

การออกแบบหัวเลเซอร์สำหรับเลเซอร์ผ่าตัด
Laser Head Design for Laser Scalpel

วิวัฒน์ เฝ้าลินจง
WIWAT POWLINJONG

อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร.แดเนียล บริน
ADVISOR
DANIEL BREEN D.Phil(OXON)

วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2531

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

แบบฟอร์มการให้คะแนนการสอบวิทยานิพนธ์

สำหรับนักศึกษาระดับมหาบัณฑิต

ชื่อนักศึกษา นายวิวัฒน์ เฝ้าลิ้นจี่ เลขประจำตัว 29126-017

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ การออกแบบหัวเลเซอร์สำหรับเลเซอร์ผ่าตัด
(Laser Head Design for Laser Scalpel)

ชื่ออาจารย์ผู้ควบคุมการสอบ	ลายมือชื่อ	ผลการสอบ
ดร.แดเนียง บริน		ตง
รศ.ดร.สีทธิชัย โภคยอดม		ตง
รศ.ดร.สมเกียรติ ศกเดช		ตง
รศ.มนัส สังวาร์ศิลป์		ผ่าน
อาจารย์พลผดุง ผดุงกุล		ตง

วันเดือนปี ที่สอบ 18 มกราคม 2532 เวลา 10.30 น. สถานที่ ห้อง D-107


(นายสีทธิชัย โภคยอดม)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ii
สัญลักษณ์และความหมาย	iii
บทที่ 1 เลเซอร์	1
1.1 บทนำ	1
1.2 เงื่อนไขการเกิดเลเซอร์	1
1.2.1 การเปล่งแสงแบบถูกเร้า	1
1.2.2 Optical Cavity	1
1.3 เลเซอร์เพื่อการแพทย์	4
บทที่ 2 ความต้องการเฉพาะของเลเซอร์ผ่าตัด	7
2.1 ลักษณะของ mode และกำลังทางออก	7
2.2 มุมการขยายตัวของลำแสง	8
2.3 จุดโฟกัสและพลังงานที่จุดโฟกัส	9
บทที่ 3 การออกแบบหัวเลเซอร์	12
3.1 บทนำ	12
3.2 แนวทางการพิจารณาสำหรับการออกแบบ	12
3.2.1 การสูญเสียพลังงานภายในระบบ	13
3.2.2 อัตราขยายภายในระบบ	15
3.2.3 การคำนวณกำลังทางออกของเลเซอร์	16
3.3 ขั้นตอนในการออกแบบหัวเลเซอร์	18
3.3.1 ขั้นตอนการออกแบบ	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 การสร้างและทดสอบ คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ ที่ใช้ในการผ่าตัด	21
4.1 บทนำ	21
4.1.1 หลอดเลเซอร์	21
4.1.2 ฐานเลเซอร์	23
4.1.3 กระจกปิดปลายทางออกของท่อกำเนิด	23
4.1.4 ขั้ว Electrode	25
4.1.5 กระจกสะท้อนของระบบ	27
4.1.6 แชนส่งกำลังเลเซอร์	28
4.2 การออกแบบแชนส่งกำลังเลเซอร์	29
4.3 สรุปรายละเอียดส่วนประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์ เลเซอร์	33
บทที่ 5 การทดลอง	35
บทที่ 6 สรุป	48
กิตติกรรมประกาศ	50
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวกที่ 1 แบบแสดงรายละเอียดของแชนส่งกำลังเลเซอร์ แต่ละส่วน	53
ภาคผนวกที่ 2 แบบแสดงแชนส่งกำลังเลเซอร์ที่ประกอบแล้ว	71
ภาคผนวกที่ 3 ตารางแสดงคุณสมบัติของกระจกแต่ละชนิดกับ ความยาวคลื่นต่าง ๆ	73
ภาคผนวกที่ 4 รายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้วัดกำลังเลเซอร์	75
ภาคผนวกที่ 5 รายละเอียดของ Rectangular Windows ที่ใช้ Zine Selenide	78
ภาคผนวกที่ 6 รายละเอียดของเลนส์ที่ใช้ Cadmium Telluride	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

การนำเอาเลเซอร์แบบคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ในการผ่าตัดนั้น เนื่องจากเลเซอร์แบบคาร์บอนไดออกไซด์ มีความยาวคลื่น 10.6 ไมโครเมตร ขณะเดียวกันเนื้อเยื่อมีคุณสมบัติพิเศษในการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นนี้ได้ดี

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แสดงให้เห็นถึงความต้องการและลักษณะพิเศษเฉพาะของเลเซอร์ผ่าตัด และได้แสดงการออกแบบโครงสร้างของเครื่องที่ได้สร้างขึ้น ทั้งได้มีการทดสอบเลเซอร์แบบคาร์บอนไดออกไซด์นี้ ความต้องการพื้นฐานของเลเซอร์ผ่าตัดชนิดนี้ ประกอบไปด้วยกำลังทางออกควรอยู่ในช่วง 30 วัตต์ การเลือกโหมดจะต้องทำให้ได้ขนาดของจุดโฟกัสที่มีขนาดเล็ก และการออกแบบและสร้างแขนส่งกำลัง ไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้ ทั้งนี้ต้องมีน้ำหนักเบา เคลื่อนไหวได้สะดวก

หลังจากที่ได้ออกแบบหาค่าส่วนประกอบต่าง ๆ ด้วยทฤษฎีการคำนวณแล้ว ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยัง ได้แสดงให้เห็นถึงรายละเอียดในการสร้าง เทคนิคในการเลือกโหมด พร้อมทั้งทดสอบให้เห็นถึงความแตกต่างของโหมดต่าง ๆ อีกด้วย และสุดท้ายได้ทดสอบเครื่องเลเซอร์ที่สร้างขึ้นด้วยการตัดเนื้อหมูตัวอย่าง ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อของมนุษย์

เลเซอร์ที่ได้สร้างขึ้นนี้ นับว่ามีคุณสมบัติเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการผ่าตัดได้ แต่ยังมีปัญหาทางด้านกลไกของการส่งกำลัง ซึ่งการสร้างแขนส่งกำลังที่ใช้งานได้จริงต้องการเครื่องมือที่มีความละเอียดสูงและค่าใช้จ่ายในการสร้างที่ค่อนข้างสูงด้วย จึงเป็นการยากมากสำหรับขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้ที่จะทำให้สมบูรณ์ได้

Abstract

The absorption characteristic of flesh tissue at infra-red wavelength of 10.6 microns makes the output of carbon dioxide lasers ideal for surgical application. The present thesis is concerned with the requirements, design, construction, and testing of a carbon dioxide laser for use as a laser scalpel. The basic requirements are a) output power in the 30 watts range b) focusing to minimum spot size with implication for mode selection c) construction design with delivery of the power output to the required target area.

After a theoretical calculation of design parameters, construction details are given. Mode selection techniques and test are described. Finally, scalpel test were made on a pork sample which approximates closely to human flesh.

While the characteristics of the laser constructed were adequate for surgical use the mechanical of power delivery were explored rather than solved. Construction of a suitable mechanical delivery arm requires workshop skills and budgetary expenses beyond the scope of the present thesis.

สัญลักษณ์และความหมาย

A	=	1/2 ของขนาดจุดโฟกัส
A _T	=	พื้นที่หน้าตัดของท่อกำเนิด
D _T	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกำเนิด
F	=	ความยาวโฟกัสของเลนส์
g	=	เงื่อนโซของเสถียรภาพของกระจกสะท้อน
g ₀	=	Unsaturated gain
Go	=	Small Signal Gain Coefficient หรือ Unsaturated gain
I _s	=	Saturation intensity
I _o	=	ความเข้มของกำลังทางออก (out put intensity)
l	=	loss ภายในระบบ
L _A	=	ระยะ Discharge ของท่อกำเนิด
L _c	=	ระยะระหว่างกระจกสะท้อนทั้งสองด้าน
l _๓	=	Scattering และ Absorbtion loss
l _{pq}	=	Diffraction loss
m,n	=	order ของ mode
N	=	Fresnel number
P	=	กำลังทางออกของเลเซอร์ (Power Output)
R	=	รัศมีความโค้งของกระจกทางออก
r'	=	รัศมีของ Beam ก่อนเข้าเลนส์
r ₁	=	รัศมีความโค้งของกระจกที่ปลายแหล่งกำเนิดด้านหนึ่ง
r ₂	=	รัศมีความโค้งของกระจกที่ปลายแหล่งกำเนิดอีกด้านหนึ่ง
S	=	เส้นผ่านศูนย์กลางจุดโฟกัส
T	=	เปอร์เซ็นต์การสะท้อนของกระจกทางออก
TEM	=	Transverse electromagnetic mode

W_0	=	บริเวณคอคอดของลำโฟตอนที่ออสซิลเลทส์ภายในแหล่งกำเนิด (Beam waist)
W_1	=	รัศมีของลำโฟตอนที่ตกกระทบที่กระจกที่มีรัศมีความโค้งเท่ากับ r_1
W_2	=	รัศมีของลำโฟตอนที่ตกกระทบที่กระจกที่มีรัศมีความโค้งเท่ากับ r_2
$W(X)$	=	รัศมีของลำแสงที่ระยะ X
Watt	=	กำลังของเลเซอร์ที่ยังไม่ผ่านเลนส์
Watt/cm^2	=	กำลังของเลเซอร์ที่จุดโฟกัสหลังผ่านเลนส์
X	=	ระยะทางระหว่างหัวเลเซอร์ถึงปลายทางที่มีความยาว X
Δz	=	ลำขนานบริเวณตำแหน่งโฟกัส
λ	=	ความยาวคลื่นของลำแสงเลเซอร์
α	=	มม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

เลเซอร์

1.1 บทนำ

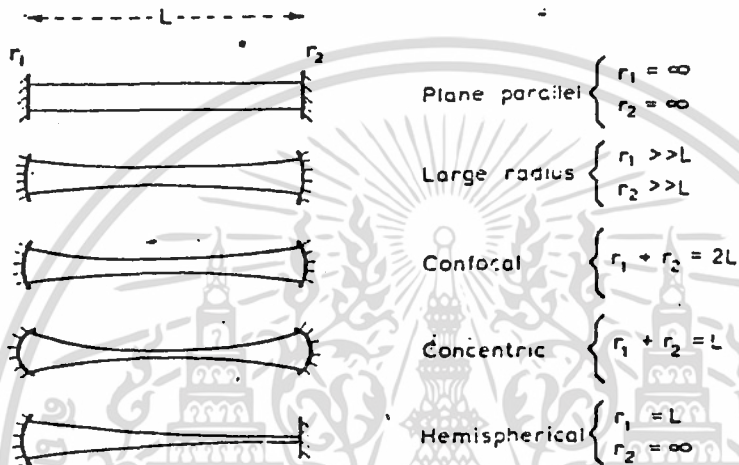
เลเซอร์ (Laser) เป็นคำย่อของคำว่า "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" ซึ่งหมายถึงการปลดปล่อยพลังงาน เนื่องจากถูกเร้าหรือกระตุ้นจากแหล่งพลังงานภายนอก การปลดปล่อยพลังงานแบบถูกเร้านี้ทำให้ลำโฟตอนที่ถูกละปล่อยออกมา มีความยาวคลื่นและเฟสเดียวกัน ซึ่งเป็นลักษณะ coherency ของแสงเลเซอร์ ชะเดียวกันความหมายของคำว่า Laser ยังบอกถึงการขยายแสง Light amplification ด้วย ซึ่งหมายถึงว่าต้องมี optical cavity เพื่อให้เกิดการ Oscillation ในระบบ และเกิดการ Amplifier ขึ้น

1.2 เงื่อนไขการเกิดเลเซอร์

1.2.1 การเปล่งแสงแบบถูกเร้า (Stimulated Emission) และ Population Inversion ลักษณะเช่นนี้ต้องการพลังงานมากกระตุ้นจากภายนอก เพื่อให้เกิดปลดปล่อยโฟตอนออกมา [1]

1.2.2 Optical cavity เพื่อให้เกิดการขยายแสงภายในระบบ วิธีการที่จะขยายแสงหรือขยายจำนวนโฟตอนมีลักษณะและวิธีการคล้ายกับวิธีการกักเก็บทางไฟฟ้า [1],[3] ลักษณะทางเรขาคณิตของ optical cavity มีหลายลักษณะเช่น optical cavity ที่เป็นแบบ plane parallel ที่มีกระจกที่ปลายแหล่งกำเนิดทั้ง 2 ด้าน มีรัศมีมีความโค้งเป็นอนันต์ หรือ แบบ confocal ปลายทั้งสองด้านของแหล่งกำเนิดมีรัศมีมีความโค้งของกระจกเท่ากับสองเท่าของความยาวแหล่งกำเนิด และยังมีส่วนอื่นอีกมาก

จากรูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นถึงลักษณะกระจกแบบต่าง ๆ และรูปร่างทางเรขาคณิตของโฟตอนที่โหมดพื้นฐาน อยู่ระหว่างกระจกทั้ง 2 ด้าน ภายใต้เงื่อนไขว่า mode ของการออสซิลเลชันต้องเป็น fundamental mode เท่านั้น [7] ถ้าไม่ใช่ fundamental mode รูปร่างทางเรขาคณิตของโฟตอนจะไม่เป็นดังรูป



รูปที่ 1.1 รูปแสดงกระจกสะท้อนภายในเลเซอร์แบบต่าง ๆ โดยที่ r หมายถึง รัศมีความโค้งของกระจกสะท้อน และ L หมายถึงความยาวระหว่างกระจกสะท้อนทั้ง 2 ด้าน

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้กระจกสะท้อนแบบ large radius และ hemispherical ซึ่งด้านหนึ่งของกระจก เป็นกระจกที่มีรัศมีความโค้งเป็นอนันต์ และอีกด้านหนึ่งมีรัศมีความโค้งมากกว่าแหล่งกำเนิดหลายเท่า ส่วนเหตุผลของการใช้กระจกชนิดนี้จะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 4

การคำนวณหาขนาดของลำโฟตอนที่ตกกระทบกระจกแต่ละด้าน ที่ปลายทั้งสองด้านของแหล่งกำเนิด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1.1 และ 1.2 [7]

$$w_1^4 = (X/\pi)^2 r_1^2 (r_2 - Lc)/(r_1 - Lc) (r_1 + r_2 - Lc) \dots (1.1)$$

$$w_2^4 = (X/\pi)^2 r_2^2 Lc (r_1 - Lc)/(r_2 - Lc) (r_1 + r_2 - Lc) \dots (1.2)$$

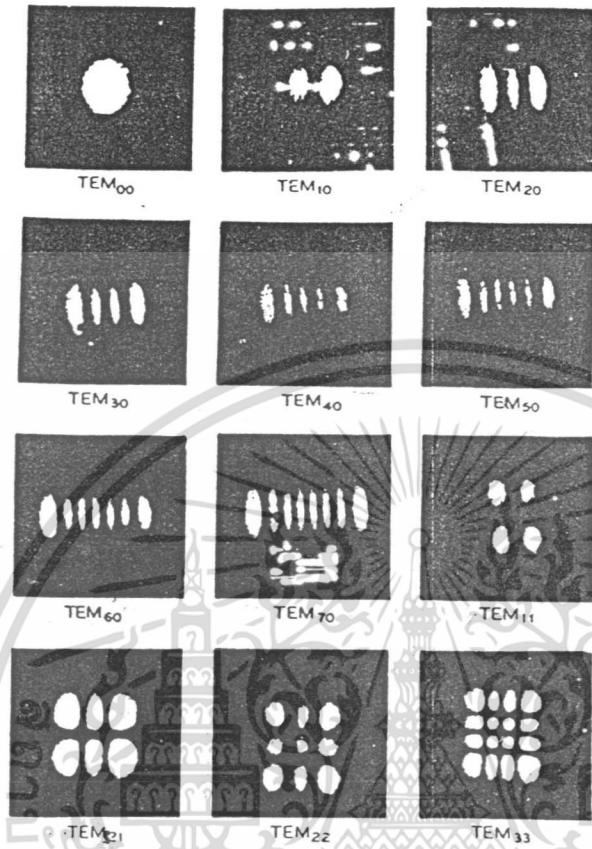
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ ω_1 = รัศมีของลำโพตอนที่ตกกระทบบนกระจกสะท้อนที่ปลายแหล่งกำเนิดด้านหนึ่ง
 ω_2 = รัศมีของลำโพตอนที่ตกกระทบบนกระจกสะท้อนที่ปลายแหล่งกำเนิดอีกด้านหนึ่ง
 λ = ความยาวคลื่นของแสง
 L_c = ความยาวระหว่างกระจกสะท้อนทั้งสองด้าน
 r_1 = รัศมีของกระจกสะท้อน 100%
 r_2 = รัศมีความโค้งของกระจกทางออก

ลักษณะของกระจกสะท้อนแบบ large radius ผสมกับ hemispherical นี้ทำให้ Uniphase mode หรือ Fundamental mode มีขนาดของลำโพตอน (ω_0) มีค่าเท่ากับ ω_2 พอดี หรืออาจกล่าวได้ว่า บริเวณคอคอของลำโพตอนที่ออสซิลเลทส์ภายในแหล่งกำเนิดตกกระทบบนกระจกที่มีรัศมีความโค้ง r_2 พอดี

การคำนวณหาขนาดของรัศมีของลำโพตอนและองค์ประกอบอื่นของหัวเลเซอร์ เพื่อให้ระบบออสซิลเลทส์ที่ Fundamental (TEM_{00}) mode จะได้กล่าวในบทต่อไป

จากรูปที่ 1.2 แสดงให้เห็นถึงรูปร่างของ mode ต่าง ๆ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า TEM_{00} mode มีความสว่างราบเรียบตลอดพื้นที่ แตกต่างจาก mode อื่น ๆ ที่มีบริเวณแถบมืดสลับกับบริเวณแถบสว่าง ซึ่งหมายถึงพลังงานที่จุดโฟกัสหลังผ่านเลนส์จะแตกต่างกันมากอีกด้วย ดังจะกล่าวในบทต่อไป



รูปที่ 1.2 รูปแสดงรูปแบบของ Mode ที่ Order ต่าง ๆ

1.3 เลเซอร์เพื่อการแพทย์ (MEDICAL LASER)

แนวคิดในการใช้เลเซอร์แทนใบมีดในการผ่าตัด เนื่องจากเมื่อแสงเลเซอร์ถูกยิงผ่านเลนส์แล้วที่จุดโฟกัส จะเล็กมาก ขึ้นอยู่กับขนาดความยาวโฟกัสของเลนส์ที่เลือกใช้ จากที่จุดโฟกัสมีขนาดเล็กนี้เอง จึงเปรียบเสมือนใบมีดที่คมและเล็กมากนั่นเอง

การใช้งานเลเซอร์ในทางการแพทย์เพิ่มมากขึ้นในหลาย ๆ ด้าน และโดยอาศัยเลเซอร์หลายชนิดที่ให้ผลที่แตกต่างกัน เช่น ใช้เลเซอร์ที่บดหินทำให้แสงสีแดง สามารถใช้ลบรอยปานดำบนผิวหนังได้ดี เพราะเลเซอร์ชนิดนี้ไม่มีปฏิกิริยาต่อผิวหนังที่ไม่ใช่สีดำ ขณะเดียวกับอาร์กอนเลเซอร์ที่ให้แสงสีเขียวใช้ลบปานแดงหรือจุดแดงบนผิวหนัง เพราะเลเซอร์อาร์กอนมีปฏิกิริยากับสีแดง การลบรอยปานสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาหรือสีแดงนั้นก็อาศัยหลักการที่ว่าสีบางชนิดมีปฏิกิริยากับความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ต่างชนิดกัน โดยที่สีเฉพาะนั้นจะดูดกลืนพลังงานความร้อนไว้และทำลายตัวเอง ขณะเดียวกันเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ก็นิยมใช้กันมากในทางการแพทย์ เช่น ใช้ในงานผ่าตัดแทนใบมีด ใช้ละลายเนื้องอกหรือกระตังใช้เชื่อมเส้นเลือดฝอยในลูกตา สามารถเชื่อมเส้นเลือดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร ซึ่งโดยปรกติจะเป็นการผ่าตัดที่ยากมากและมีโอกาสสำเร็จได้น้อย ระบบเลเซอร์นี้จะสามารถเชื่อมต่อเส้นเลือดขนาดเล็กได้โดยอาศัยปรากฏการณ์ของการ หลอมละลายเชื่อมติดกันของเนื้อเยื่อโปรตีน เมื่อถูกทำลายด้วยเลเซอร์ที่มีกำลังพอเหมาะและทำงานอย่างนี้มวนล มีแต่เลเซอร์ชนิดนี้เท่านั้นที่เหมาะสมกับงานที่มีขนาดเล็กนี้ได้ง่ายและรวดเร็ว

จากการทดลองทำให้ทราบว่าแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 10.6×10^{-6} เมตรนี้ ถูกดูดกลืนความร้อนจากน้ำได้ดีและภายในเนื้อเยื่อของมนุษย์หรือสัตว์ก็ประกอบด้วยน้ำจำนวนมาก ดังนั้นเมื่อแสงเลเซอร์กระทบกับเนื้อเยื่อ น้ำที่อยู่ภายในเนื้อเยื่อจะร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื้อเยื่อที่ตำแหน่งนั้นก็จะถูกความร้อนทำลายและระเหยไปอย่างรวดเร็วเช่นกัน โดยที่เนื้อเยื่อบริเวณรอบ ๆ ยังไม่ถูกทำลาย

เมื่อเปรียบเทียบความได้เปรียบของเลเซอร์ใบมีดกับใบมีดธรรมดาพบว่า

1. คนไข้จะไม่เสียเลือดขณะผ่าตัด เพราะความร้อนของเลเซอร์จะไปหลอมละลายหลอดเลือดที่ปากแผล เลือดจึงไม่ไหล
2. เนื่องจากไม่ต้องถ่ายเลือดเพราะไม่เสียเลือดขณะผ่าตัด คนไข้จึงไม่ต้องเสี่ยงกับการติดเชื้อขณะผ่าตัด
3. ไม่ต้องเสี่ยงต่อการติดเชื้อที่บริเวณบาดแผลขณะผ่าตัด เพราะความร้อนของแสงเลเซอร์จะฆ่าเชื้อโรคที่บาดแผลไปในตัว
4. เลเซอร์สามารถเข้าไปถึงส่วนต่าง ๆ ของร่างกายได้ง่าย ขณะที่ใบมีดธรรมดาทำไม่ได้
5. เลเซอร์สามารถยิงทีละครั้งในช่วงเวลาสั้น ๆ เพื่อทำลายเนื้องอกให้ระเหยไป โดยไม่ต้องเสี่ยงกับเส้นประสาทที่อยู่ข้างเคียง เพราะบางครั้งใบมีดธรรมดาไม่สามารถตัดเนื้องอกออกได้ เพราะมีเส้นประสาทที่อยู่ข้างเคียงจำนวนมาก

นอกจากข้อดีตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น ก็ยังมีข้อควรระวังในการใช้งานเลเซอร์ผ่าตัดอีกด้วย ข้อควรระวังในการใช้เลเซอร์ผ่าตัด

1. เลเซอร์ไม่ควรใช้ร่วมกับ แอลกอฮอล์ อีเธอร์ หรือก๊าซที่ไวไฟ
2. ทุกคนที่อยู่ในห้องที่ใช้งานเลเซอร์ต้องสวมแว่นที่ทําจากแก้วหรือพลาสติก เพราะแสงเลเซอร์

จะไม่สามารถผ่านแก้วหรือพลาสติกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ไม่ควรมีอุปกรณ์ใด ๆ ที่สะท้อนแสงได้อยู่ภายในห้อง เพราะอาจเป็นอันตรายได้ถ้าแสง เลเซอร์ถูกสะท้อนโดยวัตถุสะท้อนแสงนั้น
4. ควรมีเครื่องหมายแสดงไว้หน้าห้องว่าห้องนี้กำลังใช้งานเลเซอร์
5. ทุกคนควรจะทราบว่าแสง เลเซอร์ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่ความร้อนของมันเป็นอันตรายต่อทุกคน ดังนั้นจึงต้องระมัดระวัง
6. ทุกคนควรจะทราบว่าภายในระบบของเลเซอร์ประกอบด้วยไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งเป็นอันตราย
7. จะ เป็นอันตรายอย่างยิ่งถ้าเครื่อง เปิดทิ้งไว้โดยไม่มีผู้ใช้ เครื่องอยู่ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ความต้องการเฉพาะของเลเซอร์ผ่าตัด

2.1 บทนำ

เลเซอร์ผ่าตัดแบบคาร์บอนไดออกไซด์ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการทำงานคือ

- มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา
- มีกำลังงานมากพอที่จะใช้ขังงานผ่าตัดได้ ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 5-30 วัตต์
- Transverse electromagnetic mode ที่ออกมาต้องอยู่ใน order ต่ำที่สุด
- มีเสถียรภาพและมีระบบระบายความร้อนที่ดี
- มีความสะดวกในการใช้งาน โดยมีแขนส่งกำลัง เลเซอร์ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ

เลเซอร์แบบคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดิสซาร์ดตามแนวแกน โดยทั่วไปแล้วพลังงานที่ออกมาจากท่อกำเนิดจะแปรผันโดยตรงกับความยาวของท่อกำเนิดประมาณ 10 วัตต์ ต่อความยาว 1 ฟุต ดังนั้นถ้าต้องการพลังงานทางออก 30 วัตต์ จึงต้องการความยาวประมาณ 3 ฟุต หรือ 1 เมตร [3]

ในการออกแบบนี้ไม่เพียงแต่จะคำนึงถึงกำลังทางออกแต่เพียงอย่างเดียวเท่านั้น ยังต้องคำนึงถึง Transverse electromagnetic mode ที่เป็น pattern ของกำลังทางออกอีกด้วย

2.2 ลักษณะของ mode และกำลังทางออก

ลักษณะของ mode จะบ่งบอกถึงการกระจายพลังงานครอบคลุมพื้นที่ mode ที่เกิดขึ้นภายในแหล่งกำเนิดจะมี Pattern ต่าง ๆ กัน เนื่องจากมีความเร็ว Phase ที่ต่างกัน ถ้ากำหนดให้ Phase Shift เป็นฟังก์ชันของ mode number ก็จะสามารถกำหนด Phase Shift ของแต่ละ mode ได้จากสมการที่ 2.1 [16]

$$\Phi = (m + n) \tan^{-1} (\lambda Z / \pi W_0^2) \quad \text{-----(2.1)}$$

เมื่อ Φ = Phase
 m, n = Mode Order
 Z = ระยะทางตามแนวแกนของแสง
 λ = ความยาวคลื่นของแสง
 W_0 = รัศมีของ Beam Waist ภายใน Cavity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.1 แสดงว่าความเร็ว Phase จะเพิ่มขึ้นเมื่อ Order ของ Mode เพิ่มขึ้นและโดยเฉพาะภายใน Cavity Resonator จะมีความแตกต่างของ Resonance Frequency มากมาย ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างเช่น ขนาดของหลอด ความยาวระหว่างกระจก ซึ่งจะทำให้เกิด Mode หลายชนิดขึ้นภายใน Resonator

สำหรับเครื่องผ่าตัดที่ใช้เลเซอร์ TEM₀₀ mode จะมีความสำคัญที่สุดเพราะ TEM₀₀ mode พลังงานส่วนใหญ่จะอยู่ที่จุดศูนย์กลาง (ประมาณ 86.4%) และเป็นที่ทราบดีว่าพลังงานของ Mode ที่มี Order สูงกว่า เช่น TEM₀₁ พลังงานไม่ได้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ขนาดของจุดโฟกัส (Spot Size) หลังผ่านเลนส์จะใหญ่ขึ้น ดังนั้นในการผ่าตัดถ้าเปรียบเทียบพลังงาน ณ จุดโฟกัสที่ได้จาก TEM₀₀ และ TEM₀₁ โดยยิงแสงเลเซอร์ผ่านเลนส์ที่มีความยาวโฟกัส (FOCAL LENGTH) เท่ากัน จะเห็นความแตกต่างได้ชัดเจนจากตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1

MODE	ความยาวโฟกัส	ขนาดของจุดโฟกัส	ความเข้มของพลังงานที่จุดโฟกัส	พลังงานก่อนเข้าเลนส์หรือกำลังทางออก
TEM ₀₀	400 mm.	.8 mm.	1900w/cm ²	10 วัตต์
TEM ₀₁	400 mm.	2 mm.	1900w/cm ²	60 วัตต์

จากตารางที่ 2.1 พบว่า ถ้า mode order สูงขึ้นขนาดของจุดโฟกัส (spot size) จะใหญ่ขึ้น ถ้าต้องการความเข้มของพลังงานที่จุดโฟกัสเท่ากัน ต้องใช้กำลังทางออกถึง 60 วัตต์ ขณะที่ TEM₀₀ สามารถใช้กำลังทางออกเพียง 10 วัตต์เท่านั้น ดังนั้นในการออกแบบเลเซอร์ผ่าตัดถ้าต้องการให้ได้พลังงานสูงสุดจึงต้องกำจัด mode อื่น ๆ ที่มี order สูงขึ้น ด้วยการออกแบบลักษณะ โครงสร้างของ Laser head อย่างเหมาะสมด้วย ซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

2.3 มุมการขยายตัวของลำแสง (Beam divergence)

มุมการขยายตัวของลำแสงหรือ Beam divergence มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ mode ที่ออกมาจากแหล่งกำเนิด เพราะโดยปรกติลำแสง เลเซอร์ มี mode ต่างกัน จะมีมุมการขยายตัวของแสงที่ต่างกันซึ่ง order ของ mode สูงขึ้นมุมการขยายตัวของแสงก็จะขยายตัวมากขึ้น ในทางการแพทย์ต้องการลำแสงที่ออกมาอย่างสม่ำเสมอ การขยายตัวของลำแสงน้อย ซึ่ง mode ที่เหมาะสมมีการขยายตัวต่ำที่สุดก็คือ TEM₀₀ mode ซึ่งมุมการขยายตัวเป็นไปตามสมการที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha \text{ TEM}_{00} = \lambda / \pi W_0 \quad \text{-----}(2.2)$$

$\alpha \text{ TEM}_{00}$ = มุมการขยายตัวของลำแสงที่ mode order $m, n=0$
 λ = ความยาวคลื่นของลำแสง
 W_0 = รัศมีบริเวณคอขวดของแสงภายในแหล่งกำเนิด

สาเหตุที่เลเซอร์ผ่าตัดในทางการแพทย์ต้องการมุมการขยายตัวของลำแสงที่ต่ำเนื่องจากเหตุผล 2 ประการ คือ

1. ต้องการให้ขนาดของลำแสงที่ปลายทางออกยังคงมีขนาดเกือบเท่าเดิม โดยที่ปลายทางออกก่อนเข้าเลนส์มีระยะทางประมาณ 2 เมตร ซึ่งการคำนวณหาขนาดของลำแสงที่ปลายทางออกก่อนเข้าเลนส์สามารถหาได้จากสมการ

$$W^2(X) = W_0^2 (1 + [X\lambda / \pi W_0^2]) \quad \text{-----}(2.3)$$

เมื่อ $W(X)$ = รัศมีของลำแสงที่ระยะ x

X = ระยะทางระหว่างหัวเลเซอร์ ถึงปลายทางออก (2 เมตร)

λ = ความยาวคลื่นของลำแสง (10.6×10^{-6} เมตร)

W_0 = รัศมีของลำแสงที่แหล่งกำเนิด (4.5 มิลลิเมตร)

เมื่อกำหนดค่าเข้าไปในสมการ ดังนั้นรัศมีของลำแสงที่ระยะ $x = 4.5000101$ มม. จะเห็นว่า TEM_{00} ที่ระยะทาง 2 เมตร จากแหล่งกำเนิดลำแสงจะเบี่ยงเบนออกจากแหล่งกำเนิดเพียง .0000101 มิลลิเมตร เท่านั้น ซึ่งนับว่าน้อยมาก

2. ต้องการให้ความเข้มของแสง ที่จุดโฟกัสมีกำลังงานสูงที่สุด รายละเอียดจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

2.4 จุดโฟกัสและพลังงานที่จุดโฟกัส

เนื่องจากเนื้อเยื่อภายในร่างกายของสิ่งมีชีวิต มีจุดหลอมละลายแตกต่างกัน และขณะเดียวกันการผ่าตัดก็ต้องการใบมีดที่มีขนาดเล็กและคมมาก ดังนั้น เมื่อลำแสงเลเซอร์ ยิงออกมาจากแหล่งกำเนิดจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางโดยทั่ว ๆ ไปเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของแหล่งกำเนิด ดังนั้น เพื่อให้มีขนาดเล็กลงมากที่จุดตัดและมีกำลังสูงมากที่จุดตัด จึงต้องอาศัยเลนส์เข้าช่วย เพื่อให้เป็นไปตามความต้องการดังกล่าว พลังงานที่ผ่านเลนส์แล้วนี้ คิดพลังงานในแง่ของวัตต์ต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.4 [2]

$$\text{Power Density} = \text{watt} \times 100 / \pi A^2 = \text{watts/cm}^2 \quad \text{----}(2.4)$$

โดยที่ A = $1/2$ ของขนาดจุดโฟกัส (Spot Size)

และ watt = กำลัง เลเซอร์ก่อนเข้าเลนส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งพื้นที่หรือขนาดของจุดโฟกัส (Spot Size) จะเป็นฟังก์ชันของเลนส์ ความยาวโฟกัส และ mode ขณะเดียวกันขนาดของจุดโฟกัส (Spot Size) ก็จะมีผลโดยตรงต่อความเข้มของแสงที่จุดโฟกัส และความลึกในการตัด การคำนวณหาขนาดของจุดโฟกัสสามารถหาได้จากสมการที่ 2.5 [15]

$$S = 2FA^2 / \pi r' \quad \text{-----(2.5)}$$

เมื่อ S = เส้นผ่าศูนย์กลางของจุดโฟกัส
 λ = ความยาวคลื่นของแสง
 r' = รัศมีของลำแสงก่อนเข้าเลนส์
 F = ความยาวโฟกัสของเลนส์

และโดยปรกติลำแสง เมื่อผ่านเลนส์แล้วจะรวมตัวกันที่จุดโฟกัส และจะมีลำขนานกันอยู่เป็นระยะทาง Δz ก่อนที่จะบานตัวออกในลักษณะของการบานตัวแบบเกาส์ เขียนระยะทาง Δz หาได้จากสมการที่ 2.6 [5]

$$\Delta z = \pi S^2 / 4\lambda \quad \text{-----(2.6)}$$

S = เส้นผ่าศูนย์กลางของจุดโฟกัส
 λ = ความยาวคลื่นของแสง

เมื่อนำสมการทั้ง 3 มาพิจารณา(ความเข้มของพลังงานที่จุดโฟกัส, ขนาดของจุดโฟกัสและลำขนานที่จุดโฟกัส) จะพบว่าทั้ง 3 สมการ มีความสัมพันธ์ต่อความเร็วและความลึกของการตัดอย่างมาก ซึ่งสามารถยกตัวอย่างจาก เลเซอร์ที่ใช้ในการแพทย์ที่ใช้กันอยู่ในโรงพยาบาล [4]

- เครื่องคาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์มีความยาวคลื่น = 10.6×10^{-6} เมตร
- ขนาดของแหล่งกำเนิดทำให้รัศมีของลำแสง (r') = .45 เซนติเมตร
- กำลังทางออก (Power Output) Watts = 5 - 25 วัตต์
- ใยเลนส์มีความยาวโฟกัส (F) = 95.25, 63.5 และ 50 มิลลิเมตร

จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ของความยาวโฟกัส ขนาดของจุดโฟกัส และพลังงานที่จุดโฟกัสได้จากตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2

ความยาวโฟกัส	(F=95.25)	(F=63.5)	(F=50) mm
ขนาดจุดโฟกัส (S)	.14 mm.	0.095 mm.	0.075 mm.
Δz	1.45 mm.	.668 mm.	.416 mm.
พลังงานก่อนเข้าเลนส์	Watts/cm ²	Watts/cm ²	Watts/cm ²
25	162403	352698	565884
20	129922	282158	452707
10	64961	149079	226354
5	32480	70539	113174

จากตารางที่ 2.2 จะสังเกตเห็นว่าเลนส์ที่มีจุดโฟกัส (Spot Size) ขนาด 0.075 มิลลิเมตร ใช้กำลังทางออกเพียง 5 วัตต์ จะได้พลังงานที่จุดโฟกัสเท่ากับเลนส์ที่มีจุดโฟกัสขนาด .14 มิลลิเมตร ที่กำลังทางออก 20 วัตต์ แต่ขณะเดียวกันการใช้เลนส์ที่มีขนาดจุดโฟกัส .075 มิลลิเมตรนั้น ก็เปรียบเสมือนใบมีดที่บางมาก และมีข้อจำกัดคือ ต้องใช้ความเร็วสูงขณะทำการตัดเนื้อเยื่อ เพราะลำแสงจะมีลักษณะ (Δz) ก่อนที่จะบานตัวออกที่สั้นมากเพียง .416 มิลลิเมตรเท่านั้น ถ้าต้องการให้มีลักษณะของจุดโฟกัส (Δz) ที่มีระยะยาวขึ้นต้องทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางที่จุดโฟกัส (S) ใหญ่ขึ้นคล้ายกับใบมีดที่หนาขึ้น โดยเปลี่ยนเลนส์ที่มีระยะโฟกัสยาวขึ้น ขึ้นอยู่กับขนาดและความเหมาะสมที่ต้องการใช้

อย่างไรก็ตาม การใช้ความเร็วสูง ๆ จะมีผลดีก็ต่อเมื่อใช้จุดโฟกัสที่มีขนาดเล็ก ซึ่งจะให้กำลังงานสูงมากที่จุดโฟกัส ขณะเดียวกันก็มีข้อเสียของการใช้ขนาดจุดโฟกัสที่เล็กมากคือ

1. การใช้ความเร็วสูงต้องการความชำนาญและประสบการณ์มากในการผ่าตัด ผู้ที่จะเริ่มใช้เทคโนโลยีด้านนี้ในการผ่าตัดต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ
2. ขนาดจุดโฟกัสที่เล็ก จะมีผลทำให้ลำแสง ณ จุดโฟกัสสั้น จึงต้องระมัดระวังในเรื่องการเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งที่จะผ่าตัด

บทที่ 3

การออกแบบหัวเลเซอร์

3.1 บทนำ

การออกแบบเลเซอร์แบบคาร์บอนไดออกไซด์กำลังต่ำ ต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่ล้วนแต่มีความสำคัญด้วยกันทั้งสิ้น โดยเฉพาะความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในแหล่งกำเนิดจะเป็นตัวกำหนด Mode ที่เกิดขึ้น โดยธรรมชาติแล้ว Mode ที่เกิดขึ้นภายในตัวกลางแหล่งกำเนิดจะมีหลาย Mode แต่จุดประสงค์ของเลเซอร์ชนิดนี้ต้องการให้เกิดขึ้นเพียง Mode เดียว (Fundamental Mode TEM₀₀) ส่วน Mode อื่น ๆ ที่อยู่ในอันดับที่สูงกว่าต้องบังคับให้เกิดขึ้นได้น้อยที่สุด เพราะเป็นที่ทราบดีว่ากำลังทางออกของเลเซอร์ที่ Fundamental Mode มีความเข้มและราบเรียบที่สุด

3.2 แนวทางในการพิจารณาสำหรับการออกแบบ

การออกแบบในบทนี้เน้นเฉพาะส่วนสำคัญของหัวเลเซอร์เท่านั้น โดยตั้งสมมุติฐานว่าอัตราส่วนผสมของก๊าซ ความดัน เงื่อนไขการดิสชาร์จเหมาะสมแล้ว ดังนั้นค่าต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดกำลังทางออก (P) ของเลเซอร์จะขึ้นอยู่กับอัตราการสูญเสีย และ อัตราขยายที่เกิดขึ้นทั้งหมดภายในท่อกำเนิด [13] เช่น

- Single pass gain (GoL_a เมื่อ Go คือ Unsaturated gain และ L_a เป็นระยะดิสชาร์จของท่อกำเนิด)

- Saturation Intensity (I_s)

- เปอร์เซนต์การปลดปล่อยและสะท้อนกลับของโฟตอน ที่กระจกทางออกจากสมการทั่วไปของกำลังทางออกของเลเซอร์ ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปของค่าคงที่ค่าหนึ่งจะได้ว่า

$$\text{กำลังทางออก (P)} = K A_T I_0 \quad \text{----- (3.1)}$$

เมื่อ A_T = พื้นที่หน้าตัดของท่อตัวกลาง

I_0 = ความเข้มของกำลังทางออก

K = ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งขึ้นกับองค์ประกอบต่าง ๆ เช่น ความดันของก๊าซ โครงสร้างทางเรขาคณิตของกระจกสะท้อนและจากการทดลองพบว่า K มีค่าเท่ากับ 0.8 [13]

เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้น จึงสร้างสมการ โดยอาศัยสมการที่ 3.1 ได้ว่า

$$P = 0.2 \pi D_T^2 (I_o/I_s) I_s \text{ -----(3.2)}$$

เมื่อ $D_T =$ เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อกำเนิด

$I_s =$ Saturation Intensity

สมการที่ 3.2 จะสามารถคำนวณได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ของ I_o/I_s ที่เป็นฟังก์ชันของ GoLa (Single Pass Gain) เบอ์เชินด์การสะท้อนของกระจก (T) และ อัตราการสูญเสีย (l) ภายในระบบ โดยที่

$$\frac{I_o}{I_s} = \frac{(1-l)^{\frac{1}{2}} T(GoLa + \ln((1-l)(1-l-T))^{\frac{1}{2}})}{((1-l)^{\frac{1}{2}} + (1-l-T)^{\frac{1}{2}}) (1-((1-l)(1-l-T))^{\frac{1}{2}})} \text{ ----(3.3)}$$

จากสมการที่ 3.3 นี้ง่ายที่จะคำนวณหากำลังทางออกของเลเซอร์ และ เบอ์เชินด์การสะท้อนกลับของกระจกทางออกของเลเซอร์ และ เมื่อคำนวณหาอัตราการสูญเสีย และ อัตราขยาย ภายในท่อกำเนิดได้ก็จะสามารถบังคับ Mode ที่จะเกิดใกล้เคียงกับความต้องการได้อีกด้วย

3.2.1 การสูญเสียพลังงานภายในระบบ

ความสัมพันธ์ของกำลังทางออกของเลเซอร์ และ Mode เกี่ยวข้องโดยตรงกับการคำนวณค่าของ อัตราการสูญเสีย (l) และค่าของ Single pass gain (GoLa) ภายในท่อกำเนิด ซึ่งอัตราการสูญเสีย (l) ทั้งหมดภายในตัวกลางนี้ประกอบด้วย

1. การสูญเสียเนื่องจากการกระเจิงของแสง และ การดูดกลืนของแสง (l_m)
2. การสูญเสียเนื่องจากการบานตัวของแสง (l_{pq}) หรือเขียนเป็นสมการจะได้ว่า

$$l = l_m + l_{pq} \text{ -----(3.4)}$$

ในทางปฏิบัติ ถ้าช่องว่างระหว่างปลายท่อกำเนิดกับกระจกสะท้อนมีระยะห่างกันประมาณ 5-10 % หรือน้อยกว่านั้น ของระยะห่างระหว่างกระจกสะท้อนทั้งสองด้านแล้ว l_m จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ของกระจกสะท้อนเท่านั้น เช่น ความสะอาดของกระจก คุณสมบัติในการสะท้อนแสงของกระจก ซึ่งสิ่งเหล่านี้สามารถตรวจวัดได้ง่าย แต่ อัตราการสูญเสียเนื่องจากการบานตัวของแสง (l_{pq}) จะหาได้ด้วยวิธีเดียวคือ การคำนวณจากรูปทรงทางเรขาคณิตของตัวกลางซึ่งสามารถหาได้จาก Fresnel number (N) โดยที่เขียนให้อยู่ในรูปของสมการ

$$N = D_T^2 / 4 \lambda L_c \quad \text{-----} (3.5)$$

เมื่อ λ = ความยาวคลื่นของแสงที่ใช้

L_c = ระยะห่างระหว่างกระจกสะท้อนทั้งสองด้าน

การคำนวณอัตราการสูญเสียเนื่องจากการบานตัวของแสง ($1pq$) มีความสำคัญมาในการเลือก Mode ของเลเซอร์ ให้ได้เพียง Mode เดียว โดยเฉพาะ Fundamental Mode TEM₀₀ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากองค์ประกอบสำคัญ 3 ประการ คือ

1. ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อกำเนิด
2. รัศมีของกระจกสะท้อนทั้งสองด้าน
3. ระยะห่างระหว่างกระจกสะท้อนทั้งสองด้าน

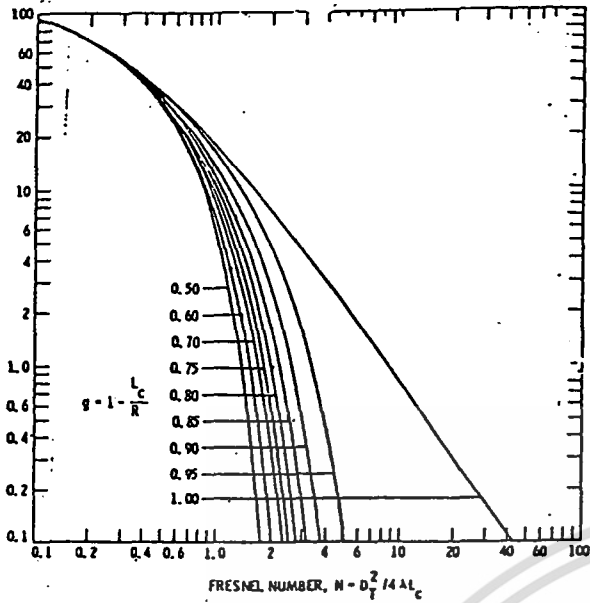
ถ้าสามารถจัดองค์ประกอบทั้งสามได้เหมาะสมแล้ว อัตราการสูญเสียของ TEM₀₀ จะน้อยที่สุด ขณะเดียวกัน Mode อันดับสูงกว่า เช่น TEM₁₀ จะมีอัตราการสูญเสียภายในท่อกำเนิดสูงมาก เหลือแต่ TEM₀₀ เท่านั้นที่ผ่านออกมาได้

จากรูปที่ 3.1 และ 3.2 ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของ Single pass diffraction loss กับ Fresnel number (N) ซึ่งอัตราส่วนของทั้งสองนั้นจะเป็นเท่าใดขึ้นอยู่กับ g - factor ซึ่งเป็นเงื่อนไขของเสถียรภาพของกระจกสะท้อน (จากรูปที่ 3.1 และ 3.2) ทั้งนี้ Curve ของ g - factor ดังกล่าวกำหนดขึ้นจากสมการ

$$g = 1 - L_c/R \quad \text{-----} (3.6)$$

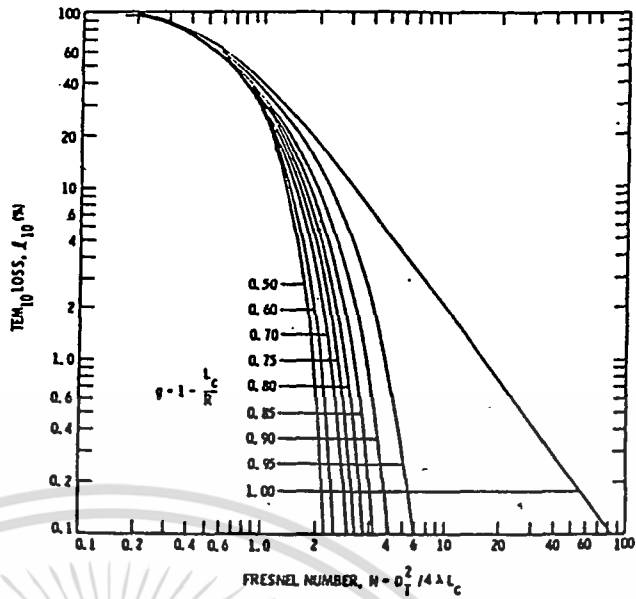
เมื่อ L_c = ระยะห่างระหว่างกระจกสะท้อนทั้งสองด้าน

R = รัศมีความโค้งของกระจกสะท้อน



Average single-pass TEM₀₀ mode loss for a half-symmetric cavity.

รูปที่ 3.1 แสดงอัตราการสูญเสียของ TEM₀₀ เปรียบเทียบกับ Fresnel Number



Average single-pass TEM₁₀ mode loss for a half-symmetric cavity.

รูปที่ 3.2 แสดงอัตราการสูญเสียของ TEM₁₀ เปรียบเทียบกับ Fresnel Number

3.2.2 อัตราขยายภายในระบบ

- Small signal gain coefficient (G_0) ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์และความดันของก๊าซแต่เพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นกับการไหลของก๊าซ อุณหภูมิ และการดิสชาร์จอีกด้วย ทั้งนี้ถ้าการไหลของก๊าซ อุณหภูมิ การดิสชาร์จ ความดันและการผสมก๊าซเหมาะสมแล้ว G_0 ก็จะเป็นฟังก์ชันของเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อกำเนิดแต่เพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถกำหนดค่าของ G_0 ได้จากสมการ

$$G_0 = 0.012 - 0.0025 D_T \text{ cm}^{-1} \quad (3.7)$$

จะสังเกตได้ว่า G_0 เป็นอัตราส่วนกลับกับเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนั้น หมายถึงว่ายิ่งขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ขึ้นอัตราขยาย (G_0) ก็จะลดลง แต่ทั้งนี้สมการนี้จะใช้ได้ต้องขึ้นกับเงื่อนไขที่ว่า D_T ต้องมีขนาดไม่ต่ำกว่า 0.4 ซม. และไม่เกิน 3.4 ซม. [13]

- Saturation intensity

Saturation intensity (IS) ก็เช่นเดียวกับ Small signal Gain (G_0) คือจะมีค่าเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขหลายประการเช่นเดียวกัน แต่ถ้ากำหนดให้การไหลของก๊าซ อุณหภูมิ

การติสซาร์ด ความดันและการผสมก๊าซเหมาะสมแล้ว Saturation intensity (I_s) ก็จะเป็นฟังก์ชันของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อกำเนิดแต่เพียงอย่างเดียวเช่นกัน ซึ่งสามารถหาค่าของ I_s ได้จากสมการ

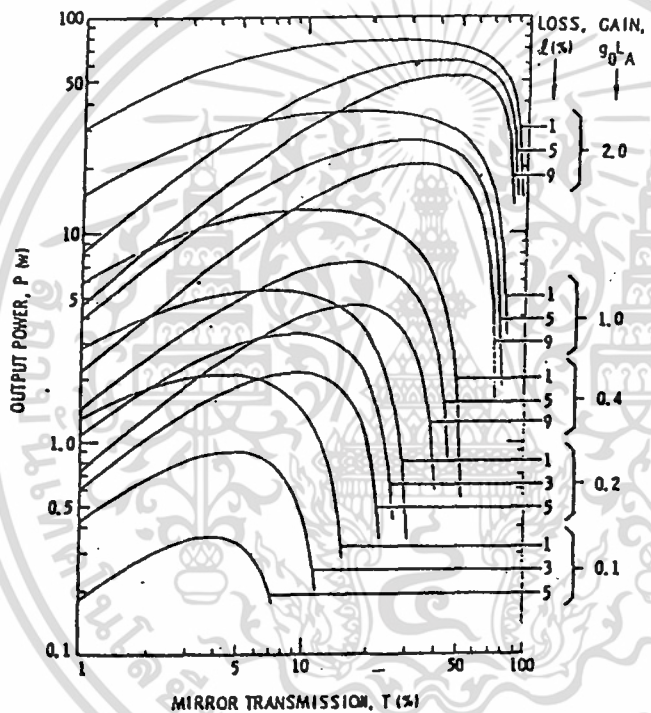
$$I_s = (72/D_T^2) \text{ W/cm}^2 \quad \text{-----(3.8)}$$

3.2.3 การคำนวณกำลังทางออกของเลเซอร์

ถ้านำสมการที่ 3.8 แทนลงในสมการที่ 3.2 แล้ว จะได้ค่าของกำลังทางออก (P) ซึ่ง

$$P = 14.4 \pi (I_o/I_s) \quad \text{-----(3.9)}$$

และโดยอาศัยสมการที่ 3.3 กำลังทางออกของเลเซอร์ก็สามารถกำหนดได้จากเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของกระจกทางออก อัตราขยายของระบบและอัตราการสูญเสียของระบบที่หาได้จากสมการที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังรูปที่ 3.3



Output power vs mirror transmission for several values of gain and loss.

รูปที่ 3.3 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของกระจกทางออกกับกำลังทางออก

จากสมการต่าง ๆ ที่ผ่านมามีข้อสังเกตที่ว่า ถ้าเพิ่มค่าอัตราการสูญเสียให้สูงขึ้น ด้วยเหตุผลที่ต้องการให้แน่ใจว่าจะได้ Fundamental mode ออกมาเพียง mode เดียวนั้น ยิ่งเพิ่มค่าอัตราการสูญเสียสูงมากขึ้นเท่าใด อัตราขยายก็จะลดลงไปด้วย ซึ่งแน่นอนว่าจะทำให้กำลังทางออกลดลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าผู้ออกแบบต้องการจุดที่เหมาะสมในการใช้งานอย่างไร

โดยทั่วไปการออกแบบกระจกสะท้อนของระบบ มีหลายลักษณะเช่น Large radius, Confocal, Hemispherical และ Plane parallel แต่ในงานวิจัยชิ้นนี้กระจกสะท้อนของระบบที่ใช้เป็นการผสมระหว่าง Hemispherical และ Large radius ซึ่งจะทำให้เสถียรภาพดีเหมือน Hemispherical และให้กำลังทางออกสูงแบบ Large radius การใช้กระจกสะท้อนแบบนี้จะทำให้หน้าคลื่นของลำแสงมีขนาดเท่ากับหน้าคลื่นที่ตกกระทบกระจกสะท้อนในส่วนที่เป็น Plane พอดี โดยที่ขนาดของลำแสงจะเป็นไปตามสมการ

$$W_0^4 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 L_c (R - L_c) \quad (3.10)$$

เมื่อ W_0 = หน้าคลื่นของลำแสงหรือบริเวณคอขวดของลำแสง (Beam waist)

λ = ความยาวคลื่นของลำแสง

L_c = ระยะห่างระหว่างกระจกสะท้อน

R = รัศมีความโค้งของกระจกสะท้อน

3.3 ขั้นตอนในการออกแบบหัวเลเซอร์

ในการออกแบบ สิ่งที่ต้องการสำหรับเลเซอร์ผ่าตัดคือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และสำหรับเลเซอร์แบบคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว กำลังทางออกขึ้นอยู่กับขนาดความยาว โดยทั่วไปเลเซอร์แบบคาร์บอนไดออกไซด์ แบบสอง Electrode จะมีกำลังทางออกประมาณ 10 วัตต์ต่อความยาวแหล่งกำเนิดหนึ่งฟุตและขนาดที่ใช้งานโดยทั่วไปไม่เกิน 30 วัตต์ หลอดเลเซอร์จึงควรมีความยาวประมาณ 1 เมตร และระยะห่างระหว่างกระจกสะท้อนประมาณ 130 เซนติเมตร

จากสมการที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น เป็นการยากที่จะกำหนดให้ชัดเจนลงไปว่าองค์ประกอบต่าง ๆ แต่ละตัวจะมีขนาดเท่าใดนั้น โดยทั่วไปเป็นไปตามความต้องการที่กำหนดไว้ เช่น ถ้าต้องการกำลัง 30 วัตต์ ค่าของเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของกระจกทางออก (T) และเส้นผ่าศูนย์กลางของแหล่งกำเนิด อาจจะทำไม่ได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นค่าที่หาได้จึงเป็นค่าประมาณ ซึ่งยังคงใกล้เคียงกับค่าจริงที่ต้องการ

เมื่อสังเกตจากสมการและรูปภาพของกราฟทั้งหมดจะเห็นว่าค่าของ D_T และรัศมีความโค้งของกระจก (R) เป็นส่วนสำคัญที่สุดในการกำหนดเปอร์เซ็นต์การสูญเสียของ Mode ต่าง ๆ ที่กำลังทางออก และโดยเฉพาะ D_T เป็นตัวสำคัญที่จะกำหนดให้เลเซอร์จะมีพลังงานออกมาเท่าใด ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้ จึงเลือกค่า R (รัศมีความโค้งของกระจกสะท้อน) ขึ้นมา 2 ค่า คือ $R = 5$ เมตร และ $R = 10$ เมตร ส่วน D_T นั้นเลือกขึ้นมา 3 ค่า คือ 9 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร และ 12 มิลลิเมตร เพื่อหาค่าที่เหมาะสมโดยการทดลองให้เห็นจริง

3.3.1 ขั้นตอนการออกแบบ

1. หาค่า g-factor จากสมการที่ 3.6

$$g = 1 - L_c/R$$

เมื่อ $L_c = 130$ เซนติเมตร และ $R = 5$ เมตร ดังนั้น $g = .74$

เมื่อ $L_c = 130$ เซนติเมตร และ $R = 10$ เมตร ดังนั้น $g = .87$

2. หาค่า Fresnel number $N = D_T^2 / 4 \lambda L_c$

เมื่อ $\lambda =$ ความยาวคลื่นของเลเซอร์แบบคาร์บอนไดออกไซด์ (10.6×10^{-6} เมตร)

ที่ $D_T = 9 \times 10^{-3}$ เมตร $N = 1.47$

$D_T = 10 \times 10^{-3}$ เมตร $N = 1.88$

$D_T = 12 \times 10^{-3}$ เมตร $N = 2.6$

3. หาค่าอัตราการสูญเสียของ TEM₀₀ และ TEM₁₀ จากรูปที่ 3.1 และ 3.2 โดยอาศัยค่า g และ N ที่หาได้

No.	รัศมีความโค้งกระจก (เมตร)	g	N	อัตราการสูญเสีย TEM ₀₀ (%)	อัตราการสูญเสีย TEM ₁₀ (%)
1	5	.74	1.47	2	8
2	5	.74	1.8	1	4.5
3	5	.74	2.6	<.1	.7
4	10	.87	1.47	4.5	15
5	10	.87	1.8	3	10
6	10	.87	2.6	.4	2.5

จากตารางจะเห็นว่า ในบรรทัด No.4 กระจกที่มีรัศมีความโค้ง 10 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางท่อกำเนิด 9×10^{-3} เมตร จะมีอัตราการสูญเสียของ TEM₁₀ ถึง 15 % ซึ่งเป็นค่าสูงสุดในตารางข้างต้น ดังนั้น ในทางปฏิบัติจึงอาศัยค่าที่ได้นี้เป็นบรรทัดฐาน

4. หาค่า Single Pass Gain

จากสมการที่ 3.7 ทำให้ทราบค่าของ $G_0 = 0.012 - 0.0025 D_T \text{ cm}^{-1}$ และจากการเลือก $D_T = 9 \times 10^{-3}$ เมตร ดังนั้น $G_0 = 9.75 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ ขณะเดียวกันความยาวของหลอดแก้วที่ใช้ในการดีสชาร์ต $L_a = 100 \text{ cm}$. ดังนั้น Single Pass Gain ($G_0 L_a$) = 0.975

5. หาค่าความเหมาะสมของเบอร์เซนต์การสะท้อนของกระจก โดยการใส่ค่าที่หาได้จากขั้นตอนที่แล้วลงในสมการที่ 3.3 แล้วทำการอนุพันธ์สมการที่ 3.3 เทียบกับ 0

$$\text{ค่า } T \text{ ที่หาได้} = 15\%$$

6. หาค่ากำลังทางออก จากสมการที่ 3.9 ซึ่ง $P = 14.4 (I_o/I_s)$

$$\text{ค่า } P \text{ ที่หาได้} = 30 \text{ watts}$$

7. คำนวณค่าอัตราการบานตัวของลำแสง (Beam Divergence) เพื่อหาขนาดของลำแสงที่ระยะต่าง ๆ จากสมการที่ 2.3

เช่น ที่ระยะ 2 เมตร (จากแหล่งกำเนิดจนถึงปลายทางออกของลำแสงกำลัง ซึ่งจะมีระยะทางประมาณ 2 เมตร) ขนาดของลำแสงจะมีการขยายตัวน้อยมาก โดยมีขนาดเพียง 4.5000101 มม.

3.4 สรุป

ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณจะได้นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองต่อไป และผลการทดลองนี้จะได้กล่าวไว้ในบทที่ 5



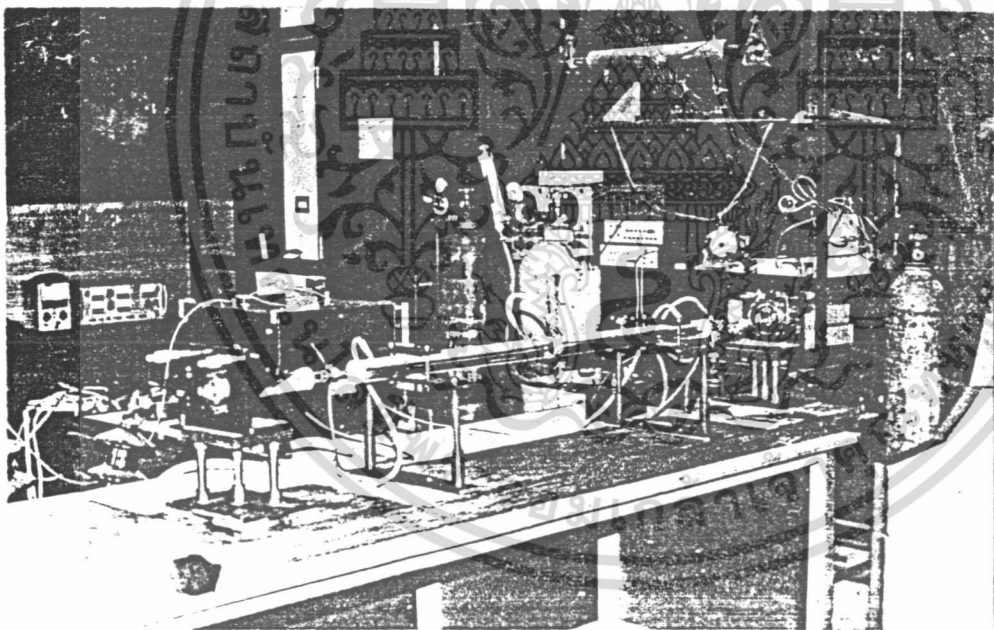
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างและทดสอบเลเซอร์แบบคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในงานผ่าตัด

4.1 บทนำ

เลเซอร์ผ่าตัดที่ใช้ในงานโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 5 - 60 วัตต์ งานวิจัยชิ้นนี้ใช้หลอดแก้วทนความร้อน Pyrex โดยได้ทำการทดลองสร้างเลเซอร์ที่มีแหล่งกำเนิดแตกต่างกัน 2 ขนาด คือ ขนาด 9 x 1000 มิลลิเมตร และ 13 x 1300 มิลลิเมตร เพื่อทดสอบความแตกต่างของกำลังความร้อนและ mode ที่ออกมา

ระบบกระจกสะท้อนที่ปลายทางออกก็ได้ทดสอบกระจกสะท้อนที่มีรัศมีความโค้งของกระจก 5 เมตร เปอร์เซ็นต์การสะท้อน 70% และกระจกที่มีรัศมีความโค้ง 10 เมตร เปอร์เซ็นต์การสะท้อน 85% เพื่อทดสอบเสถียรภาพของกระจกทั้งสอง



รูปที่ 4.1 ภาพเลเซอร์ผ่าตัดที่ได้สร้างขึ้น

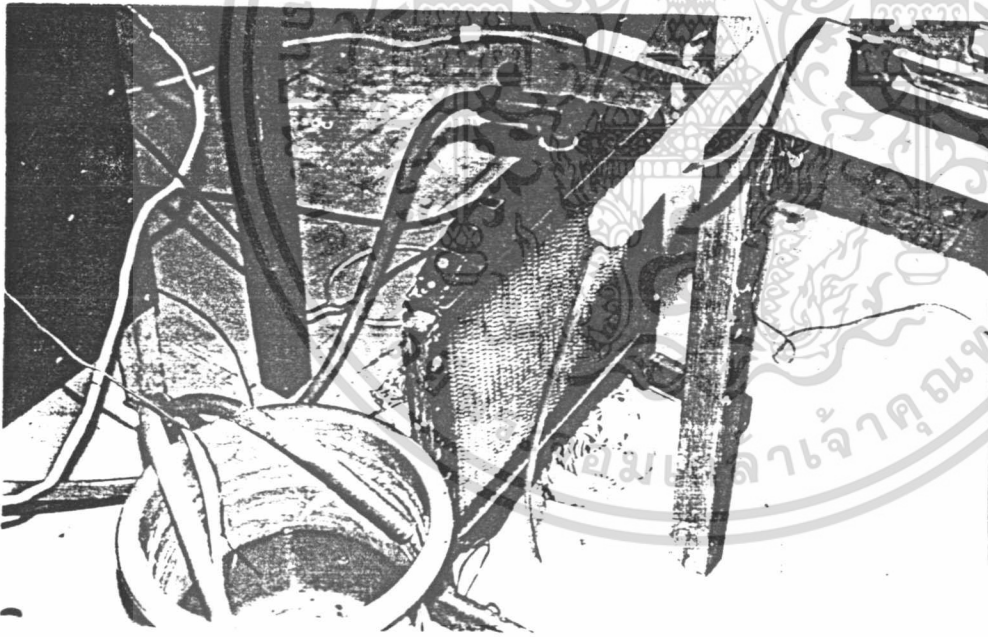
4.1.1 หลอดเลเซอร์

เป็นหลอดแก้วทนความร้อน Pyrex โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร ยาว 1.3 เมตร 1 ท่อ และเส้นผ่าศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร ยาว 1 เมตร อีก 1 ท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากกำลังทางออกของเลเซอร์แปรผันโดยตรงกับความยาว ขณะเดียวกันเส้นผ่าศูนย์กลางกลางท่อก็เป็นอัตราส่วนกลับกับอัตราขยายของระบบ ดังนั้นการสร้างท่อกำเนิดด้วยหลอดแก้ว 2 ขนาดจึงเหมาะสมที่จะหาจุดที่เหมาะสมต่อไป

การระบายความร้อนให้แก่เลเซอร์ อาศัยท่อกำเนิดสอดเข้าไปในท่อน้ำเลี้ยง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว ความยาวที่ใช้สั้นกว่าหลอดกำเนิด 8 เซนติเมตร นับจากขั้ว electrode ทั้งสองของท่อกำเนิด โดยท่อน้ำเลี้ยงนี้จะบิดปลายท่อด้วยเทปลอนทนความร้อนทั้งสองด้าน ขณะเดียวกัน ด้านหนึ่งของท่อจะเป็นทางน้ำเข้า และอีกด้านหนึ่งเป็นทางน้ำออก น้ำจะถูกปั๊มเข้าและออกในท่อน้ำเลี้ยงด้วยความเร็ว 4 ลิตรต่อนาที ขณะเดียวกัน เพื่อประกันว่าการระบายความร้อนให้แก่หลอดเลเซอร์จะสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ก็โดยอาศัยลมช่วยระบายความร้อนให้แก่ท่อน้ำเลี้ยงหลอดกำเนิดอีกครั้งหนึ่ง ด้วยวิธีให้น้ำที่ออกจากหลอดระบายความร้อนผ่านรังผึ้งระบายความร้อนก่อนที่จะเข้าถึงปั๊มน้ำ รังผึ้งนี้จะระบายความร้อนโดยอาศัยพัดลมเป่าที่รังผึ้ง เมื่อน้ำออกจากรังผึ้งแล้วก็จะถูกดูดกลับเข้าไปในระบบอีก การหล่อเย็นดังกล่าวจึงเป็นระบบปิดซึ่งช่วยให้ท่อน้ำทำงานอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

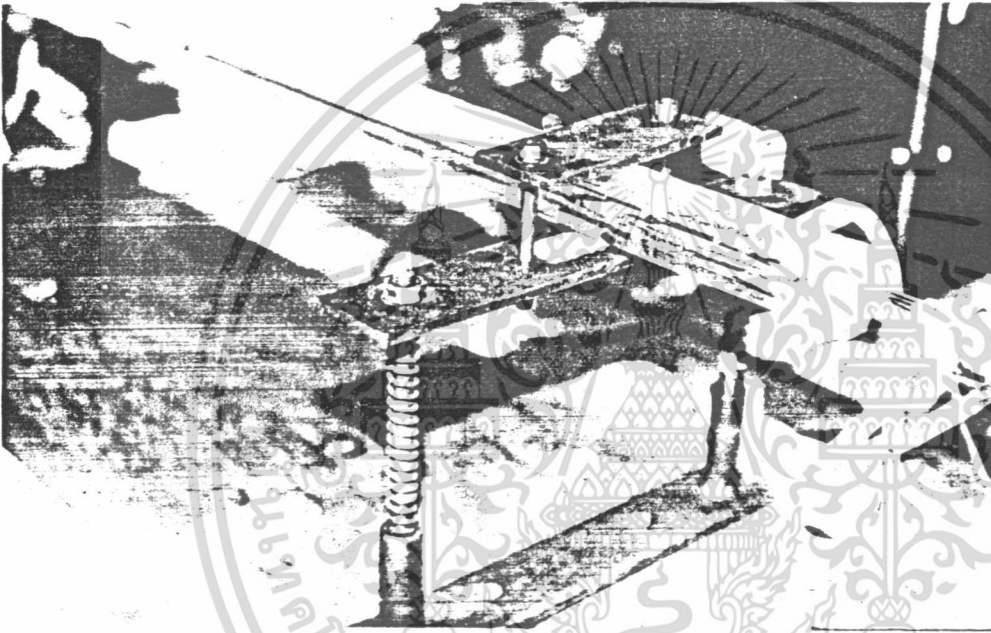


รูปที่ 4.2 รังผึ้งของน้ำระบายความร้อนด้วยอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ฐานเลเซอร์

เนื่องจากหลอดเลเซอร์ที่ใช้งานมีเส้นผ่านศูนย์กลางค่อนข้างเล็ก จึงยากแก่การปรับแต่งหาศูนย์กลางท่อ ฉะนั้นเพื่อสะดวกแก่การปรับแต่งหาศูนย์กลางท่อ และเพื่อให้ศูนย์กลางท่อไม่เคลื่อนจากตำแหน่งได้ง่าย ฐานเลเซอร์จึงกำหนดให้มีน้ำหนักมาก โดยมีขนาดความกว้าง 30 เซนติเมตร หนา 5 เซนติเมตร ยาว 2.5 เมตร ขณะเดียวกันฐานรับหลอดเลเซอร์จะต้องปรับระดับได้ เพื่อให้สะดวกแก่การปรับแต่งมากยิ่งขึ้น



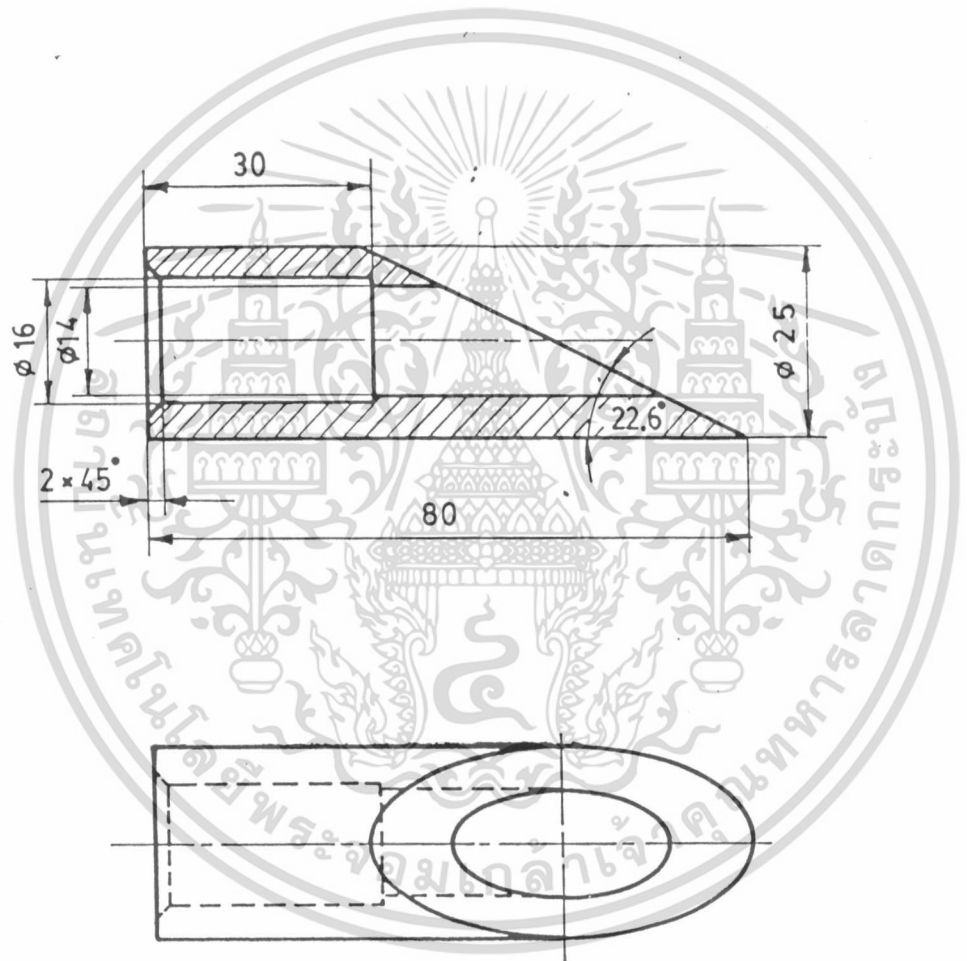
รูปที่ 4.3 ส่วนของฐานที่สามารถปรับระดับได้

4.1.3 กระจกปิดปลายทางออกของท่อกำเนิด

ในการออกแบบเลเซอร์ระบบนี้ได้แยกกระจกสะท้อนทั้งสองด้านออกจากท่อกำเนิด โดยที่ปลายท่อกำเนิดทั้งสองด้านจะถูกปิดแน่นด้วยกระจกที่ทำจากวัสดุจำพวก ZnSe ซึ่งวัสดุจำพวก ZnSe นี้จะทึบมุม Polarize กับแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 10.6×10^{-6} เมตร นี้ได้ค่าที่ 67.4 องศา (Brewster Angle)[ภาคผนวกที่ 5] ซึ่ง มุมที่มุม polarize นี้ แสงเลเซอร์จะสูญเสียอย่างน้อยที่สุด

ฐานรองกระจกหัวลูมิเนียมซึ่งมีน้ำหนักเบาจะถูก "wire cut" ให้ทึบมุมกับแนวระนาบ 22.6 องศา แล้วเจาะรูสวมเข้าที่ปลายท่อกำเนิด และยึดแผ่นกระจกกับหัวลูมิเนียมด้วยกาวทนความร้อน หัวลูมิเนียมนี้จะยึดติดกับปลายท่อกำเนิดด้วยแหวนยึดประกบกัน "o" Ring

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

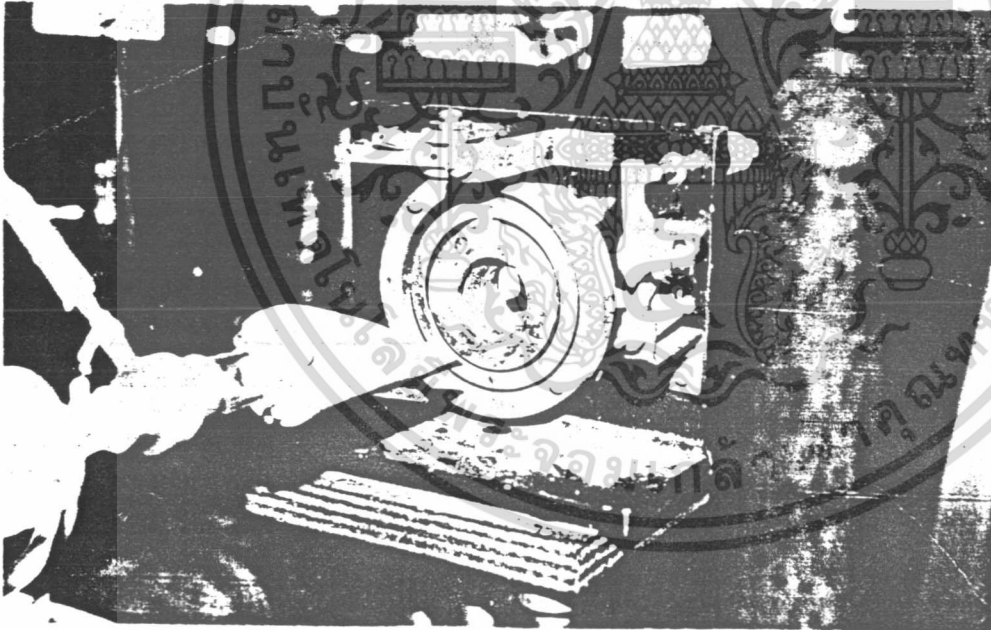


รูปที่ 4.4 แบบแสดงรายละเอียดชิ้นส่วนของฐานรองกระจก Brewster angle windows.

4.1.4 ขั้ว electrode

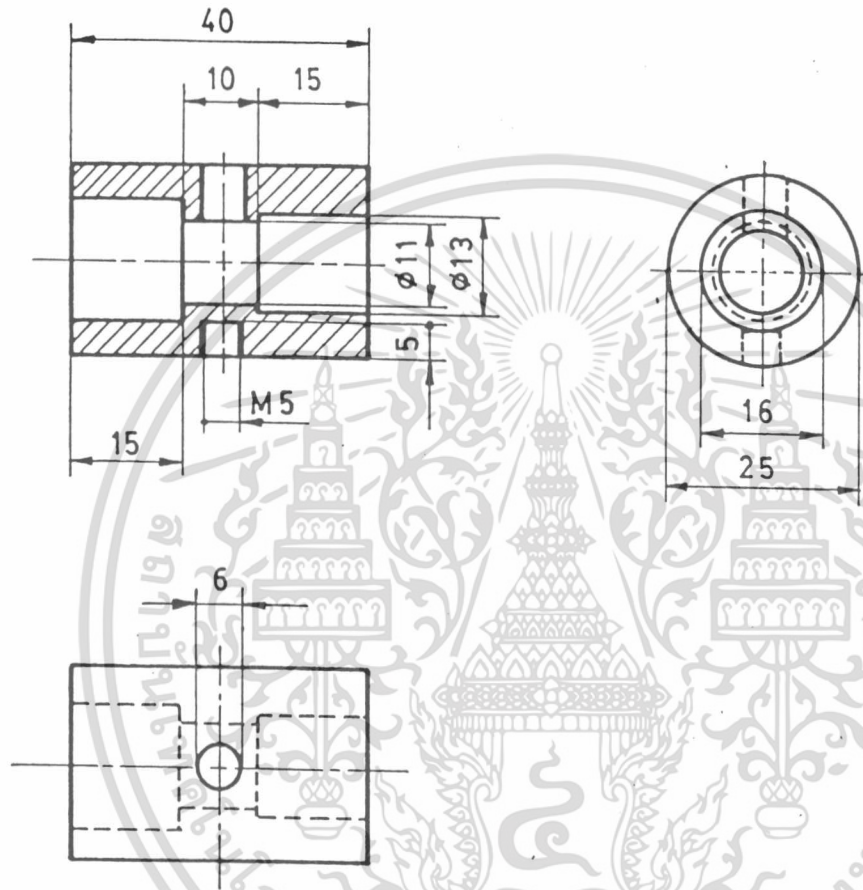
ขั้ว electrode ของหลอดกำเนิดจะอยู่ที่ส่วนปลายของท่อ วัตจากปลายสุดเข้ามา 15 เซนติเมตร ทำด้วยทองเหลือง เหตุที่ใช้ทองเหลืองเพราะสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ และที่ขั้ว electrode นี้เองทั้งสองขั้วจะเป็นทางเข้าและทางออกของก๊าซที่จะมาทำดีสชาร์จ โดยที่ก๊าซจะถูกดูดเข้าจากขั้วบวกและออกที่ขั้วลบด้วยปั๊มสุญญากาศ ที่มีขนาดอัตราดูด 4.5 ลิตรต่อนาที ที่ความดันต่ำกว่า 0.05 มิลลิเมตรปรอท

ด้านทั้งสองของขั้ว electrode จะถูกเจาะให้มีขนาดเท่ากับท่อกำเนิดขณะเดียวกันอีกด้านหนึ่งก็เจาะให้มีขนาดเท่ากับหลอดแก้ว เพื่อสวมเข้าอลูมิเนียม เหตุที่ต้องแยกหัวอลูมิเนียมออกจากขั้ว electrode โดยที่ไม่ใช้อลูมิเนียมเป็นขั้ว electrode เลย เนื่องจากการดีสชาร์จ อาจทำความเสียหายให้กับกระจก ZnSe (Brewster window) ได้ ตามรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ภาพแสดงขั้ว Electrode ที่แยกออกจากหัว Brewster angle windows

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แบบแสดงรายละเอียดของขั้ว Electrode

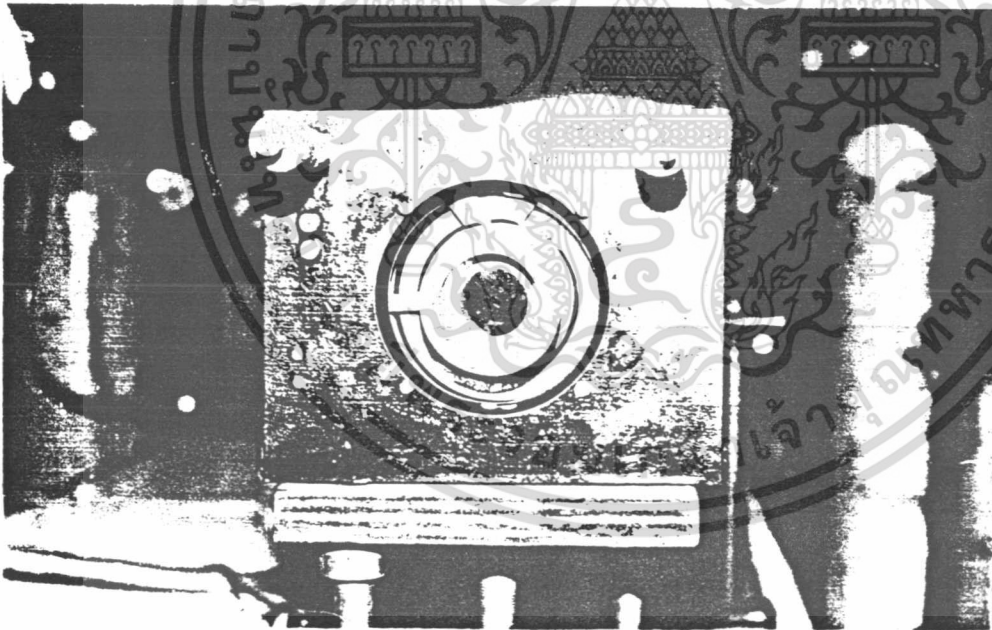
4.1.5 กระจกสะท้อนของระบบ

กระจกสะท้อนแสงเลเซอร์นี้จะอยู่ที่ปลายสุดทั้งสองด้านของแหล่งกำเนิด ด้านหนึ่งเป็นกระจกสะท้อนที่ฉาบด้วยทองคำบริสุทธิ์ ซึ่งสามารถให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 10.6×10^{-6} เมตรได้ถึง 99.4 เปอร์เซ็นต์ ส่วนอีกด้านหนึ่งกระจกจะทำจากสารจำพวก ZnSe ที่ให้ผลในการสะท้อน 70% และปล่อยลำแสงออกมาได้ 30% กระจกด้านนี้มีผิวแบบ Concave โดยมีรัศมีความโค้ง 5 เมตร เหตุที่ใช้รัศมีความโค้งของกระจกสะท้อนแสงยาวกว่าแหล่งกำเนิดอย่างน้อย 2 เท่า พิจารณาจากข้อดีอย่างน้อย 2 ข้อ คือ

1. ทำให้มี filling factor ที่ดีสำหรับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแหล่งกำเนิด

2. ทำให้มีเสถียรภาพที่ดีในการ Oscillation

กระจกสะท้อนทั้ง 2 ด้านจะถูกยึดติดกับฐานยึดกระจก ซึ่งถูกออกแบบให้ปรับได้ทั้งแกน x,y และ z

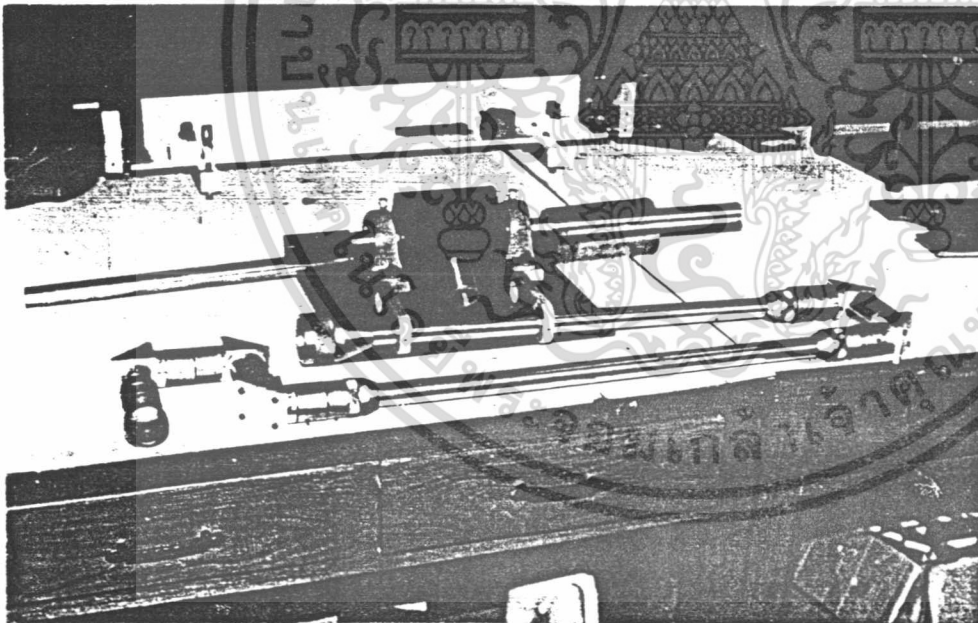


รูปที่ 4.7 กระจกสะท้อนของระบบที่ยึดติดกับฐานยึดกระจกที่ปรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.6 แขนส่งกำลังเลเซอร์

องค์ประกอบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งของเลเซอร์ผ่าตัดก็คือแขนส่งกำลังเลเซอร์ ความสะดวกที่จะใช้งานของเลเซอร์ผ่าตัดขึ้นอยู่กับความคล่องตัวของแขนส่งกำลังที่สามารถเคลื่อนที่ได้รอบตัวที่ระยะ 2 เมตร จากแหล่งกำเนิด โดยแขนส่งกำลังนี้ประกอบด้วยข้อต่อและกระจกสะท้อนภายในลำแขนหลายบาน ทุก ๆ บานจะเอียงท่ามุม 45 องศา กับลำแสงและแต่ละบานจะเคลือบผิวหน้าด้วยทองคำบริสุทธิ์ ซึ่งให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนถึง 99.4 เปอร์เซ็นต์ ข้อสำคัญแขนส่งกำลังนี้ต้องมีน้ำหนักเบาและระยะคลอน (clearance) ของแต่ละข้อต่อต้องมีน้อยมาก เพื่อไม่ให้ลำแสงสูญเสียไปกับการกระทบกับผนังท่อ รายละเอียดในการออกแบบนั้นจะได้กล่าวในบทต่อไป



รูปที่ 4.8 แขนส่งกำลังเลเซอร์พร้อมทั้งฐานรับแขนส่งกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

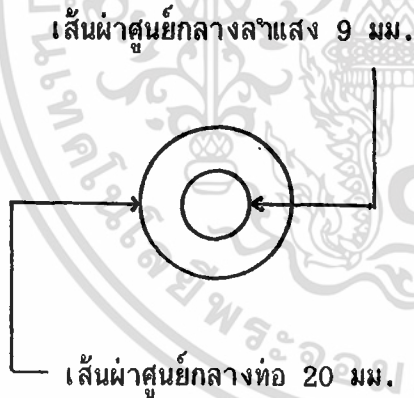
4.2 การออกแบบแขนส่งกำลังเลเซอร์

ดังได้กล่าวมาแล้ว สำหรับความสำคัญของแขนส่งกำลังเลเซอร์คือ

1. มีน้ำหนักเบา
2. คล่องตัวในการเคลื่อนที่
3. ระยะคลอนของข้อต่อน้อยมาก
4. มุมกระจุกทุกบานต้องได้ 45 องศาพอดี

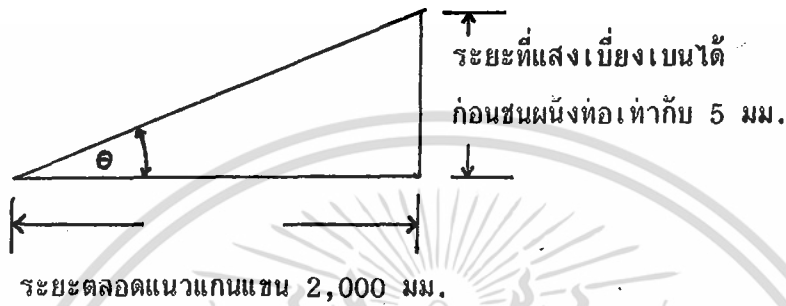
วัสดุที่เลือกใช้ทำแขนส่งกำลังส่วนใหญ่ประกอบด้วย ท่อสเตนเลส อลูมิเนียมอัลลอย และทองเหลือง ซึ่งต้องพยายามทำให้เล็กใช้ทำงานได้และมีน้ำหนักเบา ปัญหาต่อมาที่ต้องพิจารณาก็คือ คล่องตัวในการเคลื่อนที่ ซึ่งหมายถึงว่าต้องมีจุดเคลื่อนที่ได้ของลำแขนหลายจุด จากการศึกษาทดลองที่ผ่านมาพบว่าต้องมีอย่างน้อย 11 จุด หรือ 11 ข้อต่อจึงเหมาะสมและกระจุกสะท้อนอย่างน้อย 9 บาน ในขั้นตอนของการออกแบบสิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึงก็คือ ความคลาดเคลื่อนทั้งหมดที่อนุญาตให้ได้ โดยอาศัยข้อมูลเบื้องต้นคือ

- | | |
|------------------------------|--------------|
| 1. เส้นผ่าศูนย์กลางลำแสง | 9 มิลลิเมตร |
| 2. เส้นผ่าศูนย์กลางท่อที่ใช้ | 20 มิลลิเมตร |
| 3. ข้อต่อทั้งหมด | 11 ข้อ |
| 4. กระจุกสะท้อนแสง | 9 บาน |



รูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นถึงขนาดของลำแสงและขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ

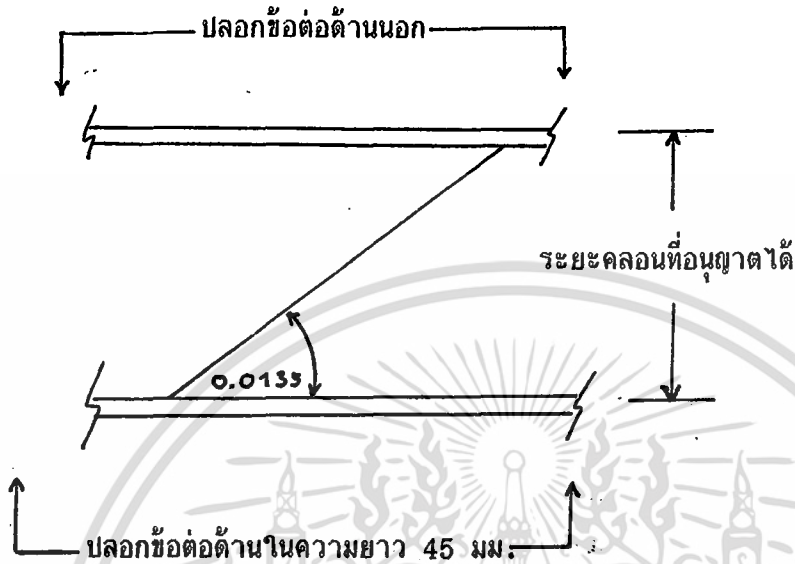
จากรูปจะพบว่า ลำแสงจะเคลื่อนออกจากแนวแกนแสง (จุดศูนย์กลาง) ได้ไม่เกิน 5.5 มิลลิเมตร ก่อนจะกระทบผนังท่อ และแสงต้องเดินทางเป็นระยะทางถึง 2 เมตร ก่อนจะ फैนปลายแขน ดังนั้นมุมที่อนุญาตให้พิจารณาตลอดทั้งแกนแขนต้องไม่เกิน 0.158 องศา



รูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึงมุมที่อนุญาตให้ได้

ฐานกระทงทั้ง 9 บาน จะนำเข้าเครื่อง Wire Cut ตัด 45 องศา ซึ่งเครื่องดังกล่าวมีความผิดพลาด $\pm .003$ องศา รวมความผิดพลาดสูงสุดทางสถิติทั้ง 9 บาน $= \pm 0.003 \times \sqrt{9} = 0.009$ องศา ทำให้ความคลาดเคลื่อนที่อนุญาตให้ได้คงเหลือ $0.158 - 0.018 = 0.14$ องศา เมื่อทราบค่าของมุมคลาดเคลื่อนที่อนุญาตได้แล้ว ต่อไปคำนวณหามุมระยะคลอนของแต่ละข้อต่อว่าจะให้มีระยะคลอนได้เท่าใด

ขั้นต้นเมื่อทราบจำนวนข้อต่อทั้งหมดคือ 11 ข้อ ดังนั้นแต่ละข้อจะคลอนได้ไม่เกิน 0.0135 องศา และถ้าตั้งสมมุติฐานว่าแต่ละข้อยาวประมาณ 45 มิลลิเมตร ดังนั้นระยะคลอนจะต้องเท่ากับ 0.01 มิลลิเมตร



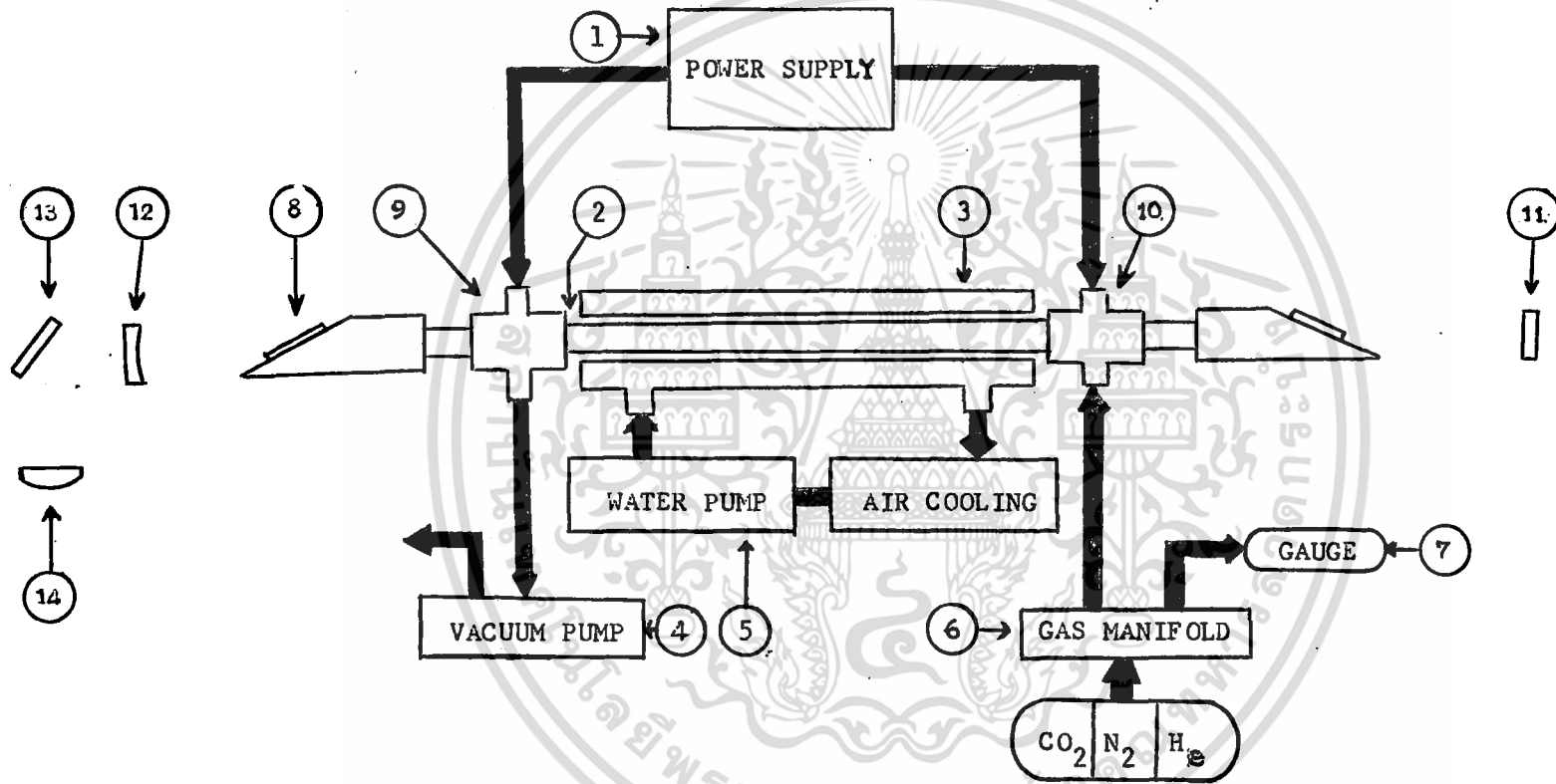
รูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นถึงระยะคลอนที่อนุญาตได้

เมื่อทราบค่าความยาวของปลอกข้อต่อด้านใน และ ขีดจำกัดที่ข้อต่อแต่ละข้อจะคลอนได้ไม่เกิน 0.0135 องศาแล้ว สามารถคำนวณได้ว่า $45 \tan 0.0135 =$ ระยะคลอนที่อนุญาตได้ 0.01 มิลลิเมตร

ดังนั้นจะสรุปได้ว่า

1. การตัดฐานกระจกแต่ละบาน ความผิดพลาดต้องไม่เกิน $\pm .003$ องศา
2. การกรึงข้อต่อแต่ละข้อจะผิดพลาดโดยให้มีระยะคลอนได้ไม่เกิน ± 0.01 มิลลิเมตร

ถ้าความผิดพลาดมากกว่าข้อสรุป 2 ข้อ ข้างต้น แสงเลเซอร์ที่ออกมาบางส่วน จะกระทบผนังท่อทำให้พลังงานที่ออกมาที่ปลายแขนลดลงไม่เป็นไปตามต้องการ



รูปที่ 4.12 แผนภาพ เลเซอร์ตัดแบบคาร์บอนไอออกไซด์

4.3 สรุปรายละเอียดส่วนประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์ เลเซอร์

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้า

จ่ายไฟสูงให้เกิดการดิสชาร์จ ในหลอดเลเซอร์ ศักดาไฟฟ้าที่ใช้ประมาณ 15 กิโลวัตต์ 25 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งประกอบด้วย

- หม้อแปลงไฟสูง 15,000 โวลต์ 100 มิลลิแอมป์
- ตัวปรับระดับแรงดัน (Variac) ซึ่งสามารถปรับระดับแรงดันได้ตั้งแต่ 0 ถึง 250 โวลต์ ทนกระแสได้ 15 แอมแปร์
- ชุดเปลี่ยนแรงดัน กระแสสลับเป็นกระแสตรง

2. ท่อกำเนิดแสงเลเซอร์

หลอดแก้วทนความร้อน Pyrex โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 13 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 9 มิลลิเมตร ความยาวรวม 130 เซนติเมตร

3. ท่อน้ำเลี้ยงหล่อเย็น

ท่อแก้วหรือพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 25.4 มิลลิเมตร ยาว 94 เซนติเมตร

4. บั๊มสุญญากาศ

อุปกรณ์ที่ทำให้ภายในหลอดเลเซอร์มีความกดดันต่ำ สามารถดูดอากาศออกจากท่อได้ด้วยความเร็ว 4.5 ลิตรต่อนาที ซึ่งจะทำให้ความดันในท่อน้อยกว่า 0.09 มิลลิเมตรปรอท

5. บั๊มน้ำ

ช่วยปั๊มน้ำให้ไหลเร็วในระบบเพื่อการทำกรหล่อเย็น ความเร็วในการปั๊ม 4 ลิตรต่อนาที โดยปั๊มน้ำผ่านรังผึ้งและระบายความร้อนของน้ำด้วยอากาศก่อนเข้าระบบ

6. ห้องผสมแก๊ส

เป็นที่รวมของแก๊สที่จะดิสชาร์จ ในหลอดเลเซอร์และสามารถปรับอัตราส่วนของก๊าซให้เหมาะสมในวิทยานิพนธ์ชุดนี้ส่วนที่เหมาะสมคือ

คาร์บอนไดออกไซด์	4.5	ส่วน
ไนโตรเจน	13.5	ส่วน
ฮีเลียม	82	ส่วน

7. มิเตอร์วัดสุญญากาศ

อุปกรณ์ใช้วัดอัตราส่วนผสมของก๊าซที่จ่ายเข้าไปดีสชาร์จภายในท่อกำเนิด อุปกรณ์ชิ้นนี้สามารถวัดได้ 0.001-10 มิลลิเมตรปรอท

8. BREWSTER ANGLE WINDOWS

กระจกทางออกของแสงเลเซอร์เป็นวัสดุจำพวก ZnSe ซึ่งทำมุมกับแนวระนาบ 22.6 องศา

9. ขั้วสกัดคาโพลบ

ขั้วโพลบขณะเดียวกันก็เป็นทางออกของก๊าซที่ดีสชาร์จแล้ว

10. ขั้วสกัดคาโพบวก

ขั้วโพบวกขณะเดียวกันก็จะเป็นทางเข้าของก๊าซที่จะนำไปดีสชาร์จ

11. กระจกสะท้อน 100 %

กระจกเงาที่ฉาบผิวหน้าด้วยทองคำบริสุทธิ์ สามารถสะท้อนแสงที่มีความยาวคลื่น 10.6 ไมโครเมตร ได้ถึง 99.4% ซึ่งใกล้เคียงกับ 100 %

12. กระจกสะท้อน 85%

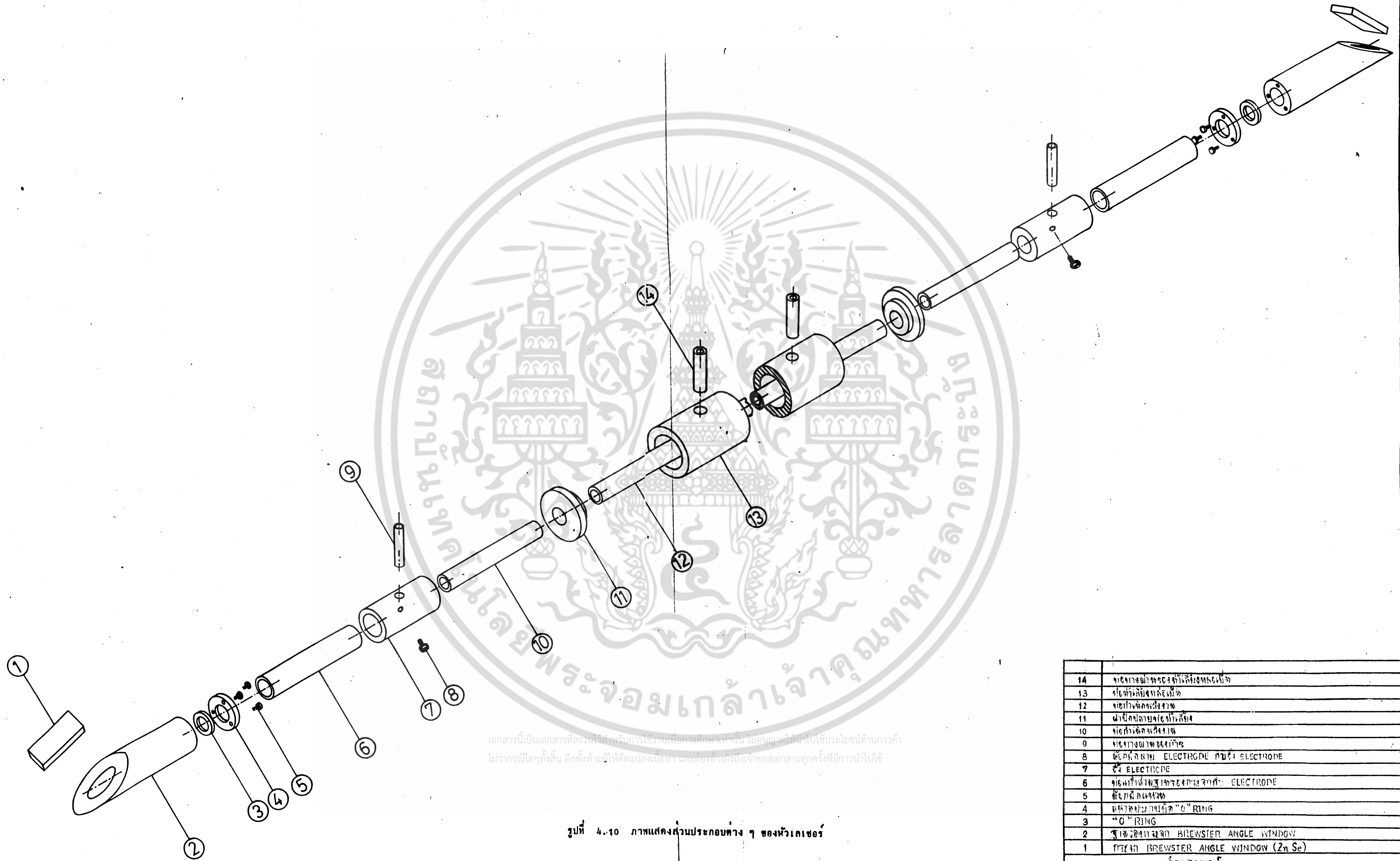
กระจกที่ทำจากวัสดุจำพวก ZnSe ผิวโค้งจะมีรัศมีความโค้ง 10 เมตร ทำให้แสงผ่าน 15 % สะท้อนกลับได้ 85 %

13. แขนส่งกำลังเลเซอร์

ประกอบด้วยข้อต่อที่หมุนลำแขนได้ 11 ข้อต่อเคลื่อนที่ได้รอบตัวมีความยาวทั้งหมดประมาณ 2 เมตรภายในลำแขนประกอบด้วยกระจกสะท้อนแสง 9 บาน ผิวหน้าเคลือบด้วยเงินบริสุทธิ์ซึ่งให้สัมประสิทธิ์การสะท้อน 99.5 %

14. เลนส์

ที่ปลายทางออกของแขนเลเซอร์จะติดตั้งเลนส์รวมแสงโดยที่เลนส์มีความยาวโฟกัส 0.0925 เมตร ทำจากวัสดุจำพวก CdTe ขณะเดียวกันสามารถเปลี่ยนเลนส์ที่เหมาะสมขนาดอื่นได้ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.10 ภาพแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของหัวเลเซอร์

14	ฝาครอบหน้าต่างคริสตัลรังสีอินฟราเรด
13	ท่อตัวนำสัญญาณอินพุต
12	ท่อตัวนำสัญญาณเอาต์พุต
11	ฝาปิดปลายท่อสัญญาณอินพุต
10	ท่อตัวนำสัญญาณเอาต์พุต
9	ท่อตัวนำสัญญาณอินพุต
8	ขั้วนำไฟฟ้าลบ ELECTRODE ขั้วลบ ELECTRODE
7	ขั้วนำไฟฟ้าลบ ELECTRODE
6	ขั้วนำไฟฟ้าบวกหรือขั้วนำสัญญาณบวก ELECTRODE
5	ขั้วนำไฟฟ้าบวก
4	แหวนวงแหวนปิด "O" RING
3	"O" RING
2	รูเลเซอร์มุมฉาก BREWSTER ANGLE WINDOW
1	รูเลเซอร์มุมฉาก BREWSTER ANGLE WINDOW (Zn Se)
หัวเลเซอร์	
คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สภาบัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	
ศาสตราจารย์ ดร. อดิศักดิ์ อดิศักดิ์	

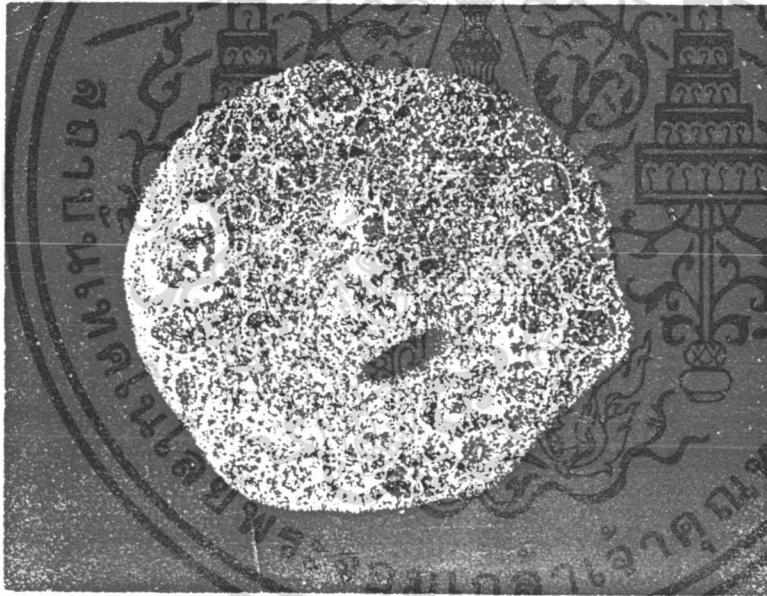
บทที่ 5

การทดลอง

การทดลองในวิทยานิพนธ์ เรื่อง เลเซอร์ผ่าตัดนี้ มุ่งเน้นที่จะบังคับให้ Pattern ของ mode ที่ออกมาให้เป็นลักษณะของ Fundamental mode และทดลองใช้ตัดเนื้อหมูที่ความเร็ว 1.25 มม.ต่อวินาที และข้อจำกัดในการออกแบบแขนส่งกำลังเลเซอร์

ผลการทดลอง

โดยการนำหลอดแก้ว Pyrex ทนความร้อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อแก้ว 12 มิลลิเมตร เป็นแหล่งกำเนิด ซึ่งปลายทั้งสองด้านประกอบด้วยกระจก 100% ด้านหนึ่ง และกระจกสะท้อน 85% อีกด้านหนึ่ง ซึ่งให้เป็นทางออกของเลเซอร์ จากการทดลองวัดกำลังทางออกปรากฏว่าได้กำลังความร้อนถึง 35 วัตต์ แต่ Pattern ของ mode ที่ออกมาเป็นลักษณะของ multimode ตามรูปข้างล่าง



รูปที่ 5.1 แสดงให้เห็นถึง Pattern ของ Fundamental mode ที่ทดลองได้จากท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มม. กำลังทางออกที่ได้ 35 วัตต์

เพื่อให้ได้ mode ที่ออกมาเป็น mode เดียวโดยมี Pattern เป็นลักษณะ Fundamental mode จึงต้องใส่วงแหวนเล็ก ๆ (stop aperture) ที่ปลายทางออกของท่อกำเนิด เพื่อจำกัดขนาดของท่อกำเนิดและเพื่อทำให้ mode ที่มี order สูงกว่า Fundamental mode เกิดการสูญเสียที่ผนังท่อ การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกใช้ Stop Aperture ขนาดได้นั้น พิจารณาได้จากลำโพตอนทออสซิลเลทส์ที่อยู่ใน cavity ขนาดของลำโพตอนที่ตกกระทบที่กระจกสะท้อนสามารถหาได้จากสมการที่ 5.1

$$W_1^4 = (\lambda / \pi)^2 r_1^2 (r_2 - Lc) / (r_1 + r_2 - Lc)(r_1 - Lc) \text{ -----(5.1)}$$

และ

$$W_2^4 = (\lambda / \pi)^2 r_2^2 Lc (r_1 - Lc) / (r_2 - Lc)(r_1 + r_2 - Lc) \text{ -----(5.2)}$$

เมื่อ W_1 = รัศมีของ Beam ที่ตกกระทบกระจกสะท้อนที่ปลายแหล่งกำเนิดด้านหนึ่ง

W_2 = รัศมีของ Beam ที่ตกกระทบกระจกสะท้อนที่ปลายแหล่งกำเนิดอีกด้าน

λ = ความยาวคลื่นของลำแสง เลเซอร์

Lc = ความยาวระหว่างกระจกสะท้อนทั้งสองด้าน

r_1 = รัศมีความโค้งของกระจกสะท้อน 100%

r_2 = รัศมีความโค้งของกระจกทางออก

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการข้างต้นแล้วพบว่าลำโพตอนที่ตกกระทบที่กระจกสะท้อนด้าน r_1 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.764 มิลลิเมตร และที่ตกกระทบ r_2 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.737 มิลลิเมตร ดังนั้นสามารถประมาณได้ว่าขนาดของลำโพตอนที่ออสซิลเลทส์ที่ Fundamental mode มีขนาดประมาณเท่ากับลำโพตอนที่ตกกระทบที่กระจกทางออก

Stop aperture ที่ใส่ไว้ได้ทดลองเปลี่ยนขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในตั้งแต่ 7 มิลลิเมตร จนถึง 11.2 มิลลิเมตร เพื่อทดสอบผลการทดลองเปรียบเทียบกับค่าคำนวณ จากตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นถึงกำลังทางออกที่เปลี่ยนไป ขณะที่เปลี่ยนขนาดของ stop aperture และ mode ที่ได้

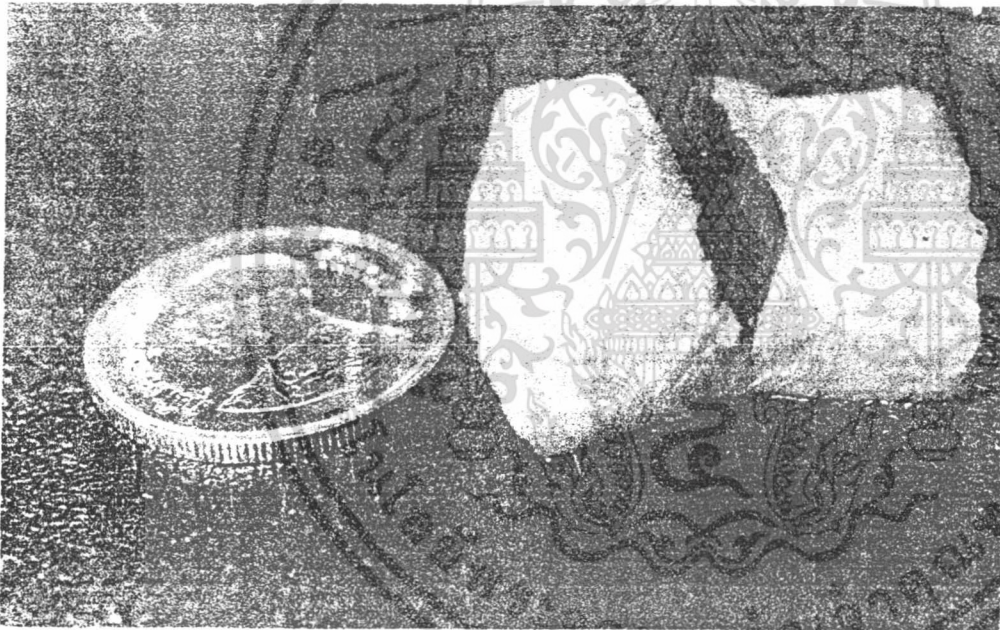
ตารางที่ 5.1

ขนาดของ Stop Aperture เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (มม.)	กำลังทางออก (Watts)	mode ที่ได้ตามรูปที่
7	6	5.2
7.7	15	5.3
8.2	15	5.4
8.6	18	5.5
9.3	14	5.6
9.9	22	5.7
10.5	23	5.8
11.2	23	5.9

หมายเหตุ ขณะที่ทำการทดลองโดยไม่มีใส่ stop aperture กำลังทางออกปรับได้เพียง 28 วัตต์ เท่านั้น

จากการทดลองปรากฏว่าวางแหวนที่มีขนาด 8.6 และ 9.3 มิลลิเมตร ให้ pattern ของ mode ที่ออกมาใกล้เคียงกับ Fundamental mode มากที่สุด ในงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้สร้างท่อกำเนิดขึ้นมาใหม่ โดยใช้ท่อแก้ว pyrex ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 9 มิลลิเมตร ความยาว 1 เมตร จากการทดลอง โดยทำการปรับความดันของก๊าซ ปรับจุดขนานของกระจก และการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในจุด optimum ผลปรากฏว่าสามารถวัดกำลังได้ถึง 25 วัตต์ ซึ่งเมื่อเทียบกับการคำนวณแล้วใกล้เคียงกันมาก และโดยอาศัยท่อกำเนิดใหม่นี้ ทดลองตัดเนื้อหมูที่ความเร็ว 1.25 มม.ต่อวินาที โดยอาศัยการแขวนเนื้อ หมูไว้บนรางเลื่อน รางเลื่อนนี้ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ที่สามารถปรับความเร็วได้ และการทดลองนี้ไม่ใช้แขนส่ง กำลังเลเซอร์ในการตัด เพราะการใช้แขนส่งกำลังจะทำให้ความเร็วไม่สม่ำเสมอ ไม่เหมือนกับราง เลื่อนที่จะให้ผลการทดลองแน่นอนกว่า ซึ่งพบว่าสามารถตัดเนื้อหมูได้ลึก 6 มิลลิเมตร

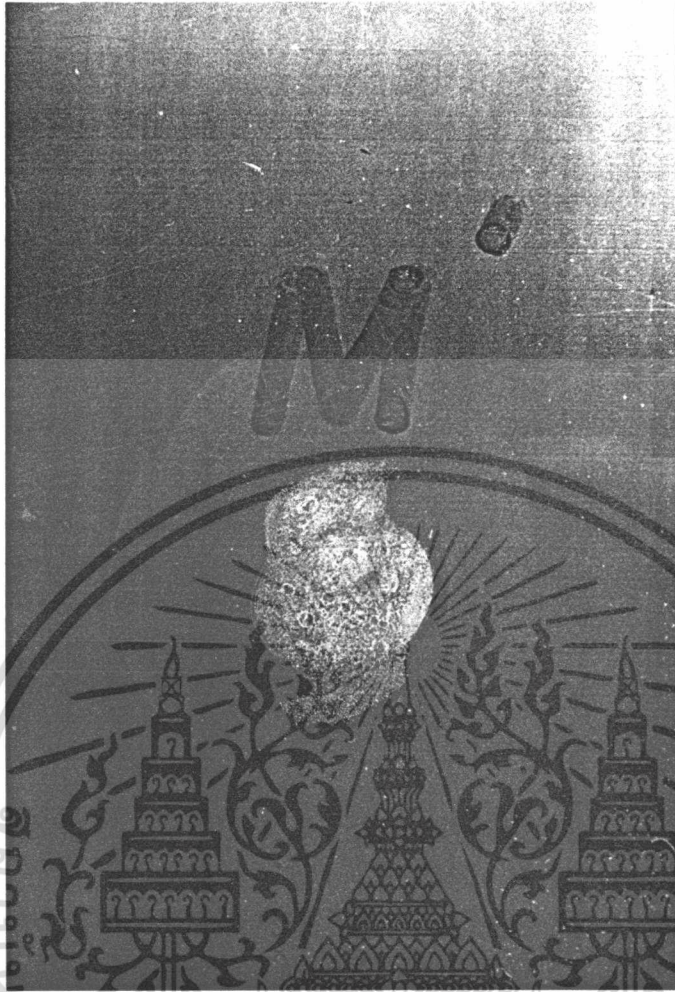
เป็นที่น่าสังเกตว่าเนื้อหมูที่ใช้เป็นเนื้อบริเวณสะโพก ซึ่งมีไขมันเกาะอยู่น้อยแต่ถึงอย่างไรถ้าแสงเลเซอร์
 บริเวณที่มีไขมันแล้วจะเจาะลงไปลึกอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความลึกของเนื้อเยื่อที่ถูกตัด
 ด้วยแสงเลเซอร์จะลึกเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของเนื้อเยื่อด้วย และได้แสดงให้เห็นตามรูปที่ 5.2



รูป 5.2 เนื้อที่ถูกตัดด้วยจุดโฟกัส 0.1 มม. ความเร็ว 1.25 มม. ต่อวินาที

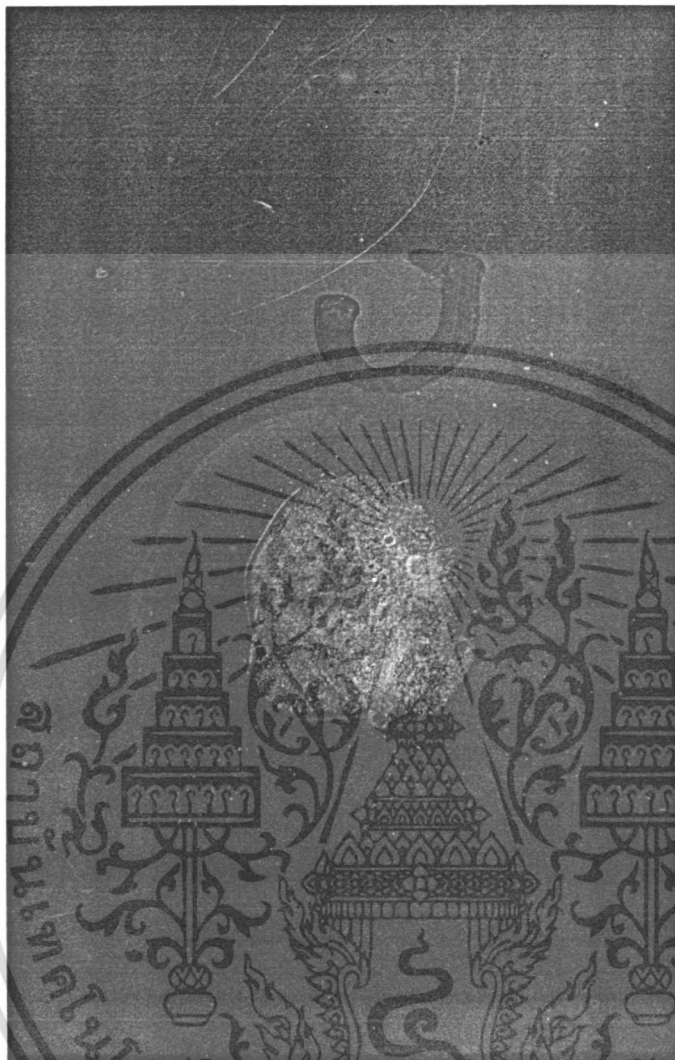
จากรูปที่ 5.2 ถึง 5.9 แสดงให้เห็นถึง mode ที่เกิดขึ้นจากการใช้ Stop Aperture ตั้งแต่
 มิลลิเมตร จนถึง 11.2 มิลลิเมตร และได้แสดงคำอธิบายไว้ได้รูปในแต่ละ mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



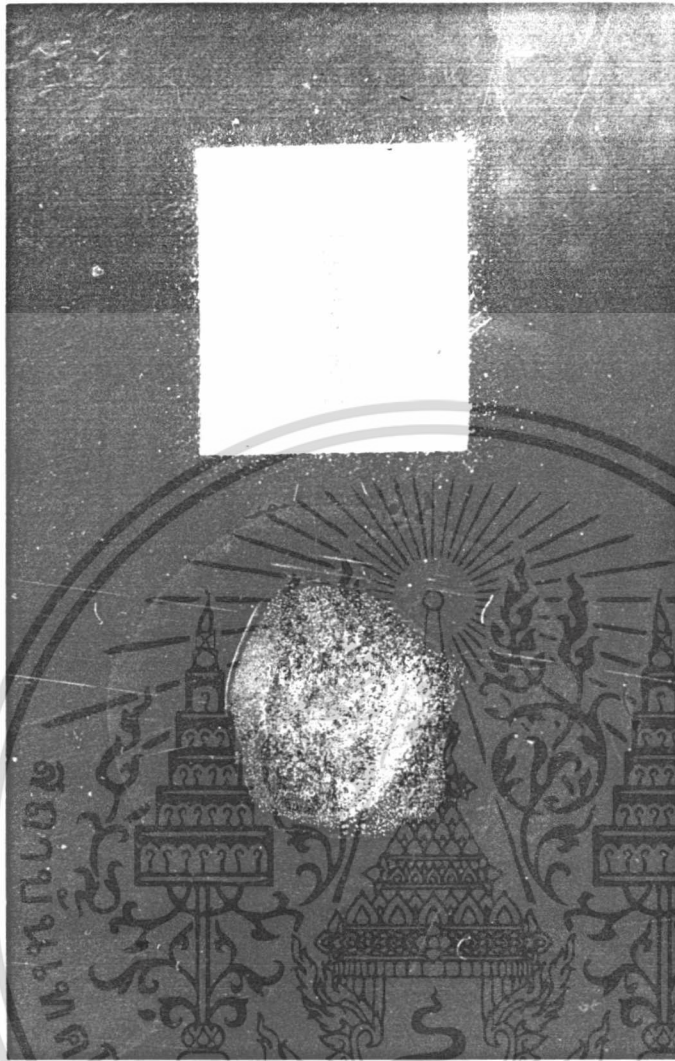
รูป 5.3 ขนาด Aperture 7 มม. กำลัง 6 วัตต์
 บริเวณที่ถูกความร้อนจะมีสีขาว จะเห็นว่า
 บริเวณที่เป็นจุดสีดํากระจายอยู่ทั่วไป และ
 ขนาดของลำแสงที่กระทบเข้ามีขนาดเล็ก
 Mode ที่ได้เป็นลักษณะของ Multimode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



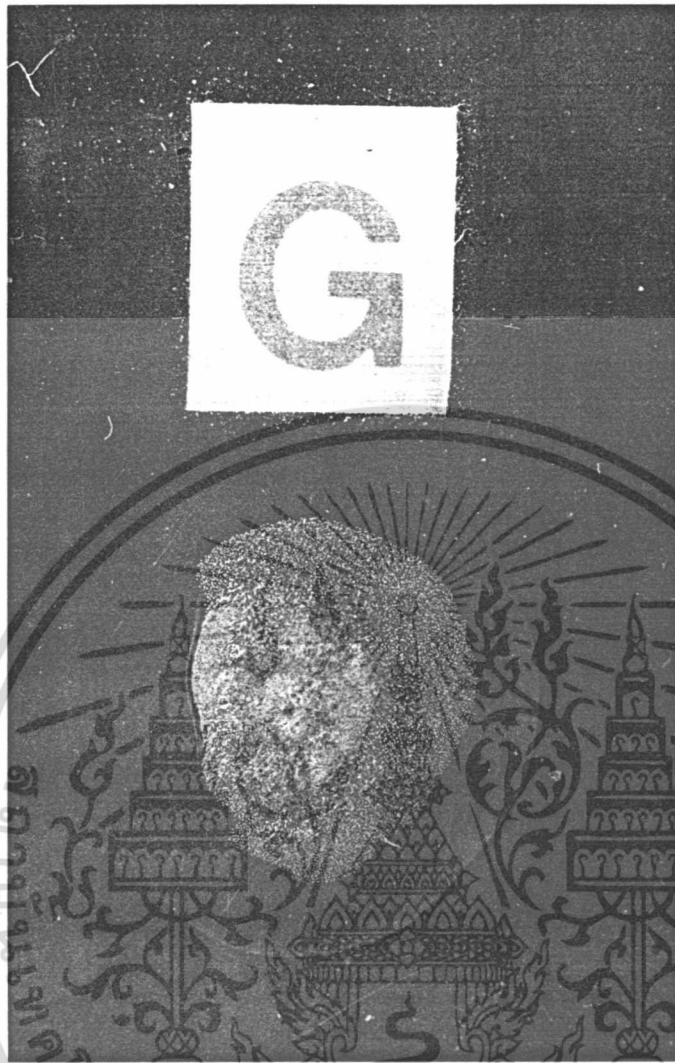
รูปที่ 5.4 ขนาด Aperture 7.7 มม. กำลัง 7.5 วัตต์
บริเวณจุดขาวที่ถูกความร้อนรวมตัวกันมากขึ้น
บริเวณจุดดำที่กระจายตัวออกมีจำนวนลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



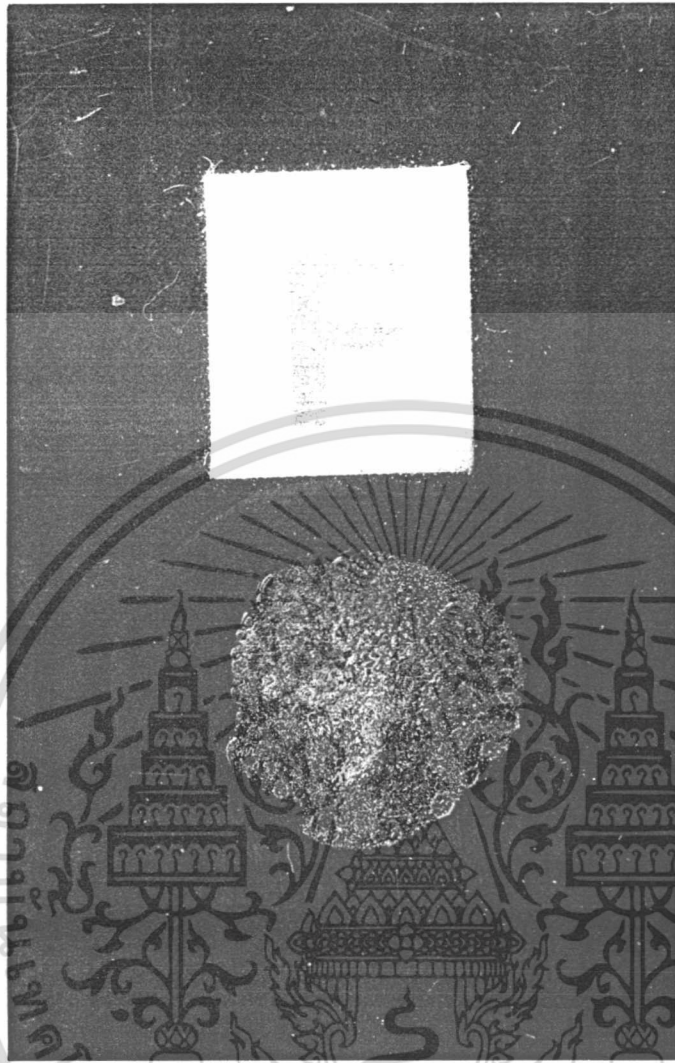
รูปที่ 5.5 ขนาด Aperture 8.2 มม. กำลัง 15 วัตต์
รูปร่างของ mode ไม่ต่างจาก รูปที่ 5.4 มากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



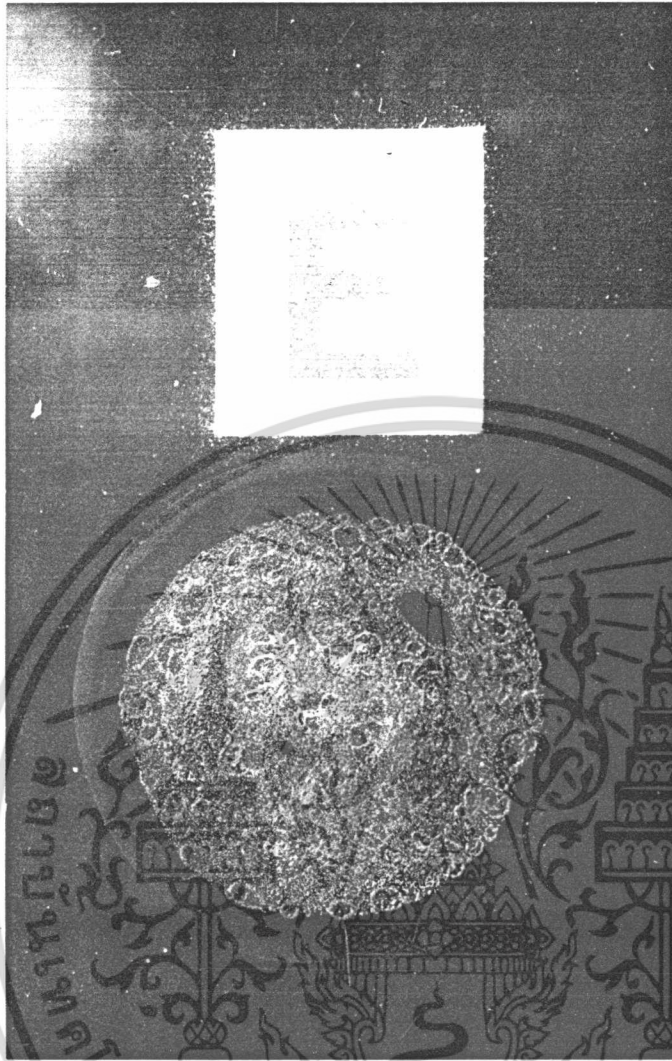
รูปที่ 5.6 ขนาด Aperture 8.6 มม. กำลัง 18 วัตต์
 กลุ่มของจุดขาวที่ถูกความร้อนรวมตัวกันมากขึ้น
 ที่จุดศูนย์กลาง แต่บริเวณจุดศูนย์กลางยังมีจุดมืด
 กระจายตัวอยู่บ้าง เป็นที่น่าสังเกตว่าขนาดของ
 Aperture ที่ 8.6 มม. นั้น ใกล้เคียงกับ
 Fundamental Mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 ขนาด Aperture 9.3 มม. กำลัง 14 วัตต์
กลุ่มของจุดขาวที่บริเวณจุดศูนย์กลาง เริ่มกระจาย
ตัวออก แต่บริเวณจุดขาวส่วนใหญ่ยังอยู่ที่จุดศูนย์กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



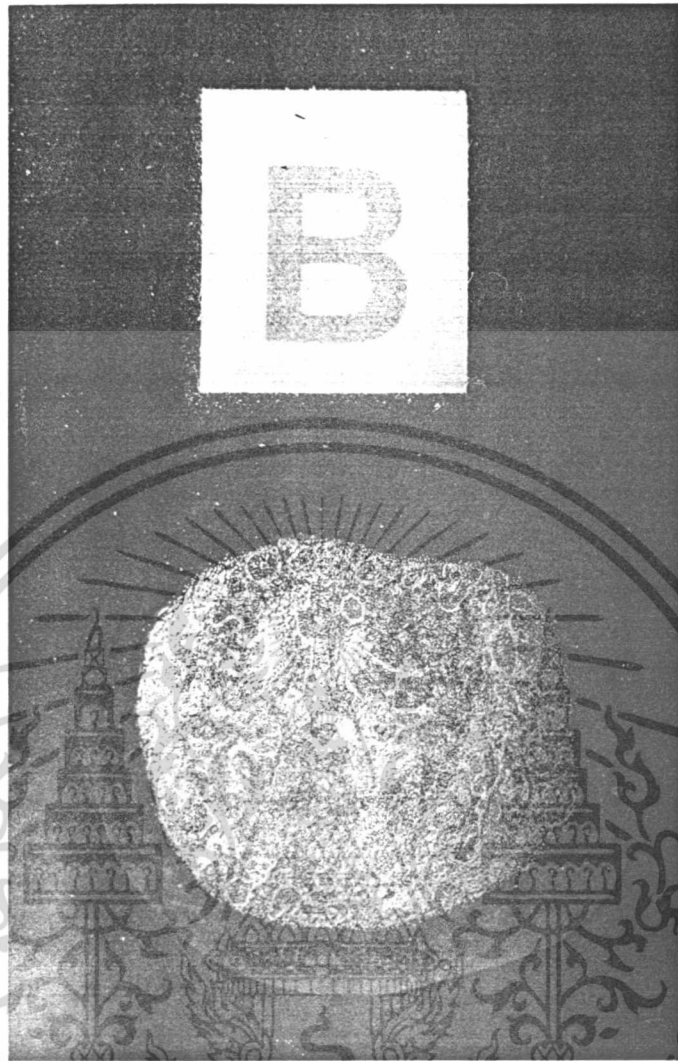
รูปที่ 5.8 ขนาด Aperture 9.9 มม. กำลัง 22 วัตต์
จุดขาวและจุดดำสลับกันกระจายตัวอยู่โดยรอบ
เป็นลักษณะที่ชัดเจนของ Multimode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 ขนาด Aperture 10.5 มม. กำลัง 23 วัตต์
 มีจุดมืดขนาดใหญ่ เป็นวงแหวนล้อมรอบจุดศูนย์กลาง
 กลางซึ่งเป็นจุดขาว ปรากฏการณ์นี้แสดงว่า mode
 เริ่มเปลี่ยนเป็น mode ที่ใกล้เคียงกับ mode 01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 ขนาด Aperture 11.2 มม. กำลัง 23 วัตต์
 จุดมืดและจุดขาวสลับกันกระจายตัวอยู่ทั่วไป mode
 ที่เกิดจาก Aperture นี้ เริ่มเข้าสู่ Multimode
 อีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุป

เลเซอร์ผ่าตัดที่ได้สร้างขึ้นนี้ ยังไม่สามารถนำไปใช้ในการผ่าตัดได้จริง ทั่วไปในโรงพยาบาลได้ ถึงแม้ว่าระบบของ เลเซอร์ต้นแบบนี้จะมีเสถียรภาพดีและกำลังทางออกที่ออกมาสามารถที่จะตัดเนื้อเยื่อได้ เหมือนกับเลเซอร์ผ่าตัดทั่วไปแต่สิ่งที่ยังไม่สมบูรณ์คือ ลักษณะของ mode ที่ออกมายังไม่ได้ TEM₀₀ mode ที่แท้จริง

จากรูปที่ 5.2 ถึง 5.9 จะสังเกตเห็นว่าในแต่ละรูปนั้นล้วนมีจุดสีขาวและจุดสีดำกระจายตัว อยู่ตลอดพื้นที่ แต่การกระจายตัวในแต่ละรูปนั้นมีความแตกต่างกันอยู่ คือ การเกาะกลุ่มของจุดสีขาว ซึ่งจุดสีขาวหมายถึง เป้าที่ถูกความร้อนจากการทดลอง ขณะเดียวกัน จุดสีดำเกิดจากเป้าหมายเดียวกันที่ไม่ถูกความร้อน ดังนั้นจึงพอจะคาดคะเนลักษณะของ mode ที่ออกได้จากการเกาะกลุ่มของจุดสีขาวถ้า จุดสีขาวในรูปโดยรวมกลุ่มกันที่จุดศูนย์กลางมากที่สุด หมายถึงว่ารูปนั้นใกล้เคียงกับ TEM₀₀ mode มาก ที่สุดนั่นเอง และจากการทดลองในบทที่ 5 ทำให้ทราบว่า stop aperture ขนาด 8.6-9.3 มิลลิเมตรจะทำให้ลักษณะของ mode ออกมาดีที่สุดแต่ก็ยังไม่ดี TEM₀₀ mode ที่ดีที่สุดได้ เหตุผล ประการสำคัญก็คือ จากการคำนวณขนาดของ stop aperture ในสมการที่ 5.1 และ 5.2 พบว่า ขนาด stop aperture ที่ใช้ควรมีขนาดประมาณ 6.7 มิลลิเมตร แต่เป็นการยากมากในทางปฏิบัติที่จะ ปรับตำแหน่งศูนย์กลางร่วม ให้แกนแสงผ่านจุดกึ่งกลางของ stop aperture พอดี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทดลองกับ stop aperture ที่มีขนาดโตกว่าที่คำนวณได้

การทดลองขนส่งกำลัง เลเซอร์ได้ทำการทดลองโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงที่เป็นแสง เลเซอร์ชนิด ฮีเลียม-นีออน เลเซอร์แทนเลเซอร์แบบคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากมีขนาดที่เล็กกว่า สะดวกในการเคลื่อนย้ายและสามารถมองเห็นลำแสงได้ชัดเจน (แสงสีแดง) ในการทดลองพบว่าแสงของ ฮีเลียม-นีออน เลเซอร์ เบี่ยงเบนออกจากแนวแกนแสง (แกนกลางของขนส่งกำลัง) ตลอดเวลาที่เคลื่อนที่ผ่านเลน บางครั้งแสง ฮีเลียม-นีออน เลเซอร์ กระทบกระຈกสะทอนภายในเลนแล้วไม่สามารถออกมาที่ปลาย แขนงได้ทั้งหมดเนื่องจากกระทบผนังท่อ เหตุที่เป็นดังนี้เนื่องจากการสร้างขนส่งกำลังนี้ วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ยังไม่มียุติภาพเพียงพอ ทำให้ข้อต่อแต่ละข้อของขนส่งกำลังมีระยะคลอน มากเกินกว่า ที่คำนวณได้ อีกทั้งวัสดุที่ใช้ยังมีน้ำหนัก ทำให้ขนส่งกำลังไม่สามารถเคลื่อนไหวได้สะดวกตามจุดประสงค์

จากผลของการทดลองหาให้ได้ข้อสรุปในอีกชั้นหนึ่งว่า ถ้าสามารถแก้ปัญหาในเรื่อง แชนส่งกำลังได้ โดยใช้อุปกรณ์เครื่องมือที่มีความละเอียดและประสิทธิภาพสูงกว่าเดิมในการทำ แชนส่งกำลัง ทั้งสามารถออกแบบหัวเลเซอร์เพื่อให้ได้ mode ที่ออกมาดีกว่าที่เป็นอยู่แล้ว เลเซอร์เครื่องนี้ก็จะสามารถใช้งานได้จริงต่อไปตามจุดประสงค์ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.แดเนียล บริน ที่ท่านได้กรุณาช่วยเหลือ แนะนำ ตรวจสอบ และติดตามการทำงาน ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง ผู้ทำการวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รู้สึกซาบซึ้งในพระคุณของท่าน ขอขอบคุณอาจารย์วิเชียร เกื้อนเครือวัลย์ และ นายโสภณ อัครศรีวรรณท์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล (วิทยาเขตเทเวศร์) ที่ให้ความอนุเคราะห์เกี่ยวกับการจัดหาและสร้างอุปกรณ์สำคัญบางชนิด และสุดท้ายขอขอบคุณ คุณพ่อประยูร และคุณแม่บังกช เผ่าลีนจง ที่ให้กำลังใจและทุนทรัพย์ในการทำวิจัยนี้ด้วยดีอย่างยิ่งตลอดมา

วิวัฒน์ เผ่าลีนจง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมศักดิ์ เขียร์ศิริกุล, "คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์แบบดิสชาร์ตามแนวแกน," คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ลาดกระบัง, 2526.
- [2] Operating Manual Sharplan 791, "Co₂ Surgical Laser," Laser Industries Ltd Israel.
- [3] Orazio Svelto, "Principles of Lasers," Plenum Press, New York, 1982.
- [4] Joel Bainerman, "Laser Medicine in Israel," Lasers & Applications, May 1984.
- [5] Jean-Marc Brunetaud et Bernard Decomps, "Les Lasers en Medicine," La Reherche, October 1982.
- [6] P.W. Smith, "Mode Selection in Laser," IEEE, Vol.60, pp. 422-440, April 1972.
- [7] M.J.Beesley, "Lasers and Their Application," Taylor & Francis, London, 1971.
- [8] L.V.Tarasov, "Laser Phisics and Application," Mir Publishers, Moscow, 1986.
- [9] W.J. Witteman, "G-11-High-Power Single-Mode Co₂ Laser," IEEE Journal of Quantum Electronics., Vol.QE-4, No.11, November 1968.
- [10] Fred J.Demma, "A Large Volume TEM₀₀ Mode Technique for 10.6 Laser," Applied Optics., Vol.7, No.12, December 1968.
- [11] Mochida, "Medilaser-s Model Mel-442," Mochida Pharmaceutical Co.,Ltd. Tokyo Japan.

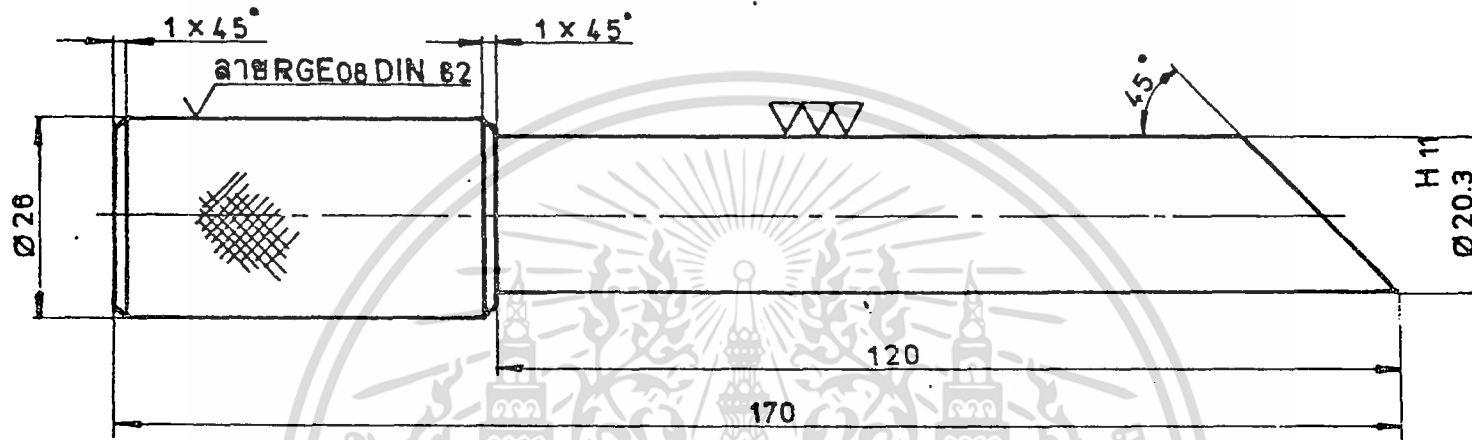
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Colin S.W. Illett, "Introduction to GAS LASER," Harry Diamond laboratories, Washington, DC 20438.
- [13] Theodore S. Fahlen, "Co₂ Laser Design Procedure," Applied optics., Vol. 12, No. 10, October 1973.
- [14] John P. Goldseorugh, "Design of Gas Laser," Spectra-Physics, Inc. Mountain View, California, U.S.A.
- [15] Francis P. Gagliano, "Lasers in Industry," IEEE, Vol. 57, pp. 114-147, Feb. 1969.
- [16] H. Kogelnik and T. Li, "Laser Beams and Resonators," IEEE, vol. 54, pp. 1312-1329, Oct. 1966.
- [17] แดเนี่ยล บริน และ วิวัฒน์ เฝ้าลีนจง, "ความสำคัญของส่วนต่างๆ ในการออกแบบเลเซอร์ผ้าตัด," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบัน ครั้งที่ 11, 2531.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

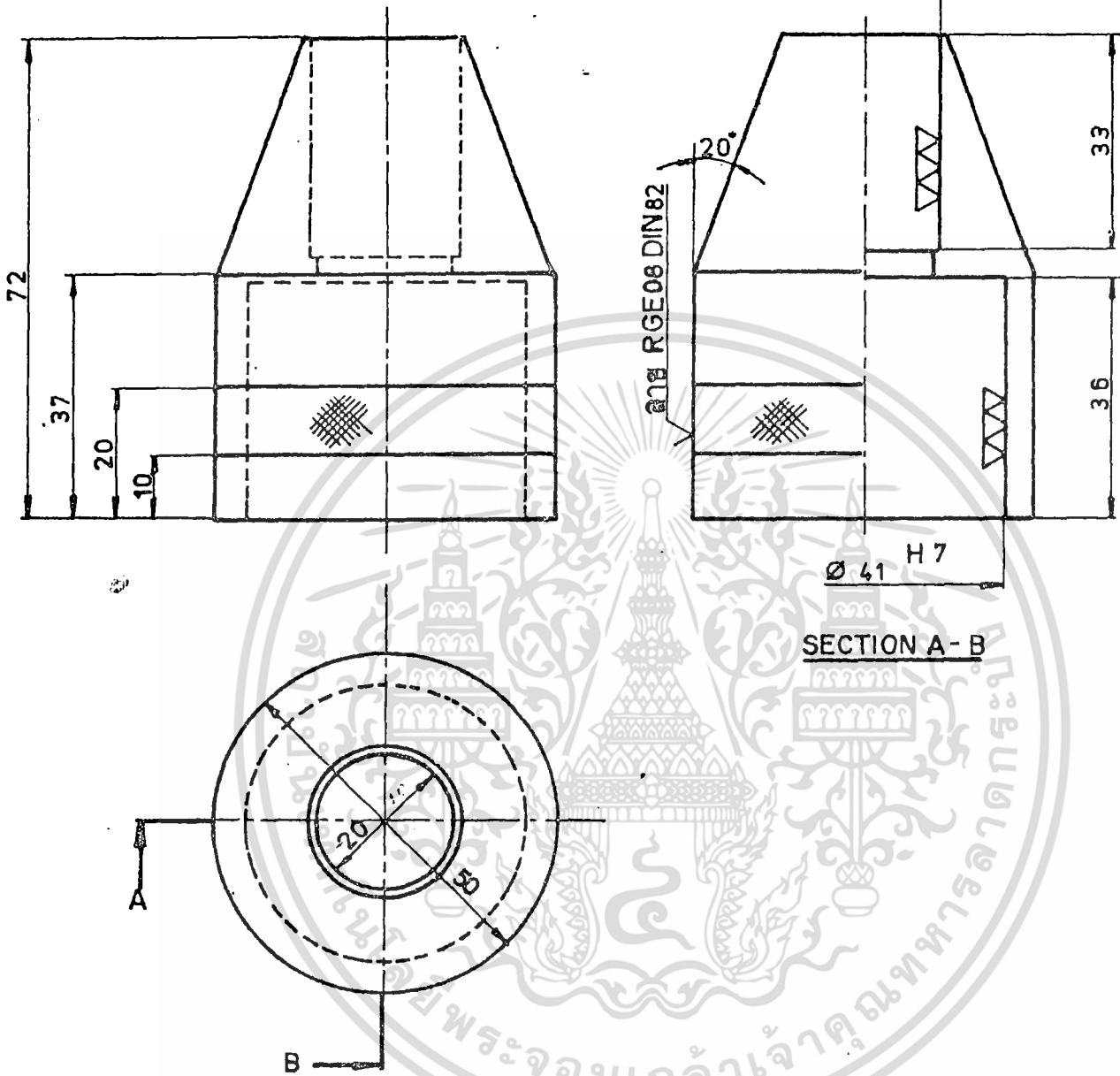
▽ (▽▽▽)



NOTE ± 0.25

8	ค้ำติดกระจก	Ø 26 x 175	st 37	30-32-08	1
วันที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน				คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	
ผู้ตรวจ					
ผู้ตรวจ ผ.ศ.					
ผู้ออกแบบ					
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน	แขนส่งกำลังเลเซอร์		หมายเลขแบบ	
1:1					

▽ (▽▽)

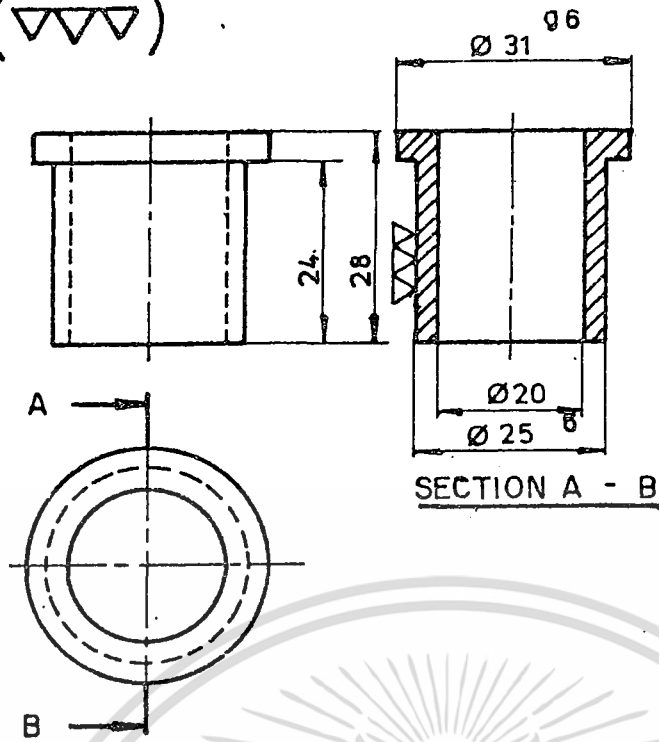


NOTE ± 0.25

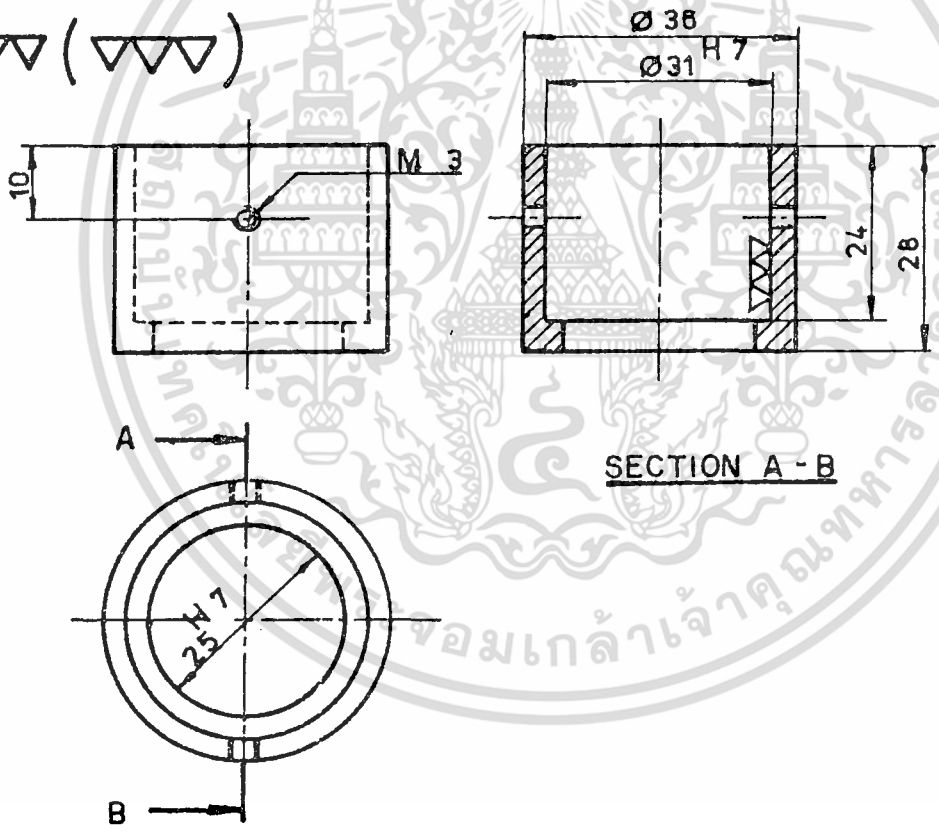
ชื่อต่อฐาน	Ø 53 x 75	BRASS	30-32-10	1
รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้จัดทำ			คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง.	
จ. ม.ช.				
แบบ				
กล่าว	ชื่อชิ้นงาน		หมายเหตุ	
	แขนส่งกำลังเลเซอร์		หมายเลขแบบ	

GATEWAY NATURAL TRACING PAPER, 90-95 gm² SIZE A4

18 (▽▽)



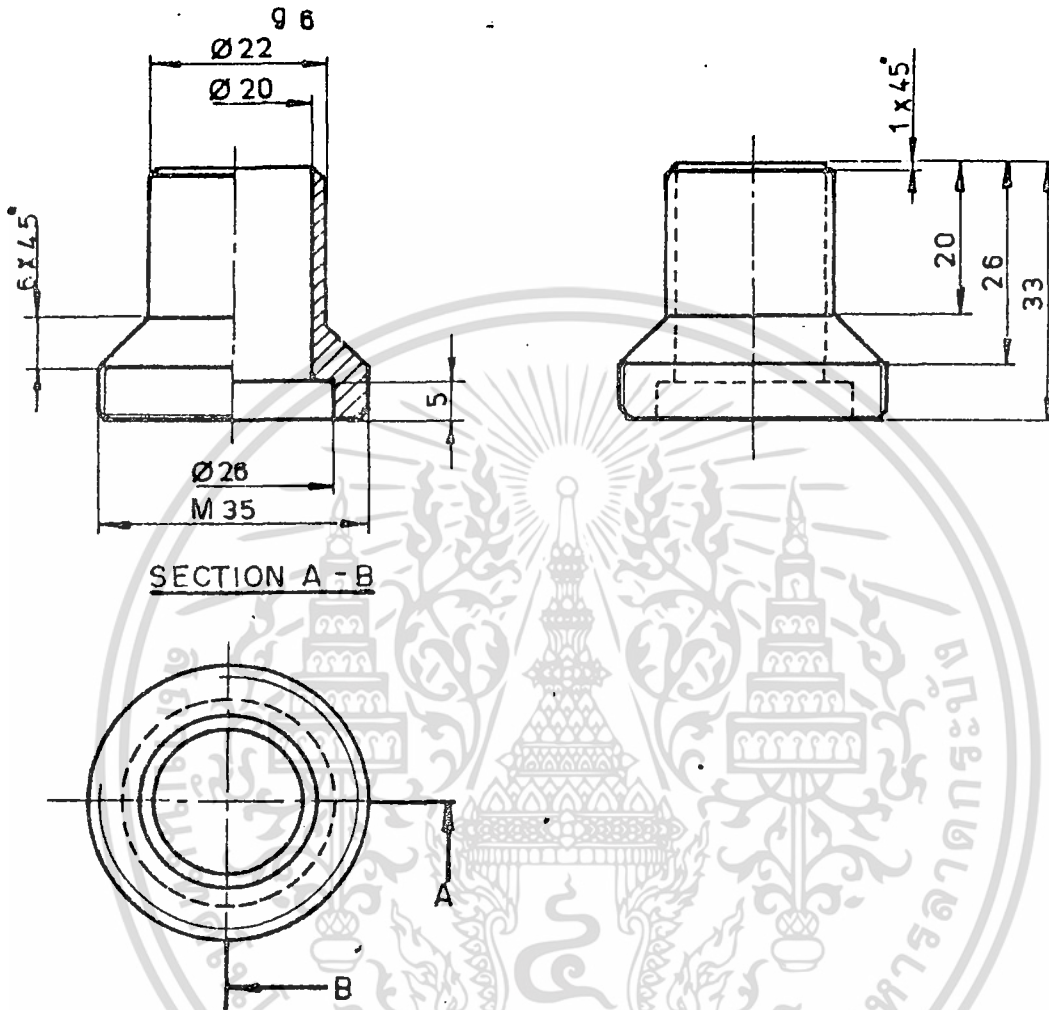
19 (▽▽)



TOLERANCE ± 0.25

รูชนอก	Ø 40 x 35	BRASS	30 - 32 - 19	6
รูชนใน	Ø 35 x 35	BRASS	30 - 32 - 18	6
รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน

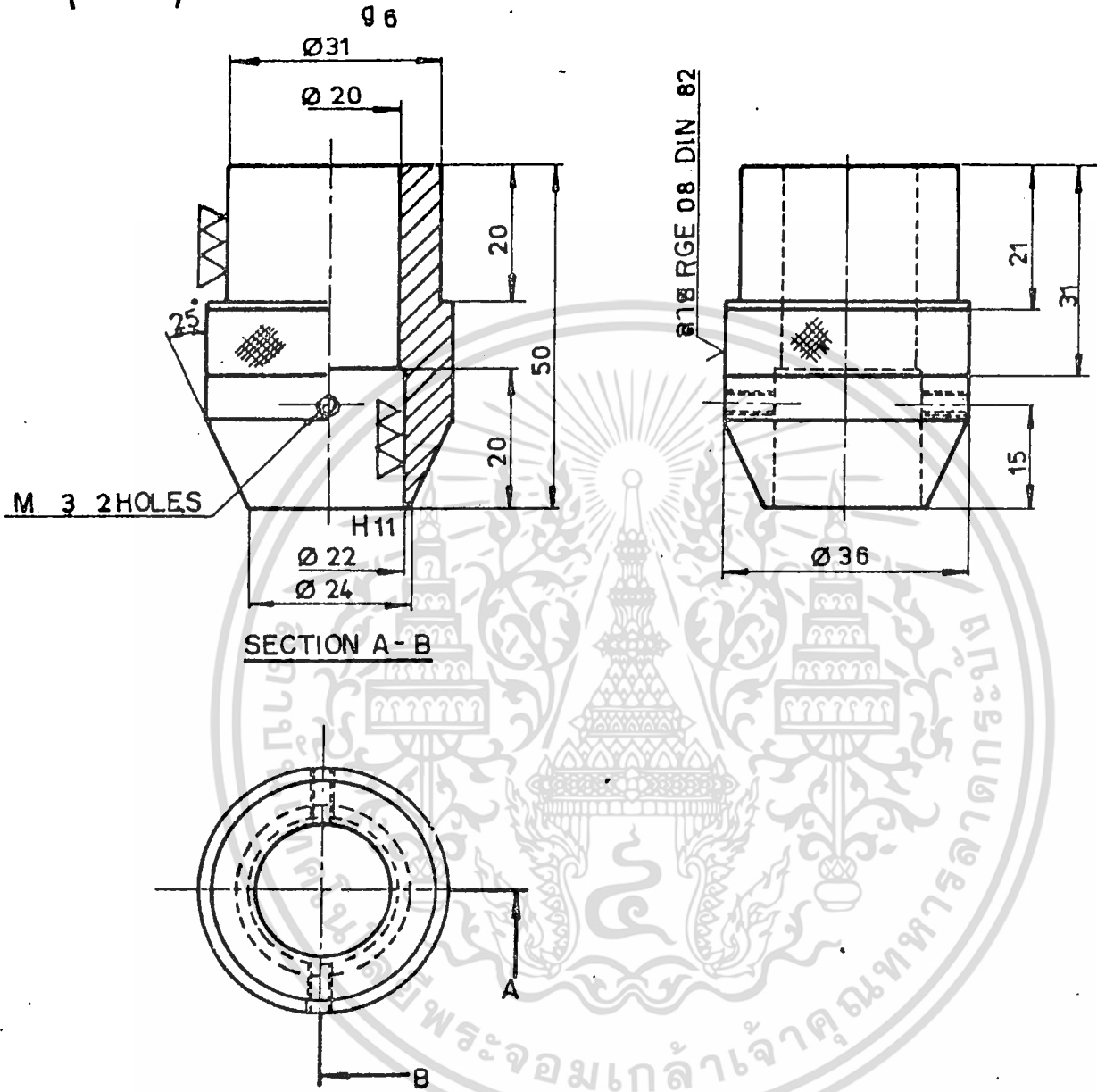
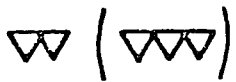
ย่น		คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ภาควิชาการ ลาดกระบัง
วิชา		
วิชา ม.ช.		
ออกแบบ		
ครุภัณฑ์	ชื่อชิ้นงาน	เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา ไม่สามารถนำออกนอกห้องเรียนได้ ขอสงวนสิทธิ์ในชื่อ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
จำนวน	1	



NOTE ± 0.25

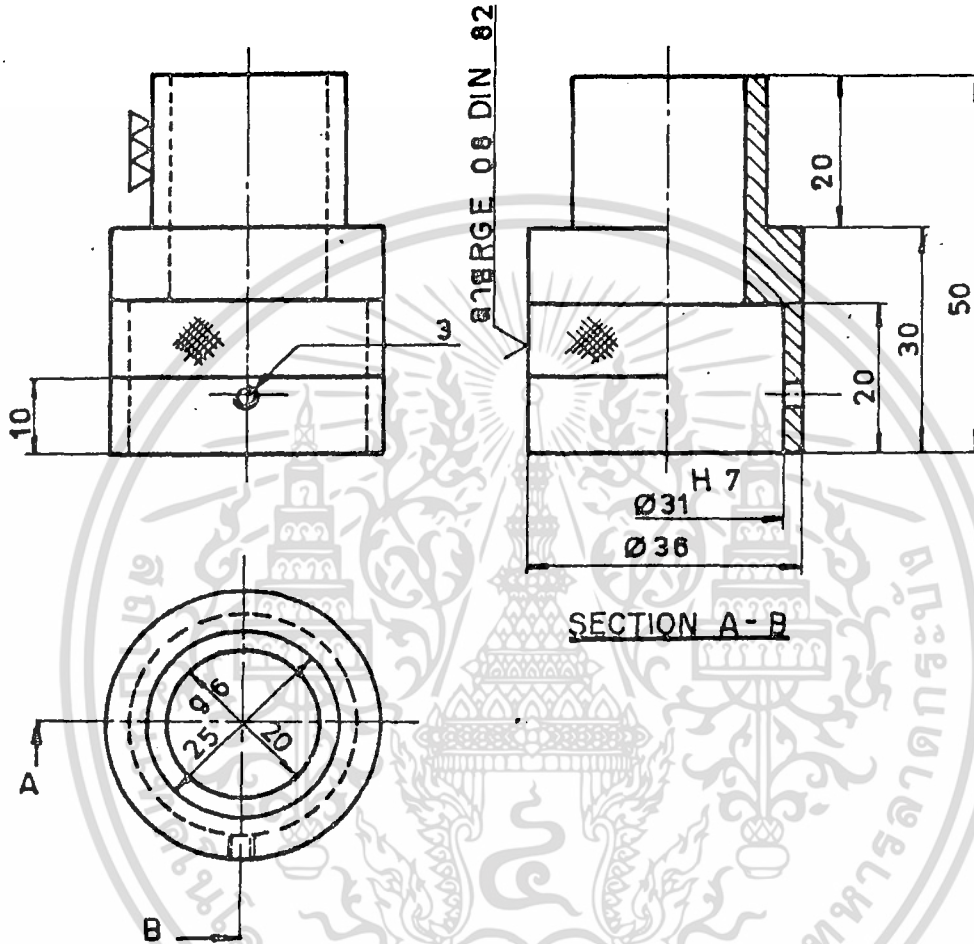
วัสดุ	ขนาดวัสดุ	BRASS	30-32-24	1
รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
เขียน			คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	
ตรวจ				
จวิจ ม.ช.				
ออกแบบ				
ราคาส่วน	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขแบบ		
1	เขียนส่งกำลังเลเซอร์	ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเปิดเผยข้อมูลนี้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้		

GATEWAY NATURAL TRADING PERPETUUM CO., LTD. 2561



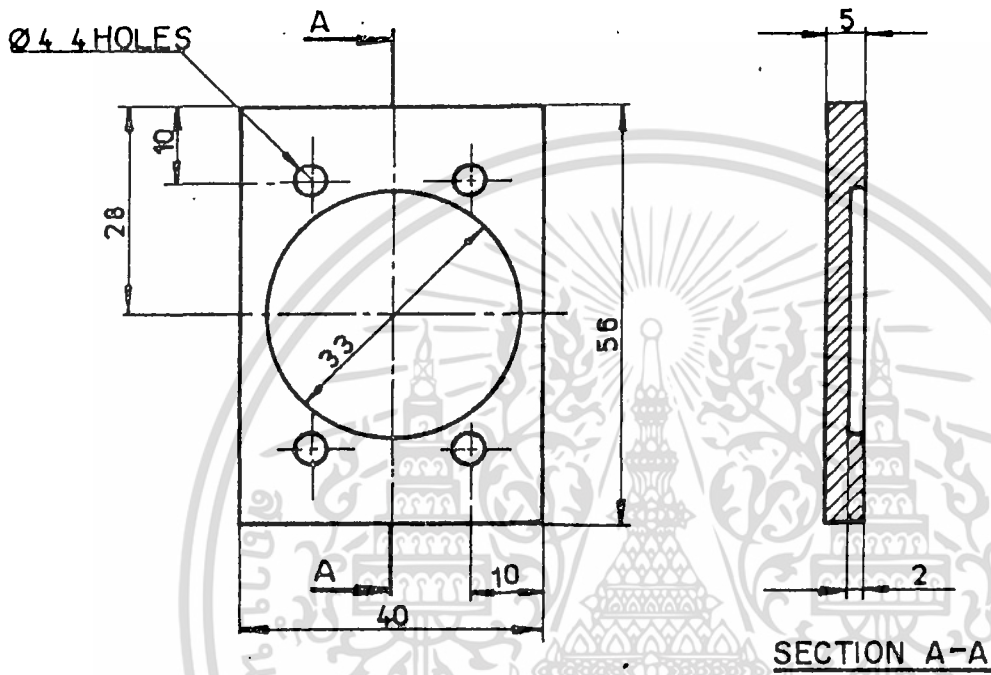
NOTE ± 0.25

ชื่อต่อตรงปานอก	Ø 40 x 55	BRASS	30 - 32 - 23	2
รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
เขียน			คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ภาควิชาคณิศร ลาดกระบัง หมายเลขแบบ	
ตรวจ				
ตรวจ มช.				
ออกแบบ				
ตรวจร่าง	ชื่อผู้ร่าง	เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการ วิชาการอื่นใดทั้งสิ้น ยกเว้นกรณีที่มีการขออนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้		
1:1	เซ็นส่งกำลังเลเซอร์			



NOTE ± 0.25

ชื่อคอดตรง	Ø 40 x 55	BRASS	30-32-22	1
รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
เขียน			คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	
ตรวจ				
ตรวจ ม.ย.				
ออกแบบ				
รายการส่วน	ชื่อชิ้นงาน	เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำออกนอกห้องเรียนโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า		
: 1	แขนส่งกำลังเลเซอร์	หมายเหตุ: หากต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่ออาจารย์ผู้สอน หรือช่างเทคนิคประจำห้องเรียน		

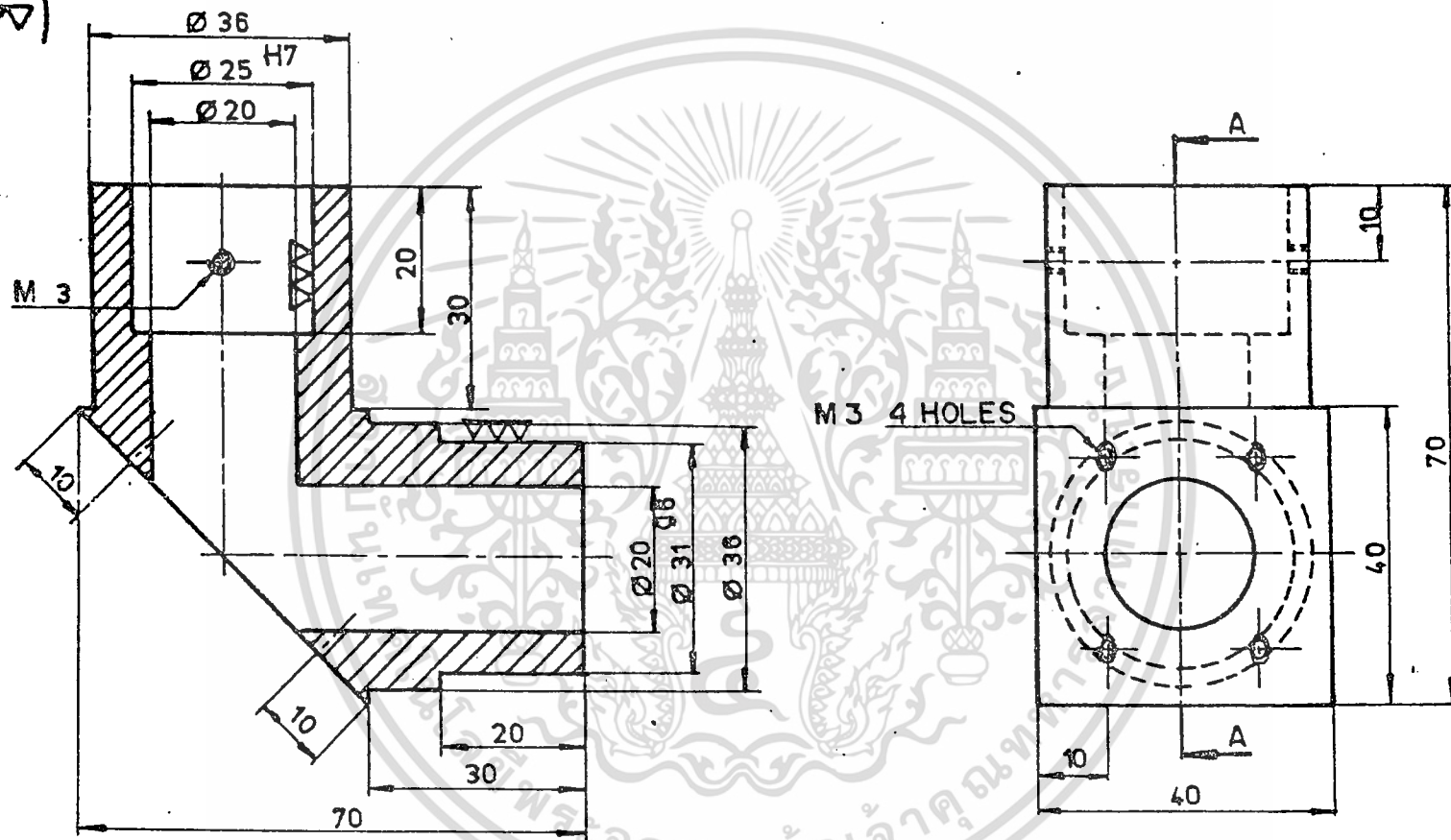


NOTE ± 0.25

แผ่นประกบกระจก	50 × 60 × 10	ALUMINIUM	30 - 32 - 20	5
รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ชย			คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	
ชวจ				
ชวจ ม.ช.				
อกแบบ				
ตรวจฉนวน	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขแบบ		
:	ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้			

GATEWAY NATURAL TRACING PAPER OF DE PT 2 SIZE 17

▽ (▽▽)

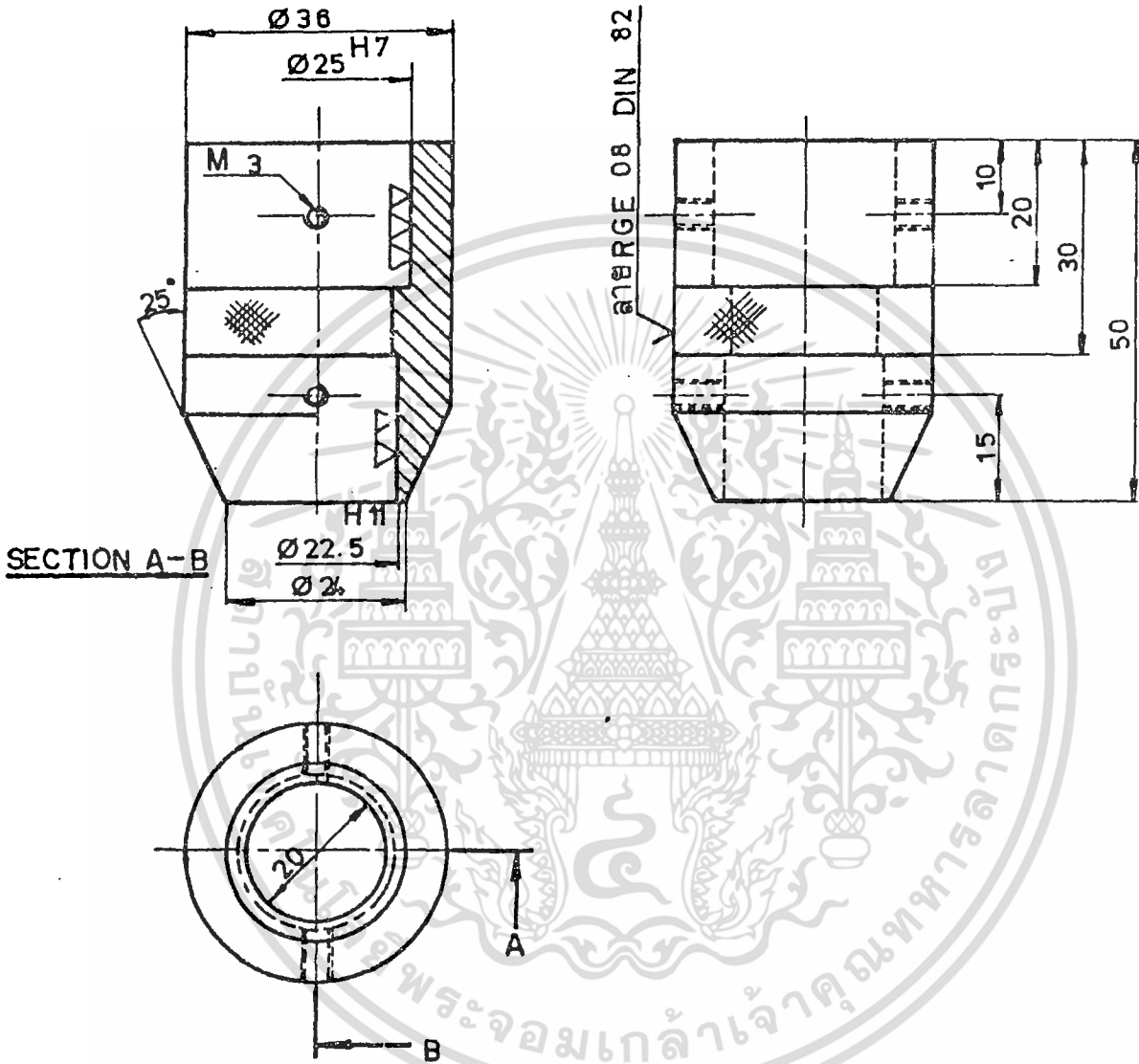


SECTION A-A

NOTE ± 0.25

17	ชื่อต่อมมาจาก	45 x 80 x 80	ALLOY	30-32-17	5
ชื่อที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน				คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	
ผู้ตรวจ					
ผู้ตรวจ มช.					
ผู้ออกแบบ					

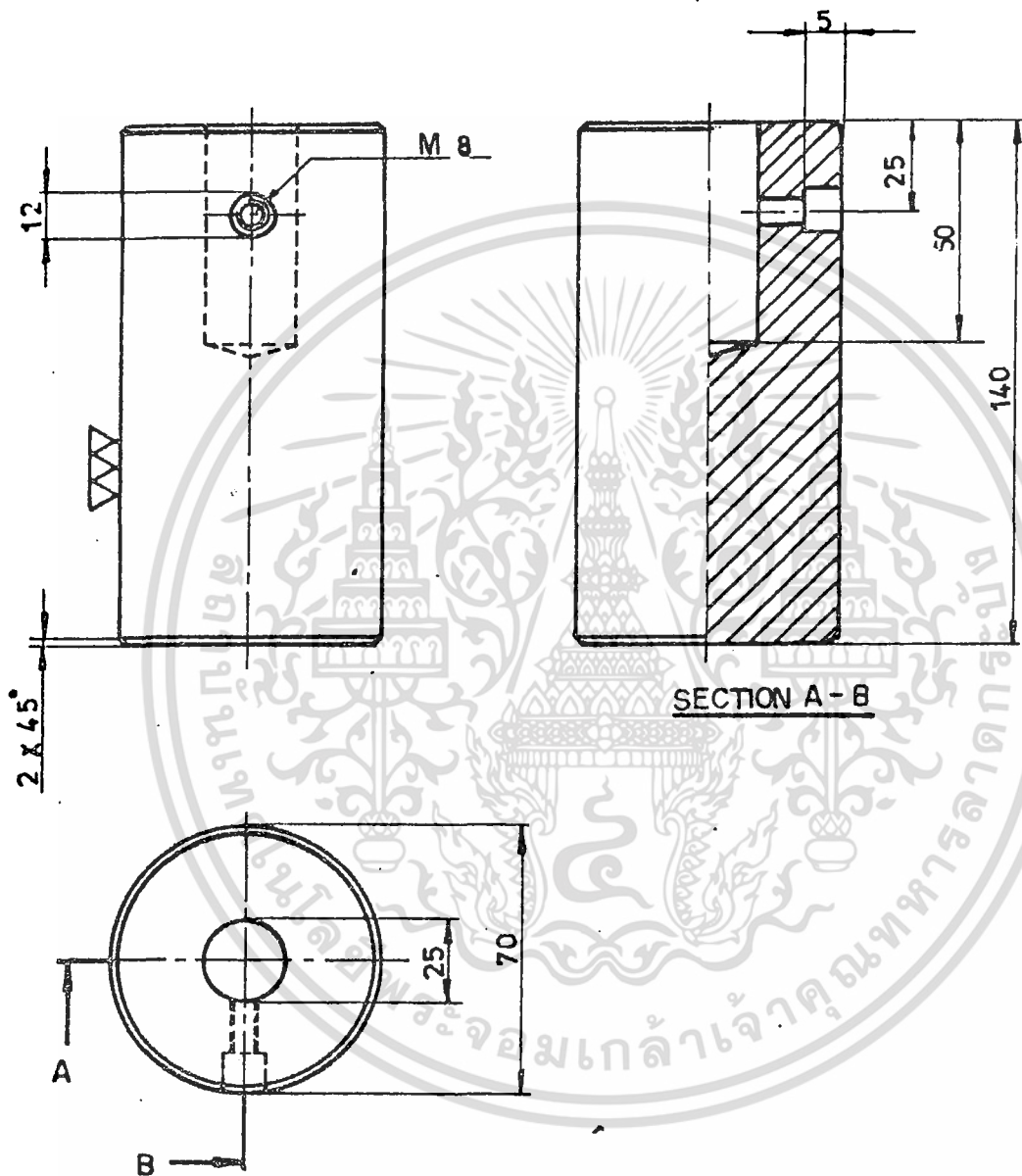
▽ (▽▽)



NOTE ± 0.25

ชื่อต่อตรงป้าใน	Ø 40 x 55	BRASS	30 - 32 - 16	1
รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
น			คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	
ว				
ว จ ม ช.				
กแบบ				
ราคาส่วน	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขแบบ		
1	ชิ้นส่งกำลังเลเซอร์	หมายเหตุ: ไม่สามารถแก้ไขได้ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้		

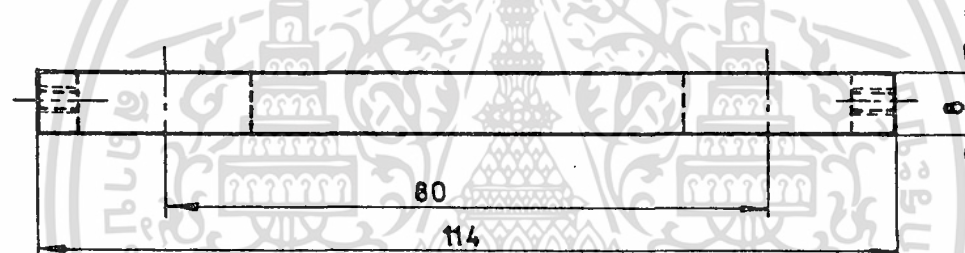
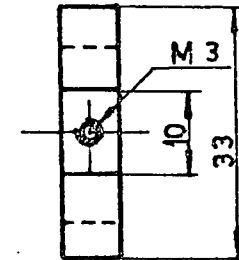
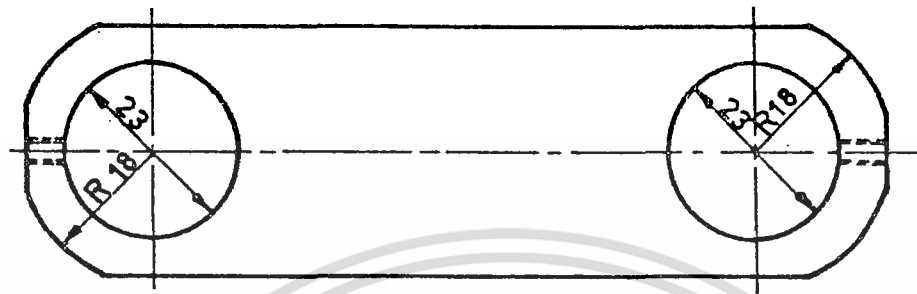
▽ (▽▽)



TOLERANCE ± 0.25

ลูกคัมพ่าหนัก	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
Ø 75 x 145	ส. 37	30 - 32 - 14	1	
รายการ				
ยูน				
ตรวจ				
ตรวจ ม.ช.				
ออกแบบ				
ราคา				
จำนวน : 2	ชื่อชิ้นงาน แขนส่งกำลังเลเซอร์		คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง หมายเลขแบบ	

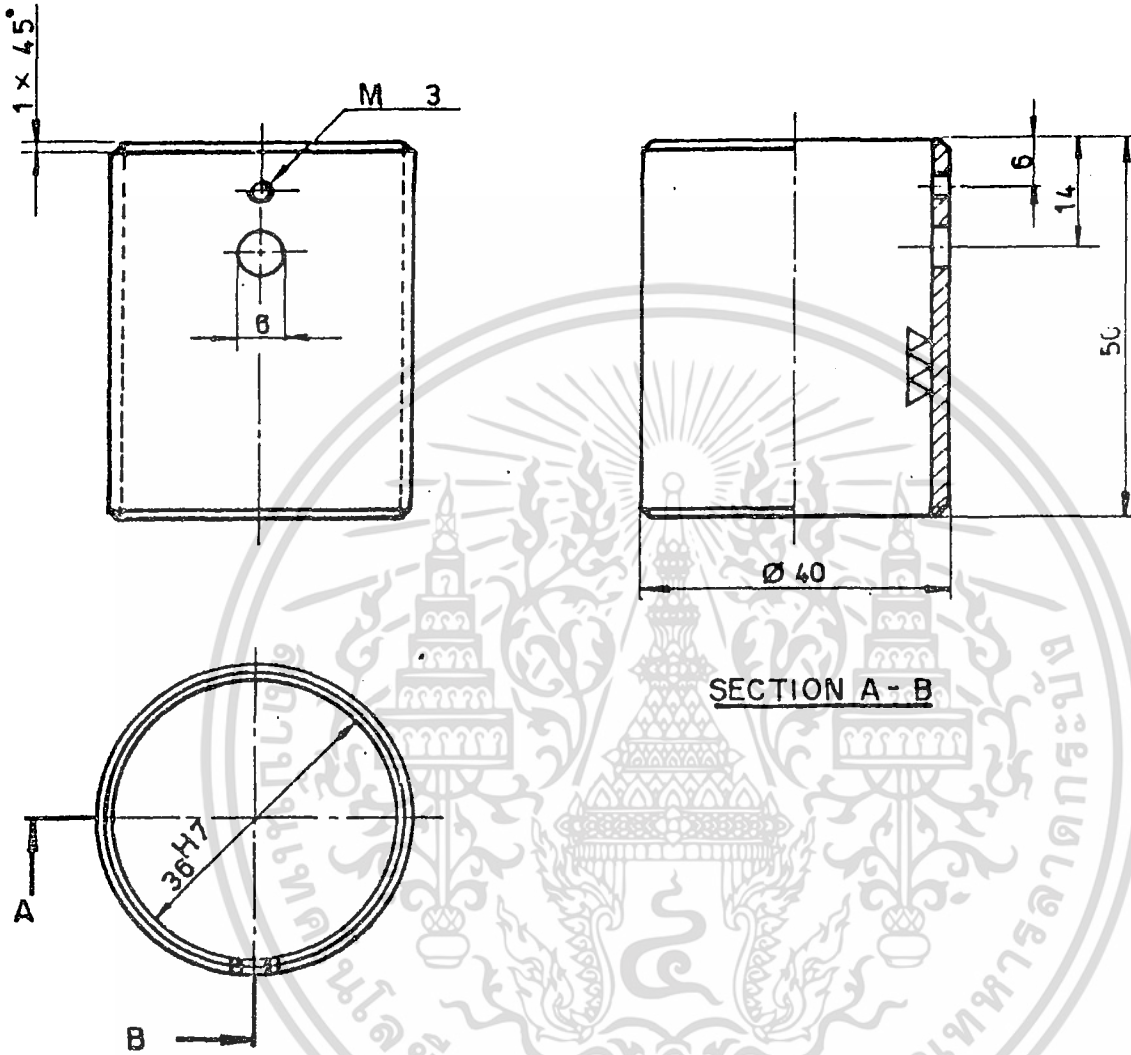
ไม่ว่าการผลิตชิ้นงานเป็นเอกสารหรือลงนามในใบสั่งงานเพื่อการผลิตโดยไม่ได้รับอนุญาตจากฝ่ายควบคุมคุณภาพ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



NOTE ± 0.25

12	ขนาดมดลย	37 x 118 x 10	ALUMINIUM	30-32-12	2
ชนิด	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน				คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	
ผู้ตรวจ					
ผู้ตรวจ ม.ศ.					
ผู้ออกแบบ					
มาตราส่วน 1 : 1	ชื่อชิ้นงาน	แขนส่งกำลังเลเซอร์		หมายเลขแบบ	

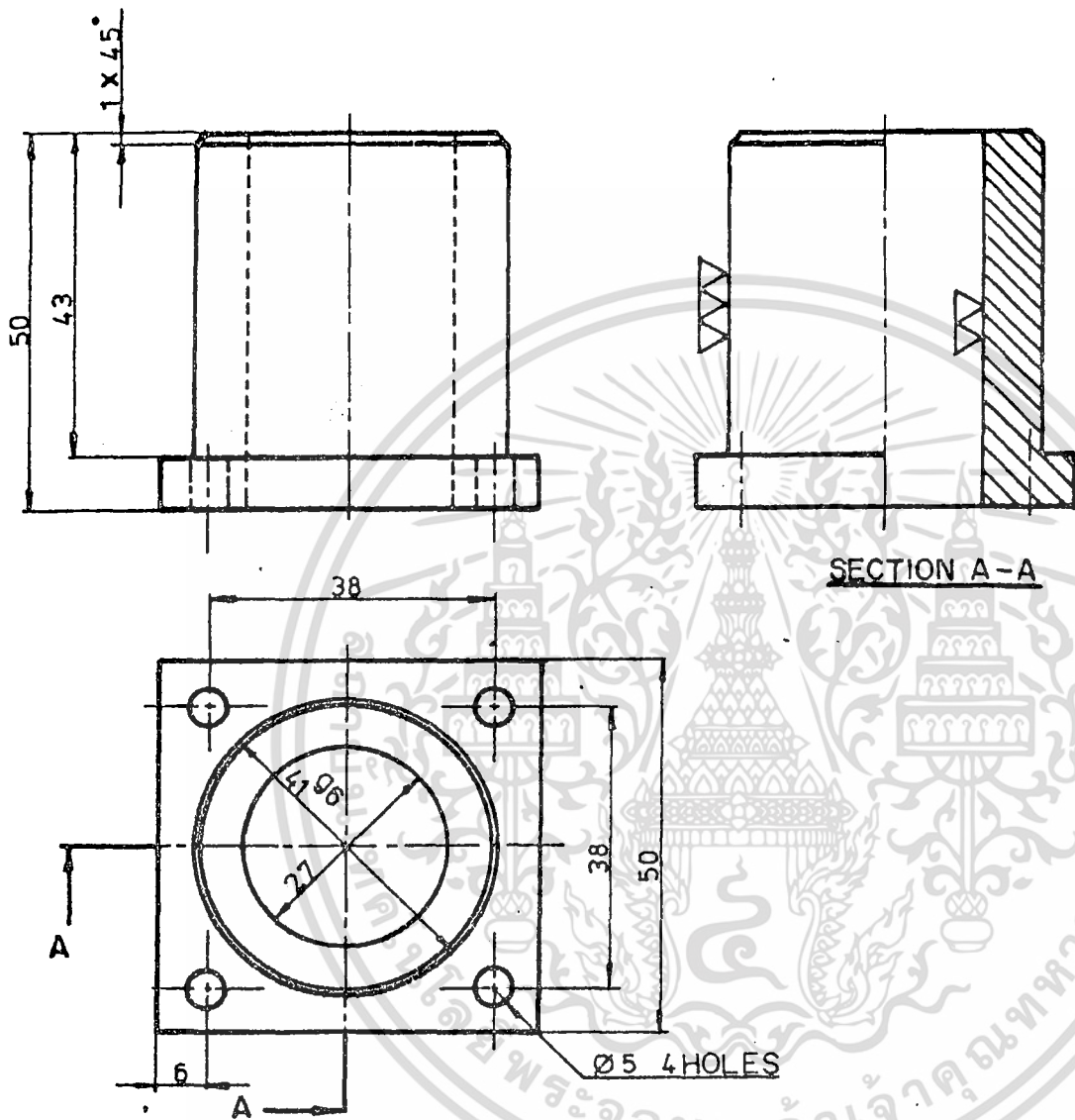
▽ (▽▽)



NOTE ± 0.25

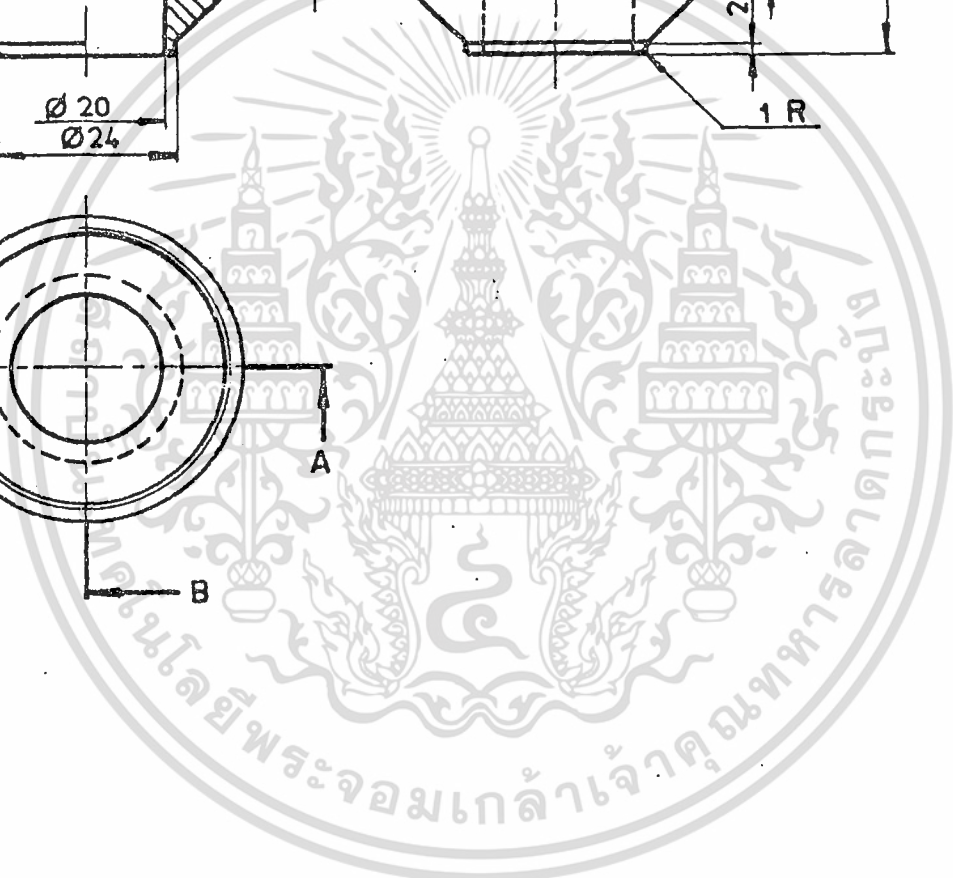
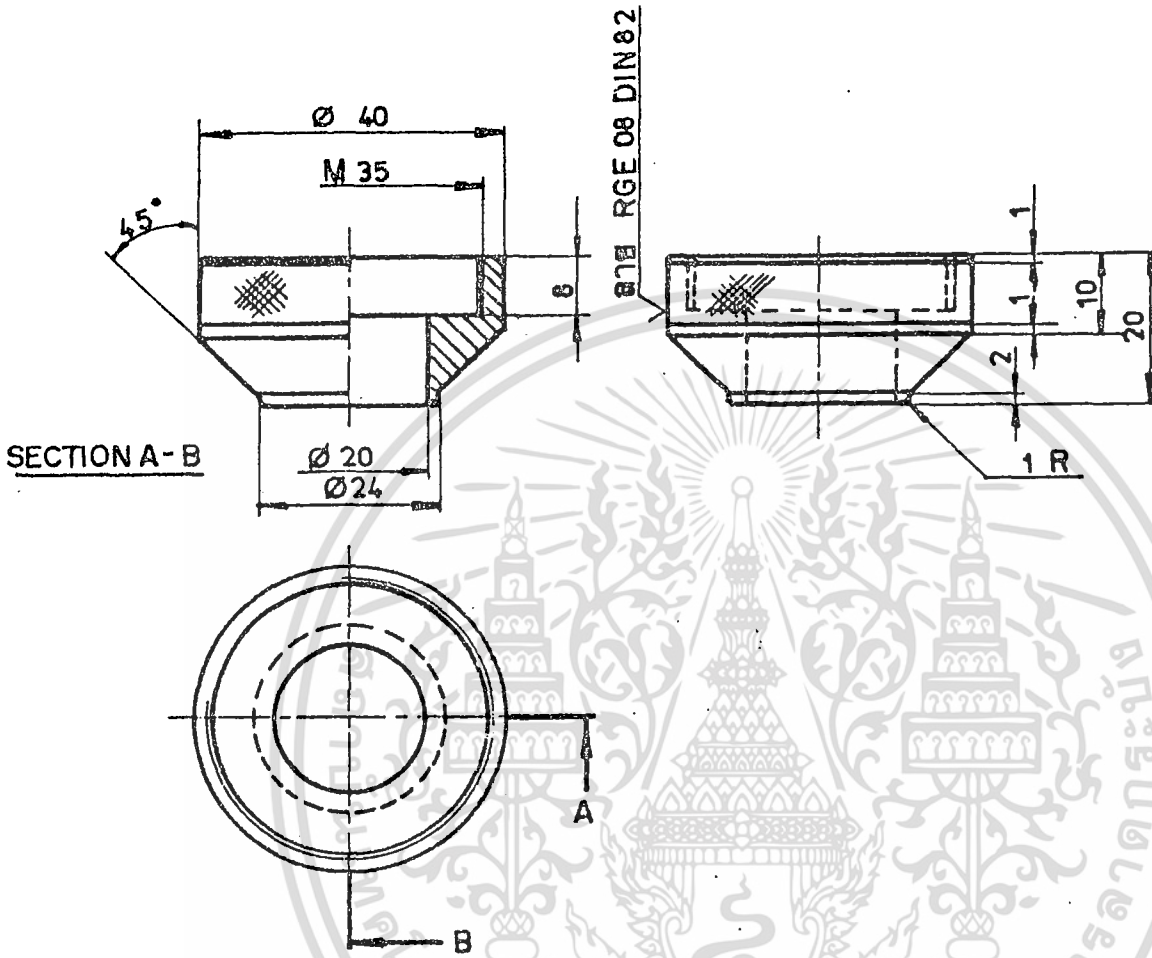
ปลอกบังคับ	∅ 45 x 55	BRASS	30 - 32 - 11	2
รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
น			คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	
จ				
จ ม.ช. แบบ				
จำนวน	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขแบบ		
1	แขนส่งกำลังเลเซอร์	ไม่ว่าจะกรณีใดๆก็ตาม ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้		

▽ (▽▽▽)



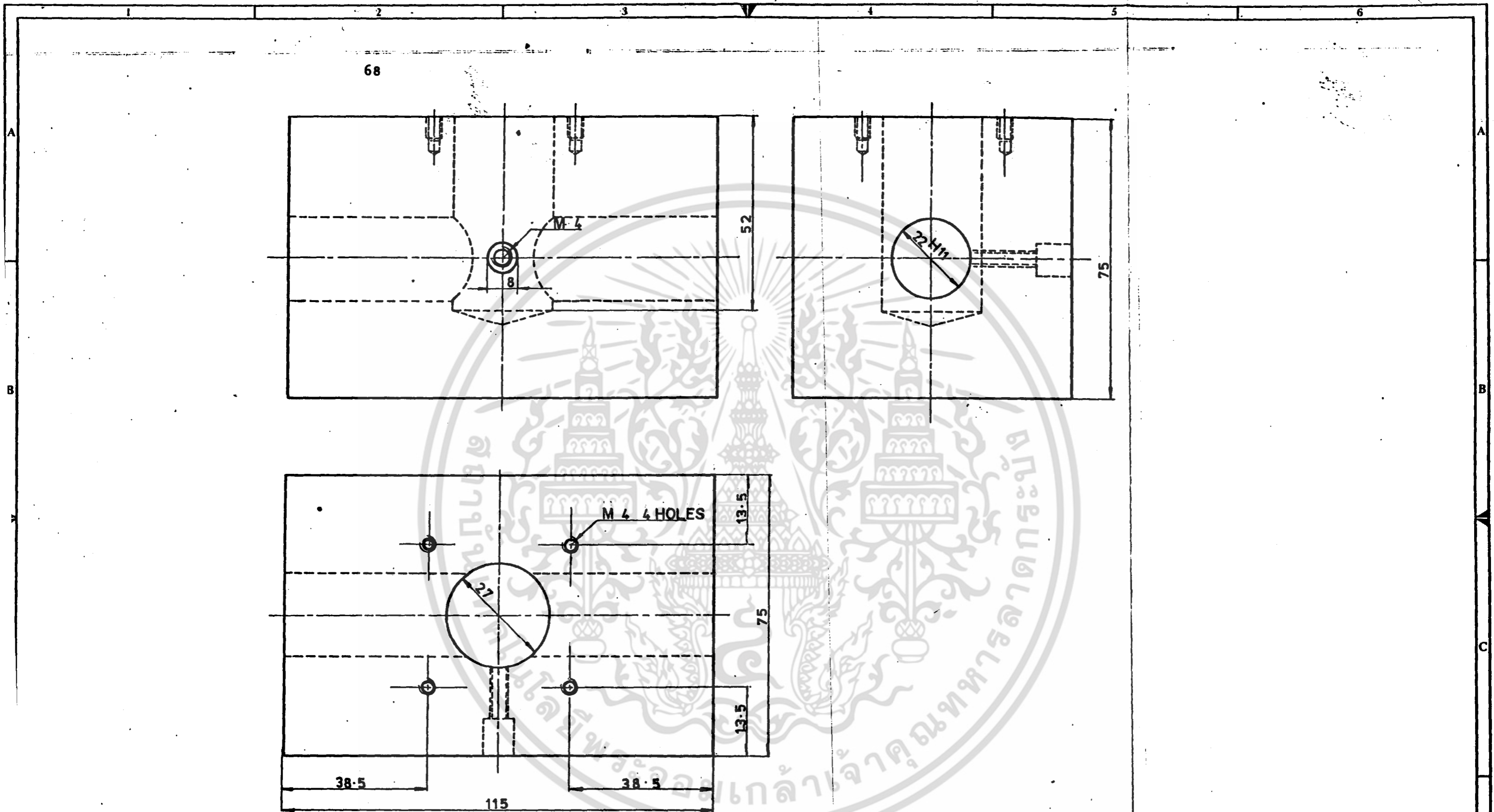
NOTE ± 0.25

แกนข้อต่อฐาน	□ 55 x 55	ส. 37	30 - 32 - 09	1
รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ม.ช.			คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	
บ.บ.				
ส่วน	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขแบบ		
ไม่ว่ากรณีใดๆที่ แชนส่งกำลังเลเซอร์				



NOTE ± 0.25

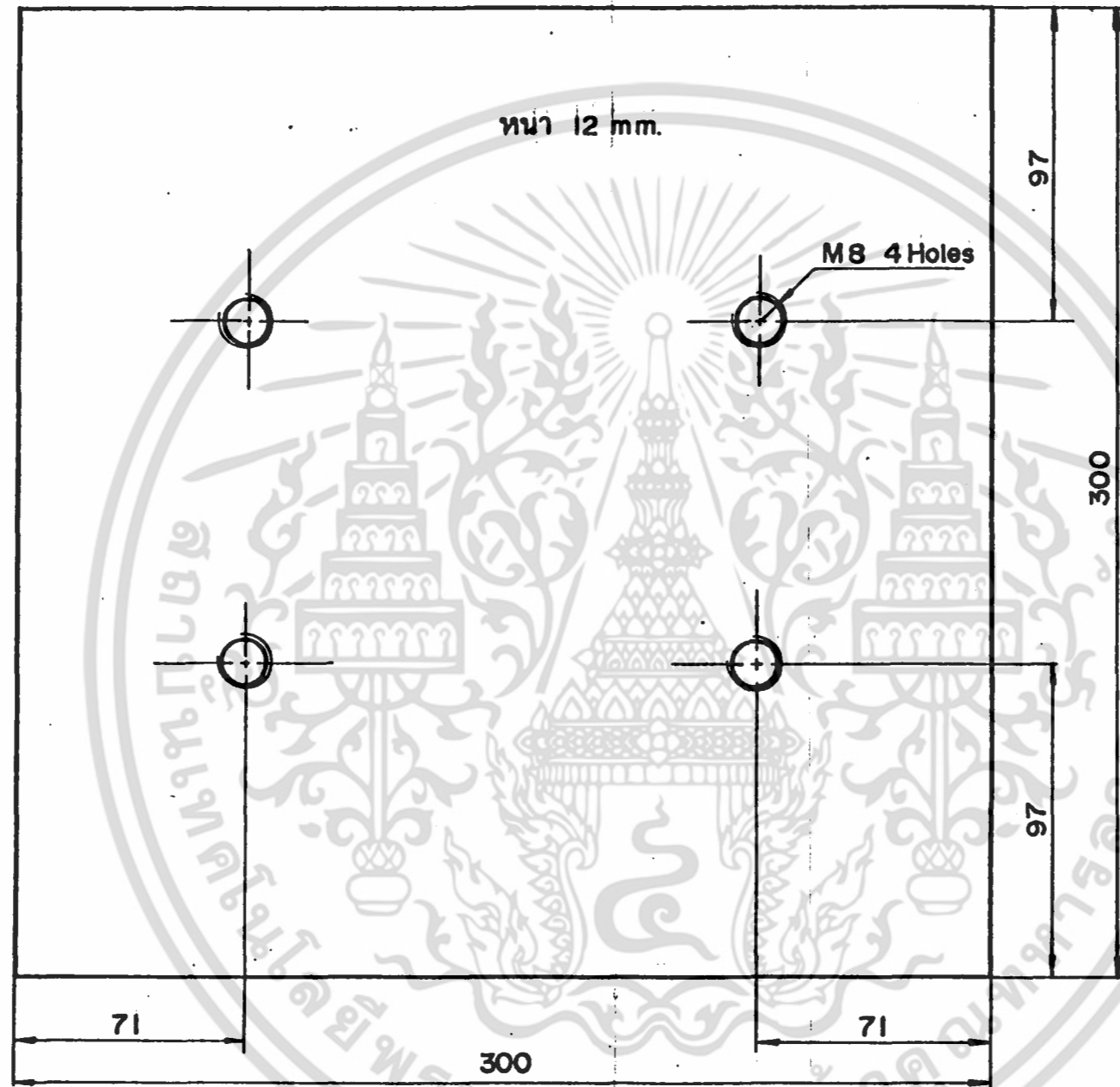
ฝาครอบเลนฉนวน	Ø 45 x 25	BRASS	30 - 32 - 25	1
รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ใน				
วจ				
ว 4 ม.ช.				
กแบบ				
จำนวน	ชื่อชิ้นงาน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง หมายเลขแบบ		
1	ไม่ทราบ แขนส่งกำลังเลเซอร์	ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้		



NOTE ± 0.25

7	ฐานรับแฉ่ง	80 x 80 x 120	ส. 37	30-32-07	1
ชนิดที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน				ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	
ผู้ตรวจ					
ผู้ตรวจ ม.ช.					
ผู้ออกแบบ					
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน	ชื่อโรงงาน		หมายเลขแบบ	
หมายเหตุ: เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ ไปอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่			แชนส์ก้าลิงเลเซอร์		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อไปอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่

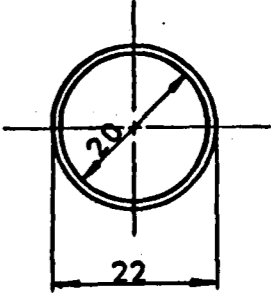
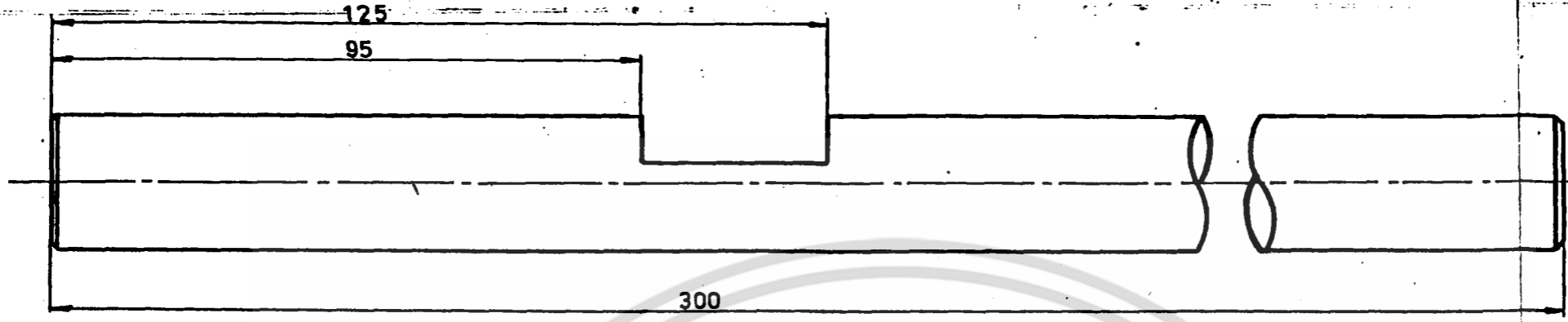


NOTE ± 0.5

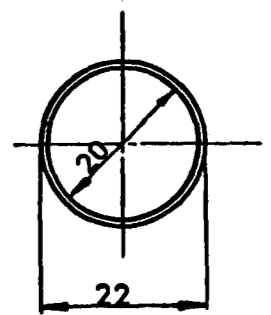
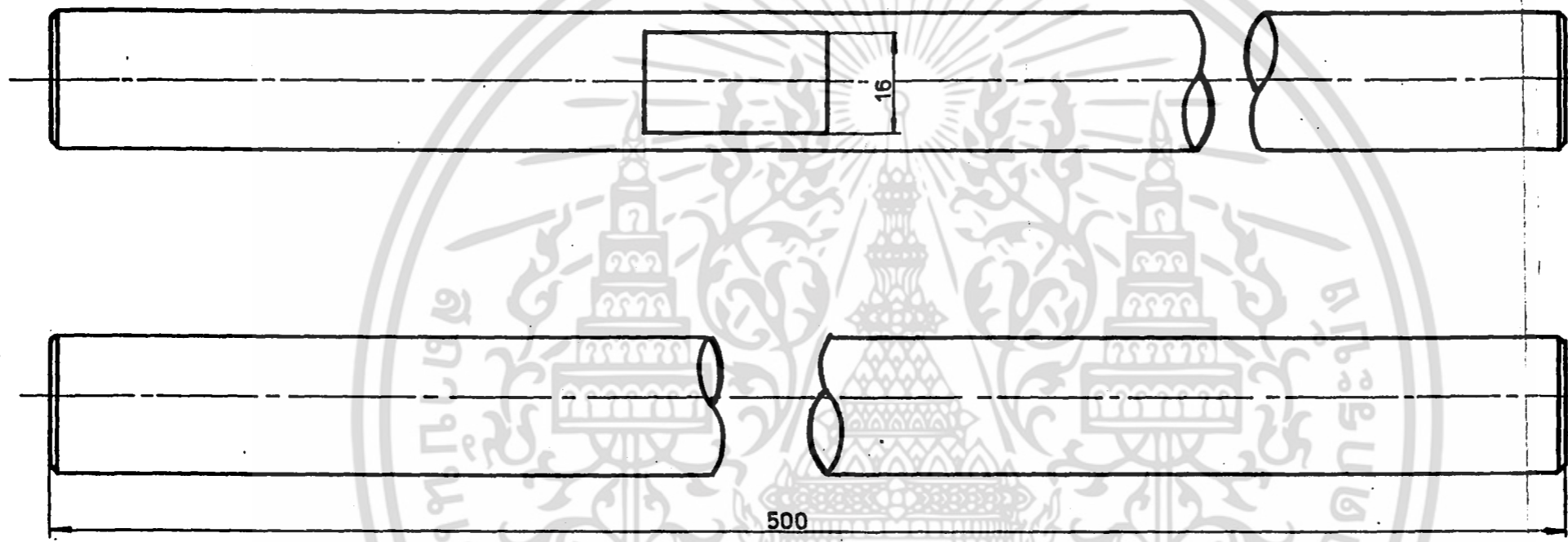
งาน	1.5 x 305 x 305	St. 37	30 - 32 - 01	1
ชนิด	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ
เขียน				คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ตรวจ				
ตรวจ ผ.ศ.				
ออกแบบ				
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขแบบ		
1 : 2	ชื่อย่อโครงการ			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องสงวนลิขสิทธิ์ของเอกสารทุกครั้งที่มีทำเนาไปใช้

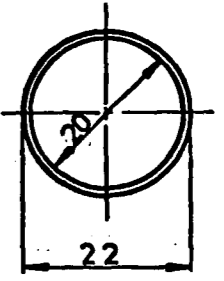
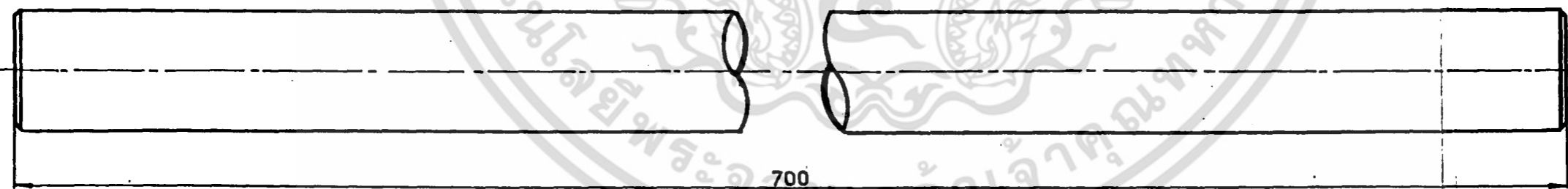
5



15



13



NOTE ๕: ๐-5

15	ท่อ	∅ 22 x 500	STAINLESS	30 - 32 - 15	2
13	ท่อ	∅ 22 x 700	STAINLESS	30 - 32 - 13	1
5	ท่อ	∅ 22 x 300	STAINLESS	30 - 32 - 5	1
ชั้นที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน

ผู้เขียน		ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ผู้ตรวจ		
ผู้ตรวจ ม.ร.		
ผู้ออกแบบ		
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน	หมายเหตุแบบ ไชน่ส่งกำลังเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา
 ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวกที่ 2
แบบแสดงแผนผังกำลังเลเซอร์ที่ประกอบแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวกที่ 3
 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติของกระจกแต่ละชนิดกับความยาวคลื่นต่าง ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Percent Reflectance of Freshly Evaporated Mirror
Coatings (Normal-Incidence)

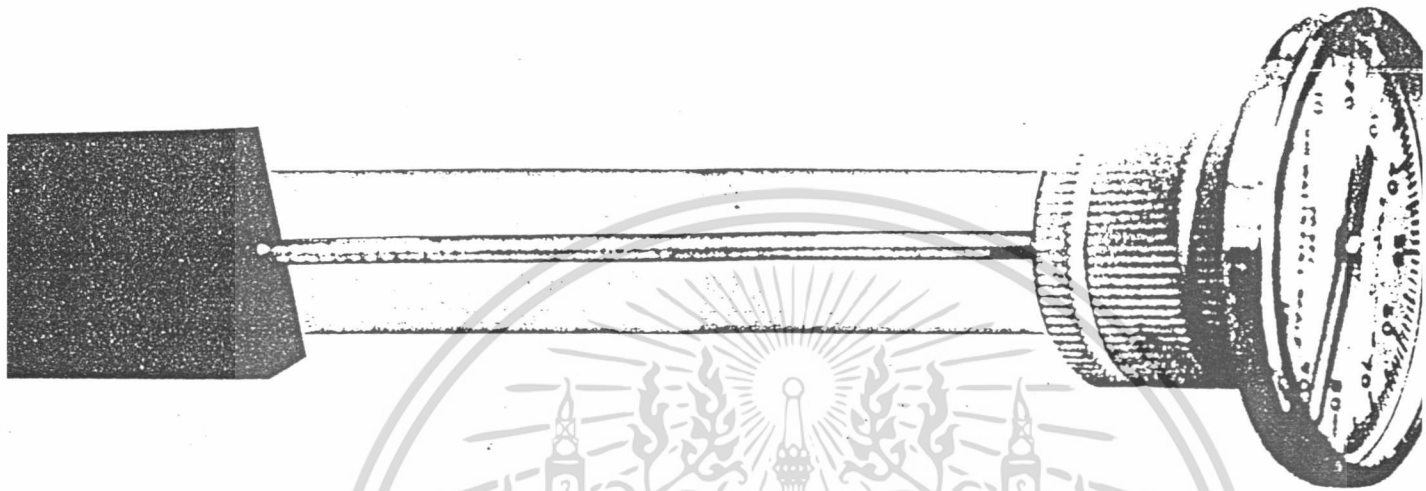
$\lambda(\mu\text{m})$	Al	Ag	Au	Cu	Rh
0.220	91.5	28.0	27.5	40.4	57.8
0.240	91.9	29.5	31.6	39.0	63.2
0.260	92.2	29.2	35.6	35.5	67.7
0.280	92.3	25.2	37.8	33.0	70.7
0.300	92.3	17.6	37.7	33.6	73.4
0.315	92.4	5.5	37.3	35.5	75.0
0.320	92.4	8.9	37.1	36.3	75.5
0.340	92.5	72.9	36.1	38.5	76.9
0.360	92.5	88.2	36.3	41.5	78.0
0.380	92.5	92.8	37.8	44.5	78.1
0.400	92.4	95.6	38.7	47.5	77.4
0.450	92.2	97.1	38.7	55.2	76.0
0.500	91.8	97.9	47.7	60.0	76.6
0.550	91.5	98.3	81.7	66.9	78.2
0.600	91.1	98.6	91.9	93.3	79.7
0.650	90.5	98.8	95.5	96.6	81.1
0.700	89.7	98.9	97.0	97.5	82.0
0.750	88.6	99.1	97.4	97.9	82.6
0.800	86.7	99.2	98.0	98.1	83.1
0.850	86.7	99.2	98.2	98.3	83.4
0.900	89.1	99.3	98.4	98.4	83.6
0.950	92.4	99.3	98.5	98.4	83.9
1.0	94.0	99.4	98.6	98.5	84.2
1.5	97.4	99.4	99.0	98.5	87.7
2.0	97.8	99.4	99.1	98.6	91.4
3.0	98.0	99.4	99.3	98.6	95.0
4.0	98.2	99.4	99.4	98.7	95.8
5.0	98.4	99.5	99.4	98.7	96.4
6.0	98.5	99.5	99.4	98.7	96.8
7.0	98.6	99.5	99.4	98.7	97.0
8.0	98.7	99.5	99.4	98.8	97.2
9.0	98.7	99.5	99.4	98.8	97.4
10.0	98.7	99.5	99.4	98.9	97.6
15.0	98.9	99.6	99.4	99.0	98.1
20.0	99.0	99.6	99.4		
30.0	99.2	99.6	99.4		

ตารางในภาคผนวกนี้ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของกระจก กับ กระจกชนิดต่าง ๆ เช่นที่ความยาวคลื่น 10.0 ไมโครเมตร กระจกที่เป็นเงินสามารถสะท้อนแสง ได้ถึง 99.5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Opt. Eng.

Optical Engineering A Division of Lasercraft Inc.



er power measurements should be quick and easy. / should not involve time consuming set-up and align- t problems. Ideally, the measurements should also be to be made at any point in an optical system where es are likely to occur.

ortunately, most laser power meters have sacrificed e of use to gain continuous power readings. However, ost laboratory and production situations, the usual re- ement is for a quick spot check of power with a mum of disruption. Even when tuning up a laser, archers have found that it is best to tune for a rable mode pattern using Thermal Image Plates*, then ily check the laser power.

Power Probes are calorimeter-type power meters h measure laser power using a timed exposure. They lay average power absorbed on a calibrated readout e, and can be used with continuous or repetitively ed lasers ranging from small 2 watt YAG lasers to e 10,000 watt CO₂ lasers.

Thermal Image Plates and Beam Probes are viewing devices for CO₂, CO, HF, and YAG. Data sheets are available from Optical Engineering.

Key Features

The absorbing head of a Power Probe is conveniently sized. Therefore, unlike a bulky conventional meter, it can be inserted between optical components to measure the laser power without disturbing a set-up, or it can be used to measure the transmission losses of optics.

The hand-held meter requires only about 1/2 minute to take a power measurement.

The absorbent coating is very tough, resisting mechanical abrasion and water immersion.

A zero adjustment mechanism has been incorporated in the design to expedite and simplify the power measurement process.

The accurate and durable all-metal construction has been used to insure a long life.

Taking Measurements

Each Power Probe is a self-contained unit consisting of an absorbing head, a temperature measuring mechanism, a zeroing knob and a readout dial. In operation, the dial is zeroed then the absorbing head on the end of the Power Probe is exposed to the laser beam for a specified time interval. After the Power Probe has been removed from the laser beam, the average laser power can be read out on the dial. The process takes about 1/2 minute. If it is necessary to make several power measurements in succession, the absorbing head can be rapidly cooled by immersing in a beaker of water. This permits successive power measurements to be made at about one-minute intervals.

The Laser Power Probes have proven to be so popular that Optical Engineering now offers 14 models. The models include 8 different power ranges and 2 different absorbing coatings. The "Y" series Power Probes have a broad spectral absorption coating which can be used from .4 to 11 μ. This coating has a damage threshold of 2000 w/cm². These Power Probes are designed for use with YAG or CO₂ lasers. The "C" series Power Probe can only be used with CO₂ laser wavelengths. The "C" series is recommended for use with CO₂ lasers because the coating generally has a higher damage limit than the "Y" series. However, this difference shows up primarily in being able to better tolerate hot spots which exceed the quoted 2000 w/cm² damage limit.

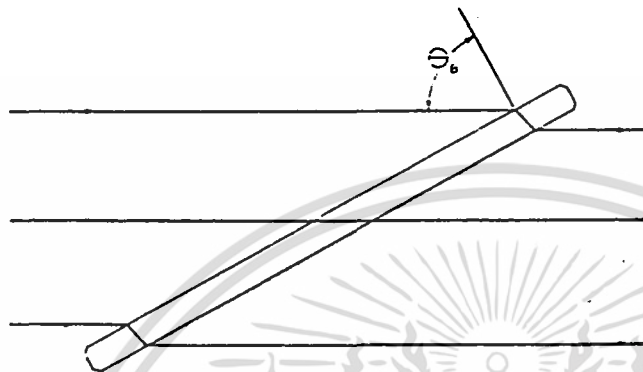
การบริการที่เป็นเลิศของเราที่ส่งมอบไว้ด้วยบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RECTANGULAR WINDOWS

These rectangular, uncoated windows are primarily used to control the polarization of a laser by relying on the fact that P-Polarization responds differently to the same inclined surface. (Polarization is discussed under Beam-splitters). A polarized beam striking at Brewster's Angle (θ_b) is fully transmitted while any S-Polarized energy is reflected strongly. The major optical characteristic to be controlled is the parallelism of the surfaces. The part

efficiency increases as the angle between the surfaces decreases. Again, if needed, the standard ≤ 3 arc minutes tolerance can be tightened to arc seconds.

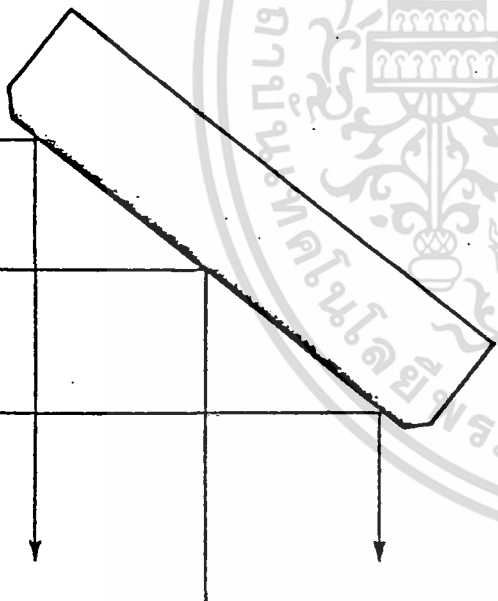
In general, small variations in the wavelength of operation or in the angle at which the beam strikes the part do not significantly change the performance of these windows. This is due to the high index of these materials which varies only slightly over large useful wavelength ranges.



MIRRORS

A mirror or total reflector is employed when the user wishes to reflect all of the incident light. Since no energy is transmitted through these parts, the substrates for mirrors are selected for their thermal conductivity. These optics are specified like output couplers with two differences; the back surface is fine ground (FG), and the parallelism is ≤ 3 arc minutes.

Several coatings for the reflective surface are available. Because silver is one of the highest reflecting metals in the infrared ($\geq 98.9\%$) it is our primary choice over gold ($\geq 98.0\%$). With our Protected Silver (PS) Coating a very thin dielectric overcoat protects the silver from tarnishing and increases the coating durability. As a rule this type of mirror is used in applications external to a laser cavity. If the mirror is to be used inside a laser cavity, the mirror reflectivity can be improved by .5% to $\geq 99.4\%$ by using a dielectrically Enhanced Silver (ES) Coating. This coating has multiple dielectric layers on top of the silver layer which not only protect the silver but boost the reflectivity at the laser wavelength. If the enhanced coating is used on a beam bender the user must state the wavelength, angle of incidence and polarization when ordering. Silicon always requires a reflective coating. Copper and Molybdenum are used coated or uncoated depending on the application.



Chemical vapor deposited ZnSe is an infrared material that transmits from .5 microns in the visible to 22 microns in the infrared.

Due to its low absorptivity at several laser wavelengths (as low as .0005 cm⁻¹ at 10.6 microns) ZnSe is excellent in many systems for lenses, windows, output couplers and splitters. For high power applications, it is critical that material bulk absorption and internal defect structure be carefully controlled, that minimum-damage polishing technology be employed in fabricating the optics, and that the highest quality optical thinfilm coatings optimized to the type of application be utilized. II-VI employs a CO₂ laser vacuum calorimeter capable of resolving fractional percent into the 10⁻⁵ range to monitor its production process and to constantly improve finished product performance. Our Quality Assurance department will provide testing and certification of specific optics.

Because of its broad transmission range and specifically its low absorption and scatter in the 8 to 14 micron region, ZnSe is a standard material for use in FLIR and other infrared instrument or imaging systems. II-VI offers a large selection of AR, reflective and beamsplitter coatings which can be tailored to specific application needs. Several representative examples follow in this catalog.

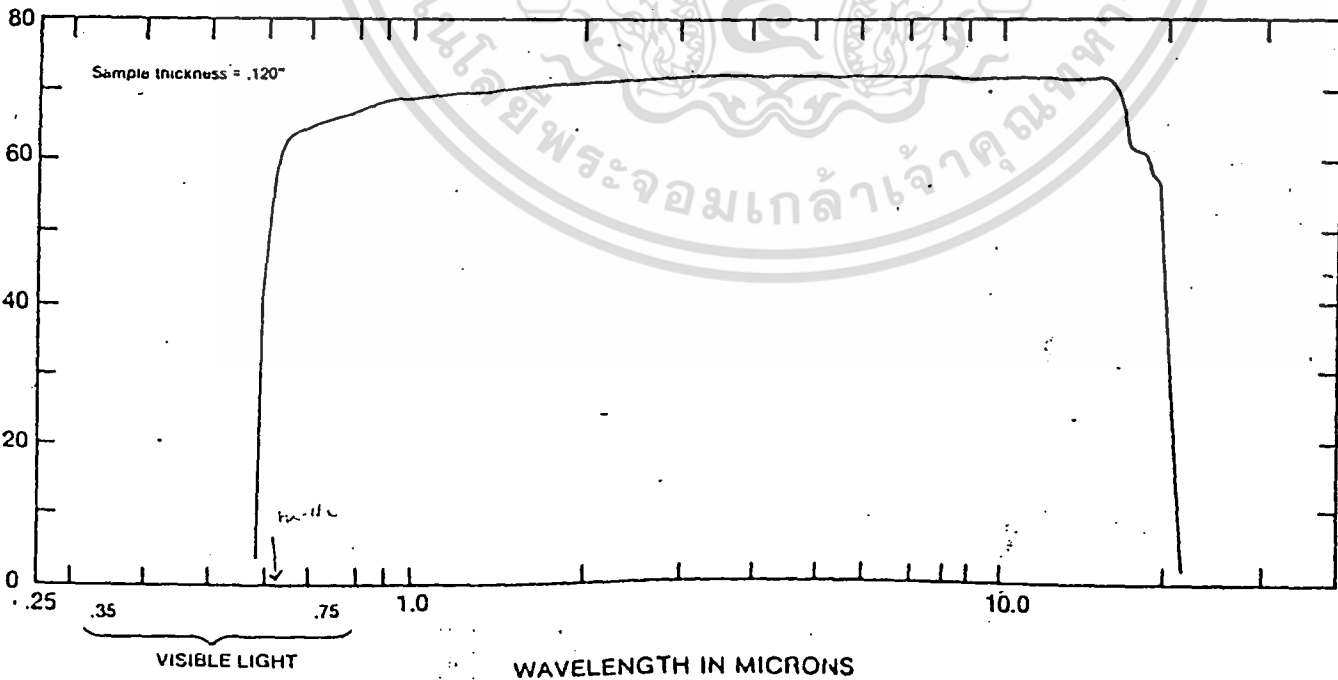
ZnSe optics are routinely polished at diameters of 10 to 15 cm, and sizes in excess of 30 cm diameter and 2.5 cm thick have been manufactured to customer requirements.

ZnSe is non-hygroscopic, chemically stable unless treated with strong acids, and safe to use in industrial and field applications as well as in laboratory environments.

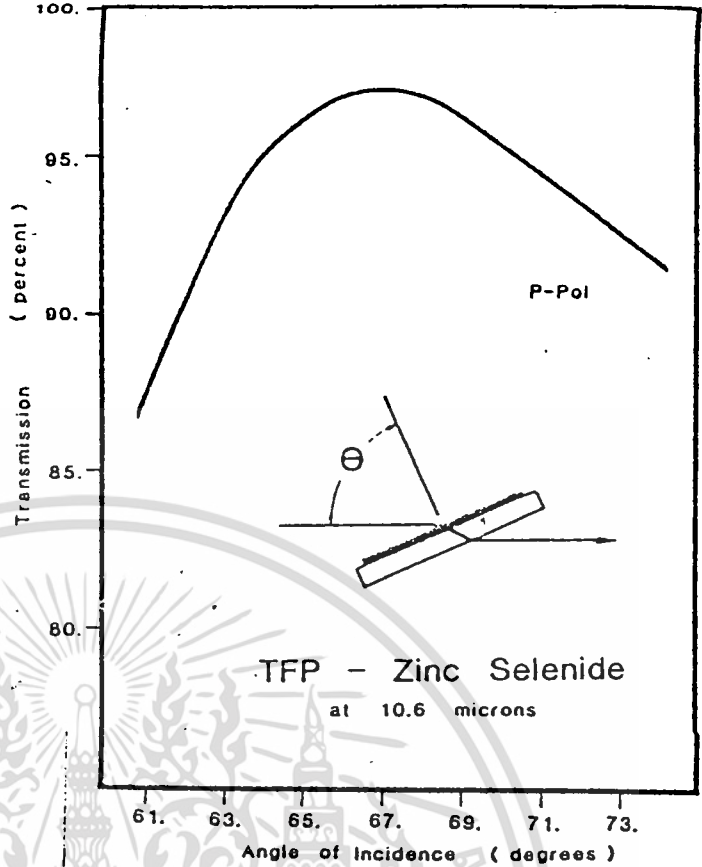
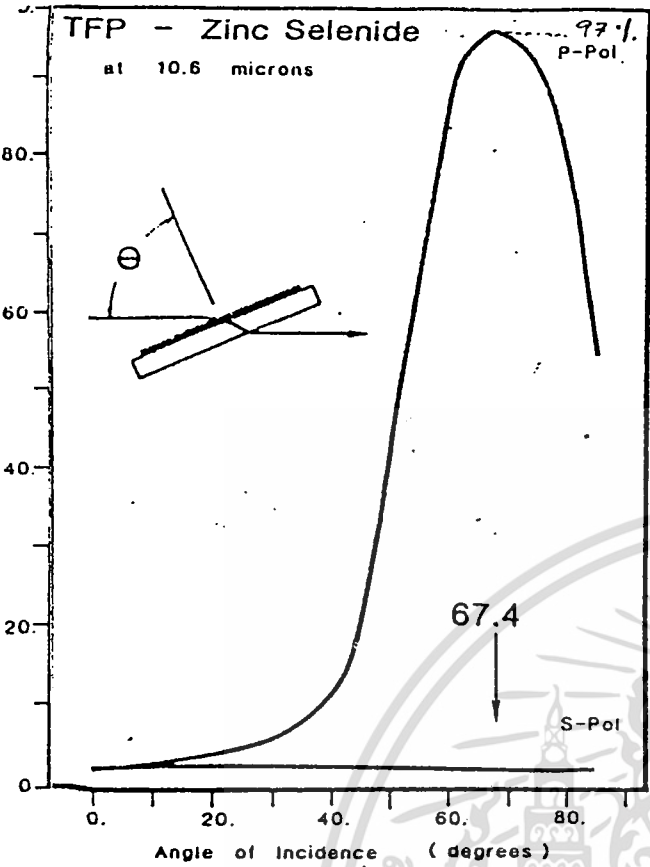
MATERIAL PROPERTIES

Bulk Absorptivity (cm ⁻¹ @ 10.6 μm)	≤ .0015	Temperature Change of Refractive Index (10 ⁻⁶ /C°)	64.
Thermal Conductivity (W/cm-C°)	.18	Refractive Index @ 10.6 μm	2.40
Thermal Expansion Coefficient (10 ⁻⁶ /C°)	7.6	Hardness (Knoop)	130.
		Rupture Modulus (psi)	8000.

TRANSMISSION OF UNCOATED ZnSe

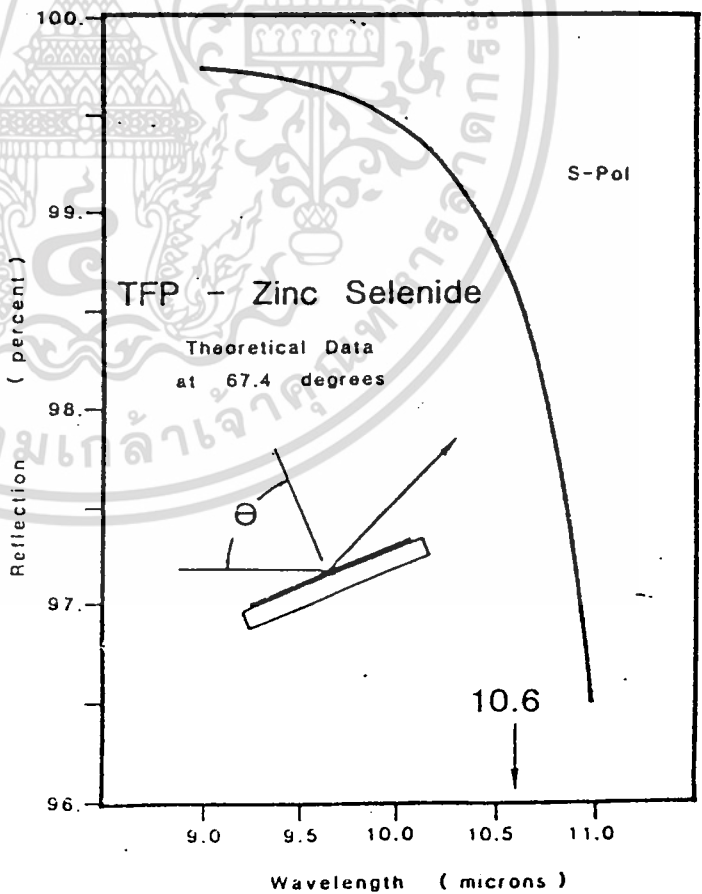
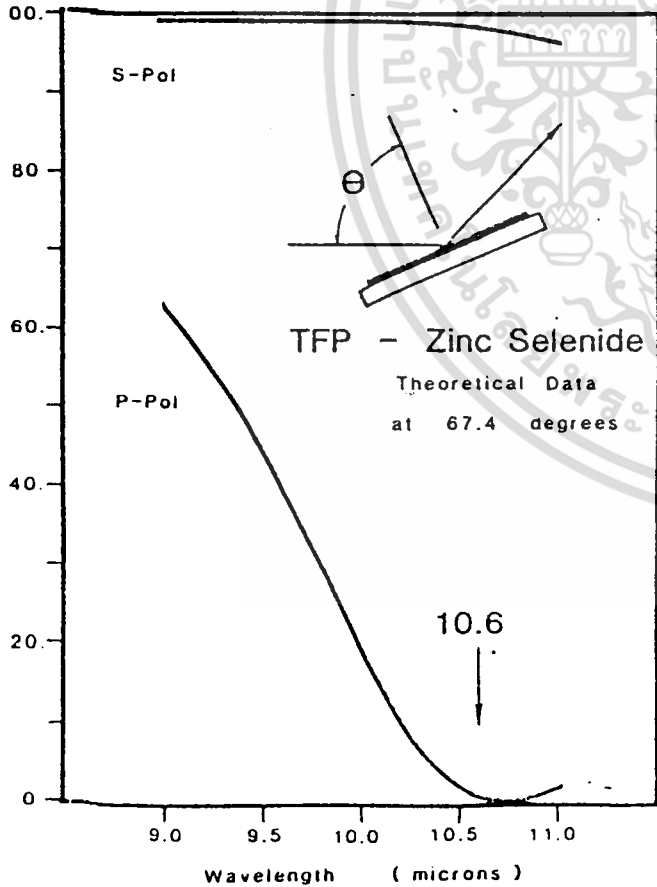


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

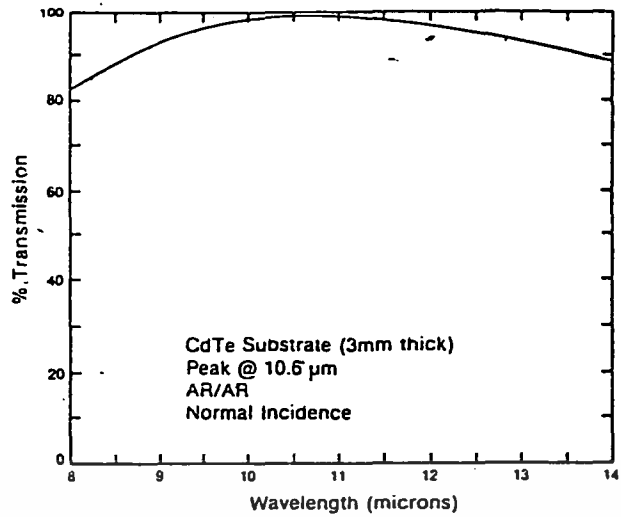
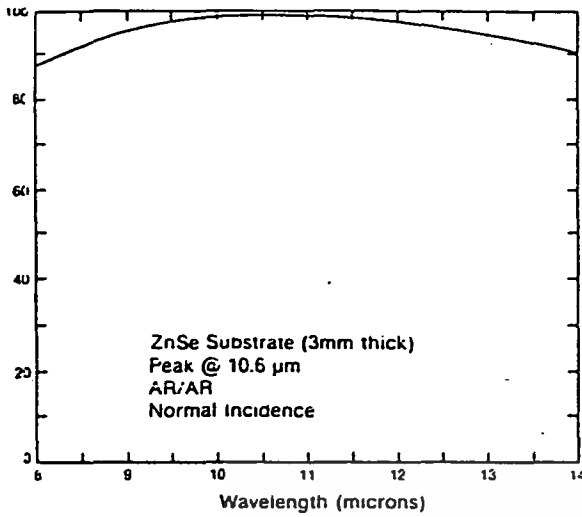


Graph 7

Graph 8

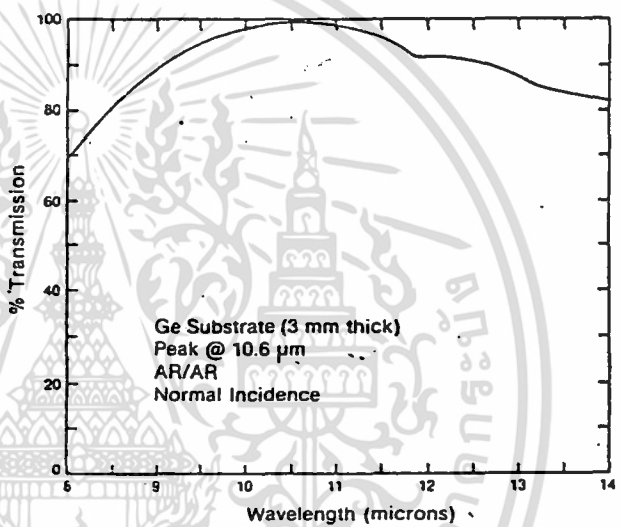
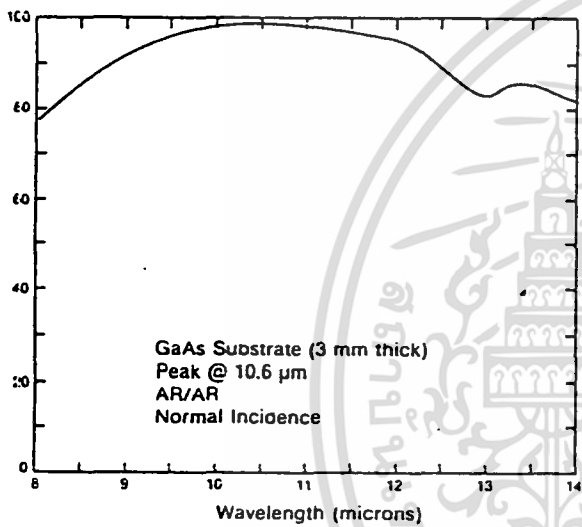


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



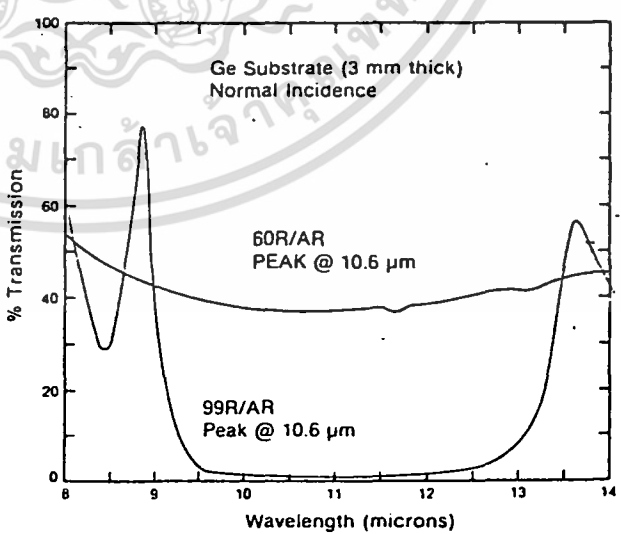
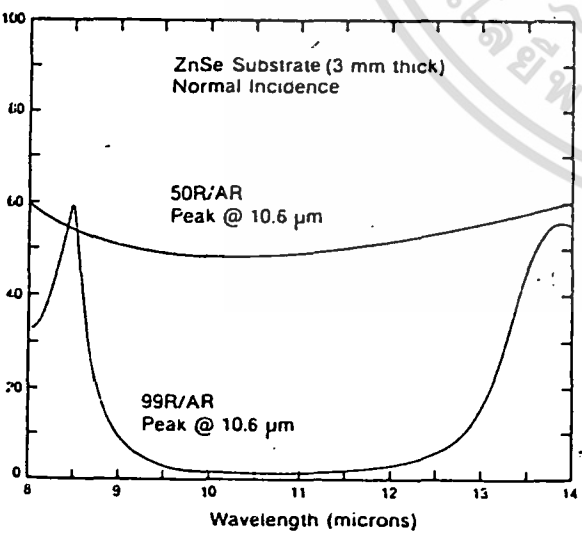
GRAPH 1: ZnSe AR coating at 10.6 microns.

GRAPH 2: CdTe AR coating at 10.6 microns.



GRAPH 3: GaAs AR coating at 10.6 microns.

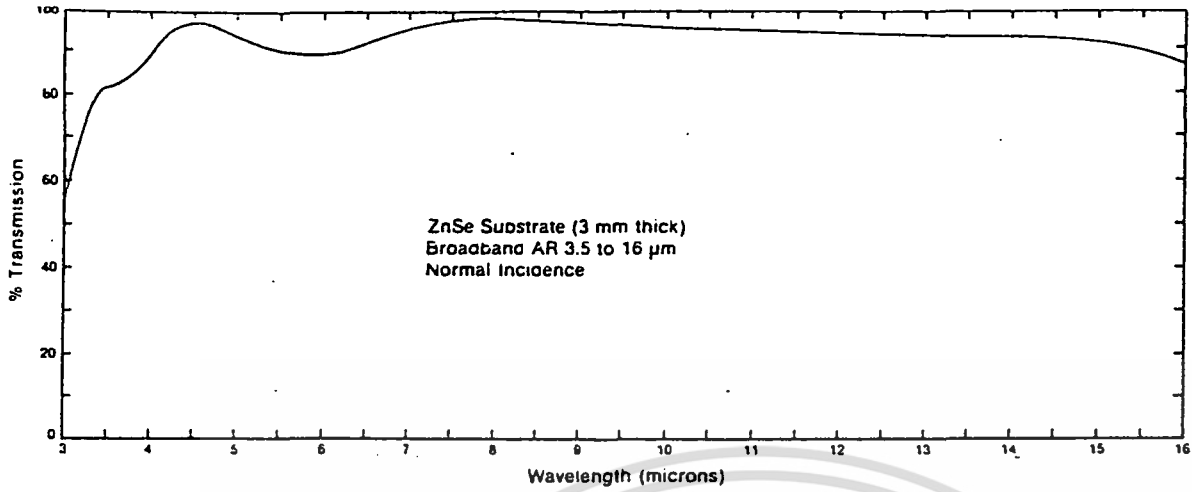
GRAPH 4: Ge AR coating at 10.6 microns.



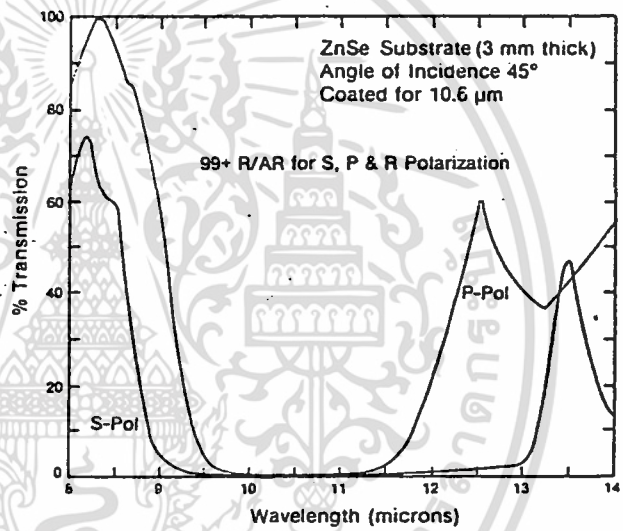
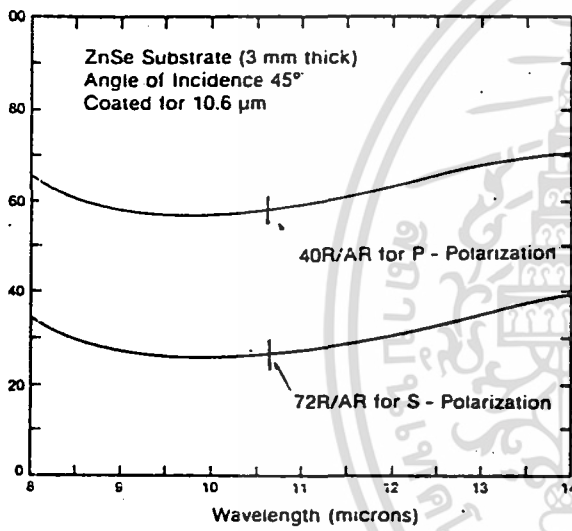
GRAPH 5: Typical ZnSe PR coatings at 10.6 microns.

GRAPH 6: Typical Ge PR coatings at 10.6 microns.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

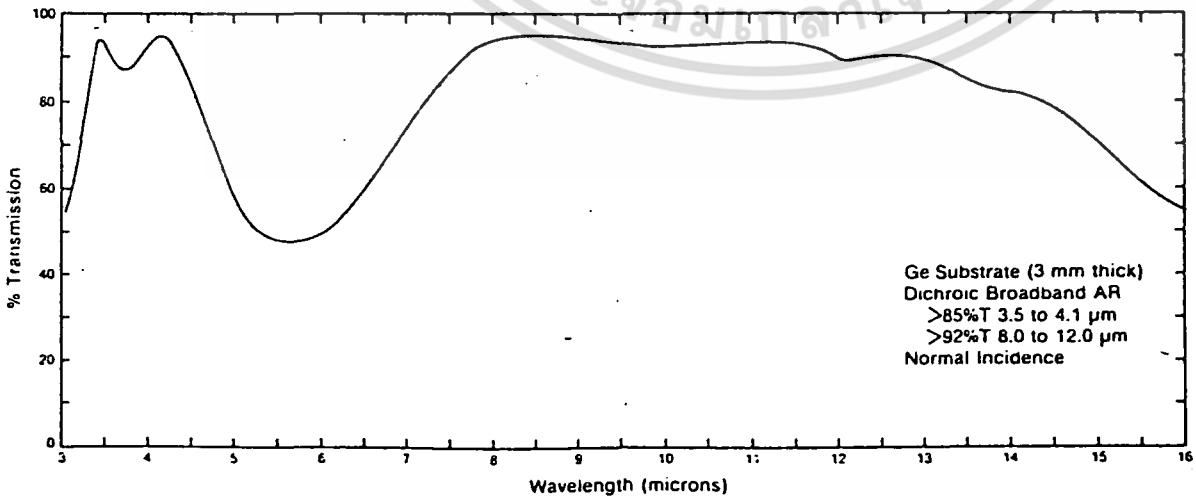


GRAPH 7: Spectrophotometric Broadband AR for ZnSe.



GRAPH 8: ZnSe 40 percent P-Pol Beamsplitter for 45 degrees at 10.6 microns.

GRAPH 9: ZnSe 99 percent Beamsplitter for P- and S-Pol at 45 degrees and 10.6 microns.



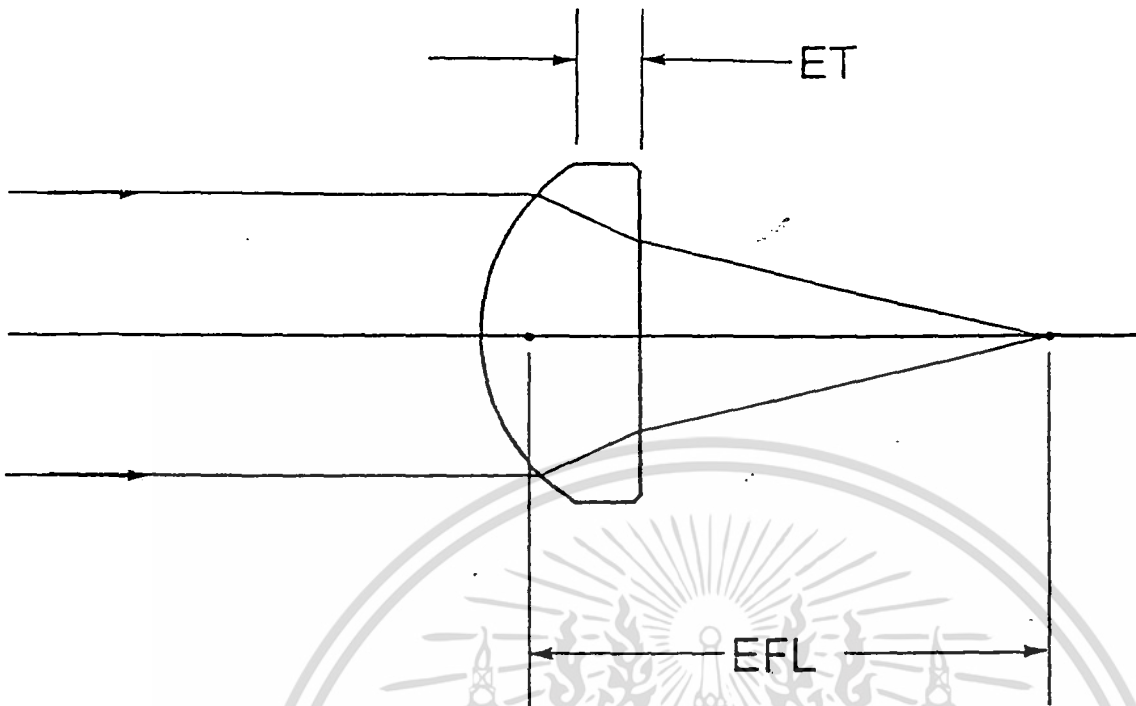
เอกสารนี้ GRAPH 10: Instrument-grade Dichroic Broadband AR for Ge. กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวกที่ 6
รายละเอียดของ Lens ที่ใช้ Cadmium Telluride



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Plano convex lenses are the most economical focusing lens type available. They are ideally suited for laser heating, welding, cutting and infrared radiation collection where spot size and spherical aberrations are not critical. They are the economical choice where the lens design is limited. See the Optics Guide section for further information on plano convex lenses.

Specifications are listed only for stock plano convex lenses in standard focal lengths. II-VI maintains an extensive inventory of test plates and tooling that enables fabrication

of many non-standard focal lengths. In addition to cylinder lenses, page 24 depicts some of the other types of lenses available. Our Sales Department will be pleased to provide quotations for your specific requirements.

Listed below are the optical specifications for standard stock optics. *You may specify tighter requirements to the limit of those listed in the far right column below, which are state-of-the-art specifications for crystalline infrared materials.

SPECIFICATIONS

STANDARD

AVAILABLE*

(at add'l cost)

Effective Focal Length (EFL) tolerance	± 2%	Inquire
Surface Figure Irregularity @ .63 μm	1 fringe	Inquire
Clear Aperture	90%	100%
Surface Quality: Scratch-Dig	20-10	5-2
Edge Thickness Variation (ETV)	≤ .002"	≤ .0001"
Dimensional tolerances		
Diameter	+ .000" - .005"	+ .000" - .001"
Thickness	± .010"	± .0005"
AR Coating Reflectivity @ 10.6 μm per surface	≤ 0.5%	≤ 0.1%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CADMIUM TELLURIDE

CdTe

Cadmium telluride has an infrared transmission range which extends from one micron in the near IR to greater than 25 microns in the mid-IR. The absorptivity of II-VI electrooptic CdTe at 10.6 microns is low at $< 0.02 \text{ cm}^{-1}$, however, due to its thermal conductivity (approximately a third that of Si) CdTe is limited to use in CO₂ laser systems with CW power levels up to a few hundred watts.

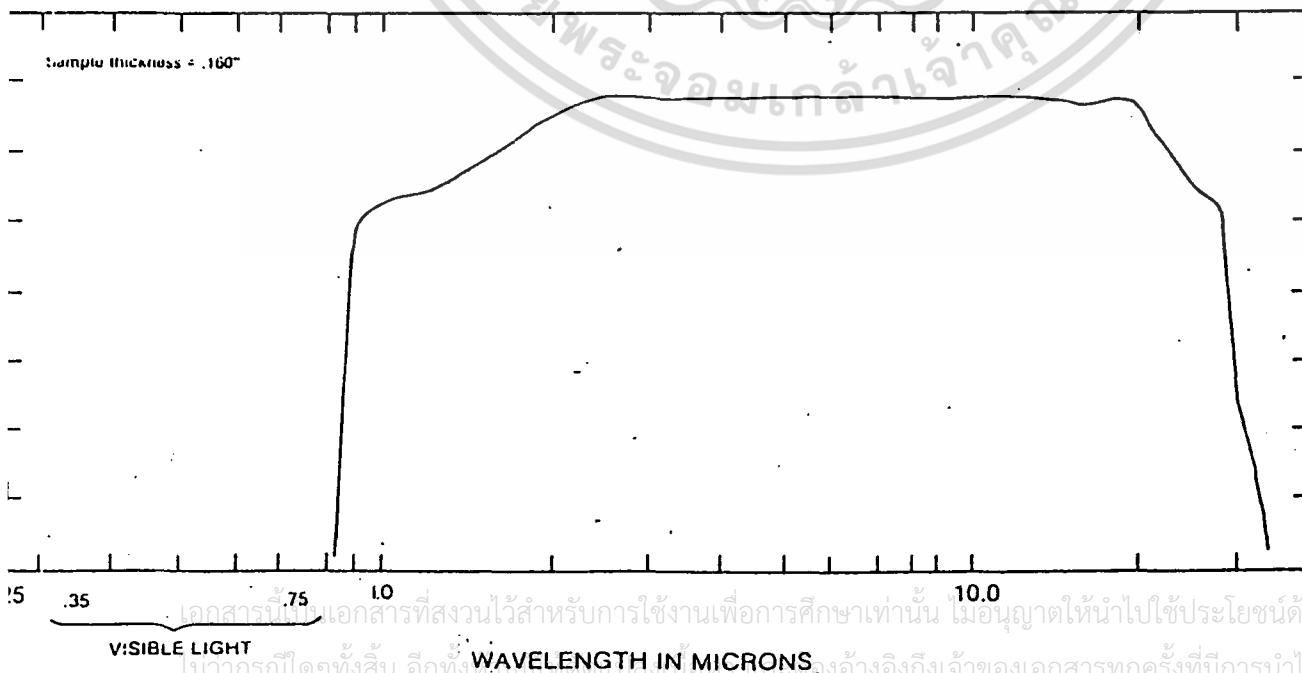
CdTe is used successfully as an output coupler in some commercial CO₂ lasers.

CdTe is an ideal choice for filter substrates in the 12 to 25 micron region where many materials have lowered and variable transmission due to the presence of absorption bands.

MATERIAL PROPERTIES

Bulk Absorptivity (cm^{-1} @ 10.6 μm)	≤ 0.018	Temperature Change of Refractive Index ($10^{-6}/\text{C}^\circ$)	107.
Thermal Conductivity ($\text{W}/\text{cm}\cdot\text{C}^\circ$)	0.06	Refractive Index @ 10.6 μm	2.67
Thermal Expansion Coefficient ($10^{-6}/\text{C}^\circ$)	5.9	Hardness (Knoop)	45.
		Rupture Modulus (psi)	3200.

TRANSMISSION OF UNCOATED CdTe



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้