

การศึกษากระบวนการทำสัญลักษณ์ด้วยเลเซอร์



นางสาวมณีวรรณ ศุภธรรมวิทย์

นางสาวมัลลิกา วงษ์ขำ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2543

เลขทมิ.....

เลขทะเบียน 40210

วัน, เดือน, ปี 20 ส.ค. 2544

b. 1109804X
i.

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Study of Laser Marking Process



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Bachelor of Science
Department of Applied Physics
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษากระบวนการการทำสัญลักษณ์ด้วยเลเซอร์
โดย นางสาวมณีวรรณ ศุภธรรมวิทย์
 นางสาวมัลลิกา วงษ์ขำ
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา อ.วิษณุ เพชรภา


ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้นับโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต



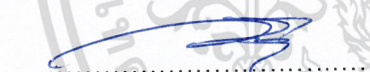
หัวหน้าภาควิชา

(ผศ.วิชาญ เตชิตธีระ)


คณะกรรมการโครงการพิเศษ


.....
(ผศ.ดร.นราวุฒิ เกาสัดดา)

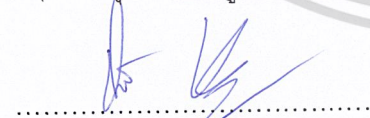
ประธานกรรมการ


.....
(อ.วิษณุ เพชรภา)

กรรมการ


.....
(รศ.สุวรรณ คู่สำราญ)

กรรมการ


.....
(ผศ.ดร.จิติ หนูแก้ว)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ : การศึกษากระบวนการทำสัญลักษณ์ด้วยเลเซอร์
 นักศึกษาผู้รับผิดชอบโครงการ : นางสาวมณีวรรณ ศุภธรรมวิทย์
 นางสาวมัลลิกา วงษ์ขำ
 อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ : อาจารย์วิษณุ เพชรภา
 ภาควิชา : ฟิสิกส์ประยุกต์
 ปีการศึกษา : 2543



โครงการพิเศษนี้ศึกษากระบวนการทำสัญลักษณ์ด้วยเลเซอร์ โดยการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของสมการการนำความร้อนภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state) ตามเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดขึ้น การแก้สมการดังกล่าวทำได้โดยการแปลงแบบแฮงก์เคิล (Hankel Transform) โดยที่คำตอบของสมการเป็นค่าอุณหภูมิของโลหะซึ่งอยู่ในรูปของรัศมีตามแนวแกนรัศมีของลำแสง ค่ากำลังแสงของเลเซอร์ และค่าคงที่ต่าง ๆ ที่เป็นสมบัติเฉพาะตัวของโลหะ เช่น ค่าการดูดกลืนความร้อน ค่าการนำความร้อน ซึ่งได้ทำการทดลองโดยการทำสัญลักษณ์บนโลหะ ได้แก่ เหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง เลเซอร์ที่ใช้คือ นีโอดีเมียมแยกละเซอร์ (Nd:YAG Laser) และการพัฒนาอุปกรณ์ขั้นต้นในการทำสัญลักษณ์ด้วยเครื่องกวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย (Scanning x-y) ผลที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับทฤษฎีและทำการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title : A Study of Laser Marking Process
 Name : Miss Maneewan Supathamavit
 Miss Mullika Wongkham
 Special Project Advisor : Mr. Wisanu Pecharapa
 Department : Applied Physics
 Academic Year : 2000



Abstract

This special project is to study laser marking. Mathematical model of heat conduction process under steady state condition on metal is developed with given boundary conditions. Hankel transform equation is required to solve the governing equation. The result is the temperature distribution of substrate in term of radial distance, radius of laser beam, power of laser and other constants of specified metal such as heat absorption, heat conductivity and heat diffusivity. The experiment of marking process is set using a Nd:YAG laser heating on various metals such as Fe , Al and Cu. The experimental data are compared with theoretical values. A x-y scanning system which is one of laser marking apparatus is also developed. The marked configuration can be designed and controlled by computer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ประสบกับปัญหาและอุปสรรคต่างๆมากมาย และการแก้ไขปัญหาเหล่านี้ จะไม่สามารถแก้ไขปัญหาและอุปสรรคดังกล่าวได้ ถ้าหากขาดบุคคลเหล่านี้ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงค่ะ

1. อาจารย์วิษณุ เพชรภา ที่ให้ความรู้, คำแนะนำ และแนวทางแก้ปัญหาต่างๆ เพื่อให้การทำโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี
2. รศ.ดร.พิเชษฐ ลิ่มสุวรรณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในความอนุเคราะห์ให้ยืมใช้เลเซอร์ในการทำการทดลอง
3. รศ.สุวรรณ คูสำราญ ที่ได้ให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาต่างๆ
4. ผศ.ดร.วราวุฒิ เกาลัดดา ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้กล้องดิจิทัล, เครื่องกวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย และเครื่องสแกนรูปภาพ
5. ผศ.อนุพงศ์ สรงประภา ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องสแกนรูปภาพและเวอร์เนียร์
6. ผศ.วิชาญ เตชิตธีระ ที่ได้ให้กำลังใจมาโดยตลอด
7. อ.สุรชาติ กมลดิลก ที่ช่วยในการติดต่อขอใช้อุปกรณ์ในการทดลองการทำสัญลักษณ์ด้วยเลเซอร์ และคำแนะนำต่างๆ
8. พี่อัศวิน เรณูสวัสดิ์ ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำการทดลอง และข้อเสนอแนะที่มีให้มาโดยตลอด
9. อ.บัณฑิต ดำรงค์ศักดิ์ และ MTECH ที่ให้อุปกรณ์ในการวัดความกว้างของรูที่ได้ทำสัญลักษณ์ลงบนวัสดุ และคำแนะนำต่างๆมากมาย
10. พี่รัชชัย คำศรี ที่ได้คำแนะนำในการใช้โปรแกรม matlab
11. เบญจพล ต้นฐู่ เพื่อนที่แสนดีในการให้ความช่วยเหลือต่างๆมากมาย

เราเสมอมา

มณีวรรณ ศุภธรรมวิทย์

มัลลิกา วงษ์ขำ

ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญรูป	จ-ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 วิธีดำเนินงาน	1
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการจัดทำโครงการพิเศษ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน และพื้นฐานทางเลเซอร์	3
2.1 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน	3
2.1.1 การนำความร้อน	3
2.1.2 การพาความร้อน	3
2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน	4
2.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน	4
2.3 ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity;k)	4
2.4 ค่าการแผ่กระจายความร้อน (Thermal Diffusivity; α)	4
2.5 สภาวะสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ	4
2.6 พื้นฐานของเลเซอร์	5
2.6.1 กระบวนการเกิดเลเซอร์	5
2.6.2 สภาวะประชากรผกผัน	6
2.6.3 คุณสมบัติของแสงเลเซอร์	8
2.6.4 เลเซอร์โมด	9
2.7 ลำแสงแบบเกาส์เซียน	10
2.8 นิโอดีเมียมแยกเลเซอร์	11
2.9 การทำสัญลักษณ์ (Marking)	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10	สเต็ปเปอร์มอเตอร์	13
2.10.1	สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบยูนิโพลาร์	13
2.10.2	การกระตุ้นและควบคุมการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์	13
2.11	การ์ด 8255 แบบ ISA bus	15
บทที่ 3	การวิจัยและการดำเนินการ	18
3.1	การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	18
3.1.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการหาการกระจายของอุณหภูมิ	18
3.1.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการหาความถี่ของรอยสัณฐาน	25
3.2	การทำสัญลักษณ์บนโลหะ	28
3.2.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	28
3.2.2	วิธีทดลอง	28
3.2.3	สมบัติเฉพาะของนีโอไดเมียมแยกเลเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง	29
3.2.4	ข้อมูลของโลหะที่ใช้ในการทดลอง	29
3.3	การออกแบบและจัดทำอุปกรณ์เครื่องกวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย	29
3.3.1	อุปกรณ์	29
3.3.2	ขั้นตอนการดำเนินงาน	30
บทที่ 4	ผลการวิจัยและวิจารณ์	35
4.1	ผลที่ได้จากการทดลองการทำสัญลักษณ์ด้วยเลเซอร์บนวัสดุต่างๆ	35
4.1.1	ผลการทดลองของการวัดความลึก	35
4.1.2	ผลที่ได้จากทางทฤษฎี	38
4.1.3	ผลการทดลองของการวัดความกว้างของรูบนวัสดุต่างๆ	40
4.2	ผลที่ได้จากการทดลองชุดอุปกรณ์เครื่องกวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย	45
4.2.1	ลักษณะการทำงานของโปรแกรม	45
4.2.2	ผลที่ได้จากการทำงานของชุดอุปกรณ์เครื่องกวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย	46
4.3	การวิเคราะห์ผลการทดลอง	47
4.3.1	กราฟแสดงผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลทางทฤษฎี	47
4.3.2	กราฟแสดงผลการทดลอง	53
บทที่ 5	สรุปผลการทดลอง	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1	สรุปผลการทดลองในการทำสัญลักษณ์บนวัสดุต่างๆ	60
5.2	สรุปผลการทดลองในการทำอุปกรณ์เครื่องกวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย	61
5.3	แนวทางในการพัฒนา	62

ภาคผนวก

หนังสืออ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงลำดับการทำงานของขดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบ 1 เฟส	13
ตารางที่ 2.2 แสดงลำดับการทำงานของขดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบ 2 เฟส	14
ตารางที่ 2.3 แสดงลำดับการทำงานของขดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบครึ่งสเต็ป	15
ตารางที่ 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ	26
ตารางที่ 3.2 แสดงข้อมูลของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	29
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองของการวัดความลึกของรูบนหลัก	36
ตารางที่ 4.2 แสดงผลที่ได้จากทางทฤษฎี	38
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองของการวัดความกว้างของรูบนหลัก	41
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองของการวัดความกว้างของรูบนอะลูมิเนียม	42
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองของการวัดความกว้างของรูบนทองแดง	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการเกิดเลเซอร์	5
รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการการกระตุ้นสารเลเซอร์มีเดียแบบ 3 ระดับพลังงาน	7
รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการการกระตุ้นสารเลเซอร์มีเดียแบบ 4 ระดับพลังงาน	7
รูปที่ 2.4 ลักษณะของแสงเลเซอร์ที่ออกมา (Laser output) TEM _{mn} ที่ค่า m,n ต่างๆกัน	10
รูปที่ 2.5 แสดงระดับพลังงานในระบบนีโอดีมีียมแยกเลเซอร์	11
รูปที่ 2.6 แสดงการตั้งค่าต่างๆของพอร์ตควบคุม	16
รูปที่ 2.7 แสดงการกำหนดค่าอินพุท/เอาต์พุทของคอมพิวเตอร์	17
รูปที่ 3.1 แสดงการยิงลำแสงเลเซอร์และขอบเขตของวัตถุ	18
รูปที่ 3.2 แสดงรูปฟิสิกส์ทรงกระบอก	18
รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังของเลเซอร์และเวลา	26
รูปที่ 3.4 แสดงแนวของลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนวัสดุ	27
รูปที่ 3.5 แผ่นวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	28
รูปที่ 3.6 แสดงเครื่องกวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย	29
รูปที่ 3.7 แสดงการ์ด 8255 ชนิด ISA bus	30
รูปที่ 3.8 แสดงวงจรขั้วสแต็ปเปอร์มอเตอร์	30
รูปที่ 3.9 แสดงวงจรขั้วสแต็ปเปอร์มอเตอร์	33
รูปที่ 3.10 แสดงแผนภาพการทำงานของชุดอุปกรณ์เครื่องกวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย	34
รูปที่ 4.1 แสดงรูปของรูบนวัสดุต่างๆที่ใช้ในการวัดความลึก	35
รูปที่ 4.2 แสดงการวัดความลึกของรูบนวัสดุ	36
รูปที่ 4.3 แสดงรูปของรูบนวัสดุต่างๆที่ใช้ในการวัดความกว้าง	40
รูปที่ 4.4 แสดงการวัดความกว้างของรูบนวัสดุ	40
รูปที่ 4.5 แสดงภาพโปรแกรม Laser Marking project.exe	45
รูปที่ 4.6 แสดงภาพการใส่ค่าตัวเลขที่ต้องการพลอตลงในโปรแกรม	45
รูปที่ 4.7 แสดงตัวอย่างการใช้โปรแกรมในการควบคุมชุดอุปกรณ์เครื่องกวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย	46
รูปที่ 4.8 แสดงภาพตัวเลขที่สามารถเขียนได้จากชุดอุปกรณ์เครื่องกวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความลึกของรูที่ 20 กิโลเฮิร்தซ	47
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความลึกของรูที่ 30 กิโลเฮิร்தซ	48
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความลึกของรูที่ 40 กิโลเฮิร்தซ	49
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความลึกของรูที่ 3 วินาที	50
รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความลึกของรูที่ 5 วินาที	51
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความลึกของรูที่ 10 วินาที	52
รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 20 กิโลเฮิร்தซ	53
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 30 กิโลเฮิร்தซ	53
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 40 กิโลเฮิร்தซ	54
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 3 วินาที	54
รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 5 วินาที	55
รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 10 วินาที	55
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 20 กิโลเฮิร்தซ	56
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 30 กิโลเฮิร்தซ	56
รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 40 กิโลเฮิร்தซ	57
รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 3 วินาที	57
รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 5 วินาที	58
รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 10 วินาที	58
รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 40 กิโลเฮิร்தซ	59
2000 วัดที่ เวลาต่างๆ	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ

นับตั้งแต่ได้มีการค้นพบระบบเลเซอร์ระบบแรกของโลกคือเลเซอร์ทับทิม (Ruby Laser) ในปี ค.ศ. 1960 เป็นต้นมา ได้มีการนำเอาเลเซอร์ไปประยุกต์ใช้ในวงการต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เพราะเนื่องจากเลเซอร์เป็นแสงที่บริสุทธิ์และมีคุณสมบัติที่ดีทางแสงเท่าที่นักวิทยาศาสตร์จะผลิตออกมาได้ ปัจจุบันงานด้านต่างๆในระบบอุตสาหกรรมนั้นก็ได้มีการนำเลเซอร์มาประยุกต์ใช้เพื่อให้ได้ลักษณะงานที่มีคุณภาพ เช่น ในงานทางด้านการตัด, การเจาะ, การเชื่อม, การทำสัญลักษณ์บนโลหะและวัสดุต่างๆ (Cutting, Drilling, Welding, Marking Metals and Others Materials) โดยในการจัดทำโครงการพิเศษนี้จะมุ่งเน้นไปในการศึกษาถึงการนำเลเซอร์มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการการทำสัญลักษณ์บนโลหะ (Laser Marking) เพื่อจัดสร้างอุปกรณ์และนำมาประยุกต์ใช้งานอื่น ๆ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการนำความร้อนภายในเนื้อโลหะ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาพื้นฐานและคุณสมบัติต่างๆ ของเลเซอร์
- 1.2.3 เพื่อศึกษากระบวนการทำสัญลักษณ์ของเลเซอร์บนโลหะต่าง ๆ
- 1.2.4 จัดทำอุปกรณ์เพื่อใช้ในงานทางด้านการทำสัญลักษณ์ด้วยเลเซอร์

1.3 วิธีการดำเนินงาน

- 1.3.1 ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนในระบบสามมิติ
- 1.3.2 ศึกษาพื้นฐานของเลเซอร์เบื้องต้น
- 1.3.3 ศึกษากระบวนการทำสัญลักษณ์บนโลหะด้วยเลเซอร์
- 1.3.4 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากทฤษฎี
- 1.3.5 ออกแบบและจัดสร้างอุปกรณ์เพื่อนำมาใช้งานด้านการทำสัญลักษณ์ด้วยเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการจัดทำโครงการพิเศษ

- 1.4.1 สามารถแก้ปัญหาการหาสมการการนำความร้อนในระบบสามมิติในเงื่อนไขต่าง ๆ ได้
- 1.4.2 สามารถนำสมการความร้อนในระบบสามมิติมาประยุกต์ใช้ในการทดลองในกระบวนการทำสัญลักษณ์ด้วยเลเซอร์ได้
- 1.4.3 สามารถออกแบบและจัดทำอุปกรณ์เพื่อนำมาใช้งานทางด้านการทำสัญลักษณ์ด้วยเลเซอร์ โดยการประยุกต์ใช้โปรแกรมในการควบคุมสแตปมอเตอร์ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน และพื้นฐานทางเลเซอร์

2.1 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน (Principles of Heat Transfer)

เมื่อไรก็ตามที่จุดสองจุดมีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ก็จะมีพลังงานถ่ายเทจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ พลังงานที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยอิทธิพลของอุณหภูมิที่แตกต่างกันนี้มีชื่อเรียกว่า "ความร้อน" เนื่องจากการไหลของความร้อนเกิดขึ้นเมื่อไรก็ตามที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิในระบบ ดังนั้นความรู้เกี่ยวกับการกระจายของอุณหภูมิในระบบจึงจำเป็นมากในการศึกษาการถ่ายเทความร้อน และถ้าทราบการกระจายของอุณหภูมิแล้ว เราสามารถหาพลั๊กซ์ความร้อน ซึ่งเป็นค่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลาได้จากกฎหรือสมการซึ่งเกี่ยวข้องกับระหว่างพลั๊กซ์ความร้อนกับเกรเดียนอุณหภูมิ

ในการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน สามารถแยกพิจารณาออกได้อย่างเด่นชัดเป็น 3 แบบ คือ การนำ การพา และการแผ่รังสี

2.1.1 การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer)

การนำความร้อนเป็นรูปแบบหนึ่งของการถ่ายเทความร้อน ในลักษณะของการแลกเปลี่ยนพลังงานจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยเคลื่อนที่แบบจลน์ หรือการชนกันโดยตรงของโมเลกุลซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในของไหลที่หยุดนิ่ง ส่วนในกรณีของโลหะนั้นจะเป็นการไหลของกระแสอิเล็กตรอน สำหรับของแข็งที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมากมายที่เคลื่อนที่อยูภายในโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าวัตถุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีตามไปด้วย ยกตัวอย่างเช่น ทองแดง เงิน เหล็ก ฯลฯ อันเป็นผลมาจากการนำหรือการถ่ายเทพลังงานความร้อนโดยอิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้

2.1.2 การพาความร้อน (Convection Heat Transfer)

เมื่อของไหลไหลผ่านวัสดุที่เป็นของแข็งหรือไหลผ่านภายในช่องทางการไหล โดยที่อุณหภูมิของของไหลและผิวของของแข็งมีค่าแตกต่างกัน การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและผิวของของแข็ง จะเกิดขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวของของแข็ง กลไกของการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า "การพาความร้อน"

2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อน คือพลังงานที่ถูกส่งออกไปโดยสารซึ่งมีอุณหภูมิจำกัดแน่นอน ถึงแม้ว่าเราจะเน้นการแผ่รังสีจากผิวของวัตถุแข็งก็ตาม การส่งออกของรังสีอาจเกิดขึ้นได้จากของเหลวและก๊าซ ดังนั้นถ้าไม่คำนึงถึงรูปแบบของสาร การส่งออกของรังสีเชื่อว่าเป็นการเปลี่ยนการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนขององค์ประกอบอะตอมหรือโมเลกุล พลังงานของสนามการแผ่รังสีนั้นจะถูกนำออกไปโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (หรือเรียกอีกอย่างว่าโฟตอน) ในขณะที่การถ่ายเทพลังงานโดยการนำหรือการพาต้องการวัตถุตัวกลาง แต่การแผ่รังสีไม่ต้องการ ในความเป็นจริง การถ่ายเทโดยการแผ่รังสีเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดในสุญญากาศ

2.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน

ในการนำความร้อนนั้นมีการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยการสั่นสะเทือนของโมเลกุลของของแข็ง ซึ่งส่วนของของแข็งที่ได้รับความร้อนนั้น สามารถถ่ายเทความร้อนให้แก่โมเลกุลในชั้นถัดไป ในลักษณะของพลังงานความสั่นสะเทือน (Vibrational energy) พลังงานความร้อนก็เคลื่อนที่ลึกเข้าไปในเนื้อของของแข็งเรื่อยๆ

2.3 ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity ; k)

ค่าการนำความร้อนเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัตถุ โดยทั่วไปแล้วค่าการนำความร้อนของวัตถุจะแปรไปกับอุณหภูมิ แต่ในการใช้งานในด้านปฏิบัตินั้น ส่วนใหญ่จะใช้ค่าการนำความร้อนคงที่ที่หาจากอุณหภูมิเฉลี่ย โดยถ้าสารที่มีค่าการนำความร้อนสูงจะเรียกว่า “ตัวนำ” (Conductor) และสารที่มีค่าการนำความร้อนต่ำจะเรียกว่า “ฉนวน” (Insulator)

2.4 ค่าการแผ่กระจายความร้อน (Thermal Diffusivity ; α)

ค่าการแผ่กระจายความร้อนขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อน ความหนาแน่น และค่าความจุความร้อนจำเพาะของสาร และในสารแต่ละชนิดนั้นจะมีค่าการแผ่กระจายความร้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งค่าการแผ่กระจายความร้อนบ่งบอกถึงความเร็วของการถ่ายเทความร้อนในวัตถุนั้น

2.5 สภาวะสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ (Steady state and Unsteady state)

สภาวะสม่ำเสมอ (Steady state) หมายความว่า อุณหภูมิที่จุดหนึ่งในวัตถุไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา หรืออาจเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ว่า

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ T เป็นค่าของอุณหภูมิ และ t เป็นค่าของเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป

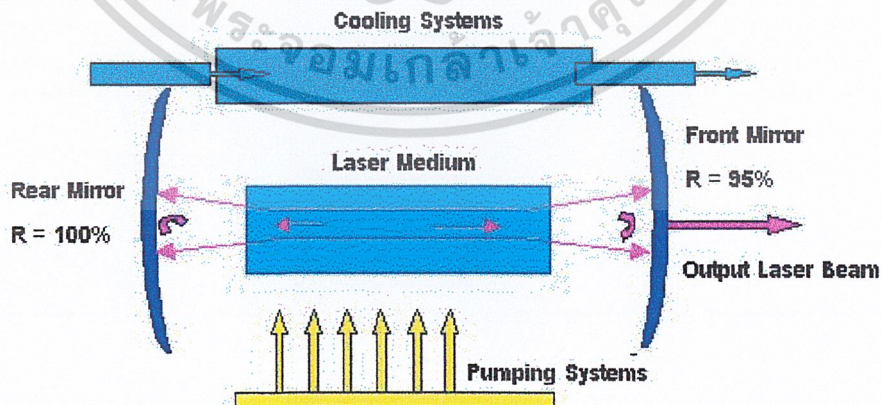
สถานะไม่สม่ำเสมอ (Unsteady state หรือ Transient state) หมายความว่าอุณหภูมิที่จุดๆหนึ่งในวัตถุยังเปลี่ยนแปลงอยู่เมื่อมีเวลาเปลี่ยนแปลง หรืออาจเขียนในรูปสมการได้ว่า

$$\frac{\partial T}{\partial t} \neq 0 \quad (2.2)$$

2.6 พื้นฐานของเลเซอร์

2.6.1 กระบวนการเกิดเลเซอร์

การทำงานของระบบเลเซอร์นั้น จะเกิดขึ้นได้เมื่ออะตอม หรือโมเลกุลของเลเซอร์มีเดียมถูกกระตุ้นโดยการให้พลังงานเพิ่มขึ้นโดยวิธีการปั๊ม (Pumping) อะตอมหรือโมเลกุลเหล่านั้นจะเปลี่ยนระดับค่าพลังงานสูงขึ้น เนื่องจากเลเซอร์มีเดียมมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลง (Transition) ค่าระดับพลังงานของอะตอมเป็นกรณีพิเศษ ดังนั้นสถานะของประชากรผกผัน (Population inversion) จึงเกิดขึ้นระหว่างระดับพลังงานที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเกิดประชากรผกผันขึ้นแล้ว เลเซอร์มีเดียมจึงมีเกน (Gain) ของการขยายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น การทำให้เกิดความเข้มของคลื่นไฟฟ้าภายในเรโซเนเตอร์สูงมากขึ้น กระทำได้โดยวิธีการป้อนกลับ (Feed back) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้วิ่งผ่านเลเซอร์มีเดียมหลายรอบ โดยการสะท้อนกลับไปกลับมาจากกระจกที่เคลือบด้วยสารไดอิเล็กทริก กระจก M_1 และ M_2 วางตัวห่างกันเป็นระยะทาง L จะก่อให้เกิดออปติคัลเรโซเนเตอร์ (Optical resonator) ขึ้นและทำหน้าที่ป้อนกลับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งยังผลให้เกิดเป็นแสงเลเซอร์ (Laser light) ออกมา



รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการเกิดเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 สภาวะประชากรผกผัน (Population Inversion)

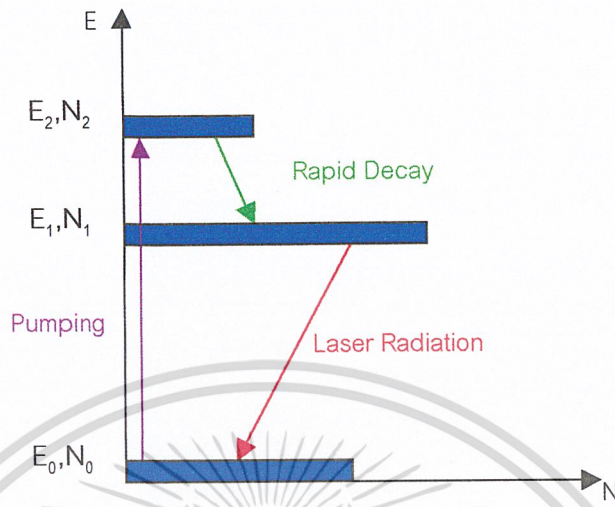
ในการทำให้เกิดการขยาย (Amplification) แอมพลิจูดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดในเลเซอร์มีเดียมนั้นจำเป็นต้องทำให้เกิดสภาวะประชากรผกผัน (Population inversion) เสียก่อน ซึ่งหมายถึงจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลในระดับชั้นพลังงาน E_2 มีจำนวนมากกว่าจำนวนโมเลกุลในระดับชั้นพลังงาน E_1 โดยที่ $E_2 > E_1$ ซึ่งในการเกิดสภาวะประชากรผกผันนั้นจำเป็นต้องเพิ่มพลังงานให้แก่อะตอมในเลเซอร์เพื่อที่จะกระตุ้นให้ไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าและมีจำนวนมากด้วย วิธีการเพิ่มพลังงานนี้เรียกทั่วไปว่าวิธีการปั๊ม (Pumping) วิธีการดังกล่าวนี้จะเกี่ยวข้องกับระดับพลังงานหลายระดับซึ่งแยกออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ดังนี้

2.6.2.1 ระดับพลังงาน 2 ระดับ (Two-level Pumping)

สำหรับกรณีที่เกี่ยวข้องกับระดับพลังงาน 2 ระดับนี้เกิดขึ้นเป็นครั้งแรกโดยใช้โมเลกุลของแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) เป็นตัวกลางที่ทำให้เกิดสภาวะประชากรผกผัน และโมเลกุลของแอมโมเนียจะทำหน้าที่ขยายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านไมโครเวฟที่มีความถี่ 24 GHz คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกขยายมานี้ถูกเรียกว่า “เมเซอร์” (MASER)

2.6.2.2 ระดับพลังงาน 3 ระดับ (Three-level Pumping)

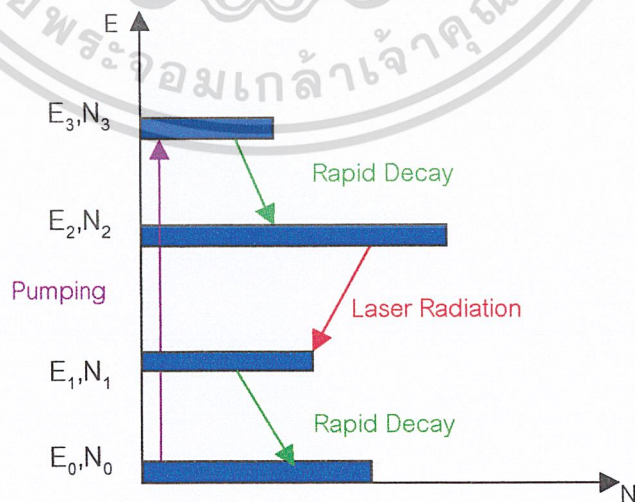
ในขณะที่อยู่ในสมดุลความร้อน และยังไม่มีการเกิดออปติคัลปั๊ม (Optical Pumping) เราจะพบว่าจำนวน $N_0 > N_1 > N_2$ โดยที่ $E_0 > E_1 > E_2$ เมื่อมีการให้ออปติคัลปั๊ม โมเลกุลจะมีการกระจายตัวไปสู่ระดับพลังงานต่างๆ ซึ่งเราจะพบว่า $N_0 > N_1$ และ $N_1 > N_2$ ถึงแม้จะมีการลดระดับพลังงานจากระดับ E_2 ไปยัง E_1 อย่างรวดเร็วเป็นแบบนอนเรดิเอทีฟทรานซิชัน (Nonradiative transition) ก็ตาม จำนวน $N_0 > N_1$ ซึ่งในกรณีนี้จะไม่เกิดสภาวะประชากรผกผัน ต่อมาเมื่อเราเพิ่มกำลังของออปติคัลปั๊มมากพอที่จะกระตุ้นให้อะตอมหรือโมเลกุลของเลเซอร์มีเดียมนั้นกระจายตัวไปอยู่ในระดับพลังงานต่างๆ ที่ทำให้ $N_1 > N_0$ และ $N_1 > N_2$ จะทำให้เกิดสภาวะประชากรผกผันขึ้น และเลเซอร์มีเดียมนั้นจะทำหน้าที่ขยายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดเลเซอร์ขึ้น



รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการกระตุ้นสารเลเซอร์มีเดียแบบ 3 ระดับพลังงาน

2.6.2.3 ระดับพลังงาน 4 ระดับ (Four-level Pumping)

เป็นการเกี่ยวข้องกับระดับพลังงาน 4 ระดับ ซึ่งในลักษณะนี้จะต้องการสารเลเซอร์มีเดียที่มีระดับพลังงาน 4 ระดับ โดยที่ระดับ $E_3 > E_2$ และ $E_1 > E_0$ และอะตอมในชั้น E_3 และ E_1 จะต้องตกมาในชั้นที่ต่ำกว่าอย่างรวดเร็ว ซึ่งในแบบระดับพลังงาน 4 ระดับนี้จะสามารถยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ได้ดีกว่าแบบระดับพลังงาน 3 ระดับ เพราะในการทรานซิชันไม่มีการปล่อยโฟตอนออกมา



รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการกระตุ้นสารเลเซอร์มีเดียแบบ 4 ระดับพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 คุณสมบัติของแสงเลเซอร์

แสงเลเซอร์มีคุณลักษณะที่มีความเจิดจ้าสูงและมีทิศทางเคลื่อนที่ที่แน่นอน และยังมีคุณสมบัติที่เป็นแสงความถี่ และยังเป็นคลื่นแสงที่มีลักษณะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ซึ่งคุณสมบัติต่างๆของเลเซอร์สรุปได้ดังนี้

2.6.3.1 โมโนโครมาติกส์ (Monochromatics)

ลำแสงแบบโมโนโครมาติกส์นั้นเป็นลำแสงที่มีความถี่เดียว แต่ในความเป็นจริงแล้วแสงเลเซอร์นั้นไม่ได้เป็นความถี่เดียว แต่มีการกระจายของความถี่เป็น $\Delta\nu$ ซึ่งการที่แสงเลเซอร์เป็นโมโนโครมาติกส์นั้นขึ้นกับ $\Delta\nu$

2.6.3.2 แสงที่มีทิศทางที่แน่นอน (Directionality)

คุณสมบัติที่เด่นเฉพาะตัวของแสงเลเซอร์ที่แสงชนิดอื่นไม่สามารถทำได้ก็คือคุณสมบัติที่เรียกว่า “ไดเรกชันแนลลิตี” (Directionality) กล่าวคือ แสงเลเซอร์ที่ถูกผลิตออกมานั้นมีทิศทางในการเคลื่อนที่ที่แน่นอน ไม่กระจายออกไปโดยรอบๆ ทั้งนี้เพราะแสงเลเซอร์เกิดกระบวนการทางฟิสิกส์ที่เรียกว่าสตีมูเลตอิมิชชัน (Stimulated emission) และจำเป็นต้องมีออปติคัลเรโซเนเตอร์ซึ่งประกอบด้วยกระจกที่มีค่าการสะท้อนกลับสูง ดังนั้นแสงเลเซอร์จะถูกผลิตออกมาเฉพาะบริเวณที่มีกระจก และในทิศทางในแนวแกนออปติคของเรโซเนเตอร์เท่านั้น

2.6.3.3 ไดเวอร์เจนซ์ (Divergence)

คุณสมบัติของเลเซอร์ที่เด่นอีกข้อหนึ่งก็คือ แสงเลเซอร์มีไดเวอร์เจนซ์น้อยมาก คุณสมบัติไดเวอร์เจนซ์นี้มีความเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติไดเรกชันแนลลิตี กล่าวคือ แสงเลเซอร์จะมีไดเรกชันแนลลิตีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับมุมเบี่ยงเบน (divergence angle) ของแสงเลเซอร์นั่นเอง โดยทั่วไปแสงเลเซอร์จะมีมุมเบี่ยงเบนประมาณ 1.0-2.0 มิลลิเรเดียน ซึ่งมีค่าน้อยมาก ดังนั้นแสงเลเซอร์ที่ถูกปล่อยออกมาจะเป็นลำแสงขนาน พุ่งไปในทิศทางที่แน่นอน

2.6.3.4 โคฮีเรนซ์ (Coherence)

โคฮีเรนซ์ (Coherence) เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับคลื่น โดยแสงเลเซอร์นั้นจะมีลักษณะเป็นโคฮีเรนซ์คือ มีการเคลื่อนที่ที่เป็นระเบียบและมีทิศทางเดียวกัน

2.6.4 เลเซอร์โหมด (Laser Modes)

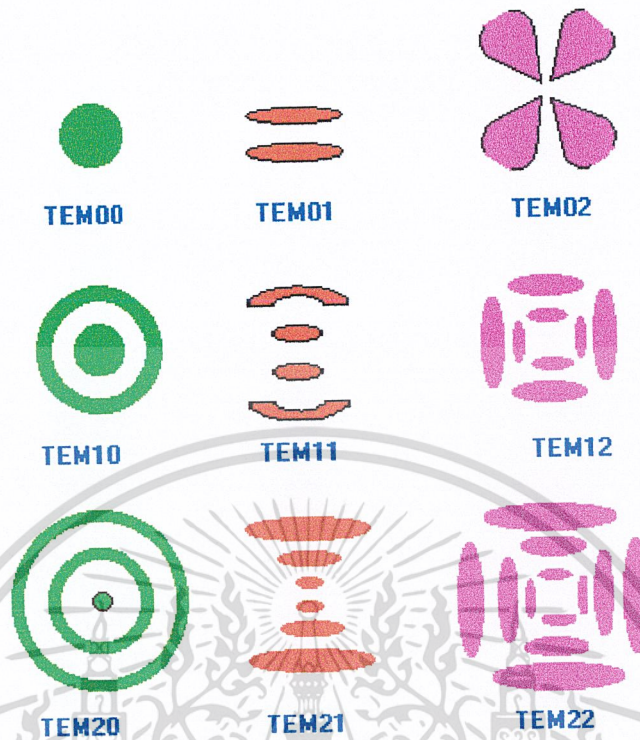
แสงเลเซอร์จะประกอบด้วยโหมด (Modes) ต่างๆ ซึ่งทำหน้าที่แสดงถึงรูปแบบของการกระจายของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในเลเซอร์คาวิตี (Laser cavity) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 โหมดคือ แอ็กเซียลโหมด (Axial Modes) และ ทรานส์เวิร์สโหมด (Transversal Modes) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.6.4.1 แอ็กเซียลโหมด (Axial Modes)

ในระบบของเลเซอร์นั้นเมื่อออปติคัลเรโซเนเตอร์ ซึ่งมีหน้าที่ขยายความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเมื่อเกิดการเรโซแนนซ์ออกมาหลายๆค่า ทำให้เกิดการกระจายความหนาแน่นของพลังงานภายในเรโซเนเตอร์ และลักษณะของการกระจายความหนาแน่นของพลังงานเรียกว่า ลอนจิจูดินัลโหมด (Longitudinal Modes) หรือ แอ็กเซียลโหมด (Axial Modes) นั่นเอง

2.6.4.2 ทรานส์เวิร์สโหมด (Transverse Modes)

ในระบบของเลเซอร์มีกระจก M_1 และ M_2 ซึ่งอยู่ห่างกันเป็นระยะ L ดังนั้นเรโซเนเตอร์จึงมี 3 มิติ จึงทำให้มีทรานส์เวิร์สโหมด (Transverse Modes) เกิดขึ้น และมีความถี่เรโซแนนซ์ที่เกี่ยวข้องด้วย ทำให้ผลรวมในการเกิดเรโซแนนซ์ของออปติคัลเรโซเนเตอร์ประกอบด้วย แอ็กเซียลโหมด และทรานส์เวิร์สโหมด ซึ่งผลที่ได้มีค่า q ตัวเดียวไม่เพียงพอเพราะเป็น 3 มิติ ดังนั้นค่าโหมดที่ออกมาจึงเขียนได้เป็น TEM_{mnq} เรียกว่า ทรานส์เวิร์สอิเล็กโตร-แมกเนติก (Transverse Electro-Magnetic) ซึ่งค่าโหมดนั้นจะมีลักษณะแตกต่างกันดังรูป



รูปที่ 2.4 ลักษณะของแสงเลเซอร์ที่ออกมา (laser output) TEM_{mn} ที่ค่า m และ n แปรต่างกันไป

2.7 ลำแสงแบบเกาส์เซียน (Gaussian Beams)

ลำแสงทุกโหมดจะมีส่วนประกอบของเกาส์เซียน แต่โหมดที่ต่ำที่สุด TEM_{00} จะถูกกล่าวถึงโดยทั่วไป เนื่องจากการกระจายของกำลังความเข้มมีรูปร่างคล้ายคลึงกับแบบเกาส์เซียน ความเข้มของกำลังเป็นฟังก์ชันกับกำลังความเข้มที่จุดศูนย์กลางของลำแสง (I_0) ระยะทางทางด้านตอนข้างจากจุดศูนย์กลาง (r) และรัศมีของลำแสง (w) สำหรับลำแสงเกาส์เซียนจะถูกกำหนดโดย

$$I = I_0 \exp(-2r^2 / w^2)$$

รัศมี w คือระยะที่กำลังความเข้มลดลงสู่ $1/e^2$ (13.5%) ของค่าที่จุดศูนย์กลางของลำแสง

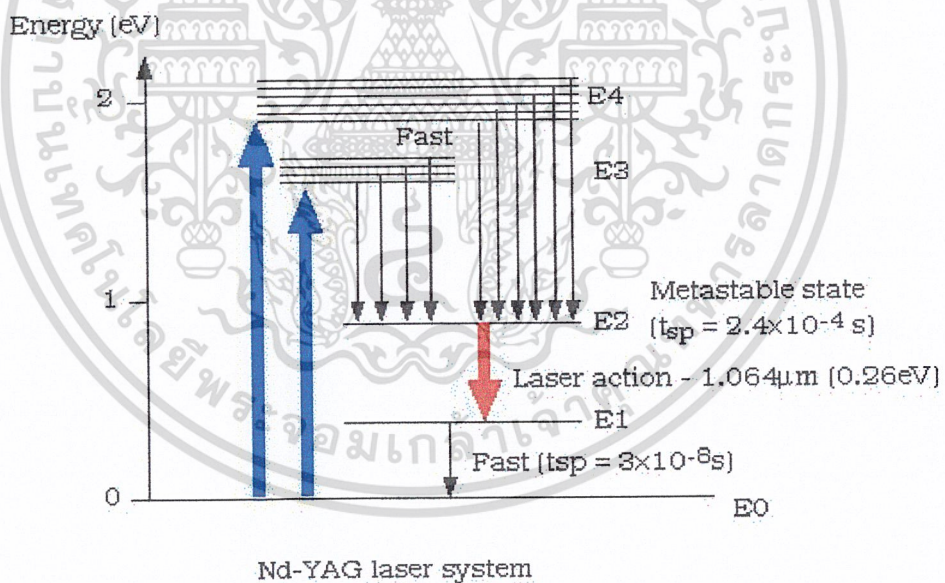
ความสัมพันธ์ระหว่าง I_0 กับกำลังรวม P เป็นที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถคำนวณกำลังความเข้มสูงสุดได้ ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$I_0 = 2P / \pi w^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 นีโอติเมียมแยกละเซอร์ (Nd:YAG Laser)

ระบบนีโอติเมียมแยกละเซอร์ (Nd:YAG Laser) เป็นระบบโซลิดสเตตเลเซอร์อีกระบบหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เลเซอร์ระบบนี้มีเลเซอร์มีเดียเป็นแท่งผลึก Nd:YAG โดยการนำนีโอติเมียมไอออน Nd^{3+} ไปเป็นอิมพิวริตี (impurity) ในโครง (host) ของยิทเทรียมอะลูมิเนียมแกเรต (Yttrium Aluminum Garnet ;YAG ; $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) แสงเลเซอร์ที่ได้ออกมาเกิดจากการเกิดประชากรผกผัน (population inversion) ของอะตอมนีโอติเมียม การทำให้เกิดประชากรผกผันนั้นทำได้โดยการใส่แฟลชแลมป์ที่บรรจุแก๊สซีนอน (Xenon flashlamp) ที่ให้ความเข้มของแสงสูง ทำการปั๊มแท่งผลึกนีโอติเมียมแยกละเซอร์ (Nd:YAG rod) แท่ง Nd:YAG มีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงในย่านความถี่หลายๆช่วงของสเปกตรัมที่ได้จากซีนอนแฟลชแลมป์ส่งออกมา แสงเลเซอร์ที่เกิดจากแท่ง Nd:YAG จะมีความยาวคลื่น $\lambda = 1.0641 \mu\text{m}$ ที่อุณหภูมิห้อง ($T \approx 300 \text{ K}$) แสงเลเซอร์ที่เกิดจากระบบ Nd:YAG เกิดได้ 2 แบบคือ แบบที่เป็นช่วง (pulse) และแบบที่ต่อเนื่อง (continuous wave,CW)



รูปที่ 2.5 แสดงระดับพลังงานในระบบนีโอติเมียมแยกละเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 การทำสัญลักษณ์ (Marking)

การทำสัญลักษณ์เป็นสิ่งที่ต้องการในการทำวัสดุให้เหมือนกันทุกอย่าง, ข่าวดสารของผลิตภัณฑ์ หรือ การป้องกันการโจรกรรม เมื่อสิ่งเหล่านี้ถูกทำสัญลักษณ์ที่เล็กและเบาบาง ซึ่งจะถูกทำสัญลักษณ์ที่ความเร็วสูง และบริเวณนั้นต้องไม่มีการทำรอยต่อ หรือการปนเปื้อนของสารเคมีจากน้ำหมึก ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถทำสัญลักษณ์ได้ เลเซอร์จะถูกนำมาใช้ในเทคนิคนี้มากที่สุด

วิธีทั่วไปในการทำสัญลักษณ์ด้วยเลเซอร์มี 3 ข้อดังต่อไปนี้

2.9.1 การทำแม่พิมพ์หรือการแกะสลัก (Engraving)

2.9.2 การทำสัญลักษณ์แบบดอทเมตริกซ์ (Dot matrix marking)

2.9.3 การทำภาพหน้ากาก (Mask imaging)

2.9.1 การทำแม่พิมพ์หรือการแกะสลัก (Engraving)

การแกะสลักด้วยเลเซอร์นี้จะคล้ายกับการแกะสลักทางกลศาสตร์ ในที่นี้เลเซอร์จะถูกใช้เป็น "ไมโคร-มิลลิ" (micro-milli) เพื่อทำร่องลงบนชิ้นงาน ในกระบวนการคร่าวๆ เลเซอร์จะทำให้ชิ้นสารระเหยและหลุดออกไปเป็นไอและเกิดการทำร่องอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจมีความกว้างประมาณ 12 μm ถึง 1mm ซึ่งโดยประมาณจะเท่ากับความลึก ลำแสงสามารถปฏิบัติการได้ที่คุณสมบัติการพิมพ์ในโครงสร้างใดๆ

2.9.2 การทำสัญลักษณ์แบบดอทเมตริกซ์ (Dot matrix marking)

การทำสัญลักษณ์แบบดอทเมตริกซ์ (Dot matrix marking) ถูกทำให้สมบูรณ์โดยการกลายเป็นไออย่างต่อเนื่องของรูเล็กๆ โดยการเคลื่อนที่อย่างช้าๆของกระจกสะท้อนเลเซอร์ และการที่ลากเส้นโดยเกิดการต่อเนื่องของรูเล็กๆที่มีอัตรามากกว่า 30 รูต่อวินาที หลักการนี้ทำให้สามารถทำลวดลายได้ด้วย เช่น การวาดหรือการทำสัญลักษณ์ของบริษัท

2.9.3 การทำภาพหน้ากาก (Mask imaging)

การทำภาพหน้ากาก (Mask imaging) ได้นำเอาข้อได้เปรียบของลำแสงขนานแนวเดียวกันที่ใกล้กันซึ่งสร้างโดยเลเซอร์ ลำแสงจะส่องหน้ากากซึ่งกระทำลงบนวัตถุจากการสะท้อนของเลนส์ เลนส์จะสร้างภาพหน้ากากบนชิ้นสารและลดขนาดลงเสมอ ถ้าพลังงานของเลเซอร์สูงเพียงพอจะเคลื่อนเอาสิ่งเปลี่ยนแปลงในชิ้นสารออกจากวัสดุ ภาพหน้ากากจะถูกสร้างขึ้น เทคนิคนี้ทำให้เกิดผลผลิตที่มีมูลค่าสูง

Nd:YAG เลเซอร์จะใช้มากที่สุดในการทำสัญลักษณ์ แต่อย่างไรก็ตามเลเซอร์ที่มีพลังงานสูงก็สามารถใช้ทำสัญลักษณ์ได้ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

Nd:YAG เลเซอร์แบบ Q-switched จะใช้ได้ดีในการแกะสลัก (engraving) และการทำสัญลักษณ์แบบดอทเมตริกซ์ (Dot matrix marking)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 สเต็ปเปอร์มอเตอร์

2.10.1 สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบยูนิโพลาร์

ในปัจจุบันสเต็ปเปอร์มอเตอร์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบยูนิโพลาร์ (uni-polar stepper motor)

สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบนี้มีการพันขดลวด 2 ขดแต่ละขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ แต่ละขดแบ่งเป็น 2 เฟส รวมมอเตอร์ทั้งตัวจะมี 4 เฟสคือ เฟส 1,2,3 และ 4 มีการต่อสายออกมาจากขดลวดแต่ละขดเพื่อจ่ายไฟเลี้ยง ทำให้สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบนี้มีทั้งแบบ 5 สายและ 6 สาย ถ้าเป็นแบบ 5 สาย จะเป็นการนำสายไฟเลี้ยงของขดลวดทั้งสองมาต่อรวมกันเป็นสายเดียว

2.10.2 การกระตุ้นและควบคุมการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์

การกระตุ้นและควบคุมการหมุนของมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปแต่ละสเต็ป ทำได้โดยจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังขดลวดทีละขดบนสเตเตอร์ ซึ่งต้องป้อนเป็นแบบซีควเอนเชียลในรูปแบบที่ถูกต้องด้วย สามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบคือ แบบ 1 เฟส (full step) , แบบ 2 เฟส (two phase) และแบบครึ่งสเต็ป (half step)

แบบหนึ่งเฟสหรือแบบฟูลสเต็ป (full step) เป็นการกระตุ้นที่มีรูปแบบง่ายที่สุด โดยทำการกระตุ้นขดลวดทีละขดในเวลาหนึ่งได้เรียงติดกันไป เช่น เริ่มต้นที่ขดที่ 1,2,3,4 แล้ววนกลับมาที่ 1 ใหม่ วนไปเรื่อยๆ หรือเริ่มที่ขดที่ 1 แล้วย้อนไปยังขดที่ 4,3,2 แล้วกลับมาขดที่ 1 อีกครั้ง ซึ่งทำให้ทิศทางของการหมุนสวนกัน ในการกระตุ้นรูปแบบนี้จึงมีขดลวดเพียงขดเดียวในเวลาหนึ่งที่ถูกกระตุ้นเท่านั้น วงจรกระตุ้นแบบเวฟจึงมีราคาถูกและง่าย ขั้นตอนการทำงานต่างๆ แสดงดังตาราง

สเต็ปที่	เฟสที่ 1	เฟสที่ 2	เฟสที่ 3	เฟสที่ 4
1	ทำงาน	-	-	-
2	-	ทำงาน	-	-
3	-	-	ทำงาน	-
4	-	-	-	ทำงาน

ตารางที่ 2.1 แสดงลำดับการทำงานของขดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบ 1 เฟส

แบบ 2 เฟส เป็นการกระตุ้นซึ่งคล้ายกับแบบหนึ่งเฟส แต่การกระตุ้นแบบนี้จะทำการ

กระตุ้นโดยจ่ายกำลังไฟฟ้าไปที่ขดลวด 2 ขด ที่อยู่ใกล้กันในเวลาเดียวกัน และเรียงติดกันไปเช่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดียวกับแบบเวฟ ดังตัวอย่าง ขดลวดชุดแรกที่ถูกกระตุ้นจะเป็นขดที่ 1 และ 2 ตามด้วยการกระตุ้นขดที่ 2 และ 3 ต่อไปเป็นขดที่ 3 และ 4 ถัดไปเป็นขดที่ 4 และ 1 ทิศทางการหมุนจะสวนทางกัน การกระตุ้นสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบนี้สามารถเพิ่มแรงบิดได้มากกว่าแบบเวฟ มอเตอร์จะเคลื่อนที่ด้วยแรงดึงอย่างเต็มแรงจาก 2 ขดลวดที่ถูกกระตุ้นพร้อมกัน และต่อไปด้วยแรงดึงจากอีก 2 ขดลวดถัดไป สำหรับข้อเสียคือ การกระตุ้นแบบนี้ต้องใช้กำลังไฟฟ้ามากขึ้น ขั้นตอนการทำงานต่างๆแสดงดังตารางที่ 2.2

สเต็ปที่	เฟสที่ 1	เฟสที่ 2	เฟสที่ 3	เฟสที่ 4
1	ทำงาน	ทำงาน	-	-
2	-	ทำงาน	ทำงาน	-
3	-	-	ทำงาน	ทำงาน
4	ทำงาน	-	-	ทำงาน

ตารางที่ 2.2 แสดงลำดับการทำงานของขดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์ เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบ 2 เฟส

แบบครึ่งสเต็ปเป็นรูปแบบที่ผสมผสานระหว่างการกระตุ้นแบบ 1 เฟส และ 2 เฟส เพื่อเพิ่มจำนวนของสเต็ปต่อรอบอีกเท่าตัวหนึ่ง ในระบบนี้จะทำการกระตุ้นขดลวดเรียงกันไปเป็นลำดับดังนี้ เริ่มจากขดลวดที่ 1,1 และ 2,2,2 และ 3,3,3 และ 4,4,4 และ 1 แล้ววนกลับมายังขดลวดที่ 1 แรงบิดที่ได้รับจากการกระตุ้นแบบนี้จะเพิ่มมากขึ้นอีก เพราะช่วงสเต็ปมีระยะสั้นลง แต่ละสเต็ปจะเกิดแรงดึงจากขดลวด 2 ขดที่ถูกกระตุ้นพร้อมกัน ความถูกต้องของตำแหน่งมีเพิ่มมากขึ้น แต่ต้องพึงระวังไว้อีกประการหนึ่งว่า เมื่อกระตุ้นให้ทำงานในรูปแบบนี้จะต้องทำการหมุนถึง 2 สเต็ปจึงจะได้ระยะเท่ากับ 1 สเต็ปเต็มของการควบคุมใน 2 แบบแรก สำหรับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต้องใช้ขนาดเท่ากับแบบ 2 เฟสเป็นอย่างน้อยจึงจะเพียงพอ ขั้นตอนการทำงานต่างๆแสดงดังตารางที่ 2.3

สเต็ปที่	เฟสที่ 1	เฟสที่ 2	เฟสที่ 3	เฟสที่ 4
1	ทำงาน	-	-	-
2	ทำงาน	ทำงาน	-	-

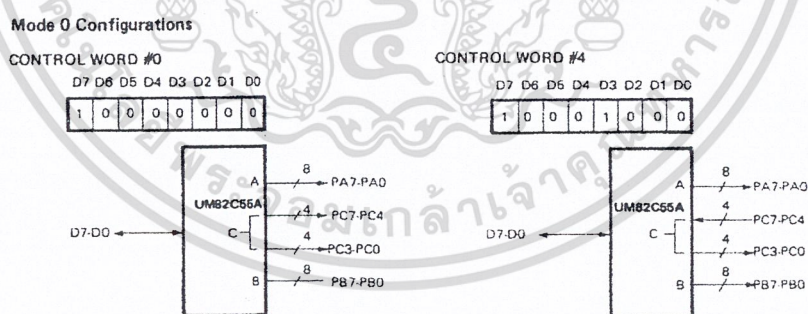
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3	-	ทำงาน	-	-
4	-	ทำงาน	ทำงาน	-
5	-	-	ทำงาน	-
6	-	-	ทำงาน	ทำงาน
7	-	-	-	ทำงาน
8	ทำงาน	-	-	ทำงาน

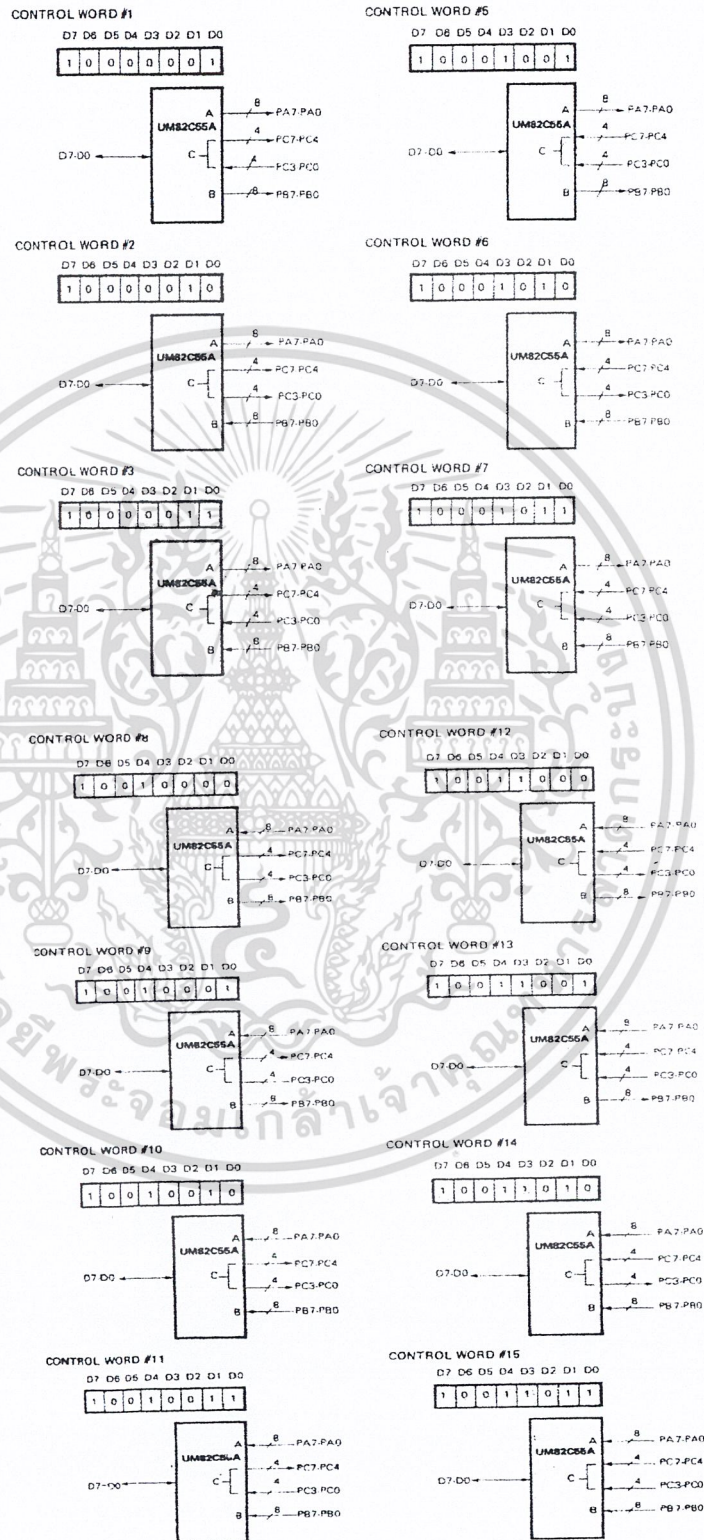
ตารางที่ 2.3 แสดงลำดับการทำงานของขดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์ เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบครึ่งสเต็ป

2.11 การ์ด 8255 แบบ ISA bus

การ์ด 8255 เป็นอุปกรณ์ขยายการเชื่อมต่อแบบขนาน โดยอาศัยไอซี 8255 ซึ่งเป็นไอซี programmable peripheral interface โดยมีช่องทางอินพุต/เอาต์พุตจำนวน 24 ช่อง ซึ่งจะถูกแบ่งเป็นพอร์ตขนาด 8 บิต คือ A,B และ C ซึ่งแต่ละพอร์ตสามารถกำหนดให้เป็นช่องอินพุตหรือเอาต์พุตก็ได้โดยไม่ขึ้นแก่กัน ถ้ากำหนดช่องทางอินพุต/เอาต์พุต สามารถกำหนดได้จากค่าของพอร์ตควบคุม (Control Port) ดังรูป



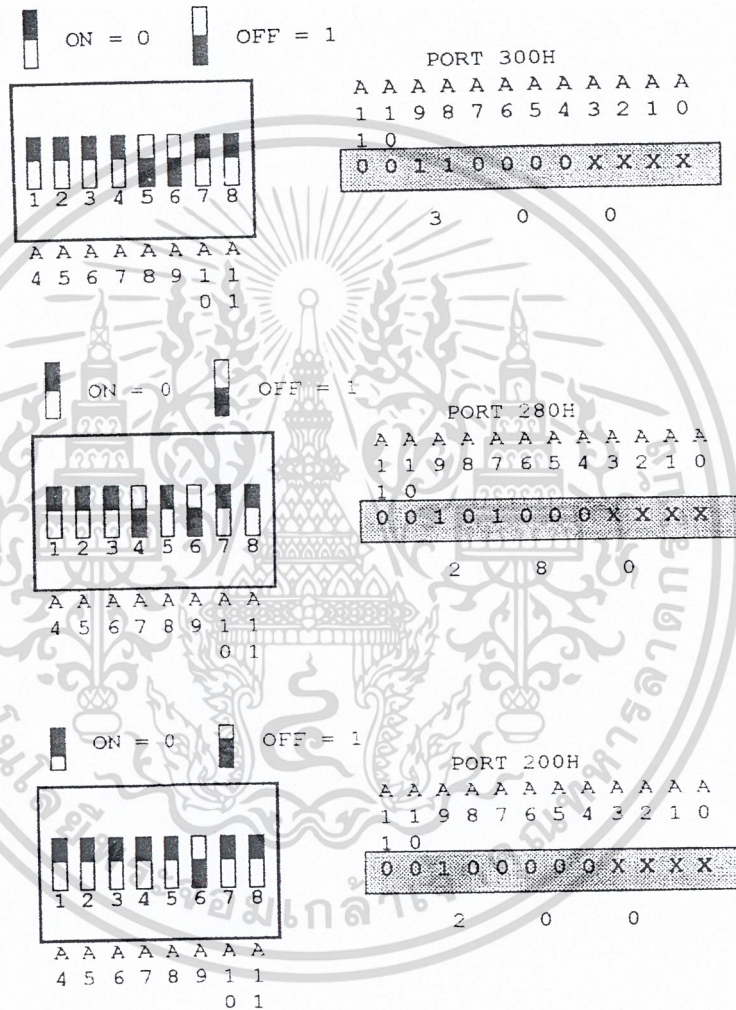
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงการตั้งค่าต่างๆของพอร์ตควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การ์ด 8255 ที่ใช้ประกอบด้วยไอซี 8255 จำนวน 3 ตัวทำให้สามารถขยายพอร์ตนานได้สูงสุดถึง 72 ช่องทาง โดยระดับแรงดันที่ออกจากการ์ด 8255 จะเป็นระดับทีทีแอล (TTL: Transistor Transistor Logic) คือ 0-5 โวลต์ จึงสามารถนำไปใช้ร่วมกับไอซีทีทีแอลโดยไม่ต้องมีการแปลงระดับสัญญาณ นอกจากนี้เราสามารถกำหนดค่าอินพุท/เอาต์พุทของคอมพิวเตอรืได้ดังรูป



รูปที่ 2.7 แสดงการกำหนดค่าอินพุท/เอาต์พุทของคอมพิวเตอรื

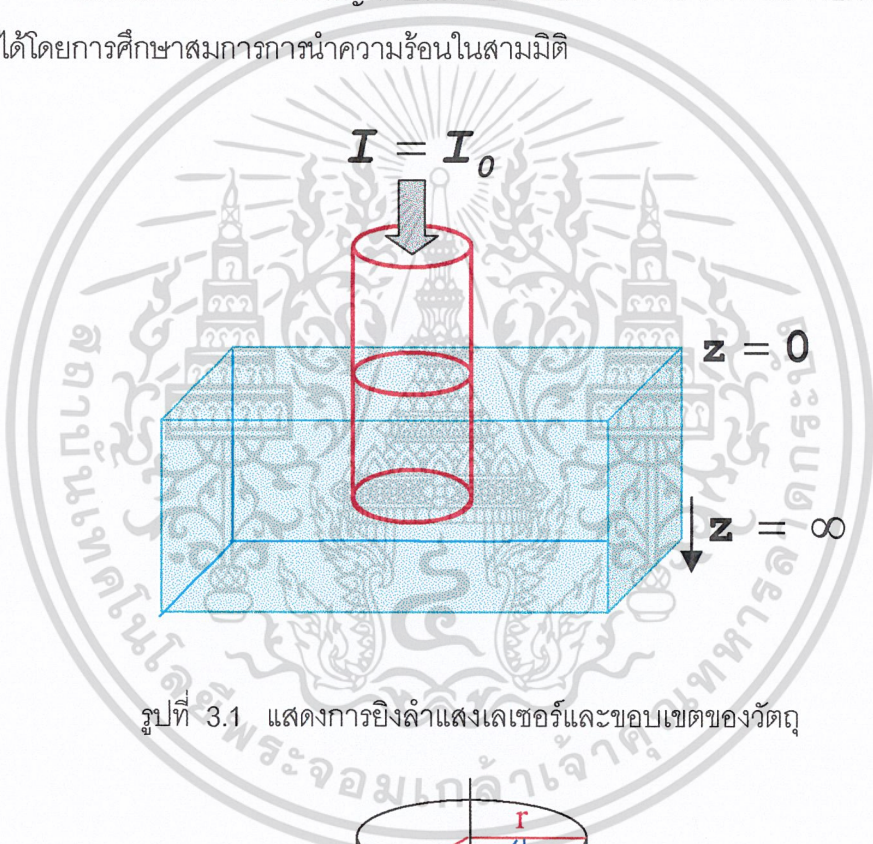
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 การวิจัยและการดำเนินการ

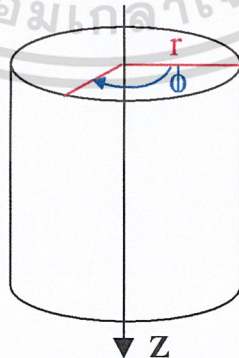
3.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการหาการกระจายของอุณหภูมิ

ในกระบวนการการทำสัญลักษณ์ด้วยเลเซอร์การศึกษาการกระจายความร้อนในชั้นงานทำได้โดยการศึกษาสมการการนำความร้อนในสามมิติ



รูปที่ 3.1 แสดงการยิงลำแสงเลเซอร์และขอบเขตของวัตถุ



รูปที่ 3.2 แสดงรูปพิกัดทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.1 และ รูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่า มีการยิงลำแสงเลเซอร์ด้วยความเข้ม I รัศมี r ลงบนผิววัตถุที่มีความหนา $z = \infty$ (Semi-infinite Slab) เมื่อลำแสงเลเซอร์ตกกระทบชิ้นงาน ความร้อนจะแผ่กระจายไปทุกทิศทางในชิ้นงาน ในโครงการนี้จะเป็นการศึกษาการกระจายความร้อนที่เกิดจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์ เพื่อนำไปหาการกระจายของอุณหภูมิ (Temperature Distribution) ภายใต้สภาวะคงตัว (Steady State Condition) โดยอยู่ภายใต้สมมติฐานบ้างข้อต่อไปนี้

1. การกระจายความร้อนภายในโลหะเกิดจากการนำความร้อน (Heat Condition) เท่านั้น
2. ค่าคงที่ที่เกี่ยวข้อง เช่น Thermal conductivity : k , Thermal diffusivity : α , ค่าความจุความร้อนจำเพาะ : C_p มีค่าคงที่
3. บริเวณที่ความร้อนกระจายไปถึงน้อยมาก เมื่อเทียบกับขนาดของชิ้นงาน
4. ลำแสงเลเซอร์ถูกประมาณให้มีความเข้มคงที่ $I = I_0$ ภายในรัศมี r ดังนั้นระบบแกนอ้างอิงที่เหมาะสม คือ ระบบแกนอ้างอิงทรงกระบอก (Cylindrical Coordinate)

จากสมมติฐานเหล่านี้ สมการการนำความร้อน (Heat Conduction Equation) ภายใต้สภาวะคงตัวเขียนได้เป็น

Governing Equation

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} (r, z) \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} (r, z) = 0 \quad (3.1)$$

โดยที่มีเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ดังนี้

$$\text{ที่ } z = 0 \quad -k \frac{\partial T}{\partial z} = AI_0 = f(r) \quad (3.2a)$$

$$\text{ที่ } z = \infty \quad -k \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (3.2b)$$

$$\text{ที่ } r = \infty \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (3.2c)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแก้สมการที่ (3.1) สามารถทำได้โดยการใช้ **Hankel Transform**

$$\bar{T}(\beta, z) = \int_0^{\infty} r J_0(\beta r) T(r, z) dr \quad (3.3a)$$

และ **Inversed Hankel Transform**

$$T(r, z) = \int_0^{\infty} r J_0(\beta r) \bar{T}(\beta, z) dz \quad (3.3b)$$

นำ $r J_0(\beta r)$ คูณ สมการ (3.1) จะได้

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} (r, z) \right) r J_0(\beta r) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} (r, z) r J_0(\beta r) = 0 \\ & \int_0^{\infty} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} (r, z) \right) J_0(\beta r) dr + \int_0^{\infty} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} (r, z) r J_0(\beta r) dr = 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

โดยการอินทิเกรตบางส่วน (By Part Intergration)

$$\int u dv = uv - \int v du$$

$$\int_0^{\infty} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} (r, z) \right) J_0(\beta r) dr \quad \text{จะได้} \quad u = J_0(\beta r), \quad dv = \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} (r, z) \right)$$

จากสมการ (3.4) จะได้

$$\begin{aligned} & J_0(\beta r) r \frac{\partial T}{\partial r} (r, z) \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} r \frac{\partial T}{\partial r} (r, z) \frac{dJ_0(\beta r)}{dr} dr + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \int_0^{\infty} r J_0(\beta r) T(r, z) dr = 0 \\ & - \left[r \frac{dJ_0(\beta r)}{dr} T \right]_0^{\infty} + \int_0^{\infty} T(r, z) \frac{d}{dr} \left[r \frac{dJ_0(\beta r)}{dr} \right] dr + \frac{d^2 \bar{T}}{dz^2} (\beta, z) = 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก

$$\frac{d}{dx} (x^{-n} J_n(x)) = -x^{-n} J_{n+1}(x)$$

จะได้ว่า ในส่วนของ

$$\frac{d}{dr} \left[r \frac{d}{dr} J_0(\beta r) \right] = \frac{d}{dr} \left[\beta r \frac{dJ_0(\beta r)}{d(\beta r)} \right]$$

$$= \frac{d}{dr} [-\beta r J_1(\beta r)]$$

$$= -\beta \frac{d}{d(\beta r)} [\beta r J_1(\beta r)]$$

และจาก

$$\frac{d}{dx} (x^n J_n(x)) = x^n J_{n-1}(x)$$

จะได้

$$-\beta \frac{d}{d(\beta r)} [\beta r J_1(\beta r)] = -\beta^2 r J_0(\beta r)$$

$$\int_0^{\infty} T(r, z) [-\beta^2 r J_0(\beta r)] dr + \frac{d^2 \bar{T}}{dz^2}(\beta, z) = 0$$

$$\frac{d^2 \bar{T}}{dz^2}(\beta, z) - \beta^2 \bar{T}(\beta, z) = 0 \quad (3.6)$$

ซึ่งคำตอบของสมการ (3.6) อยู่ในรูปสมการ (3.7)

$$\bar{T}(\beta, z) = C_1 e^{\beta z} + C_2 e^{-\beta z} \quad (3.7)$$

จากสมการ (3.2a) และ (3.3a)

$$-k \frac{\partial}{\partial z} \int_0^{\infty} T(r, z) r J_0(\beta r) dr = \int_0^{\infty} A I_0 r J_0(\beta r) dr$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-k \frac{\partial \bar{T}(\beta, z)}{\partial z} = \bar{f}(\beta) \quad \text{ที่ } z=0 \quad (3.8a)$$

จากสมการ (3.2b) และ (3.3a)

$$-k \frac{\partial}{\partial z} \int_0^{\infty} T(r, z) r J_0(\beta r) dr = 0$$

$$-k \frac{\partial \bar{T}(\beta, z)}{\partial z} = 0 \quad \text{ที่ } z=\infty \quad (3.8b)$$

จากสมการ (3.7) และ (3.8b)

$$\begin{aligned} -k \frac{\partial \bar{T}(\beta, z)}{\partial z} &= 0 \\ -k [C_1 \beta e^{\beta z} - C_2 \beta e^{-\beta z}]_{z=\infty} &= 0 \\ \text{ดังนั้น} \quad C_1 &= 0 \end{aligned} \quad (3.9a)$$

จากสมการ (3.7) และ (3.8a)

$$\begin{aligned} -k \frac{\partial \bar{T}(\beta, z)}{\partial z} &= \bar{f}(\beta) \\ -k [C_1 \beta e^{\beta z} - C_2 \beta e^{-\beta z}]_{z=0} &= \bar{f}(\beta) \\ -k [-C_2 \beta e^{-\beta z}] &= \bar{f}(\beta) \end{aligned}$$

$$-k [-C_2 \beta] = \bar{f}(\beta)$$

$$\text{จะได้} \quad C_2 = \frac{\bar{f}(\beta)}{k\beta} \quad (3.9b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นผลเฉลยสมการ (3.7) เขียนได้ดังรูป

$$\bar{T}(\beta, z) = C_2 e^{-\beta z} = \frac{\bar{f}(\beta)}{k\beta} e^{-\beta z} \quad (3.10)$$

เมื่อเราให้

$$f(r) = AI_0$$

จะได้

$$\begin{aligned} \bar{f}(\beta) &= \int_0^w f(r) r J_0(\beta r) dr \\ &= \int_0^w AI_0 r J_0(\beta r) dr \end{aligned}$$

กำหนดให้ $r = w, u = 1$ แล้ว $u = r/w$ ดังนั้น $r = uw$

จะได้

$$dr = w du \quad \text{ดังนั้น} \quad du = (1/w) dr$$

จากสมการการอินทิเกรตของ Bessel Function

$$\int_0^1 x^{v+1} J_v(ax) dx = a^{-1} J_{v+1}(a) \quad ; [Re v > 1]$$

จะได้

$$\begin{aligned} AI_0 \int_0^w r J_0(\beta r) dr &= AI_0 \int_0^1 (uw) J_0(\beta uw) w du \\ &= AI_0 w^2 \int_0^1 u J_0(\alpha u) du \quad ; \alpha = \beta w \\ &= \frac{AI_0 w^2 J_1(\alpha)}{\alpha} \\ &= \frac{AI_0 w^2 J_1(\beta w)}{\beta w} \\ &= \frac{AI_0 w J_1(\beta w)}{\beta} \\ \bar{f}(\beta) &= \frac{AI_0 w J_1(\beta w)}{\beta} \end{aligned} \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.10) และ (3.11) จะได้

$$\bar{T}(\beta, z) = \frac{AI_0 w J_1(\beta w) e^{-\beta z}}{k\beta^2} \quad (3.12)$$

ค่าของการกระจายของอุณหภูมิที่ขึ้นกับ r, z หาได้โดยการใช้ Inversed Hankel Transform กับสมการ (3.12) จะได้

$$\begin{aligned} T(r, z) &= \int_0^{\infty} r J_0(\beta r) \bar{T}(\beta, z) d\beta \\ &= \frac{AI_0 w r}{k} \int_0^{\infty} \frac{J_0(\beta r) J_1(\beta w) e^{-\beta z}}{\beta^2} d\beta \end{aligned} \quad (3.13)$$

จากสมการการอินทิเกรตของ Bessel Function

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} x^{\lambda-1} e^{-\alpha x} J_{\mu}(\beta x) J_{\nu}(\gamma x) dx &= \frac{\beta^{\mu} \gamma^{\nu}}{\Gamma(\nu+1)} 2^{-\nu-\mu} \alpha^{-\lambda-\mu-\nu} \times \\ &\sum_{m=0}^{\infty} \frac{\Gamma(\lambda + \mu + \nu + 2m)}{m! \Gamma(\mu + m + 1)} \times \\ &F(-m, -\mu - m; \nu + 1; \frac{\gamma^2}{\beta^2}) \left(-\frac{\beta^2}{4\alpha^2}\right)^m \end{aligned} \quad (3.14)$$

โดยที่ $[\text{Re}(\lambda + \mu + \nu) > 0, \text{Re}(\alpha \pm i\beta \pm i\gamma) > 0]$

จากสมการ (3.14) จะได้ว่า

$$\lambda = -1, \alpha = Z, \mu = 0, \beta = r, \nu = 1, \gamma = w, \chi = \beta$$

และจากสมการ (3.13) จะได้

$$\begin{aligned} T(r, z) &= \frac{AI_0 w r}{k} \left\{ \frac{\beta^{\mu} \gamma^{\nu}}{\Gamma(\nu+1)} 2^{-\nu-\mu} \alpha^{-\lambda-\mu-\nu} \times \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{\Gamma(\lambda + \mu + \nu + 2m)}{m! \Gamma(\mu + m + 1)} \right. \right. \\ &\left. \left. F(-m, -\mu - m; \nu + 1; \frac{\gamma^2}{\beta^2}) \left(-\frac{\beta^2}{4\alpha^2}\right)^m \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.15) พบว่า ค่าผลเฉลย $T(r,z)$ อยู่ในรูปของ Gamma Function : $\Gamma(x)$ และ Hypergeometric Function : $F(-m, -\mu - m; \nu + 1; \frac{\gamma^2}{\beta^2}) \left(-\frac{\beta^2}{4\alpha^2} \right)^m$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ซับซ้อน อย่างไรก็ตาม การหาค่า $T(r,z)$ ในรูปแบบตัวเลขสามารถทำได้โดยการประมาณ (Approximation) และวิธีการทาง Numerical Calculation ซึ่งเป็นแผนงานที่จะดำเนินการต่อไปในอนาคต

3.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการหาความลึกของรอยสัญลักษณ์ สมการที่ใช้คำนวณในทางทฤษฎี

Hole Depth : Due to Vaporization (D_H)

$$\begin{aligned} E_i(1+R_s) &= \pi r_0^2 D_H \rho [C_p(T_v - T_0) + L_m + L_v] \\ E_i(1+R_s) &= \pi r_0^2 z_d \rho [C_p(T_v - T_0) + L_m + L_v] \\ E_i A &= \pi r_0^2 z_d \rho [C_p(T_v - T_0) + L_m + L_v] \end{aligned} \quad (3.16)$$

โดยที่

- E_i = ค่าพลังงานตกกระทบของแสงเลเซอร์ (Energy of incident laser beam)
- A = ค่าการดูดกลืนของสาร (Absorptivity of material) = $(1 + R_s)$
- r_0 = รัศมีของลำแสง (Beam radius)
- Z_d = ความลึก (Depth)
- ρ = ความหนาแน่น (Density)
- C_p = ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity)
- T_v = อุณหภูมิที่จุดเดือด (Boiling temperature)
- T_0 = อุณหภูมิห้อง (Room temperature)
- L_m = ความร้อนแฝงจำเพาะ (Specific latent heat)
- L_v = ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (Latent heat of vaporization)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_s = ค่าการสะท้อนที่ผิวสาร (Reflectance of material surface)

ค่าที่ใช้ในทางทฤษฎี

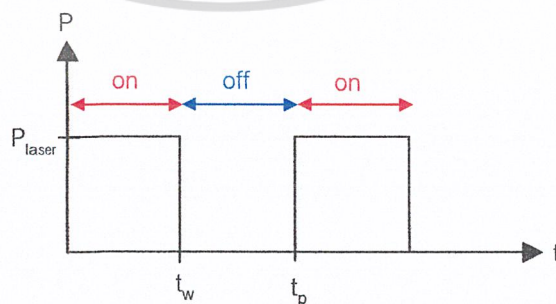
	เหล็ก	อะลูมิเนียม
C_p	$0.106 \text{ cal g}^{-1}\text{K}^{-1}$	$0.215 \text{ cal g}^{-1}\text{K}^{-1}$
ρ	7.7 g / cm^3	2.7 g / cm^3
T_v	3130 K	2540 K
T_0	273 K	273 K
L_m	$2.72 \times 10^5 \text{ J / Kg}$	$3.55 \times 10^5 \text{ J / Kg}$
L_v	$6.10 \times 10^6 \text{ J / Kg}$	$1.052 \times 10^6 \text{ J / Kg}$
A	0.25 (Ref. 6)	0.034

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

ในการหาค่าพลังงาน E_i เนื่องจากแสงเลเซอร์ที่ใช้เป็นแบบ Q-Switched Nd:YAG

Laser ดังนั้นค่าพลังงาน E_i สามารถหาได้จากสมการ

$$E_i = \int_0^{t_w} P dt = \int_0^{t_w} P dt + \int_{t_w}^{t_p} P dt \quad (3.17)$$



รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังของเลเซอร์และเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

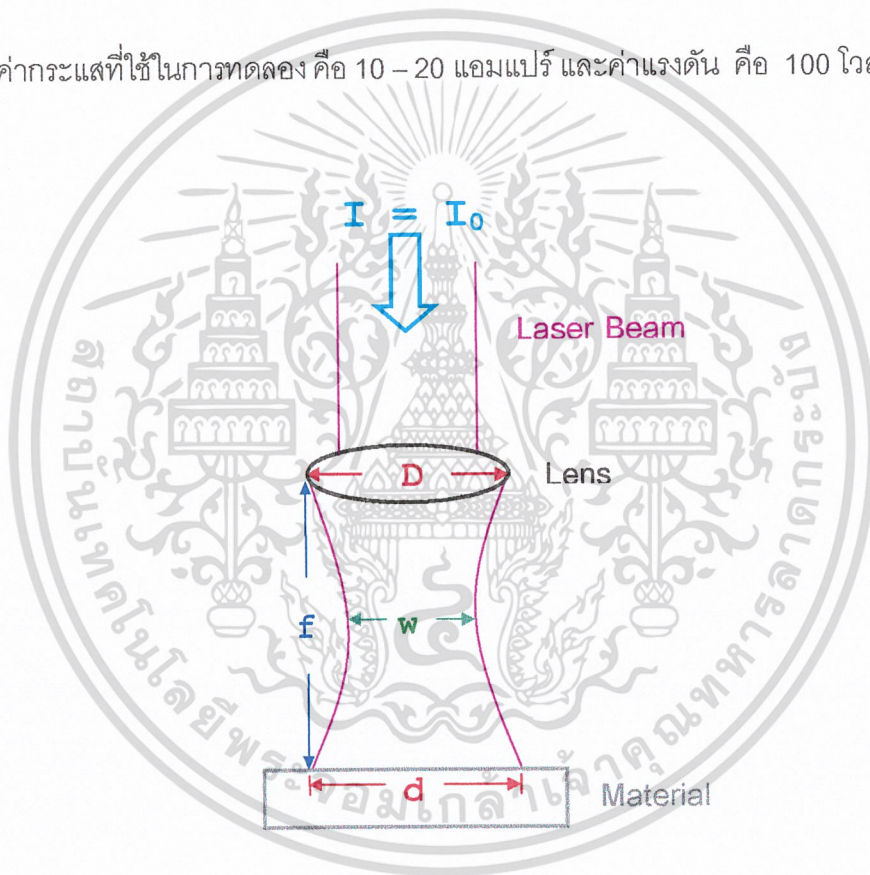
จากรูปแสดงความสัมพันธ์ของ P กับ t ทำให้ได้

$$E_i = Pt_w \quad (3.18)$$

และ

$$P_{laser} = 1\%P_{in} = \left(\frac{1}{100}\right)IV \quad (3.19)$$

โดยที่ ค่ากระแสที่ใช้ในการทดลอง คือ 10 – 20 แอมแปร์ และค่าแรงดัน คือ 100 โวลต์



รูปที่ 3.4 แสดงแนวของลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนวัสดุ

และ

$$d = \frac{\lambda f}{D} = 2R \approx w \quad (3.20)$$

โดยที่ d = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนวัสดุ (Diameter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

λ = ความยาวคลื่นของเลเซอร์ (Wave length)

f = ระยะโฟกัสของเลนส์ (Focus lens)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงเลเซอร์ที่จุดโฟกัสเลนส์(Diameter)

R = รัศมีของลำแสง (Beam radius)

W = เส้นผ่านศูนย์กลางที่สั้นที่สุดของลำแสง (Beam waist)

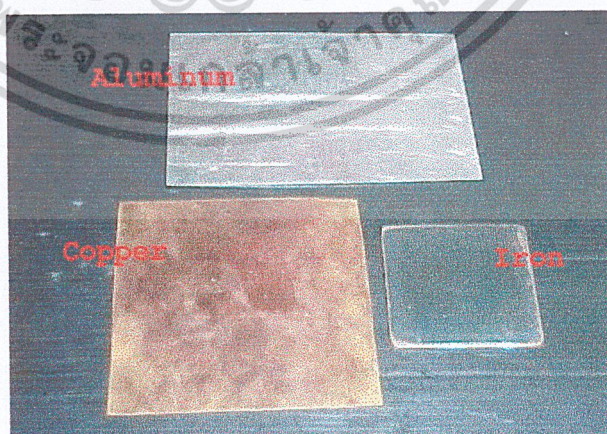
3.2 การทำสัญลักษณ์บนโลหะ

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. นีโอดีเมียมแยกเลเซอร์ (Nd:YAG laser)
2. แผ่นอะลูมิเนียม, เหล็ก และทองแดง
3. ทราเวลลิงไมโครสโคป (Traveling microscope)
4. วีดีโอออปติคัลไมโครสโคป (VDO optical microscope:KEYENCE VH7000)
5. แผ่นดิสก์เกตบันทึกข้อมูล
6. นาฬิกาจับเวลา, เข็ม, ไฟฉาย

3.2.2 วิธีทดลอง

1. ทำการทดลองโดยใช้ Nd:YAG เลเซอร์ทำสัญลักษณ์ลงบนแผ่นวัสดุคือ เหล็ก, อะลูมิเนียม และทองแดง โดยทำสัญลักษณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า เวลา(3, 5 และ 10 วินาที), Repetition Rate (20, 30 และ 40 กิโลเฮิรตซ์) และ กำลังอินพุท (ที่กระแสนินพุท 10, 15 และ 20 แอมแปร์)



รูปที่ 3.5 แผ่นวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการวัดขนาดความกว้างและความลึกของรูที่ได้มีการทำสัญลักษณ์ ด้วยเครื่อง VDO optical microscope และ Traveling microscope ตามลำดับ ทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากทฤษฎีและการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง
3. สรุปผลการทดลอง

3.2.3 สมบัติเฉพาะของนีโอติเมียมแยกเลเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง

1. กระแสอินพุท 15 และ 20 แอมแปร์
2. Repetition rate Q-switch 20,30 และ 40 กิโลเฮิร์ตซ
3. Pulse width 5×10^{-6} วินาที
4. ค่าการเปลี่ยนแปลงจากกำลังอินพุทเป็นกำลังเอาต์พุท 1%

3.2.4 ข้อมูลของโลหะที่ใช้ในการทดลอง

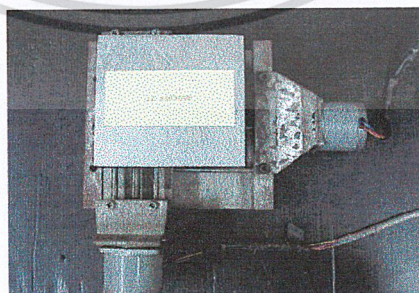
วัสดุ	ความหนา(มิลลิเมตร)	ความกว้าง (มิลลิเมตร)	ความยาว(มิลลิเมตร)
เหล็ก	2.03	60	60
อะลูมิเนียม	0.84	92	137
ทองแดง	0.22	102	102

ตารางที่ 3.2 แสดงข้อมูลของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.3 การออกแบบและจัดทำอุปกรณ์เครื่องกวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย

3.3.1 อุปกรณ์

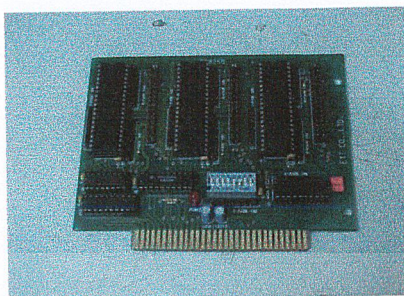
1. เครื่องกวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย



รูปที่ 3.6 แสดงเครื่องกวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การ์ด 8255 ชนิด ISA bus



รูปที่ 3.7 แสดงการ์ด 8255 ชนิด ISA bus

3. คอมพิวเตอร์ 1 ชุด
4. แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply)
5. วงจรขับสแต็ปเปอร์มอเตอร์



รูปที่ 3.8 แสดงวงจรขับสแต็ปเปอร์มอเตอร์

3.2.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ออกแบบวงจรขับสแต็ปเปอร์มอเตอร์

ในการกระตุ้นสแต็ปเปอร์มอเตอร์ให้ทำงาน วงจรที่ใช้ขับนอกจากจะให้ความต่างศักย์แล้ว ยังต้องให้กระแสพอที่จะทำให้มอเตอร์ทำงานด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการกระตุ้นสเต็ปเปอร์มอเตอร์จะเป็นในลักษณะการสวิตช์ การป้อนความต่างศักย์ให้แก่ขดลวดของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ตามลักษณะการกระตุ้นไม่ว่าจะเป็นแบบครึ่งสเต็ป (half step) หรือแบบหนึ่งเฟส (full step) ในโครงงานพิเศษนี้จะใช้มอสเฟตชนิดเอ็น (MOSFET-n channel) เบอร์ IRF510 เป็นตัวสวิตช์ โดยเมื่อเอาท์พุทออกจากการ์ด 8255 จะผ่านไอซี 74LS244 ซึ่งทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ ในวงจรนี้จะประกอบด้วยไอซีออปโตคัปเปิล (Opto Couple) เบอร์ 4N25 ทำหน้าที่เป็นตัวกั้นทางแสง โดยมี LED บอกลสถานะต่ออยู่ ถ้าสัญญาณที่ออกจาก 74LS244 เป็น 5 โวลต์ (High level) LED จะดับ แต่ถ้าเป็น 0 โวลต์ (Low level) LED จะสว่าง ที่เอาท์พุทของ 4N25 จะไม่ต่อกับขาเกตของ IRF510 โดยมีตัวต้านทาน 100 กิโลโอห์ม ต่ออยู่ระหว่างขาเกต (gate) กับขาซอร์ส (source) โดยการทำงานเมื่อเอาท์พุทจาก 74LS244 เป็น 0 โวลต์ จะทำให้เกิดความต่างศักย์คร่อมตัวต้านทาน 100 กิโลโอห์มที่ต่ออยู่ระหว่างขาเกตกับขาซอร์ส ซึ่งจะทำให้กระแสสามารถไหลผ่านจากขาเดรนไปยังขาซอร์สมีค่าสูงสุด ซึ่งจะเป็นช่วงที่เป็นการให้การกระตุ้นกับสเต็ปเปอร์มอเตอร์ และเมื่อเอาท์พุทจาก 74LS244 เป็น 5 โวลต์จะทำให้ความต่างศักย์ที่คร่อมตัวต้านทาน 100 กิโลโอห์มหายไป ทำให้ไม่มีกระแสไหลจากเดรนไปซอร์ส คือเป็นช่วงที่หยุดการให้การกระตุ้นกับสเต็ปเปอร์มอเตอร์

2. ต่อบอร์ดอุปกรณ์กับสเต็ปเปอร์มอเตอร์
3. ประกอบชุดอุปกรณ์เครื่องกวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย
4. เขียนโปรแกรมควบคุมชุดอุปกรณ์เครื่องกวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวายเพื่อแสดงผลเป็นตัวเลข 0-9 โดยใช้โปรแกรม visual basic

การออกแบบโปรแกรมสำหรับใช้ในการควบคุมจากการ x-y scan จะใช้โปรแกรม Visual Basic เป็นในลักษณะ GUI(Graphic User Interface) ในส่วนของการออกแบบโปรแกรมจะแบ่งการทำงานออกเป็น

1. ส่วนที่ติดต่อกับการ์ด 8255

เนื่องจากโปรแกรม Visual Basic ไม่สามารถอ้างถึงตำแหน่งอินพุท/เอาท์พุท ได้โดยตรงจึงต้องมีการนำโปรแกรมอื่นที่เขียนเพื่อให้โปรแกรม Visual Basic สามารถอ้างถึงตำแหน่งอินพุท/เอาท์พุท ได้โดยผ่านโปรแกรมนั้น ซึ่งเราเรียกว่าโมดูล (modules) มาใช้ ในโปรแกรมนี้อาจใช้โมดูลที่ชื่อว่า dllport.dll และทำการสร้างโมดูลที่ชื่อว่า module1.bas ที่ประกาศข้อความภายใน

```
Public Declare Sub Out Lib "DllPort.dll" Alias "Out32" (ByVal PortAddress As Integer, ByVal value As Integer)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Public Declare Function Inp Lib "DllPort.dll" Alias "Inp32" (ByVal PortAddress As Integer) As Integer

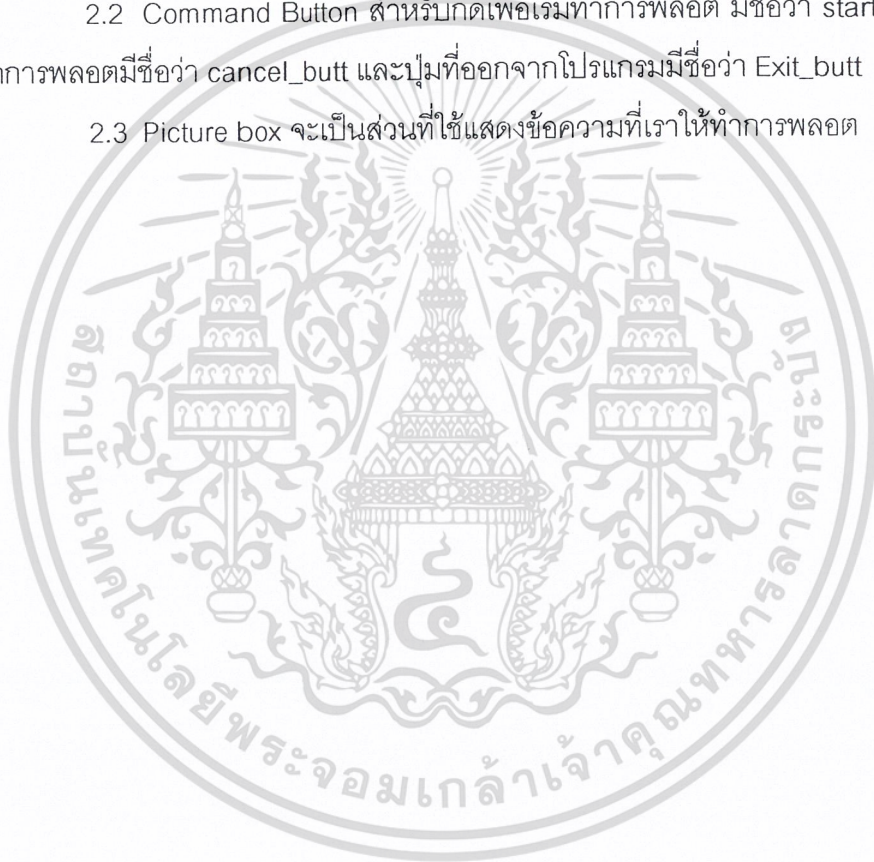
ซึ่งเราสามารถอ้างถึงตำแหน่งอินพุทและเอาท์พุทได้โดยผ่านฟังก์ชัน Out() และ Inp()

2. ส่วนของ Form ที่มีชื่อว่า frmLaser โดยจะเป็นส่วนหน้าต่างหลักของโปรแกรม ซึ่งประกอบด้วย

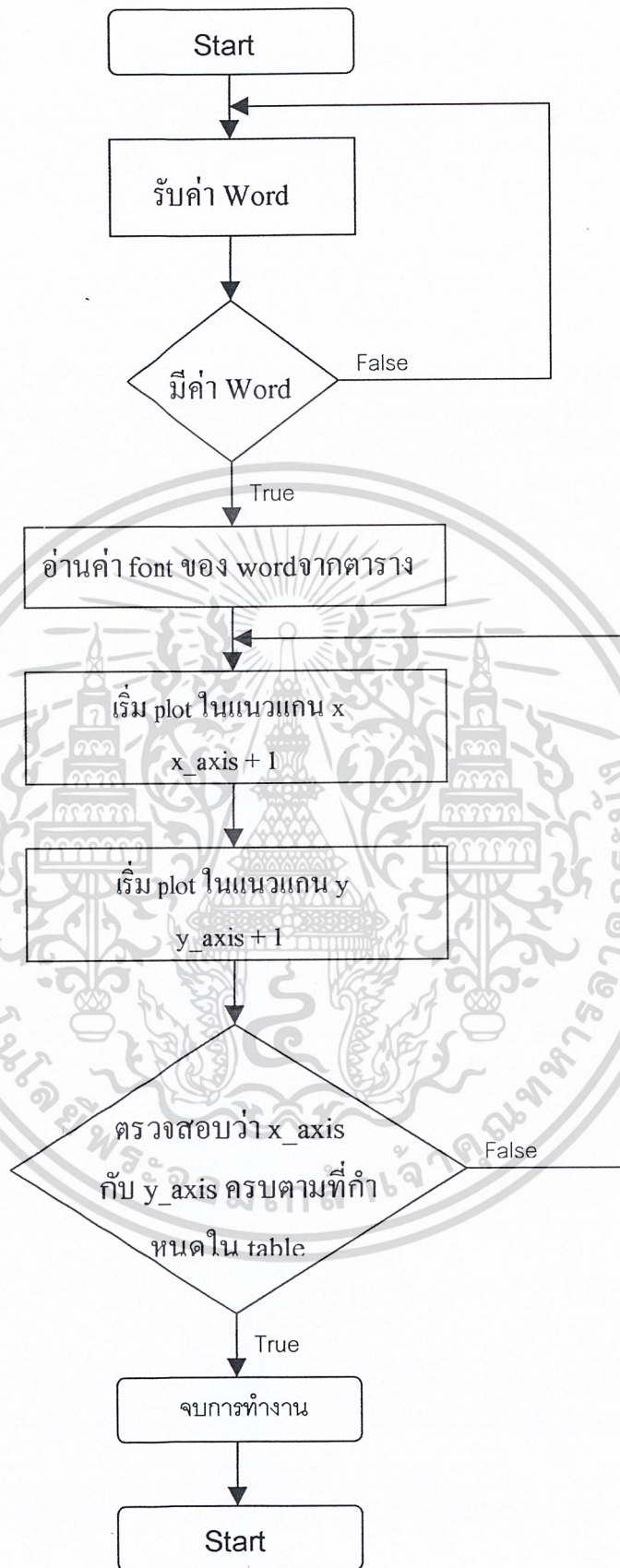
2.1 Input box สำหรับใส่ข้อความ

2.2 Command Button สำหรับกดเพื่อเริ่มทำการพลอต มีชื่อว่า start_buttn ที่ใช้ยกเลิกการพลอตมีชื่อว่า cancel_buttn และปุ่มที่ออกจากโปรแกรมมีชื่อว่า Exit_buttn

2.3 Picture box จะเป็นส่วนที่ใช้แสดงข้อความที่เราให้ทำการพลอต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



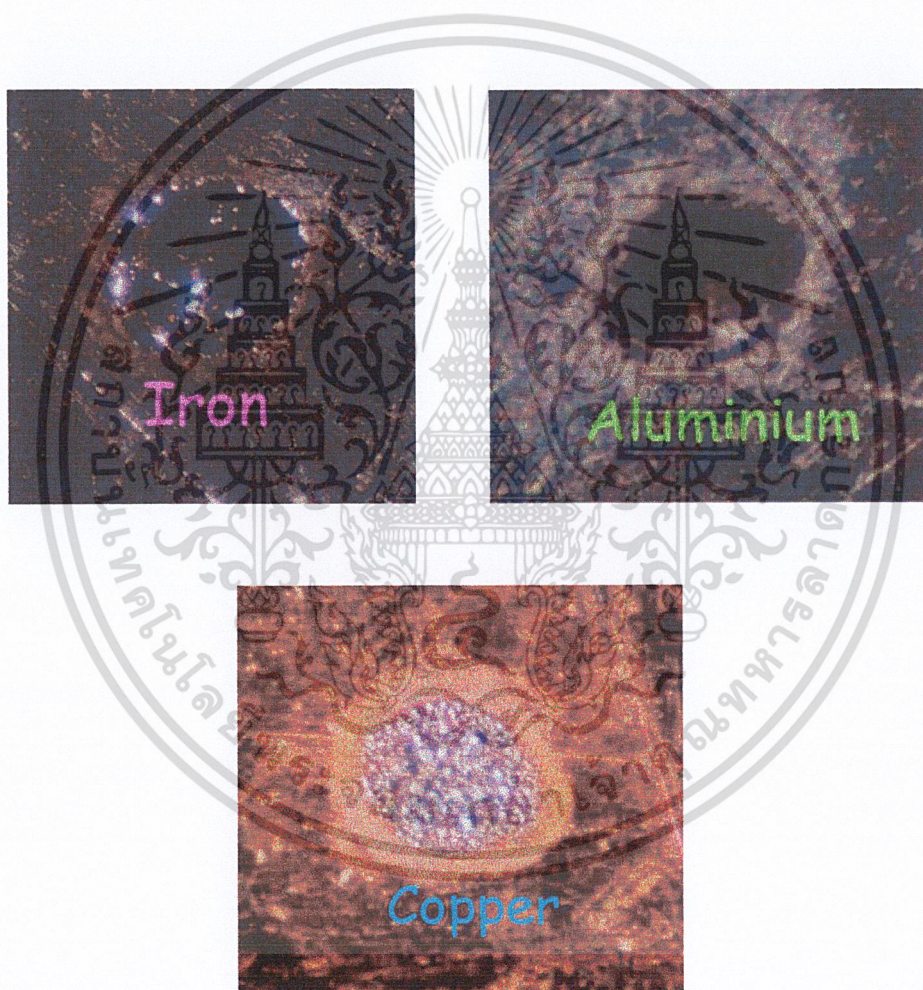
รูปที่ 3.10 แสดงแผนภาพการทำงานของชุดอุปกรณ์เครื่องกวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์

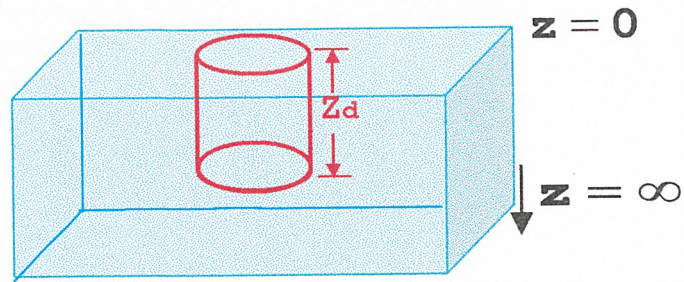
4.1 ผลที่ได้จากการทดลองการทำสัญลักษณ์ด้วยเลเซอร์บนวัสดุต่าง ๆ

4.1.1 ผลการทดลองของการวัดความลึก



รูปที่ 4.1 แสดงรูปของรูบนวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ในการวัดความลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงการวัดความลึกของรูบนวัสดุ

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองของการวัดความลึกบนเหล็ก

เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิรตซ์)	Power input (วัตต์)	ความลึก (มิลลิเมตร)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
3	20	1500	0.146	0.150	0.140	0.145
5	20	1500	0.157	0.173	0.156	0.162
10	20	1500	0.456	0.354	0.421	0.410

เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิรตซ์)	Power input (วัตต์)	ความลึก (มิลลิเมตร)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
3	30	1500	0.23	0.21	0.245	0.228
5	30	1500	0.323	0.33	0.325	0.326
10	30	1500	0.514	0.521	0.495	0.510

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิรตซ์)	Power input (วัตต์)	ความลึก (มิลลิเมตร)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
3	40	1500	0.351	0.355	0.349	0.352
5	40	1500	0.365	0.423	0.358	0.382
10	40	1500	0.536	0.651	0.563	0.583

เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิรตซ์)	Power input (วัตต์)	ความลึก (มิลลิเมตร)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
3	20	2000	0.155	0.148	0.150	0.151
5	20	2000	0.366	0.433	0.325	0.375
10	20	2000	0.523	0.485	0.550	0.519

เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิรตซ์)	Power input (วัตต์)	ความลึก (มิลลิเมตร)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
3	30	2000	0.256	0.350	0.248	0.285
5	30	2000	0.564	0.532	0.513	0.536
10	30	2000	0.895	0.923	0.898	0.905

เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิรตซ์)	Power input (วัตต์)	ความลึก (มิลลิเมตร)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
3	40	2000	0.421	0.398	0.452	0.424
5	40	2000	0.785	0.852	0.798	0.812
10	40	2000	1.435	0.985	0.987	1.136

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลที่ได้จากทางทฤษฎี

ตารางที่ 4.2 แสดงผลที่ได้จากทางทฤษฎี

เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิรตซ์)	Power input (วัตต์)	ความลึก (มิลลิเมตร)
3	20	1500	0.211
5	20	1500	0.352
10	20	1500	0.703

เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิรตซ์)	Power input (วัตต์)	ความลึก (มิลลิเมตร)
3	30	1500	0.316
5	30	1500	0.527
10	30	1500	1.055

เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิรตซ์)	Power input (วัตต์)	ความลึก (มิลลิเมตร)
3	40	1500	0.422
5	40	1500	0.703
10	40	1500	1.406

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

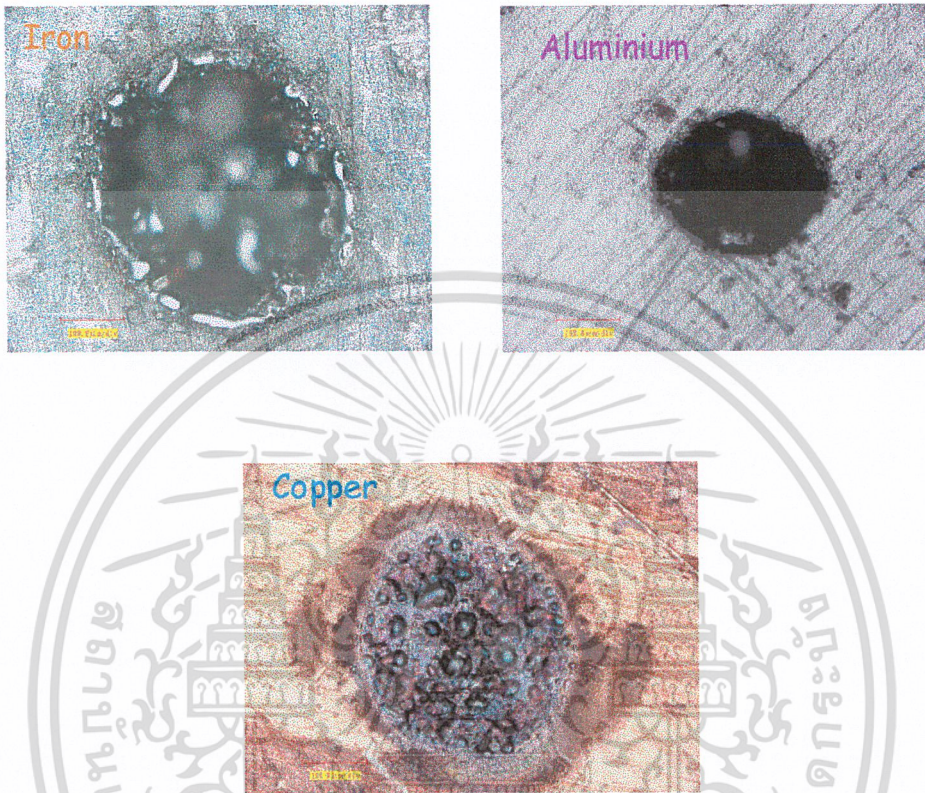
เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิรท์ซ)	Power input (วัตต์)	ความลึก (มิลลิเมตร)
3	20	2000	0.281
5	20	2000	0.469
10	20	2000	0.938

เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิรท์ซ)	Power input (วัตต์)	ความลึก (มิลลิเมตร)
3	30	2000	0.422
5	30	2000	0.703
10	30	2000	1.406

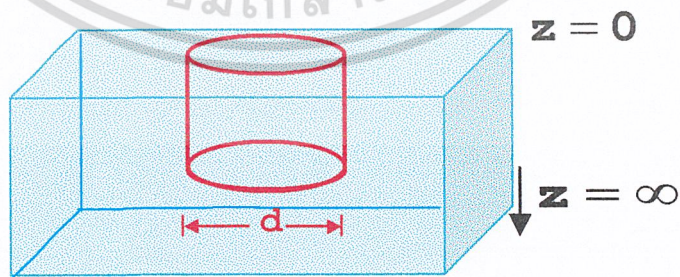
เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิรท์ซ)	Power input (วัตต์)	ความลึก (มิลลิเมตร)
3	40	2000	0.563
5	40	2000	0.938
10	40	2000	1.875

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ผลการทดลองของการวัดความกว้างของรูบนวัสดุต่าง ๆ



รูปที่ 4.3 แสดงรูปของรูบนวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ในการวัดความกว้าง



รูปที่ 4.4 แสดงการวัดความกว้างของรูบนวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองของการวัดความกว้างของรูบนเหล็ก

เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิรตซ์)	Power input (วัตต์)	ความกว้าง (ไมโครเมตร)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
3	20	1500	360.4	337.9	330.6	343.0
5	20	1500	344.9	361.2	350.4	352.2
10	20	1500	453.9	336.6	325.8	372.1

เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิรตซ์)	Power input (วัตต์)	ความกว้าง (ไมโครเมตร)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
3	30	1500	285.0	302.6	302.7	296.8
5	30	1500	300.5	326.1	322.6	316.4
10	30	1500	374.6	308.1	316.4	333.0

เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิรตซ์)	Power input (วัตต์)	ความกว้าง (ไมโครเมตร)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
3	40	1500	303.9	310.6	275.4	296.6
5	40	1500	299.9	296.6	305.5	300.7
10	40	1500	315.8	330.9	325.2	324.0

เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิรตซ์)	Power input (วัตต์)	ความกว้าง (ไมโครเมตร)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
3	20	2000	366.5	409.2	389.4	361.7
5	20	2000	427.4	417.7	360.8	402.0
10	20	2000	408.0	401.7	425.6	411.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิรตซ์)	Power input (วัตต์)	ความกว้าง (ไมโครเมตร)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
3	30	2000	387.7	400.4	429.7	408.0
5	30	2000	433.7	433.7	419.9	429.1
10	30	2000	424.3	425.2	435.4	428.3

เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิรตซ์)	Power input (วัตต์)	ความกว้าง (ไมโครเมตร)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
3	40	2000	396.6	350.0	396.6	381.1
5	40	2000	377.7	373.8	379.0	376.8
10	40	2000	400.5	417.5	409.2	409.1

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองของการวัดความกว้างของรูบนอะลูมิเนียม

เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิรตซ์)	Power input (วัตต์)	ความกว้าง (ไมโครเมตร)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
3	20	1500	195.6	203.9	178.9	192.8
5	20	1500	211.4	206.0	213.9	210.4
10	20	1500	219.3	201.7	224.4	215.1

เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิรตซ์)	Power input (วัตต์)	ความกว้าง (ไมโครเมตร)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
3	30	1500	190.0	206.9	192.0	196.3
5	30	1500	225.0	200.2	195.9	207.0
10	30	1500	184.4	233.2	228.9	215.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิร်ทซ)	Power input (วัตต์)	ความกว้าง (ไมโครเมตร)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
3	40	1500	192.3	119.6	150.4	154.1
5	40	1500	178.2	189.4	202.0	189.9
10	40	1500	208.4	212.8	192.3	204.5

เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิร်ทซ)	Power input (วัตต์)	ความกว้าง (ไมโครเมตร)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
3	20	2000	289.6	296.1	286.6	290.8
5	20	2000	286.6	290.7	301.9	293.1
10	20	2000	312.8	294.0	303.1	303.3

เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิร်ทซ)	Power input (วัตต์)	ความกว้าง (ไมโครเมตร)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
3	30	2000	251.4	264.7	247.3	254.5
5	30	2000	259.7	272.8	270.4	267.6
10	30	2000	275.2	302.0	289.3	288.8

เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิร်ทซ)	Power input (วัตต์)	ความกว้าง (ไมโครเมตร)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
3	40	2000	255.3	252.1	194.9	234.1
5	40	2000	258.3	275.7	259.6	264.5
10	40	2000	276.5	258.7	281.7	272.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองของการวัดความกว้างของรูบนทองแดง

เวลา (วินาที)	Repetition rate (กิโลเฮิรตซ์)	Power input (วัตต์)	ความกว้าง (ไมโครเมตร)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
10	40	2000	236.6	274.1	262.9	257.9
15	40	2000	351.0	321.8	338.2	337.0
20	40	2000	331.2	371.4	395.4	366.0



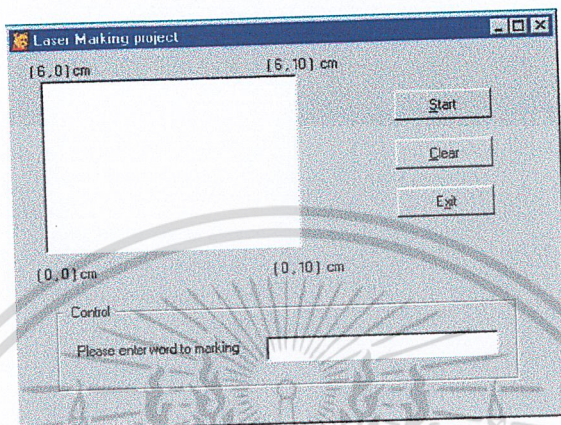
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลที่ได้จากการทดลองชุดอุปกรณ์เครื่องกวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย

4.2.1 ลักษณะการทำงานของโปรแกรมมีดังต่อไปนี้

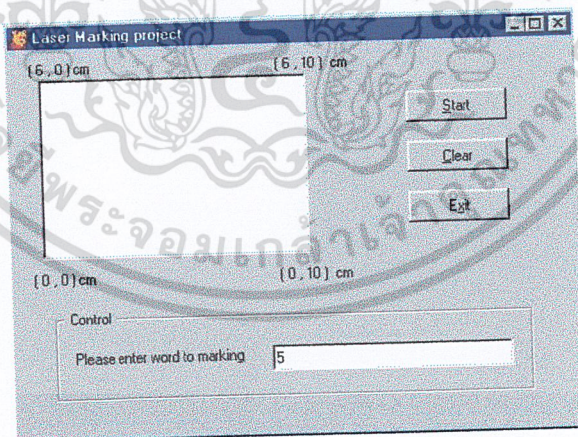
1. เริ่มต้นจากการเปิดโปรแกรม Laser Marking project.exe ซึ่งจะปรากฏหน้าจอดังรูปที่

4.5



รูปที่ 4.5 แสดงภาพโปรแกรม Laser Marking project.exe

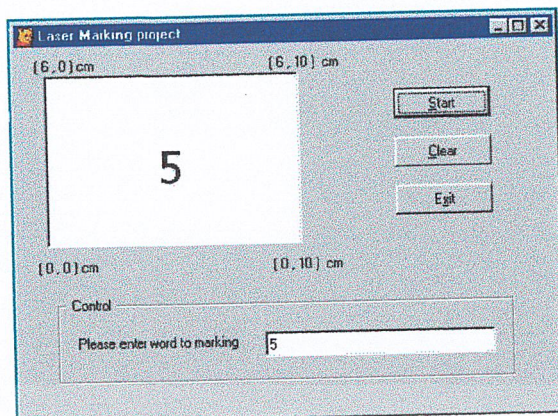
2. จากนั้นใส่ค่าตัวเลข (0-9) ที่ต้องการจะทำการพลอตลงในช่อง "Please enter word to marking" ในส่วนของ Control ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงภาพการใส่ค่าตัวเลขที่ต้องการพลอตลงในโปรแกรม

3. จากนั้นกดปุ่ม "Start" ภาพโปรแกรมจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.7 และอุปกรณ์เครื่องกวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย จะเริ่มทำการพลอตตัวเลข

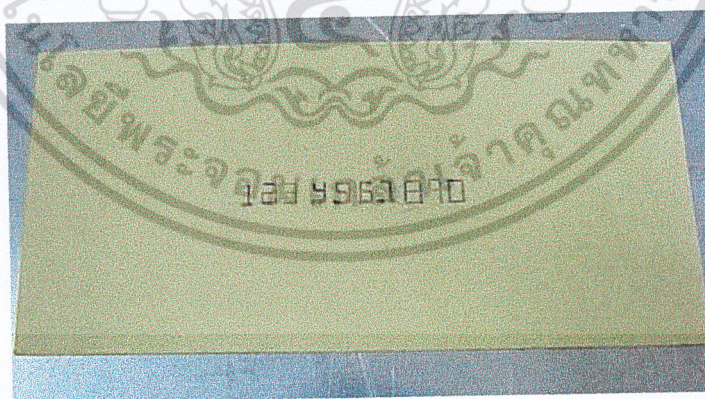
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงตัวอย่างการใช้โปรแกรมในการควบคุมชุดอุปกรณ์เครื่องวาดในแนวแกน
เอ็กซ์และแกนวาย

4. ถ้าต้องการสั่งเลิกทำการพลอตตัวเลขให้กดปุ่ม "Clear" หน้าต่างของโปรแกรมจะกลับ
มาเป็นดังรูป 4.5
5. ถ้าต้องการออกจากโปรแกรมให้กดปุ่ม "Exit" หน้าต่างของโปรแกรมจะถูกปิดลง

4.4.2 ผลที่ได้จากการทำงานของชุดอุปกรณ์เครื่องวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกน
วาย จะได้ผลการทดลองดังรูป



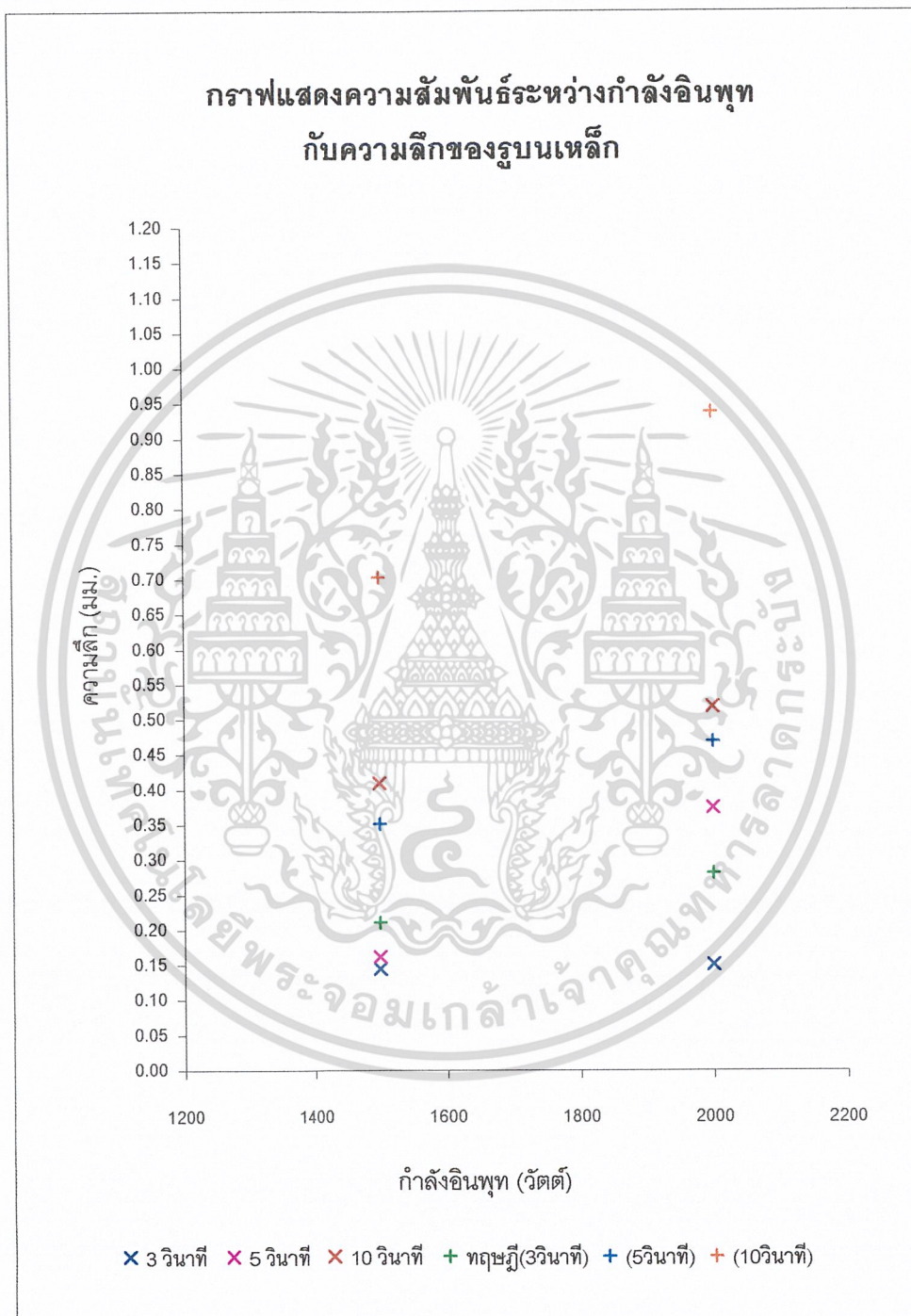
รูปที่ 4.8 แสดงภาพตัวเลขที่สามารถเขียนได้จากชุดอุปกรณ์เครื่องวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย

จะเห็นได้ว่าการสั่งโปรแกรมให้ทำการขับเคลื่อนมอเตอร์จะทำให้ชุดอุปกรณ์
เครื่องวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย สามารถเขียนตัวเลข 0-9 ออกมาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

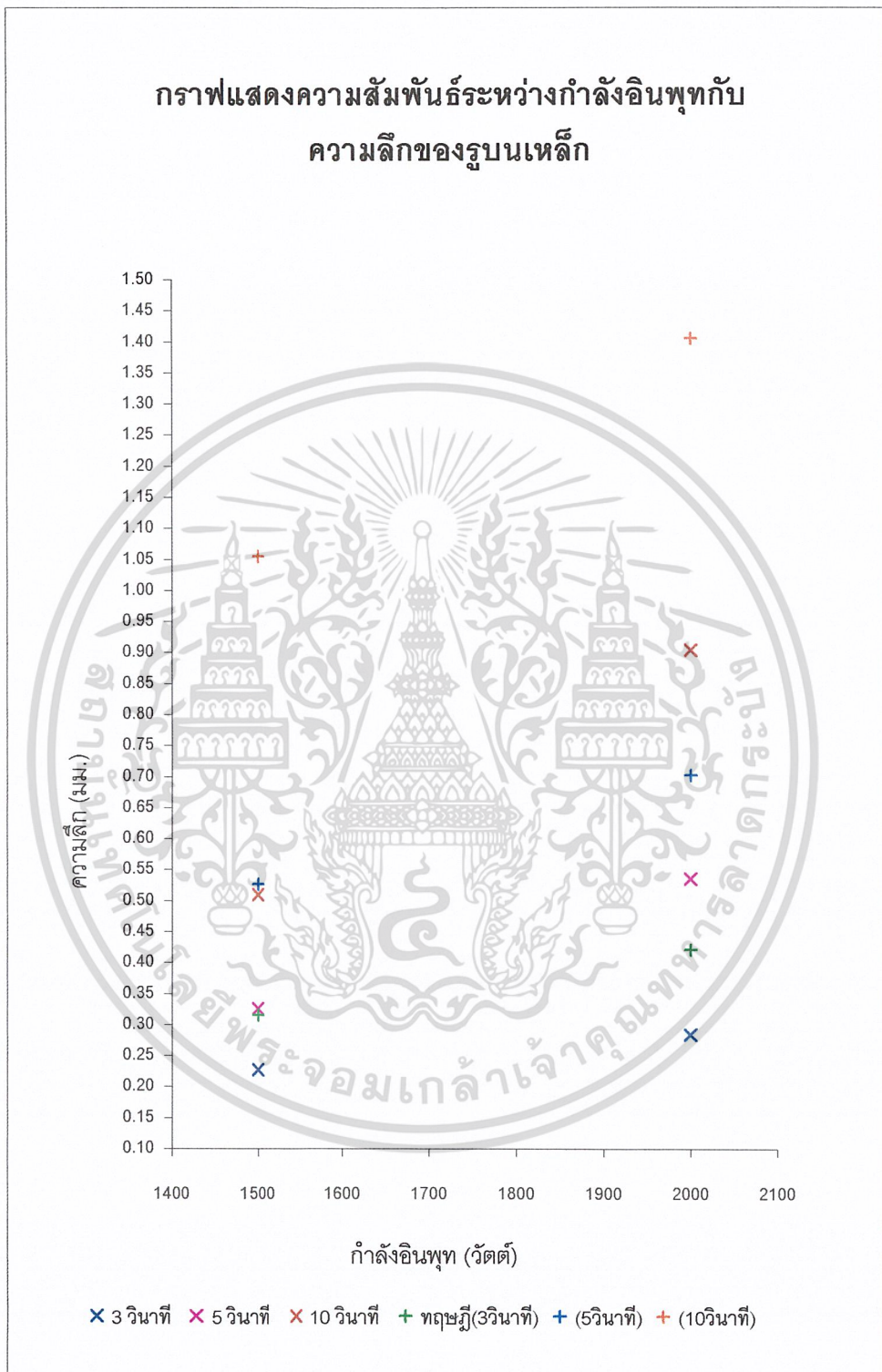
4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.3.1 กราฟแสดงผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลทางทฤษฎี



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความลึกของรูที่ 20 กิโลเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความลึกของรูที่ 30 กิโลเฮิร์ตซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



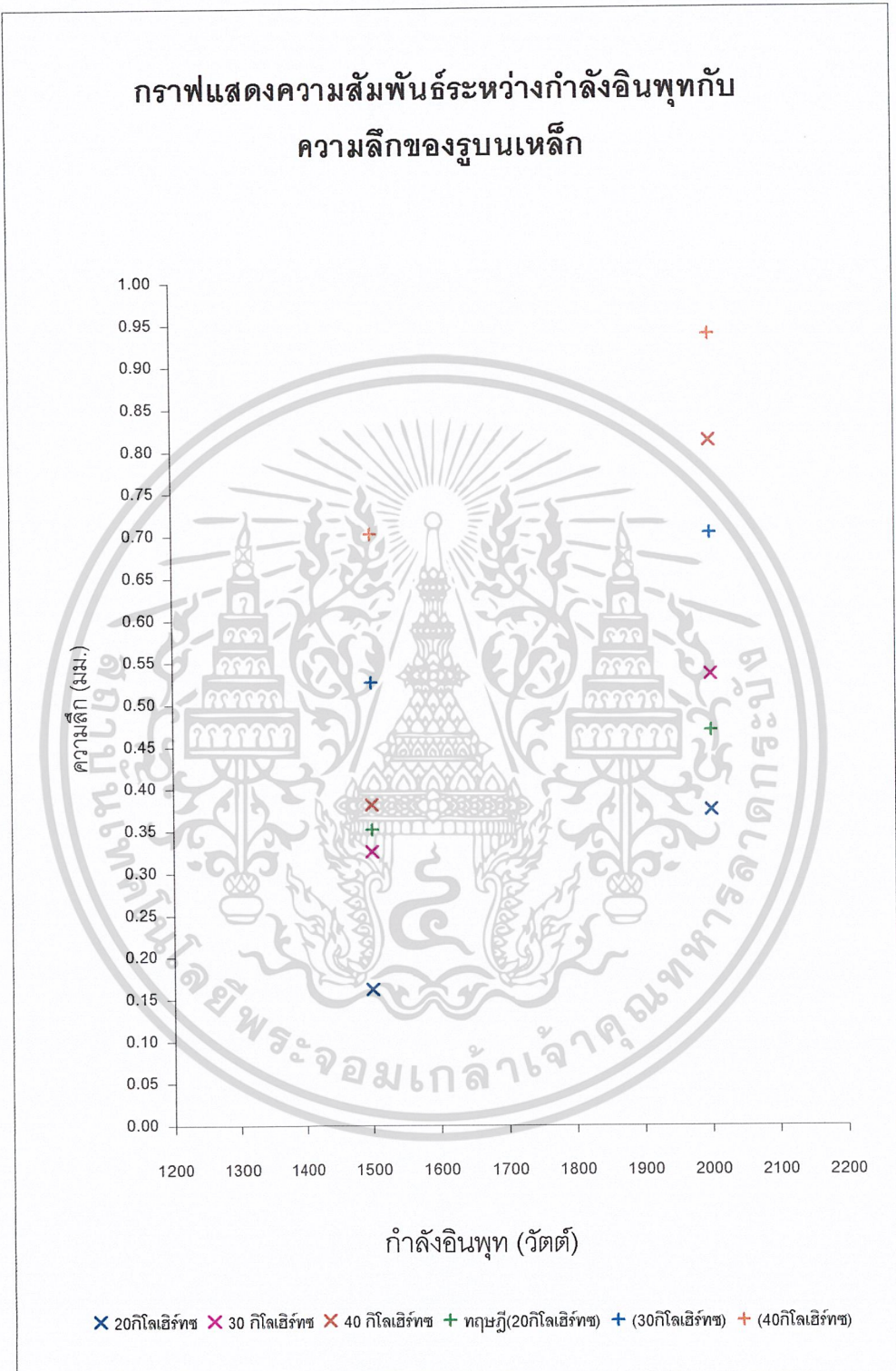
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความลึกของรูที่ 40 กิโลเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความลึกของรูที่ 3 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความลึกของรูที่ 5 วินาที

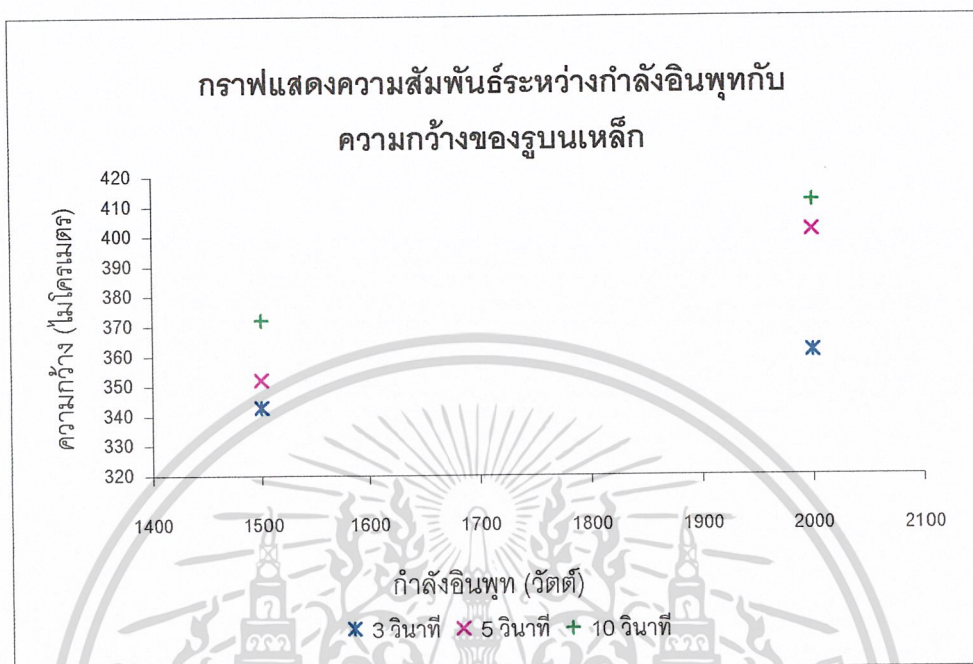
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



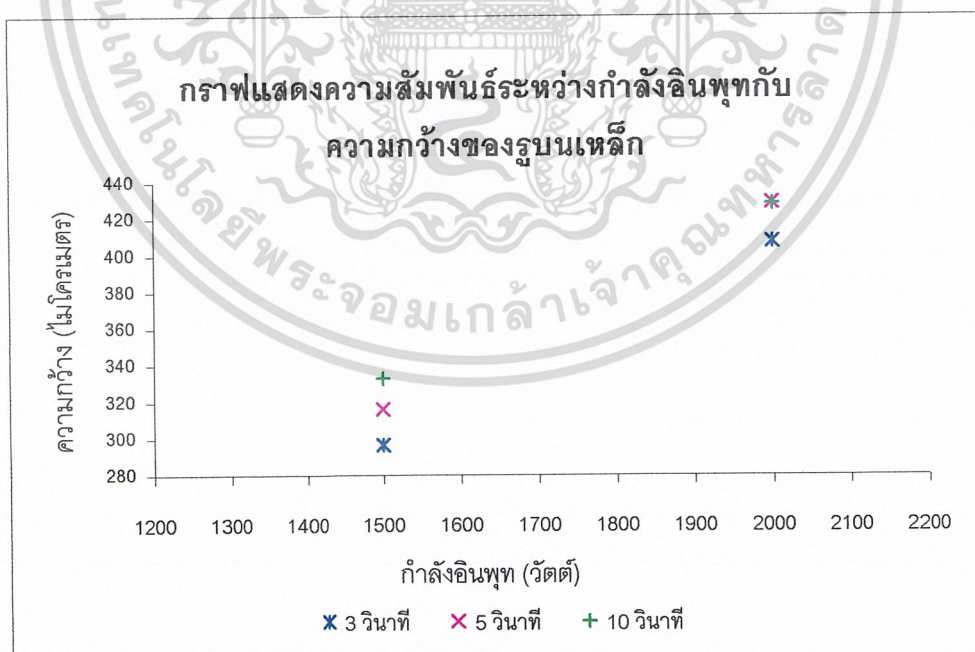
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความลึกของรูที่ 10 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 กราฟแสดงผลการทดลอง

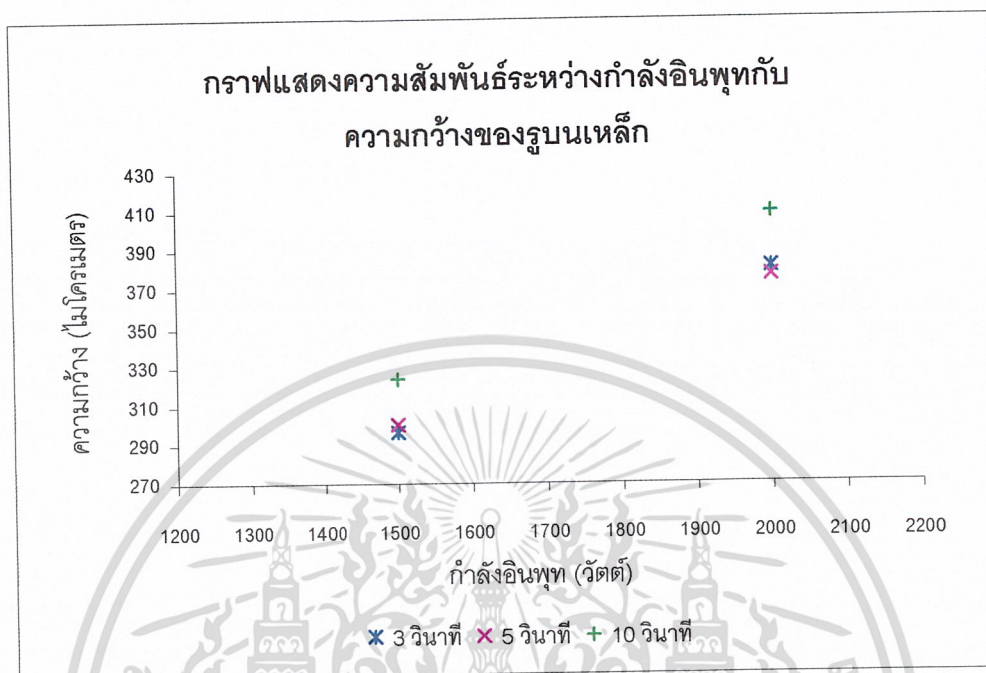


รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 20 กิโลเฮิร์ตซ

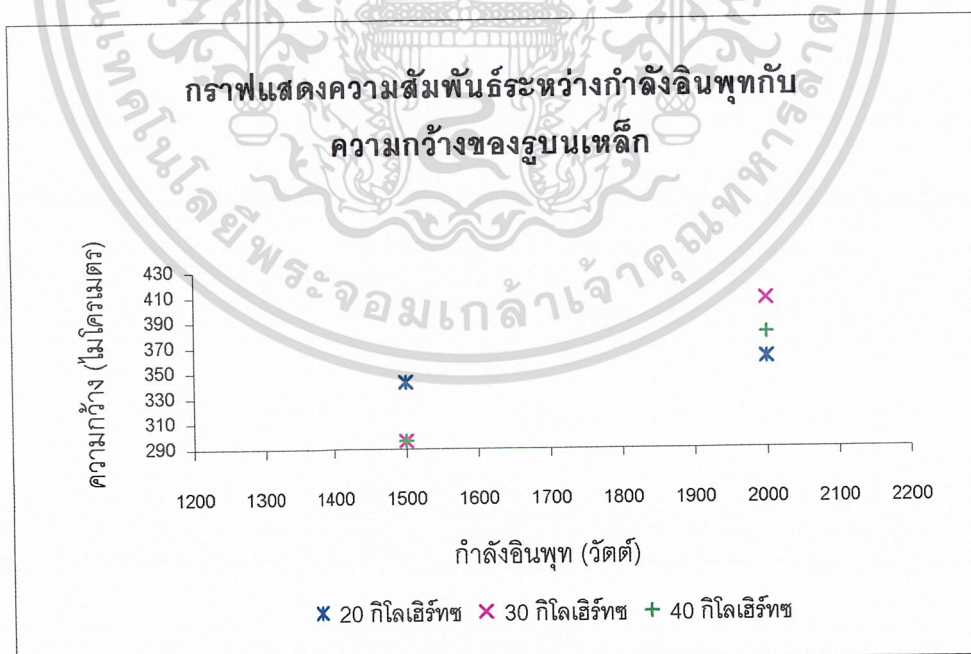


รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 30 กิโลเฮิร์ตซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

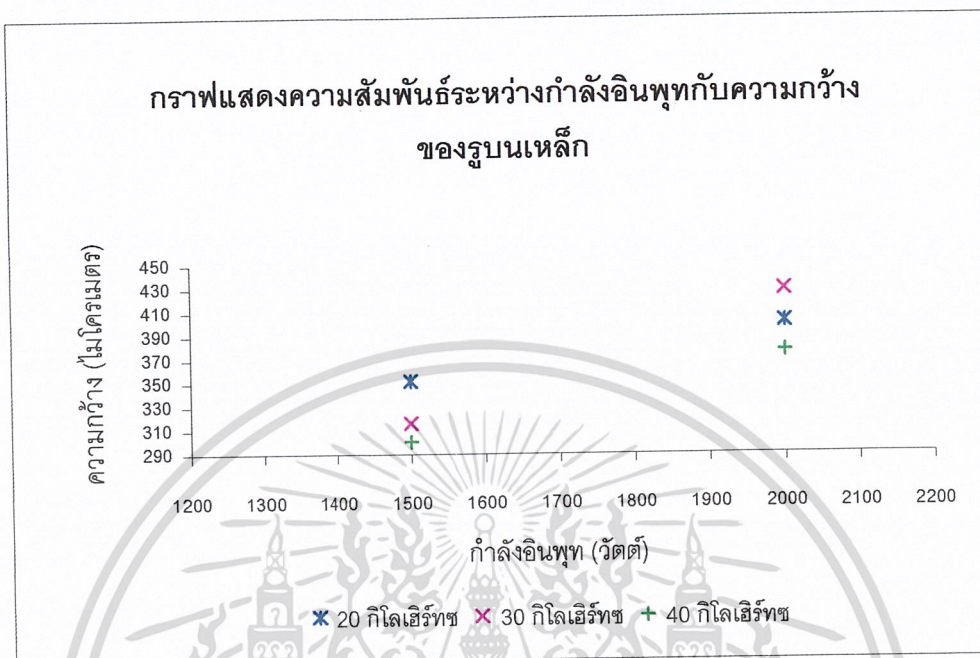


รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 40 กิโลเฮิร์ตซ

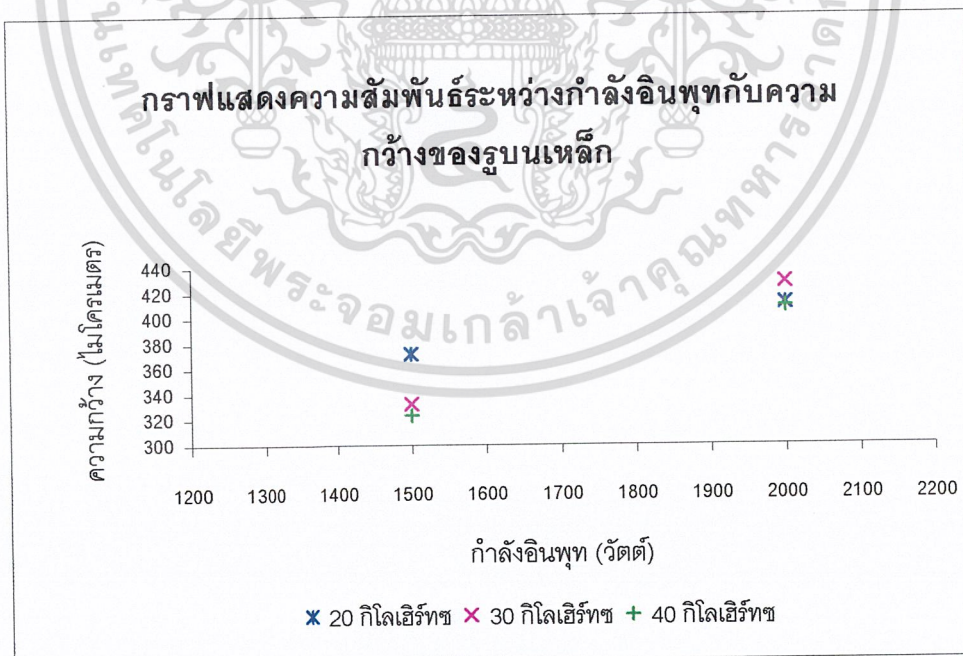


รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 3 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

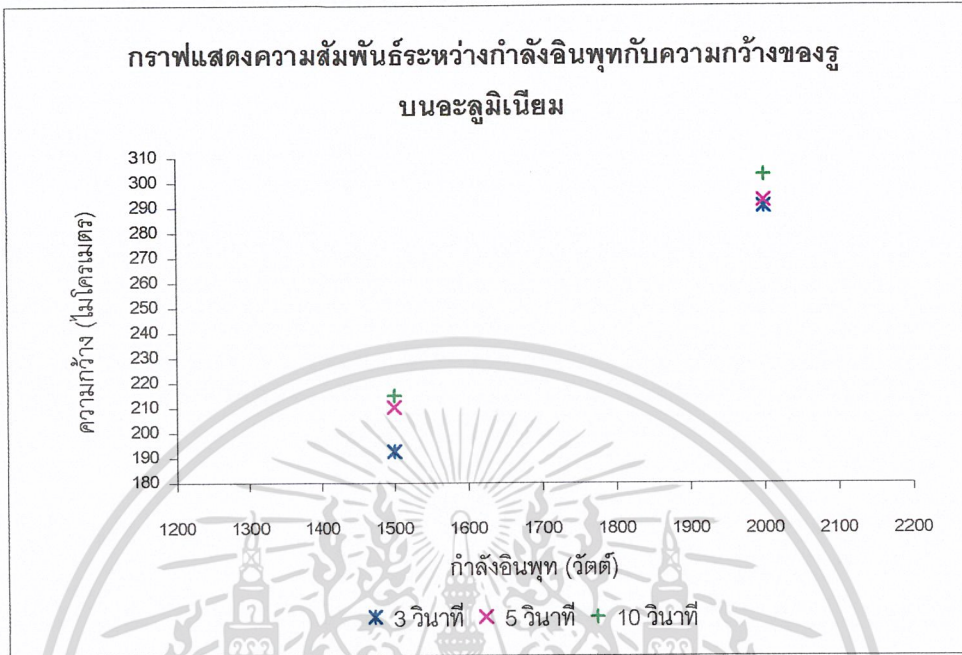


รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 5 วินาที

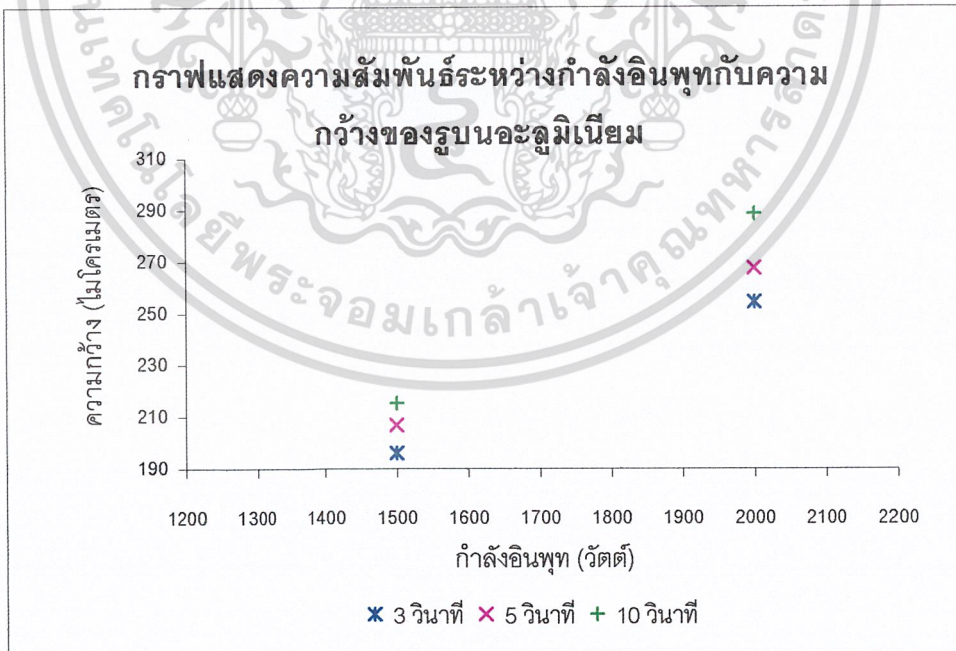


รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 10 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

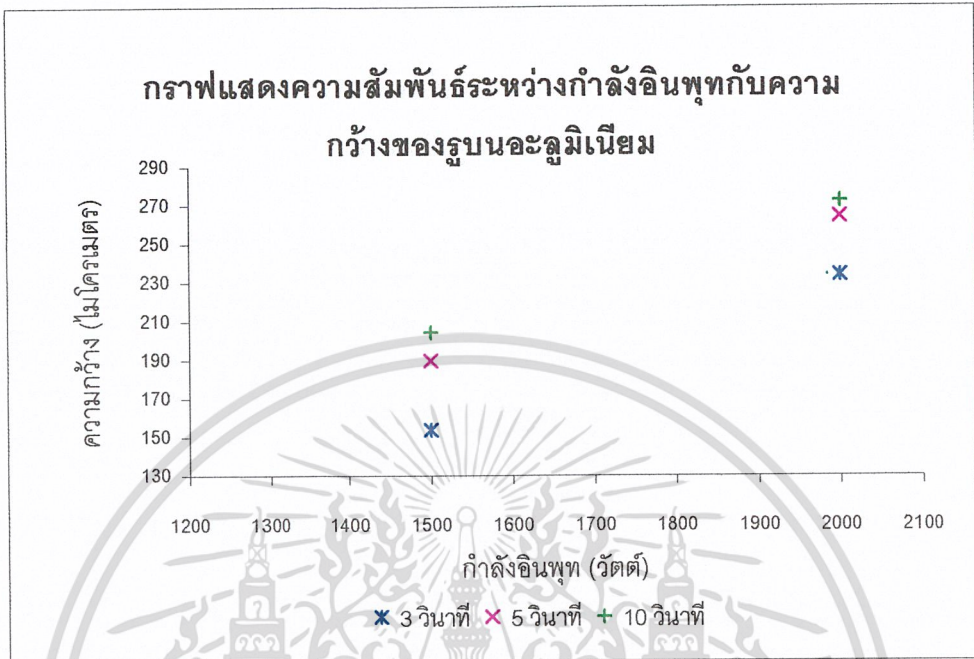


รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 20 กิโลเฮิรตซ์

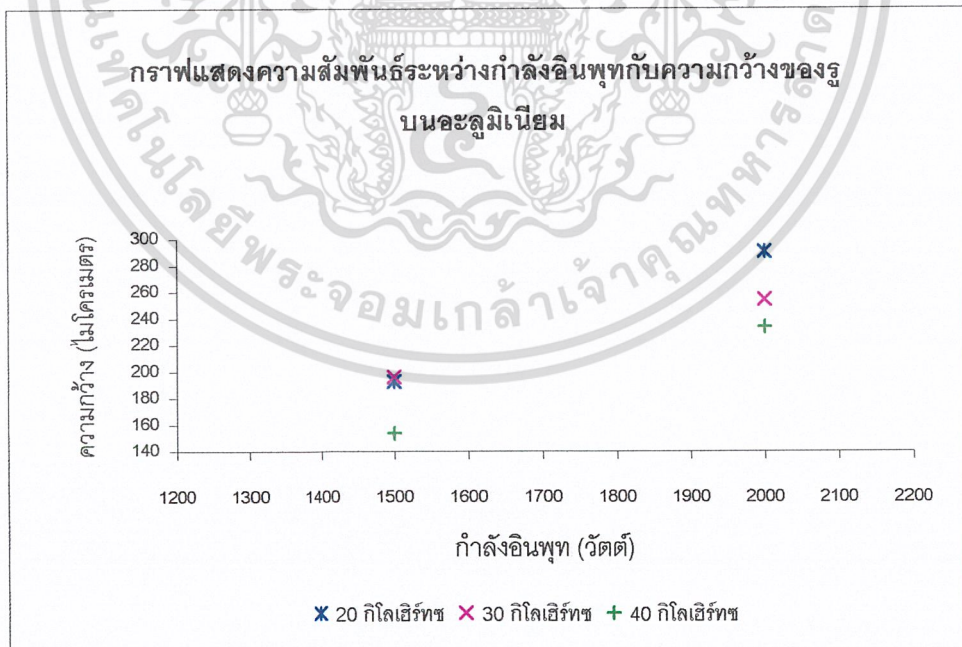


รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 30 กิโลเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

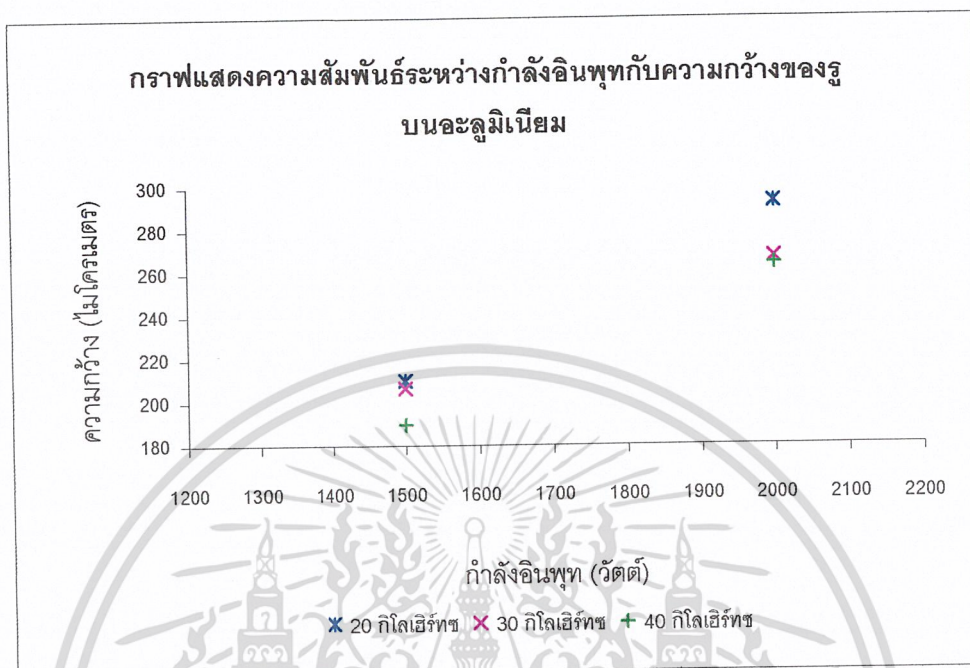


รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูปที่ 40 กิโลเฮิร์ตซ

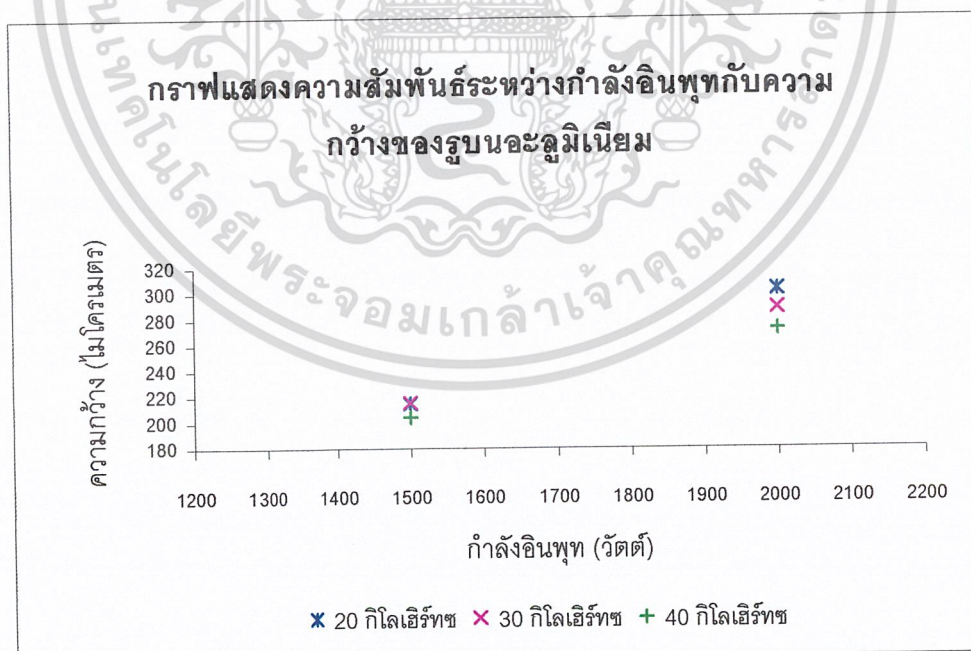


รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูปที่ 3 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

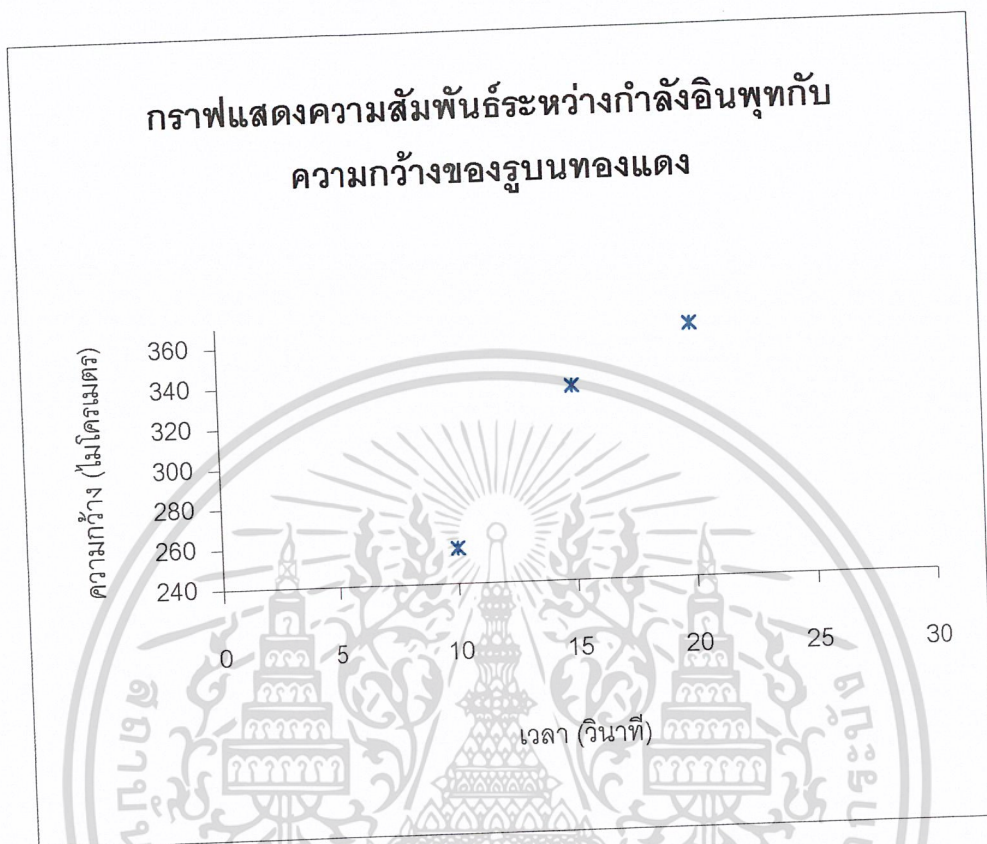


รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 5 วินาที



รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 10 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอินพุตกับความกว้างของรูที่ 40 กิโลเฮิรตซ์
2000วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลองในการทำสัญลักษณ์บนวัสดุต่าง ๆ

1. วัสดุ – เหล็ก

จากผลการทดลอง จะสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1.1 เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จะทำให้ความลึกที่ได้ทำสัญลักษณ์ลงบนเหล็กมีความลึกเพิ่มมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับสมการ (4.1) , สมการ (4.3) และสมการ (4.4)
- 1.2 เมื่อค่า repetition rate เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความลึกมีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับสมการ (4.1) , สมการ (4.3) และสมการ (4.4)
- 1.3 เมื่อค่า power input เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความลึกมีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับสมการ (4.1) , สมการ (4.3) และสมการ (4.4)
- 1.4 เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ความกว้างที่ได้ทำสัญลักษณ์ลงบนเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย
- 1.5 เมื่อค่า repetition rate เพิ่มมากขึ้นจะเห็นว่าไม่มีผลต่อความกว้างที่ได้ทำสัญลักษณ์ แสดงว่าการนำความร้อนในแนวแกนรัศมี (r) มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับแนวแกน Z
- 1.6 เมื่อค่า power input เพิ่มมากขึ้น จะมีผลทำให้ความกว้างมีค่าเพิ่มมากขึ้น
- 1.7 เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากทฤษฎีและการทดลองแล้วจะเห็นว่า ความลึกในทางทฤษฎีนั้นจะมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง เนื่องจากเหตุผลหลายประการ
 - 1.7.1 ค่าคงที่ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมีค่าไม่คงที่ แต่ขึ้นกับอุณหภูมิของชิ้นงาน, ความยาวคลื่นของแสงที่ใช้
 - 1.7.2 ปรากฏการณ์ต่าง ๆ เช่น Plasma effect ,Self focusing ซึ่งมีผลต่อการนำความร้อน
 - 1.7.3 ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเลเซอร์ที่ใช้ (Nd : YAG Laser) ไม่แน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วัสดุ – อะลูมิเนียม

จากผลการทดลอง จะสามารถสรุปได้ดังนี้

- 2.1 เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ความกว้างที่ได้ทำสัญลักษณ์ลงบนอะลูมิเนียมมีค่าเพิ่มมากขึ้น
- 2.2 เมื่อค่า repetition rate เพิ่มมากขึ้นจะเห็นว่าไม่มีผลต่อความกว้างที่ได้ทำสัญลักษณ์
- 2.3 เมื่อค่า power input เพิ่มมากขึ้น จะมีผลทำให้ความกว้างมีค่าเพิ่มมากขึ้น

3. วัสดุ – ทองแดง

จากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ดังนี้

- 3.1 เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ความกว้างที่ได้ทำสัญลักษณ์ลงบนทองแดงนั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้น
 - 3.2 เนื่องจากทองแดงมีสมบัติการสะท้อนแสงได้ดีในช่วงอินฟราเรด ทำให้ไม่สามารถใช้ค่า repetition rate และ power input ที่ต่ำกว่าค่าการสะท้อนแสงของทองแดงได้
4. จากผลการทดลองทำให้ทราบว่า เหล็กมีคุณสมบัติในการดูดกลืนความร้อนได้ดีที่สุดในวัสดุทั้งสามชนิดที่ใช้ในการทดลอง รองลงมาคือ อะลูมิเนียม และทองแดง ตามลำดับ
5. จากผลการทดลองจะได้ว่า ความลึกแปรผันตรงกับเวลา, repetition rate และ power input ส่วนความกว้างแปรผันตรงกับเวลา และ power input

5.2 สรุปผลการทดลองในการทำอุปกรณ์เครื่องกวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย

ในการจัดทำอุปกรณ์เครื่องกวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวายนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์พื้นฐานรองรับการพัฒนากระบวนการทำสัญลักษณ์บนวัสดุโดยใช้แสงเลเซอร์ (Laser Marking) นั่นเอง โดยใช้การ์ด 8255 เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์และวงจรขับสเต็ปมอเตอร์ เพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย โดยในหลักการนี้เราจะใช้ดินสอแทนเลเซอร์ซึ่งก็คือสมมติว่าแสงเลเซอร์ไม่มีการเคลื่อนที่ เมื่ออุปกรณ์เครื่องกวาดในแนวแกนเอ็กซ์และแกนวายเกิดการเคลื่อนที่ก็จะทำให้สามารถเกิดการทำสัญลักษณ์บนวัสดุเหล่านั้นได้ ซึ่งก็เป็นหลักการพื้นฐานของการทำสัญลักษณ์ (Marking) นั่นเอง

5.3 แนวทางในการพัฒนา

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มานั้นสามารถนำไปพัฒนาเพื่อแผนงานต่อไปในอนาคตได้
2. อุปกรณ์ชุดนี้สามารถพัฒนาให้เกิดลวดลายการทำสัญลักษณ์ต่างๆได้มากขึ้น โดยการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของสตีปเปอร์มอเตอร์ได้
3. อุปกรณ์ชุดนี้สามารถนำไปประกอบร่วมกับเลเซอร์ เพื่อให้เกิดการพัฒนากระบวนการทำสัญลักษณ์บนวัสดุได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIAL FUNCTIONS

THE GAMMA FUNCTION

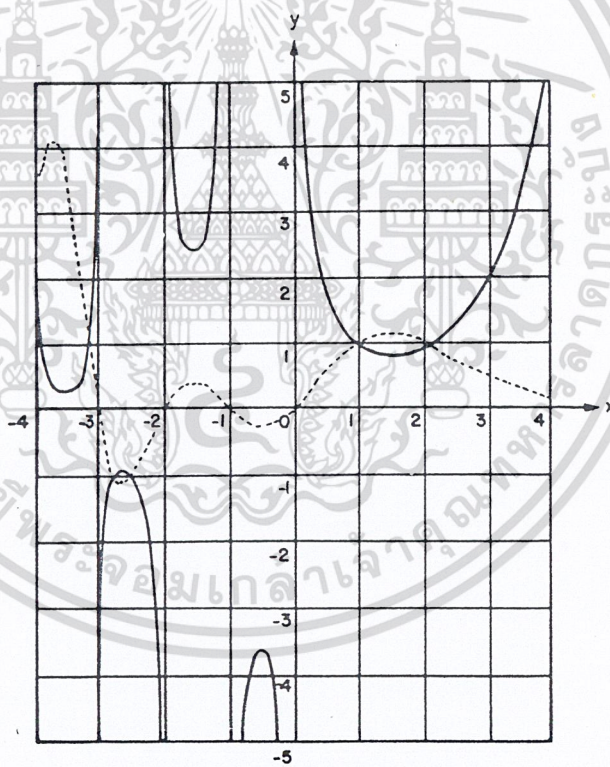


Fig. 1 *Gamma function.*

———, $y = \Gamma(x)$, - - - - , $y = 1/\Gamma(x)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GAMMA FUNCTION

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad \text{for } 1 \leq x \leq 2$$

[For other values use the formula $\Gamma(x+1) = x\Gamma(x)$]

x	Γ(x)	x	Γ(x)
1.00	1.00000	1.50	.88623
1.01	.99433	1.51	.88659
1.02	.98884	1.52	.88704
1.03	.98355	1.53	.88757
1.04	.97844	1.54	.88818
1.05	.97350	1.55	.88887
1.06	.96874	1.56	.88964
1.07	.96415	1.57	.89049
1.08	.95973	1.58	.89142
1.09	.95546	1.59	.89243
1.10	.95135	1.60	.89352
1.11	.94740	1.61	.89468
1.12	.94359	1.62	.89592
1.13	.93993	1.63	.89724
1.14	.93642	1.64	.89864
1.15	.93304	1.65	.90012
1.16	.92980	1.66	.90167
1.17	.92670	1.67	.90330
1.18	.92373	1.68	.90500
1.19	.92089	1.69	.90678
1.20	.91817	1.70	.90864
1.21	.91558	1.71	.91057
1.22	.91311	1.72	.91258
1.23	.91075	1.73	.91467
1.24	.90852	1.74	.91683
1.25	.90640	1.75	.91906
1.26	.90440	1.76	.92137
1.27	.90250	1.77	.92376
1.28	.90072	1.78	.92623
1.29	.89904	1.79	.92877
1.30	.89747	1.80	.93138
1.31	.89600	1.81	.93408
1.32	.89464	1.82	.93685
1.33	.89338	1.83	.93969
1.34	.89222	1.84	.94261
1.35	.89115	1.85	.94561
1.36	.89018	1.86	.94869
1.37	.88931	1.87	.95184
1.38	.88854	1.88	.95507
1.39	.88785	1.89	.95838
1.40	.88726	1.90	.96177
1.41	.88676	1.91	.96523
1.42	.88636	1.92	.96877
1.43	.88604	1.93	.97240
1.44	.88581	1.94	.97610
1.45	.88566	1.95	.97988
1.46	.88560	1.96	.98374
1.47	.88563	1.97	.98768
1.48	.88575	1.98	.99171
1.49	.88595	1.99	.99581
1.50	.88623	2.00	1.00000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE BETA FUNCTION

DEFINITION $B(m,n) = \int_0^1 t^{m-1} (1-t)^{n-1} dt \quad m > 0, n > 0$

RELATIONSHIP WITH GAMMA FUNCTION $B(m,n) = \frac{\Gamma(m)\Gamma(n)}{\Gamma(m+n)}$

PROPERTIES

$$B(m,n) = B(n,m)$$

$$B(m,n) = 2 \int_0^{\pi/2} \sin^{2m-1} \theta \cos^{2n-1} \theta d\theta$$

$$B(m,n) = \int_0^\infty \frac{t^{m-1}}{(1+t)^{m+n}} dt$$

$$B(m,n) = r^n (r+1)^m \int_0^1 \frac{t^{m-1} (1-t)^{n-1}}{(r+t)^{m+n}} dt$$

THE BESSEL FUNCTIONS

BESSEL'S DIFFERENTIAL EQUATION

$$x^2 y'' + xy' + (x^2 - n^2)y = 0 \quad n \geq 0$$

Solutions of this equation are called *Bessel functions of order n*.

BESSEL FUNCTIONS OF THE FIRST KIND OF ORDER n

$$\begin{aligned} J_n(x) &= \frac{x^n}{2^n \Gamma(n+1)} \left\{ 1 - \frac{x^2}{2(2n+2)} + \frac{x^4}{2 \cdot 4(2n+2)(2n+4)} - \dots \right\} \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k (x/2)^{n+2k}}{k! \Gamma(n+k+1)} \end{aligned}$$

$$J_{-n}(x) = \frac{x^{-n}}{2^{-n} \Gamma(1-n)} \left\{ 1 - \frac{x^2}{2(2-2n)} + \frac{x^4}{2 \cdot 4(2-2n)(4-2n)} - \dots \right\}$$

$$= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k (x/2)^{2k-n}}{k! \Gamma(k+1-n)}$$

$$J_{-n}(x) = (-1)^n J_n(x)$$

If $n \neq 0, 1, 2, \dots$, $J_n(x)$ and $J_{-n}(x)$ are linearly independent.

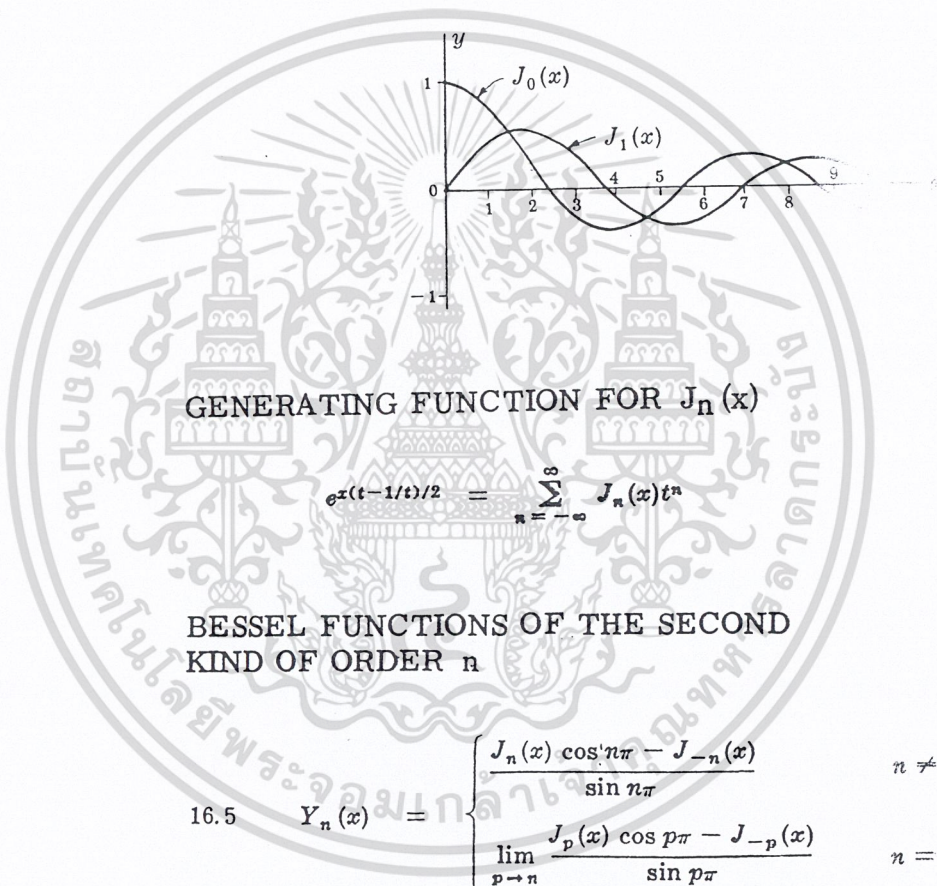
If $n \neq 0, 1, 2, \dots$, $J_n(x)$ is bounded at $x = 0$ while $J_{-n}(x)$ is unbounded.

For $n = 0, 1$ we have

$$J_0(x) = 1 - \frac{x^2}{2^2} + \frac{x^4}{2^2 \cdot 4^2} - \frac{x^6}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6^2} + \dots$$

$$J_1(x) = \frac{x}{2} - \frac{x^3}{2^2 \cdot 4} + \frac{x^5}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6} - \frac{x^7}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6^2} + \dots$$

$$J'_0(x) = -J_1(x)$$



This is also called *Weber's function* or *Neumann's function*.

[also denoted by $N_n(x)$].

For $n = 0, 1, 2, \dots$, L'Hospital's rule yields

$$Y_n(x) = \frac{2}{\pi} \{ \ln(x/2) + \gamma \} J_n(x) - \frac{1}{\pi} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(n-k-1)!}{k!} (x/2)^{2k-n} - \frac{1}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \{ \Phi(k) + \Phi(n+k) \} \frac{(x/2)^{2k+n}}{k!(n+k)!}$$

where $\gamma = .5772156\dots$ is Euler's constant and

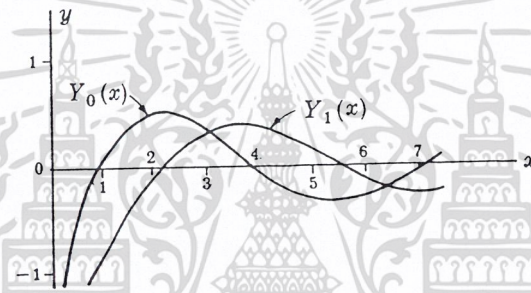
$$16.6 \quad \Phi(p) = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{p}, \quad \Phi(0) = 0$$

For $n = 0$,

$$Y_0(x) = \frac{2}{\pi} \{ \ln(x/2) + \gamma \} J_0(x) + \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{x^2}{2^2} - \frac{x^4}{2^2 4^2} \left(1 + \frac{1}{2} \right) + \frac{x^6}{2^2 4^2 6^2} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right) - \dots \right\}$$

$$Y_{-n}(x) = (-1)^n Y_n(x) \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

For any value $n \geq 0$, $J_n(x)$ is bounded at $x = 0$ while $Y_n(x)$ is unbounded.



GENERAL SOLUTION OF BESSEL'S DIFFERENTIAL EQUATION

$$y = A J_n(x) + B J_{-n}(x) \quad n \neq 0, 1, 2, \dots$$

$$y = A J_n(x) + B Y_n(x) \quad \text{all } n$$

$$y = A J_n(x) + B J_n(x) \int \frac{dx}{x J_n^2(x)} \quad \text{all } n$$

where A and B are arbitrary constants.

RECURRENCE FORMULAS FOR BESSEL FUNCTIONS

$$J_{n+1}(x) = \frac{2n}{x} J_n(x) - J_{n-1}(x)$$

$$J'_n(x) = \frac{1}{2}\{J_{n-1}(x) - J_{n+1}(x)\}$$

$$xJ'_n(x) = xJ_{n-1}(x) - nJ_n(x)$$

$$xJ'_n(x) = nJ_n(x) - xJ_{n+1}(x)$$

$$\frac{d}{dx}\{x^n J_n(x)\} = x^n J_{n-1}(x)$$

$$\frac{d}{dx}\{x^{-n} J_n(x)\} = -x^{-n} J_{n+1}(x)$$

The functions $Y_n(x)$ satisfy identical relations.

BESSEL FUNCTIONS OF ORDER EQUAL TO HALF AN ODD INTEGER

In this case the functions are expressible in terms of sines and cosines.

$$J_{1/2}(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \sin x$$

$$J_{-1/2}(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \cos x$$

$$J_{3/2}(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \left(\frac{\sin x}{x} - \cos x \right)$$

$$J_{-3/2}(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \left(\frac{\cos x}{x} + \sin x \right)$$

$$J_{5/2}(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \left\{ \left(\frac{3}{x^2} - 1 \right) \sin x - \frac{3}{x} \cos x \right\}$$

$$J_{-5/2}(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \left\{ \frac{3}{x} \sin x + \left(\frac{3}{x^2} - 1 \right) \cos x \right\}$$

For further results use the recurrence formula. Results for $Y_{1/2}(x), Y_{3/2}(x), \dots$ are obtained from 16.5.

HANKEL FUNCTIONS OF FIRST AND SECOND KINDS OF ORDER n

$$H_n^{(1)}(x) = J_n(x) + iY_n(x)$$

$$H_n^{(2)}(x) = J_n(x) - iY_n(x)$$

Special Function

Generalized Hypergeometric Series / Function

$${}_pF_q(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p; \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_q; z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\alpha_1)_k (\alpha_2)_k \dots (\alpha_p)_k}{(\beta_1)_k (\beta_2)_k \dots (\beta_q)_k} \frac{z^k}{k!}$$

Hypergeometric Function

$$F(\alpha, \beta, ; \gamma; z) = 1 + \frac{\gamma\beta}{\gamma \cdot 1} z + \frac{\alpha(\alpha + 1)\beta(\beta + 1)}{\gamma(\gamma + 1) \cdot 1 \cdot 2} z^2 + \dots$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Dim round_value As Integer
Dim x_axis(9) As Integer, y_axis(9) As Integer
Dim flag_loop As Integer
Dim stepp As Integer, round As Integer
Private Sub clear_Click()
label.Caption = ""
word.text = ""
flag_loop = 0
round_value = 0
Timer1.Enabled = False
End Sub
Private Sub exit_Click()
End
End Sub
Private Sub Form_Load()
label.RightToLeft = True
End Sub
Private Sub start_Click()
Dim j As Integer
Dim len_word As Integer
Dim text As String
'-----
flag_loop = 0 'flag loop of shape
round_value = 0
stepp = 4
'-----
Call Out(&H303, &H80) 'Initial Card 8255

If word = "" Then
MsgBox "Error no text"
Else

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

len_word = Len(word)
ReDim ch_word(len_word) As String
For j = 0 To len_word - 1
ch_word(j) = Mid(word, j + 1, 1)
'Debug.Print ch_word(j)
Next

```

```

Select Case Val(ch_word(0))

```

```

Case 1

```

```

x_axis(0) = 4

```

```

y_axis(0) = 0

```

```

x_axis(1) = 0

```

```

y_axis(1) = 0

```

```

x_axis(2) = 2

```

```

y_axis(2) = 0

```

```

x_axis(3) = 2

```

```

y_axis(3) = 9

```

```

x_axis(4) = 1

```

```

y_axis(4) = 9

```

```

x_axis(5) = 2

```

```

y_axis(5) = 9

```

```

x_axis(6) = 2

```

```

y_axis(6) = 0

```

```

x_axis(7) = 0

```

```

y_axis(7) = 0

```

```

x_axis(8) = 0

```

```

y_axis(8) = 0

```

```

x_axis(9) = 0

```

```

y_axis(9) = 0

```

```

Case 2

```

```

x_axis(0) = 5

```

```

y_axis(0) = 0

```

```

x_axis(1) = 0

```

```

y_axis(1) = 0

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

x_axis(2) = 5

y_axis(2) = 0

x_axis(3) = 5

y_axis(3) = 5

x_axis(4) = 0

y_axis(4) = 5

x_axis(5) = 0

y_axis(5) = 9

x_axis(6) = 5

y_axis(6) = 9

x_axis(7) = -1

y_axis(7) = 9

x_axis(8) = -1

y_axis(8) = 0

x_axis(9) = 0

y_axis(9) = 0

Case 3

x_axis(0) = 5

y_axis(0) = 0

x_axis(1) = 0

y_axis(1) = 0

x_axis(2) = 0

y_axis(2) = 5

x_axis(3) = 5

y_axis(3) = 5

x_axis(4) = 0

y_axis(4) = 5

x_axis(5) = 0

y_axis(5) = 9

x_axis(6) = 5

y_axis(6) = 9

x_axis(7) = 0

y_axis(7) = 9

x_axis(8) = 0

y_axis(8) = 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

x_axis(9) = 0

y_axis(9) = 0

Case 4

x_axis(0) = 5

y_axis(0) = 0

x_axis(1) = 0

y_axis(1) = 0

x_axis(2) = 0

y_axis(2) = 5

x_axis(3) = 5

y_axis(3) = 5

x_axis(4) = 5

y_axis(4) = 9

x_axis(5) = 5

y_axis(5) = 5

x_axis(6) = 0

y_axis(6) = 5

x_axis(7) = 0

y_axis(7) = 9

x_axis(8) = 0

y_axis(8) = 0

x_axis(9) = 0

y_axis(9) = 0

Case 5

x_axis(0) = 5

y_axis(0) = 0

x_axis(1) = 0

y_axis(1) = 0

x_axis(2) = 0

y_axis(2) = 5

x_axis(3) = 5

y_axis(3) = 5

x_axis(4) = 5

y_axis(4) = 9

x_axis(5) = -1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

y_axis(5) = 9

x_axis(6) = -1

y_axis(6) = 0

x_axis(7) = 0

y_axis(7) = 0

x_axis(8) = 0

x_axis(8) = 0

x_axis(9) = 0

y_axis(9) = 0

Case 6

x_axis(0) = 5

y_axis(0) = 0

x_axis(1) = 0

y_axis(1) = 0

x_axis(2) = 0

y_axis(2) = 5

x_axis(3) = 5

y_axis(3) = 5

x_axis(4) = 5

y_axis(4) = 9

x_axis(5) = 0

y_axis(5) = 9

x_axis(6) = 5

y_axis(6) = 9

x_axis(7) = 5

y_axis(7) = 0

x_axis(8) = 0

y_axis(8) = 0

x_axis(9) = 0

y_axis(9) = 0

Case 7

x_axis(0) = 5

y_axis(0) = 0

x_axis(1) = 0

y_axis(1) = 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

x_axis(2) = 0

y_axis(2) = 9

x_axis(3) = 5

y_axis(3) = 9

x_axis(4) = 0

y_axis(4) = 9

x_axis(5) = 0

y_axis(5) = 0

x_axis(6) = 0

y_axis(6) = 0

x_axis(7) = 0

y_axis(7) = 0

x_axis(8) = 0

y_axis(8) = 0

x_axis(9) = 0

y_axis(9) = 0

Case 8

x_axis(0) = 5

y_axis(0) = 0

x_axis(1) = 5

y_axis(1) = 5

x_axis(2) = 0

y_axis(2) = 5

x_axis(3) = 0

y_axis(3) = 0

x_axis(4) = 5

y_axis(4) = 0

x_axis(5) = 5

y_axis(5) = 9

x_axis(6) = 0

y_axis(6) = 9

x_axis(7) = 0

y_axis(7) = 0

x_axis(8) = 0

y_axis(8) = 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

x_axis(9) = 0

y_axis(9) = 0

Case 9

x_axis(0) = 5

y_axis(0) = 0

x_axis(1) = 0

y_axis(1) = 0

x_axis(2) = 0

y_axis(2) = 5

x_axis(3) = 5

y_axis(3) = 5

x_axis(4) = 5

y_axis(4) = 9

x_axis(5) = 0

y_axis(5) = 9

x_axis(6) = 0

y_axis(6) = 0

x_axis(7) = 0

y_axis(7) = 0

x_axis(7) = 0

y_axis(7) = 0

x_axis(8) = 0

y_axis(8) = 0

x_axis(9) = 0

y_axis(9) = 0

Case 0

x_axis(0) = 5

y_axis(0) = 0

x_axis(1) = 5

y_axis(1) = 9

x_axis(2) = 0

y_axis(2) = 9

x_axis(3) = 0

y_axis(3) = 0

x_axis(4) = 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

y_axis(4) = 0
x_axis(5) = 0
y_axis(5) = 0
x_axis(6) = 0
y_axis(6) = 0
x_axis(7) = 0
y_axis(7) = 0
x_axis(8) = 0
y_axis(8) = 0
x_axis(9) = 0
y_axis(9) = 0
Case Else

End Select

label.Caption = word.text
label.Top = 1060
label.Left = 1570

Timer1.Enabled = True
End If

End Sub
Function step(ByVal a As Integer) As Integer
'If a > 8 Then
' a = 0
'End If
step = &HFF - 2 ^ a
End Function

Private Sub Timer1_Timer()
Dim value As Integer
Dim x_result As Integer
Select Case flag_loop

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Case 0

'one move

'-----

Call drive_step(check_x(0), loop_x(0), False)

'-----

Case 1

Call drive_step(check_y(0), loop_y(0), True)

Case 2

Call drive_step(check_x(1), loop_x(1), False)

Case 3

Call drive_step(check_y(1), loop_y(1), True)

Case 4

Call drive_step(check_x(2), loop_x(2), False)

Case 5

Call drive_step(check_y(2), loop_y(2), True)

Case 6

Call drive_step(check_x(3), loop_x(3), False)

Case 7

Call drive_step(check_y(3), loop_y(3), True)

Case 8

Call drive_step(check_x(4), loop_x(4), False)

Case 9

Call drive_step(check_y(4), loop_y(4), True)

Case 10

Call drive_step(check_x(5), loop_x(5), False)

Case 11

Call drive_step(check_y(5), loop_y(5), True)

Case 12

Call drive_step(check_x(6), loop_x(6), False)

Case 13

Call drive_step(check_y(6), loop_y(6), True)

Case 14

Call drive_step(check_x(7), loop_x(7), False)

Case 15

Call drive_step(check_y(7), loop_y(7), True)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Case 16

```
Call drive_step(check_x(8), loop_x(8), False)
```

Case 17

```
Call drive_step(check_y(8), loop_y(8), True)
```

'Case 18

```
' Call drive_step(check_x(9), loop_x(9), False)
```

'Case 19

```
' Call drive_step(check_y(9), loop_y(9), True)
```

Case Else

```
'Do While (flag_loop < 20)
```

```
' Call drive_step(check_xy(flag_loop), loop_num(flag_loop), check_axis(flag_loop))
```

```
' Debug.Print check_xy(flag_loop), loop_num(flag_loop), check_axis(flag_loop)
```

```
'Loop
```

```
'flag_loop = 18
```

```
Timer1.Enabled = False
```

```
MsgBox "Success"
```

```
End Select
```

```
End Sub
```

```
Private Sub x_plot(round_loop As Integer)
```

```
Debug.Print round_value, round_loop
```

```
If round_loop = 0 Then
```

```
Debug.Print "round loop=0"
```

```
round_value = 0
```

```
flag_loop = flag_loop + 1
```

```
Else
```

```
If round_value = round_loop Then
```

```
round_value = 0
```

```
flag_loop = flag_loop + 1
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

End If
End If
round_value = round_value + 1

End Sub

Private Function dir(dir_value As Boolean) As Integer
If dir_value = True Then ' forward step
    stepp = stepp - 1
    If stepp = 3 Then
        stepp = 8
    End If
Else
    stepp = stepp + 1 ' backward step
    If stepp = 9 Then
        stepp = 4
    End If
End If
If stepp > 9 Then
    stepp = 4
End If
Debug.Print stepp
End Function

```

```

Private Sub drive_step(dir_value As Boolean, loop_value As Integer, flag As Boolean)
'dir_value as direction
'True for forward , False for backward
'loop_value as loop number
'flag as X or Y axis
'True for X-axis, False for Y-axis
If flag = False Then
    value = step(stepp) 'select X-axis step
Else

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

value = step(step - 5) ' select Y-axis step
End If
dir (dir_value)      ' direction
'Debug.Print value
Call Out(&H300, value) ' number of value
Call x_plot(loop_value) 'number of loop
:
End Sub

```

```

Private Function check_x(a As Integer) As Boolean
Select Case Sgn(x_axis(a + 1) - x_axis(a))
Case 1: check_x = True      ' x_axis(a+1) > x_axis(a)
Case 0: check_x = True
Case -1: check_x = False
End Select
End Function

```

```

Private Function check_y(b As Integer) As Boolean
Select Case Sgn(y_axis(b + 1) - y_axis(b))
Case 1: check_y = True      ' y_axis(a+1) > y_axis(a)
Case 0: check_y = True
Case -1: check_y = False
End Select
End Function

```

```

Function loop_y(ByVal i As Integer) As Integer
loop_y = Abs(y_axis(i + 1) - y_axis(i)) * 200
End Function

```

```

Function loop_x(ByVal j As Integer) As Integer
loop_x = Abs(x_axis(j + 1) - x_axis(j)) * 200
End Function

```

```

Function check_axis(ByVal u As Integer) As Boolean
If ((u + 1) \ 2) = 1 Then

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

'Odd
check_axis = True
Else
'even
check_axis = False
End If
End Function
Function check_xy(ByVal xy_pass As Integer) As Boolean
Dim tmp As Integer
tmp = xy_pass \ 2
If ((xy_pass + 1) Mod 2) = 1 Then
'Odd
'check_y
Select Case Sgn(y_axis(tmp + 1) - y_axis(tmp))
Case 1: check_xy = True 'y_axis(a+1) > y_axis(a)
Case 0: check_xy = True
Case -1: check_xy = False
End Select
Else
'even
'check_x
Select Case Sgn(x_axis(tmp + 1) - x_axis(tmp))
Case 1: check_xy = True 'x_axis(a+1) > x_axis(a)
Case 0: check_xy = True
Case -1: check_xy = False
End Select

End If
End Function
Function loop_num(ByVal num_pass As Integer) As Integer
Dim tmp As Integer
tmp = num_pass \ 2
If ((num_pass + 1) Mod 2) = 1 Then
'Odd

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
'loop_y
loop_num = Abs(y_axis(tmp + 1) - y_axis(tmp)) * 200
Else
'even
'loop_x
loop_num = Abs(x_axis(tmp + 1) - x_axis(tmp)) * 200
End If
End Function
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

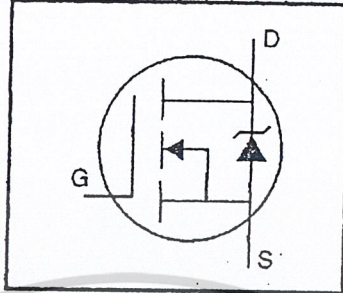


ภาคผนวก ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HEXFET® Power MOSFET

- Dynamic dv/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements



$$V_{DSS} = 100V$$

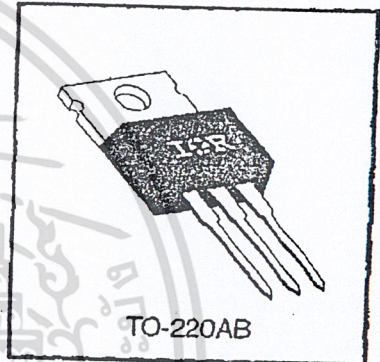
$$R_{DS(on)} = 0.54\Omega$$

$$I_D = 5.6A$$

Description

Third Generation HEXFETs from International Rectifier provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



Absolute Maximum Ratings

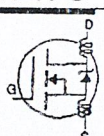
Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	5.6	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	4.0	
I_{DM}	20	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	43	W
	0.29	W/°C
V_{GS}	± 20	V
E_{AS}	100	mJ
I_{AR}	5.6	A
E_{AR}	4.3	mJ
dv/dt	5.5	V/ns
T_J T_{STG}	-55 to +175	°C
	300 (1.6mm from case)	
	10 lbf·in (1.1 N·m)	

Thermal Resistance

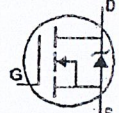
Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	—	—	3.5	°C/W
$R_{\theta CS}$	—	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	—	—	62	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	100	—	—	V	$V_{GS}=0V, I_D=250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.12	—	V/ $^\circ\text{C}$	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D=1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.54	Ω	$V_{GS}=10V, I_D=3.4A$ ③
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS}=V_{GS}, I_D=250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	1.3	—	—	S	$V_{DS}=50V, I_D=3.4A$ ④
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS}=100V, V_{GS}=0V$
		—	—	250		$V_{DS}=80V, V_{GS}=0V, T_J=150^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS}=20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS}=-20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	8.3	nC	$I_D=5.6A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	2.3		$V_{DS}=80V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	3.8		$V_{GS}=10V$ See Fig. 6 and 13 ④
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	6.9	—	ns	$V_{DD}=50V$
t_r	Rise Time	—	16	—		$I_D=5.6A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	15	—		$R_G=24\Omega$
t_f	Fall Time	—	9.4	—		$R_D=8.4\Omega$ See Figure 10 ④
L_D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6 mm (0.25in.) from package and center of die contact 
L_S	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	180	—	pF	$V_{GS}=0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	81	—		$V_{DS}=25V$
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	15	—		$f=1.0\text{MHz}$ See Figure 5

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	5.6	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode. 
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	20		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	2.5	V	$T_J=25^\circ\text{C}, I_S=5.6A, V_{GS}=0V$ ④
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	100	200	ns	$T_J=25^\circ\text{C}, I_F=5.6A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	0.44	0.88	μC	$di/dt=100A/\mu\text{s}$ ④
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S+L_D)				

Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature (See Figure 11)
- ② $V_{DD}=25V$, starting $T_J=25^\circ\text{C}$, $L=4.8\text{mH}$, $R_G=25\Omega$, $I_{AS}=5.6A$ (See Figure 12)
- ③ $I_{SD}\leq 5.6A$, $di/dt\leq 75A/\mu\text{s}$, $V_{DD}\leq V_{(BR)DSS}$, $T_J\leq 175^\circ\text{C}$
- ④ Pulse width $\leq 300\mu\text{s}$; duty cycle $\leq 2\%$.

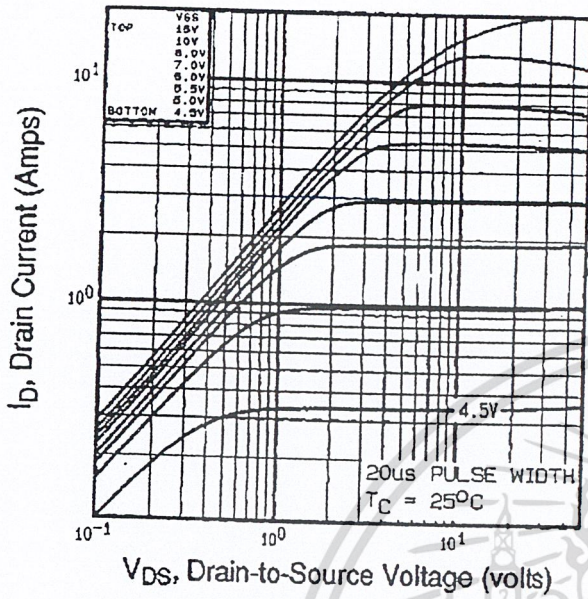


Fig 1. Typical Output Characteristics, $T_C=25^\circ\text{C}$

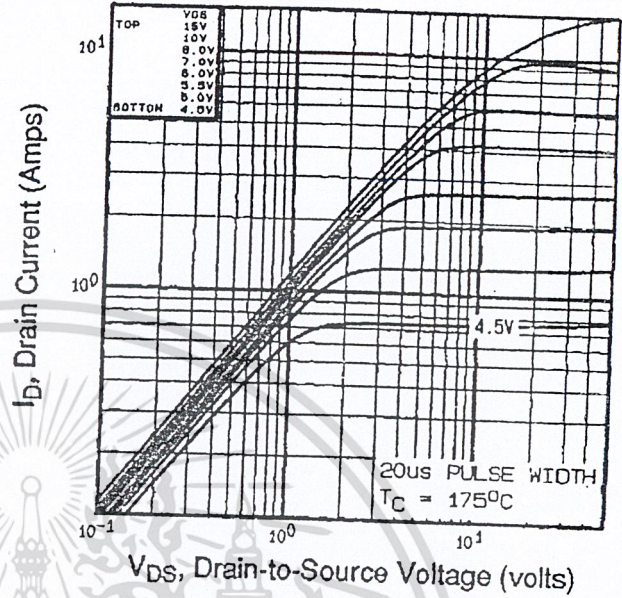


Fig 2. Typical Output Characteristics, $T_C=175^\circ\text{C}$

DATA SHEETS

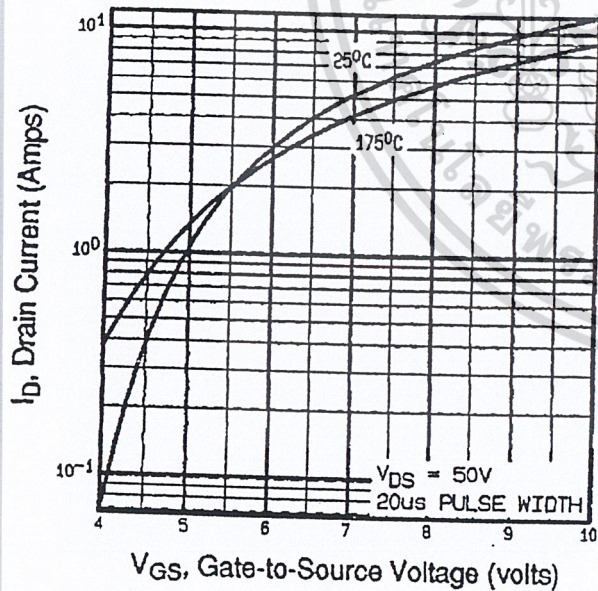


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

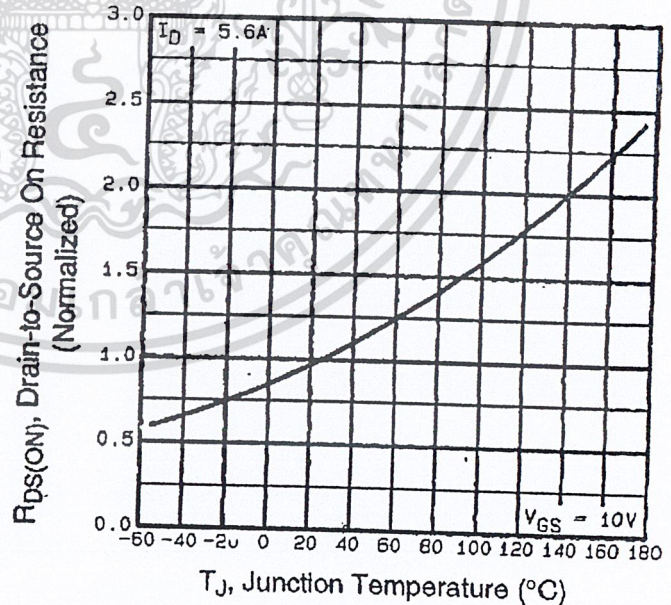


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

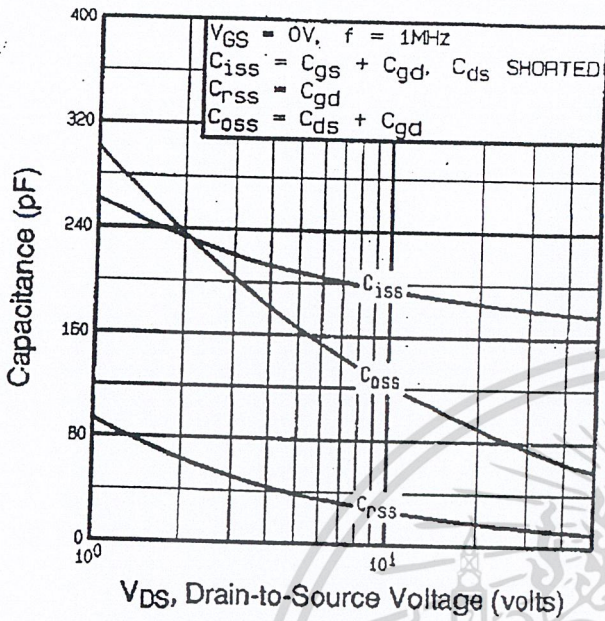


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

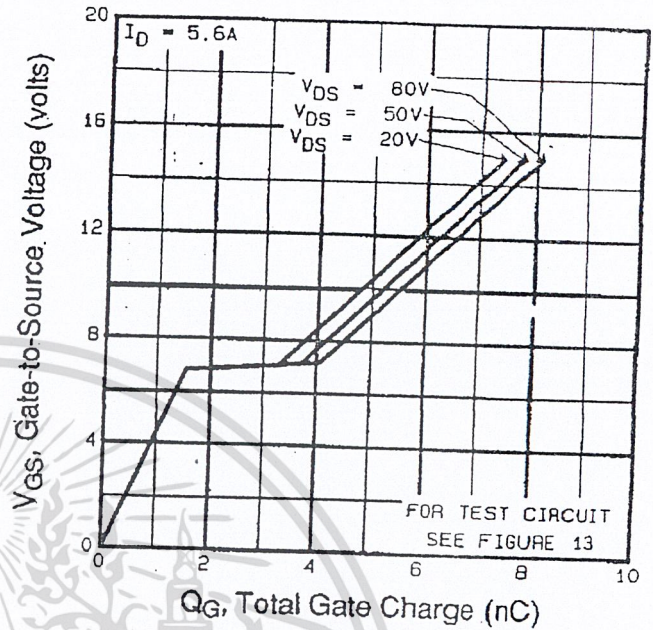


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

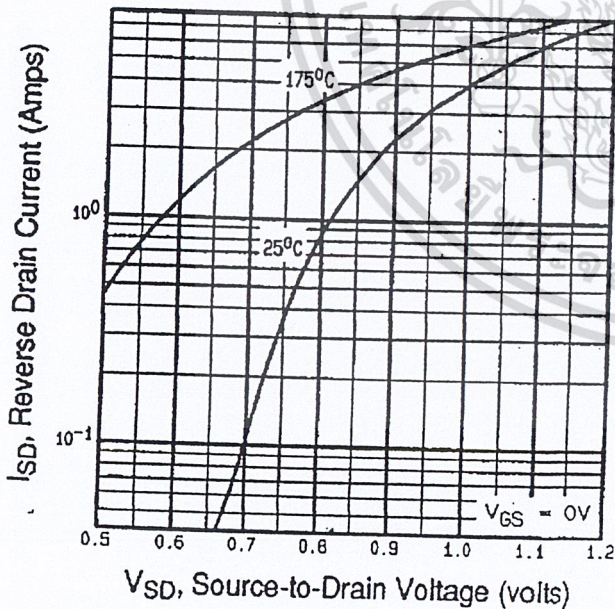


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

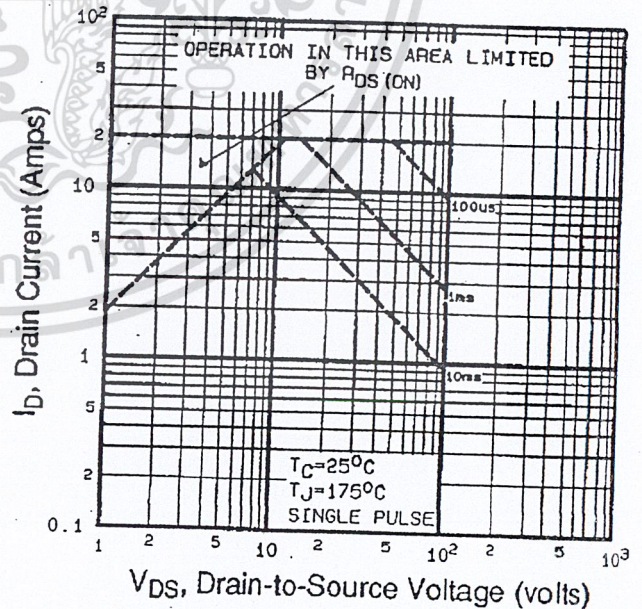


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

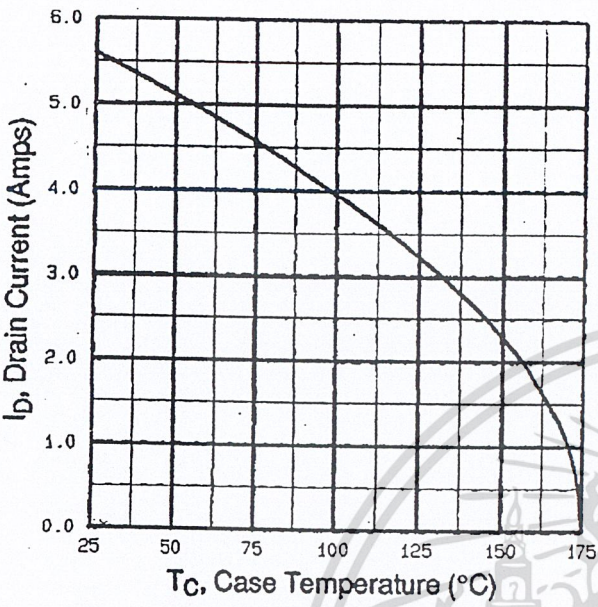


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

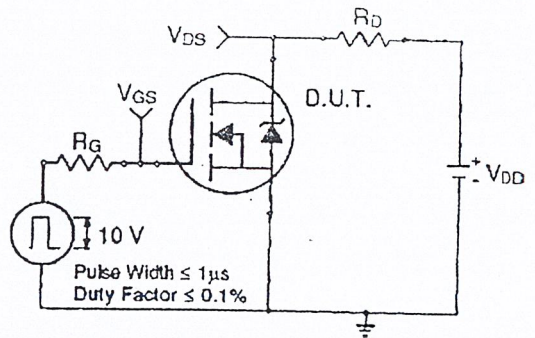


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

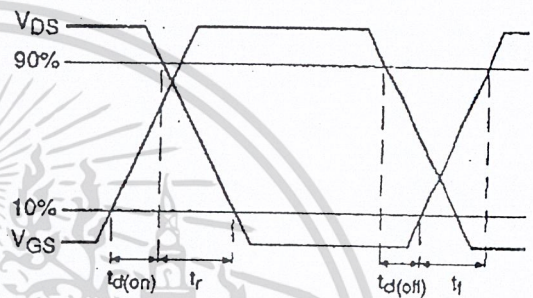


Fig 10b. Switching Time Waveforms

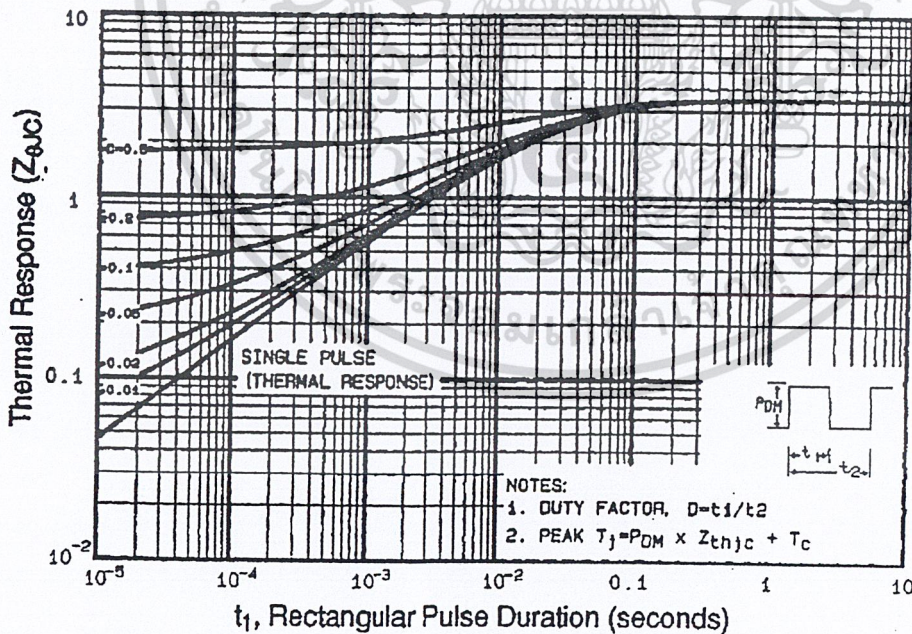


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

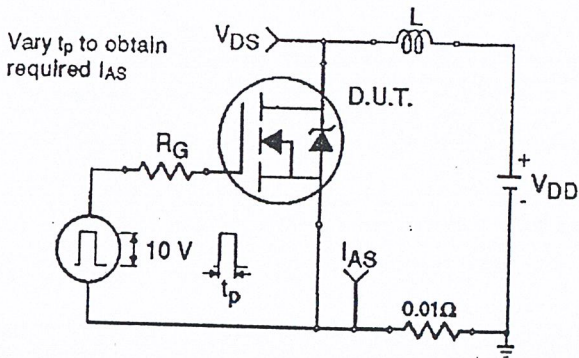


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

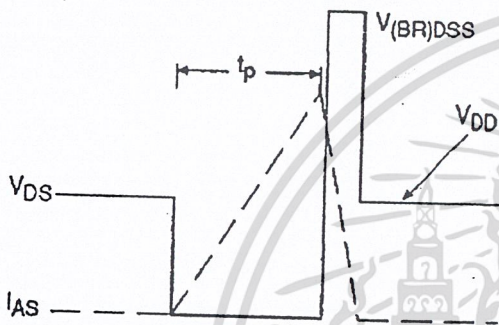


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

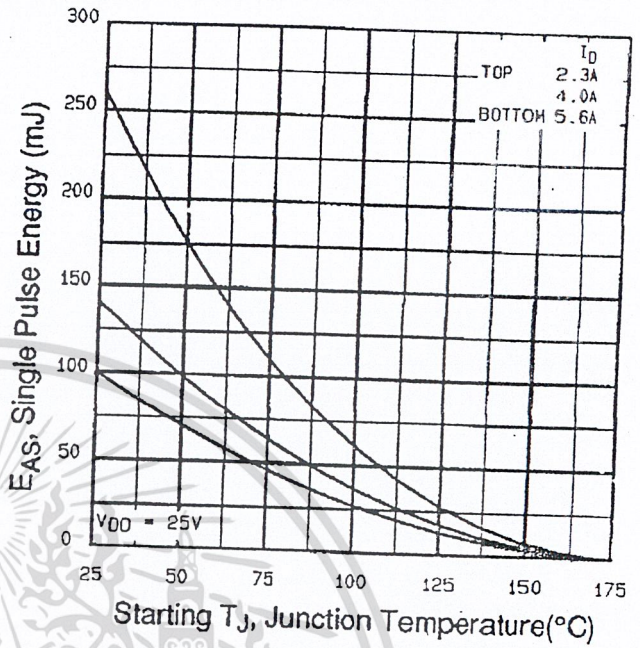


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

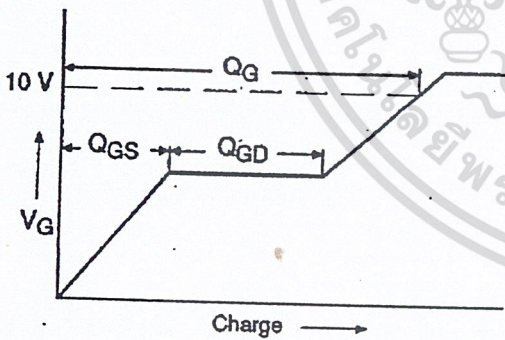


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

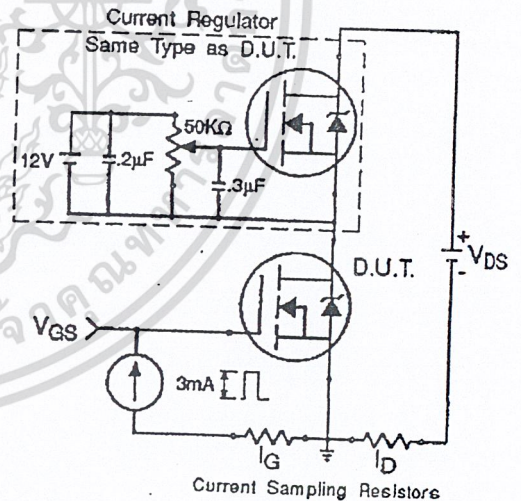


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

Appendix A: Figure 14, Peak Diode Recovery dv/dt Test Circuit – See page 1505

Appendix B: Package Outline Mechanical Drawing – See page 1509

Appendix C: Part Marking Information – See page 1516

Appendix E: Optional Leadforms – See page 1525

**International
IR Rectifier**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้เฉพาะในกรณีที่ท่านได้สั่งซื้อสินค้าจากเราไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

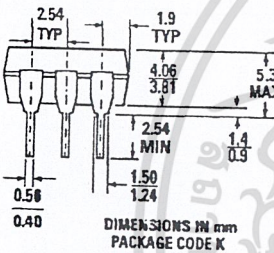
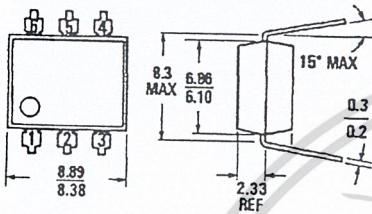
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ 118 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



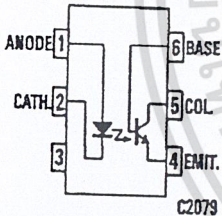
PHOTOTRANSISTOR OPTOCOUPERS

4N25 4N27
4N26 4N28

PACKAGE DIMENSIONS



DIMENSIONS IN mm
PACKAGE CODE K



Equivalent Circuit

DESCRIPTION

The 4N25, 4N26, 4N27, and 4N28 series of optocouplers have an NPN silicon planar phototransistor optically coupled to a gallium arsenide diode.

FEATURES & APPLICATIONS

- AC line/digital logic isolator
- Digital logic/digital logic isolator
- Telephone/telegraph line receiver
- Twisted pair line receiver
- High frequency power supply feedback control
- Relay contact monitor
- Power supply monitor
- Small package size and low cost
- Excellent frequency response
- UL recognized—File E90700

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

TOTAL PACKAGE

*Storage temperature	.....	-55°C to 150°C
*Operating temperature at junction	.....	-55°C to 100°C
*Lead temperature (soldering, 10 sec)	.....	260°C
*Total package power dissipation at 25°C ambient (LED plus detector)	.....	250 mW
*Derate linearly from 25°C	.....	3.3 mW/°C

INPUT DIODE

*Forward DC current continuous	.....	80 mA
*Reverse voltage	.....	3.0 V
*Peak forward current (300 μs, 2% duty cycle)	.....	3.0 A
*Power dissipation at 25°C ambient	.....	150 mW
*Derate linearly from 25°C	.....	2.0 mW/°C

OUTPUT TRANSISTOR

*Collector emitter voltage (BV _{ceo})	.....	30 V
*Collector base voltage (BV _{ceo})	.....	70 V
*Emitter collector voltage (BV _{eco})	.....	7 V
*Power dissipation at 25°C ambient	.....	150 mW
*Derate linearly from 25°C	.....	2.0 mW/°C

*Indicates JEDEC Registered Data.

ELECTRO-OPTICAL CHARACTERISTICS (25°C Free Air Temperature Unless Otherwise Specified)

INDIVIDUAL COMPONENT CHARACTERISTICS

CHARACTERISTICS	SYMBOL	MIN.	TYP.	GUAR. MAX.	UNITS	TEST CONDITIONS
INPUT DIODE						
*Forward voltage	V_f		1.20	1.50	V	$I_f = 10 \text{ mA}$
Capacitance	C		150		pF	$V_r = 0 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}$
*Reverse leakage current			.05	100	μA	$V_r = 3.0 \text{ V}, R_L = 1.0 \text{ M}\Omega$
DETECTOR						
DC forward current gain	h_{FE}		250			$V_{CE} = 5 \text{ V}, I_C = 500 \mu\text{A}$
*Collector to emitter breakdown voltage	BV_{CEO}	30	65		V	$I_C = 1.0 \text{ mA}, I_B = 0$
*Collector to base breakdown voltage	BV_{CBO}	70	165		V	$I_C = 100 \mu\text{A}, I_E = 0$
*Emitter to collector breakdown voltage	BV_{ECO}	7	14		V	$I_E = 100 \mu\text{A}, I_B = 0$
*Collector to emitter leakage current (4N25, 4N26, 4N27)	I_{CEO}		3.5	50	nA	$V_{CE} = 10 \text{ V}$ Base Open
*Collector to emitter leakage current (4N28)				100	nA	
*Collector to base leakage current	I_{CBO}		0.1	20	nA	$V_{CB} = 10 \text{ V}$ Emitter Open

TRANSFER CHARACTERISTICS

DC CHARACTERISTICS	SYMBOL	MIN.	TYP.	GUAR. MAX.	UNITS	TEST CONDITIONS
*Collector output current (a) (4N25, 4N26) (4N27, 4N28)	I_C	2.0 1.0	5.0 3.0	— —	mA	$V_{CE} = 10 \text{ V}, I_F = 10 \text{ mA}, I_B = 0$
*Collector-emitter saturation	$V_{CE(sat)}$		0.2	0.5	V	$I_C = 2.0 \text{ mA}, I_F = 50 \text{ mA}$

TRANSFER CHARACTERISTICS

AC CHARACTERISTICS	SYMBOL	TYP.	UNITS	TEST CONDITIONS
Non-saturated Collector				
Delay time	t_d	0.5	μs	$R_L = 100 \Omega, I_C = 2 \text{ mA}, V_{CC} = 10 \text{ V}$
Rise time	t_r	2.5	μs	(Fig. 10 and 11)
Fall time	t_f	2.6	μs	
Non-saturated Collector				
Delay time	t_d	2.0	μs	$R_L = 1\text{k}\Omega, I_C = 2 \text{ mA}, V_{CC} = 10 \text{ V}$
Rise time	t_r	15	μs	(Fig. 10 and 11)
Fall time	t_f	15	μs	

*Indicates JEDEC Registered Data.

(a) Pulse Test: Pulse Width=300 μs , Duty Cycle <2.0%

(b) For this test LED pins 1 and 2 are common and Phototransistor pins 4, 5 and 6 are common.

(c) If adjusted to yield $I_C = 2 \text{ mA}$ and $I_F = 0.7 \text{ mA RMS}$; Bandwidth referenced to 10 kHz.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRO-OPTICAL CHARACTERISTICS
(25°C Free Air Temperature Unless Otherwise Specified) (Cont'd)

TRANSFER CHARACTERISTICS (Cont'd)

AC CHARACTERISTICS	SYMBOL	MIN.	TYP.	GUAR. MAX.	UNITS	TEST CONDITIONS
Saturated t_r (from 5 V to 0.8 V)	t_{on} (SAT)		5		μ s	$R_L=2k\Omega$, $I_f=15$ mA, $V_{CC}=5$ V
t_f (from SAT to 2.0 V)	t_{off} (SAT)		25		μ s	$R_L=$ Open (Fig. 10)
Saturated t_r (from 5 V to 0.8 V)	t_{on} (SAT)		5		μ s	$R_L=2k\Omega$, $I_f=20$ mA, $V_{CC}=5$ V
t_f (from SAT to 2.0 V)	t_{off} (SAT)		18		μ s	$R_L=100k\Omega$ (Fig. 10)
Non-saturated Base-Collector photo diode Rise time	t_r		175		ns	$R_L=1k\Omega$, $V_{CB}=10$ V
Fall time	t_f		175		ns	
Isolation voltage (b) (4N25, 4N26, 4N27, 4N28) *(4N26, 4N27) *(4N28)	V_{iso}	5300 1500 500	— — —	— — —	V V V	$I_{fo} \leq 1$ μ A RMS, $t=1$ minute Peak Peak
Isolation resistance (b)			10^{11}		Ω	$V=500$ VDC
Isolation capacitance (b)			1.3		pF	$V=0$, $f=1.0$ MHz
Bandwidth (c) (also see note 2)	B_w		300		kHz	$I_c=2.0$ mA, $R_L=100$ Ω (Fig. 12)

*Indicates JEDEC Registered Data.

(a) Pulse Test: Pulse Width=300 μ s, Duty Cycle $\leq 2.0\%$

(b) For this test LED pins 1 and 2 are common and Phototransistor pins 4, 5 and 6 are common.

(c) If adjusted to yield $I_c=2$ mA and $t_r=0.7$ mA RMS; Bandwidth referenced to 10 kHz.

TYPICAL ELECTRO-OPTICAL CHARACTERISTIC CURVES
(25°C Free Air Temperature Unless Otherwise Specified)

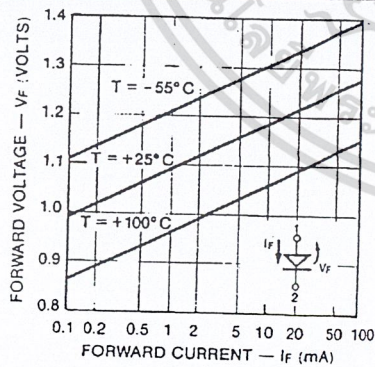


Fig. 1. Forward Voltage vs. Current

C1688

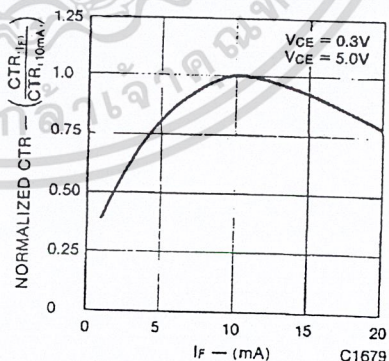


Fig. 2. Normalized CTR vs. Forward Current

C1679

TYPICAL ELECTRO-OPTICAL CHARACTERISTIC CURVES
(25°C Free Air Temperature Unless Otherwise Specified) (Cont'd)

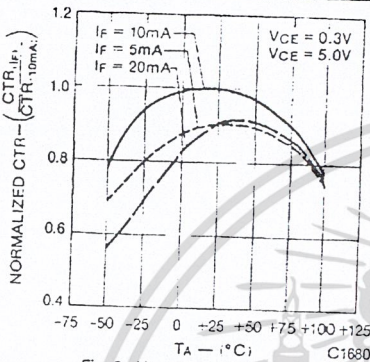


Fig. 3. Normalized CTR vs. Temperature

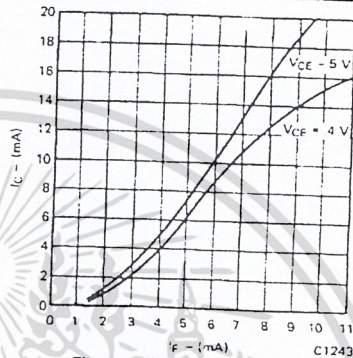


Fig. 4. Collector Current vs. Forward Current

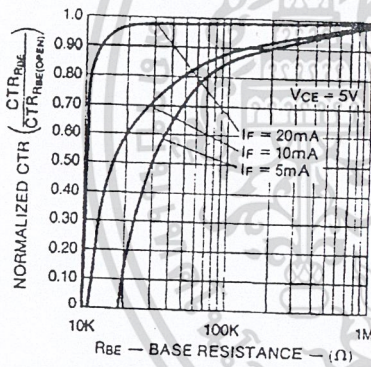


Fig. 5. CTR vs. R_{BE} (Unsaturated)

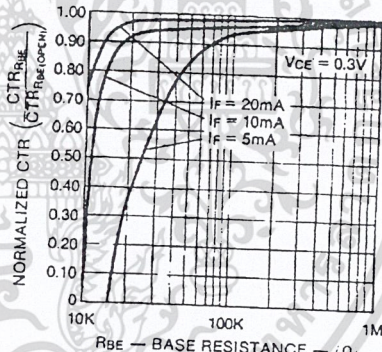


Fig. 6. CTR vs. R_{BE} (Saturated)

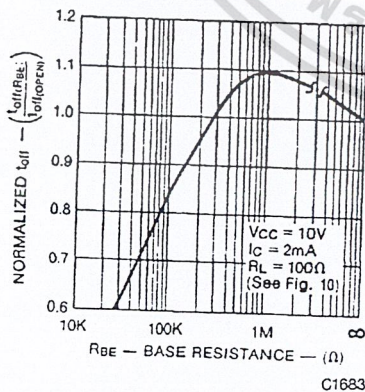


Fig. 7. Normalized T_{off} vs. R_{BE}

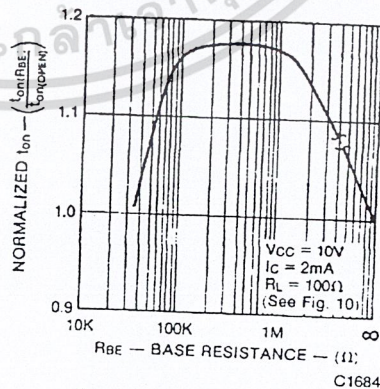


Fig. 8. Normalized T_{on} vs. R_{BE}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL ELECTRO-OPTICAL CHARACTERISTIC CURVES
(25°C Free Air Temperature Unless Otherwise Specified) (Cont'd)

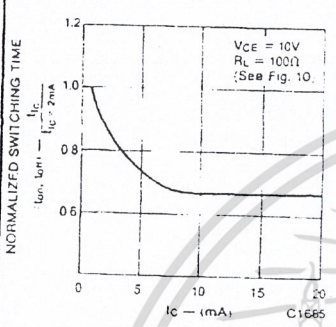


Fig. 9. Switching Time vs. IC

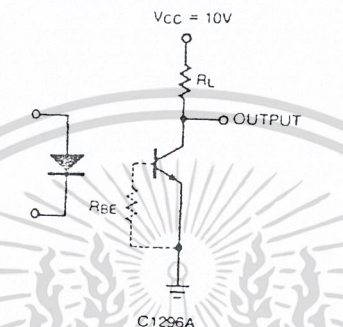


Fig. 10. Switching Time Test Circuit

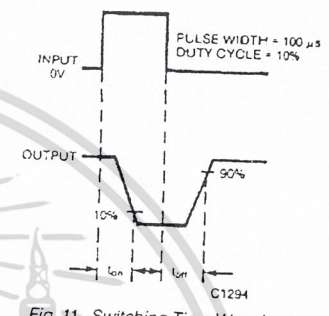


Fig. 11. Switching Time Waveforms

OPERATING SCHEMATICS

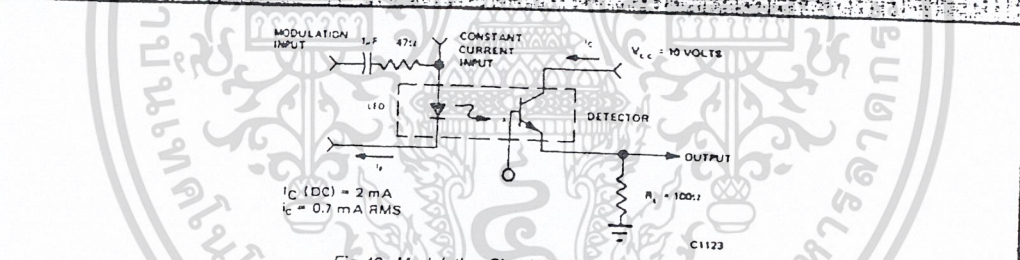


Fig. 12. Modulation Circuit Used to Obtain Output vs. Frequency Plot

NOTES

1. The current transfer ratio (I_o/I_i) is the ratio of the detector collector current to the LED input current with V_{ce} at 10 volts.
2. The frequency at which i_c is 3dB down from the 10 kHz value.
3. Rise time (t_r) is the time required for the collector current to increase from 10% of its final value to 90%.
Fall time (t_f) is the time required for the collector current to decrease from 90% of its initial value to 10%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. รศ.สุนันท์ ศรีถนยนิษฐ์ , การถ่ายเทความร้อน ,หน้า (2-2)-(2-4) , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
2. พงษ์เจต พรหมวงศ์ , การถ่ายเทความร้อน , พิมพ์ครั้งที่ 1 , หน้า 1-12 , Japan International Cooperation Agency (JICA) ,มิถุนายน 2534
3. รศ.ดร. วุฑฒิ พันธุมนาวิน , เลเซอร์ฟิสิกส์ , พิมพ์ครั้งที่ 1 , หน้า 30-42 และ 66-68 , โรงพิมพ์มิตรนราการพิมพ์ , พ.ศ. 2532
4. Larry C . Andrews , Special Function of Mathematics For Engineers , 2nd ed. ,pp. 62-63 and 263-264 , McGraw-Hill ,1992
5. J.N. Denas , S.E. Denas , Interfacing and Scientific Computing on Personal Computers , pp. 84-94
6. J.Xie and A. Kar , J. "Mathematical modeling of melting during laser materials processing" , American Institute of Physics 81(7) . (1997) : 3015-3022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้