

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์

Mathematical model of laser drilling



ปริญญาโท เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์

A MATHEMATICAL MODEL OF LASER DRILLING



นายพงศ์ศักดิ์ เขตขยัน  
นางสาวภิญทิลา พรโชคธนเสถียร  
นายองอาจ อมรรัตนานุภาพ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A MATHEMATICAL MODEL OF LASER DRILLING



PONGSAK KETKHAYAN  
PHANTILA PORNCHOKTANASATIEN  
ONGART AMONRATTANANUPHAB

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
2012  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2555  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์  
A MATHEMATICAL MODEL OF LASER DRILLING

ผู้จัดทำ

- |                    |               |              |          |
|--------------------|---------------|--------------|----------|
| 1. นาย พงศ์ศักดิ์  | เขตชัยน       | รหัสประจำตัว | 52010742 |
| 2. นางสาว ภัณชิตลา | พรโชคชนเสถียร | รหัสประจำตัว | 52010890 |
| 3. นาย อองอาจ      | อมรรัตนาภาพ   | รหัสประจำตัว | 52011365 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.มธุรส สุชาติวัฒน์)



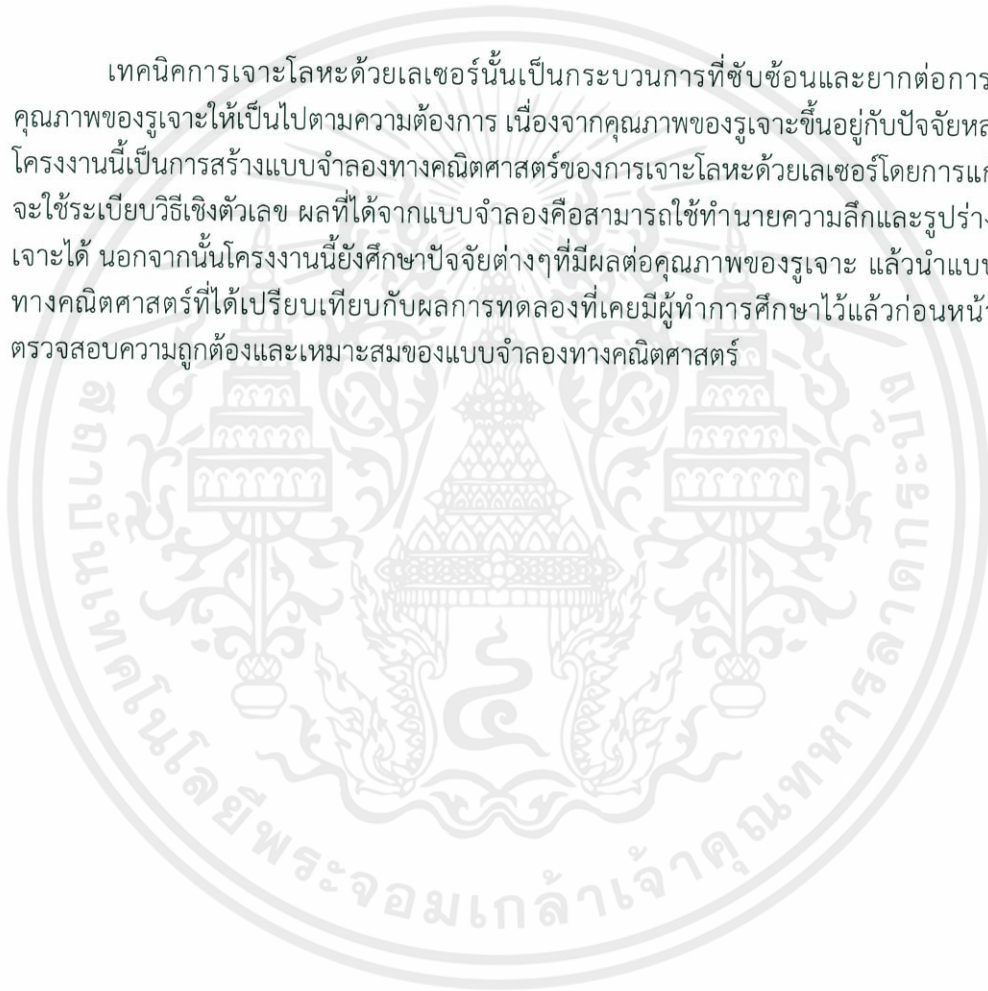
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์

นายพงศ์ศักดิ์ เขตขยัน 52010742  
นางสาวภิญทิลาพร โชครนเสถียร 52010890  
นายองอาจ อมรรัตนาภาพ 52011365  
ดร.มจรุส สุชาติวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2555

### บทคัดย่อ

เทคนิคการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์นั้นเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและยากต่อการควบคุมคุณภาพของรูเจาะให้เป็นไปตามความต้องการ เนื่องจากคุณภาพของรูเจาะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง โครงการนี้เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์โดยการแก้สมการจะใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ผลที่ได้จากแบบจำลองคือสามารถทำนายความลึกและรูปร่างของรูที่เจาะได้ นอกจากนี้โครงการนี้ยังศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อคุณภาพของรูเจาะ แล้วนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่เคยมีผู้ทำการศึกษาไว้แล้วก่อนหน้านี้ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



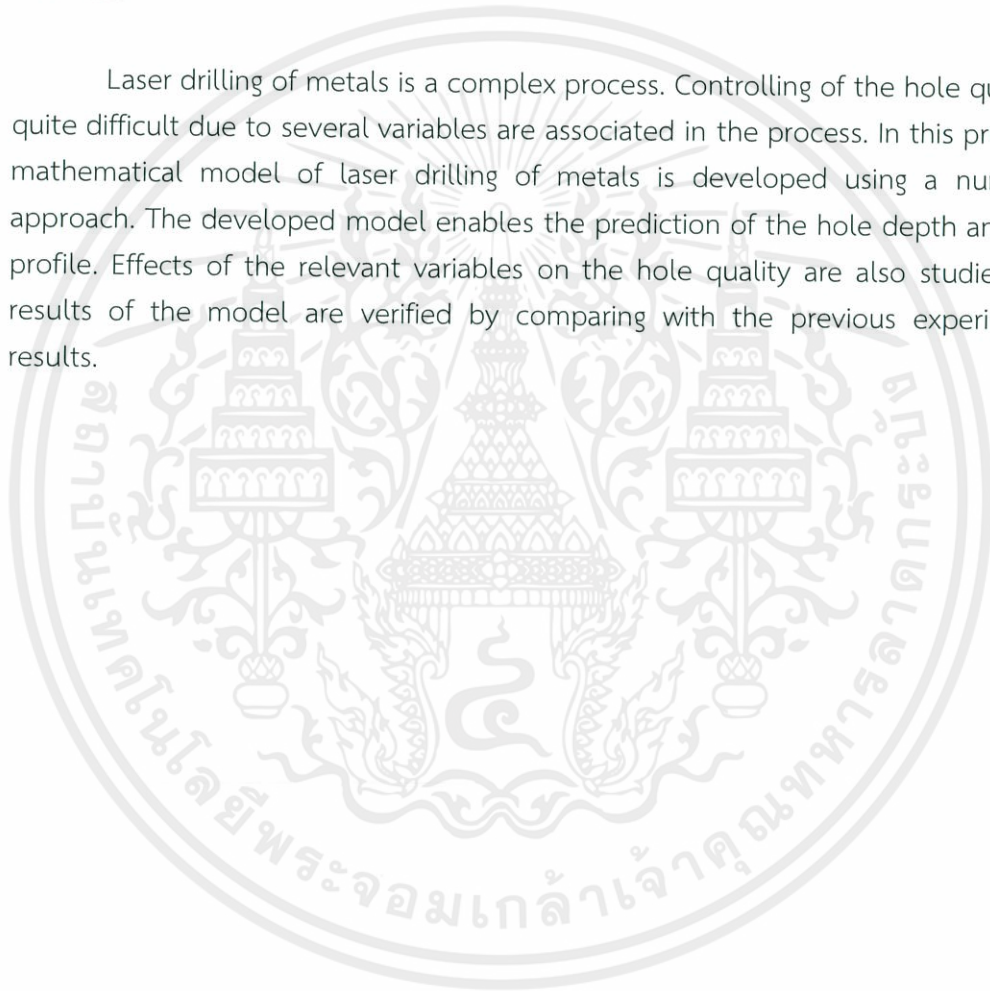
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# MATHEMATICAL MODEL OF LASER DRILLING

Pongsak	Ketkhayon	52010742
Phantila	Pornchoktanasatien	52010890
Ongart	Amonrattananuphab	52011365
Dr.Maturose	Suchatawat	Advisor
Year 2012		

## Abstract

Laser drilling of metals is a complex process. Controlling of the hole quality is quite difficult due to several variables are associated in the process. In this project, a mathematical model of laser drilling of metals is developed using a numerical approach. The developed model enables the prediction of the hole depth and hole profile. Effects of the relevant variables on the hole quality are also studied. The results of the model are verified by comparing with the previous experimental results.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน คณะผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ดร.มธุรส สุชาติวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้ความรู้ คำปรึกษา แนะนำแนวทาง หลักการในการดำเนินงาน และแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำโครงการ ซึ่งมีส่วนสำคัญในการทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รศ.ดร.มณฑล ใจกุลศล รศ.ดร.บำรุง พ่วงเกิด และรศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ที่กรุณาเป็น คณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนจนกระทั่งแนะนำเงื่อนไขจนปริญญาบัตรมีความถูกต้อง สมบูรณ์

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่เลี้ยงดู มอบความรัก กำลังใจ คำปรึกษา พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่

นายพงศ์ศักดิ์ เขตขยัน  
นางสาวภรณ์ทิลา พรโชคธนเสถียร  
นายองอาจ อมรรัตนานภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
บทที่ 2 หลักกลไกของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์.....	3
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับเลเซอร์.....	3
2.2 การประยุกต์เลเซอร์.....	8
2.3 กลไกการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์.....	11
บทที่ 3 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์.....	15
3.1 แบบจำลองกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์.....	15
3.2 กฎการอนุรักษ์มวล.....	16
3.3 กฎการอนุรักษ์พลังงาน.....	17
3.4 สมการความดันของแก๊สช่วยที่ออกจากหัวฉีด.....	20
3.5 ขั้นตอนการคำนวณ.....	22
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล.....	23
4.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล.....	23
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	30
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	30
5.2 วิจารณ์ผลจากแบบจำลอง.....	30
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

ภาคผนวก.....	31
โปรแกรมในการคำนวณ.....	31
ผลการคำนวณ.....	34
บรรณานุกรม.....	37



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สารต้นกำเนิดของเลเซอร์แต่ละชนิด และการใช้ประโยชน์เลเซอร์.....	11
4.1 คุณสมบัติเชิงความร้อนของเหล็กกล้าอะมุน.....	23
4.2 คุณสมบัติเชิงความร้อนของแก๊สช่วยอ็อกซิเจนและพารามิเตอร์หัวฉีดแก๊ส.....	24



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดเลเซอร์.....	4
2.2 ส่วนประกอบเลเซอร์ทับทิม.....	6
2.3 การตัดโลหะด้วยเลเซอร์.....	9
2.4 การเชื่อมโลหะด้วยเลเซอร์.....	10
2.5 การเจาะโลหะด้วยเลเซอร์.....	10
2.6 การเจาะโลหะด้วยเลเซอร์เพื่อหล่อเย็นชิ้นส่วนอุปกรณ์.....	10
2.7 การเจาะโลหะด้วยเลเซอร์เพื่อหล่อเย็นชิ้นส่วน Turbine blade.....	11
2.8 กลไกที่เกิดขึ้นในการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์.....	12
2.9 ลักษณะของรูที่เจาะโดยใช้แก๊สช่วยชนิดต่างๆ.....	13
2.10 เทคนิคการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์.....	14
3.1 แสดงการไหลของโลหะเหลวที่ไหลออกจากรูเจาะระหว่างการเจาะ.....	15
3.2 ขั้นตอนการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์.....	22
4.1 เปรียบเทียบระหว่างการคาดคะเนความลึกของรูกับความลึกของรูที่ได้จากการทดลอง.....	25
4.2 เปรียบเทียบระหว่างการคาดคะเนความลึกของรูกับความลึกของรูที่ได้จากการทดลอง.....	25
4.3 ความลึกของรูในช่วงที่มีการเจาะและช่วงพักการเจาะ.....	26
4.4 ผลของความกว้างของพัลส์กับจำนวนพัลส์ที่ใช้ในการเจาะทะลุ.....	27
4.5 เปรียบเทียบระหว่างกำลังสูงสุดที่ใช้ในการเจาะที่ 3 4 และ 5 kW.....	27
4.6 เปรียบเทียบความดันของแก๊สช่วยที่ใช้ในการเจาะที่ความดัน 3 4 5 6 และ 7 bar.....	28
4.7 เปรียบเทียบความลึกของรูเจาะที่มีแก๊สช่วยและไม่มีแก๊สช่วยในกระบวนการเจาะ.....	28
4.8 การคาดคะเนความลึกของรูเจาะที่พัลส์ต่างๆ จำนวน 3 พัลส์แรกของการเจาะ.....	29
4.9 การคาดคะเนลักษณะของรูเจาะเมื่อเจาะทะลุแล้ว.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$A_{eff}$	พื้นที่ประสิทธิผลของการไหลของแก๊สช่วย ( $m^2$ )
$A_l$	ค่าการดูดซับพลังงานของโลหะเหลว
$A_{rl}$	พื้นที่ของการสูญเสียความดันแก๊สช่วย ( $m^2$ )
$d_n$	เส้นผ่านศูนย์กลางที่บริเวณทางออกของหัวฉีด (m)
$H_{ox}$	เอนทัลปีของการออกซิเดชัน ( $J/mol$ )
$h_g$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแก๊สช่วย ( $W/m^2.K$ )
$I_{abs}$	ค่าความเข้มของเลเซอร์ที่โลหะดูดซับ ( $W/m^2$ )
$k_g$	ค่าการนำความร้อนของแก๊สช่วย ( $W/m.K$ )
$k_l$	ค่าการนำความร้อนของของเหลว ( $W/m.K$ )
$k_s$	ค่าการนำความร้อนของของแข็ง ( $W/m.K$ )
$L_m$	ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว ( $kJ/kg$ )
$L_v$	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ( $kJ/kg$ )
$\dot{m}_m$	อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของโลหะเหลวที่ถูกดันออกมาจากรูในรูปหยดของเหลว ( $kg/s$ )
$\dot{m}_s$	อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของโลหะที่ละลาย ( $kg/s$ )
$\dot{m}_v$	อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของโลหะเหลวที่กลายเป็นไอ ( $kg/s$ )
$p_c$	ความดันวิกฤติ ( $N/m^2$ )
$p_{eff}$	ความดันประสิทธิผลของแก๊สช่วย ( $N/m^2$ )
$p_i$	ความดันภายในหัวฉีด ( $N/m^2$ )
$P_{peak}$	พลังงานสูงสุด (W)
$Pr$	Prandtl number
$R$	ค่าคงที่ของโลหะในสถานะแก๊ส ( $J/kg.K$ )
$r$	ระยะตามแนวรัศมี (m)
$r_l$	รัศมีลำแสงเลเซอร์ (m)
$S_{lv}$	พื้นที่ผิวระหว่างของเหลว-ไอ ( $m^2$ )
$S_m$	พื้นที่บริเวณที่โลหะหลอมเหลวไหลออก ( $m^2$ )
$S_{sl}$	พื้นที่ผิวระหว่างของแข็ง-ของเหลว ( $m^2$ )
$T_0$	อุณหภูมิเริ่มต้นของโลหะ (K)
$T_g$	อุณหภูมิของแก๊สช่วย (K)
$T_{l0}$	อุณหภูมิที่ผิวโลหะเหลว (K)
$T_m$	อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะ (K)
$T_{vap}$	อุณหภูมิจุดเดือดของโลหะ (K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดก็ตามที่ผู้จัดทำเอกสารนี้จำเป็นต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$v_g$	ความเร็วการไหลของแก๊ส (m/s)
$v_m$	ความเร็วของโลหะหลอมเหลวที่ไหลออก (m/s)

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$z_m$	ระยะตามแนวตั้งระหว่างของแข็ง-ของเหลว (m)
$z_{m0}$	ระยะตามแนวตั้งระหว่างของแข็ง-ของเหลวที่กลางรูเจาะ (m)
$z_n$	ระยะห่างระหว่างหัวฉีด-ชิ้นงาน (m)
$z_v$	ระยะตามแนวตั้งระหว่างของเหลว-ไอ (m)
$z_{v0}$	ระยะตามแนวตั้งระหว่างของเหลว-ไอที่กลางรูเจาะ (m)
$\alpha_s$	ค่าการแพร่ความร้อนในของแข็ง ( $m^2/s$ )
$\gamma$	อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ
$\mu_g$	ค่าความหนืดของแก๊สช่วย ( $N/m^2 \cdot s$ )
$\rho_g$	ความหนาแน่นของแก๊สช่วย ( $kg/m^3$ )
$\rho_l$	ความหนาแน่นของโลหะเหลว ( $kg/m^3$ )
$\rho_s$	ความหนาแน่นของโลหะแข็ง ( $kg/m^3$ )
$\eta_{ox}$	ประสิทธิภาพออกซิเดชัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สืบเนื่องมาจากในปัจจุบันอุตสาหกรรมโลหะมีการพัฒนาและขยายตัวอย่างรวดเร็ว เครื่องยนต์และอุปกรณ์ทางแอโรไดนามิกจึงถูกออกแบบให้มีความแข็งแรง ทนทาน และสามารถใช้งานในสภาวะที่อุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นในกระบวนการทางวิศวกรรมจึงจำเป็นต้องมีการหล่อเย็นให้แก่ชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อลดและป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้น อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานให้แก่อุปกรณ์ด้วย โดยทั่วไปการหล่อเย็นดังกล่าวสามารถทำได้โดยอาศัยการเจาะรูขนาดเล็กซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.5 มิลลิเมตร [1] ลงบนชิ้นส่วนอุปกรณ์โดยรูที่เจาะนั้นอาจมีจำนวนมากถึง 40,000 รูต่อชิ้นงาน นอกจากนี้รูที่เจาะจะต้องไม่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน ซึ่งการเจาะในลักษณะดังกล่าวสามารถทำได้โดยอาศัยเครื่อง EDM (Electrical Discharge Machine) แต่เนื่องจากการเจาะรูที่มีขนาดเล็กและจำนวนมากนั้นทำได้ยาก อีกทั้งการเจาะรูด้วยเครื่อง EDM ยังมีข้อจำกัด กล่าวคือไม่เหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่และรูปร่างซับซ้อน ดังนั้นการเจาะชิ้นส่วนอุปกรณ์ด้วยเลเซอร์จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจและเหมาะสมกว่าการเจาะโดยอาศัยเครื่อง EDM กระบวนการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์นั้นมีความซับซ้อน นอกจากนี้คุณภาพของรูเจาะนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง อาทิเช่น พลังงานเลเซอร์ ชนิดและความดันของแก๊สช่วย ความกว้างของพัลส์ ชนิดของโลหะ และเวลาที่ใช้ในการเจาะ เป็นต้น ส่งผลให้การควบคุมและคาดคะเนผลของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์อย่างถูกต้องแม่นยำนั้นทำได้ยาก จึงเป็นที่มาของโครงการในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรูเจาะและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นจะช่วยในการหาขนาดความลึกและรูปร่างของรูที่เจาะได้ รวมทั้งใช้วิเคราะห์ผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ โดยพิจารณาผลของแก๊สช่วยเข้าไปในแบบจำลอง
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรูเจาะของการเจาะชิ้นส่วนโลหะด้วยเลเซอร์

### 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

เพื่อเป็นการลดความยุ่งยากในการแก้สมการทางคณิตศาสตร์จึงจำเป็นต้องมีการตั้งสมมุติฐานของแบบจำลอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. แบบจำลองดังกล่าวจะไม่พิจารณาการเกิดพลาสมาในกระบวนการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์
2. แบบจำลองดังกล่าวจะไม่พิจารณาการดูดซับพลังงานเลเซอร์ของไอโลหะ
3. การกระจายลำแสงเลเซอร์ในกระบวนการเจาะโลหะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ

นอกจากนี้ 4. การเกิดชั้นสนิม (oxide layer) ที่ผิวของรูเจาะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า surface absorbtivity การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม 5. กระบวนการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ที่เกิดขึ้นอยู่ในสภาวะ Quasi-steady-state ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

กระบวนการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ กล่าวคือเมื่อเลเซอร์ตกกระทบบลงบนผิวโลหะ โลหะบางส่วนจะหลอมเหลวและกลายเป็นไอส่งผลให้ภายในรูเจาะประกอบด้วยโลหะเหลวและไอโลหะ โดยไอโลหะที่เกิดขึ้นจะอยู่เหนือบริเวณชั้นผิวของโลหะเหลวและทำให้เกิดความดันไอ (vapor pressure หรืออาจเรียกว่า recoil pressure) กดลงบนผิวของโลหะเหลวและดันโลหะเหลวให้ไหลขึ้นไปตามผนังของรูออกสู่ด้านบนของรูเจาะในรูปหยดของเหลว (liquid droplets) ในการวิเคราะห์กระบวนการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอาศัยสมการสมดุลมวลและกฎการอนุรักษ์พลังงาน

#### 1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. การศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบ 2 มิติ
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวพิจารณาวัสดุที่ทำการเจาะเป็นโลหะเท่านั้น

#### 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูล บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. สร้างแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายกระบวนการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์
3. แก้สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
4. ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือผลงานวิจัยที่ทำการศึกษามาก่อนหน้านี้
5. ทำการศึกษารายละเอียดที่มีผลต่อคุณภาพของรูเจาะของการเจาะชิ้นส่วนโลหะด้วยเลเซอร์
6. สรุปผลการศึกษาและจัดทำรูปเล่มปริญญาโท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# หลักการของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์

### 2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับเลเซอร์

เลเซอร์[2] (laser ย่อมาจากคำว่า light amplification by stimulated emission of radiation) ในทางฟิสิกส์คือ อุปกรณ์ที่ให้กำเนิดลำแสงที่มีลักษณะเฉพาะซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่รวมกันระหว่างกลศาสตร์ควอนตัมกับอุณหพลศาสตร์ ซึ่งพลังงานแสงเลเซอร์สามารถมีคุณสมบัติได้หลากหลายขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการออกแบบ เลเซอร์ส่วนมากจะเป็นลำแสงที่มีขนาดเล็กมีการเบี่ยงเบนน้อย (low-divergence beam) และสามารถระบุมุมความยาวคลื่นได้ง่ายโดยดูจากสีของเลเซอร์ ถ้าอยู่ในสเปกตรัมที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (visible spectrum) ซึ่งเลเซอร์นี้อาจกล่าวได้ว่าเป็นการรวมพลังงานแสงที่ส่งออกมาจากหลายความยาวคลื่นเข้าด้วยกันเลเซอร์ จะหมายรวมไปถึงการให้พลังงานผ่านทางสื่อส่งแสงซึ่งสื่อส่งแสงอาจเป็นได้ทั้งของแข็ง ของเหลว ก๊าซ หรืออิล็กตรอนอิสระที่มีคุณสมบัติสามารถนำแสงได้ในรูปแบบที่ง่ายที่สุด ออปติคัลคาวิตี (Optical cavity) จะประกอบไปด้วยกระจก 2 อันที่จะจัดเรียงแสงเข้าด้วยกันครั้งแล้วครั้งเล่า โดยที่แต่ละครั้งจะผ่านสื่อส่งแสงโดยหนึ่งในกระจกนั้น (Output coupler) จะส่งลำแสงออกมาลำแสงเลเซอร์ที่ผ่านทางสื่อส่งแสงจะมีความยาวคลื่นเฉพาะและมีพลังงานเพิ่ม ซึ่งกระจกนี้จะพยายามทำให้แสงส่วนมากสามารถผ่านทางสื่อส่งแสงให้ได้ และออกมาเป็นลำแสงเลเซอร์ กระบวนการเหนี่ยวนำลำแสงเพื่อเพิ่มพลังงานนี้จะใช้พลังงานไฟฟ้าหรือแสงในหลายความยาวคลื่น ซึ่งในการทดลองแต่ละครั้งความยาวคลื่นของแสงในแต่ละความยาวคลื่นจะส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติ รูปร่าง และความยาวคลื่นของลำแสงเลเซอร์ที่สร้างออกมา

การค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับเลเซอร์เกิดขึ้นครั้งแรกเมื่อเดือนพฤษภาคม ปี 1960 โดย ทีโอดอร์ ไมแมน (Theodore Maiman) ที่สถาบันวิจัย ฮิวจ์ (Hughes Research Laboratories) ทุกวันนี้เลเซอร์กลายเป็นอุตสาหกรรมที่ทำรายได้หลายพันล้านดอลลาร์ ผลผลิตจากงานวิจัยเลเซอร์และกลายเป็นอุปกรณ์ที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายมีให้เห็นอย่างเช่น แผ่นดีวีดี แผ่นซีดี เครื่องเล่นดีวีดี เครื่องอ่านบาร์โค้ด อุปกรณ์ตัดโลหะด้วยเลเซอร์ ฯลฯ จะเห็นได้ว่าเลเซอร์มีการใช้กันอย่างกว้างขวางไม่ว่าจะเป็นด้านวิทยาศาสตร์ ด้านอุตสาหกรรม ด้านการแพทย์ หรือแม้กระทั่งด้านการทหาร ก็เพราะว่าเลเซอร์สามารถควบคุมความยาวคลื่นตามที่ต้องการได้

คุณสมบัติของเลเซอร์

1. มีทิศทางเดียวที่แน่นอน (Directionality) ลำแสงเลเซอร์จะขนานกันไปตลอดระยะทางไกลๆ ไม่มีการบานปลายออก ดังนั้นความเข้มของแสงเลเซอร์จะลดลงน้อยมากในระยะทางไกลๆ

2. เป็นแสงเอกรงค์ (Monochromaticity) แสงเลเซอร์มีความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว แสงกำเนิดแสงที่เราพบเห็นในชีวิตประจำวัน เช่น หลอดไฟฟ้า และ ดวงอาทิตย์จะเป็นแสงสีขาว ถ้าให้แสงสีขาวนี้ผ่านปริซึมจะเห็นแถบสีต่างๆเรียงกันอย่างต่อเนื่องจากสีม่วงถึงสีแดง เรียกว่า แถบสเปกตรัมของแสงเลเซอร์ เช่น เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน เมื่อให้แสงสีแดงของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนผ่านปริซึมจะไม่มีแยกเป็นหลายเส้นแต่ยังคงมีเพียง 1 เส้นที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร

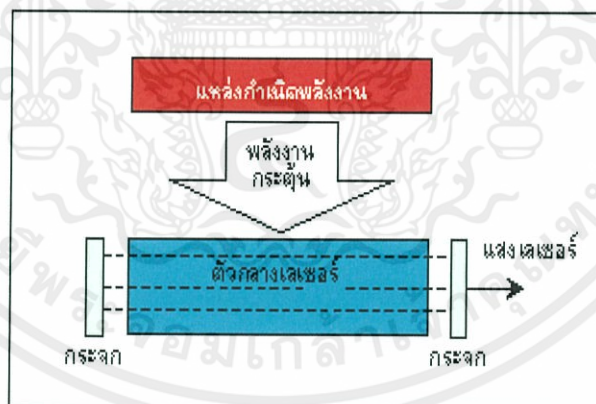
3. มีความเจิดจ้า (Brightness) แสงเลเซอร์มีลักษณะโดดเด่นไม่ซ้ำแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่นในเชิงความเข้มสูงและเมื่อลำแสงตกกระทบวัตถุก็เกิดความระยิบระยับของลำแสงขึ้น (Laser Speckle) โดยเฉพาะเมื่อวัตถุที่มีความหยาบหรือแม้แต่ในบรรยากาศที่มีฝุ่นละอองหรือควันซึ่งเป็นอนุภาค

แขวนลอยอยู่อย่างอิสระ ทั้งนี้เนื่องจากแสงเลเซอร์เกิดการสะท้อนแบบไม่มีทิศทางกับอนุภาค หรือผิวของวัตถุและเกิดการแทรกสอดของลำแสงทำให้เกิดความระยิบระยับขึ้นจึงเป็นมิติของการมองเห็นโดยใช้ Laser displays แสงเลเซอร์กำลังต่ำๆ เช่น เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ขนาด 1 มิลลิวัตต์ ก็มีความเข้มสูงกว่าแสงพระอาทิตย์ฉะนั้นถ้าฉายเข้าตามนุษย์โดยตรงแล้วจะเป็นอันตรายต่อนัยน์ตาถึงตาบอดได้

4. มีความเป็นอาพันธ์ (coherence) หลอดไฟฟ้าที่เปล่งแสงประกอบด้วยอะตอมที่เล็กจำนวนมากโดยแต่ละอะตอมจะทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดแสง ดังนั้นแต่ละอะตอมก็ปล่อยแสงออกมาอย่างอิสระซึ่งกันและกัน แสงที่ถูกปล่อยออกมาจากหลอดไฟจึงมีเฟสและความยาวคลื่นต่างๆกัน ยิ่งกว่านั้นแต่ละคลื่นที่ถูกปล่อยออกมามีทิศทางไม่แน่นอนหรือเป็น random แสงจากแหล่งต้นกำเนิดแสงธรรมดาโดยทั่วไปจะเรียกว่า แสงอินโคฮีเรนต์ (incoherence light) ต้นกำเนิดของแสงเลเซอร์นอกจากจะให้แสงสีเดียวทุกๆคลื่นของแสงเลเซอร์จะมีเฟสเดียวกันหมดดังนั้นแสงเลเซอร์จึงเรียกว่า แสงโคฮีเรนต์ (coherence light)

เมื่อนำปัจจัยที่กล่าวมาทั้งหมดในหัวข้อที่แล้วมาพิจารณาจะพบว่าในทางปฏิบัติโครงสร้างของเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์จะต้องมีองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วนคือ

1. ตัวกลางเลเซอร์ (laser medium) เป็นวัสดุที่ถูกกระตุ้นแล้วให้แสงเลเซอร์ออกมา ซึ่งอาจเป็นแก๊ส ของแข็ง ของเหลวหรือสารกึ่งตัวนำ
2. ออปติคัลเรโซเนเตอร์ (optical resonator) เป็นส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดเลเซอร์ที่ทำให้เกิดการปล่อยแสงแบบถูกกระตุ้นซ้ำแล้วซ้ำอีกจนถึงจุดเลเซอร์ ประกอบด้วยกระจก 2 แผ่นวางหันหน้าเข้าหากัน โดยระหว่างกลางมีตัวกลางเลเซอร์อยู่
3. แหล่งกำเนิดพลังงาน (energy source) เป็นตัวกระตุ้นให้อะตอมอยู่ในสภาวะที่เป็นประชากรผกผัน



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดเลเซอร์

กระจกที่ทำหน้าที่เป็นออปติคัลเรโซเนเตอร์สองบานนั้น มีความสามารถในการสะท้อนแสงได้ต่างกันเล็กน้อย กล่าวคือ กระจกแผ่นหลังตัวกลางเลเซอร์สามารถสะท้อนแสงได้หมด ในขณะที่กระจกแผ่นหน้าสะท้อนแสงได้เกือบหมด โดยมีปริมาณแสงบางส่วนทะลุผ่านไปได้ แสงที่ทะลุผ่านออกไปก็คือแสงเลเซอร์นั่นเอง โดยสามารถแบ่งชนิดของเลเซอร์ตามลักษณะของตัวกลางเลเซอร์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารอ้างอิงสำหรับทำรายงานหรือการค้นคว้าเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Gas Laser สารตัวกลางเลเซอร์มีลักษณะเป็นก๊าซ เช่น CO<sub>2</sub> Laser, Argon Laser, Xenon Laser, He-Ne Laser
2. Solid State Laser ใช้สารตัวกลางเลเซอร์ที่เป็นแท่งผลึกแข็ง เช่น Nd:YAG Laser, Ruby Laser
3. Dye Laser สารตัวกลางมีลักษณะเป็นของเหลว เช่น Rhodamin 6G Laser
4. Semiconductor Laser: เป็นเลเซอร์ที่ใช้สารตัวกลางเลเซอร์เป็นสารกึ่งตัวนำ เช่น Diode Laser ชนิดต่าง ๆ

โดยทั่วไปเลเซอร์ที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมในปัจจุบัน ได้แก่ He-Ne Laser, Argon-Ion Laser, Carbon dioxide Laser, Ruby Laser, Nd:YAG Laser, Semiconductor Laser และ Eximer Laser แต่ละชนิดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 1. ฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ (He-Ne Laser)

เป็นเลเซอร์ก๊าซชนิดแรก ประกอบด้วยก๊าซฮีเลียม (He) และนีออน (Ne) ในอัตราส่วนประมาณ 10:1 แหล่งกำเนิดพลังงานที่กระตุ้นให้เกิดประชากรผกผัน (มักเรียกอีกชื่อว่า pumping source) ที่ใช้จะเป็น electrical discharge คือทำให้มีอิเล็กตรอนวิ่งผ่านและชนกับก๊าซที่บรรจุอยู่ในหลอดเลเซอร์ แสงเลเซอร์ที่ได้จะเป็นสีแดงที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร และมีกำลังประมาณ 0.5-50 มิลลิวัตต์ ผู้สร้างสามารถเลือกการเปลี่ยนชั้นพลังงานของอะตอมให้เกิดเป็นเลเซอร์สีเขียวและอินฟราเรดได้ แต่ไม่นิยมเพราะแสงดังกล่าวเกิดยากกว่าและต้องใช้ต้นทุนสูงมีการใช้งาน ฮีเลียม-นีออน เลเซอร์มากในงานศึกษาวิจัยโดยมากใช้ในการสอบเทียบ การวัด การสร้างภาพโฮโลแกรม ในงานอุตสาหกรรมใช้เป็นมาตรฐานในการสอบเทียบการวัดเชิงมิติ

#### 2. อาร์กอน-อออนเลเซอร์ (Argon-ion Laser)

ตัวกลางที่เป็นต้นกำเนิดของแสงเลเซอร์ชนิดนี้คือ อีออนของอาร์กอน ซึ่งเกิดจากการกระตุ้นอะตอมของอาร์กอน จนอิเล็กตรอนบางอนุภาคหลุดออกไป Pumping source ที่ใช้เป็นแบบ electrical discharge ทำให้อีออนของอาร์กอนถูกกระตุ้นไปอยู่ที่ชั้นพลังงานที่สูงกว่า ที่เรียกว่า metastable state โดยที่บริเวณที่เป็น metastable states จะมีหลายชั้นย่อยทำให้สามารถเกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานได้หลายแบบแต่ที่เด่นชัดคือ แสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 514 นาโนเมตร (สีเขียว) และ 488 นาโนเมตร (สีน้ำเงิน) กำลังของแสงเลเซอร์ที่ได้จะอยู่ในช่วง 1-20 วัตต์ ข้อเสียของเลเซอร์ชนิดนี้คือต้องใช้กระแสไฟฟ้าในการ pump สูงมากเพราะต้องทำหน้าที่ทั้งทำให้อะตอมเป็นอีออนและกระตุ้นอีออนให้เกิดประชากรผกผันทำให้เกิดความร้อนสูงจึงต้องมีระบบหล่อเย็น อาร์กอน-อออนเลเซอร์ ถูกนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ (ผ่าตัด) สร้างภาพโฮโลแกรม(holography) และงานด้าน spectrophotometry

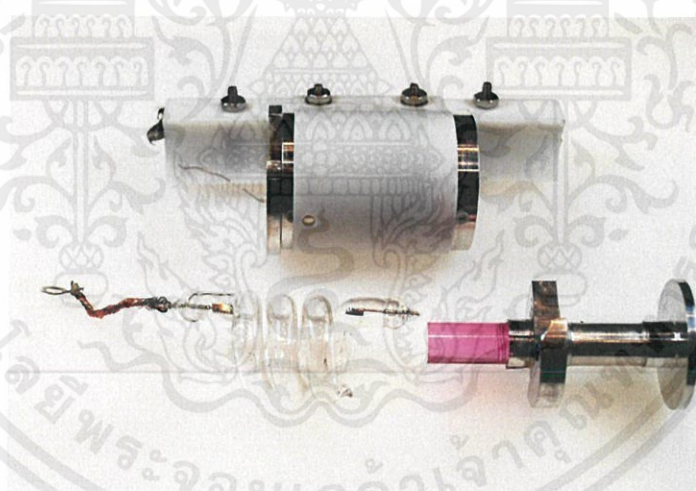
#### 3. คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ (Carbon dioxide Laser)

เป็นเลเซอร์ชนิดก๊าซประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน และก๊าซฮีเลียม ในอัตราส่วนประมาณ 1:1:10 เพื่อช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์ที่แตกต่างเลเซอร์ก๊าซประเภทอื่นมาก เพราะแสงเลเซอร์ไม่ได้เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอะตอม แต่เกิดจากการหมุนและการสั่นของโมเลกุลของก๊าซ โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ปกติจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงโดยมีออกซิเจนอยู่สองข้างและคาร์บอนอยู่ตรงกลาง การสั่นของโมเลกุลเป็นการสั่นขึ้นลงหรือเข้าออกของออกซิเจนเมื่อเทียบกับคาร์บอน พลังงานจากการเปลี่ยนระดับพลังงานในการสั่นของโมเลกุลจะมีค่าประมาณ 0.1 อิเล็กตรอนโวลต์ ได้ความยาวคลื่นแสงเลเซอร์ประมาณ 10.6 ไมครอน ซึ่งเป็นคลื่น

แม่เหล็กไฟฟ้าย่านอินฟราเรด การที่พลังงานจากการเปลี่ยนระดับพลังงานมีค่าต่ำทำให้ pump โดยใช้ electrical discharge ได้ง่าย และมีประสิทธิภาพสูงถึง 20% ซึ่งถือว่ามากเมื่อเทียบกับเลเซอร์โดยทั่วไปที่มีประสิทธิภาพประมาณ 1% คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์โดยทั่วไปจะมีกำลังเฉลี่ยประมาณ 10-2,000 วัตต์ ถ้าประยุกต์ใช้ในงานการตัดกระดาษหรือผ้าหรือในงานแกะสลักพลาสติกและไม้จะใช้กำลังอยู่ที่ประมาณ 5-10 วัตต์ แต่ถ้าใช้ในการตัดหรือเจาะโลหะหรือวัสดุที่มีความแข็งสูงมากต้องใช้กำลังอยู่ที่ประมาณ 100 วัตต์ ขึ้นไปทำให้เลเซอร์ชนิดนี้ไม่เหมาะในการนำมาประยุกต์ใช้ในงานการแกะสลักหรือเจาะวัสดุที่มีความแข็งสูง โดยส่วนใหญ่แล้วมักใช้กับวัสดุจำพวกโลหะเนื่องจากระบบคาร์บอนไดออกไซด์แบบชนิดที่มีกำลังสูงจะมีขนาดใหญ่ และมีอุปกรณ์เสริมต่อพ่วง เช่น ถังก๊าซ บีมสยูญญากาศ และอุปกรณ์ควบคุมความดันรวมถึงแหล่งจ่ายกำลังแรงดันสูงประมาณ 10-25 กิโลโวลต์

#### 4. เลเซอร์ทับทิม (Ruby Laser)

เป็นเลเซอร์ชนิดของแข็งมีลักษณะที่สำคัญคือ ตัวกลางเลเซอร์ที่ใช้จะเป็นแท่งผลึกของฉนวนซึ่งทำหน้าที่เป็น host และมีการฉาบ (dope) โครเมียม (เป็น impurity) เข้าไปทำให้บางครั้งนิยมเรียกว่า doped insulator laser และมีตัวอย่างเลเซอร์หลักๆ ชนิดที่ใช้เทคนิคนี้ คือ เลเซอร์ทับทิม และ Nd:YAG เลเซอร์เลเซอร์ทับทิม เป็นเลเซอร์ชนิดแรกที่ถูกสร้างขึ้นโดย Theodore Maiman ในปี ค.ศ. 1960 สารตัวกลางเลเซอร์คือ  $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็นการ dope  $\text{Cr}^{3+}$  ลงไปใน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ซึ่งคือทับทิมสังเคราะห์นั่นเอง pumping source ที่ใช้เป็นแบบ optical โดยที่นิยมใช้กันคือ หลอดไฟแฟลช (xenon flash lamp ที่เห็นเป็นหลอดแก้วเกลียวซึ่งโอบรอบแท่งผลึกทับทิมที่อยู่ตรงกลาง) ดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบเลเซอร์ทับทิม [3]

การทำให้เกิดประชากรผกผันในเลเซอร์ทับทิมนั้นทำได้ยากและจะได้เลเซอร์เฉพาะแบบที่เป็นพัลส์เท่านั้นความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ที่ได้คือ 694.3 นาโนเมตร และมีพลังงานในระดับ มิลลิจูลต่อพัลส์ ถึง กิโลจูลต่อพัลส์

#### 5. นีโอติเมียมแย็กเลเซอร์ (Nd:YAG Laser)

เป็นเลเซอร์ชนิดของแข็ง โดยมี host เป็น ผลึกของ Yttrium-aluminium garnet ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ) หรือเรียกย่อๆว่า YAG ส่วน impurity คือ  $\text{Nd}^{3+}$  ซึ่งจะถูก dope เข้าไปประมาณ 1% โดยน้ำหนัก โดยทั่วไปนีโอติเมียมแย็กเลเซอร์มีกำลังเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 3-1,000 วัตต์ สามารถให้แสงได้ทั้งแบบพัลส์

(pulse) และแบบต่อเนื่อง (continuous) ขึ้นอยู่กับว่า pumping source ที่ใช้เป็นแบบหลอดไฟแฟลช หรือหลอดไฟอาร์ค เลเซอร์ชนิดนี้มีความยาวคลื่น 1064 นาโนเมตร อยู่ในย่านอินฟราเรดแต่นิยมใช้ควบคู่กับ second harmonic crystal เช่น KTP ทำให้ได้ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร เป็นแสงสีเขียวออกมาได้ เนื่องจากเลเซอร์ชนิดนี้สามารถทำให้เกิดค่ากำลังสูงสุดถึง 2,000 วัตต์ ได้ในระบบเลเซอร์ที่มีค่ากำลังเฉลี่ย 3 วัตต์ เท่านั้นจึงทำให้ระบบเลเซอร์นี้ซึ่งมีขนาดเล็กสามารถนำไปทำการเจาะ ตัด หรือแกะสลักวัสดุที่มีความแข็งสูง วัสดุจำพวกโลหะ หรือ วัสดุเช่นแก้ว เซรามิก หรืออัญมณี ได้เป็นอย่างดี ปัจจุบันระบบนีโอดีเมียมแย็กเลเซอร์ส่วนใหญ่ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมเป็นแบบใช้หลอดไฟแฟลชหรือหลอดไฟอาร์คเป็น pumping source ซึ่งระบบนี้มีการสิ้นเปลืองพลังงานมาก เนื่องจากพลังงานทั้งหมดที่ใส่ให้แก่หลอดอาร์คจะมีเพียง 4-7% เท่านั้นที่ถูกนำไปใช้ในการกระตุ้นส่วนที่เหลือคือความร้อนซึ่งจะต้องถูกระบายทิ้งออกไป ในปัจจุบันมีการพัฒนาเลเซอร์ไดโอดให้มีประสิทธิภาพสูงและมีราคาที่ถูกลงมากจึงได้นำเอาเลเซอร์ไดโอดมาใช้เป็นแหล่งกระตุ้นแทนที่หลอดไฟอาร์คชนิดเดิม ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้นถึง 50-70% ของประสิทธิภาพรวม โดยที่ระบบเดิมมีค่าเพียง 2-3% เท่านั้น ระบบจึงมีขนาดเล็กลงมากและมีอุปกรณ์ระบายความร้อนที่มีขนาดเล็กด้วยทำให้ค่าใช้จ่ายในการทำงานลดลงมาก

#### 6. เลเซอร์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Laser)

เป็นเลเซอร์ที่ใช้สารกึ่งตัวนำเป็นตัวกลาง และเป็นเลเซอร์ที่มีจำนวนมากที่สุดมีลักษณะคล้ายกับ LED (light emitting diode) แต่มีลักษณะพิเศษบางประการ ทำให้แสงที่ออกมาเป็นเลเซอร์โดย LED จะให้แสงจาก spontaneous emission แต่เลเซอร์สารกึ่งตัวนำให้แสงจาก stimulated emission แสงในเลเซอร์ชนิดนี้เกิดจากการรวมตัว (recombination) ของอิเล็กตรอนกับ "หลุม" (hole) ที่บริเวณรอยต่อ P-N ของสารกึ่งตัวนำ เช่น GaAs GaP และ GaAlAs ความยาวคลื่นของแสงขึ้นกับชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นตัวกลาง โดยความยาวคลื่นหลัก ๆ คือ 650 770 809 1100 และ 1500 นาโนเมตร สามารถประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์หลายชนิด เช่น ปริ้นเตอร์ เลเซอร์พอยน์เตอร์ กำลังของเลเซอร์ที่ได้มีตั้งแต่ระดับ มิลลิวัตต์ ถึง วัตต์ แต่สามารถนำเลเซอร์สารกึ่งตัวนำหลายอันมารวมกันในรูปแบบของ array หรือ bar ให้มีกำลังสูงเป็นระดับกิโลวัตต์ได้

#### 7. เอ็กไซเมอร์เลเซอร์ (Eximer Laser)

เป็นเลเซอร์ชนิดก๊าซโดยก๊าซที่บรรจุอยู่ภายในระบบนั้นจะมีความดันอยู่ในช่วงไม่เกิน 5 atm ซึ่งก๊าซที่ใช้เป็นการผสมกันของแก๊สเฉื่อยเช่น Ar, Kr, Xe ปริมาณ 0.1-0.3% กับก๊าซฮาโลเจน เช่น F, Cl, Br, I ปริมาณ 2-10% โดยก๊าซทั้งสองชนิดจะมีอยู่ในระบบเพียงน้อยนิดเมื่อเทียบกับปริมาตรของก๊าซทั้งหมดภายในระบบ ส่วนที่เหลือคือ buffer gas เช่น He แต่ buffer gas จะไม่ใช่เป็นตัวกลางของการเกิดแสงเลเซอร์เอ็กไซเมอร์เลเซอร์เกิดขึ้นจากการปลดปล่อยพลังงานของโมเลกุล เมื่อมีการเปลี่ยนระดับพลังงานระหว่างสถานะกระตุ้นและสถานะพื้น คำว่า Eximer มาจากคำว่า Excited Dimer (อ่านว่า ไดเมอร์) ซึ่งเอ็กไซเมอร์เลเซอร์ที่ใช้ส่วนใหญ่จะใช้ก๊าซผสมระหว่างแก๊สเฉื่อยที่มีมวลโมเลกุลสูงกับก๊าซฮาโลเจน เช่น ArCl ให้แสงความยาวคลื่น 175 นาโนเมตร XeF ให้แสงความยาวคลื่น 175 นาโนเมตร ArF ให้แสงความยาวคลื่น 193 นาโนเมตร KrF ให้แสงความยาวคลื่น 249 นาโนเมตร และ XeCl ให้แสงความยาวคลื่น 308 นาโนเมตร pumping source ที่ใช้ได้มาจากพลังงานจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างแก๊สเฉื่อยกับก๊าซฮาโลเจน เรียกว่าวิธี pump แบบนี้ว่า chemical pumping เมื่อต้องการให้เกิดแสงเลเซอร์ ก๊าซสองชนิดจะถูกนำมาผสมกันนั้นคือก๊าซทั้งสองแยกกันอยู่ในตอนแรกเอ็กไซเมอร์เลเซอร์ให้แสงที่เป็นแบบพัลส์ออกมาสามารถให้พลังงานตั้งแต่ระดับ มิลลิจูล ไปจนถึงระดับ 100 จูลต่อพัลส์ ในความถี่สูงถึงระดับ 1-2 กิโลเฮิรท์

และสามารถให้กำลังงานเฉลี่ยได้สูงถึง 500 วัตต์ เอ็กไซเมอร์เลเซอร์เป็นอุปกรณ์กำเนิดแสงเหนือม่วงแบบอาพันธ์ (coherent uv) และ deep uv ให้ลำแสงที่มีขนาดเล็กมาก สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆอย่างกว้างขวางทั้งทางการแพทย์ (เลสิก) และทางอุตสาหกรรม โดยส่วนใหญ่จะนำไปใช้กับวัสดุที่มีความแข็งแรงของโครงสร้างโมเลกุลสูง เช่น เพชร หรือสารจำพวกโพลีเมอร์

## 2.2 การประยุกต์ใช้งานเลเซอร์

เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีคุณสมบัติเด่น คือเป็นคลื่นแสงที่มีระเบียบ มีลักษณะเป็นลำแสง ความเข้มแสงสูง จึงมีศักยภาพในการประยุกต์มากมาย ได้แก่ การใช้เลเซอร์เพื่อเจาะ ตัด เชื่อม เลเซอร์เป็นแสงที่มีความเข้มสูง และเป็นลำแสง เมื่อโฟกัสจะมีขนาดเล็กสามารถ เจาะ ตัด เชื่อมวัสดุต่างๆได้ รูปที่เจาะ รอยเชื่อม จะมีขนาดเล็กและคมชัดมาก ทำให้สามารถทำงานที่มีความละเอียดสูงได้ เลเซอร์ที่ใช้งานต้องมีกำลังสูง เช่น เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์

### 1. การใช้เลเซอร์ด้านการแพทย์

เลเซอร์ถูกนำมาใช้ในการผ่าตัดและรักษาทางการแพทย์และจักษุแพทย์ เช่น การผ่าตัดที่มีขนาดเล็ก (Microsurgery) การผ่าตัดต้อ เป็นต้น เลเซอร์ที่ใช้ได้แก่ เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ เลเซอร์อาร์กอน การเลือกใช้เลเซอร์แบบต่างๆขึ้นอยู่กับว่า อวัยวะที่ต้องการผ่าตัดมีความสามารถในการดูดกลืนแสงสีอะไร และขนาดกำลังของเลเซอร์ เช่น เส้นเลือดแดงจะดูดกลืนสีแดงได้น้อย จึงใช้เลเซอร์แสงสีเขียวที่ได้จากเลเซอร์ก๊าซอาร์กอน ในการใช้งานจริงๆ อาจใช้ลำแสงที่มีกระจกเลนส์อยู่ภายใน และหักงอได้เป็นตัวนำแสงเลเซอร์ ไปยังบริเวณอวัยวะที่จะผ่าตัด หรือใช้ลำแสงเลเซอร์ผ่านกล้องจุลทรรศน์ผ่าตัด ในการรักษาโรคมะเร็ง เลเซอร์ที่ใช้จะต้องมีความหนาแน่นพลังงาน 300-500 ลูกบาศก์เซนติเมตร แสงเลเซอร์จะทำลายเซลล์เนื้องอก โดยไม่ทำลายเนื้อเยื่อปกติโดยรอบ บาดแผลภายหลังการผ่าตัดจะฟื้นตัวเร็ว ในงานจุลศัลยกรรมของเส้นเลือด เลเซอร์สามารถห้ามเลือดให้หยุดไหลโดยการเชื่อมเส้นเลือดเล็กๆภายในบริเวณจำกัดให้ติดกัน วิธีการอาจใช้ท่อนำแสงเข้าช่วยด้วย เพื่อนำแสงเลเซอร์ไปตามช่องอวัยวะที่เข้าถึงยาก

### 2. การใช้เลเซอร์ด้านสื่อสารโทรคมนาคม

การสื่อสารในปัจจุบันส่วนใหญ่ใช้คลื่นไมโครเวฟ หรือใช้โทรศัพท์ อย่างไรก็ตามหลังจากที่มีการพัฒนาเลเซอร์ไดโอด (semiconductor diode laser) และเส้นใยแก้วนำแสง (optical fiber) แล้ว การสื่อสารด้วยแสง (optical communication) หรือการส่งข้อมูลข่าวสารจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งหรือระหว่างเมืองต่างๆ ก็เป็นไปได้อย่างรวดเร็ว ในอนาคตการสื่อสารด้วยเลเซอร์จะเข้ามาแทนที่ระบบโทรศัพท์ที่ใช้ลวดตัวนำที่ใช้กันอยู่ทั่วไป แสงเลเซอร์นี้มีจุดเด่นที่จะไม่มีสัญญาณรบกวนเพราะเป็นคลื่นแสง มีความจุข้อมูลสูงมากเพราะมีความถี่สูงกว่าคลื่นวิทยุ ทำให้เส้นใยแก้วนำแสงเส้นหนึ่งสามารถคู่สายโทรศัพท์ได้เป็นพันๆคู่

### 3. การใช้เลเซอร์ด้านการสร้างภาพสามมิติ

ปัจจุบันได้ใช้เลเซอร์ในการสร้างภาพ 3 มิติหรือภาพ โฮโลกราฟี หมายถึง กระบวนการสร้างภาพฮอโลแกรม ซึ่งเป็นภาพ 3 มิติ แตกต่างจากการสร้างภาพเชิง 3 มิติ โดยฮอโลแกรมนั้นเป็นภาพที่บันทึกลงบนฟิล์ม หรือ แผ่นเคลือบด้วยสารสำหรับบันทึกแสง ซึ่งผ่านเทคนิคการบันทึกด้วยการใช้ แสงที่มีหน้าคลื่นสอดคล้องกัน (coherence) เช่น แสงเลเซอร์ และเมื่อถูกส่องสว่างอย่างเหมาะสม จะแสดงให้เห็นภาพที่มีลักษณะ 3 มิติ โฮโลกราฟี เป็นเทคนิคที่ช่วยให้แสงกระจายจากวัตถุที่จะบันทึก และถูกสร้างขึ้นใหม่ต่อมา เพื่อให้ปรากฏเป็นวัตถุอยู่ในตำแหน่งเดิมเมื่อเทียบกับการบันทึก การเปลี่ยนแปลง

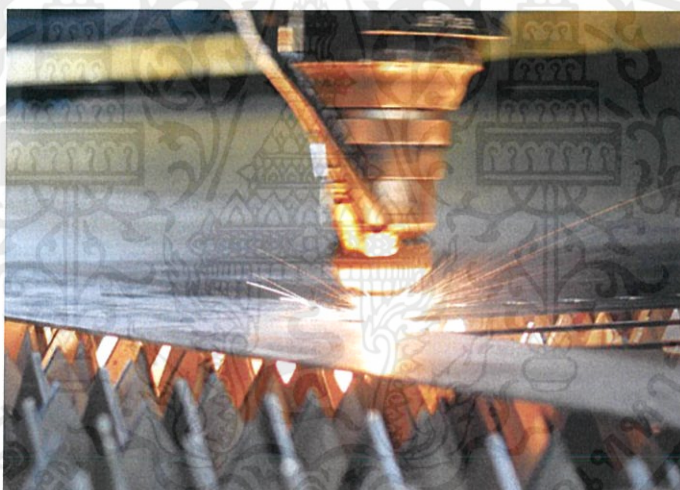
รูปแบบตำแหน่งและทิศทางของการระบบการมองเห็น เปลี่ยนแปลงไปอย่างถูกต้องเหมือนกับถ้าวัตถุก็ยังคงเป็นปัจจุบันจึงทำให้ภาพที่บันทึกโฮโลแกรมปรากฏเป็นสามมิติ เทคนิคของโฮโลกราฟียังสามารถใช้ในการเก็บ ดึงและประมวลผลข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับแสง ในขณะที่โฮโลกราฟีเป็นที่นิยมใช้เพื่อใช้แสดงภาพ 3 มิติแบบคงที่ แต่ก็ยังไม่สามารถสร้างฉากตามต้องการโดยการแสดงปริมาตรของ holographic ได้ ถ้าจะกล่าวในคำพูดที่เป็นเชิงวิชาการมากขึ้น ก็อาจกล่าวได้ว่า โฮโลแกรม ก็คือ บันทึกของรูปแบบการแทรกสอดของลำแสง ที่มีหน้าคลื่นสอดคล้องกัน 2 ลำ

#### 4. การใช้เลเซอร์ในการวัด

การใช้เลเซอร์ในการวัด นับ ทดสอบ ตรวจสอบการควบคุม ทั้งในกระบวนการผลิตและในงานวิทยาศาสตร์ เช่น การตรวจสอบยางล้อเครื่องบินโดยไม่ทำลาย โดยวิธีโฮโลกราฟี (holography) การวัดปริมาณมลภาวะเพื่อหาปริมาณของสารต่างๆในบรรยากาศ เนื่องจากเลเซอร์มีความยาวคลื่นคงที่และเป็นลำแสงขนานจึงถูกนำมาใช้เป็นมาตรฐานการวัดที่ละเอียดแม่นยำ เช่น การวัดขนาดของสิ่งของ การวัดระยะทางทั้งใกล้และไกล โดยอาศัยหลักการของการแทรกสอด

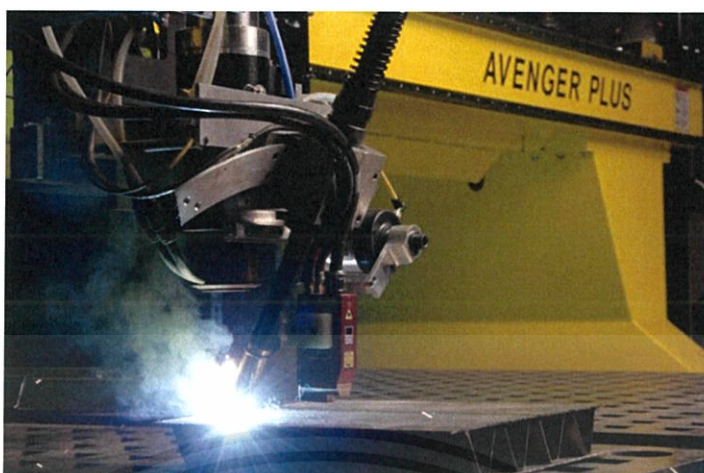
#### 5. การใช้เลเซอร์ในอุตสาหกรรมโลหะ

ในด้านอุตสาหกรรมโลหะ เราใช้เลเซอร์ในการเชื่อมโลหะ ตัดโลหะและเจาะโลหะ การประยุกต์ใช้งานเลเซอร์ในอุตสาหกรรมโลหะสามารถแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.3 การตัดโลหะด้วยเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



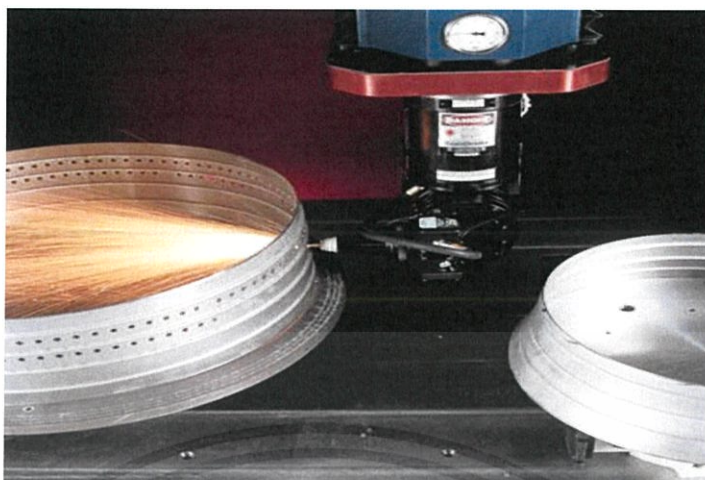
รูปที่ 2.4 การเชื่อมโลหะด้วยเลเซอร์



รูปที่ 2.5 การเจาะโลหะด้วยเลเซอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งรูปที่ 2.6 การเจาะโลหะด้วยเลเซอร์เพื่อหล่อเย็นชิ้นส่วนอุปกรณ์รั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การเจาะโลหะด้วยเลเซอร์เพื่อหล่อเย็นชิ้นส่วน Turbine blade

โดยตารางที่ 2.1 สามารถสรุปสารต้นกำเนิดของเลเซอร์แต่ละชนิดและการใช้ประโยชน์เลเซอร์ได้ดังนี้

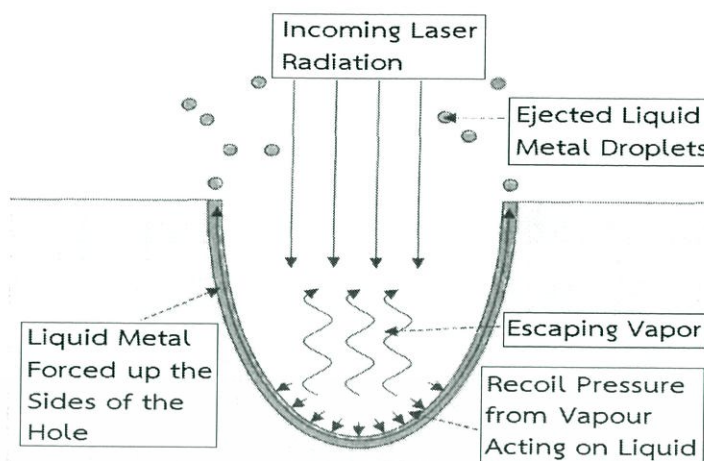
ตารางที่ 2.1 สารต้นกำเนิดของเลเซอร์แต่ละชนิด และการใช้ประโยชน์เลเซอร์

สารต้นกำเนิด	ความยาวคลื่น (nm.)	การใช้ประโยชน์
คาร์บอนไดออกไซด์	9400	เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนทางการแพทย์ ใช้ในอุตสาหกรรมเชื่อมและเจาะโลหะ
เลเซอร์กึ่งตัวนำ	838 – 839	เป็นตัวนำสำหรับการสื่อสารทางโทรศัพท์ใยแสง
ทับทิม	694	ใช้ในอุตสาหกรรมเจาะเพชรและวัดระยะอาวูธ
ฮีเลียม-นีออน	632.8	เป็นแหล่งกำเนิดแสงเพื่อถ่ายภาพ 3 มิติ
อาร์กอน	457.9	เป็นแหล่งกำเนิดแสงเพื่อถ่ายภาพ 3 มิติ
ไนโตรเจน	334	เป็นแหล่งกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ต

## 2.3 กลไกการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์

เมื่อเลเซอร์ตกกระทบกับผิวโลหะ โลหะบางส่วนจะหลอมละลายและระเหยเป็นไอ ภายในรูเจาะนั้นจะมีทั้งโลหะเหลวและไอโลหะ โดยไอโลหะที่อยู่บริเวณผิวของเหลว จะทำให้เกิดความดันไอ (vapor pressure, recoil pressure) กดลงบนผิวของโลหะเหลวและดันให้โลหะเหลวไหลขึ้นไปตามผนังของรูและถูกดันออกสู่ภายนอกของรูเจาะในรูปของหยดของเหลว (liquid droplets) [4,5] กระบวนการดังกล่าวสามารถแสดงดังรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

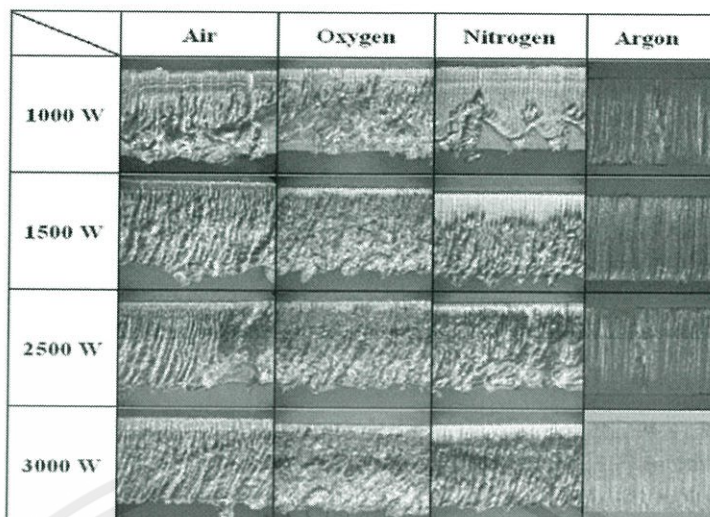


รูปที่ 2.8 กลไกที่เกิดขึ้นในการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ [4]

ตัวอย่างปัจจัยที่ผลต่อคุณภาพของรูมีดังต่อไปนี้

1. ความเข้มของเลเซอร์ที่ใช้เจาะ (laser intensity) การเจาะที่ใช้ความเข้มของเลเซอร์สูงๆ จะทำให้เกิดรูเจาะได้เร็ว เนื่องจากโลหะดูดซับพลังงานเลเซอร์ได้โดยตรง [6-13] และพลังงานเลเซอร์สูงสุดที่ใช้เจาะ (peak power) ควรจะคงที่สม่ำเสมอ [13] เพราะจะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งรู
2. ระยะห่างระหว่างผิวชิ้นงานกับหัวเลเซอร์ (focal plane position) ถ้าผิวชิ้นงานอยู่ที่ระยะจุดโฟกัสของเลเซอร์พอดี รูเจาะจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงเลเซอร์ ถ้าผิวชิ้นงานอยู่ที่ตำแหน่งก่อนหรือหลังระยะโฟกัสของเลเซอร์ รูเจาะจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงเลเซอร์ [9-10]
3. ความถี่ (frequency) การเจาะโลหะด้วยความถี่สูงจะทำให้ใช้เวลาในการเจาะน้อยลง เกิดรูได้เร็วและรูที่ได้มีความลึกมากกว่าการเจาะโดยใช้ความถี่ต่ำ [5,11-12]
4. ความกว้างของพัลส์ (pulse width) การเจาะโดยใช้ความกว้างของพัลส์สูงๆ ก็จะทำให้เกิดรูได้เร็วขึ้นและรูเจาะจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสม่ำเสมอ [6-7,11,14]
5. ชนิดของโลหะที่ทำการเจาะ โลหะที่มีความแข็งสูงจะใช้เวลาในการเจาะ อีกทั้งยังใช้พลังงานเลเซอร์สูงในการเจาะรูให้ได้ขนาดที่ต้องการ [8,10]
6. ความหนาของชิ้นงาน ชิ้นงานที่มีความหนาจะใช้พลังงานเลเซอร์สูงและใช้เวลาในการเจาะนานกว่าชิ้นงานที่บาง [8]
7. ความดันของแก๊สช่วยที่ใช้ในระหว่างกระบวนการเจาะ ความดันของแก๊สช่วยที่เพิ่มเข้าไปจะช่วยให้โลหะเหลวที่อยู่บนบริเวณผิวหน้าของรูเจาะให้ไหลขึ้นไปตามผนังของรูออกสู่ด้านบนของรูเจาะ [10-11,15-18]
8. ชนิดของแก๊สช่วยที่ใช้ในการเจาะ ถ้าแก๊สมีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบจะทำให้ได้รูเจาะที่ลึกกว่าเนื่องจากแก๊สออกซิเจนทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) กับโลหะได้เร็วกว่าแก๊สชนิดอื่น [10,15,18] แต่ในทางกลับกันถ้าแก๊สช่วยเป็นแก๊สเฉื่อยก็จะทำให้รูเจาะนั้นเรียบสม่ำเสมอ [18] เนื่องจากแก๊สเฉื่อยนั้นทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโลหะได้น้อยมาก

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย



รูปที่ 2.9 ลักษณะของรูที่เจาะโดยใช้แก๊สช่วยชนิดต่างๆ [18]

ในปัจจุบันเทคนิคการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์มี 4 ประเภท [5,19-20] มีดังนี้

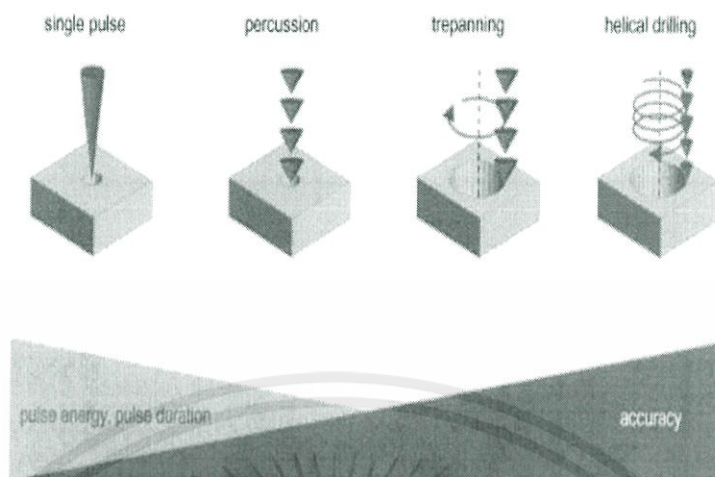
1. Single-shot drilling เป็นการเจาะโดยใช้พัลส์พลังงานสูงเพียงพัลส์เดียว วิธีการเจาะแบบนี้จะเร็วที่สุดและได้ขนาดของรูเจาะใกล้เคียงกับขนาดของลำแสง (laser beam) แต่ขนาดของมุมเอียงของรู (taper) ที่ได้จะค่อนข้างมากเนื่องจากการเป็นการเจาะที่เกิดจากการใช้เพียงพัลส์เดียว

2. Percussion drilling การเจาะด้วยเทคนิคนี้เหมาะกับโลหะที่มีความหนาไม่มาก จะเป็นการเจาะโดยการใช้พัลส์มากกว่า 1 พัลส์ยิงลงบนชิ้นงานที่ตำแหน่งเดียวกัน วิธีการนี้จะช้ากว่าแบบแรกที่ใช้เพียงพัลส์เดียว แต่สามารถเจาะโลหะที่มีความหนามากกว่าและคุณภาพของรูที่เจาะจะดีกว่าแบบ single-shot drilling

3. Trepanning วิธีการนี้นิยมใช้ในการเจาะรูที่ขนาดใหญ่กว่าขนาดลำแสงเลเซอร์ โดยการเจาะนั้นอาศัยการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์เป็นวงกลม รูเจาะที่ได้จะมีคุณภาพดีและมีขนาดมุมเอียงของรูน้อยมาก

4. Helical drilling วิธีการนี้อาศัยการเคลื่อนที่ของเลเซอร์โดยเคลื่อนที่เป็นวงกลมหลายๆรอบ โดยในโครงการนี้จะพิจารณาเฉพาะเลเซอร์ชนิดนีโอดิเมียมแยกเลเซอร์ (Nd:YAG Laser) และเป็นการเจาะโลหะแบบ percussion drilling อย่างไรก็ตามเทคนิคการเจาะด้วยวิธี helical drilling นั้นอยู่ในช่วงพัฒนา ยังไม่ได้นำมาใช้จริงในอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 เทคนิคการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ [5,19-20]

จากเทคนิคการเจาะด้วยเลเซอร์ที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้นจะเห็นว่า percussion drilling เป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการเจาะรูขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.5-2.0 มิลลิเมตร) จำนวนมาก และมีความแม่นยำสูง ดังนั้นในโครงการนี้จึงจะพิจารณาการเจาะโลหะด้วยวิธี percussion เป็นหลัก ซึ่งเลเซอร์ที่ใช้ในการเจาะด้วยเทคนิคนี้คือเลเซอร์ชนิด Nd:YAG ซึ่งจะให้แสงเลเซอร์ที่มีความคลื่นประมาณ 1064 นาโนเมตร และมีการกระจายตัวของแสงเลเซอร์บนพื้นผิวแบบสม่ำเสมอ (uniform beam profile)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

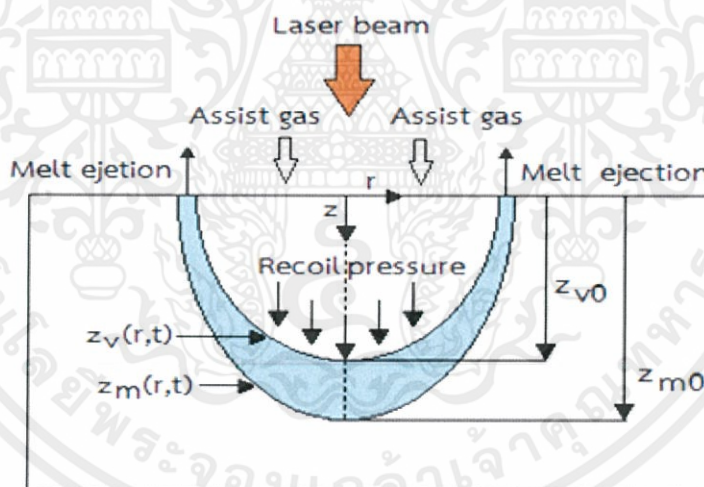
## การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์

### 3.1 แบบจำลองกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์

ในโครงการนี้จะพิจารณาว่าเลเซอร์ที่ใช้คือ Nd:YAG laser ซึ่งจะให้ลำแสงเลเซอร์ที่มีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ โดยสมมติฐานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีดังนี้

1. แบบจำลองดังกล่าวจะไม่พิจารณาการเกิดพลาสมาในกระบวนการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์
2. แบบจำลองดังกล่าวจะไม่พิจารณาการดูดซับพลังงานเลเซอร์ของไอโลหะ
3. การกระจายลำแสงเลเซอร์ในกระบวนการเจาะโลหะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ
4. การเกิดขึ้นสนิม (oxide layer) ที่ผิวของรูเจาะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า surface absorptivity
5. กระบวนการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ที่เกิดขึ้นอยู่ในสภาวะ Quasi-steady-state

ภาพจำลองกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ จะเห็นว่าภายในรูเจาะมีชั้นของผสมระหว่างของแข็ง-ของเหลว และของเหลว-ไอ แยกเป็นชั้นอย่างชัดเจน และโลหะเหลวจะถูกดันให้ไหลขึ้นไปตามผนังรูเจาะขึ้นสู่ด้านบนเนื่องจากความดันไอ (recoil pressure) ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงการไหลของโลหะเหลวที่ไหลออกจากรูเจาะระหว่างการเจาะ

- เมื่อ  $z_{m0}$  คือ ความลึกของชั้นของผสมของแข็ง-ของเหลวที่บริเวณกลางรู
- $z_{v0}$  คือ ความลึกของชั้นของผสมของเหลว-ไอที่บริเวณกลางรู
- $z_m(r,t)$  คือ ความลึกของชั้นของแข็ง-ของเหลวที่เป็นฟังก์ชันตามแนวระยะรัศมี ( $r$ ) และเวลา ( $t$ )
- $z_v(r,t)$  คือ ความลึกของชั้นของเหลว-ไอที่เป็นฟังก์ชันตามแนวระยะรัศมี ( $r$ ) และเวลา ( $t$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

### 3.2 กฎการอนุรักษ์มวล

เมื่อทำการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ จะเกิดการหลอมเหลวของโลหะแข็งกลายเป็นโลหะเหลว ซึ่งส่วนหนึ่งของโลหะเหลวจะเกิดการระเหยกลายเป็นไอ ในขณะที่อีกส่วนหนึ่งจะถูกดันออกมาจากรูในรูปหยดของของเหลว (melt droplets) ดังนั้นสสารอนุรักษ์มวลจะเขียนได้ว่า

$$\dot{m}_s = \dot{m}_m + \dot{m}_v \quad (1)$$

เมื่อ  $\dot{m}_m$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของโลหะเหลวที่ถูกดันออกมาจากรูในรูปหยดของเหลว (kg/s)

$\dot{m}_s$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของโลหะที่ละลาย (kg/s) และ

$\dot{m}_v$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของโลหะเหลวที่กลายเป็นไอ (kg/s)

จากสมการ (1) อาจเขียนได้เป็น

$$S_{sl}\rho_s \frac{\partial z_m}{\partial t} = S_m\rho_l v_m + S_{lv}\rho_l \frac{\partial z_v}{\partial t} \quad (2)$$

เมื่อ  $S_{lv}$  คือ พื้นที่ผิวระหว่างของเหลว-ไอ (m<sup>2</sup>)

$S_m$  คือ พื้นที่บริเวณที่โลหะหลอมเหลวไหลออก (m<sup>2</sup>)

$S_{sl}$  คือ พื้นที่ผิวระหว่างของแข็ง-ของเหลว (m<sup>2</sup>)

$v_m$  คือ ความเร็วของโลหะหลอมเหลวที่ไหลออกจากรูเจาะ (m/s)

$z_m$  คือ ระยะตามแนวตั้งระหว่างของแข็ง-ของเหลว (m)

$z_v$  คือ ระยะตามแนวตั้งระหว่างของเหลว-ไอ (m)

$\rho_l$  คือ ความหนาแน่นของโลหะเหลว (kg/m<sup>3</sup>) และ

$\rho_s$  คือ ความหนาแน่นของโลหะแข็ง (kg/m<sup>3</sup>)

โดยพื้นที่บริเวณที่โลหะหลอมเหลวไหลออก ( $S_m$ ) หาได้จากสมการ

$$S_m = \pi(r_{m0}^2 - r_{v0}^2) \quad (3)$$

เมื่อ  $r_{m0}$  คือ รัศมีของชั้นระหว่างของแข็ง-ของเหลว (m) และ

$r_{v0}$  คือ รัศมีของชั้นระหว่างของเหลว-ไอ (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากพิจารณารูเงาะมีลักษณะเป็นพาราโบลิกจะได้ว่า

$$S_{sl} = \frac{\pi r_{m0}}{6z_{m0}^2(t)} - [(r_{m0}^2 - 4z_{m0}^2(t))^{\frac{3}{2}} - r_{m0}^3] \quad (4)$$

$$S_{lv} = \frac{\pi r_{v0}}{6z_{v0}^2(t)} - [(r_{v0}^2 - 4z_{v0}^2(t))^{\frac{3}{2}} - r_{v0}^3] \quad (5)$$

โดยความเร็วของโลหะเหลวที่ไหลออกจากรูเงาะหาได้จากสมการ [15]

$$p_{vap} + p_{eff} = \frac{\rho l v_m^2}{2} \quad (6)$$

เมื่อ  $p_{eff}$  คือ ความดันประสิทธิผลของแก๊สช่วย ( $N/m^2$ ) และ  
 $p_{vap}$  คือ ความดันไอเนื่องจาก recoil pressure ( $N/m^2$ )

โดยความดันไอ ( $p_{vap}$ ) หาได้จากสมการ Clausius-Clapeyron [15]

$$p_{vap} = p_0 \exp \left[ \frac{L_v}{R} \left( \frac{1}{T_{vap}} - \frac{1}{T_{l0}} \right) \right] \quad (7)$$

เมื่อ  $p_0$  คือ ความดันบรรยากาศ ( $N/m^2$ )  
 $L_v$  คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ( $kJ/kg$ )  
 $R$  คือ ค่าคงที่ของโลหะในสถานะแก๊ส ( $J/kg.K$ )  
 $T_{vap}$  คือ อุณหภูมิจุดเดือดของโลหะ ( $K$ ) และ  
 $T_{l0}$  คือ อุณหภูมิผิวโลหะเหลว ( $K$ )

### 3.3 กฎการอนุรักษ์พลังงาน

เมื่อโลหะมีการหลอมเหลวและกลายเป็นไอจะทำให้เกิดรอยต่อระหว่างของเหลว-ไอ (liquid-vapor) และของแข็ง-ของเหลว (solid-liquid) โดยที่สมการอนุรักษ์พลังงานที่บริเวณรอยต่อของเหลว-ไอ สามารถเขียนได้เป็น

$$\rho_l L_v \frac{\partial z_v}{\partial t} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial z} \left[ 1 + \left( \frac{\partial z_v}{\partial r} \right)^2 \right] = I_{abs} + \rho_l H_{ox} \eta_{ox} \frac{\partial z_m}{\partial t} - h_g (T_{l0} - T_g) \quad (8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$h_g$	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแก๊สช่วย ( $W/m^2.K$ )
	$I_{abs}$	คือ ค่าความเข้มของเลเซอร์ที่โลหะดูดซับ ( $W/m^2$ )
	$k_l$	คือ ค่าการนำความร้อนของของเหลว ( $W/m.K$ )
	$H_{ox}$	คือ เอนทัลปีของการออกซิเดชัน ( $J/mol$ )
	$r$	คือ ระยะตามแนวรัศมี (m)
	$T_g$	คือ อุณหภูมิของแก๊สช่วย (K)
	$T_l$	คือ อุณหภูมิของโลหะเหลว (K) และ
	$\eta_{ox}$	คือ ประสิทธิภาพการออกซิเดชันเท่ากับ 0.26 [15]

โดยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแก๊สช่วย ( $h_g$ ) หาได้จากสมการ [15]

$$h_g = \frac{k_g}{2r_l} \left( C_c Re^{n_c} Pr^3 \right) \quad (9)$$

$$Re = \frac{\rho_g v_g 2r_l}{\mu_g} \quad (10)$$

เมื่อ	$k_g$	คือ ค่าการนำความร้อนของแก๊สช่วย ( $W/mK$ )
	$Pr$	คือ Prandtl number
	$r_l$	คือ รัศมีลำแสงเลเซอร์ (m)
	$Re$	คือ Reynolds number
	$v_g$	คือ ความเร็วการไหลของแก๊สช่วย (m/s)
	$\mu_g$	คือ ค่าความหนืดของแก๊สช่วย (N/ms)
	$\rho_g$	คือ ความหนาแน่นของแก๊สช่วย ( $kg/m^3$ ) และ
	$C_c, n_c$	คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.228 และ 0.731 ตามลำดับ [15]

โดยค่าความเข้มของเลเซอร์ที่โลหะดูดซับ ( $I_{abs}$ ) หาได้จากสมการ

$$I_{abs} = \frac{P_{peak} \times A_l}{\pi r_l^2} \quad (11)$$

เมื่อ	$A_l$	คือ ค่าการดูดซับพลังงานของโลหะเหลว (มีค่าเท่ากับ 0.231 สำหรับเหล็กกล้าอะมุน)
	$P_{peak}$	คือ พลังงานสูงสุดของพัลส์ (W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่บริเวณรอยต่อระหว่างของแข็ง-ของเหลว สมการอนุรักษ์พลังงานจะเขียนได้เป็น

$$\rho_s L_m \frac{\partial z_m}{\partial t} = \left( k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial z} \right) \left[ 1 + \left( \frac{\partial z_m}{\partial r} \right)^2 \right] \quad (12)$$

เมื่อ  $k_s$  คือ ค่าการนำความร้อนของโลหะ (W/m.K) และ  
 $L_m$  คือ ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (kJ/kg)

ที่จุดศูนย์กลางรู ( $r=0$ ) จะได้

$$z_m(r, t) = z_{m0}(t) - \frac{r^2}{r_{m0}^2} z_{m0}(t) \quad (13)$$

$$z_v(r, t) = z_{v0}(t) - \frac{r^2}{r_{v0}^2} z_{v0}(t) \quad (14)$$

โดยที่  $\frac{\partial z_m}{\partial r} = 0$  และ  $\frac{\partial z_v}{\partial r} = 0$  ดังนั้นสมการ (7) ที่รอยต่อของเหลว-ไอจะเขียนได้เป็น

$$\rho_l L_v \frac{\partial z_v}{\partial t} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial z} = I_{abs} + \rho_l H_{ox} \eta_{ox} \frac{\partial z_m}{\partial t} - h_g (T_{l0} - T_g) \quad (15)$$

และสมการ (11) ที่รอยต่อของแข็ง-ของเหลวจะเขียนได้เป็น

$$\rho_s L_m \frac{\partial z_m}{\partial t} = \left( k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial z} \right) \quad (16)$$

หากสมมติให้การกระจายตัวของอุณหภูมิในของแข็งและของเหลวเป็นเส้นตรงเมื่อแทนสมการ (12) และ (13) ลงใน (14) และ (15) จะได้สมการที่บริเวณของเหลว-ไอ และของแข็ง-ของเหลวคือ

$$\rho_l L_v \frac{dz_{v0}(t)}{dt} - k_l \frac{T_m - T_{l0}}{z_{m0}(t) - z_{v0}(t)} = I_{abs} + \rho_l H_{ox} \eta_{ox} \frac{dz_{m0}(t)}{dt} - h_g (T_{l0} - T_g) \quad (17)$$

$$\rho_s L_m \frac{dz_{m0}(t)}{dt} = k_s \frac{T_0 - T_{l0}}{2\sqrt{\alpha_s t}} - k_l \frac{T_m - T_{l0}}{z_{m0}(t) - z_{v0}(t)} \quad (18)$$

เมื่อ  $T_0$  คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของโลหะ (K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น  $\alpha_s$  คือ ค่าการแพร่ความร้อนของโลหะ ( $m^2/s$ ) ถึงเข้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมสมการ (16) และ (17) เข้าด้วยกันจะได้สมการ

$$\rho_s L_m \frac{dz_{m0}(t)}{dt} + \rho_l L_v \frac{dz_{v0}(t)}{dt} = k_s \frac{T_0 - T_m}{2\sqrt{\alpha_s t}} + I_{abs} + \rho_l H_{ox} \eta_{ox} \frac{dz_{m0}(t)}{dt} - h_g (T_{l0} - T_g) \quad (19)$$

จัดรูปสมการ

$$z'_{v0}(t) = \frac{1}{\rho_l L_v} \left[ I_{abs} + h_g (T_g - T_{l0}) + \frac{k_s (T_0 - T_m)}{2\sqrt{\alpha_s t}} + \rho_l H_{ox} \eta_{ox} z'_{m0}(t) - \rho_s L_m z'_{m0}(t) \right] \quad (20)$$

โดย  $z'_{v0}(t) = \frac{dz_{v0}(t)}{dt}$  และ  $z'_{m0}(t) = \frac{dz_{m0}(t)}{dt}$

### 3.4 สมการความดันของแก๊สช่วยที่ออกจากหัวฉีด

ในแบบจำลองนี้พิจารณาว่าแก๊สช่วยที่ใช้คือ อ็อกซิเจน ซึ่งจะทำให้เกิดผล 3 ประการต่อการเจาะโลหะได้แก่ ทำให้เกิดการอ็อกซิเดชันกับโลหะ ช่วยทำให้เกิดการหล่อเย็นที่ผิวโลหะเหลว และ ประการสุดท้ายความดันของแก๊สช่วยจะเสริมความดันไอ (recoil pressure) ทำให้มีความดันกระทำต่อผิวหน้าโลหะเหลวมากขึ้น ความดันของแก๊สช่วยหาได้จากสมการ [15]

$$p_{eff} = p_c \left( \frac{A_{eff}}{A_{eff} + A_{rl}} \right) \quad (21)$$

เมื่อ  $A_{eff}$  คือ พื้นที่ประสิทธิผลของการไหลของแก๊สช่วย ( $m^2$ )

$A_{rl}$  คือ พื้นที่ของการสูญเสียความดันแก๊สช่วย ( $m^2$ ) และ

$p_c$  คือ ความดันวิกฤต ( $N/m^2$ )

โดยพื้นที่ประสิทธิผลของการไหลของแก๊สช่วย ( $A_{eff}$ ) และพื้นที่ของการสูญเสียความดันแก๊สช่วย ( $A_{rl}$ ) [15] หาได้จากสมการ

$$A_{eff} = \pi r_l^2 \quad (22)$$

$$A_{rl} = d_n \pi z_n \quad (23)$$

เมื่อ  $d_n$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางที่บริเวณทางออกของหัวฉีด (m) และ

$z_n$  คือ ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับชิ้นงาน (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันของแก๊สช่วยที่ทางออกของหัวฉีด หาได้โดยพิจารณาค่าความดันที่ทางออก มีค่าเท่ากับความดันวิกฤติ (critical pressure,  $p_c$ ) [15] หาได้จากสมการ

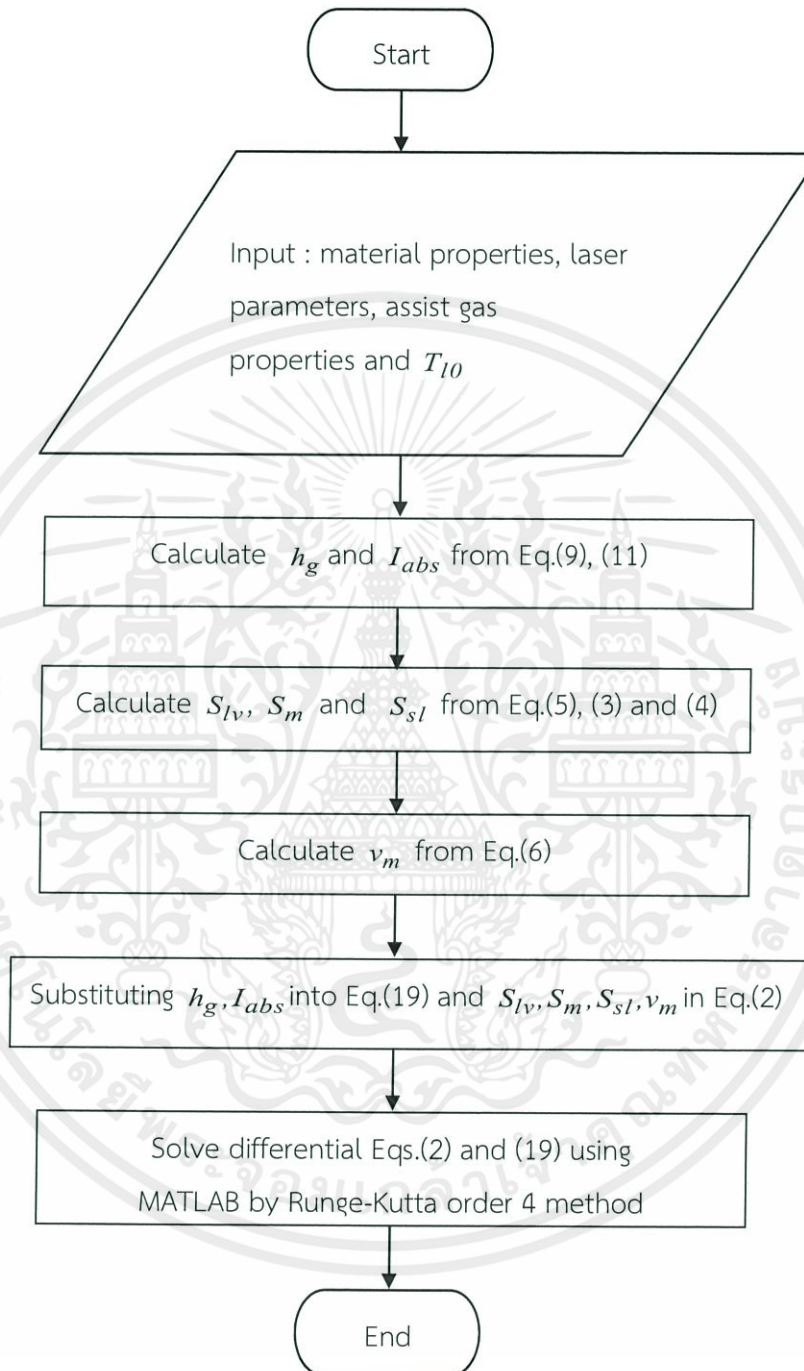
$$p_c = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} p_i \quad (24)$$

เมื่อ  $p_i$  คือ ความดันภายในหัวฉีด ( $\text{N/m}^2$ ) และ  
 $\gamma$  คือ อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ  $\gamma$  เท่ากับ 1.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 ขั้นตอนการคำนวณ



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์นั้นจะพิจารณาโลหะเหล็กกล้า  
ละมุน และแก๊สช่วยอ็อกซิเจนซึ่งมีคุณสมบัติตามตาราง

ตาราง 4.1 คุณสมบัติทางความร้อนของเหล็กกล้าละมุน

คุณสมบัติของเหล็กกล้าละมุน	
ความหนาแน่นของโลหะ, $\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	7800
ความหนาแน่นของโลหะเหลว, $\rho_l$ (kg/m <sup>3</sup> )	6980
ค่าความร้อนจำเพาะของโลหะ, $c_{p,s}$ (J/kg.K)	628
ค่าความร้อนจำเพาะของโลหะเหลว, $c_{p,l}$ (J/kg.K)	748
ค่าการแพร่ความร้อนในโลหะ, $\alpha_s$ (m <sup>2</sup> /s)	$0.014 \times 10^{-3}$
ค่าการแพร่ความร้อนในโลหะเหลว, $\alpha_l$ (m <sup>2</sup> /s)	$0.007 \times 10^{-3}$
ค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลว, $L_m$ (J/kg)	$276 \times 10^3$
ค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอ, $L_v$ (J/kg)	$6088 \times 10^3$
อุณหภูมิเริ่มต้นของโลหะ, $T_0$ (K)	300
อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะ, $T_m$ (K)	1808
อุณหภูมิจุดเดือดของโลหะ, $T_{vap}$ (K)	3100
มวลโมเลกุลของโลหะ, $M_m$ (kg/mol)	0.05575

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

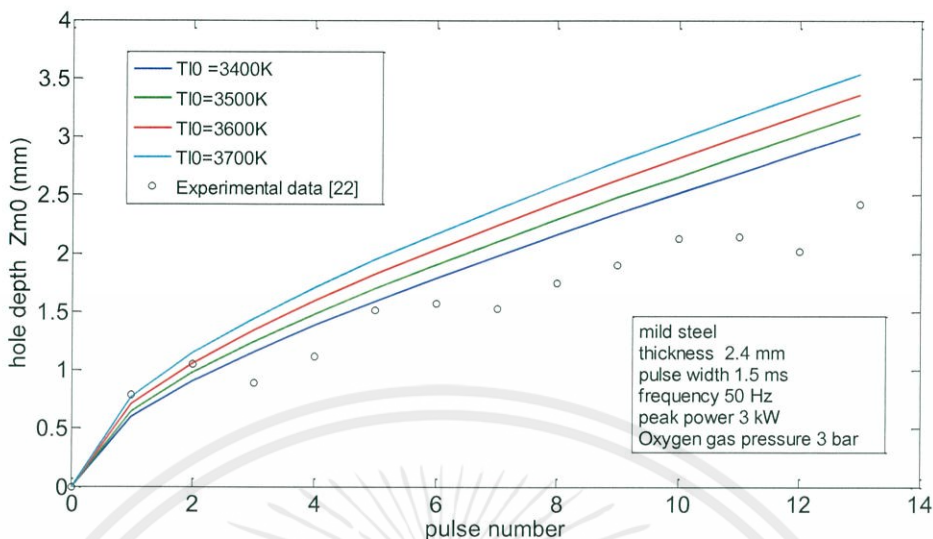
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติเชิงความร้อนของแก๊สช่วยออกซิเจนและพารามิเตอร์หัวฉีดแก๊ส

คุณสมบัติเชิงความร้อนของแก๊สช่วยออกซิเจนและพารามิเตอร์หัวฉีด	
ความดันภายในหัวฉีด, $p_i$ (N/m <sup>2</sup> )	$3 \times 10^5$
ความเร็วการไหลของแก๊ส, $v_g$ (m/s)	377
ความหนาแน่นของแก๊สช่วย, $\rho_g$ (kg/m <sup>3</sup> )	1.3007
ค่าความหนืดของแก๊สช่วย, $\mu_g$ (N/m <sup>2</sup> .s)	$2.01 \times 10^{-5}$
Prandtl number, $Pr$	0.73
ค่าการนำความร้อนของแก๊สช่วย, $k_g$ (W/m.K)	0.0259
อุณหภูมิของแก๊สช่วยภายในหัวฉีด, $T_i$ (K)	300
เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของหัวฉีด, $d_n$ (m)	$1.5 \times 10^{-3}$
รัศมีแสงเลเซอร์, $r_l$ (m)	$2.6 \times 10^{-4}$
ระยะระหว่างหัวฉีด-ชิ้นงาน, $z_n$ (m)	$2.2 \times 10^{-3}$

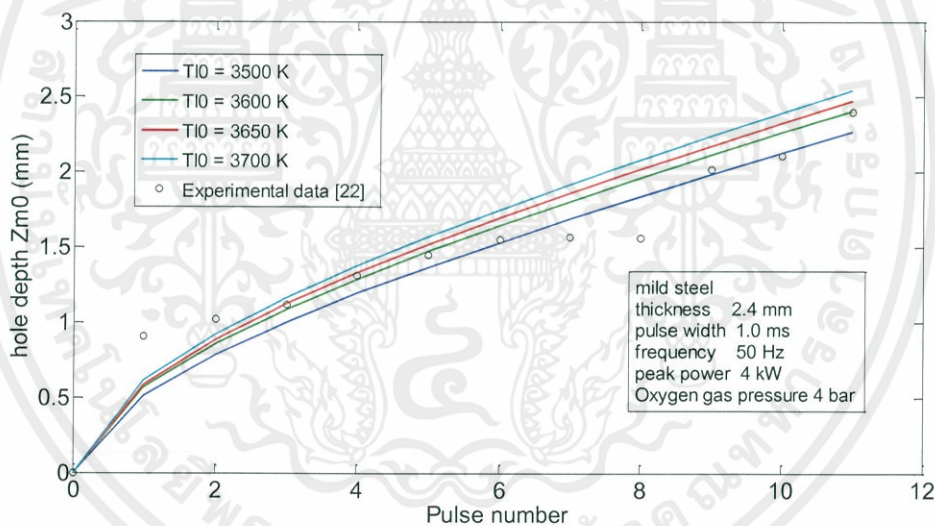
ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์จะอาศัยการแก้สมการอนุกรมมวลและสมการอนุกรมพลังงาน แต่ทั้งนี้เนื่องจากทั้งสองสมการเป็นสมการเชิงอนุพันธ์จึงเลือกใช้วิธีการแก้สมการเชิงอนุพันธ์โดยวิธี Runge-Kutta อันดับ 4 โดยผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถอธิบายได้ดังนี้

การเปรียบเทียบการคาดคะเนความลึกของรูเจาะจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง 2 ชุด โดยแต่ละชุดการทดลองจะใช้เงื่อนไขในการเจาะโลหะที่แตกต่างกัน จากข้อมูลผลการทดลองสมมติให้อุณหภูมิบริเวณผิวของโลหะเหลวมีค่าสูงกว่าจุดเดือดเล็กน้อย กล่าวคือประมาณ 3,200-5,000 K จากการคำนวณโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าอุณหภูมิที่ผิวโลหะเหลวในช่วงระหว่าง 3,400 ถึง 3,700 K จะให้การคาดคะเนที่ใกล้เคียงเมื่อเทียบกับผลการทดลอง ค่าเบี่ยงเบนของอุณหภูมิที่ผิวโลหะเหลวในช่วงดังกล่าวจะทำให้เกิดการเบี่ยงเบนเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าคาดคะเนความลึกของรูเจาะที่อุณหภูมิ 3,500 K จะใกล้เคียงกับผลการทดลองที่นำมาอ้างอิง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ดังนั้นในโครงการนี้จึงเลือกอุณหภูมิที่ผิวโลหะเหลว  $T_{10}$  เท่ากับ 3,500 K และใช้อุณหภูมินี้ตลอดทั้งการคำนวณและแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบระหว่างการคาดคะเนความลึกของรูกับความลึกของรูที่ได้จากการทดลอง [19]

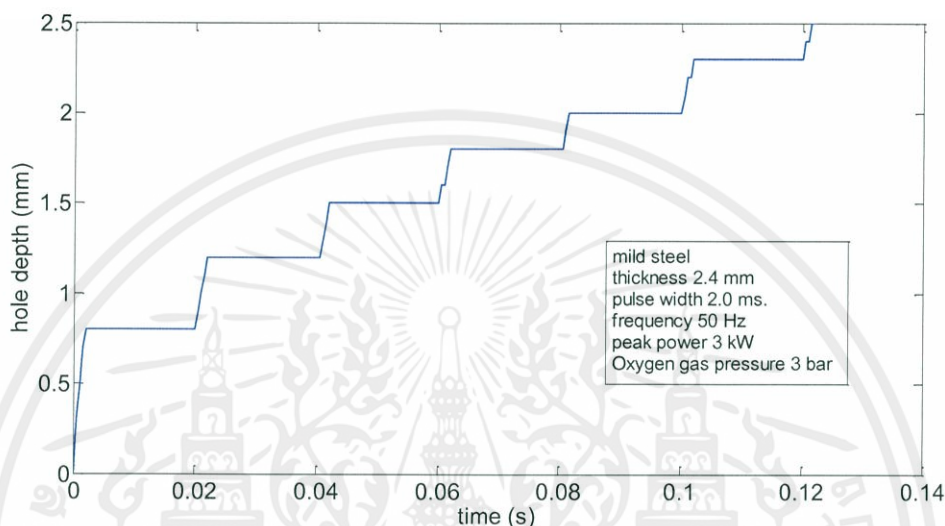


รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบระหว่างการคาดคะเนความลึกของรูกับความลึกของรูที่ได้จากการทดลอง [19]

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์จะใช้ความถี่ในการเจาะ 50 เฮิรท์ และใช้เวลา 20 ms./รอบ โดยกระบวนการเจาะดังกล่าวจะประกอบด้วย 2 ช่วง นั่นคือช่วงที่มีการเจาะ 2 ms. ( $t_{on}$ ) และช่วงพักการเจาะ ( $t_{off}$ ) 18 ms.

เมื่อเจาะพัลส์ที่ 1 ในช่วงเวลาที่มีการเจาะโลหะจะดูดซับพลังงานเลเซอร์เต็มที่ โลหะจะหลอมเหลวและเริ่มเกิดเป็นรูโดยความลึกของรูเจาะจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้กราฟในช่วงดังกล่าวมีความชันสูง ต่อมาช่วงเวลาที่พักการเจาะจะเป็นช่วงที่หยุดการเจาะเอาไว้ก่อนจะเจาะพัลส์ที่ 2 ช่วงนี้โลหะเหลวที่อยู่ในรูเจาะจะแข็งตัวทำให้ความลึกของรูลดลง แต่เนื่องจากชั้นของการแข็งตัวของโลหะเหลวมีความหนาเพียงเล็กน้อยจึงพิจารณาให้ความลึกของรูเจาะคงที่ ลักษณะกราฟของช่วงพักการเจาะ

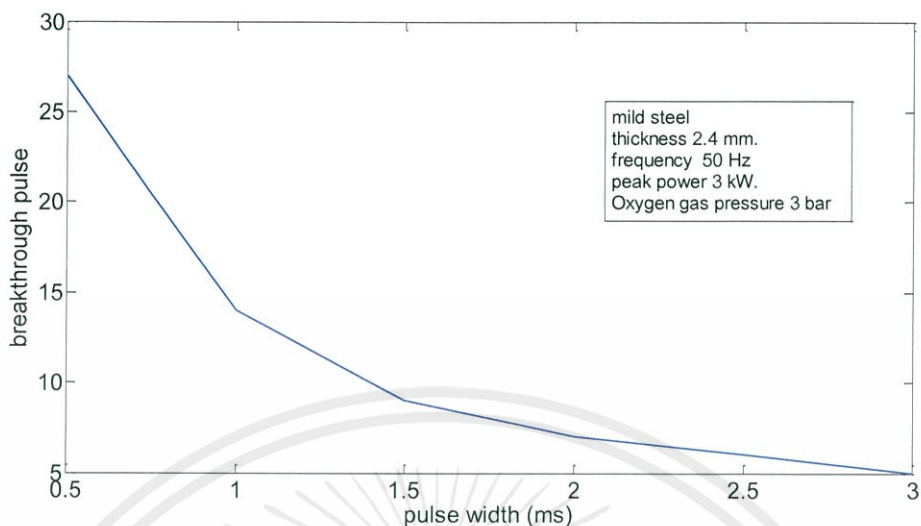
จะเป็นเส้นตรงตามแนวอน เมื่อเจาะพัลส์ที่ 2 ความลึกของรูจะเพิ่มขึ้นแต่จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากในรูเจาะมีความดันไอ ไอโลหะ มุมเอียงภายในรูเจาะและการสะท้อนกลับของพลังงานเลเซอร์ บางส่วน ปัจจัยเหล่านี้ทำให้โลหะดูดซับพลังงานเลเซอร์ได้น้อยลง และพัลส์ต่อไปก็จะมีลักษณะเหมือนเดิมโดยจะเจาะประมาณ 7 พัลส์ในการเจาะทะลุเหล็กกล้าอะลูมิเนียมที่มีความหนา 2.4 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความลึกของรูในช่วงที่มีการเจาะและช่วงพักการเจาะ

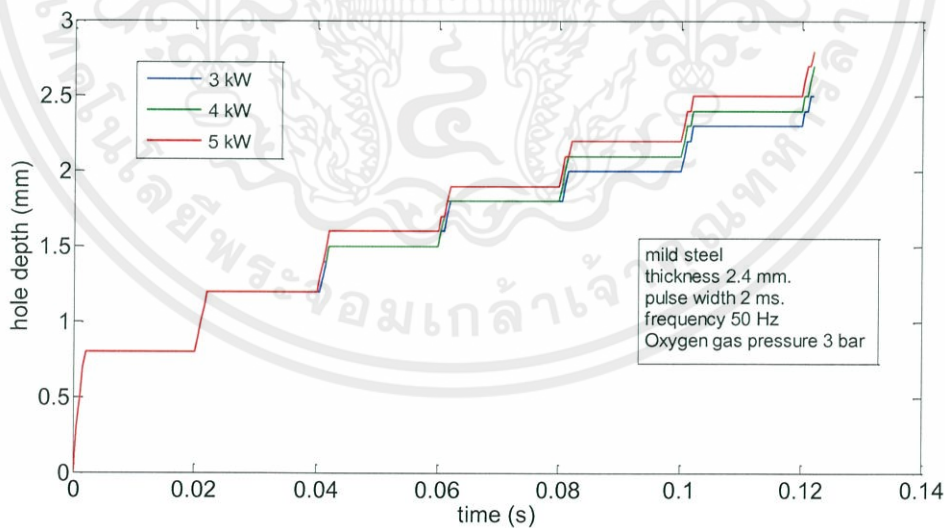
จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัลส์ที่ใช้ในการเจาะทะลุ (breakthrough pulse) กับความกว้างพัลส์ (pulse width) ที่ 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 และ 3.0 มิลลิวินาที พบว่าเมื่อความกว้างพัลส์มากขึ้นส่งผลให้จำนวนพัลส์ที่ใช้ในการเจาะทะลุชิ้นงานลดลง เนื่องจากเมื่อความกว้างพัลส์มีค่ามากขึ้น พลังงานเลเซอร์ต่อพัลส์ที่ชิ้นงานดูดซับก็จะมากขึ้นตามไปด้วย โลหะจะหลอมเหลวและกลายเป็นไอมากขึ้น ดังนั้นความกว้างพัลส์ที่มีค่ามากก็จะใช้จำนวนพัลส์ในการเจาะทะลุชิ้นงานน้อยลงเช่นกัน เช่น ถ้าใช้ความกว้างพัลส์ 1.5 มิลลิวินาที จะใช้จำนวนพัลส์ประมาณ 8 พัลส์ในการเจาะทะลุเหล็กกล้าอะลูมิเนียมที่มีความหนา 2.4 มิลลิเมตร แต่หากใช้ความกว้างพัลส์ 3 มิลลิวินาทีจะใช้จำนวนพัลส์เพียง 5 พัลส์ในการเจาะทะลุเหล็กกล้าอะลูมิเนียมที่มีความหนาเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ผลของความกว้างพัลส์กับและจำนวนพัลส์ที่ใช้ในการเจาะทะลุ

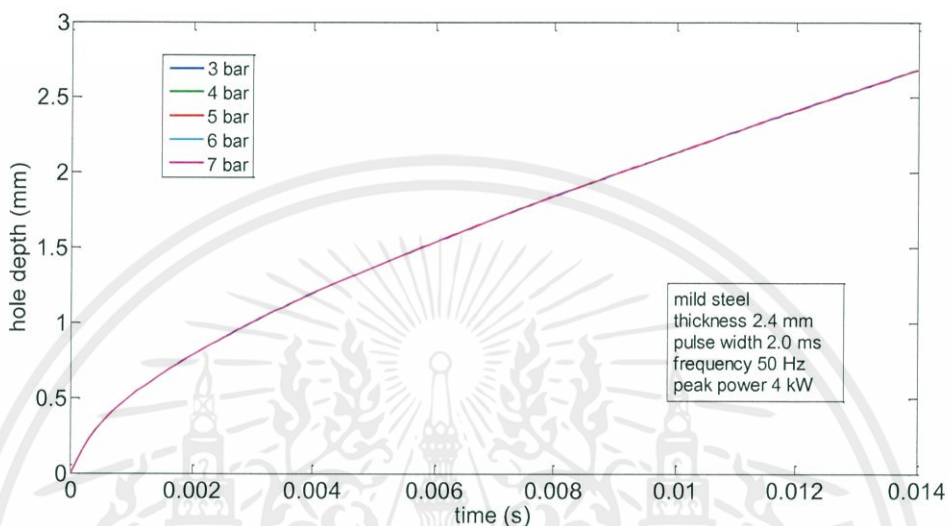
จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของรูเจาะและพลังงานเลเซอร์ที่ใช้ในการเจาะ โดยแปรค่าพลังงานเลเซอร์ 3 ระดับ คือ 3 4 และ 5 กิโลวัตต์ โดยกำหนดการเจาะทั้งหมด 7 พัลส์ พบว่าการเจาะโลหะด้วยพลังงานเลเซอร์ที่มีค่าสูงส่งผลให้ความลึกของรูเจาะลึกมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเจาะเท่ากัน เนื่องจากที่พลังงานเลเซอร์สูงๆ จะทำให้โลหะหลอมเหลวและเกิดเป็นรูเจาะอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 4.5



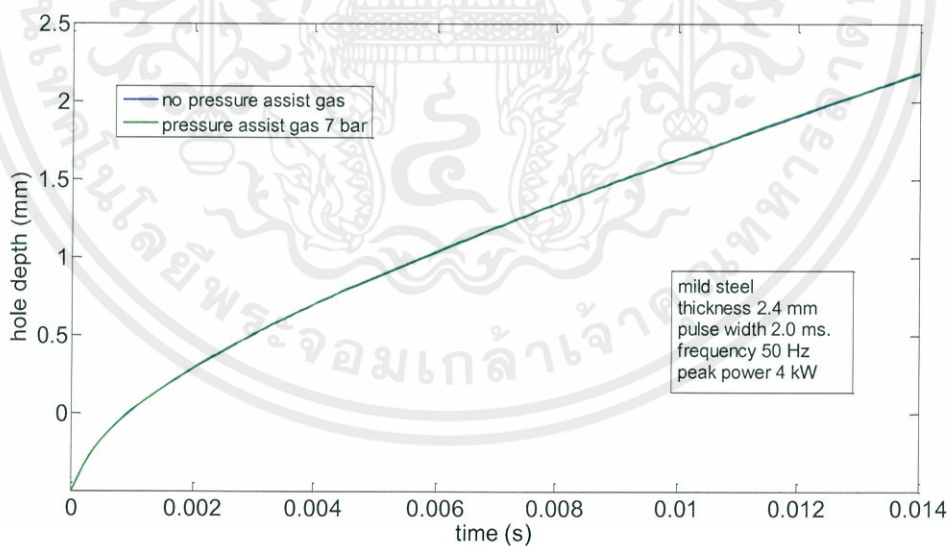
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบระหว่างพลังงานเลเซอร์ที่ใช้ในการเจาะที่ 3 4 และ 5 kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของรูเจาะและความดันของแก๊สช่วยที่ใช้ในการเจาะ พบว่าความดันของแก๊สช่วยแทบจะไม่มีผลต่อความลึกของรูเจาะ แต่แก๊สช่วยจะเพิ่มความดันไอและช่วยดันโลหะเหลวที่อยู่ในรูเจาะให้ไหลขึ้นไปตามผนังของรูออกสู่ด้านบนของรูเจาะ ทำให้ชั้นโลหะเหลวในรูเจาะมีความหนาลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7



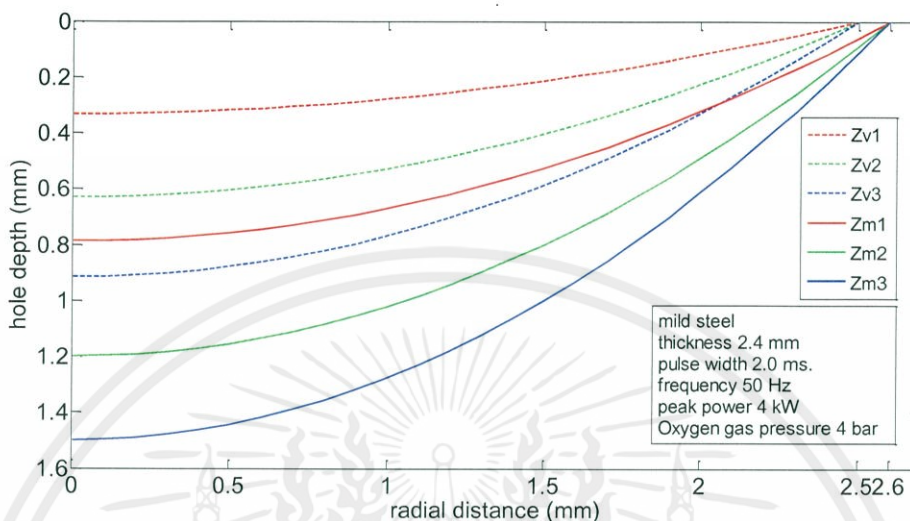
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบความดันของแก๊สช่วยที่ใช้ในการเจาะที่ความดัน 3 4 5 6 และ 7 bar



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบความลึกของรูเจาะที่มีแก๊สช่วยและไม่มีแก๊สช่วยในกระบวนการเจาะ

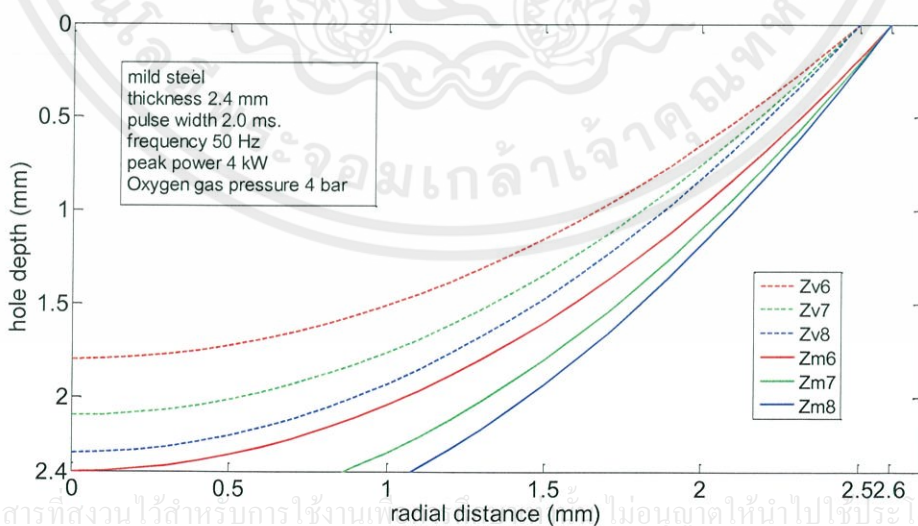
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคาดคะเนความลึกของรูเจาะที่พัลส์ต่างๆ จำนวน 3 พัลส์แรกของการเจาะแสดงความลึกของชั้นผิวระหว่างของเหลว-ไอ (Zv) และชั้นผิวระหว่างของแข็ง-ของเหลว (Zm) ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การคาดคะเนความลึกของรูเจาะที่พัลส์ต่างๆจำนวน 3 พัลส์แรกของการเจาะ

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าเมื่อมีการเจาะทะลุชิ้นงานแล้ว ถ้ายังมีการเจาะพัลส์ต่อไป จะทำให้ขนาดของรูเจาะตามแนวรัศมีขยายใหญ่ขึ้น จนกระทั่งรูเจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเลเซอร์ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วขนาดของรูเจาะที่ได้จะมีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเลเซอร์ เนื่องจากการนำความร้อนตามแนวรัศมีทำให้ผนังรูเจาะหลอมเหลวและขยายใหญ่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การคาดคะเนลักษณะของรูเจาะเมื่อเจาะทะลุแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ โดยพิจารณารวมผลของการเกิดออกซิเดชันเนื่องจากการใช้ออกซิเจนเป็นแก๊สช่วยเข้าไว้ในแบบจำลองด้วย โดยโลหะที่นำมาพิจารณาคือเหล็กกล้าละมุน (mild steel) ผลที่ได้พบว่า

1. ช่วงแรกของการเจาะโลหะ ความลึกของรูเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากโลหะดูดซับพลังงานเลเซอร์เต็มที่ ช่วงที่สองของการเจาะรูเจาะจะมีความลึกเพิ่มขึ้น แต่เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากโลหะบางส่วนหลอมเหลวและกลายเป็นความดันไอ การสะท้อนกลับของเลเซอร์บางส่วน และการแข็งตัวของชั้นโลหะเหลว ปัจจัยเหล่านี้ทำให้โลหะดูดซับพลังงานเลเซอร์ได้น้อยลง
2. ความลึกของรูเจาะนั้นขึ้นอยู่กับพลังงานสูงสุดของพัลส์ เลเซอร์ที่มีพลังงานสูงสุดของพัลส์สูงจะทำให้ได้รูที่มีความลึกมากกว่า
3. เมื่อความกว้างของพัลส์เพิ่มขึ้น ความลึกที่เจาะได้จะมากขึ้น
4. แก๊สช่วยนั้นมีผลต่อความลึกของรูเจาะเพียงเล็กน้อย แต่แก๊สช่วยจะช่วยดันโลหะเหลวที่อยู่ในรูเจาะให้ขึ้นไปตามผนังรูออกสู่ด้านบนของรูเจาะ ทำให้ความหนาของชั้นโลหะเหลวมีความหนาลดลง

#### 5.2 วิจารณ์ผลจากแบบจำลอง

โครงการนี้เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ และทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อคุณภาพของรูเจาะ โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข 2 มิติ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองที่มีผู้ทำการศึกษามาแล้วก่อนหน้านี้พบว่าแบบจำลองยังไม่สอดคล้องกับผลการทดลองเท่าที่ควร เนื่องจากมีการลดตัวแปรต่างๆเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ และในส่วนของทางเลือกวิธีแก้สมการเชิงอนุพันธ์ยังไม่เหมาะสมกับแบบจำลอง ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้กำหนดให้รูเจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงเลเซอร์ แต่ในความเป็นจริงแล้วรูเจาะจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า เนื่องจากในกระบวนการเจาะมีการนำความร้อนตามแนวรัศมี ทำให้ผนังของรูเจาะหลอมเหลวและขยายใหญ่ขึ้น

#### 5.3 ข้อเสนอแนะ

ถ้ามีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตควรที่จะศึกษาตัวแปรที่ไม่มีสมการทางคณิตศาสตร์อธิบายเอาไว้ เช่น การเกิดพลาสมาในกระบวนการเจาะ และเลือกใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่เหมาะสมในการแก้สมการทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



```

Slv = ((22/7)*r2*((r2^2+(4*Zv^2))^1.5 - r2^3))/(6*Zv^2);
Ssl = ((22/7)*r1*((r1^2+(4*Zm^2))^1.5 - r1^3))/(6*Zm^2);
EQ = S+(Slv*pl*dZv)-(Ssl*ps*dZm);
dZm = solve(EQ,dZm)
%after press 'ENTER' will get function dZm in form dZm = dZm(t,Zm)
%chang dZm(t,Zm) in form dZm(t,y)
f=inline('((3490*(1421312787727201/(584036387418800128000*((82641413450
21879*t)/147573952589676412928)^(1/2)) -
2263050910867553/22279220101120000)*((11*(4*((1353*y)/10000 +
(159*t)/1250 - (169/400000000*t)^(1/2)))^2 +
4722366482869645/75557863725914323419136)^(3/2))/14000 -
53192736063043687/4332790137498830962146934784000)/(3*((1353*y)/10000
+ (159*t)/1250 - (169/400000000*t)^(1/2)))^2) -
5936096427756511/4611686018427387904)/((3014431410585653*((11*(4*((1353
*y)/10000 + (159*t)/1250 - (169/400000000*t)^(1/2)))^2 +
4722366482869645/75557863725914323419136)^(3/2))/14000 -
53192736063043687/4332790137498830962146934784000))/(19151192064000*((1
353*y)/10000 + (159*t)/1250 - (169/400000000*t)^(1/2)))^2) -
(1300*((3768406289343523*(4*y^2 +
5107711587871809/75557863725914323419136)^(3/2))/4611686018427387904 -
20498278165262826505798514549649/14272476927059598810582859694494951363
82746624))/y^2)');
[t,y]=ode45(f,[10^-20:0.5*10^-3:14*10^-3],10^-20)
%ode45 is ordinary differential equation solving by Runge-Kutta order4
%10^-20 is lower value
%0.5*10^-3 is width of time step
%14*10^-3 is upper value
%10^-20 is initial condition
plot(t,y) % t is time (ms)
          % y is hole depth (mm)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ผลการคำนวณ

```

>> dir

.
..
3ku3bar1.5ms.asv
3ku3bar1.5ms.m
4kU4bar1ms.asv
4kU4bar1ms.m
BO.Spulse
B11.asv
Example.asv
Fn.asv
PEQ.asv
PEQ.m

PEQbreakthroug.asv
PEQbreakthroug.m
Untitled1.asv
Untitled2.asv
Untitled3.asv
Untitled4.asv
Untitled5.asv
Untitled6.asv
Untitled7.asv
ae.asv
aey.asv

assistgas.m
code.pressure.assist.gas.asv
code.asv
f.asv
fal.asv
graph.m
graph1.asv
graph1.m
IntegralEQ.m
interpolation.asv
interpolation.m

miv.asv
order.m
peakpower.asv
pressure.m
radius.eq.asv
sample.asv
stiff.asv
test1.asv

/ >>

```

```

>> code.m

dZm =

(13450*(14213127877201/(5940363974188800128000*(1.0264141346001879^c)/(1475739525896764129508)^(1/2)) - 3283050910867553/2227

t =

0.0000
0.0005
0.0010
0.0015
0.0020
0.0025
0.0030
0.0035
0.0040
0.0045

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MATLAB 7.8.0 (R2009a)

File Edit Debug Parallel Desktop Window Help

Current Directory: C:\Users\CSC\_KMITL\Documents\MATLAB

Shortcuts How to Add What's New

Command Window

```

0.0035
0.0040
0.0045
0.0050
0.0055
0.0060
0.0065
0.0070
0.0075
0.0080
0.0085
0.0090
0.0095
0.0100
0.0105
0.0110
0.0115
0.0120
0.0125
0.0130
0.0135
0.0140

y =

0.0000
0.0003
0.0005
0.0007
0.0009
0.0010
0.0011
0.0012
0.0013
0.0014
0.0015
0.0016
0.0017
0.0018
0.0019
0.0020
0.0021
0.0022
0.0023
0.0024
0.0025
0.0026
0.0027

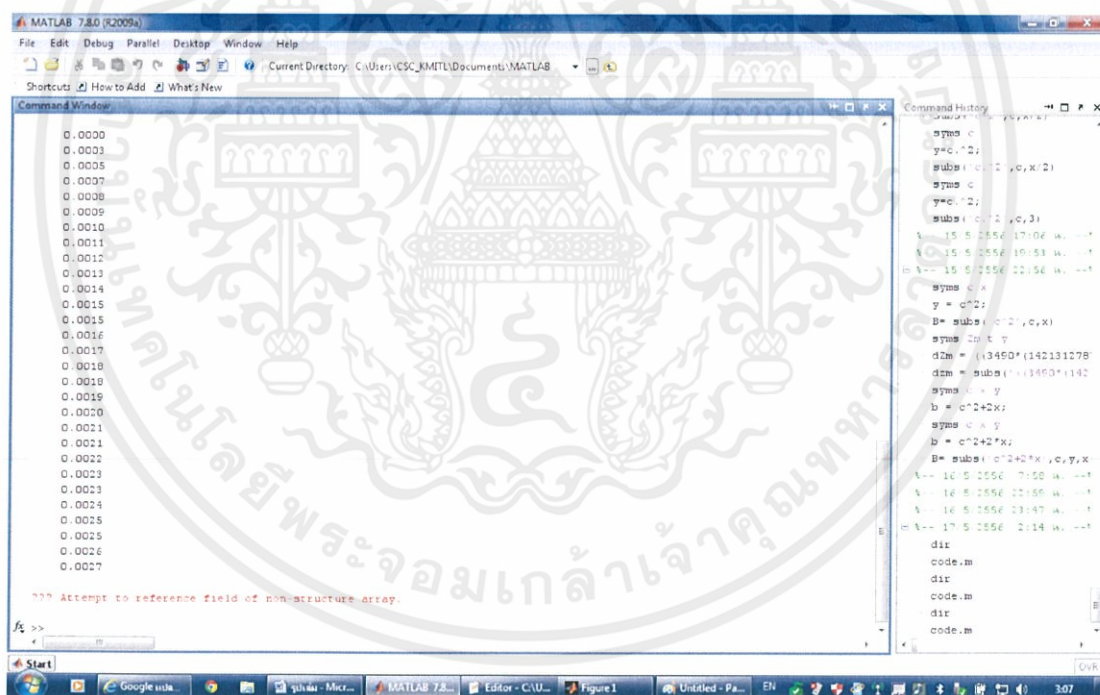
```

Command History

```

sym c
y=c.^2;
subs(c.^2,c,x/2)
sym c
y=c.^2;
subs(c.^2,c,3)
V-- 15/5 2556 17:02 W--1
V-- 15/5 2556 16:53 W--1
V-- 15/5 2556 22:56 W--1
sym c x
y = c^2;
B= subs(c.^2,c,x)
sym z= x y
d2m = (3450*(142131278
d2m = subs('+(3450*+142
sym c x y
b = c^2+2x;
sym c x y
b = c^2+2*x;
B= subs(c^2+2*x,c,y,x
V-- 16/5 2556 17:50 W--1
V-- 16/5 2556 22:59 W--1
V-- 16/5 2556 23:47 W--1
V-- 17/5 2556 2:14 W--1
dir
code.m
dir
code.m
dir
code.m

```



MATLAB 7.8.0 (R2009a)

File Edit Debug Parallel Desktop Window Help

Current Directory: C:\Users\CSC\_KMITL\Documents\MATLAB

Shortcuts How to Add What's New

Command Window

```

0.0000
0.0003
0.0005
0.0007
0.0008
0.0009
0.0010
0.0011
0.0012
0.0013
0.0014
0.0015
0.0016
0.0017
0.0018
0.0019
0.0020
0.0021
0.0022
0.0023
0.0024
0.0025
0.0026
0.0027

??? Attempt to reference field of non-structure array.

```

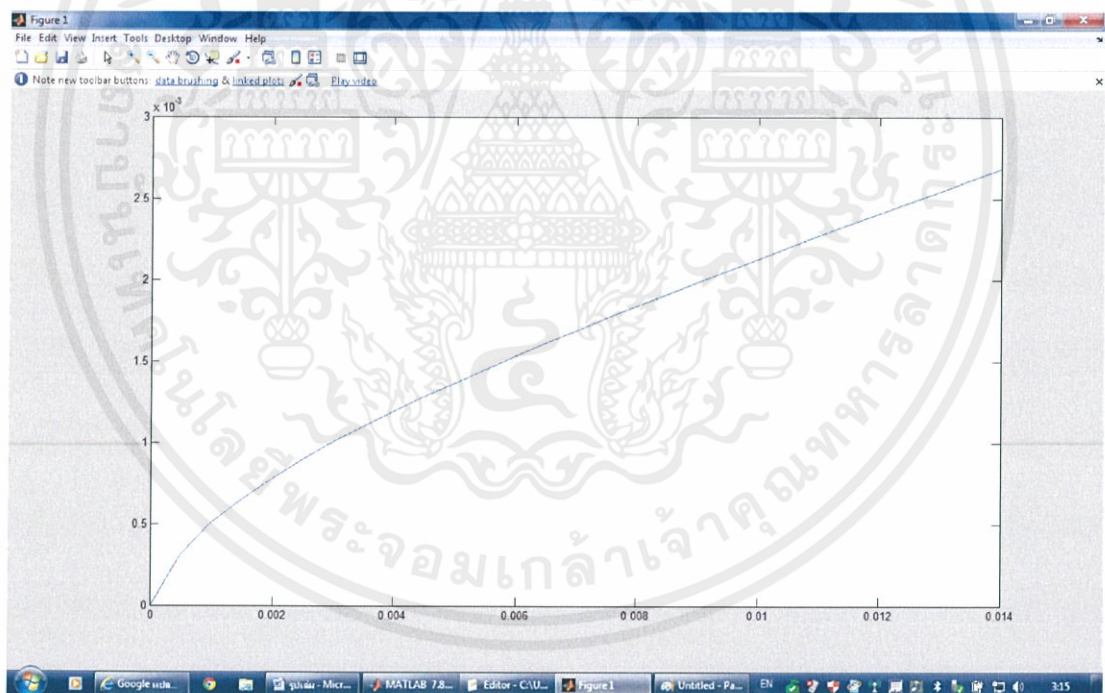
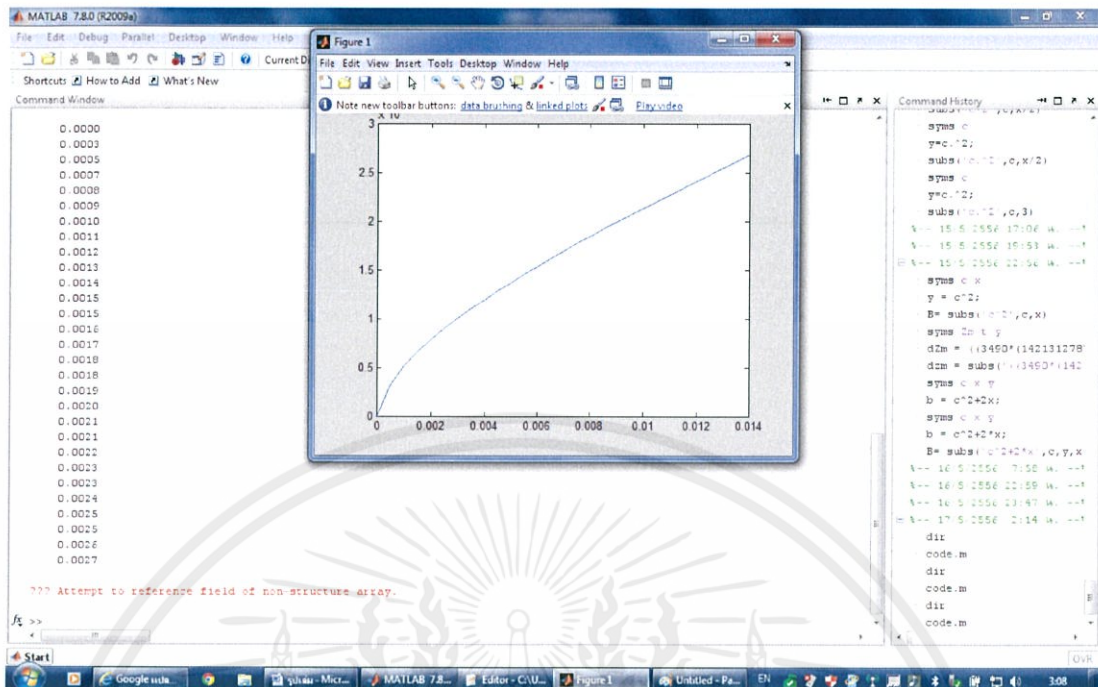
Command History

```

sym c
y=c.^2;
subs(c.^2,c,x/2)
sym c
y=c.^2;
subs(c.^2,c,3)
V-- 15/5 2556 17:02 W--1
V-- 15/5 2556 16:53 W--1
V-- 15/5 2556 22:56 W--1
sym c x
y = c^2;
B= subs(c.^2,c,x)
sym z= x y
d2m = (3450*(142131278
d2m = subs('+(3450*+142
sym c x y
b = c^2+2x;
sym c x y
b = c^2+2*x;
B= subs(c^2+2*x,c,y,x
V-- 16/5 2556 17:50 W--1
V-- 16/5 2556 22:59 W--1
V-- 16/5 2556 23:47 W--1
V-- 17/5 2556 2:14 W--1
dir
code.m
dir
code.m
dir
code.m

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] John F. Ready, Dave F. Farson, LIA Handbook of laser materials processing, laser institute of America magnolia publishing, Inc., 2001
- [2] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. (๒๕๕๖). เลเซอร์. สืบค้นเมื่อ 16 พฤษภาคม 2556 จาก:  
<http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%80%E0%B8%A5%E0%B9%80%E0%B8%8B%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B9%8C>
- [3] Wikipedia, the free encyclopedia.(2010). Components of original ruby laser. Retrieved May 16, 2013 from  
<http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%80%E0%B8%A5%E0%B9%80%E0%B8%8B%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B9%8C>
- [4] C.E.Webb and J.D.C.Jones (2004). Handbook of Laser Technology and Applications: Volume III-Applications, Institute of Physics
- [5] C.Y. Yeo, S.C. Tam, S. Jana, Michael W.S. Lau, A technical review of the laser drilling of aerospace materials, Journal of Materials Processing Technology 42 (1994) 15-49.
- [6] G.K.L.Ng,L.Li, The effect of laser peak power and pulse width on the hole geometry repeatability in laser percussion drilling, Optic & Laser Technology 33(2001) 393-402.
- [7] G.K.L.Ng, L.Li, Repeatability characteristic of laser percussion drilling of stainless-steel sheets, Optics and laser in engineering 39(2003) 25-33.
- [8] B.S.Yilbas, Parametric study to improve laser hole drilling process, Journal of Material Processing Technology 70(1997) 264-273.
- [9] D.K.Y. Low, L.Li, P.J. Byrd, The effects of process on spatter deposition in laser percussion drilling, Optics & Laser Technology 32 (2000) 347-354.
- [10] S. Bandyopadhyay, Hina Gokhale, J.K. Sarin Sundar, G. Sundararajan, S.V. Joshi, A statistical approach to determine process parameter impact in Nd:YAG laser drilling of IN718 and Ti-6Al-4V sheets, Optic and Lasers in Engineering 43 (2005) 163-182.
- [11] M.Ghoreishi, D.K.Y.Low, L.Li, Comparative statistical analysis of hole taper and circularity in laser percussion drilling, International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002) 985-995.

- [12] Yinzhou Yan, Lingfei Ji, Yong Bao, Yijian Jiang, An experimental and numerical study on laser percussion drilling of thick-section alumina, *Journal of Material Processing Technology* 212 (2012) 1257-1270.
- [13] D.K.Y.Low, L.Li, P.J.Byrd, The influence of temporal pulse train modulation during laser percussion drilling, *Optic and Laser Engineering* 35 (2001) 149-164.
- [14] D.K.Y.Low, L.Li, A.G.Corfe, Characteristic of spatter formation under the effects of different laser parameters during laser drilling, *Journal of Materials Processing Technology* 118 (2001) 179-186.
- [15] G.K.L.Ng ,P.L.Crouse,L.Li An analytical model for laser drilling incorporating effects of exothermic reaction, pulse width and hole geometry, *International Journal heat and mass transfer* 49(2006) 1358-1374.
- [16] Shang-Liang Chan, The effects of gas composition on the C2O laser cutting of mild steel, *Journal of Material Processing Technology* 73 (1998) 147-159.
- [17] H.Golnabi, M.Bahar, Investigation of optimum condition in oxygen gas-assist laser cutting, *Optic & Laser Technology* 41(2009)454-460.
- [18] A.Riveiro, F.Quintero, F.Lusquinos,. R.Comesana, J.Pou, Parametric investigation of C<sub>2</sub>O laser cutting of 2024-T3 alloy, *Journal of Materials Processing Technology* 210(2010) 1138-1152.
- [19] A.Rioveiro, F.Quintero, F.Lusquinos, R.Comesana, J.del Val, J.Pou, The role of the assist gas nature in laser cutting of Aluminum alloys, *Physics Procedia* 12(2011) 548-554.
- [20] N. B.Dahotre, Sandip P.Harimkar, *Laser Fabrication and Machining of Materials*, Springer, Inc.2008.
- [21] F. Dausinger, H. Hugel, and V. Konov, *Micro-machining with ultrashort laser pulses: From basic understanding to technical applications*, 2003.
- [22] M.Suchatawat (2011), *Mathematical modeling of multiple pulsed laser percussion drilling*, A thesis submitted to The University of Manchester.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้