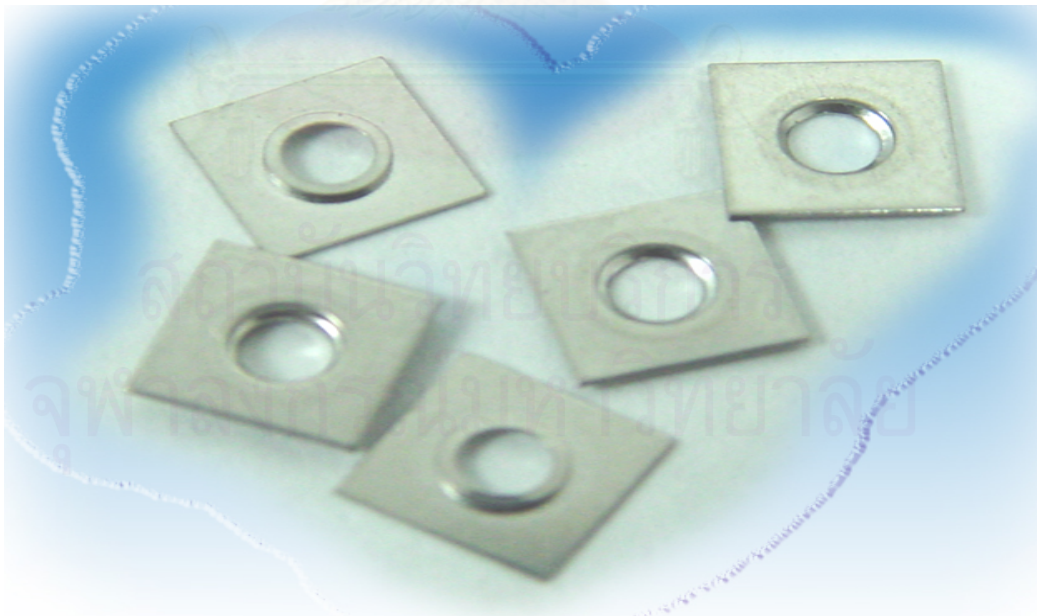


รูปที่ 5ข แสดงสแตนเลส 304 ความหนา 1 มม. ที่ใช้ในการผลิตแขนจับหัวอ่าน เป็นส่วนที่เรียกว่า Arm หรือ Load Beam

ภาคผนวก ข (ต่อ)



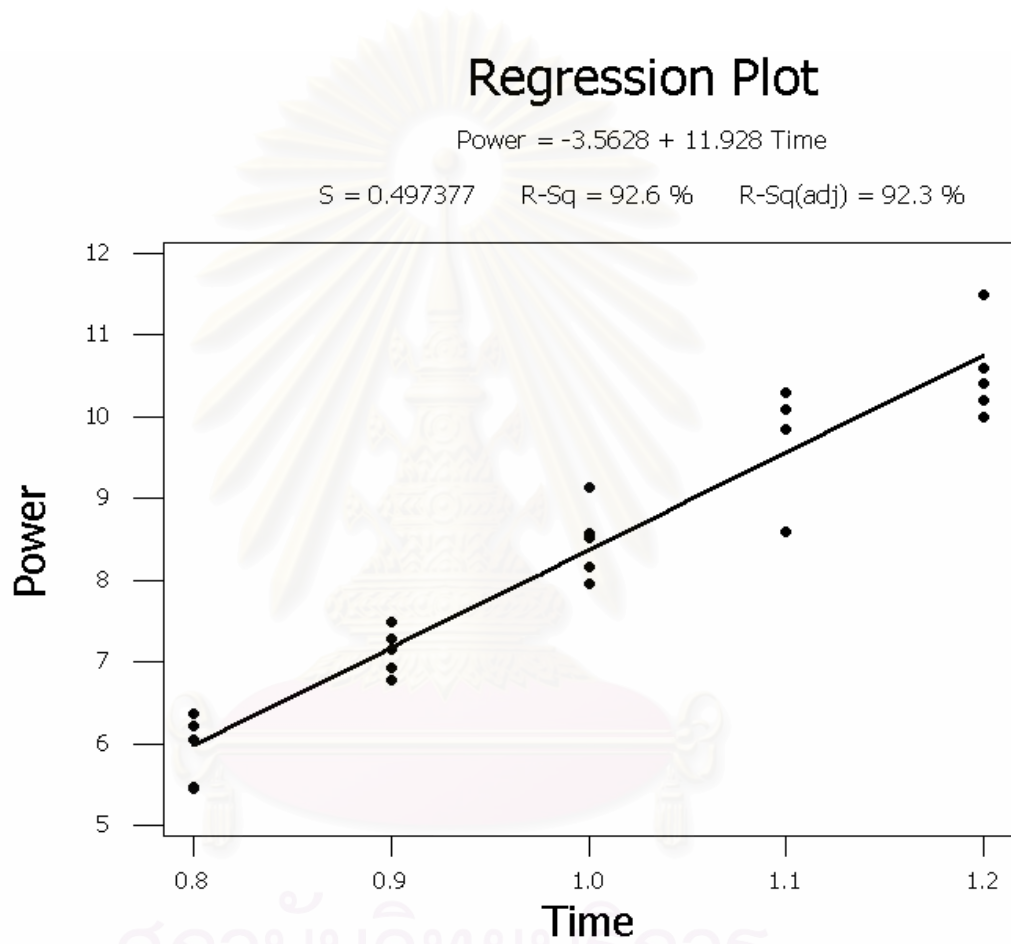
รูปที่ 6ข แสดง Trace Laminated Gimbal ที่ใช้ในการผลิตแขนจับหัวอ่าน



รูปที่ 7ข แสดง Plate ที่ใช้ในการผลิตแขนจับหัวอ่าน

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติจาก Minitab



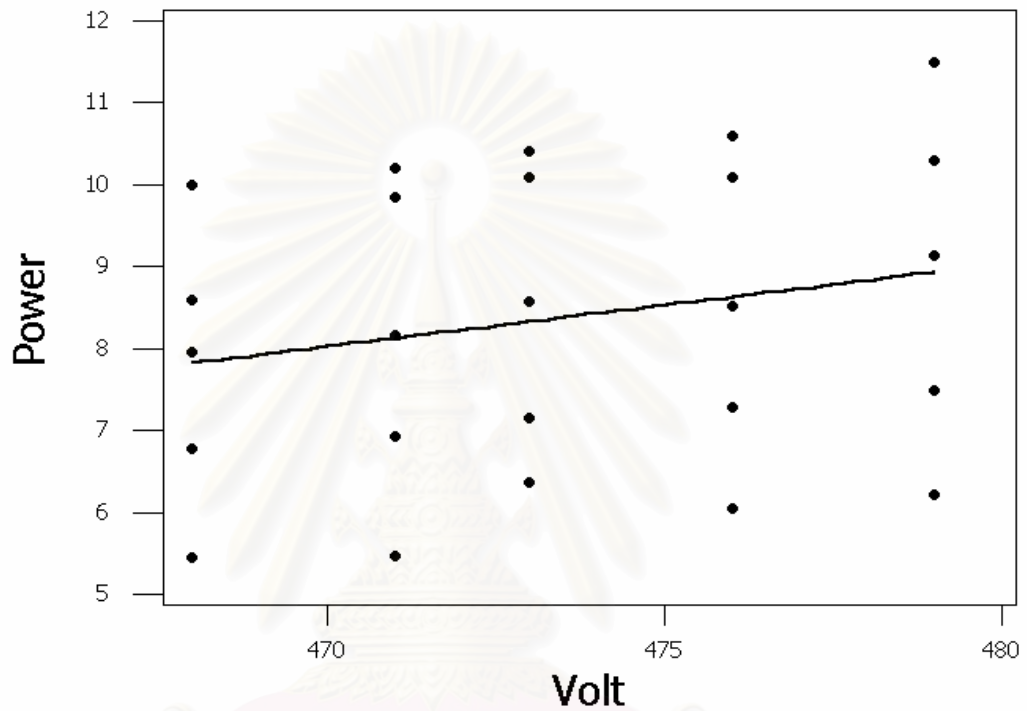
รูปที่ 1 ค แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเลเซอร์และระยะเวลาการเชื่อม

ภาคผนวก ค (ต่อ)

Regression Plot

$$\text{Power} = -39.1662 + 0.100404 \text{ Volt}$$

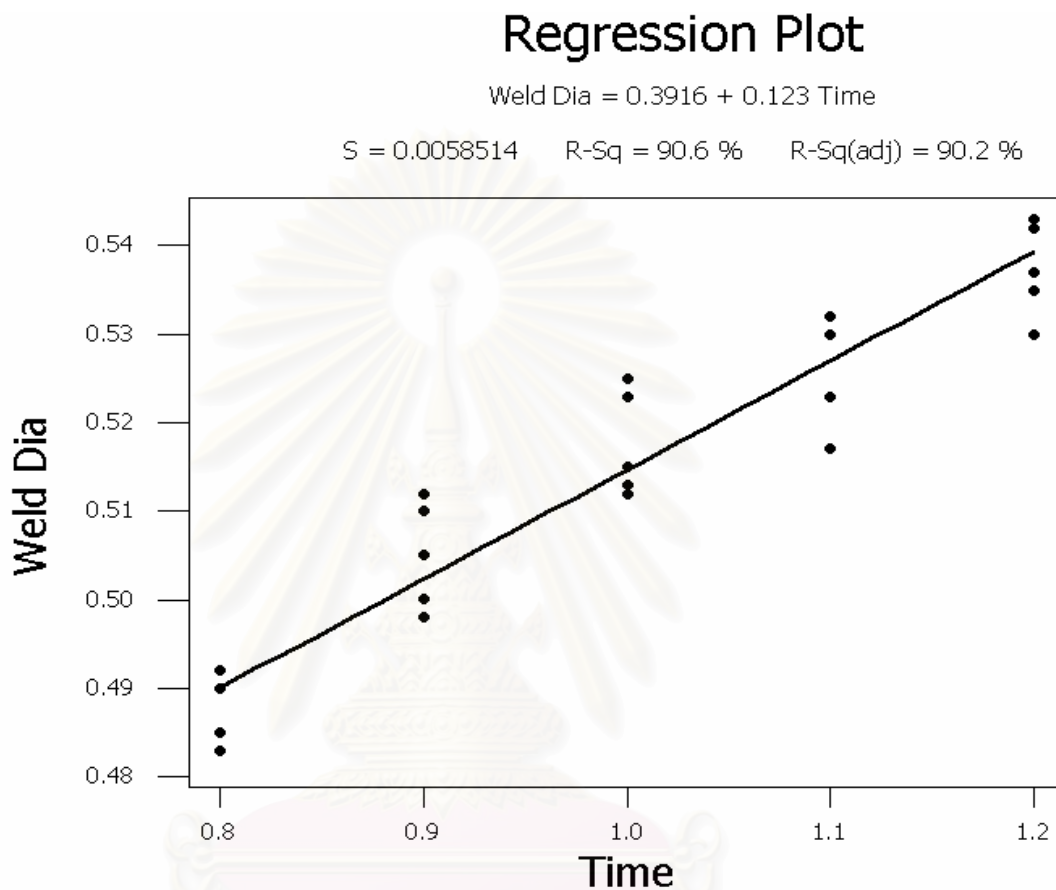
$$S = 1.78324 \quad R\text{-Sq} = 4.8 \% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 0.7 \%$$



รูปที่ 2 ค แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเลเซอร์และแรงดันไฟฟ้า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

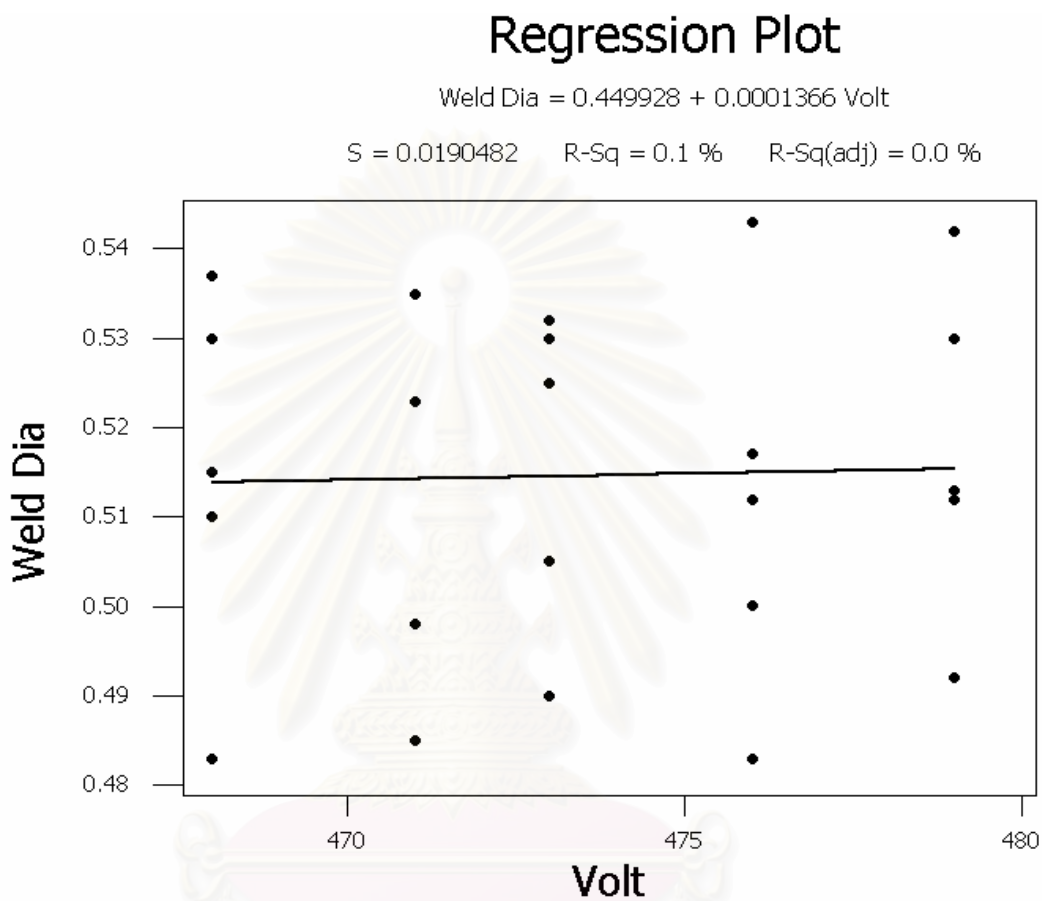
ภาคผนวก ค (ต่อ)



รูปที่ 3 ค แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรอยเชื่อมและระยะเวลาการเชื่อม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

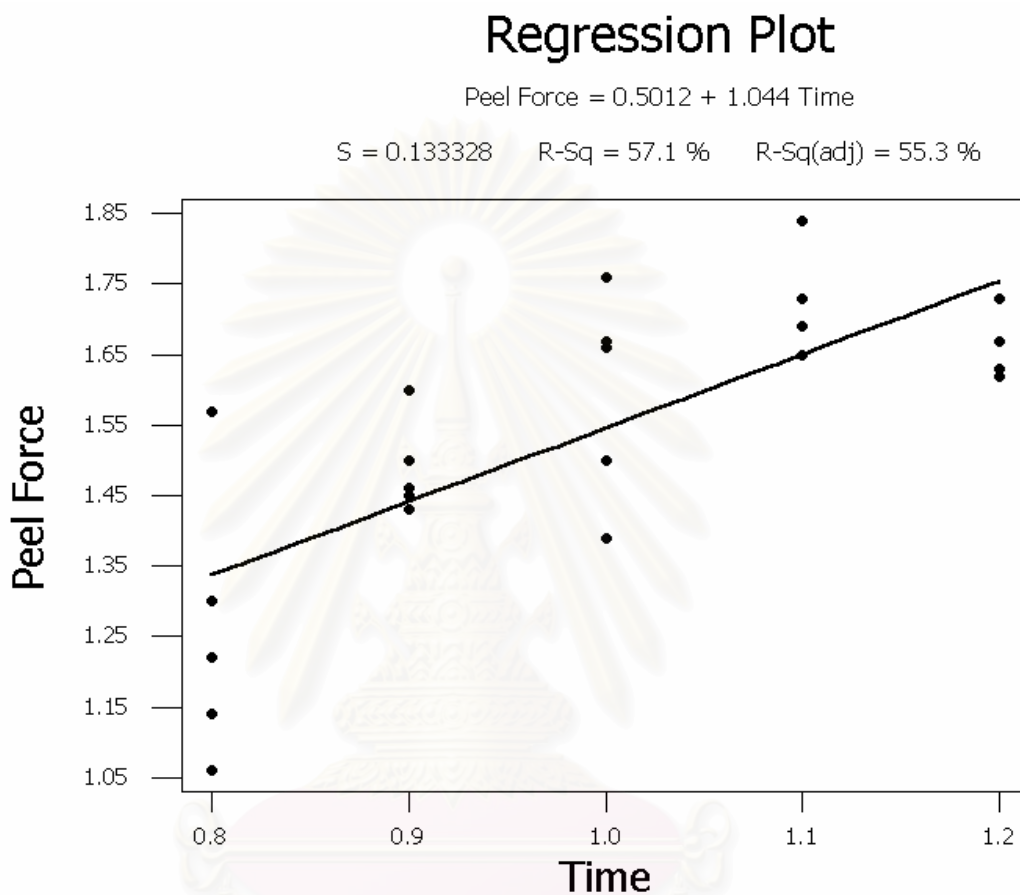
ภาคผนวก ค (ต่อ)



รูปที่ 4 ค แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรอยเชื่อมและแรงดันไฟฟ้า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

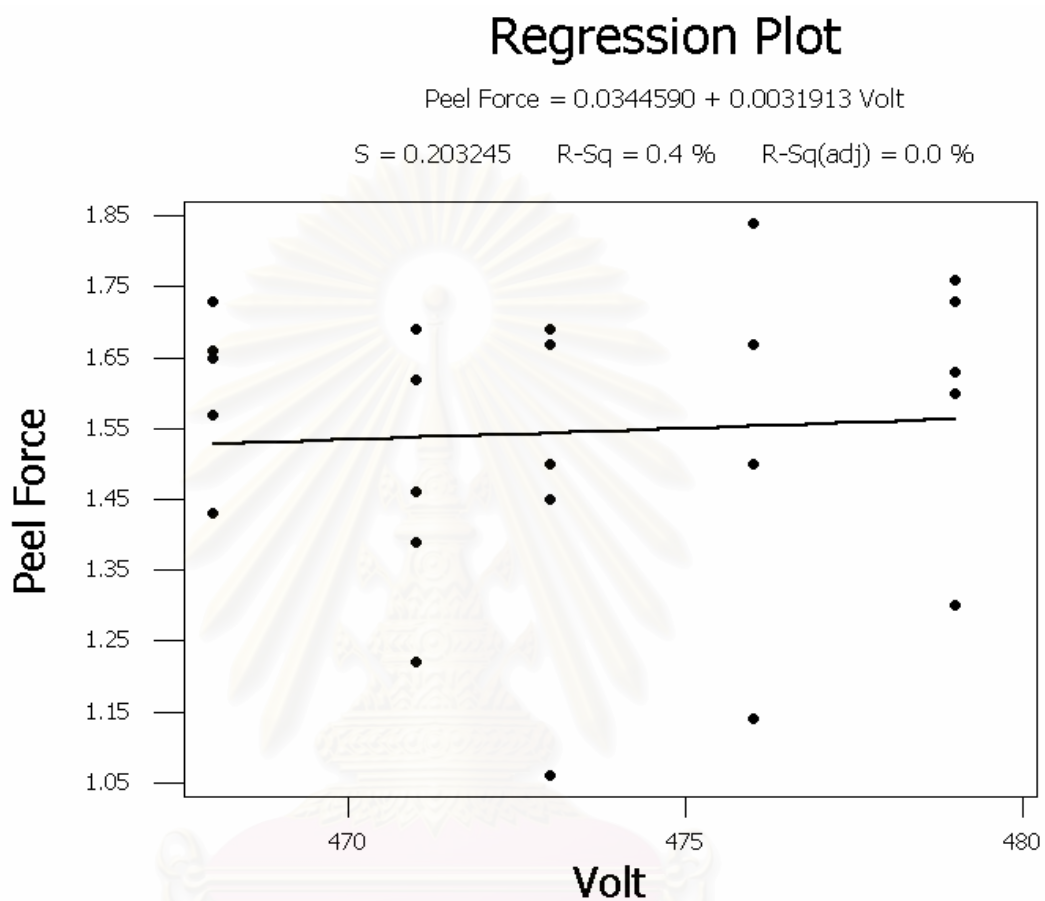
ภาคผนวก ค (ต่อ)



รูปที่ 5 ค แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉีกและระยะเวลาการเชื่อม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

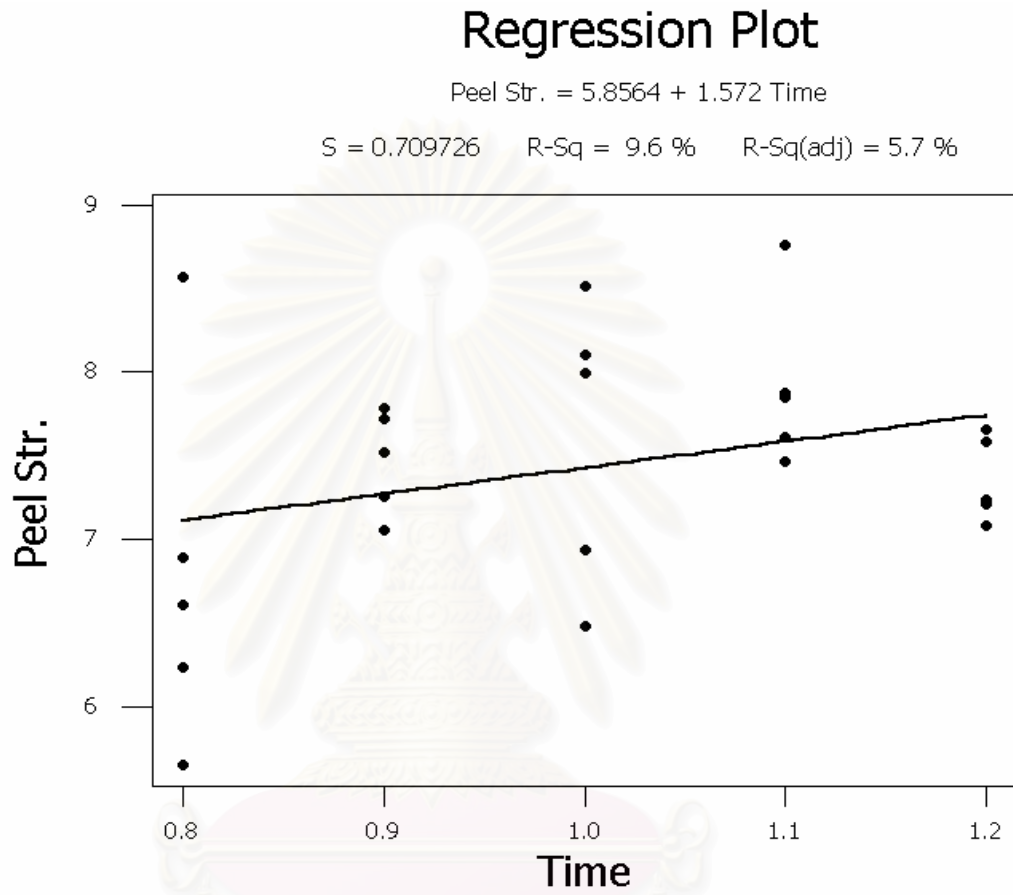
ภาคผนวก ค (ต่อ)



รูปที่ 6 ค แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉีกและแรงดันไฟฟ้า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

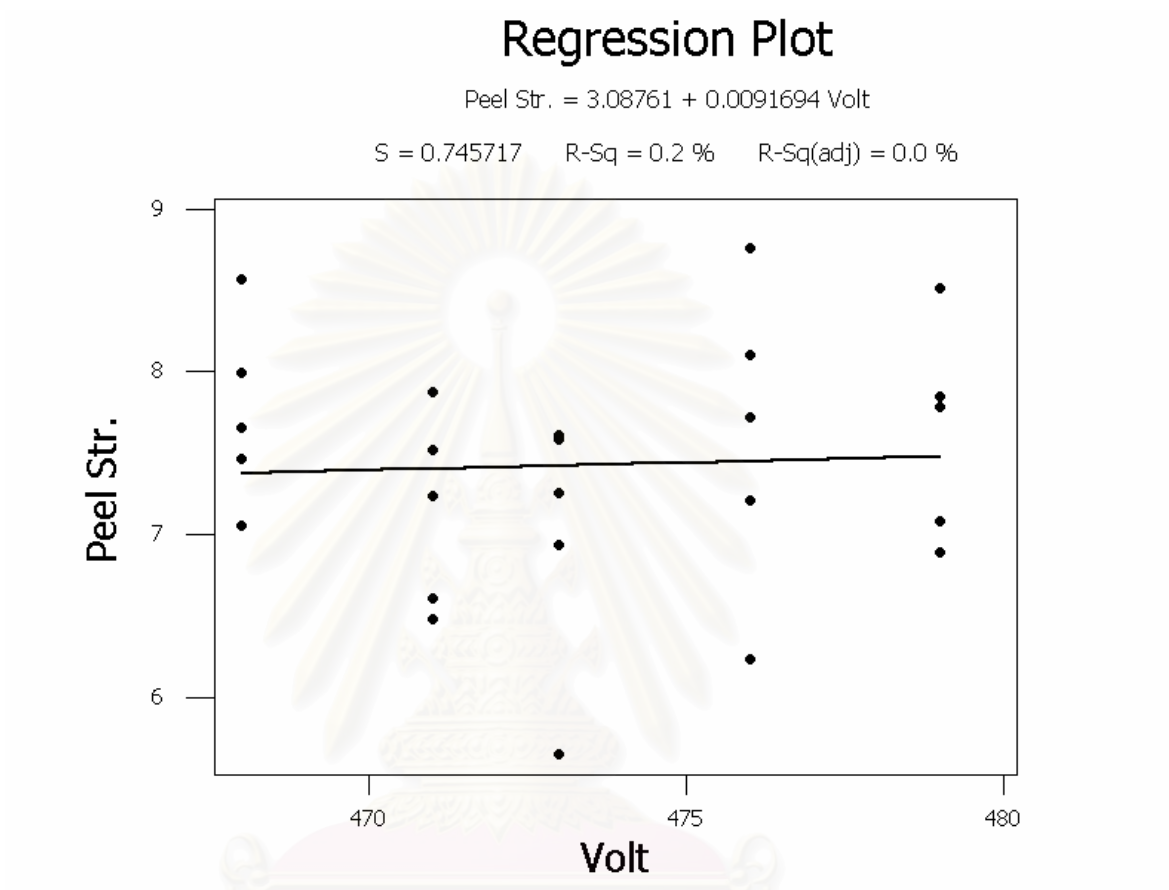
ภาคผนวก ค (ต่อ)



รูปที่ 7 ค แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของรอยเชื่อมและระยะเวลาการเชื่อม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

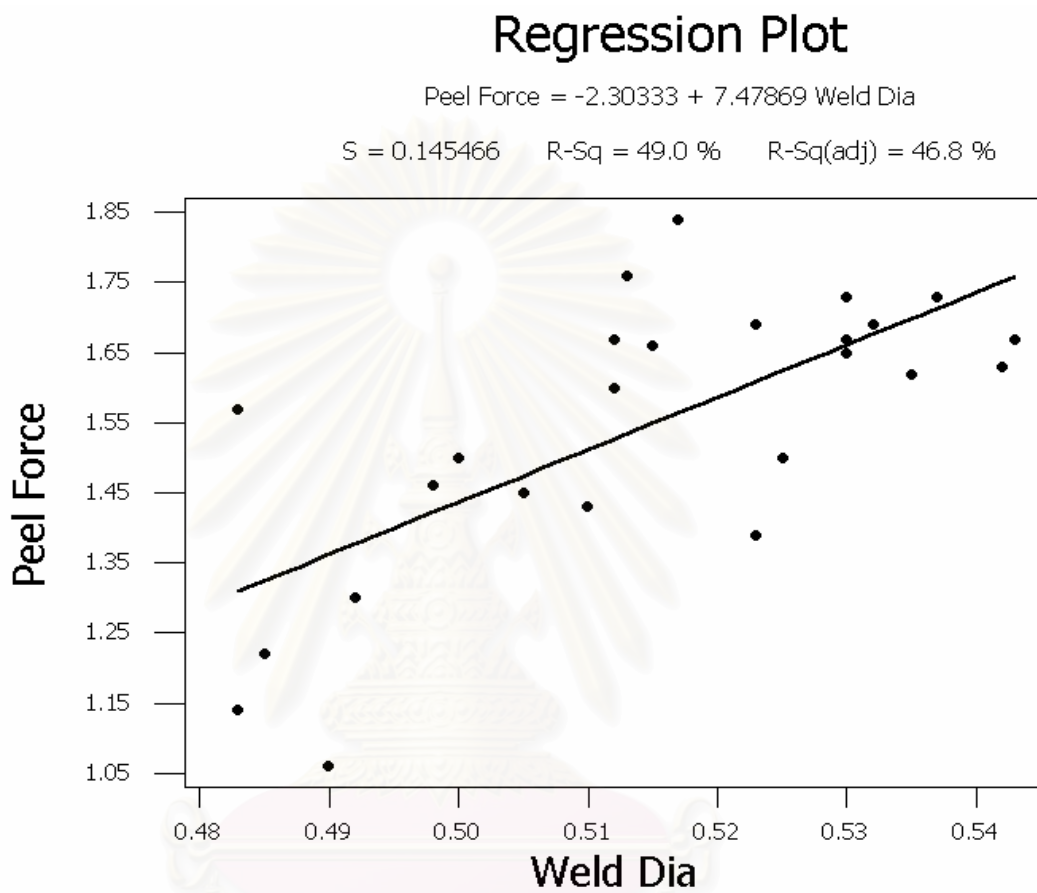
ภาคผนวก ค (ต่อ)



รูปที่ 8 ค แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของรอยเชื่อมและแรงดันไฟฟ้า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

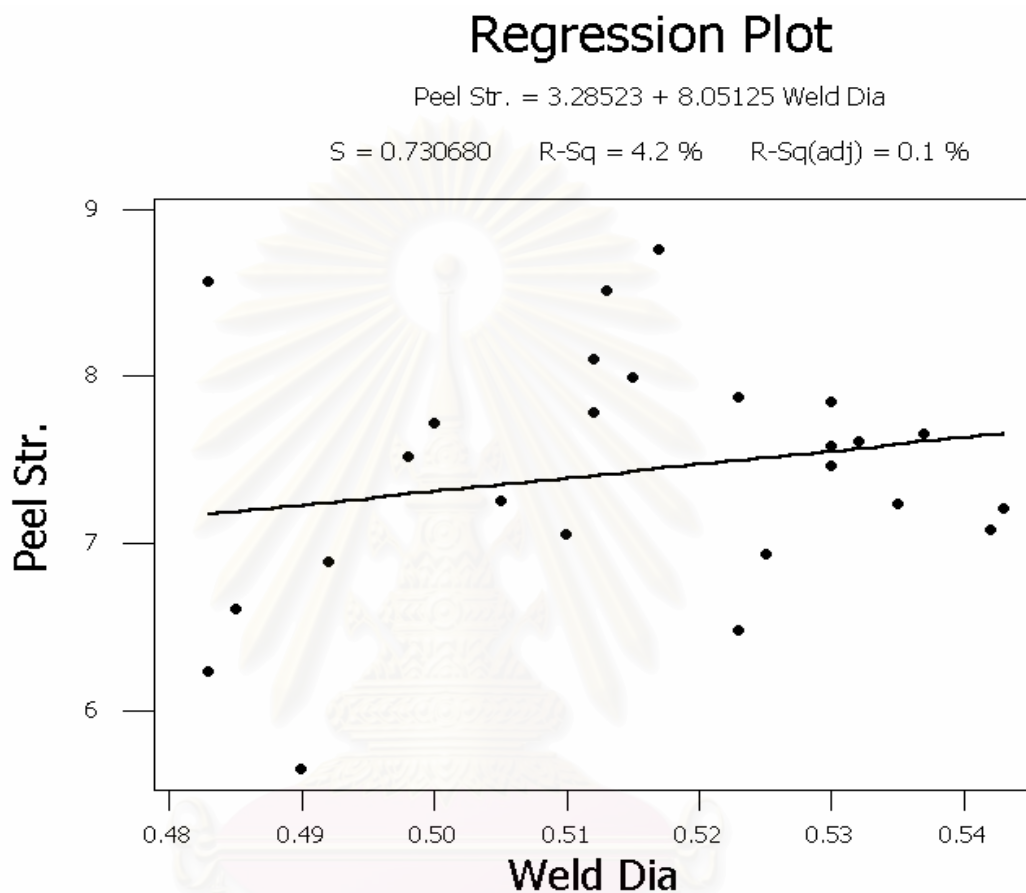
ภาคผนวก ค (ต่อ)



รูปที่ 9 ค แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉีกและขนาดของรอยเชื่อม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

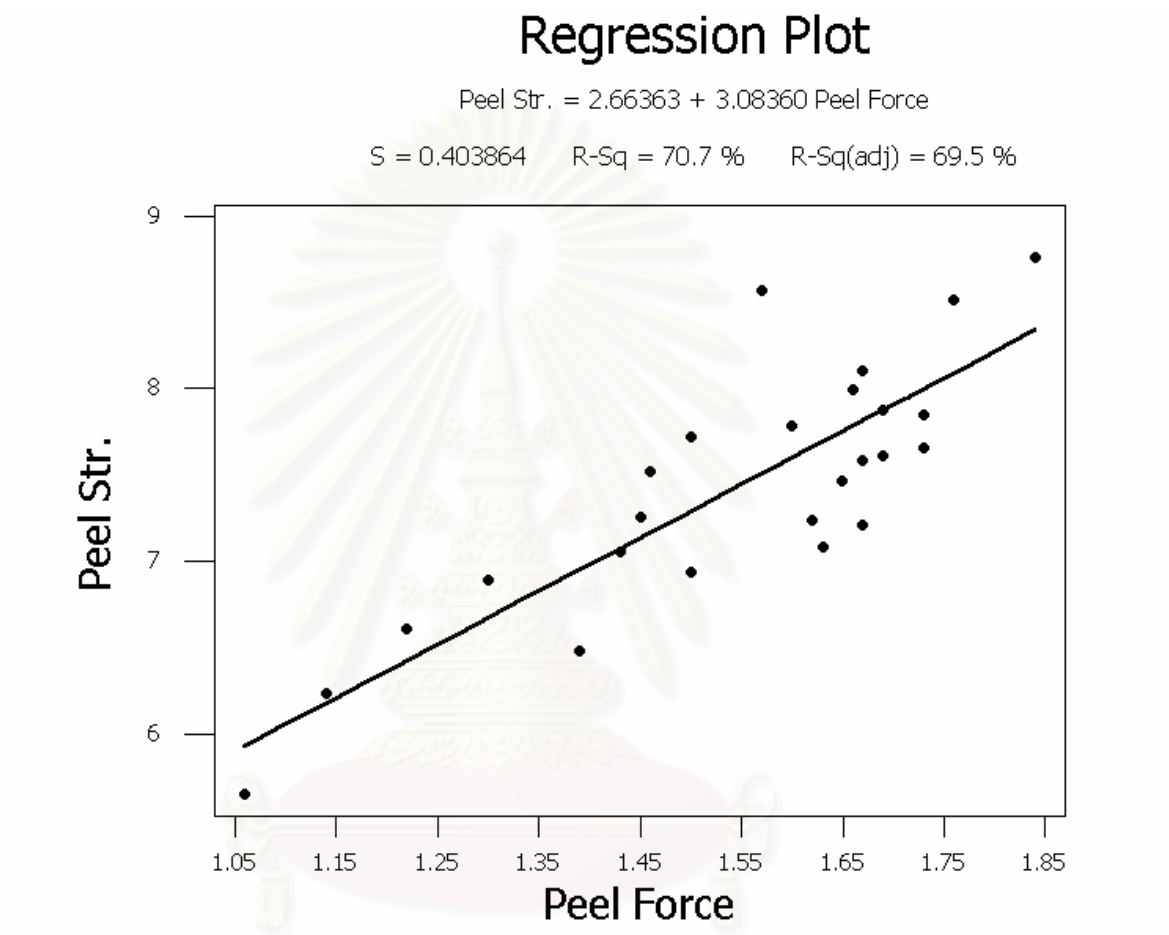
ภาคผนวก ค (ต่อ)



รูปที่ 10 ค แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงและขนาดของรอยเชื่อม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

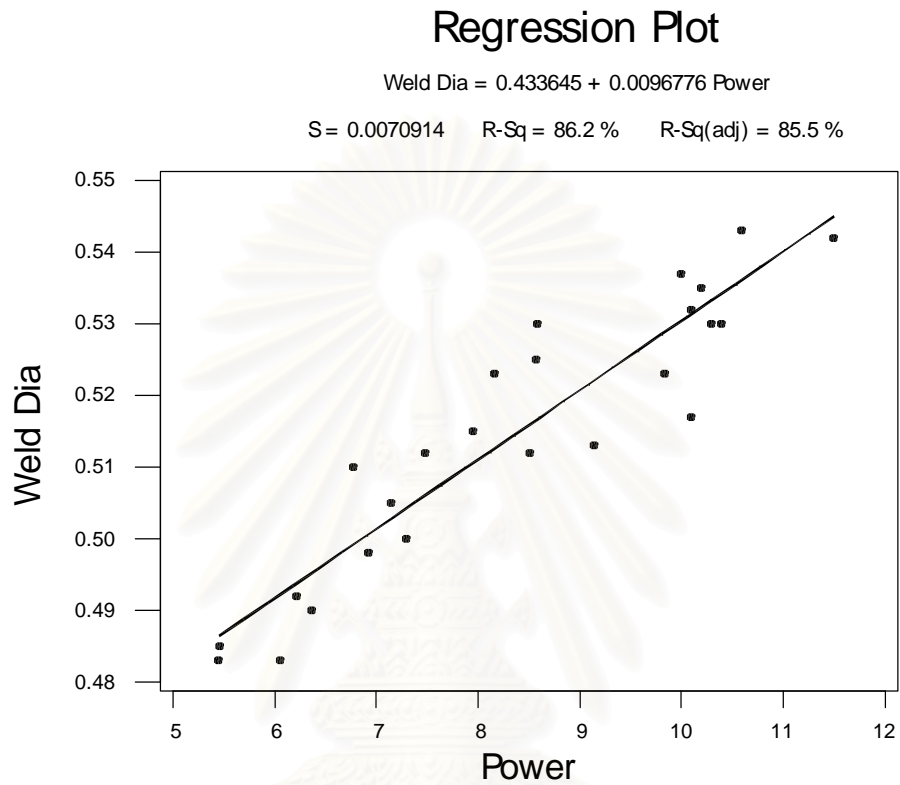
ภาคผนวก ค (ต่อ)



รูปที่ 11 ค แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของรอยเชื่อมและแรงฉีก

สถาบันวิจัยปฏิบัติการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค (ต่อ)



รูปที่ 12 ค แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรอยเชื่อมและกำลังเลเซอร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค (ต่อ)

ตารางที่ 1ค การวิเคราะห์ความแปรปรวนของขนาดรอยเชื่อม เมื่อระยะเวลาการเชื่อมคงที่ที่ 0.8 มิลลิวินาที

Analysis of Variance for Weld Diameter					
Source	DF	SS	MS	F	P
Volt	4	0.0002713	0.0000678	2.08	0.113
Error	25	0.0008147	0.0000326		
Total	29	0.0010860			

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev					
Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----+-----	
468	6	0.48317	0.00417	(-----*-----)	
471	6	0.48533	0.00622	(-----*-----)	
473	6	0.48783	0.00488	(-----*-----)	
476	6	0.48283	0.00854	(-----*-----)	
479	6	0.49083	0.00319	(-----*-----)	
Pooled StDev = 0.00571				0.4800	0.4850 0.4900 0.4950

ตารางที่ 2ค การวิเคราะห์ความแปรปรวนของขนาดรอยเชื่อม เมื่อระยะเวลาการเชื่อมคงที่ที่ 0.9 มิลลิวินาที

Analysis of Variance for Weld Diameter					
Source	DF	SS	MS	F	P
Volt	4	0.0008818	0.0002205	17.68	0.000
Error	25	0.0003117	0.0000125		
Total	29	0.0011935			

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev					
Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----+-----	
468	6	0.50750	0.00235	(-----*-----)	
471	6	0.49733	0.00509	(-----*-----)	
473	6	0.50433	0.00383	(-----*-----)	
476	6	0.49750	0.00164	(-----*-----)	
479	6	0.51100	0.00369	(-----*-----)	
Pooled StDev = 0.00353				0.4980	0.5040 0.5100

ภาคผนวก ค (ต่อ)

ตารางที่ 3ค การวิเคราะห์ความแปรปรวนของขนาดรอยเชื่อม เมื่อระยะเวลาการเชื่อมคงที่ที่ 1.0 มิลลิวินาที

Analysis of Variance for Weld Diameter

Source	DF	SS	MS	F	P
Volt	4	0.0007835	0.0001959	4.58	0.006
Error	25	0.0010680	0.0000427		
Total	29	0.0018515			

Individual 95% CIs For Mean
Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	CI Lower	CI Upper
468	6	0.51383	0.00293	0.50797	0.51969
471	6	0.52250	0.00394	0.51462	0.53038
473	6	0.52417	0.00877	0.50640	0.54194
476	6	0.51250	0.00817	0.50433	0.52067
479	6	0.51267	0.00677	0.50590	0.51944

Pooled StDev = 0.00654

ตารางที่ 4ค การวิเคราะห์ความแปรปรวนของขนาดรอยเชื่อม เมื่อระยะเวลาการเชื่อมคงที่ที่ 1.1 มิลลิวินาที

Analysis of Variance for Weld Diameter

Source	DF	SS	MS	F	P
Volt	4	0.0008635	0.0002159	6.10	0.001
Error	25	0.0008843	0.0000354		
Total	29	0.0017479			

Individual 95% CIs For Mean
Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	CI Lower	CI Upper
468	6	0.52967	0.00706	0.52261	0.53673
471	6	0.52267	0.00388	0.51879	0.52655
473	6	0.53183	0.00574	0.52609	0.53757
476	6	0.51750	0.00745	0.51005	0.52495
479	6	0.52967	0.00484	0.52483	0.53451

Pooled StDev = 0.00595

ภาคผนวก ค (ต่อ)

ตารางที่ 5ค การวิเคราะห์ความแปรปรวนของขนาดรอยเชื่อม เมื่อระยะเวลาการเชื่อมคงที่ที่ 1.2 มิลลิวินาที

Analysis of Variance for Weld Diameter

Source	DF	SS	MS	F	P
Volt	4	0.0007557	0.0001889	3.24	0.029
Error	25	0.0014590	0.0000584		
Total	29	0.0022147			

Individual 95% CIs For Mean
Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev		
468	6	0.53600	0.00477	-----+-----+-----+-----		
471	6	0.53433	0.00855	(-----*-----)		
473	6	0.52883	0.01100	(-----*-----)		
476	6	0.54217	0.00440	(-----*-----)		
479	6	0.54200	0.00746	(-----*-----)		
Pooled StDev = 0.00764				0.5280	0.5360	0.5440

ตารางที่ 6ค การวิเคราะห์ความแปรปรวนของขนาดรอยเชื่อม เมื่อระยะเวลาการเชื่อมคงที่ที่ 0.8, 0.9, 1.0, 1.1 และ 1.2 มิลลิวินาที

Analysis of Variance for Weld Dia

Source	DF	SS	MS	F	P
Volt	4	0.000813	0.000203	0.54	0.705
Error	145	0.054308	0.000375		
Total	149	0.055121			

Individual 95% CIs For Mean
Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev			
468	30	0.51403	0.01935	-----+-----+-----+-----			
471	30	0.51243	0.01923	(-----*-----)			
473	30	0.51540	0.01839	(-----*-----)			
476	30	0.51050	0.02119	(-----*-----)			
479	30	0.51723	0.01847	(-----*-----)			
Pooled StDev = 0.01935				0.5040	0.5100	0.5160	0.5220

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนิพนธ์ บัวแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 16 มกราคม พ.ศ. 2514 ที่จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ผู้เขียนได้เข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (ภาคนอกเวลาราชการ) สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2543 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้จัดการฝ่ายวิศวกรรมการผลิต บริษัท เคอาร์ พีริซัน จำกัด (มหาชน)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย