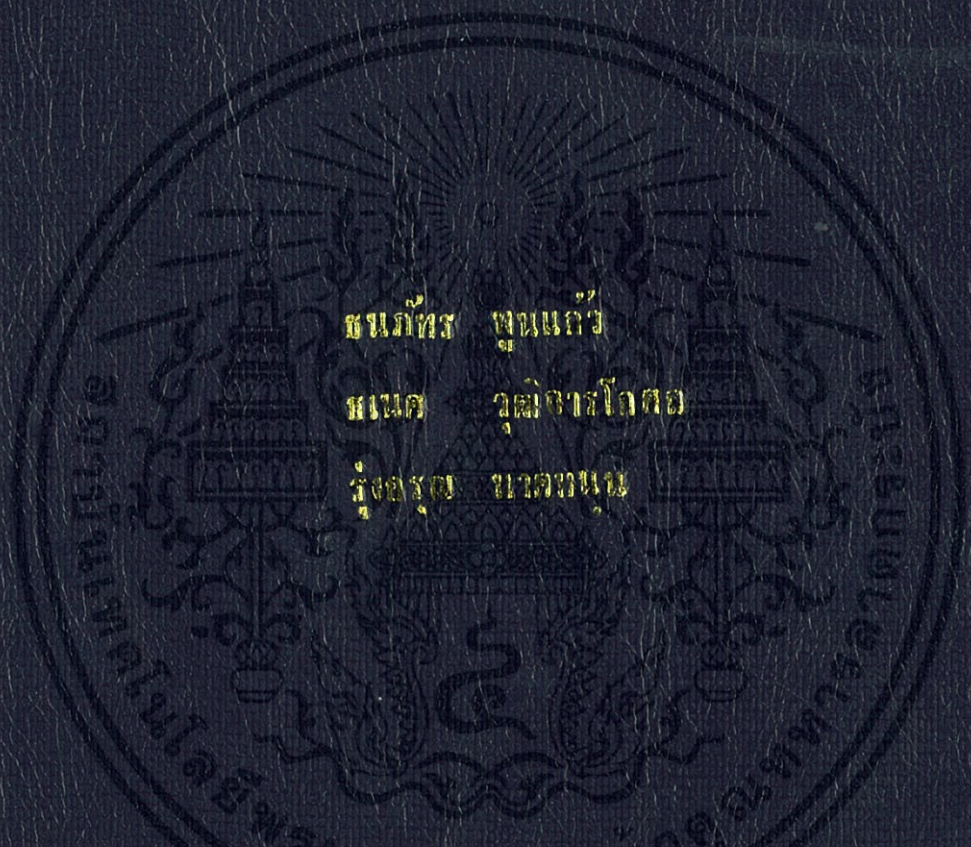


การจำลองการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์แบบพัลส์เดียว
A MATHEMATICAL MODEL OF SINGLE PULSED LASER DRILLING



ชนภัทร ชุมนแก้ว
หนนศ วุฒิจารย์โลก
รังสรรค์ นาคทนน

ปริญญาโทชั้นต้นเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาพหุศึกษาศาสตร์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์แบบพัลส์เดียว

A MATHEMATICAL MODEL OF SINGLE PULSE LASER DRILLING



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา 2556 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A MATHEMATICAL MODEL OF SINGLE PULSE LASER DRILLING

THANAPAT POONKAEW
TANATE WUTTHIKANGOSON
RUNGARON NAKNUN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
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
2013
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์แบบพัลส์เดียว
A MATHEMATICAL MODEL OF SINGLE PULSE LASER DRILLING

ผู้จัดทำ

1. นาย ธนภัทร พูนแก้ว รหัสประจำตัว 53010640
2. นาย ธเนศ วุฒิกิจโรโกศล รหัสประจำตัว 53010698
3. นางสาว รุ่งอรุณ นาคहनุน รหัสประจำตัว 53011367


(ดร. มรุส สุชาตะวัฒน์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์แบบพัลส์เดียว

นายธนภัทร	พูนแก้ว	53010640
นายธนศ	วุฒิกิจโกศล	53010698
นางสาวรุ่งอรุณ	นาคหุน	53011367
ดร. มธุรส	สุชาติวัฒน์	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์แบบพัลส์เดียว โดยรวมผลของการใช้แก๊สช่วยและพลังงานจากการออกซิเดชันเข้าไปในแบบจำลองด้วย ซึ่งสมการที่ใช้ได้แก่สมการสมดุลพลังงานที่รอยต่อระหว่างของแข็ง-ของเหลว, ของเหลว-ไอ, และสมการการอนุรักษ์มวล ความถูกต้องของแบบจำลองจะตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลการทดลองที่เคยมีผู้ทำการทดลองและทำการศึกษาไว้แล้วในอดีต ผลที่ได้พบว่าแบบจำลองทำนายความเร็วของการเจาะได้ใกล้เคียงค่าจากการทดลอง โดยการรวมแก๊สช่วยเข้าไปในแบบจำลองให้ผลการทำนายที่ดีที่ความเข้มของแสงเลเซอร์ต่ำๆ นอกจากนั้นการศึกษาผลของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์พบว่า เมื่อกำลังสูงสุดของพัลส์ พลังงานของพัลส์ และช่วงกว้างของพัลส์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วของการเจาะเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A MATHEMATICAL MODEL OF SINGLE PULSE LASER DRILLING

Thanapat Poonkaew 53010640
Tanate Wutthikangoson 53010698
Rungaroon Naknun 53011367
Dr. Maturase Suchtawat Advisor
Year 2013

ABSTRACT

A mathematical models of single pulse laser drilling is developed in this study. Effects of using oxygen assist gas and energy from exothermic reaction are included in the model. The governing equations consist of the energy equations at the solid-liquid and liquid-vapor interfaces and mass balance equation. The developed model is verified by comparing with the experimental results which are available in the literature. The result show that the model gives from prediction of the drilling velocity compared with those obtained experimentally. It is also found that the model with assist gas gives better prediction at low laser intensity. Effects of the relevant parameter are also investigated in this study. The result shows that as the pulse peck power , pulse energy and pulse width increase , the drilling velocity increases.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้และความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาฯ ดร.มธุรส สุขชาติวัฒน์ ที่คอยให้ความรู้ คำปรึกษา แนะนำหลักในการดำเนินงาน ตลอดจนช่วยชี้แนะแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องและให้การสนับสนุนตลอดระยะเวลาการทำโครงการฯ ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณอาจารย์และบุคลากรทุกท่านในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อบรมสั่งสอน ให้ความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีตลอดจนให้การสนับสนุนจนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่คอยดูแลและเป็นกำลังใจให้เสมอมา พร้อมทั้งส่งเสริมโอกาสด้านการศึกษาอย่างเต็มที่ สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งที่กล่าวถึงและไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้



นายธนภัทร พูนแก้ว
นายธนศ วุฒิการโกศล
นางสาวรุ่งอรุณ นาคหนูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับเลเซอร์.....	3
2.2 การประยุกต์ใช้งานเลเซอร์.....	11
2.2.1 การใช้เลเซอร์ในด้านการแพทย์.....	11
2.2.2 การใช้เลเซอร์ในด้านการสื่อสารโทรคมนาคม.....	12
2.2.3 การใช้เลเซอร์ในด้านการวัด.....	12
2.2.4 การใช้เลเซอร์ในการแปรรูปโลหะ.....	12
2.3 กลไกการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์.....	12
2.4 ข้อดีและข้อจำกัดของการเจาะด้วยเลเซอร์.....	14
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรูเจาะ.....	14
2.5.1 พลังงานของพัลส์(Pulse energy).....	14
2.5.2 รูปร่างพัลส์(Pulse shape).....	15
2.5.3 ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์(Laser wavelength) , การลู่ออกของแสง(Beam divergence) และทรานเวิร์สมอด (Transverse modes).....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 ความยาวโฟกัสของเลนส์(Focal length of lens) และตำแหน่งโฟกัส(Focal position).....	16
2.5.5 แก๊สช่วย (Assist gas).....	16
2.5.6 วัสดุ (Material).....	16
2.5.7 สิ่งแวดล้อม (Environment).....	16
2.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์.....	19
3.1 กระบวนการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์.....	19
3.2 สมการการให้ความร้อนแก่ของแข็ง(Solid heating).....	20
3.3 สมการการวิเคราะห์ในช่วงรอยต่อของแข็งกับของเหลว (Solid-Liquid interface) และของเหลวกับไอ(Liquid-Vapor interface)	20
3.3.1 กฎทรงมวล.....	20
3.3.2 ความดันของแก๊สช่วย.....	21
3.3.3 ความเร็วของโลหะเหลวที่ออกจากกรูเจาะ.....	22
3.3.4 ความดันไอ.....	23
3.3.5 ความเร็วการกลายเป็นไอ.....	24
3.3.6 สมดุลพลังงาน.....	24
3.4 ขั้นตอนการคำนวณ.....	28
บทที่ 4 ผลการศึกษาแบบจำลองและวิเคราะห์ข้อมูล.....	31
4.1 ผลจากสมการการให้ความร้อนในของแข็ง(Solid heating).....	31
4.2 ความเร็วของโลหะเหลวที่ไหลออกจากกรูเจาะและความเข้มของแสงเลเซอร์.....	32
4.3 ความเร็วการเจาะและความเข้มของแสงเลเซอร์.....	32
4.4 ตัวแปรที่มีผลต่อความเร็วการเจาะ.....	35
4.5 ความดันของแก๊สช่วย.....	37
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	38
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	38
5.2 วิจารณ์ผลจากแบบจำลอง.....	38
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	38
เอกสารอ้างอิง.....	39
ภาคผนวก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของเลเซอร์ที่บีม.....	5
2.2 คุณสมบัติทางเลเซอร์ของผลึก Nd:YAG	6
2.3 คุณสมบัติของแสงฮีเลียม-นีออนเลเซอร์.....	8
2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง.....	17
3.1 คุณสมบัติเชิงความร้อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ.....	29
3.2 คุณสมบัติของแก๊สออกซิเจนและหัวฉีด.....	30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์.....	3
2.2 ส่วนประกอบของเลเซอร์ทึบทิม.....	5
2.3 ส่วนประกอบของหลอดอาร์กอนเลเซอร์.....	8
2.4 การสั่นของโมเลกุล CO ₂	9
2.5 กลไกการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์.....	13
2.6 ชนิดของการเจาะ.....	14
2.7 รูปร่างพัลส์.....	15
3.1 ไดอะแกรมการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์.....	19
3.2 ขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์.....	28
4.1 กราฟอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการให้พลังงานจากเลเซอร์แก่เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ.....	31
4.2 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของโลหะเหลวที่ออกจากรูเจาะและความเข้มของแสงเลเซอร์ จากแบบจำลองและผลการทดลองของ Low et al.....	32
4.3 กราฟเปรียบเทียบผลความเร็วการเจาะจากแบบจำลองและ ผลจากการทดลองของ Ng. et al. โดยไม่ใช้แก๊สช่วย.....	33
4.4 กราฟเปรียบเทียบผลความเร็วการเจาะจากแบบจำลองและ ผลจากการทดลองของ Ng. et al. โดยใช้แก๊สช่วย.....	34
4.5 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร็วการเจาะจากแบบจำลองโดยใช้แก๊สช่วยและไม่ใช้แก๊สช่วย.....	34
4.6 กราฟแสดงผลของกำลังสูงสุดที่ใช้ต่อความเร็วของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์.....	35
4.7 กราฟแสดงพลังงานที่ใช้ในการเจาะโลหะในแต่ละช่วงเวลาพัลส์และความเร็วการเจาะ.....	36
4.8 กราฟแสดงความเร็วการเจาะที่ความดันของแก๊สช่วยที่แตกต่างกัน.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A_{eff}	พื้นที่แก๊สช่วยปะทะกับผิวชิ้นงาน (m^2)
A_{rl}	พื้นที่ที่แก๊สสูญเสียความดันทางด้านข้าง (m^2)
c_p	ค่าความร้อนจำเพาะ ($J/kg-K$)
C_c	ค่าคงที่จากการทดลองการพาความร้อนแบบบังคับในแนวตั้งฉากกับผิวโลหะเหลว
$C_{p,m}$	ค่าความร้อนจำเพาะของโลหะเหลว ($J/kg-K$)
$C_{p,s}$	ค่าความร้อนจำเพาะของโลหะ ($J/kg-K$)
d_n	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออกของหัวฉีด (m)
g	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)
h	ค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อน (W/m^2K)
I_{abs}	ค่าความเข้มของแสงเลเซอร์ที่ชิ้นงานดูดซับไว้ (W/m^2)
k_b	ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (J/K)
k_s	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/mK)
L_v	ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของโลหะ (J/kg)
M_a	มวลอะตอม (g/mol)
m_{ox}	สัดส่วนมวลของโลหะในอัลลอย
\dot{m}_m	อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของโลหะเหลวที่ถูกดันออกนอกกรูจาะ (kg/s)
\dot{m}_s	อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของโลหะแข็งที่เกิดการหลอมเหลว (kg/s)
\dot{m}_v	อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของโลหะเหลวที่กลายเป็นไอ (kg/s)
$M_{r,ox}$	มวลอะตอมสัมพัทธ์ (kg/mol)
n_c	ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองการพาแบบบังคับในแนวตั้งฉากกับผิวโลหะเหลว
N_a	ตัวเลขอาโวกาโดร
p_0	ความดันบรรยากาศ (N/m^2)
p_c	ความดันวิกฤติของแก๊สที่ทางออกของหัวฉีด (N/m^2)
P_{eff}	ความดันประสิทธิผลของแก๊สช่วย (N/m^2)
P_i	ความดันแก๊สภายในหัวฉีด (N/m^2)
P_{cond}	พลังงานที่สูญเสียจากการนำความร้อน (W)
P_{conv}	พลังงานที่สูญเสียจากการพาความร้อน (W)
P_{in}	พลังงานที่ใส่เข้าไปในชิ้นโลหะเหลว (W)
P_{melt}	พลังงานที่ต้องใช้สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิและหลอมเหลว (W)
P_{out}	พลังงานที่ต้องใช้สำหรับการกลายเป็นไอ (W)
Pr	ตัวเลขพรีนดท์เทิล(Prandtl number) ของแก๊สช่วย
$P_{r,ox}$	พลังงานจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างแก๊สออกซิเจนกับโลหะ (W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลทั้งหมดไว้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P_{vap}	ความดันไอ (N/m^2)
r_l	รัศมีของลำแสงเลเซอร์ (m)
R	ค่าคงที่ของแก๊ส ($J/mol \cdot K$)
Re	ตัวเลขของเรย์โนลด์
t	เวลา (s)
T	อุณหภูมิของผิวโลหะที่เวลาใดๆ (K)
T^*	อุณหภูมิเฉลี่ยในชั้นโลหะเหลว (K)
T_0	อุณหภูมิเริ่มต้นของโลหะ (K)
T_i	อุณหภูมิแก๊สช่วย (K)
T_m	อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะ (K)
T_s	อุณหภูมิผิวของโลหะเหลว (K)
T_{vap}	อุณหภูมิของไอ (K)
U	$(M_a L_v / N_a k_b)$ (K)
v_g	ความเร็วในการไหลของแก๊สช่วย (m/s)
V_0	ความเร็วของเสียงในแก๊ส (m/s)
V_d	ความเร็วการเจาะ (m/s)
V_m	ความเร็วของโลหะเหลวที่ออกจากกรูเจาะ (m/s)
V_v	ความเร็วการกลายเป็นไอ (m/s)
z_n	ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับชิ้นงาน (m)
α_c	ค่าคงที่เพื่อหาค่า T^* ในสมการ (3.31)
α_{ox}	ร้อยละของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน
γ	อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ
δ_m	ความหนาของชั้นโลหะที่หลอมเหลว (m)
κ_m	ค่าการแพร่กระจายทางความร้อนของโลหะเหลว (W/mK)
κ_s	ค่าการแพร่กระจายทางความร้อนของโลหะ (W/mK)
μ_g	ความหนืดแบบพลวัตของแก๊ส (Ns/m^2)
ρ_g	ความหนาแน่นของแก๊สช่วย (kg/m^3)
ρ_m	ความหนาแน่นของโลหะเหลว (kg/m^3)
ρ_s	ความหนาแน่นของโลหะแข็ง (kg/m^3)
σ	แรงตึงผิว (N/m)
ΔH_{ox}	พลังงานเอนทาลปีของปฏิกิริยาออกซิเดชัน (J/mol)
ΔH_{vap}	เอนทาลปีของการกลายเป็นไอ (J/mol)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากทุกวันนี้ในวงการอุตสาหกรรมมีการพัฒนาและขยายตัวอย่างรวดเร็ว สำหรับวัสดุในงานบางประเภท เช่น วัสดุที่เป็นส่วนประกอบของยานยนต์ อากาศยาน ต้องมีการเจาะรูขนาดเล็กเป็นจำนวนมากโดยไม่ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานเปลี่ยนไป การเลือกใช้เลเซอร์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เพราะการเจาะด้วยเลเซอร์นั้นมีความแม่นยำ รวดเร็ว สามารถเจาะรูขนาดเล็กได้ และชิ้นงานยังสามารถคงคุณสมบัติทางกลของวัสดุไว้ได้มากที่สุด แม้ว่าการเจาะด้วยเลเซอร์จะให้ประสิทธิภาพในด้านต่างๆ ช้างตันได้ดีกว่าการเจาะด้วยวิธีการอื่น เช่น การเจาะด้วยเครื่องมือกลหรือการเจาะด้วยวิธี EDM(Electrical Discharge Machining) แต่ว่าเลเซอร์ต้องการใช้พลังงานค่อนข้างสูงจึงมีต้นทุนที่ใช้สูงไปด้วย ทำให้ต้องมีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเจาะด้วยเลเซอร์ ดังนั้นหากมีการศึกษาปัจจัยเพื่อให้การเจาะมีประสิทธิภาพสูงที่สุดก็จะคุ้มค่าต่อการลงทุน

ในปัจจุบันมีผู้พัฒนาแบบจำลองการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ขึ้นมามากมาย โดยแต่ละแบบจำลองต่างก็มีการตั้งสมมติฐานที่แตกต่างกันออกไป เช่น การพิจารณาแบบจำลองว่าเป็นแบบหนึ่งมิติ สองมิติ หรือแบบสามมิติ การพิจารณาการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการเจาะว่ามีสองสถานะคือของแข็งและของเหลว หรือมีสามสถานะคือของแข็ง ของเหลว และไอ การพิจารณาแบบจำลองภายใต้สภาวะคงที่ (Steady state) หรือสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา(Transient state) การไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง เป็นต้น นอกจากนี้ในทางปฏิบัติมักมีการนำแก๊สช่วย(Assist gas) เข้ามาใช้ร่วมกับการเจาะด้วยเลเซอร์เพื่อให้คุณภาพของรูเจาะดีขึ้น จึงมีผู้พัฒนาแบบจำลองการเจาะพิจารณาผลของแก๊สช่วยในกระบวนการเจาะ[1,2] แต่การศึกษาเพื่อทำนายผลของการใช้แก๊สช่วยยังมีค่อนข้างจำกัดและไม่แม่นยำ เนื่องจากคุณภาพของรูเจาะนั้นยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอีกหลายอย่างซึ่งส่งผลให้การคาดคะเนผลของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์มีความแม่นยำนั้นทำได้ยาก ดังนั้นจึงเป็นที่มาของโครงการนี้

ในโครงการนี้ได้มีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเจาะ และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์โดยนำผลของแก๊สช่วยมาพิจารณาในแบบจำลอง ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมานี้จะช่วยในการหาความเร็วของการเจาะ รวมทั้งใช้วิเคราะห์ผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์แบบพัลส์เดียว
2. เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1. ใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วยในกระบวนการเจาะ
2. ใช้รูปแบบการกระจายตัวของเลเซอร์บนผิวหน้าชิ้นงานแบบ Uniform beam profile
3. แบบจำลองเป็นแบบหนึ่งมิติ
4. ไม่คิดผลของการเกิดพลาสมา
5. ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการดูดซับพลังงานของผิววัสดุขณะหลอมเหลว เมื่อผิววัสดุได้รับความร้อนจากแสงเลเซอร์
6. พิจารณาเฉพาะวัสดุที่เป็นโลหะเท่านั้น

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

กระบวนการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์นั้นเกิดขึ้นเมื่อแสงเลเซอร์ตกกระทบผิวโลหะ จากนั้นผิวโลหะจะเกิดการหลอมเหลว ที่ภายในรูเจาะนั้นโลหะเหลวบางส่วนจะกลายเป็นไอ และไอโลหะจะทำให้เกิดความดันไอ (Vapor pressure หรือ Recoil pressure) กดลงบนผิวของโลหะเหลวแล้วดันให้โลหะเหลวไหลขึ้นไปตามผนังของรูจนถูกดันออกมาจากรูเจาะ ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์นี้จะพิจารณาผลของแก๊สช่วยต่อกระบวนการเจาะ โดยอาศัยกฎทรงมวลและกฎการอนุรักษ์พลังงานในการวิเคราะห์

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยวิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical method)
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้พิจารณาสำหรับการเจาะในวัสดุที่เป็นโลหะเท่านั้น
3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมาจะใช้สำหรับลำแสงเลเซอร์ที่มีการกระจายตัวบนผิวหน้าชิ้นงานอย่างสม่ำเสมอ (Uniform beam profile) เท่านั้น

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
2. เปรียบเทียบข้อดี-ข้อจำกัดของแต่ละแบบจำลอง
3. เลือกและพัฒนาสมการการเจาะโดยใส่ปัจจัยที่เกี่ยวข้องเข้าไปพิจารณาด้วย
4. ศึกษาการใช้โปรแกรม Mathematica เพื่อใช้ในการแก้สมการ
5. เปรียบเทียบผลการทดลองจากแบบจำลองกับผลการทดลองจากงานวิจัยอื่นๆ
6. ศึกษาผลของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง
7. จัดทำรูปเล่มปริญาานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับเลเซอร์

เลเซอร์(Laser) [3] เป็นรูปคำใหม่ที่เกิดจากการรวมตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวแรกของข้อความ Light amplification by emission of radiation เป็นอุปกรณ์ที่ปล่อยลำแสงออกมาโดยผ่านกระบวนการขยายสัญญาณแสงด้วยการกระตุ้นการปล่อยรังสี การที่จะเกิดลำแสงเลเซอร์ได้นั้นเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์จะต้องมีองค์ประกอบ 3 ส่วนที่สำคัญ [1] ดังต่อไปนี้

- 1) ตัวกลางเลเซอร์(Laser medium) ภายในตัวกลางเลเซอร์จะบรรจุอะตอม , โมเลกุล หรือไอออนที่เหมาะสม
- 2) แหล่งกำเนิดพลังงาน(Energy source) จะกระตุ้นอะตอมให้ไปอยู่ในระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้น
- 3) ออปติคัลเรโซเนเตอร์(Optical resonator) ประกอบไปด้วยกระจกสองบานซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่จะช่วยให้ลำแสงเลเซอร์ผ่านตัวกลางเลเซอร์แล้วสะท้อนไปกลับซ้ำๆ โดยกระจกด้านหน้าเลเซอร์(ด้านที่ปล่อยลำแสงเลเซอร์ออกมา)จะยอมให้แสงที่ผ่านตัวกลางเลเซอร์ผ่านออกไปบางส่วนและแสงบางส่วนสะท้อนกลับไปในตัวกลางเลเซอร์ซ้ำไปซ้ำมา

หลักการเกิดลำแสงเลเซอร์นั้นแสดงดังรูปที่ 2.1 กล่าวคือเมื่ออะตอมหรือโมเลกุลในตัวกลางเลเซอร์ได้รับการกระตุ้นจากแหล่งกำเนิดพลังงานจนถึงระดับประชากรผกผัน (Population inversion) ก็เกิดลำแสงขึ้นมา ลำแสงที่ไปตกกระทบออปติคัลเรโซเนเตอร์ก็ถูกสะท้อนกลับไปกลับมาซ้ำๆในตัวกลางเลเซอร์เพื่อไปกระตุ้นอะตอมในตัวกลางเลเซอร์ให้เกิดประชากรผกผันอีกครั้ง แต่ก็มีลำแสงบางส่วนที่ทะลุผ่านออกจากกระจกด้านหน้าออกไปซึ่งก็คือลำแสงเลเซอร์นั่นเอง



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำแสงเลเซอร์นั้นจะมีคุณสมบัติเฉพาะซึ่งแตกต่างจากแสงที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่นๆ ลำแสงเลเซอร์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆอย่างกว้างขวางทั้งนี้เนื่องจาก [4]

- 1) เป็นแสงเอกรงค์(Monochromaticity) คือแสงที่มีการแพร่กระจายของความยาวคลื่นน้อย
- 2) มีความเป็นอาพันธ์ (Coherence) ทุกๆคลื่นของแสงเลเซอร์จะมีเฟสเดียวกัน
- 3) เนื่องจากลำแสงเลเซอร์จะมีการลู่ออกของลำแสงน้อยดังนั้นจึงมีความเจิดจ้าสูง (Brightness)
- 4) กำลังที่ส่งออกมา(Power output)จากแสงเลเซอร์ สามารถให้ได้น้อยโดยมีค่าตั้งแต่ระดับไมโครวัตต์ไปจนถึงระดับกิโลวัตต์ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของเลเซอร์
- 5) กำลังสูงสุด(Peak power) และพลังงานที่ได้ในหนึ่งพัลส์มีค่าสูง
- 6) มีทิศทางเดียวที่แน่นอน (Directionality) โดยลำแสงมีความสามารถที่จะโฟกัสไปยังจุดที่มีขนาดเล็กได้โดยไม่มีการแตกกระจายของแสง

เลเซอร์แต่ละชนิดมีวัตถุประสงค์และการทำงานที่ไม่เหมือนกัน การแบ่งชนิดของเลเซอร์สามารถแบ่งได้หลายวิธีโดยใช้คุณสมบัติของตัวเลเซอร์เองมาแบ่ง ในที่นี้เราจะรวบรวมชนิดของเลเซอร์ที่แบ่งตามลักษณะของตัวกลางเลเซอร์ มีดังต่อไปนี้

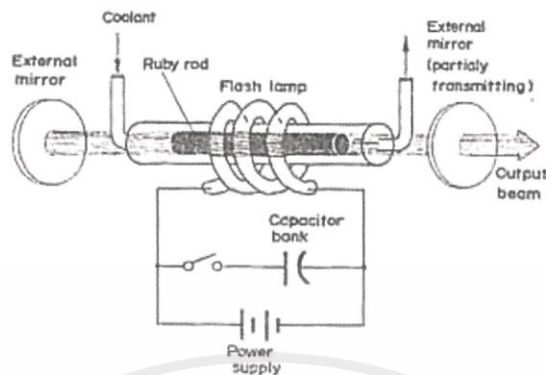
- 1) Solid State Laser ใช้สารตัวกลางเลเซอร์เป็นแท่งผลึกแข็ง

โดยทั่วไปแล้วเลเซอร์ชนิดนี้จะใช้ผลึกของวัตถุนานหรือแก้วเป็นโครงสร้างหลักของของแข็ง ซึ่งภายในโครงสร้างนี้จะมีไอออนเจือปน(Impurity ions)ฝังตัวอยู่ โดยทั่วไปไอออนเจือปนจะไปอยู่แทนที่ตำแหน่งของไอออนของผลึกของแข็ง ระดับพลังงานที่ทำให้เกิดแสงเลเซอร์จะมีผลโดยตรงมาจากพลังงานของไอออนเจือปน [5] ไอออนเจือปนพวกนี้คือไอออนของผลึกอิตอนิก ปกติอิตอนิกเป็นธาตุในกลุ่มของพวกทรานซิชัน(transition elements)ในตารางธาตุ หรือไอออนของธาตุหายาก(Rare earth ions) ตัวอย่างของเลเซอร์ชนิดนี้ ได้แก่ เลเซอร์ทับทิม (Ruby Laser), นีโอโดเนียมแย็กเลเซอร์(Nd:YAG Laser) เป็นต้น

เลเซอร์ทับทิม(Ruby Laser)

เป็นที่รู้กันว่าทับทิมคือหินรัตนชาติที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติซึ่งเป็นผลึกของ Al_2O_3 (Corundum) เลเซอร์ทับทิมเป็นเลเซอร์ชนิดแรกที่ถูกสร้างขึ้นโดย Theodore Maiman ในปี ค.ศ.1960 [7] ตัวกลางเลเซอร์คือแท่งผลึกทับทิม($Cr^{3+}: Al_2O_3$) ทำหน้าที่เป็น host และมีการดอป(dope) ด้วยสารเจือปนโครเมียมไอออน Cr^{3+} ด้วยอัตราส่วนต่อน้ำหนัก 0.05% [5-7] และ Cr^{3+} นี้จะไปอยู่แทนที่ Al ในโครงสร้างผลึก ในการเกิดประชากรผกผันนั้นเกิดจาก Cr^{3+} ซึ่งทำได้โดยการใช้แฟลชแลมป์ที่ให้ความเข้มของแสงสูง โดยที่แฟลชแลมป์มีรูปร่างเป็นเกลียวแบบเฮลิค(Helical flash lamp) พันรอบแท่งผลึกทับทิม ดังรูปที่ 2.2 แต่เนื่องจากเลเซอร์ทับทิมเป็นเลเซอร์แบบที่เกี่ยวข้องกับพลังงาน 3 ระดับ จึงทำให้การเกิดประชากรผกผันนั้นทำได้ยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องให้พลังงานแก่ระบบเป็นอย่างมากเพื่อก่อให้เกิดแสงเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของเลเซอร์ทับทิม [7]

คุณสมบัติของเลเซอร์ทับทิม นั้นพอสรุปได้ดังต่อไปนี้
 ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของเลเซอร์ทับทิม [7]

ความยาวของคลื่น	694.3 , 692.7 นาโนเมตร
พลังงาน / พัลส์แบบปกติ	1 จูล
พลังงาน / พัลส์แบบคิวสวิต (Q-switched)	10 จูล
ความกว้างของพัลส์แบบคิวสวิต (Q-switched)	10×10^{-9} วินาที
พลังงานสูงสุด (Peak power) ของแบบปกติ	2×10^4 วัตต์
พลังงานสูงสุด (Peak power) ของแบบคิวสวิต (Q-switched)	2×10^7 วัตต์
บีมไดเวอร์เจน	2 – 20 มิลลิเรเดียน
อายุของหลอดแฟลชแลมป์แบบแกเลียว	$10^5 \times 10^6$ พัลส์
อัตราการเกิดพัลส์ / วินาที	0.5 - 2

นีโอไดเมียมแย็กเลเซอร์(Nd:YAG Laser)

ผลึก Nd:YAG มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นสารตัวกลางเลเซอร์ เพราะ มีความแข็งแรงทนทาน มีคุณสมบัติทางแสงคือมีความสม่ำเสมอตลอดแท่ง และเป็นตัวนำความร้อนที่ดีเมื่อเทียบกับผลึกตัวกลางเลเซอร์ชนิดอื่นๆ และผลึก Nd:YAG ยังมีโครงสร้างผลึกเป็นรูปลูกบาศก์เป็นผลให้แสงที่ออกจากผลึกมีขนาดของเส้น(Linewidth)ที่แคบทำให้เกิดแสงเลเซอร์ที่แท่งผลึกได้ง่าย แท่ง Nd:YAG มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกยาว ขนาดโดยทั่วไปมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6-10 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 100 มิลลิเมตร แต่ในบางกรณีอาจมีรูปร่างเป็นแผ่นบางๆ หรือทรงเรขาคณิตต่างกันออกไปแล้วแต่ลักษณะของการนำมาใช้งาน ซึ่งคุณสมบัติทางเลเซอร์ของผลึกนีโอไดเมียมแย็กพอจะสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางเลเซอร์ของผลึก Nd:YAG [7]

Emission Wavelengths	1064.1 nm.
Fluorescent Lifetime	0.23 ms.
Emission Linewidth	0.45 nm.
Quantum Efficiency	99.5%
Refractive Index	1.82
Thermal conductivity	0.13 w/cm/K

ในปี ค.ศ.1964 J.E.Geusic et al. [6] ได้คิดค้นการทำให้เกิดแสงนีโอโดิเมียมแย็กเลเซอร์ได้สำเร็จ ตัวกลางเลเซอร์คือแท่งผลึก Nd:YAG โดยมี host คือ Yttrium-Aluminium Garnet ($Y_3Al_5O_{12}$) หรือเรียกว่า YAG และมีการฉาบด้วยสารเจือปน Nd^{3+} ประมาณ 0.1-2% โดยน้ำหนัก และ Nd^{3+} นี้จะไปอยู่แทนที่ Y^{3+} ในโครงผลึก [6-7] การทำให้เกิดประชากรผกผันนั้นทำได้โดยการใช้แฟลชแลมป์ที่บรรจุแก๊สซีนอน(xenon flashlamp) ที่ให้ความเข้มของแสงสูงทำการ pump แท่งผลึก Nd:YAG ที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงในย่านความถี่หลายๆช่วงของสเปกตรัมที่ได้จากซีนอนแฟลชแลมป์ที่ส่งออกมา แสงเลเซอร์ที่ได้จะมีความยาวคลื่นประมาณ 1064 นาโนเมตร นีโอโดิเมียมแย็กเลเซอร์สามารถให้แสงได้ทั้งแบบต่อเนื่อง (Continuous Wave , CW) และแบบพัลส์ โดยขึ้นอยู่กับ แหล่งกำเนิดพลังงานที่ใช้ว่าเป็นแบบหลอดไฟแฟลชหรือหลอดไฟอาร์ค โดยทั่วไปหลอดไฟแฟลชที่ใช้มีอยู่มีสองชนิดคือซีนอนแฟลชแลมป์ (Xenon flashlamp) และคริปตอนแลมป์ (Krypton lamp) กำลังสูงสุดที่ได้จากหลอดไฟแฟลชคือ 2000 วัตต์ , ระยะห่างระหว่างพัลส์ 20 พัลส์ต่อวินาที และความถี่ 1-100 Hz. ประสิทธิภาพของเลเซอร์ทั้งแบบต่อเนื่อง (CW) และแบบพัลส์โดยทั่วไปแล้วจะมีค่า 1-3% [8]

เลเซอร์ชนิดนี้ถูกนำมาประยุกต์ให้เกิดแสง second harmonic จากผลึกบางชนิด เช่น KDP เพื่อเปลี่ยนแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 1064 นาโนเมตร เป็นแสงบริสุทธ์ สีเขียว มีความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร แล้วนำไปใช้งานต่อไป ในทางการแพทย์แสงเลเซอร์นี้จะถูกนำไปช่วยในการผ่าตัดได้เป็นอย่างดี เนื่องจากขณะผ่าตัดอยู่บาดแผลจะไม่เกิดขึ้นเพราะปลายหลอดเล็อดจะทำปฏิกิริยากับแสงเลเซอร์แล้วปิดตัวเอง ทำให้ไม่มีเลือดออก ทางด้านอุตสาหกรรมได้มีการนำนีโอโดิเมียมแย็กเลเซอร์แบบให้แสงต่อเนื่องไปใช้ในการตัด เจาะ แผ่นโลหะ พลาสติก และวัสดุอื่นอย่างกว้างขวาง เลเซอร์นี้มีขีดความสามารถในการตัด เจาะ ได้ดีในกรณีที่เครื่องมือช่างโดยทั่วไปไม่สามารถทำได้[7]

2) Gas Laser สารตัวกลางเลเซอร์มีลักษณะเป็นแก๊ส

เลเซอร์แก๊สเป็นหนึ่งในรูปแบบที่พบมากที่สุดในอุตสาหกรรมเลเซอร์ และที่เรียกว่าเลเซอร์แก๊ส (Gas Laser) เป็นเพราะตัวกลางเลเซอร์ที่ผลิตแสงเลเซอร์ออกมานั้นอยู่ในสถานะแก๊ส ตัวกลางเลเซอร์เหล่านี้จะมีสภาพเป็นแก๊สบริสุทธ์ล้วน อาทิ แก๊สไนโตรเจน(N_2) หรือมีสภาพเป็นแก๊สผสม อาทิ แก๊สผสมระหว่างฮีเลียม(He)และนีออน(Ne) เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับพลังงานของตัวกลางเลเซอร์เหล่านั้นว่า เมื่อกระตุ้นอะตอมหรือโมเลกุลของแก๊สเหล่านั้นจนเกิดประชากรผกผันแล้วทำให้เกิดการปล่อยรังสีที่ถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระตุ้น(Stimulated emission) และการขยาย(Amplification)ในเวลาต่อมา ซึ่งผลที่ออกมาก็คือแสงเลเซอร์[6]

ตัวกลางเลเซอร์ที่เป็นแก๊สนั้นมีความน่าสนใจมากเมื่อเทียบกับตัวกลางเลเซอร์ที่เป็นผลึกของแข็ง ทั้งนี้เพราะความแตกต่างของความหนาแน่นของประชากรผกผันที่ได้จากแก๊สจะมีค่าน้อยกว่ากรณีของผลึกของแข็ง(Nd:YAG มี Nd จำนวน 6×10^{25} อะตอม/ m^3 และ HeNe เลเซอร์ จะมี Ne เพียง 10^{21} อะตอม/ m^3) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วพบว่าแก๊สเลเซอร์จะได้กำลังสูงกว่า แต่ขณะเดียวกันแก๊สนั้นมีความเป็นเอกพันธ์มากกว่าของแข็ง ดังนั้นจะมีการไหลเวียนของแก๊สเพื่อให้เย็นอยู่ตลอดเวลา และมีการเติมให้เต็มอยู่ตลอดเวลาได้ เลเซอร์แก๊สสามารถให้แสงได้ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบพัลส์ ความถี่ที่ได้จะอยู่ในช่วงตั้งแต่อัลตราไวโอเล็ตจนถึงอินฟราเรด [3,6] และแก๊สเลเซอร์ยังสามารถแบ่งเป็นชนิดตามหลักการเปลี่ยนสถานะของพลังงานแต่ละแบบเป็นหลักในการพิจารณา ดังนี้

- เลเซอร์แก๊สอะตอมเป็นกลาง (Neutral atom lasers) เช่น ฮีเลียม-นีออนเลเซอร์(He-Ne Laser)
- เลเซอร์ไอออน (Ion lasers) เช่น อาร์กอน-ไอออนเลเซอร์(Argon-ion Laser)
- เลเซอร์โมเลกุล (Molecular lasers) เช่น คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์(Carbon dioxide Laser) เอกไซเมอร์เลเซอร์(Excimer Laser)

ฮีเลียม-นีออนเลเซอร์(He-Ne Laser)

ฮีเลียม-นีออนเลเซอร์เป็นเลเซอร์แก๊สระบบแรกของโลกที่ถูกสร้างขึ้นโดย A. Javan et al. ในปี ค.ศ.1961[6] ในครั้งแรก A. Javan สามารถทำให้ฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ปลดปล่อยแสงที่มีความยาวคลื่น 1150 นาโนเมตร (ย่านอินฟราเรด) และต่อมาพบว่าเลเซอร์ชนิดนี้สามารถให้แสงเลเซอร์ออกมาอีกที่ความยาวคลื่น 3390 นาโนเมตร ถัดมาในปี ค.ศ.1962 A.D.White et al. [6] สามารถผลิตแสงเลเซอร์ชนิดนี้ได้ ที่ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร (แสงสีแดง) ซึ่งการทำให้เกิดแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นเท่านี้ทำได้ยากมาก เนื่องจากต้องมืองค์ประกอบทางแสง (Optical component) ของระบบที่ดีเพื่อลดการเกิดความสูญเสียของพลังงานภายในช่องเลเซอร์ (Laser cavity) และเลเซอร์ชนิดนี้ที่ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร นี้ก็เป็นที่ยอมรับใช้กันอย่างแพร่หลายและใช้กันอย่างกว้างขวางในหลายๆวงการ ฮีเลียม-นีออนเลเซอร์มีตัวกลางเลเซอร์เป็นส่วนผสมของ He และ Ne ในอัตราส่วน 10 ส่วนของ He ต่อ 1 ส่วนของ Ne ส่วนผสมของแก๊สทั้งสองจะบรรจุอยู่ในหลอดขนาดเล็ก และแก๊สผสม He และ Ne ที่อยู่ภายในหลอดเลเซอร์จะถูกอิเล็กตรอนซึ่งเกิดจากการดิสชาร์จ(Discharge)ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงวิ่งชนอะตอม He ทำให้อะตอมของ He มีพลังงานสูงขึ้นและเกิดการถ่ายเทพลังงานให้แก่อะตอมของ Ne จากนั้นจะเกิดการ stimulated emission ซึ่งจะให้แสงเลเซอร์ออกมา แสงเลเซอร์ที่ได้จากฮีเลียม-นีออนเลเซอร์จะเป็นแสงคลื่นเดียว(mono chromatic light) เป็นลำแสงขนาน ส่องระยะทางไกลๆได้โดยไม่สูญเสียความเข้มของแสงมากนัก[3,7] คุณสมบัติต่างๆพอสรุปได้ ดังตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

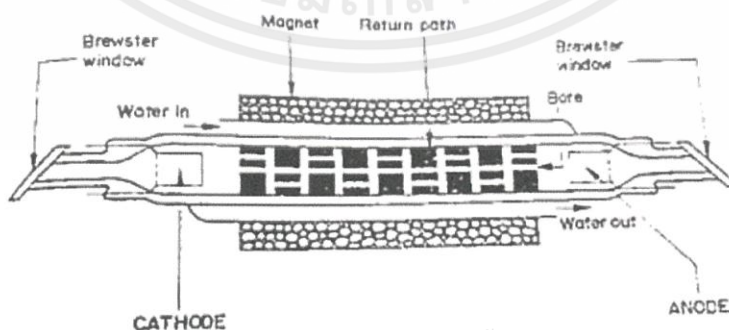
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของแสงฮีเลียม-นีออนเลเซอร์[7]

Beam Divergence	0.2 – 1.0	mrad
Line width	1700	MHz.
Wave length	632.8 , 1150 , 3390	nm.
Coherent length	20 – 100000	cm.
Brightness	10^6	W/cm ² -Sr
Power	0.1 – 100	mW

ปัจจุบันมีการใช้ฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ในด้านต่างๆอย่างแพร่หลาย โดยในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์มีการนำเลเซอร์ชนิดนี้มาใช้ในการส่องเข้าชี้ตำแหน่งของเครื่องมือต่างๆ หรือใช้ในการวัดความเร็วของที่ไหลในท่อโดยไม่ไปรบกวนการไหล ทางด้านอุตสาหกรรมถูกใช้ในการศึกษาความเค้นและความเครียดของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลขณะทำงาน ใช้ศึกษาการเกิดโฮโลกราฟี(Holography)เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของระบบ ด้านการแพทย์ถูกใช้ในการผ่าตัด นอกจากนี้ยังมีการใช้ในวงการธุรกิจโดยใช้ในการอ่านรหัสสินค้า(Bar code) [7]

อาร์กอน-อไอออนเลเซอร์(Argon-ion Laser)

อาร์กอน-อไอออนเลเซอร์ใช้ตัวกลางเป็นไอออนของอะตอมอาร์กอน(Ar^+) โดยการใช้อิเล็กตรอนดิสชาร์จวิ่งชนอะตอมของ Ar แล้วเกิด Ar^+ ขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานของอะตอมอาร์กอนเพื่อที่จะกระตุ้นแก๊สอาร์กอนให้แตกตัวเป็นไอออน และมีค่าระดับพลังงานสูงขึ้น ซึ่งต้องใช้กระแสไฟดิสชาร์จสูงกว่าปกติผ่านเข้าไปในหลอดอาร์กอนเลเซอร์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางแคบๆ(Capillary tube) ในกรณีนี้จะต้องใช้ความหนาแน่นของกระแส(Current density)ประมาณ 1000 amp/cm² เพื่อที่จะทำให้เกิดความหนาแน่นของกระแสสูง และลดการชนกระทบผนังหลอดเลเซอร์ของ Ar^+ และของอิเล็กตรอน และต้องใช้สนามแม่เหล็กในการเหนี่ยวนำไอออนและอิเล็กตรอนให้วิ่งอยู่ในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดเลเซอร์ ดังนั้นจะเห็นว่าหลอดอาร์กอนเลเซอร์จะมีขดลวดโซลินอยด์พันอยู่และส่งสนามแม่เหล็กให้ มีทิศทางขนานกับแนวแกนของหลอดเลเซอร์ ดังรูป



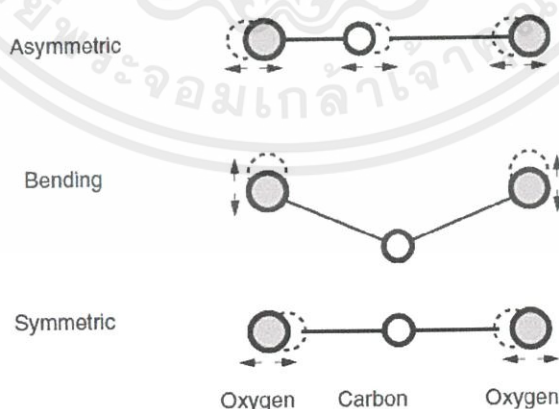
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของหลอดอาร์กอนเลเซอร์ [7]

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบส่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากจะต้องใช้ความหนาแน่นของกระแสสูงกว่าปกติ ขั้วลบ(Cathode)จะต้องเป็นตัวปล่อยอิเล็กตรอนที่ดี และช่องคาบิลลารีจะต้องทำจากวัสดุที่ทนความร้อนสูงและทนทานต่อการสึกกร่อนอันเกิดจากการวิ่งชนของไอออนต่อผนังของรูหลอด ดังนั้นวัสดุที่ใช้จึงเป็นจำพวกแกรไฟต์(Graphite) เบอริลเลียมออกไซด์(Beryllium Oxide)หรือควอทซ์(Quartz) ในการเกิดเลเซอร์โดยการดีสชาร์จอะตอมอาร์กอนนั้น จะทำให้เกิดความร้อนอย่างมากที่หลอดจึงต้องมีการหล่อเย็นด้วยน้ำที่ไหลรอบนอกหลอดเลเซอร์ อาร์กอน-ไอออนเลเซอร์สามารถให้แสงได้ทั้งแบบต่อเนื่องหรือแบบพัลส์ก็ได้ และแสงเลเซอร์ที่ได้จะมีความยาวคลื่นได้หลายค่าโดยจะอยู่ในช่วง 350 – 520 นาโนเมตร โดยค่าแสงเลเซอร์ที่มีพลังงานสูงและทำให้เกิดง่ายกว่าจะเกิดที่ความยาวคลื่น 488 นาโนเมตร(แสงสีน้ำเงิน) และ 514.5 นาโนเมตร(แสงสีเขียว) และกำลังของแสงเลเซอร์ที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง 1-20 วัตต์ เลเซอร์ชนิดนี้ถูกนำมาใช้ประยุกต์ใช้ในเครื่องพิมพ์เลเซอร์(laser printers) ช่วยในด้านการแพทย์ และใช้ในงานด้าน spectroscopy [6-7]

คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์(Carbon dioxide Laser)

คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์เป็นเลเซอร์แก๊สที่เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและกว้างขวาง เนื่องจากเลเซอร์ชนิดนี้สามารถให้ประสิทธิภาพได้สูงถึง 10-30% และอาจให้กำลังได้ถึงหลายกิโลวัตต์ คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ใช้ตัวกลางเป็นแก๊สผสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์(CO_2) แก๊สไนโตรเจน(N_2) และแก๊สฮีเลียม(He) เป็นเลเซอร์แก๊สชนิดเลเซอร์โมเลกุล ซึ่งการเกิดแสงเลเซอร์จะแตกต่างกับเลเซอร์แก๊สชนิดอื่นเพราะแสงเลเซอร์ไม่ได้เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอะตอมแต่เกิดจากการหมุนและการสั่นของโมเลกุลของ CO_2 โดยทั่วไปโมเลกุลของ CO_2 จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงโดยมีอะตอมของคาร์บอนอยู่ตรงกลางระหว่างสองอะตอมของออกซิเจน การสั่นของโมเลกุลของ CO_2 มีชนิดการสั่นต่างกัน 3 แบบ ได้แก่ แอสซิมเมตริก(Asymmetric) เป็นการสั่นของออกซิเจนทั้งสองอะตอมในแนวเดียวกันกับเส้นโมเลกุลในทิศทางเดียวกัน แต่อะตอมของคาร์บอนจะสั่นในทิศตรงกันข้ามกับอะตอมของออกซิเจน , เบนดิง(Bending)เป็นการสั่นของออกซิเจนทั้งสองอะตอมในทิศตั้งฉากกับแนวเส้นโมเลกุล และอะตอมของคาร์บอนจะสั่นในทิศตรงกันข้ามกับอะตอมของออกซิเจน และซิมเมตริก(Symmetric)เป็นการสั่นของออกซิเจนทั้งสองอะตอมในแนวเดียวกันกับเส้นโมเลกุล โดยเคลื่อนที่ในทิศตรงกันข้ามกัน [6-8] ดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **รูปที่ 2.4 การสั่นของโมเลกุล CO_2 [8]** กรุณาอย่าได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระตุ้นโมเลกุลของ CO₂ ทำได้โดยการดีสชาร์จ(Discharge)โมเลกุลด้วยไฟฟ้าแรงดันสูง และในการจะทำให้เกิดประชากรผกผันนั้นต้องผสมแก๊ส N₂ เนื่องจากแก๊ส N₂ สามารถถูกกระตุ้นได้ง่าย ส่วนแก๊ส He ที่ผสมเข้าไปนั้นจะช่วยให้เลเซอร์มีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยแก๊ส He จะช่วยเพิ่มค่าการนำความร้อนภายในระบบ ทั้งนี้เพื่อช่วยระบายความร้อนไปสู่ผนังท่อ การจะใช้แก๊สจำนวนเท่าได้นั้นขึ้นอยู่กับว่าระบบเป็นชนิดใด โดยทั่วไปจะใช้ CO₂ และ N₂ ในระดับความเข้มข้นพอๆกันในขณะที่ใช้ He ที่ระดับความเข้มข้นที่สูงกว่า คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์สามารถให้แสงได้ทั้งแบบต่อเนื่อง (CW) หรือแบบพัลส์ โดยแสงที่ได้จะอยู่ในย่านอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นเป็น 10.6 นาโนเมตร และมีกำลังเฉลี่ยอยู่ในช่วง 3 – 3000 วัตต์ คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ที่มีกำลังสูง(กำลังตั้งแต่ 3000 วัตต์ขึ้นไป)โดยทั่วไปจะมีอุปกรณ์เสริมต่อเข้าด้วยกัน[8] สำหรับที่มีกำลังต่ำกว่า 100 วัตต์ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้งานด้านการแพทย์อย่างกว้างขวาง เช่น การผ่าตัด ส่วนที่มีกำลังสูงๆได้ใช้ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม เช่น ในอุตสาหกรรมโลหะ เช่น การตัด , การเจาะ , เชื่อม , สกัด และการอบด้วยความร้อนในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งได้แก่การเขียนตัวหนังสือ(Marking) , การตัดตัวต้านทาน(Resister Trimming) , การขีด(Scribing)ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น [7]

เอกไซเมอร์เลเซอร์(Excimer laser)

เอกไซเมอร์(Eximer) เป็นคำที่รวมระหว่างคำว่า Excited กับ Dimer ซึ่งมีความหมายว่า โมเลกุลชนิด 2 อะตอม(Diatomic molecule) เอกไซเมอร์เป็นชื่อที่ใช้เรียกแทนตัวกลางเลเซอร์ชนิดหนึ่งซึ่งตัวกลางนั้นเป็นแก๊สผสมระหว่างแก๊สเฉื่อยและแก๊สฮาโลเจน เมื่อแก๊สผสมทำปฏิกิริยาเคมีต่อกันส่งผลให้มีการปลดปล่อยพลังงานของการเปลี่ยนระดับพลังงานระหว่างสถานะกระตุ้นและสถานะพื้นและทำให้เกิดแสงเลเซอร์ขึ้นมา เอกไซเมอร์เลเซอร์สามารถให้แสงแบบพัลส์ได้ เลเซอร์ชนิดนี้สามารถผลิตรังสีที่มีพลังงานสูงซึ่งอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต(Ultraviolet) ตัวอย่างเช่น[8] ArF ให้ความยาวคลื่น 193 นาโนเมตร, KrF ให้ความยาวคลื่น 248 นาโนเมตร, XeCl ให้ความยาวคลื่น 308 นาโนเมตร, KrF ให้ความยาวคลื่น 248 นาโนเมตร, KrF ให้ความยาวคลื่น 248 นาโนเมตร และ XeF ให้ความยาวคลื่น 351 นาโนเมตร เป็นต้น และให้ลำแสงที่มีขนาดเล็กมาก เล็กกว่าเลเซอร์พลังงานสูงชนิดอื่นๆ โดยทั่วไปกำลังสูงสุดที่ได้จะมีค่าประมาณ 200 วัตต์ และมีประสิทธิภาพประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ เอกไซเมอร์เลเซอร์ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับงานด้านการแยกไอโซโทป ด้านการแพทย์ เช่น การทำเลสิก เป็นต้น

3) เลเซอร์ชนิดของเหลวหรือด้ายเลเซอร์(Liquid laser , Dye laser)

ใช้ตัวกลางเป็นของเหลว ซึ่งสารตัวกลางที่เป็นของเหลวมักจะเป็นสารประกอบทางเคมี ตัวอย่างของตัวกลางชนิดนี้คือ โรดามีน 6 จี (Rhodamine 6 G) , คลอโรฟลูออเรสซีน (Dichloro fluore scein) เป็นต้น สารประกอบเหล่านี้มีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงและปลดปล่อยแสงออกมาเป็นขบวนการที่เรียกว่าฟลูออเรสเซนซ์(Fluorescent) สารประกอบเหล่านี้เรียกว่าด้าย(Dye) ซึ่งเป็นสารที่ประกอบด้วยโมเลกุลใหญ่ทับซ้อนกัน ด้ายบางชนิดถูกนำมาทำเป็นสีย้อมผ้าได้ ดังนั้นในบางครั้งจึงพบว่าได้มีการนำสีย้อมผ้ามาทำให้เกิดแสงเลเซอร์ได้ เมื่อสารละลายของด้ายถูก pump โดยแฟลชแลมป์หรือโดยการให้แสงเลเซอร์ โมเลกุลของด้ายจะมีระดับพลังงานสูงขึ้นและกระโดดขึ้นไปอยู่อีกชั้นพลังงานหนึ่ง ซึ่งพลังงานชั้นที่ด้ายขึ้นไปนั้นเป็นชั้นที่มีพลังงานแบบสั้นและแบบหมุนอยู่มาก โมเลกุลของด้ายจะลดค่าพลังงานลงมาเล็กน้อย และความต่างของระดับชั้นพลังงานนี้เองทำให้เกิดประชากรผกผันเกิดขึ้น แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ไว้สำหรับความรู้เท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการปล่อยรังสีที่ถูกกระตุ้นและการขยายทำให้เกิดเป็นแสงเลเซอร์ออกมา แต่เนื่องจากความต่างของระดับชั้นพลังงานที่เกิดขึ้นนั้นเป็นช่วงกว้างทำให้เกิดแสงเลเซอร์ได้หลายความถี่หรือหลายช่วงคลื่น ดังนั้นตายเลเซอร์จึงมีคุณสมบัติที่จะเปลี่ยนแปลงความถี่หรือช่วงคลื่นได้เป็นอย่างดี เลเซอร์ชนิดของเหลวหรือตายเลเซอร์สามารถให้แสงได้ทั้งแบบต่อเนื่อง (CW) หรือแบบพัลส์ ก็ได้ นอกจากนี้ยังให้แสงเลเซอร์ที่สามารถปรับช่วงคลื่นเป็นช่วงกว้างในขณะที่เลเซอร์ชนิดอื่นอาจจะให้แสงเลเซอร์ออกมาที่ช่วงคลื่นคงที่ตายเลเซอร์สามารถทำให้เกิดแสงเลเซอร์ที่ช่วงคลื่น 350 – 1100 นาโนเมตรได้ ซึ่งเลเซอร์ชนิดอื่นไม่สามารถทำได้ โดยทั่วไปกำลังสูงสุดที่ได้จากเลเซอร์ชนิดนี้มีค่าประมาณ 50 กิโลวัตต์ ตายเลเซอร์ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในวงการต่างๆอย่างกว้างขวาง เช่น ด้านพลังงานได้นำเลเซอร์ชนิดนี้ไปแยกไอโซโทปของเลเซอร์ซึ่งค่าใช้จ่ายจะถูกกว่าการแยกด้วยกระบวนการอื่นๆ , ด้านอุตสาหกรรมถูกใช้ในการศึกษาความเค้นและความเครียดของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลขณะทำงาน , ด้านการแพทย์ถูกนำไปใช้ในการผ่าตัดเรตินานัยน์ตา ผ่าตัดนิ้วในโต โดยการผ่าตัดนั้นไม่มีบาดแผลและไม่มีการติดเชื้อหลังผ่าตัด และด้านการสำรวจมลภาวะเป็นพิษในอากาศ เนื่องจากแสงตายเลเซอร์สามารถเปลี่ยนช่วงคลื่นได้อย่างต่อเนื่องทำให้สามารถวัดแก๊สพิษได้หลายชนิดพร้อมกันได้ดีกว่าเลเซอร์ชนิดอื่น[7]

4) เลเซอร์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Laser)

เลเซอร์สารกึ่งตัวนำเป็นเลเซอร์ชนิดที่ใช้ตัวกลางเป็นสารกึ่งตัวนำ การเกิดแสงเลเซอร์เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับหลุม(Hole)ที่บริเวณรอยต่อ P-N ของสารกึ่งตัวนำ ลักษณะพิเศษของเลเซอร์ชนิดนี้คือ มีขนาดเล็ก ใช้งานง่าย เมื่อผลิตจำนวนมากจะมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างต่ำ แต่เลเซอร์ชนิดนี้จะมีลำแสงบานออกอย่างมากและการเกิดของแสงเลเซอร์ก็ไม่สม่ำเสมอ เลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่ใช้กันอย่างกว้างขวางคือ GaAs [5] ให้แสงที่มีความยาวคลื่น 840 นาโนเมตร กำลังส่งออกต่อเนื่องที่ 77 เคลวินสูงถึง 2-3 วัตต์ มีประสิทธิภาพประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ เลเซอร์สารกึ่งตัวนำถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการทำเส้นใยแก้วนำแสง

2.2 การประยุกต์ใช้งานเลเซอร์

เลเซอร์ในปัจจุบันมีการใช้งานอย่างกว้างขวางเนื่องจากเลเซอร์มีคุณสมบัติที่โดดเด่น คือมีทิศทางที่แน่นอน มีความเข้มของแสงสูง เป็นลำแสงที่เล็กทำให้มีความแม่นยำสูง[9] สามารถทำงานที่ต้องใช้ความละเอียดสูงได้ ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้เลเซอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆได้มากมาย เช่น

2.2.1 การใช้เลเซอร์ในด้านการแพทย์

สำหรับในวงการแพทย์เลเซอร์เป็นที่นิยมเนื่องจากเลเซอร์เป็นลำแสงที่เล็กทำให้มีความแม่นยำในการทำงาน ทำให้สามารถใช้เลเซอร์ในการผ่าตัดต่างๆได้ เช่น การรักษาโรคเกี่ยวกับตา การรักษาโรคผิวหนัง การรักษาโรคมะเร็ง เป็นต้น การใช้เลเซอร์ในการรักษายังช่วยให้มีโอกาสเกิดอันตรายต่อระบบประสาทน้อย มีเลือดออกน้อย และยังสามารถใช้เลเซอร์ในการห้ามเลือดได้ในบางกรณีอีกด้วย เลเซอร์ที่ใช้ในการผ่าตัดได้แก่ เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ เลเซอร์อาร์กอน ในปัจจุบันเลเซอร์มีบทบาทมากขึ้นในด้านการแพทย์มากขึ้นเรื่อยๆ เช่น การทำศัลยกรรมตกแต่ง การผ่าตัดในจุดที่ซับซ้อนเข้าถึงยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การใช้เลเซอร์ในด้านการสื่อสารโทรคมนาคม

ปัจจุบันเลเซอร์เริ่มมีการนำมาใช้ในการสื่อสารมากขึ้นเพื่อใช้ในการถ่ายทอดสัญญาณโทรศัพท์ สัญญาณโทรทัศน์ การส่งข้อมูลของคอมพิวเตอร์ โดยใช้เลเซอร์ไดโอดเป็นตัวส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งการใช้เลเซอร์ในการสื่อสารนั้นจะมีข้อดีในเรื่องของความเร็วในการส่งข้อมูล ไม่มีสัญญาณรบกวน มีขนาดเล็ก รองรับย่านความถี่ได้สูง ทำให้การสื่อสารในยุคนี้มีความสะดวกรวดเร็วมากขึ้น แต่ข้อเสียของใยแก้วนำแสงคือมีราคาที่สูงกว่าการใช้สายโทรศัพท์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันจึงทำให้ยังคงมีการใช้สายโทรศัพท์แบบเก่าอยู่

2.2.3 การใช้เลเซอร์ในด้านการวัด

การวัดโดยการใช้เลเซอร์นั้นโดยทั่วไปจะนิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งการวัดนั้นจะแบ่งออกเป็นหลายๆด้าน ได้แก่ การกำหนดจุด การตรวจสอบรูปร่างหรือลักษณะของชิ้นงาน การนับ การฉายภาพลายเส้น การหาความผิดพลาดของชิ้นงาน เป็นต้น โดยข้อดีของการใช้เลเซอร์ในการวัด คือ มีความแม่นยำ มีความชัดเจน ไม่ส่งผลกระทบต่อชิ้นงาน ทำให้การใช้เลเซอร์ในการวัดมีความสะดวกมีการทำงานที่รวดเร็วกว่าการที่ต้องไปวัดด้วยตัวเองซึ่งต้องใช้เวลาพอสมควรและยังมีโอกาสผิดพลาดได้ง่ายอีกด้วย

2.2.4 การใช้เลเซอร์ในการแปรรูปโลหะ

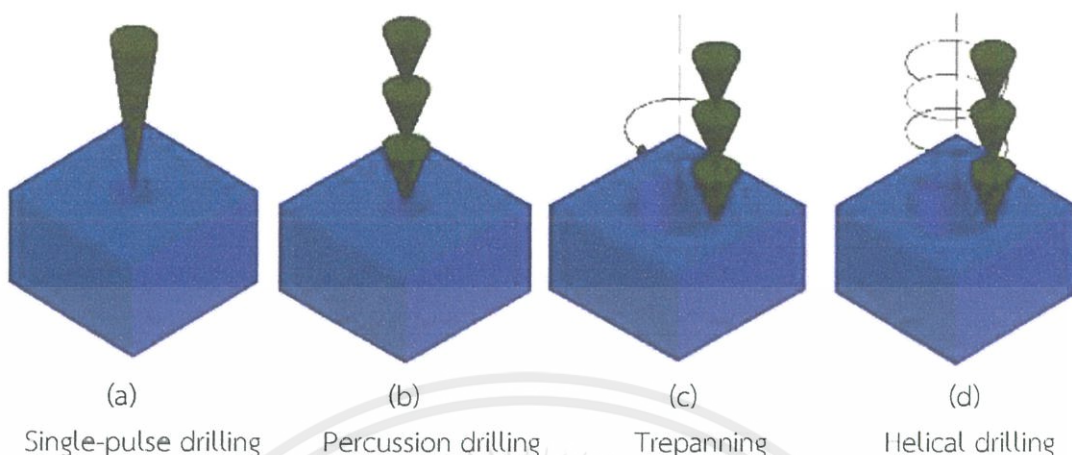
ในปัจจุบันการแปรรูปโลหะเริ่มมีการใช้เลเซอร์เข้ามามีส่วนช่วยในการทำงานมากขึ้นโดยนิยมใช้ในการตัด เจาะ เชื่อม เป็นต้น เนื่องจากการใช้เลเซอร์นั้นทำให้งานที่ได้ออกมามีคุณภาพ มีความคลาดเคลื่อนน้อย สามารถทำงานที่มีขนาดเล็กได้ เพราะเลเซอร์มีความแม่นยำสูง มีรอยตัดที่เรียบ รอยเชื่อมสวยงาม จึงทำให้เลเซอร์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่คุ้มค่าต่อการลงทุน

นอกจากนี้เลเซอร์ยังสามารถนำไปใช้งานในด้านต่างๆได้อีกมากมายในหลายๆด้านอย่างเช่นในชีวิตประจำวันที่พบบ่อยๆ คือ เลเซอร์สแกนบาร์โค้ดเวลาซื้อสินค้า หรือเลเซอร์ในเครื่องเล่นวีซีดีและดีวีดี การแกะสลักชื่อหรือลวดลายต่างๆลงบนชิ้นงาน และเลเซอร์ยังมีการนำไปใช้ในทางทหาร เช่น ใช้ในการนำวิถีจรวด ใช้ในการวัดระยะ ชีตตำแหน่งเป้าหมาย เป็นต้น

2.3 กลไกการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์

การเจาะด้วยเลเซอร์เป็นกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อนเนื่องจากการเจาะนั้นเกี่ยวข้องกับกลไกหลายอย่าง กระบวนการต่างๆเกิดขึ้นเมื่อแสงเลเซอร์ที่มีพลังงานสูงตกกระทบผิวโลหะ แสงเลเซอร์นั้นจะถูกดูดซับที่ผิวหน้าของวัสดุทำให้มีการนำความร้อน (Thermal Conduction) ทำให้เกิดการหลอมเหลว (Melting) จากนั้นโลหะบางส่วนจะระเหยกลายเป็นไอ (Vaporization) [10] เกิดเป็นช่องว่างในชิ้นงาน ซึ่งไอวัสดุจะทำปฏิกิริยากับอากาศและรังสีของแสงเลเซอร์ในช่วงของการยิงพัลส์ ส่งผลให้ไอขยายตัวอย่างรวดเร็วและเกิดคลื่นกระแทก (Shock wave) แผ่ไปรอบๆ [11] ในขณะเดียวกันอะตอมที่เป็นไอแตกตัวเป็นไอออนบวกซึ่งเปลี่ยนเป็นพลาสมา (Plasma) ในเวลาต่อมา โดยพลาสมาจะเกิดขึ้นระหว่างลำแสงเลเซอร์และผิววัสดุทำให้มีการดูดซับและปิดกั้นพลังงานที่ส่งมาจากแสงเลเซอร์ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการหักเหของแสงเลเซอร์ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการเจาะลดลง การหลอมเหลวจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อสารตัวกลางเลเซอร์ได้รับพลังงานจนอุณหภูมิเพิ่มถึงจุดหลอมเหลวของโลหะ และเมื่ออุณหภูมิผิวชิ้นเพิ่มจนถึงอุณหภูมิระเหยจะมีไอโลหะเกิดที่ผิวของวัสดุ [12] ไอโลหะเหล่านี้จะทำให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูอาจารย์ใช้เท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ชนิดของการเจาะ

2.4 ข้อดีและข้อจำกัดของการเจาะด้วยเลเซอร์

การเจาะด้วยเลเซอร์มีข้อดีต่างๆมากมาย เช่น

- 1) ไม่มีรอยแตกของชิ้นงาน
- 2) สามารถวางตำแหน่งรูเจาะได้อย่างแม่นยำ โดยการใช้ระบบเลนส์ของเลเซอร์ในการจัดวางตำแหน่ง
- 3) สามารถเจาะรูได้หลายขนาด และเจาะวัสดุที่มีความแข็งมาก เช่น เพชร ไทเทเนียม ทั้งสแตน ได้
- 4) การเจาะเป็นไปได้อย่างรวดเร็วและใช้เวลาในการติดตั้งน้อย
- 5) สามารถเจาะรูในองศาที่ยากต่อการเจาะได้
- 6) ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำ

อย่างไรก็ตามการเจาะก็ยังมีข้อเสีย เช่น

- 1) ค่าอุปกรณ์มีราคาสูง
- 2) การบานออกของรูเจาะ (Taper) ขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุ
- 3) การเจาะรูที่ไม่ทะลุให้ได้ขนาดที่แม่นยำตามต้องการจะทำได้ยาก
- 4) มีข้อจำกัดในเรื่องความหนาของวัสดุที่เลเซอร์สามารถเจาะได้

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรูเจาะ

2.5.1 พลังงานของพัลส์ (Pulse energy) ช่วงเวลาการยิงพัลส์ (Pulse duration) และ ความถี่ของพัลส์ (Pulse repetition frequency) การใช้พลังงานพัลส์ ระยะพัลส์ และความถี่ของพัลส์ที่เหมาะสมในการเจาะเลเซอร์มีผลต่อคุณภาพรูเจาะซึ่งในการนำเนื้อวัสดุออกจากชิ้นงานเป็นปริมาณมากนั้นต้องใช้กำลังของแสงเลเซอร์ค่อนข้างสูงเพื่อที่จะทำให้เกิดความดันไอที่ใช้ดันของออกจากชิ้นงาน การเพิ่มพลังงานพัลส์จะทำให้ได้กำลังสูงสุด (Peak power) ของพัลส์สูง ทำให้ได้รูที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้นเอง [1]

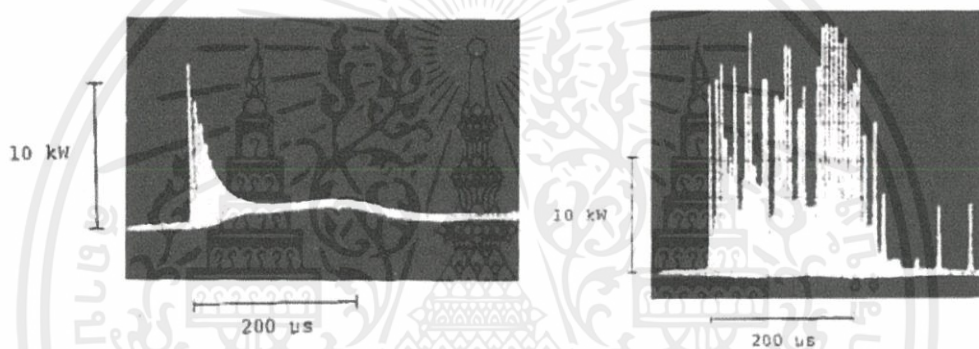
การที่จะทำให้ได้รูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสม่ำเสมอขึ้นทำได้โดยการใช้ช่วงเวลาการยิงพัลส์ให้คงที่ แต่ถ้าช่วงเวลาการยิงพัลส์มากเกินไปจะทำให้วัสดุหลอมเหลวเกินไปและปากของรูเจาะก็จะมีขนาดใหญ่

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยของ Yeo et al. [1] ทำให้ทราบว่า การใช้พลังงานพัลส์สูงและใช้ช่วงเวลาต่อพัลส์สั้นนั้น เหมาะสำหรับการเจาะที่ต้องการรูลึกในวัสดุพิเศษที่ใช้มากในอากาศยาน

สำหรับการเจาะโดยใช้พลังงานในแต่ละพัลส์เท่ากัน มีระยะพัลส์เท่ากัน แต่ใช้ความถี่ของพัลส์ต่างกัน พบว่า การเจาะโดยใช้ความถี่ต่ำกว่าจะมีช่วงพักระหว่างพัลส์ยาว เป็นผลให้โลหะในรูเจาะเกิดการแข็งตัว และในการเจาะครั้งต่อไปก็ต้องเจาะทับโลหะส่วนที่แข็งตัวลงไป ทำให้ได้รูที่ตื้นกว่าการเจาะโดยใช้ความถี่สูง

2.5.2 รูปร่างพัลส์(Pulse shape) นอกจากนั้นรูปร่างของพัลส์ที่เวลาต่างๆ(Temporal profile)ก็มีผลต่อการเจาะเช่นกัน โดยการเจาะโลหะด้วยพลังงานที่เท่ากัน บนวัสดุชนิดเดียวกัน การเจาะโดยใช้ชบวนพัลส์(Pulse train)จะให้คุณภาพรูเจาะได้ดีกว่าการเจาะด้วยพัลส์เดี่ยว(Normal laser pulse) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.7



(a) การเจาะด้วยพัลส์เดี่ยว

(b) การเจาะโดยใช้ชบวนพัลส์

รูปที่ 2.7 รูปร่างพัลส์[13]

2.5.3 ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์(Laser wavelength), การลู่ออกของแสง(Beam divergence)และ Transverse modes การเจาะวัสดุให้ทะลุผ่านนั้นจำเป็นต้องใช้การแผ่รังสีเลเซอร์เข้ามาช่วย และขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการสะท้อนของผิววัสดุ นอกจากนี้ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์แปรผันตรงกับการสะท้อนของแสง ดังนั้นเพื่อให้การเจาะได้ผลดีจึงควรใช้แสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นสั้น

การลู่ออกของแสงเลเซอร์ มีลักษณะเป็นการกระจายออกของลำแสงตามการเคลื่อนที่ และขึ้นอยู่กับกำลังเฉลี่ยที่ออกมาจากแสงเลเซอร์ ยิ่งแสงเลเซอร์มีกำลังมากก็จะมี การลู่ออกของแสงเพิ่มขึ้นตาม สำหรับการเจาะที่มีความลึกมาก ๆ ต้องใช้แสงเลเซอร์ที่มีการลู่ออกน้อย

อีกปัจจัยหนึ่งคือ Transverse modes หรือ Transverse Electromagnetic (TEM) บอกการกระจายตัวของลำแสงตามทิศทางในแนวแกน x และแกน y เช่น โหมด TEM₀₀ มีการสูญเสียน้อยที่สุด เนื่องจากมีการเลี้ยวเบนน้อย, ลู่ออกน้อย และสามารถโฟกัสไปยังจุดที่เล็กที่สุดที่สามารถเป็นไปได้ สำหรับการการเจาะรูด้วยเลเซอร์ โหมดที่มีลำดับน้อยๆนั้นเป็นที่ต้องการเพื่อให้ได้แสงเลเซอร์ที่มีการลู่ออกน้อย และมีพลังงานสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 ความยาวโฟกัสของเลนส์(Focal length of lens) และตำแหน่งโฟกัส(Focal position) ความยาวโฟกัสของเลนส์และตำแหน่งโฟกัสเป็นปัจจัยที่ต้องพิจารณาร่วมกันเพื่อให้ได้รูเงาตามที่ต้องการ เมื่อแสงเลเซอร์ผ่านเข้าไปในเลนส์แสงที่ได้จะหักเหและมีส่วนหนึ่งลู่ออก สำหรับเลนส์ที่มีความยาวโฟกัสมากจะได้รูเงาเล็กกว่าเลนส์ที่มีความยาวโฟกัสน้อย เพราะฉะนั้นแสงเลเซอร์ที่มีความยาวโฟกัสมากแต่มีการลู่ออกของแสงน้อยจะส่งผลให้รูเงาที่ได้มีความลึกมากที่สุด [1]

ถ้าตำแหน่งโฟกัสของแสงเลเซอร์ไม่ถูกต้องจะส่งผลให้ขนาดรูเงาไม่ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งตำแหน่งโฟกัสที่ดีควรอยู่ที่ผิวของวัสดุ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเงาด้านในขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุ และตำแหน่งโฟกัสของแสงเลเซอร์ การเจาะด้วยเลเซอร์ที่ดีควรมีการลู่ออกของแสงเลเซอร์น้อย, ความยาวโฟกัสของเลนส์มาก และตำแหน่งโฟกัสควรอยู่ที่ผิวของวัสดุ

2.5.5 แก๊สช่วย (Assist gas) ในกระบวนการเจาะ แก๊สช่วยจะมีส่วนช่วยให้การเจาะมีคุณภาพมากขึ้น รูเงาสวยงาม และยังช่วยป้องกันเลนส์จากเศษวัสดุอีกด้วย การใช้แก๊สช่วยจะต้องมีการเลือกชนิดของแก๊สซึ่งแต่ละวัสดุจะมีผลที่แตกต่างกัน ความหนาของชิ้นงานก็มีส่วนที่ทำให้แก๊สช่วยให้ผลที่ต่างกันได้ การเลือกใช้พลังงานในการเจาะ ซึ่งในการเจาะที่พลังงานแตกต่างกันผลของแก๊สช่วยก็จะต่างกันด้วย[17] ส่วนในผลของความดันกับแก๊สช่วย ที่ความดันต่ำแก๊สช่วยจะเป็นตัวขัดขวางการเจาะและที่ความดันสูงจะพบว่าแก๊สช่วยจะขัดขวางการเจาะที่พลังงานต่ำแต่จะมีส่วนช่วยในการเจาะที่พลังงานสูง [2] เป็นต้น

2.5.6 วัสดุ (Material) ในการเจาะด้วยเลเซอร์ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของวัสดุที่จะเจาะว่าวัสดุ นั้นจะส่งผลอย่างไรซึ่งวัสดุแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่ต่างกันอย่างออกไปเพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการเจาะ เช่น การสะท้อนของผิวที่แต่ละความยาวคลื่น ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับพลังงานแสงเลเซอร์ การนำความร้อน การแพร่กระจายความร้อน เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปวัสดุที่มีการแพร่กระจายความร้อนสูงจะรับและนำพลังงานความร้อนอย่างรวดเร็ว[1]

2.5.7 สิ่งแวดล้อม (Environment) ในการเจาะด้วยเลเซอร์ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิและความชื้น ฝุ่น ไอน้ำมัน หรือ หมอก และการสั่นอันเนื่องมาจากเครื่องจักรที่หนัก อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเจาะของเลเซอร์ได้ การเก็บรักษาเลนส์ไม่ให้เกิดความชื้น หรือในอุปกรณ์เลเซอร์ที่มีพลังสูงนั้น ต้องระวังที่จะไม่ให้มีไอน้ำมัน หรือฝุ่นเกาะอยู่บนผิวของเลนส์ ซึ่งอาจมีผลต่อการกระจายตัวหรือการหักเหของแสงเลเซอร์ได้ นอกจากนั้นยังส่งผลต่อการดูดซับของเลนส์ ทำให้เลนส์อาจเกิดความเสียหายได้

2.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมาในโครงการนี้ได้มีการศึกษางานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกับงานวิจัยของ R. S. Patel และ M. Q. Brewster [17] และ Ng. et al. [10] ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่คิดค้นขึ้นโดย R. S. Patel และ M. Q. Brewster [17] ใช้สมการการนำความร้อนมาวิเคราะห์โดยพิจารณาว่าโลหะอยู่ในสถานะของแข็งและของเหลว และใช้สมการโมเมนตัมมาอธิบายในช่วงเวลาที่วัสดุกำลังหลอมละลาย พร้อมทั้งสามารถอธิบายผลของแก๊สช่วยในขณะเจาะ การไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดสนิม ผลของสนิมต่อการเจาะซึ่งทำให้เห็นผลลัพธ์ได้อย่างชัดเจน แต่กระนั้นสมการของ R. S. Patel และ M. Q. Brewster [17] ยังไม่สามารถใช้คำนวณผลการเจาะโลหะที่มีความหนาเกินช่วง 0.6 ถึง 1.2 มิลลิเมตรได้อย่างแม่นยำเนื่องจากความหนาขึ้นอยู่กับค่าการแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity) ของโลหะแต่ละชนิด และไม่ได้นำผลของการนำความร้อนในแนวรัศมีมาคิด

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่คิดค้นขึ้นโดย Ng. et al. [10] ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองของการเจาะด้วยเลเซอร์แบบหนึ่งมิติบนแผ่นโลหะ โดยรวมผลของแก๊สช่วยไว้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมานี้ได้นำกฎการอนุรักษ์พลังงานและกฎทรงมวลมาใช้เป็นส่วนสำคัญ เมื่อนำข้อมูลจากผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่ความเร็วในการเจาะที่ได้ก็ยังคงมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 8.69% ซึ่งอาจเป็นผลมาจากค่าคงที่ที่นำมาใช้ในสมการบางตัวยังไม่รู้ที่แน่ชัด และการวิเคราะห์ในช่วงรอยต่อระหว่างของแข็ง-ของเหลว (Solid-liquid interface) ไม่ถูกนำมาคิดทำให้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น

นอกจากนี้การศึกษาแบบจำลองการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ในปัจจุบันซึ่งมีอีกมากมายทั้งแบบระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและเชิงวิเคราะห์ โดยมีการวิเคราะห์ตั้งแต่ 1 มิติ ถึง 3 มิติ แตกต่างกันไปทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมมติฐานที่นำมาพิจารณา ซึ่งแสดงดังตาราง 2.4

ตารางที่ 2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง

No.	Name(s)	Model describe	Result
1	H.S. Carslaw and J.C. Jager, 1959 [15]	<ul style="list-style-type: none"> แบบจำลอง 1 มิติ, 2 มิติ และ 3 มิติ พิจารณาการถ่ายเทความร้อนในสถานะของแข็ง (solid heating) โดยใช้เงื่อนไขขอบเขตแตกต่างกัน พิจารณาเวลาที่ใช้ต่อการยิงเลเซอร์หนึ่งพัลส์แล้วทำให้โลหะถึงจุดหลอม เป็นการศึกษาแบบจำลองในเชิงวิเคราะห์ 	<ul style="list-style-type: none"> วิเคราะห์อุณหภูมิบนผิวโลหะในหนึ่งพัลส์
2	Jeb Collins and Pierre, 2011 [16]	<ul style="list-style-type: none"> แบบจำลอง 1 มิติ พิจารณาการถ่ายเทความร้อนโดยใช้รูปร่างรูเจาะเป็นรูปพาราโบลาและกรวย เป็นการศึกษาแบบจำลองด้วยวิธีการเชิงตัวเลข 	<ul style="list-style-type: none"> วิเคราะห์อุณหภูมิและความลึกของรูเจาะจากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3	N.D Pandey and T. Mohandas, 2006 [14]	<ul style="list-style-type: none"> • แบบจำลอง 2 มิติ • พิจารณาการถ่ายเทความร้อนของการเจาะเลเซอร์ที่รอยต่อระหว่างของแข็ง-ของเหลว (solid-liquid interface) • พิจารณาความเค้นรอบรูเจาะโดยใช้ทฤษฎี von Mises • เป็นการศึกษาแบบจำลองด้วยวิธีการเชิงตัวเลข 	<ul style="list-style-type: none"> • ศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิและพลังงานเลเซอร์ในการเจาะแบบ percussion • ศึกษาการเคลื่อนที่ของของเหลวและรอยแยกของวัสดุในสถานะของแข็ง-ของเหลว (solid-liquid interface) รอบรูเจาะ
4	R.S Patel and M.Q. Brewster, 1991 [17]	<ul style="list-style-type: none"> • แบบจำลอง 1 มิติ • พิจารณาพฤติกรรมแก๊สช่วยในการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ในช่วงรอยต่อระหว่างของแข็ง-ของเหลว (solid-liquid interface) • เป็นการศึกษาแบบจำลองด้วยวิธีการเชิงตัวเลข 	<ul style="list-style-type: none"> • วิเคราะห์ผลของแก๊สช่วย (assist gas) ในการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ • วิเคราะห์อุณหภูมิผิวและความหนาของชั้นของเหลว
5	G.K.L. Ng, P.L. Crouse and L. Li, 2006 [10]	<ul style="list-style-type: none"> • แบบจำลอง 1 มิติ • พิจารณาความดันไฮดรอลิก • พิจารณาผลของ Exothermic reaction • เป็นการศึกษาแบบจำลองในเชิงวิเคราะห์ 	<ul style="list-style-type: none"> • วิเคราะห์ความดันไอที่เกิดจากผลของแก๊สช่วย • วิเคราะห์ผลการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขณะที่ผิววัสดุเกิดการหลอมเหลว
6	Wei Han and Ryszard J.Pryputniewicz, 2004 [18]	<ul style="list-style-type: none"> • แบบจำลอง 3 มิติ • พิจารณาการถ่ายเทความร้อน (การนำ, การพาและการแผ่รังสี) ของกระบวนการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ในช่วงรอยต่อระหว่างของแข็ง-ของเหลว (solid-liquid interface) • เป็นการศึกษาแบบจำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลขและเชิงวิเคราะห์ 	<ul style="list-style-type: none"> • วิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิ, ผลกำลังสูงสุด, ช่วงเวลาเปิด-ปิดพัลส์ (Laser pulse width), จำนวนของพัลส์ (number of pulse) ในการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์

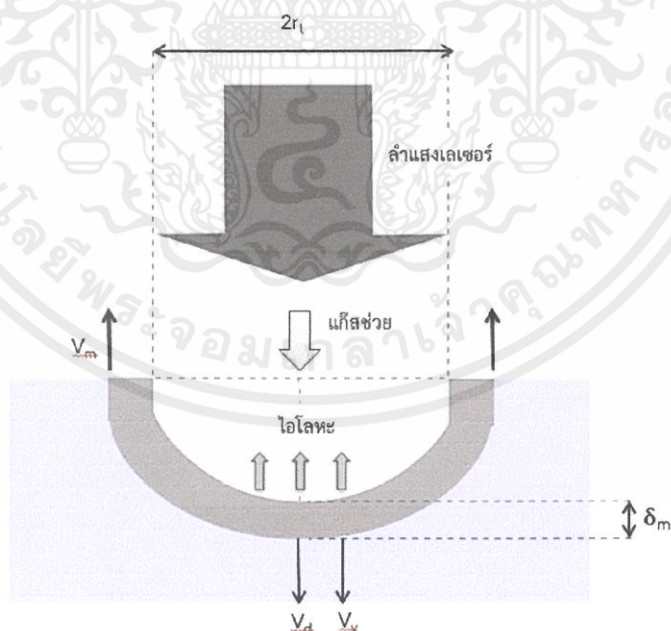
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์

3.1 กระบวนการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์

โครงการการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์แบบพัลส์เดียวนี้ พิจารณาโดยใช้ Nd:YAG laser เป็นเลเซอร์ที่ใช้ในการเจาะ เนื่องจาก Nd:YAG laser จะให้ลำแสงเลเซอร์ที่มีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ ในระหว่างการเจาะจะเกิดกระบวนการทางความร้อนขึ้น 3 กระบวนการคือ กระบวนการให้ความร้อนแก่ของแข็ง (Solid heating) กระบวนการหลอมเหลว (Melting) และกระบวนการระเหยกลายเป็นไอ (Vaporization) ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อลำแสงเลเซอร์รัศมี r_l และมีความเร็ว V_d ตกกระทบพื้นผิวโลหะ ทำให้เกิดการหลอมเหลว และภายในรูเจาะจะถูกแบ่งเป็นชั้นของของแข็ง ของเหลว และไอ โดยชั้นที่เป็นโลหะเหลวนั้นมีความหนา δ_m โดยโลหะเหลวบางส่วนจะระเหยกลายเป็นไอออกไปด้วยความเร็ว V_v ไอโลหะที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดความดันไอและดันให้โลหะเหลวไหลออกนอกรูเจาะด้วยความเร็ว V_m



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสมมติฐานที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองของการเจาะโลหะโดยใช้เลเซอร์ มีดังนี้

1. ใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วยในกระบวนการเจาะ
2. ใช้รูปแบบการกระจายตัวของเลเซอร์บนผิวหน้าชิ้นงานแบบสม่ำเสมอ (Uniform beam profile)
3. เป็นกระบวนการเจาะแบบหนึ่งมิติ
4. ไม่คิดผลของการเกิดพลาสมา
5. ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการดูดซับพลังงานของผิววัสดุขณะหลอมเหลว เมื่อผิววัสดุได้รับความร้อนจากแสงเลเซอร์
6. พิจารณาเฉพาะวัสดุที่เป็นโลหะเท่านั้น

3.2 สมการการให้ความร้อนแก่ของแข็ง(Solid heating)

คือ สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์เวลาที่ใช้ในการหลอมเหลวของพัลส์แรก

$$T(0,t) = T_0 + 2I_{abs} \sqrt{\frac{t}{\pi k c_p \rho}} \quad (3.1)$$

- เมื่อ
- $T(0,t)$ คือ อุณหภูมิของผิวโลหะที่เวลาใดๆ (K)
 - T_0 คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของโลหะ (K)
 - c_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะ (J/kg-K)
 - ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)
 - I_{abs} คือ ความเข้มของแสงเลเซอร์ที่ชิ้นงานดูดซับไว้ (W/m^2)

3.3 สมการการวิเคราะห์ในช่วงรอยต่อของแข็งกับของเหลว (Solid-Liquid interface) และของเหลวกับไอ (Liquid-Vapor interface)

3.3.1 กฎทรงมวล

ความเร็วของการเจาะ (V_d) สามารถหาได้โดยใช้กฎทรงมวล เนื่องจากระหว่างกระบวนการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์โลหะแข็งจะเกิดการหลอมเหลว โดยที่โลหะเหลวจะถูกดันออกมาจากรูเจาะและมีบางส่วนสูญเสียออกไปในรูปของไอโลหะ ซึ่งสามารถนำมาเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\dot{m}_s = \dot{m}_v + \dot{m}_m \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ \dot{m}_s คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของโลหะแข็งที่เกิดการหลอมเหลว (kg/s)
 \dot{m}_v คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของโลหะเหลวที่กลายเป็นไอ (kg/s)
 \dot{m}_m คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของโลหะเหลวที่ถูกดันออกจากรูเจาะ (kg/s)
 สามารถจัดรูปสมการ (3.2) ใหม่ ได้ดังนี้

$$\pi r_i^2 \rho_s V_d = \pi r_i^2 \rho_m V_v + 2\pi r_i \delta_m \rho_m V_m \quad (3.3)$$

$$\pi r_i^2 \rho_s V_d - \pi r_i^2 \rho_m V_v - 2\pi r_i \delta_m \rho_m V_m = 0 \quad (3.4)$$

$$\rho_s V_d - \rho_m V_v - \frac{2\delta_m \rho_m}{r_i} V_m = 0 \quad (3.5)$$

$$V_d = \frac{\rho_m V_v}{\rho_s} + \frac{2\delta_m \rho_m}{r_i} V_m \quad (3.6)$$

เมื่อ ρ_s และ ρ_m คือ ความหนาแน่นของโลหะแข็งและโลหะเหลว (kg/m^3) ตามลำดับ
 κ_m คือ ค่าการแพร่กระจายทางความร้อนของโลหะเหลว (W/mK)
 โดยที่ความหนาของชั้นโลหะที่หลอมเหลว (δ_m) สามารถประมาณค่าได้จากสมการนี้

$$\delta_m \approx \frac{\kappa_m}{V_d} \quad (3.7)$$

จากสมการ (3.6) สามารถหาความเร็วของโลหะเหลวที่ออกจากรูเจาะ (V_m) ได้ในหัวข้อย่อยที่ 3.3.3 และ
 ความเร็วของไอ (V_v) สามารถหาได้ในหัวข้อย่อยที่ 3.3.5

3.3.2 ความดันของแก๊สช่วย

การใช้แก๊สช่วยในกระบวนการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์จะช่วยเสริมความดันไอทำให้การนำโลหะ
 เหลวออกจากรูเจาะมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในที่นี้จะพิจารณานำสมการของ Low et al. [19] มาใช้ ดังนี้

$$\frac{P_{eff}}{A_{eff}} = \frac{P_c}{A_{eff} + A_{rl}} \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p_{eff} = p_c \frac{A_{eff}}{A_{eff} + A_{r1}} \quad (3.9)$$

เมื่อ p_c คือ ความดันวิกฤตของแก๊สที่ทางออกของหัวฉีด (N/m^2)

A_{eff} คือ พื้นที่ที่แก๊สช่วยปะทะกับผิวชิ้นงาน (m^2)

A_{r1} คือ พื้นที่ที่แก๊สสูญเสียความดันทางด้านข้าง (m^2)

โดยหา p_c และ A_{eff} ได้จาก

$$p_c = \left(\frac{\gamma}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} p_i \quad (3.10)$$

$$A_{eff} = \pi r_i^2 \quad (3.11)$$

$$A_{r1} = d_n \pi z_n \quad (3.12)$$

เมื่อ p_i คือ ความดันแก๊สภายในหัวฉีด (N/m^2)

γ คือ อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ(สำหรับแก๊สออกซิเจนมีค่า γ เท่ากับ 1.4 และแบบจำลองนี้ได้พิจารณาให้ใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วย)

d_n คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออกของหัวฉีด (m)

z_n คือ ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับชิ้นงาน (m)

3.3.3 ความเร็วของโลหะเหลวที่ออกจากรูเจาะ

พิจารณาให้โลหะเหลวที่ไหลออกจากรูเจาะเปรียบเสมือนเป็นการไหลของของไหลภายในท่อ ดังนั้นสามารถใช้สมการของแบร์นูลลี (Bernoulli's equation) มาคำนวณหาความเร็วของโลหะเหลวที่ออกจากรูเจาะได้ดังนี้

$$p_{vap} + p_{eff} = \frac{\rho_m V_m^2}{2} + \rho_m g h + \frac{\sigma}{r_i} \quad (3.13)$$

เมื่อ p_{vap} คือ ความดันไอ (N/m^2)

p_{eff} คือ ความดันประสิทธิผลของแก๊สช่วย (N/m^2)

g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

h คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อน (W/m^2K)

σ คือ แรงตึงผิว (N/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ห้ามมิให้คัดลอกหรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเทอมที่สองและเทอมที่สามทางฝั่งขวาของสมการ (3.13) คือความดันที่เกิดจากแรงกดและความดันที่เกิดจากแรงตึงผิว ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความดันในเทอมอื่นที่เหลือ เพราะฉะนั้นจัดรูปสมการที่ (3.13) ใหม่ได้ดังนี้

$$V_m = \sqrt{\frac{2(p_{\text{vap}} + p_{\text{eff}})}{\rho_m}} \quad (3.14)$$

การหาความเร็วของโลหะเหลวที่ออกจากกรูเจาะนั้นสามารถแบ่งการวิเคราะห์ได้เป็น 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 ความเร็วของโลหะเหลวที่ออกจากกรูเจาะโดยไม่ใช่แก๊สช่วยในกระบวนการเจาะ สามารถเขียนสมการที่ (3.14) ใหม่ได้ดังนี้

$$V_m = \sqrt{\frac{2p_{\text{vap}}}{\rho_m}} \quad (3.15)$$

กรณีที่ 2 ความเร็วของโลหะเหลวที่ออกจากกรูเจาะโดยพิจารณาผลของแก๊สช่วยในกระบวนการเจาะ แต่ไม่พิจารณาความดันของแก๊สที่สูญเสียออกทางด้านข้าง

จากสมการที่ (3.9) จะได้ $p_{\text{eff}} = p_c$ และสามารถจัดรูปสมการที่ (3.14) ใหม่ได้ดังนี้

$$V_m = \sqrt{\frac{2(p_{\text{vap}} + p_c)}{\rho_m}} \quad (3.16)$$

กรณีที่ 3 ความเร็วของโลหะเหลวที่ออกจากกรูเจาะโดยพิจารณาผลของแก๊สช่วย และผลของความดันแก๊สที่สูญเสียออกทางด้านข้าง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.14)

3.3.4 ความดันไอ

กระบวนการเจาะด้วยโลหะด้วยเลเซอร์นั้นภายในรูเจาะจะมีชั้นผสมระหว่างของแข็ง-ของเหลว และของเหลว-ไอแยกเป็นชั้นๆ การคำนวณหาความดันไอสามารถทำได้โดยใช้สมการของคลอเซียส-คลาเพรอน (Clausius-Clapeyron Equation) ซึ่งสมการนี้ได้มาจากการตั้งสมมติฐานว่าระหว่างชั้นของไอโลหะกับชั้นโลหะเหลวอยู่ในสมดุลทางพลศาสตร์ ดังนี้

$$p_{\text{vap}} = p_0 \exp \left[\frac{\Delta H_{\text{vap}}}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{vap}}} - \frac{1}{T_s} \right) \right] \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ p_0 คือ ความดันบรรยากาศ (N/m^2)

ΔH_{vap} คือ เอนทาลปีของการกลายเป็นไอ (J/mol)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส ($8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$)

T_{vap} คือ อุณหภูมิของไอ (K)

T_s คือ อุณหภูมิผิวของโลหะเหลว (K)

และมวลโมล (M_m) ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) มีค่า 0.05575 kg/mol

3.3.5 ความเร็วการกลายเป็นไอ

เนื่องจากความเร็วการกลายเป็นไอของโลหะนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิผิวของโลหะเหลวลอมเหลว โดยอธิบายเป็นความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้ [19]

$$V_v = V_0 \exp\left(-\frac{U}{T_s}\right) \quad (3.18)$$

โดยหา U และ V_0 ได้จาก

$$U = \left(\frac{M_a L_v}{N_a k_b}\right) \quad (3.19)$$

$$V_0 = \sqrt{kRT_s} \quad (3.20)$$

เมื่อ V_0 คือ อัตราเร็วของเสียงในแก๊ส (m/s)

M_a คือ มวลอะตอมเฉลี่ยของโลหะ (g/mol)

L_v คือ ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของโลหะ (J/kg)

N_a คือ ตัวเลขอาโวกาโดร

k_b คือ ค่าคงที่ของโบลซมาน (J/K)

3.3.6 สมดุลพลังงาน

พิจารณาสมดุลของพลังงานในชั้นโลหะสัมผัสกับแสงเลเซอร์ เมื่อโลหะเกิดการหลอมเหลวรอยต่อของชั้นโลหะเหลว - โลหะแข็งจะเคลื่อนที่เข้ามาในของแข็งด้วยความเร็วเฉลี่ย V_a โลหะเหลวบางส่วนจะไหลออกมาเนื่องจากความดันไอที่กดลงบนผิวของเหลวและความดันของแก๊สช่วย และมีบางส่วนที่กลายเป็นไอ พลังงานที่เข้าไปในชั้นโลหะเหลวประกอบด้วย 2 ส่วน คือ พลังงานจากแสงเลเซอร์และพลังงานจากการเกิดออกซิเดชัน ดังสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$P_m = I_{\text{abs}} \pi r_l^2 + P_{r,ox} \quad (3.21)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $P_{r,ox}$ คือ พลังงานจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างแก๊สออกซิเจนกับโลหะ (W)

P_{in} คือ พลังงานที่ใส่เข้าไปในชั้นโลหะเหลว (W)

พลังงานที่สูญเสียออกจากชั้นโลหะเหลวประกอบด้วยความร้อนที่สูญเสียไปเนื่องจากการนำความร้อน P_{cond} , ความร้อนที่สูญเสียไปเนื่องจากการพาความร้อน P_{conv} , พลังงานที่ต้องใช้สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิและหลอมเหลว P_{melt} และ พลังงานที่ต้องใช้สำหรับการกลายเป็นไอ P_{vap} โดยสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$P_{out} = P_{conv} + P_{cond} + P_{melt} + P_{vap} \quad (3.22)$$

โดยที่พลังงานที่เข้าไปจะเท่ากับพลังงานที่สูญเสีย จะได้ว่า

$$I_{abs} \pi r_1^2 + P_{r,ox} = P_{conv} + P_{cond} + P_{melt} + P_{vap} \quad (3.23)$$

เมื่อใช้ออกซิเจนเป็นแก๊สช่วย ออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับโลหะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วคายความร้อนออกมา ทำให้เป็นการเพิ่มพลังงานให้แก่กระบวนการเจาะโดยพลังงานจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มีค่าเท่ากับ

$$P_{r,ox} = \alpha_{ox} \left(\frac{V_d \pi r_1^2 \rho_m}{M_{r,ox}} \right) m_{ox} \Delta H_{ox} \quad (3.24)$$

เมื่อ ΔH_{ox} คือ พลังงานเอนทาลปีของปฏิกิริยาออกซิเดชัน (J/mol)

α_{ox} คือ ร้อยละของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

m_{ox} คือ สัดส่วนมวลของโลหะในอัลลอย

$M_{r,ox}$ คือ มวลอะตอมสัมพัทธ์ (kg/mol)

ความร้อนที่สูญเสียไปเนื่องจากการพาความร้อนสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนที่บริเวณผิวรูเจาะที่เกิดจากการหลอมเหลวและทิศทางการไหลของแก๊สที่ตั้งฉากกับพื้นผิวที่หลอมเหลว โดยตัวเลขของเรย์โน้ดสำหรับการไหลของแก๊สช่วยสามารถเขียนได้ดังนี้

$$Re = \frac{\rho_g v_g 2r_1}{\mu_g} \quad (3.25)$$

เมื่อ ρ_g คือ ความหนาแน่นของแก๊สช่วย (kg/m³)

v_g คือ ความเร็วในการไหลของแก๊สช่วย (m/s)

μ_g คือ ความหนืดแบบพลวัตของแก๊ส (Ns/m²)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการเย็นตัวระหว่างแก๊สช่วยและพื้นผิวที่หลอมเหลวต่อหน่วยพื้นที่ คือ

$$q = -h(T_s - T_i) \quad (3.26)$$

เมื่อ T_i คือ อุณหภูมิแก๊สช่วย (K)

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สามารถหาได้จาก

$$h = \frac{k_g}{2r_l} \left(C_c Re^{n_c} Pr^{\frac{1}{3}} \right) \quad (3.27)$$

โดยที่ C_c และ n_c คือ ค่าคงที่จากการทดลองการพาความร้อนแบบบังคับในแนวตั้งฉากกับผิวโลหะ
 เหลวมีค่าเท่ากับ 0.288 และ 0.731 [10]

k_g คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแก๊ส

Pr คือ ตัวเลขพรันด์เทิล(Prandtl number)ของแก๊สช่วย

ดังนั้นเมื่อรวมสมการที่ (3.25) , (3.26) และสมการที่ (3.27) จะได้พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการพาความร้อนโดยแก๊สช่วยเท่ากับ

$$P_{conv} = \frac{C_c k_g}{2r_l} \left(\frac{\rho_g v_g 2r_l}{\mu_g} \right)^{n_c} Pr^{\frac{1}{3}} (T_s - T_i) (\pi r_l^2) \quad (3.28)$$

ในระหว่างกระบวนการเจาะที่บริเวณผิววัสดุด้านบนและด้านข้างจะเกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการนำขึ้น ซึ่งพลังงานการนำความร้อนนี้สามารถประมาณค่าได้จากผลรวมของการถ่ายเทความร้อนตามแนวแกนและตามแนวรัศมี

$$P_{cond} = \rho_s C_{p,s} (T_m - T_0) V_d \pi r_l^2 + \frac{\rho_s C_{p,s} (T_m - T_0) V_d \pi r_l^2}{\left(\frac{\kappa_m}{\kappa_s} + \frac{V_d}{\kappa_s r_l} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (3.29)$$

โดยที่เทอมที่หนึ่งของสมการทางด้านขวามือคือการนำความร้อนตามแนวแกนสำหรับอุณหภูมิละโหให้ร้อนขึ้น และในเทอมที่สองคือพลังงานที่สูญเสียออกทางด้านข้างผ่านกระบวนการนำความร้อน พลังงานที่ใช้สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิและหลอมเหลวสามารถหาได้จาก

$$P_{melt} = 2\pi r_l \rho_m \left[C_{p,m} (T^* - T_m) + C_{p,s} (T_m - T_0) + L_m \right] \frac{V_m \kappa_m}{V_d} \quad (3.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ T^* คือ อุณหภูมิเฉลี่ยในชั้นโลหะเหลว (K)
 T_m คือ อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะ (K)
 โดย T^* สามารถหาได้จาก

$$T^* = T_m + \alpha_c (T_s - T_m) \quad (3.31)$$

เมื่อ α_c คือ คีอค่าคงที่ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5-1 [10] โดยในแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาในครั้งนี้จะกำหนดใช้ค่าเท่ากับ 0.5
 พลังงานที่ใช้สำหรับการกลายเป็นไอสามารถหาได้จาก

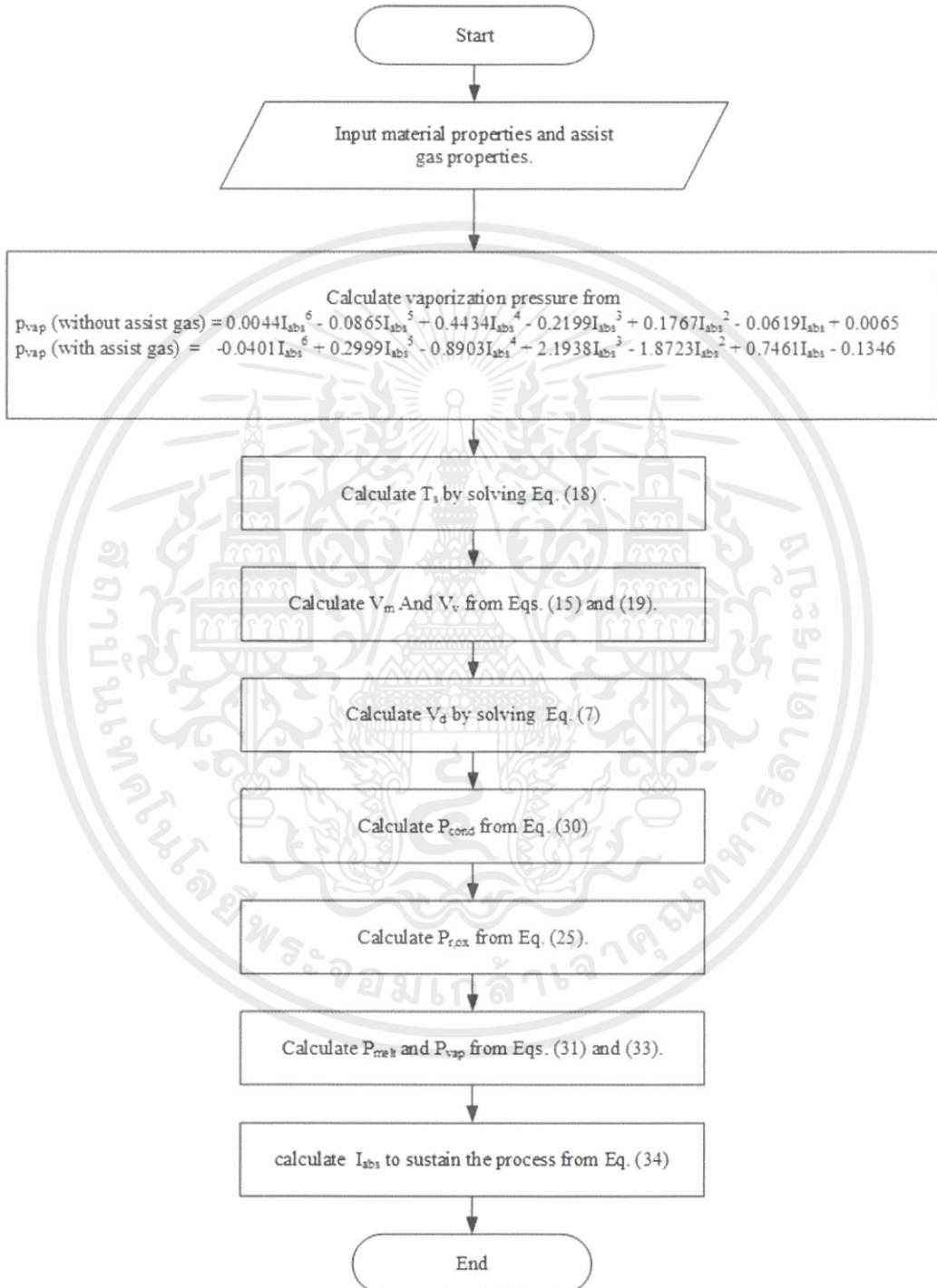
$$P_{vap} = \rho_m V_v L_v \pi r_l^2 \quad (3.32)$$

แทนค่าสมการที่ (3.24) , (3.28) , (3.29) , (3.30) และสมการที่ (3.32) ลงในสมการที่ (3.23) สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$I_{abs} = -\alpha_{ox} \left(\frac{V_d \rho_m}{M_{r,ox,i}} \right) m_{ox} \Delta H_{ox} + \frac{C_c k_g}{2r_l} \left(\frac{\rho_g v_g 2r_l}{\mu_g} \right)^{n_c} Pr^{\frac{1}{3}} (T_s - T_i) + \rho_s C_{p,s} (T_m - T_0) V_d + \frac{\rho_s C_{p,s} (T_m - T_0) V_d}{\left(\frac{\kappa_m}{\kappa_s} + \frac{V_d}{\kappa_s} r_l \right)^{\frac{1}{2}}} + 2\rho_m \left[C_{p,m} (T^* - T_m) + C_{p,s} (T_m - T_0) + L_m \right] \frac{V_m \kappa_m}{V_d r_l} + \rho_m V_v L_v \quad (3.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ขั้นตอนการคำนวณ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์
 ไม่ว่าจะฉีดยาทั้งสิ้น อีกทางหนึ่งมีเหตุผลเบื้องต้นที่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์นี้พิจารณาโลหะที่ใช้เจาะเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ และใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วยในกระบวนการเจาะเนื่องจากแก๊สออกซิเจนจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโลหะแล้วช่วยเพิ่มปริมาณการดูดซับลำแสงเลเซอร์ทำให้การเจาะดีขึ้น ซึ่งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและแก๊สออกซิเจนนั้นมีคุณสมบัติตามตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเชิงความร้อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ[10,19]

คุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ	ค่าคงที่
ความหนาแน่นของโลหะแข็ง, ρ_s (kg m ⁻³)	7800
ความหนาแน่นของโลหะเหลว, ρ_m (kg m ⁻³)	6980
ค่าความร้อนจำเพาะของโลหะแข็ง, $C_{p,s}$ (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	628
ค่าความร้อนจำเพาะของโลหะเหลว, $C_{p,m}$ (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	748
การแพร่กระจายความร้อนของของแข็ง, κ_s (m s ⁻¹)	0.014×10^{-3}
การแพร่กระจายความร้อนของโลหะเหลว, κ_m (m s ⁻¹)	0.007×10^{-3}
ความร้อนแฝงของโลหะเหลว L_m (J kg ⁻¹)	276×10^3
ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ L_v (J kg ⁻¹)	6088×10^3
อุณหภูมิเริ่มต้น, T_0 (K)	300
จุดหลอมเหลว, T_m (K)	1808
จุดเดือด, T_{vap} (K)	3100
มวลโมเลกุล, M_m (kg mol ⁻¹)	0.05575
มวลอะตอม, M_a (g mol ⁻¹)	55.75
รัศมีของลำแสงเลเซอร์, r_l (m)	0.26×10^{-3}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของแก๊สออกซิเจนและหัวฉีด[10]

คุณสมบัติของแก๊สออกซิเจน	ค่าคงที่
ความดันภายในหัวฉีด, p_i (N m^{-2})	3×10^5
ความเร็วการไหลของแก๊ส, v_g (m s^{-1})	377
ความหนาแน่นของแก๊สช่วย, ρ_g (kg m^{-3})	1.3007
ค่าความหนืดของแก๊สช่วย, μ_g ($\text{N m}^{-2} \text{s}$)	2.01×10^{-5}
Prandtl number, Pr	0.73
ค่าการนำความร้อนของแก๊สช่วย, k_g ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	0.0259
อุณหภูมิของแก๊สช่วยภายในหัวฉีด, T_i (K)	300
เส้นผ่านศูนย์กลางกลางทางออกของหัวฉีด, d_o (m)	1.5×10^{-3}
รัศมีของลำแสงเลเซอร์, r_l (m)	2.6×10^{-4}
ระยะระหว่างหัวฉีดและชิ้นงาน, z_n (m)	2.2×10^{-3}

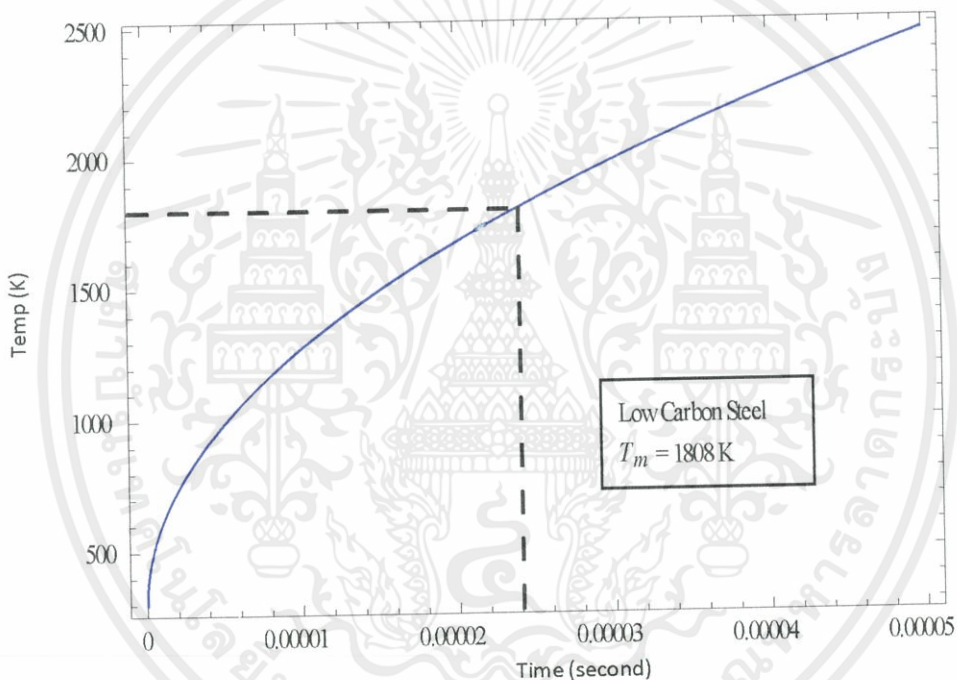
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการศึกษาแบบจำลองและวิจารณ์ผล

ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ จากการนำสมการที่ได้กล่าวในบทที่ 3 มาคำนวณเพื่อดูแนวโน้มที่เกิดขึ้นสำหรับกรณีการเจาะโลหะโดยใช้และไม่ใช้แก๊สช่วย โดยใช้โปรแกรม Mathematica 8 ในการแก้สมการและวาดกราฟ ผลที่ได้มีดังต่อไปนี้

4.1 ผลจากสมการการให้ความร้อนในของแข็ง(Solid heating)



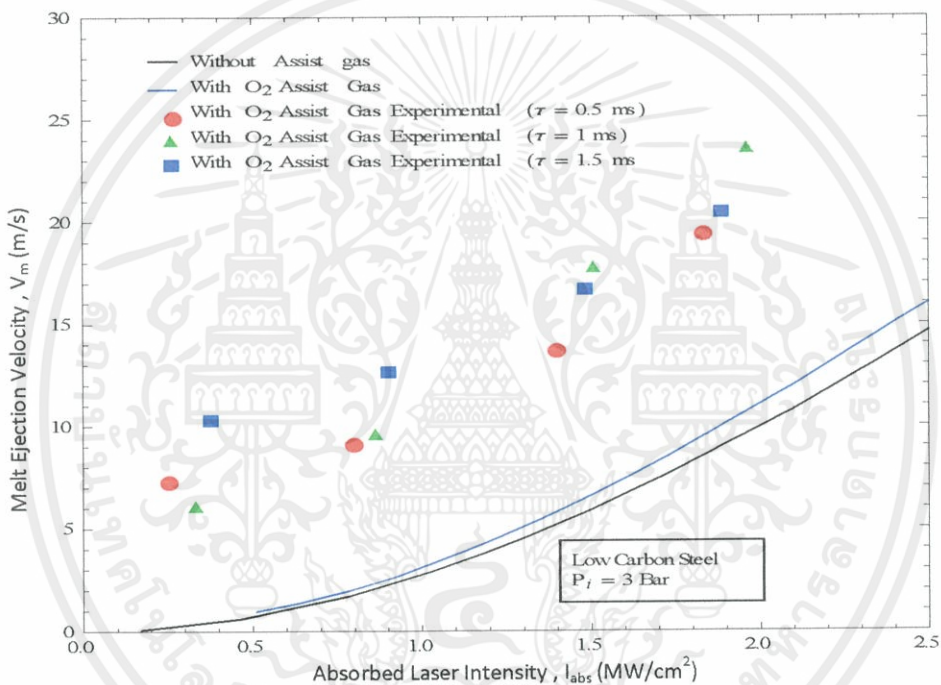
รูปที่ 4.1 กราฟอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการให้พลังงานจากเลเซอร์แก่เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

เป็นกราฟที่ได้จากสมการที่ใช้สำหรับตรวจสอบเวลาในการหลอมเหลวที่ต้องใช้ในแต่ละพัลส์ เพื่อให้อุณหภูมิในแต่ละพัลส์สูงเพียงพอต่อการเกิดการหลอมเหลวของชิ้นงาน ซึ่งในที่นี้ชิ้นงานในการเจาะของเราคือเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำจะเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1808 เคลวิน โดยใช้เวลาประมาณ 0.024 มิลลิวินาที ดังนั้นในการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์โดยใช้ช่วงเวลาพัลส์เท่ากับ 0.5-1.5 มิลลิวินาที จะสามารถทำให้เกิดชิ้นของโลหะเหลวขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ความเร็วของโลหะเหลวที่ไหลออกจากรูเจาะและความเข้มของแสงเลเซอร์

เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบความเร็วของการหลอมเหลวของชิ้นงานระหว่างการเจาะเมื่อไม่ใช้แก๊สช่วยและใช้แก๊สช่วยจากสมการที่ (3.14) จากสมการและรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าแก๊สช่วยมีผลในการเพิ่มความเร็วในการหลอมเหลวเมื่อเทียบกับการใช้ความเข้มของแสงเลเซอร์เท่ากัน เนื่องมาจากผลของการเกิด recoil pressure ซึ่งจะช่วยดันให้โลหะเหลวไหลจากรูเจาะเร็วยิ่งขึ้น นอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเพิ่มพลังงานในการกระบวนเจาะทำให้ความเร็วการเจาะสูงกว่าการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์โดยไม่ใช้แก๊สช่วย แต่ทว่าผลแบบจำลองการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์โดยใช้แก๊สช่วยมีความคลาดเคลื่อนซึ่งอาจเกิดจากการไม่คิดผลของช่วงเวลาพัลส์ที่แตกต่างกัน



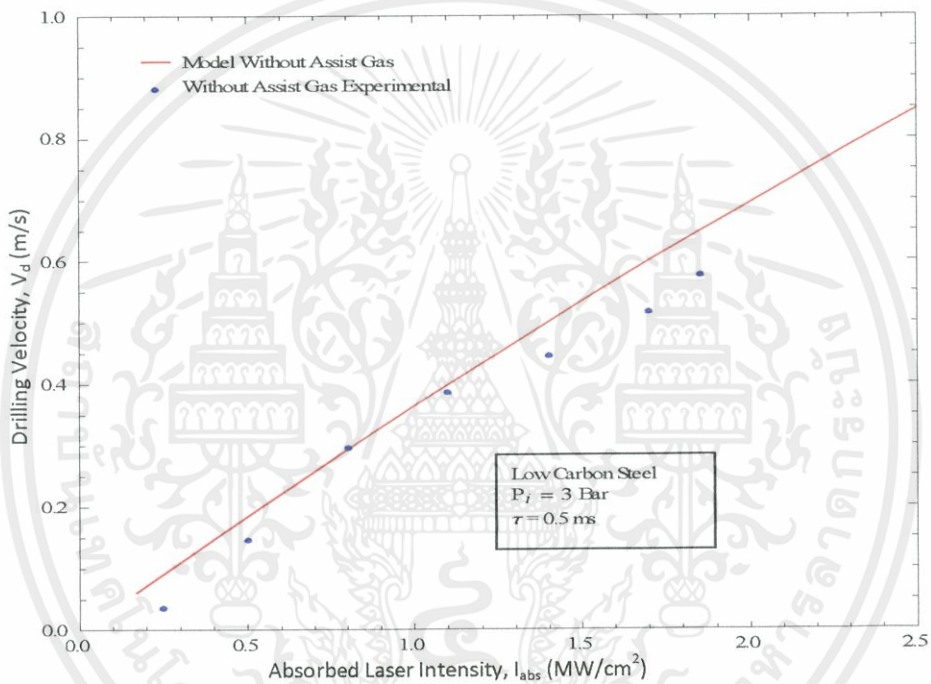
รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของโลหะเหลวที่ไหลออกจากรูเจาะและความเข้มของแสงเลเซอร์ จากแบบจำลองและผลการทดลองของ Low et al. [15]

4.3 ความเร็วการเจาะและความเข้มของแสงเลเซอร์

รูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วการเจาะและความเข้มของแสงเลเซอร์ โดยใช้พัลส์เดียวของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดลอง ของ Ng et al.[10] โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ความเข้มของแสงเลเซอร์เพิ่มขึ้น ความเร็วการเจาะก็จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการเจาะสูงก็จะทำให้มีการเจาะทะลุได้ง่ายขึ้น ผลจากแบบจำลองสำหรับการเจาะโดยไม่ใช้แก๊สช่วยมีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง แต่สำหรับแบบจำลองที่มีการใช้แก๊สช่วยในการเจาะจะมีค่าต่ำกว่าผลการทดลอง ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มของแสงเลเซอร์ อาจกล่าวได้ว่าแบบจำลองที่มีการใช้แก๊สช่วยไม่ช่วยให้ผลการทำนายที่ดีในช่วงพลังงานต่ำๆ ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากการไม่คิดปัจจัยที่

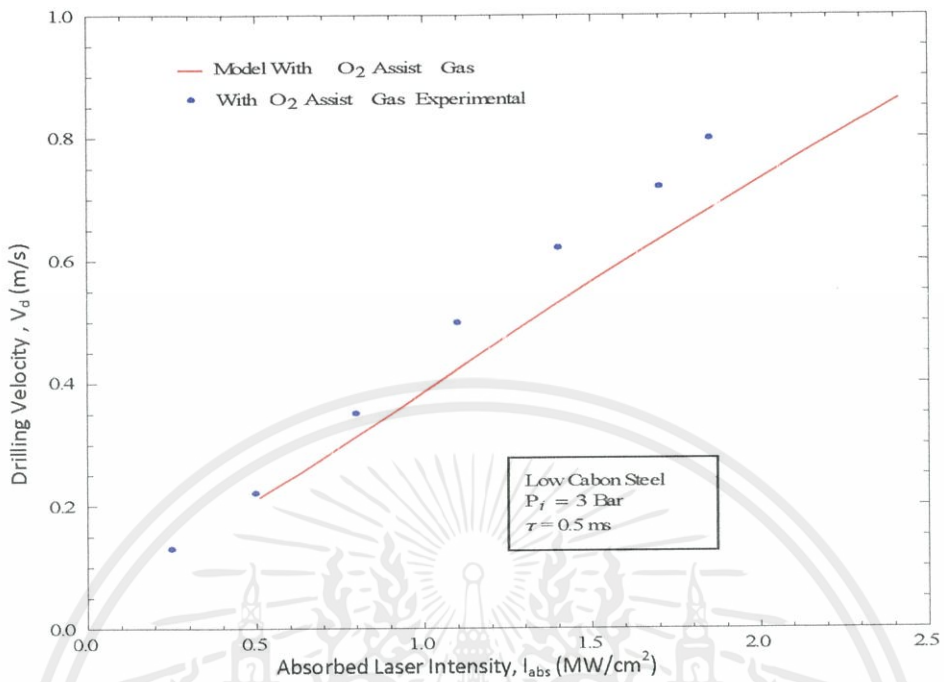
เกี่ยวข้อง เช่น รูปร่างของรูเจาะ ช่วงเวลาของพัลส์ และผลของพลาสมา ประเด็นที่น่าสนใจคือผลของพลาสมาจะส่งผลให้ผิวชิ้นงานมีจุดเดือดสูงขึ้น[11] ในขณะเดียวกันไอของพลาสมาก็จะดูดซับความเข้มของแสงบางส่วน ทำให้ไม่สามารถคาดการณ์ความเร็วในการเจาะที่ความเข้มของแสงสูงขึ้นได้ดังรูปที่ 4.4

การที่ความเร็วการเจาะเพิ่มเกิดจากผลของการเพิ่มความเร็วของการหลอมเหลวอย่างเห็นได้ชัดเจนเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพลังการเกิดปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันในการกระบวนการเจาะและความดันไอที่จะช่วยดันให้โลหะออกจากรูเจาะได้มากขึ้น หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งก็คือการเพิ่มขึ้นของความเร็วการหลอมเหลวเกิดจากผลของการใช้แก๊สช่วยในการเจาะซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.5

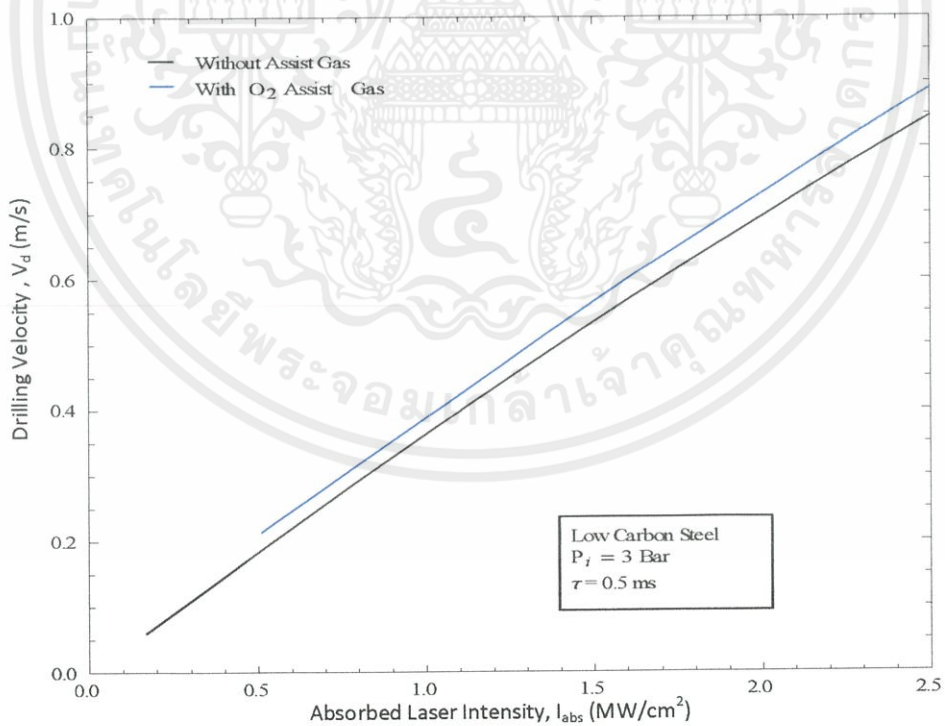


รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบผลความเร็วการเจาะจากแบบจำลองและผลจากการทดลองของ Ng. et al. [10] โดยไม่ใช้แก๊สช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



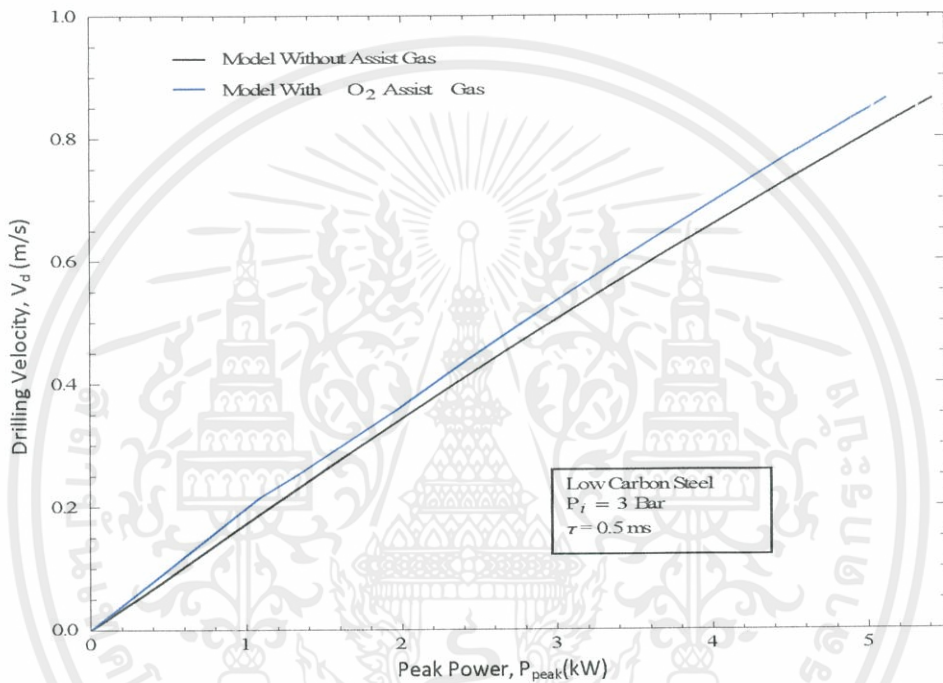
รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบผลความเร็วการเจาะจากแบบจำลองและผลจากการทดลองของ Ng. et al. [10] โดยใช้แก๊สช่วย



เอกสารนี้รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร็วการเจาะจากแบบจำลองโดยใช้แก๊สช่วยและไม่ใช้แก๊สช่วย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ตัวแปรที่มีผลต่อความเร็วการเจาะ

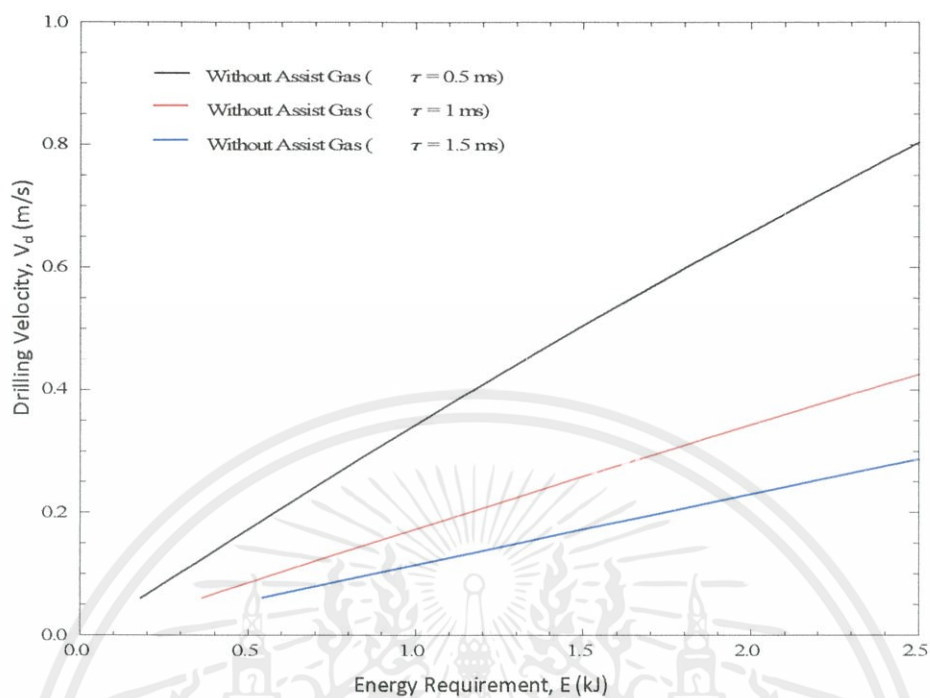
รูปที่ 4.6 เป็นรูปแสดงกำลังสูงสุดที่ใช้ในการเจาะเลเซอร์ที่ความเร็วการเจาะต่างๆ พบว่าเมื่อใช้กำลังของแสงเลเซอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วการเจาะสูงขึ้น และหากใช้กำลังสูงในการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์เท่ากันจะพบว่าแบบจำลองการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ที่ใช้แก๊สช่วยจะให้ผลของความเร็วการเจาะที่สูงกว่าในการเจาะที่ไม่ได้ใช้แก๊สช่วย นอกจากนี้การเพิ่มกำลังสูงสุดในการเจาะจะช่วยทำให้ขนาดของรูเจาะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใกล้เคียงกับขนาดของแสงเลเซอร์อีกด้วย[21]



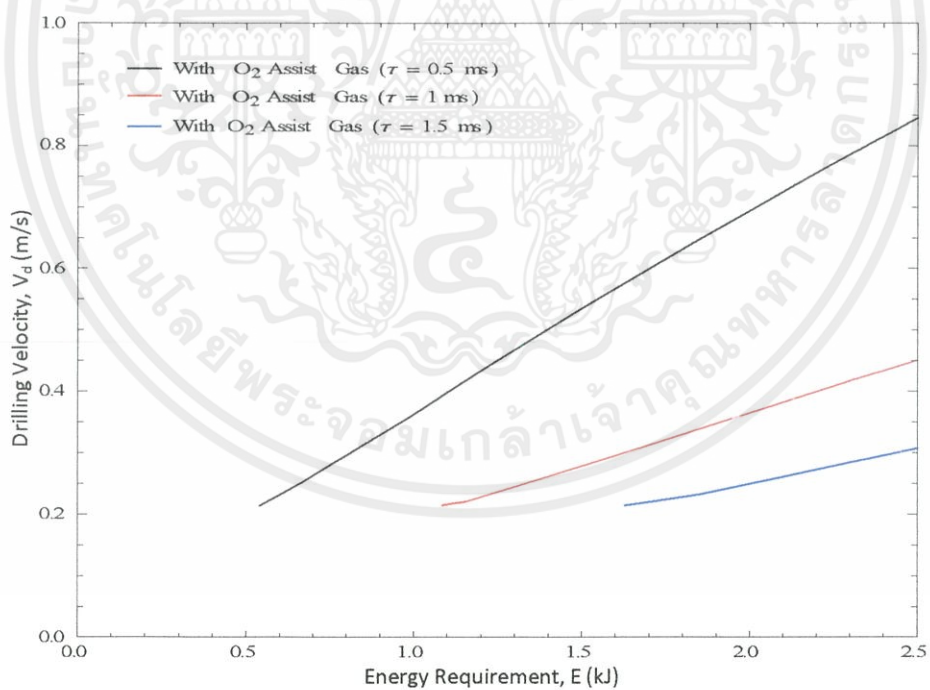
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลของกำลังสูงสุดที่ใช้ต่อความเร็วของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์

รูปที่ 4.7 แสดงพลังงานที่ใช้ในการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์โดยไม่ใช้และใช้แก๊สช่วย เมื่อใช้ช่วงเวลาพัลส์ 0.5, 1.0, และ 1.5 มิลลิวินาที พบว่าทุกช่วงเวลาของพัลส์เมื่อมีการเพิ่มกำลังสูงสุดในการเจาะสูงขึ้น ก็จะส่งผลให้ความเร็วในการเจาะสูงขึ้น และหากใช้พลังงานในการเจาะโลหะเท่ากัน ที่ช่วงเวลาพัลส์เท่ากับ 0.5 มิลลิวินาที จะได้ความเร็วการเจาะสูงที่สุดเนื่องจากต้องใช้ความเข้มของแสงเลเซอร์มากกว่าในช่วงเวลาของพัลส์เท่ากับ 1.0 และ 1.5 มิลลิวินาที ($P_{peak} = I_{abs} A_{eff}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



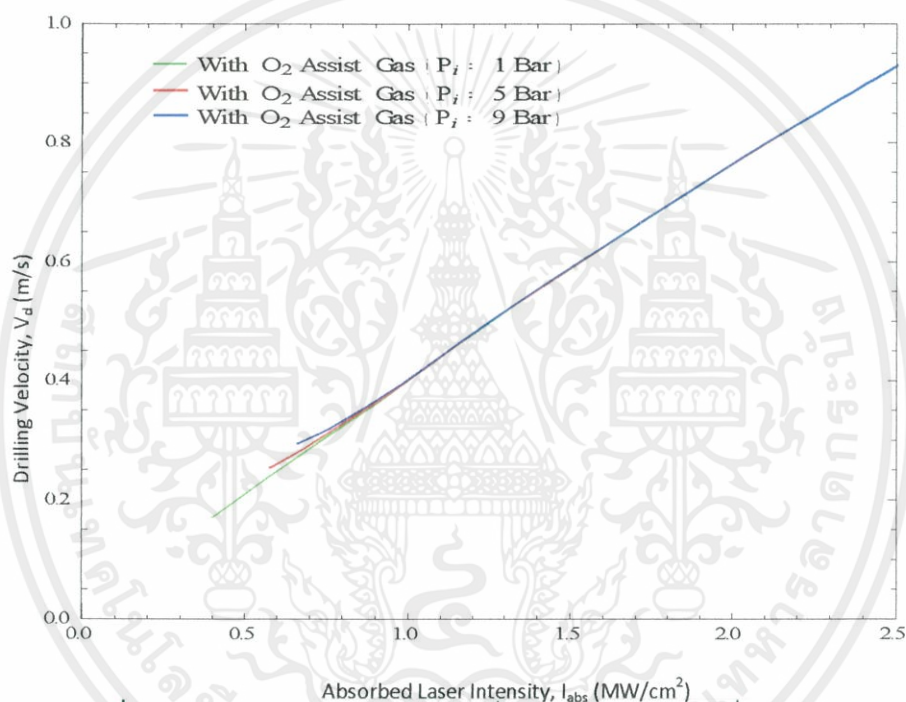
(b)

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงพลังงานที่ใช้ในการเจาะโลหะในแต่ละช่วงเวลาพัลส์และความเร็วการเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่เป็นประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ความดันของแก๊สช่วย

รูปที่ 4.8 แสดงผลของการเปลี่ยนความดันของแก๊สช่วยโดยพิจารณาใช้ความดันของแก๊สช่วยเท่ากับ 1, 5 และ 9 บาร์ จะเห็นได้จากกราฟว่าการเปลี่ยนความดันจะมีผลสำหรับช่วงเริ่มต้นการเจาะโดยจะมีความเร็วในการเจาะเริ่มต้นแตกต่างกันเล็กน้อยแต่แทบจะไม่มีผลแตกต่างกันเมื่อเพิ่มความเข้มของแสงเลเซอร์ เนื่องจากความดันของแก๊สช่วยจะมีผลแค่ทำให้ความเร็วของโลหะเหลวที่ออกจากรูเจาะและความเร็วการเจาะเพิ่มขึ้น แต่ความเร็วการเจาะนั้นยังขึ้นอยู่กับความเร็วของการกลายเป็นไอซึ่งความดันของแก๊สช่วยไม่ได้ส่งผลต่อความเร็วของการกลายเป็นไอ



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความเร็วการเจาะที่ความดันของแก๊สช่วยที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการนี้เป็นการศึกษาแบบจำลองการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์แบบพัลส์เดียวหนึ่งมิติโดยใช้และไม่ใช้แก๊สช่วย ด้วยการเปรียบเทียบผลแบบจำลองกับผลการทดลองของ Ng et al. [10] และ Low et al. [15] จากการศึกษาพบว่าผลแบบจำลองการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์แบบพัลส์เดียวหนึ่งมิติทั้งการใช้และไม่ใช้แก๊สช่วยให้ผลที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการทดลอง โดยผลที่ได้คือ

1. การเพิ่มความเข้มของแสงเลเซอร์ในการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ จะทำให้ความเร็วในการเจาะโลหะเพิ่มขึ้น
2. สำหรับการเจาะที่ใช้แก๊สช่วยยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควรที่ความเข้มของแสงเลเซอร์สูงแต่จะให้ผลการทำนายที่ดีในช่วงที่ความเข้มของแสงเลเซอร์ต่ำ
3. ผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อการการเจาะ
 - 3.1 การเพิ่มกำลังสูงสุด (Peak power) จะทำให้ความเร็วในการเจาะโลหะเพิ่มขึ้น
 - 3.2 การเพิ่มพลังงาน (Energy requirement) ที่ใช้ในการเจาะจะทำให้ความเร็วในการเจาะ
 - 3.3 ผลของช่วงเวลาของพัลส์ (Pulse width) สำหรับพลังงานในการเจาะโลหะเท่ากัน ที่ช่วงเวลาของพัลส์เท่ากับ 0.5 มิลลิวินาที จะได้ความเร็วในการเจาะโลหะสูงสุด เนื่องจากการใช้ช่วงของพัลส์น้อยทำให้ต้องใช้ความเข้มของแสงเลเซอร์มาก
 - 3.4 ผลของแก๊สช่วย (Assist gas) จะทำให้ความเร็วการเจาะโลหะเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มความดันของแก๊สช่วยจะไม่ทำให้ความเร็วการเจาะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

5.2 วิจารณ์ผลจากแบบจำลอง

โครงการนี้เป็นการศึกษาแบบจำลองการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์แบบพัลส์เดียวหนึ่งมิติทั้งการใช้และไม่ใช้แก๊สช่วย ซึ่งในกระบวนการเจาะด้วยเลเซอร์นี้มีตัวแปร เช่น พลาสมา ความลึกของรูเจาะ และช่วงเวลาของพัลส์ ไม่ถูกนำมาคิดในแบบจำลองเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ ทำให้ผลที่ได้จากแบบจำลองยังมีความคลาดเคลื่อนพอสมควรเมื่อนำมาเทียบกับผลการทดลองของผู้ที่เคยทำการทดลองมาก่อน

5.3 ข้อเสนอแนะ

หากมีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตควรมีศึกษาผลของตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์เพิ่มเข้าไปในแบบจำลอง เช่น พลาสมา ความลึกของรูเจาะ และช่วงเวลาของพัลส์ เพื่อให้ได้แบบจำลองการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ที่สามารถให้ผลใกล้เคียงกับการเจาะโลหะในความเป็นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อการใช้งานที่ถูกต้องและเป็นประโยชน์ เช่น ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] C.Y. Yeo, S.C. Tam, S. Jana and Michael W.S. Lau (1994). "A Technical Review of the Laser Drilling of Aerospace Materials." *Journal of Materials Processing Technology* 4: 35.
- [2] W.S.O Rodden, S.S Kudesia, D.P. Hand and J.D.C. Jones (2001). "Use of "Assist" Gas in Laser Drilling of Titanium." *Journal of Laser Applications* 13: 5.
- [3] สุรพล รักวิจิัย. 2544. เลเซอร์ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้. กรุงเทพฯ : เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า
- [4] Jame T. Luxon and David E. Parker (1992). "Industrial Laser And Their Application second edition". London : Prentice-Hall International.
- [5] ตำราศักดิ์ มณีพงษ์สวัสดิ์. 2530 . หลักการของเลเซอร์ Principle of Lasers (แบบศึกษาด้วยตนเอง). กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยรามคำแหง
- [6] วุฒิ พันธมนานิน. 2532. เลเซอร์ฟิสิกส์(laser physics). กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์มิตรนราการพิมพ์
- [7] สำนักงานวิจัยและพัฒนาการทหารกลาโหม. 253-. เอกสารทางวิชาการวิจัยและพัฒนาการทหารเรื่อง เลเซอร์และการประยุกต์ใช้. นนทบุรี : สำนักงาน
- [8] Elijah Kannatey-Asibu, Jr.(2009). "Principles of Laser Materials Processing". John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey
- [9] B S Yilbas and A Aleem (2003). "Laser Hole Drilling Quality and Efficiency Assessment." *J. Engineering Manufacture* 218: 9.
- [10] G.K.L. NG, P.L. Crouse and L. Li (2005). "An Analytical Model for Laser Drilling Incorporating Effects of Exothermic Reaction, Pulse Width and Hole Geometry." *International Journal Heat and Mass Transfer*: 16.
- [11] Srikanth Sankaranayanan , Hermann Emminger and Aravinda Kar (1999). "Energy Loss in the Plasma During Lasew Drilling." *J.Phy.D:Appl. Phys* 1605-1611
- [12] Yuwen Zhang and A. Fghri (1998). "Vaporization,Melting and Heat Conduction in the Laser Drilling Process." *International Journal of Heat and Mass Transfer*: 11.
- [13] Sven-Olov Roos (1980)."Laser drilling with different pulse shapes." *J.Appl. Phys*: 3.
- [14] N.D. Pandey, H.S. Shan and T. Mohandas (2006). "A New Model of Percussion Laser Drilling." *Int. J. Computer Applications in Technology* 6: 218-232.
- [15] S. Carslaw and J.C. Jaeger (1959). *Conduction of Heat in Solids* Oxford University Press 1959.
- [16] ¹ Jeb Collins^a and ^b Pierre Gremaud^{a,*2} (2010). "A Simple Model for Laser Drilling" *Matthematics and Computers in Simulation*: 1541-1552.

[17] R.S. Patel and M.Q. Brewster (1991). "Gas-Assisted Laser-Metal Drilling: Experimental Results." *J. Thermophysics* 32-39.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [18] Wei Han and Ryszard J.Pryputniewicz (2004). "Modeling and Characterization of Laser Drilling of Small Holes on Metal Sheets." 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition: 8.
- [19] D.K.Y. Low, L. Li, P.J. Byrd "Hydrodynamic Physical Modelling of Laser Drilling" , J. Manufact. Sci. Eng. 124 (2002) 852–862.
- [20] G.K.L. NG and L. Li (2001).The Effect of Laser Peak Power and Pulse Width on The Hole Geometry Repeatability in Laser Percussion Drilling". Optics & Laser Technology. 33 (2001) 393–402



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการการหาความดันไอกรณีการเจาะที่ไม่ใช้แก๊สช่วยในกระบวนการ, P_{vap}

$$I_{abs} = ; (*MW \text{ cm}^{-2}*)$$

$$p_{vap} = 0.00441 \text{Subscript}[I, abs]^6 - 0.08651 \text{Subscript}[I, abs]^5 + 0.4434 \text{Subscript}[I, abs]^4 - 0.2199 \text{Subscript}[I, abs]^3 + 0.1767 \text{Subscript}[I, abs]^2 - 0.0619 I_{abs} + 0.0065$$

สมการการหาอุณหภูมิผิวโลหะเหลว, T_s

$$p_{vap} = ; (*bar*)$$

$$p_0 = 1; (*bar*)$$

$$\Delta H_{vap} = 339400; (*J \text{ mol}^{-1}*)$$

$$R = 8.314; (*J \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}*)$$

$$T_{vap} = 3100; (*K*)$$

$$\text{Solve}[p_{vap} == p_0 \text{Exp}[\Delta H_{vap}/R (1/T_{vap} - 1/T_s)], T_s]$$

สมการการหาอุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นโลหะเหลว, T^*

$$T_s = ; (*K*)$$

$$T_m = 1808; (*K*)$$

$$\alpha_c = 0.5;$$

$$T^* = T_m + \alpha_c (T_s - T_m)$$

สมการการหาความเร็วการกลายเป็นไอ, V_v

$$T_s = ; (*K*)$$

$$k = 1.4;$$

$$R = 259.8125; (*J/kg \text{ K}*)$$

$$M_a = 55.75; (*g/mol*)$$

$$L_v = 6088; (*J/g*)$$

$$N_a = 6.02 \times 10^{23}; (*mol^{-1}*)$$

$$k_b = 1.38 \times 10^{-23}; (*J \text{ K}^{-1}*)$$

$$V_v = \sqrt{k \times R \times T_s \text{Exp}[(-((M_a L_v)/(N_a k_b))/T_s)]}$$

สมการการหาความเร็วของโลหะเหลวที่ออกจากกรูเจาะ, V_m

$$p_{vap} = ; (*Pa*)$$

$$\rho_m = 6980; (*kg \text{ m}^{-3}*)$$

$$V_m = \sqrt{\frac{2 \times p_{vap}}{\rho_m}}$$

สมการการหาความเร็วการเจาะ, V_d

$$V_v = ; (*m/s*)$$

$$V_m = ; (*m/s*)$$

$$\rho_s = 7800; (*kg \text{ m}^{-3}*)$$

$$\rho_m = 6980; (*kg \text{ m}^{-3}*)$$

$$k_m = 0.007 \times 10^{-3}; (*m^2 \text{ s}^{-1}*)$$

$$r_1 = 2.6 \times 10^{-4}; (*m*)$$

$$\text{Solve}[\rho_s V_d - \rho_m V_v - (2k_m \rho_m)/(r_1 V_d) V_m = 0, V_d]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายงานลิขสิทธิ์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการการหาความเข้มข้นของลำแสงเลเซอร์, I_{abs}

$T_s = ; (*K*)$

$T^* = ; (*K*)$

$V_v = ; (*m/s*)$

$V_m = ; (*m/s*)$

$V_d = ; (*m/s*)$

$\alpha_m = 0.26 ; (*Assume\ neglect\ error\ from\ experimental*) ; \kappa_g = 0.0259 ; (*W/mK*)$

$\rho_m = 6980 ; (*kg/m^3*)$

$; T_i = 300 ; (*K*)$

$M_{r,ox} = 0.072 ; (*kg/mol*)$

$; m_{ox} = 56/72 ;$

$\Delta H_{ox} = -158.75 \times 10^3 ; (*J/mol*)$

$; L_v = 6088 \times 10^3 ; (*J/kg*)$

$C_c = 0.228 ;$

$; \kappa_s = 0.014 \times 10^{-3} ; (*m^2/s*)$

$\kappa_g = 0.0259 ; (*W/mK*)$

$; \kappa_m = 0.007 \times 10^{-3} ; (*m^2/s*)$

$r_1 = 2.6 \times 10^{-4} ; (*m*)$

$; L_m = 276 \times 10^3 ; (*J/kg*)$

$\rho_g = 1.3007 ; (*kg/m^3*)$

$; C_{pm} = 748 ; (*J/kgK*)$

$v_g = 377 ; (*m/s*)$

$; T_0 = 300 ; (*K*)$

$\mu_g = 2.01 \times 10^{-5} ; (*Ns/m^2*)$

$; T_m = 1808 ; (*K*)$

$\eta_c = 0.731 ;$

$; \rho_s = 7800 ; (*kg/m^3*)$

$Pr = 0.73 ;$

$; C_{ps} = 628 ; (*J/kgK*)$

$T_i = 300 ; (*K*)$

$; C_{ps} = 628 ; (*J/kgK*)$

$$I_{abs} = - (\alpha_m \times (V_d \times \rho_m) / M_{r,ox} \times m_{ox} \times \Delta H_{ox}) + ((C_c \times \kappa_g) / (2r_1)) \left(\frac{\rho_g \times v_g \times 2r_1}{\mu_g} \right)^{\eta_c} \times Pr^{\frac{1}{3}}$$

$$\times (T_s - T_i) + (\rho_s \times C_{ps} \times (T_m - T_0) V_d) / \sqrt{\left(\frac{\kappa_m}{\kappa_s} + \frac{V_d \times r_1}{\kappa_s} \right)} + (2\rho_m \times (C_{pm} \times (T^* - T_m) + C_{ps} \times (T_m - T_0) + L_m) \times (V_m \times \kappa_m) / (V_d \times r_1)) + (\rho_m \times V_v \times L_v)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการการหาความดันไอกรณีการเจาะที่ใช้แก๊สช่วยในกระบวนการ, P_{vap}

$$I_{abs} = ;$$
$$p_{vap} = -0.0401 \text{Subscript}[I, abs]^6 + 0.2999 \text{Subscript}[I, abs]^5 - 0.8903 \text{Subscript}[I, abs]^4 + 2.1938 \text{Subscript}[I, abs]^3 - 1.8723 \text{Subscript}[I, abs]^2 + 0.7461 I_{abs} - 0.1346$$

สมการการหาอุณหภูมิผิวโลหะเหลว, T_s

$$p_{vap} = ; (*bar*)$$
$$p_0 = 1; (*bar*)$$
$$\Delta H_{vap} = 339400; (*J mol^{-1}*)$$
$$R = 8.314; (*J mol^{-1} K^{-1}*)$$
$$T_{vap} = 3100; (*K*)$$
$$\text{Solve}[p_{vap} == p_0 \text{Exp}[\Delta H_{vap}/R (1/T_{vap} - 1/T_s)], T_s]$$

สมการการหาอุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นโลหะเหลว, T^*

$$T_s = ; (*K*)$$
$$T_m = 1808; (*K*)$$
$$\alpha c = 0.5;$$
$$T^* = T_m + \alpha c (T_s - T_m)$$

สมการการหาความเร็วการกลายเป็นไอ, V_v

$$T_s = ; (*K*)$$
$$k = 1.4;$$
$$R = 259.8125; (*J/kg K*)$$
$$M_a = 55.75; (*g/mol*)$$
$$L_v = 6088; (*J/g*)$$
$$N_a = 6.02 \times 10^{23}; (*mol^{-1}*)$$
$$k_b = 1.38 \times 10^{-23}; (*J K^{-1}*)$$
$$V_v = \sqrt{k \times R \times T_s \text{Exp}[(-((M_a L_v)/(N_a k_b))/T_s)]}$$

สมการการหาความเร็วของโลหะเหลวที่ออกจากกรูเจาะ, V_m

$$p_{vap} = ; (*Pa*)$$
$$p_{eff} = 3181.3512; (*Pa*)$$
$$\rho_m = 6980; (*kg m^{-3}*)$$

$$V_m = \sqrt{\frac{2 \times (p_{vap} + p_{eff})}{\rho_m}}$$

สมการการหาความเร็วการเจาะ, V_d

$$V_v = ; (*m/s*)$$
$$V_m = ; (*m/s*)$$
$$\rho_s = 7800; (*kg m^{-3}*)$$
$$\rho_m = 6980; (*kg m^{-3}*)$$
$$k_m = 0.007 \times 10^{-3}; (*m^2 s^{-1}*)$$
$$r_1 = 2.6 \times 10^{-4}; (*m*)$$
$$\text{Solve}[\rho_s V_d - \rho_m V_v - (2k_m \rho_m)/(r_1 V_d) V_m == 0, V_d]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ทางปัญญาที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ กรุณาแจ้งผู้จัดทำเพื่อคัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการการหาความเข้มของลำแสงเลเซอร์, I_{abs}

$T_s = ; (*K*)$

$T^* = ; (*K*)$

$V_v = ; (*m/s*)$

$V_m = ; (*m/s*)$

$V_d = ; (*m/s*)$

$\alpha_m = 0.26 ; (*Assume neglect error from expermental*) ; \kappa_g = 0.0259 ; (*W/mK*)$

$\rho_m = 6980 ; (*kg/m^3*)$

$; T_i = 300 ; (*K*)$

$M_{r,ox} = 0.072 ; (*kg/mol*)$

$; m_{ox} = 56/72 ;$

$\Delta H_{ox} = -158.75 \times 10^3 ; (*J/mol*)$

$; L_v = 6088 \times 10^3 ; (*J/kg*)$

$C_c = 0.228 ;$

$; \kappa_s = 0.014 \times 10^{-3} ; (*m^2/s*)$

$\kappa_g = 0.0259 ; (*W/mK*)$

$; \kappa_m = 0.007 \times 10^{-3} ; (*m^2/s*)$

$r_1 = 2.6 \times 10^{-4} ; (*m*)$

$; L_m = 276 \times 10^3 ; (*J/kg*)$

$\rho_g = 1.3007 ; (*kg/m^3*)$

$; C_{pm} = 748 ; (*J/kgK*)$

$v_g = 377 ; (*m/s*)$

$; T_0 = 300 ; (*K*)$

$\mu_g = 2.01 \times 10^{-5} ; (*Ns/m^2*)$

$; T_m = 1808 ; (*K*)$

$\eta_c = 0.731 ;$

$; \rho_s = 7800 ; (*kg/m^3*)$

$Pr = 0.73 ;$

$; C_{ps} = 628 ; (*J/kgK*)$

$T_i = 300 ; (*K*)$

$; C_{ps} = 628 ; (*J/kgK*)$

$I_{abs} = - (\alpha_m \times (V_d \times \rho_m) / M_{r,ox} \times m_{ox} \times \Delta H_{ox}) + ((C_c \times \kappa_g) / (2r_1)) \left(\frac{\rho_g \times v_g \times 2r_1}{\mu_g} \right)^{\eta_c} \times Pr^{\frac{1}{3}}$

$\times (T_s - T_i) + (\rho_s \times C_{ps} \times (T_m - T_0) V_d)$

$+ ((\rho_s \times C_{ps} \times (T_m - T_0) \times V_d) / \sqrt{\left(\frac{\kappa_m}{\kappa_s} + \frac{V_d \times r_1}{\kappa_s} \right)}) + (2\rho_m \times (C_{pm} \times (T^* - T_m) + C_{ps} \times (T_m - T_0) + L_m) \times (V_m \times \kappa_m) / (V_d \times r_1)) + (\rho_m \times V_v \times L_v)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้