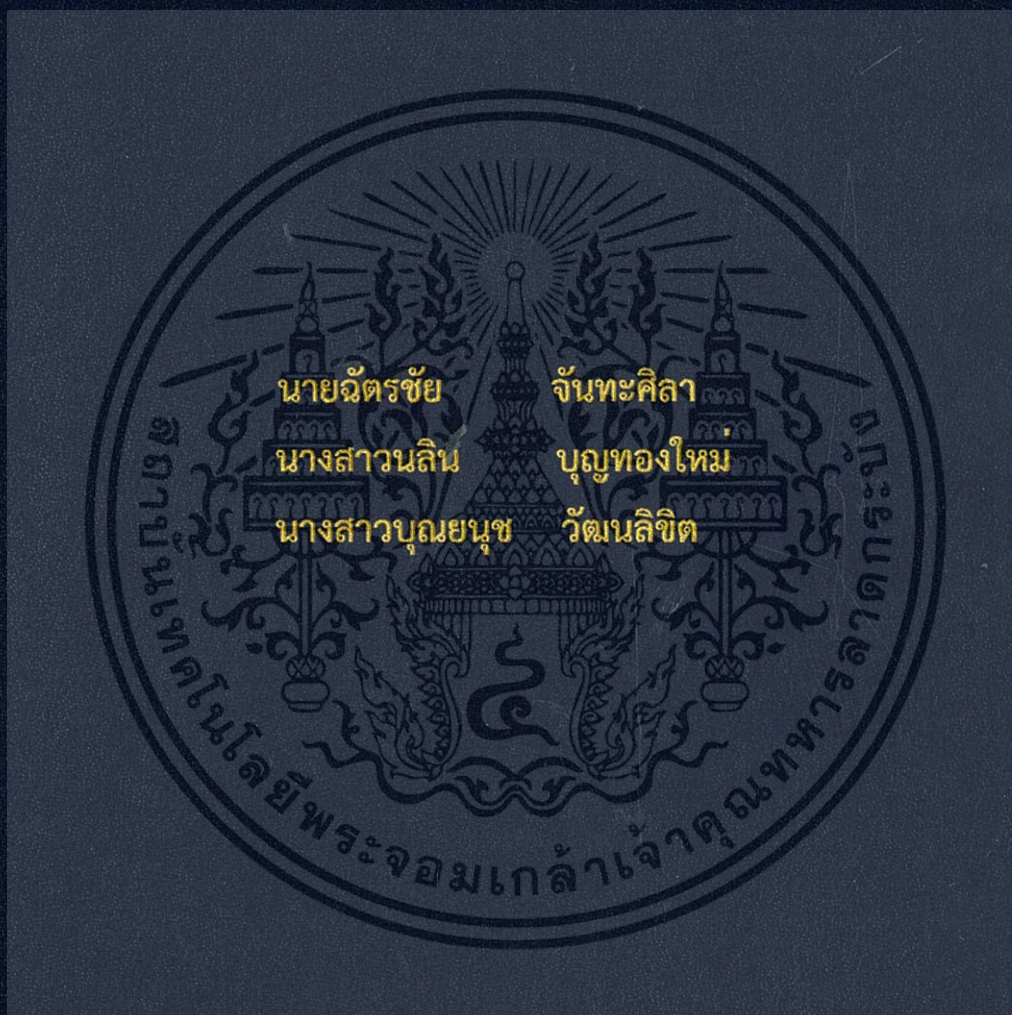


แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์แบบหลายพัลส์
A Mathematical Model of Percussion Laser Drilling



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์แบบหลายพัลส์

A Mathematical Model of Percussion Laser Drilling



T143877



นายฉัตรชัย จันทะศิลา
นางสาวนลิน บุญทองใหม่
นางสาวบุญยงช วัฒนลิขิต

รฟง.

๘ 232 ๘

๑๖๖๘

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 143877
วันเดือนปี 04 มี.ค. 2559

b. 12800564
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A MATHEMATICAL MODEL OF PERCUSSION LASER DRILLING



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

2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2558


สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์แบบหลายพัลส์
A Mathematical Model of Percussion Laser Drilling

ผู้จัดทำ

1. นาย ฉัตรชัย จันทะศิลา รหัสประจำตัว 55010202
2. นางสาว นลิน บุญทองใหม่ รหัสประจำตัว 55010633
3. นางสาว บุญยนุช วัฒนลิขิต รหัสประจำตัว 55010686


(ดร.มธุรส สุชาตะวัฒน์)

อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์แบบหลายพัลส์

นายฉัตรชัย จันทะศิลา 55010202

นางสาวนลิน บุญทองใหม่ 55010633

นางสาวบุญยงษ์ วัฒนลิขิต 55010686

ดร.มธุรส สุชาติระวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2558

บทคัดย่อ

การเจาะโลหะด้วยเลเซอร์นั้นมีการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท เนื่องจากสามารถเจาะได้รวดเร็ว แม่นยำ สามารถเจาะรูเจาะขนาดเล็กมากได้ และเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการเจาะจึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์แบบหลายพัลส์ โดยจะแบ่งแบบจำลองออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่มีพัลส์เลเซอร์ตกกระทบบนชิ้นงาน และช่วงพักระหว่างพัลส์ แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้ในการทำนายความลึกของรูเจาะและผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อกระบวนการเจาะได้ และเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจึงมีการเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลจากการทดลองที่เคยมีผู้ศึกษาไว้ก่อนหน้านี้ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถทำนายความลึกของรูเจาะได้ โดยมีความคลาดเคลื่อน 13.1% เทียบกับผลการทดลองจริง นอกจากนี้จากการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อการเจาะพบว่า เมื่อกำลังสูงสุดของพัลส์เพิ่มขึ้นหรือความกว้างของพัลส์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการเจาะเพิ่มขึ้น ส่วนความถี่ของพัลส์มีผลต่อการเจาะคือเมื่อความถี่เพิ่ม จะส่งผลให้อัตราการเจาะลดลง อย่างไรก็ตามผลของความถี่จะมีความสำคัญน้อยกว่า เมื่อเทียบกับผลจากกำลังสูงสุดของพัลส์และความกว้างของพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A MATHEMATICAL MODEL OF PERCUSSION LASER DRILLING

Chatchai Junthasila 55010202
Nalin Buntongmai 55010633
Boonyanuch Vadhanalikit 55010686
Dr.Maturose Suchatawat Advisor
Year 2015

Abstract

Laser drilling process has various advantages and has been used in many manufacturing industries. The benefits of using laser drilling are its ability to precisely produce high quality holes, short processing time, and high reproducibility. To increase the drilling efficiency, this project aims on developing of the mathematical model of percussion laser drilling. The model is divided into pulse on and pulse off period for hole-depth estimation. Effects of laser drilling parameters are also studied. The developed model will be verified by comparing with the experimental data reported in the literature. The results show that the model enables the prediction of the hole-depth with 13.1% error compared with the experiment. The study of affecting parameters shows that increasing of the peak power and pulse width result in higher drilling rate. In the other hand, increasing of the pulse frequency results in lower drilling rate. It is worth noting that effect of pulse frequency is less pronounced compared to peak power and pulse width.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ทางคณะผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณมายังผู้ที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

ดร.มธุรส สุชาติวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ผู้ที่คอยให้คำปรึกษา ให้ความรู้และคำแนะนำในการดำเนินงาน รวมทั้งข้อเสนอแนะในการแก้ไขปัญหาและปรับปรุงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการทำวิจัยให้ดีขึ้น ซึ่งถือเป็นหัวใจสำคัญในการทำให้งานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะกรรมการในการสอบปริญญาานิพนธ์ ที่กรุณาให้การชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปรับปรุงให้ปริญญาานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่คอยให้ความรู้และคำแนะนำ รวมทั้งการอบรมสั่งสอนมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่คอยดูแลและให้คำปรึกษา รวมทั้งให้กำลังใจและสนับสนุนให้ได้รับโอกาสทางการศึกษาที่ดียิ่งกว่าเดิมมาโดยตลอด

นายฉัตรชัย

จันทะศิลา

นางสาวนลิน

บุญทองใหม่

นางสาวบุญยง

วัฒนลิขิต

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 หลักกลไกของการเจาะด้วยเลเซอร์.....	5
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับเลเซอร์.....	5
2.2 กลไกการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์.....	7
บทที่ 3 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์แบบหลายพัลส์.....	12
3.1 การวิเคราะห์กระบวนการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์.....	12
3.2 แบบจำลองของช่วงก่อนที่ผิวชิ้นงานจะเกิดการหลอมเหลว.....	14
3.3 แบบจำลองของช่วงหลังจากที่ผิวชิ้นงานเกิดการหลอมเหลว.....	16
3.3.1 ช่วงการให้เลเซอร์.....	16
3.3.2 ช่วงพักระหว่างพัลส์.....	18
3.4 ขั้นตอนการคำนวณแบบจำลอง.....	21
บทที่ 4 ผลจากแบบจำลองและวิเคราะห์ข้อมูล.....	23
4.1 ผลจากแบบจำลองช่วงให้ความร้อนแก่โลหะแข็ง.....	23
4.2 ผลจากแบบจำลองช่วงการเจาะโลหะ.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	33
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	33
5.2 วิจัยารณ์ผลจากแบบจำลอง.....	34
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	34
ภาคผนวก.....	35
บรรณานุกรม.....	42



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้การเจาะด้วยเลเซอร์.....	2
3.1 คุณสมบัติทางความร้อนของเหล็กกล้าอะมุน	22
3.2 คุณสมบัติทางความร้อนของแก๊สออกซิเจน (O_2) ที่ถูกใช้เป็นแก๊สช่วย.....	22
3.3 ตัวแปรทางกระบวนการ.....	22



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 Nozzle guide vane ที่ใช้การเจาะด้วยเลเซอร์ทำรูระบายความร้อน.....	1
2.1 แสดงโครงสร้างของเครื่องกำเนิดเลเซอร์และกระบวนการเกิดลำแสงเลเซอร์.....	6
2.2 แสดงกลไกการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ทั้ง 4 แบบ.....	8
2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนกับความยาวคลื่นสำหรับโลหะบางชนิด.....	10
3.1 แสดงสมมติฐานของแบบจำลองของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์สำหรับการศึกษาในครั้งนี้.....	13
3.2 แสดงกลไกในการเกิดรูเจาะภายใต้สมมติฐานของแบบจำลองนี้.....	14
3.3 ช่วงของ pulse on และ pulse off ในแต่ละรอบการทำงานของเลเซอร์.....	15
3.4 Schematic diagram ของแบบจำลองช่วง pulse on.....	17
3.5 Schematic diagram ของแบบจำลองช่วง pulse off.....	19
3.6 แสดงขั้นตอนการหาตำแหน่งความลึกของรูเจาะหลังจากพัลส์การเจาะใดๆ.....	21
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวของรูเจาะก่อนเกิดการหลอมเหลวกับจำนวนพัลส์.....	24
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวของรูเจาะก่อนเกิดการหลอมเหลวกับเวลาที่กำลังสูงสุดของเลเซอร์ เท่ากับ 500 และ 1000 W.....	24
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัลส์ที่ทำให้เกิดการหลอมเหลวกับกำลังสูงสุดของเลเซอร์.....	25
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัลส์ที่ทำให้เกิดการหลอมเหลวกับกำลังสูงสุดของเลเซอร์ ที่ความถี่เท่ากับ 50 และ 100 Hz.....	26
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัลส์ที่ทำให้เกิดการหลอมเหลวกับกำลังสูงสุดของเลเซอร์ ที่ช่วง pulse on เท่ากับ 1ms และ 2ms.....	26
4.6 กราฟเปรียบเทียบความลึกของรูเจาะที่จุดสิ้นสุดในแต่ละพัลส์ระหว่างผลจากแบบจำลองและผลจากการทดลองจริง.....	28
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นของเหลวและชั้นของเหลวที่เปลี่ยนไปในช่วง pulse off.....	29

4.8 กราฟแสดงความถี่ของรูเจาะที่เกิดขึ้นในช่วง pulse on, pulse off และที่จุดสิ้นสุด pulse	30
4.9 ผลของกำลังสูงสุดของเลเซอร์ที่มีต่อความถี่ของรูเจาะ	31
4.10 ผลของความกว้างของพัลส์ในช่วงให้ความร้อนต่อความถี่ของรูเจาะ	31
4.11 ผลของความถี่ของพัลส์ต่อความถี่ของรูเจาะ	32



รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A_f	ค่าการดูดซับพลังงานของโลหะที่เป็นของเหลว
A_s	ค่าการดูดซับพลังงานของโลหะที่เป็นของแข็ง
C_c	ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง
c_{eff}	ค่าความจุความร้อนประสิทธิผล ($J/kg \cdot K$)
$C_{p,s}$	ค่าความร้อนจำเพาะของโลหะที่เป็นของแข็ง ($J/kg \cdot K$)
h_g	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแก๊สช่วย ($W/m^2 \cdot K$)
H_{ox}	เอนทัลปีของการออกซิเดชัน (J/kg)
I_{abs}	ค่าความเข้มของแสงเลเซอร์ที่โลหะดูดซับ (W/m^2)
I_0	ค่าความเข้มของแสงเลเซอร์ (W/m^2)
k_g	ค่าการนำความร้อนของแก๊สช่วย ($W/m \cdot K$)
k_l	ค่าการนำความร้อนของโลหะที่เป็นของเหลว ($W/m \cdot K$)
k_s	ค่าการนำความร้อนของโลหะที่เป็นของแข็ง ($W/m \cdot K$)
L_m	ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (kJ/kg)
L_v	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (kJ/kg)
P_{peak}	กำลังสูงสุดของแสงเลเซอร์ (W)
Pr	Prandtl number
r_b	รัศมีของลำแสงเลเซอร์ (m)
Re	Reynolds number
T_g	อุณหภูมิของแก๊สช่วย (K)
T_l	อุณหภูมิในชั้นโลหะที่เป็นของเหลว (K)
$T_{10,off}$	อุณหภูมิผิวของโลหะเหลวในช่วงที่หยุดให้ความร้อน (K)
$T_{10,on}$	อุณหภูมิผิวของโลหะเหลวในช่วงการให้ความร้อน (K)
T_m	อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะ (K)
t_{off}	ช่วงเวลาที่หยุดให้ความร้อน (s)
t_{on}	ช่วงเวลาของการให้ความร้อน (s)
T_s	อุณหภูมิในชั้นโลหะที่เป็นของแข็ง (K)
T_0	อุณหภูมิเริ่มต้นของโลหะ (K)
x_m	ตำแหน่งของรอยต่อระหว่างของแข็ง-ของเหลวใหม่ในช่วงพักระหว่างพัลส์ (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

z_m	ตำแหน่งของรอยต่อระหว่างของแข็ง-ของเหลว ในช่วงการให้ความร้อน (m)
z_v	ตำแหน่งของรอยต่อระหว่างของเหลว-ไอ ในช่วงการให้ความร้อน (m)
\dot{z}_m	ความเร็วของรอยต่อระหว่างของแข็ง-ของเหลว ในช่วงการให้ความร้อน (m/s)
\dot{z}_v	ความเร็วของรอยต่อระหว่างของเหลว-ไอ ในช่วงการให้ความร้อน (m/s)
α_l	ค่าการแพร่ความร้อนของโลหะที่เป็นของเหลว (m^2/s)
α_s	ค่าการแพร่ความร้อนของโลหะที่เป็นของแข็ง (m^2/s)
ρ_l	ค่าความหนาแน่นของโลหะที่เป็นของเหลว (kg/m^3)
ρ_g	ค่าความหนาแน่นของแก๊สช่วย (kg/m^3)
η_{ox}	ประสิทธิภาพของการเกิดออกซิเดชัน
v_g	ความเร็วการไหลของแก๊สช่วย (m/s)
μ_g	ค่าความหนืดของแก๊สช่วย ($N/m \cdot s$)
ρ_s	ความหนาแน่นของโลหะที่เป็นของแข็ง (kg/m^3)
ξ	ค่าคงที่ที่ใช้ในการหาค่า x_m

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การเจาะด้วยเลเซอร์ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตหลากหลายรูปแบบในปัจจุบัน เนื่องด้วยข้อดีที่มีมากมาย เช่น การเจาะด้วยความแม่นยำ รวดเร็ว สามารถเจาะรูขนาดเล็กและรูที่มีอัตราความลึกต่อความกว้างรูเจาะมาก มีความสามารถในการผลิตซ้ำได้ในเวลาอันสั้น รวมทั้งสามารถปรับมุมที่ใช้ในการเจาะ สร้างรูเจาะที่มุมยากๆ สามารถเจาะบนวัสดุหลากหลายชนิด และบนวัสดุที่มีความแข็งแรงมากได้ อีกทั้งยังควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ และไม่มีกัมมันตภาพรังสีระหว่างอุปกรณ์เลเซอร์กับชิ้นงาน ดังนั้นจึงไม่เกิดการแตกหักของชิ้นส่วนหรือความเสียหายระหว่างการเจาะ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ทำให้เลเซอร์ถูกเลือกนำมาใช้แทนการเจาะทางกลในบางอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่น การเจาะด้วยเลเซอร์ในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องยนต์กังหัน โดยใช้เลเซอร์เจาะรูระบายความร้อนของใบพัดกังหันที่มีวัสดุเป็น superalloy นำมาใช้กับเครื่องบินและโรงไฟฟ้า เป็นต้น นอกจากนี้ การเจาะด้วยเลเซอร์ยังสามารถใช้งานในแวดวงอุตสาหกรรมอื่นๆ ตั้งแต่การผลิตอุปกรณ์ทางการแพทย์ ไปจนถึงการพัฒนาการเจาะเลเซอร์เพื่อนำมาใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ดังตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในตารางที่ 1.1







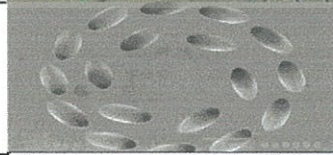
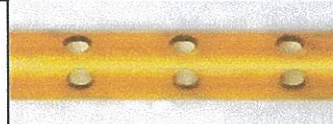


รูปที่ 1.1 Nozzle guide vane ที่ใช้การเจาะด้วยเลเซอร์ทำรูระบายความร้อน [1]

อย่างไรก็ตาม การเจาะด้วยเลเซอร์ยังมีข้อจำกัดบางประการที่ควรพิจารณา ได้แก่ ต้นทุนเครื่องที่ค่อนข้างสูง และการเจาะแบบรูตัน (blind hole) นั้นทำได้ยาก ยังมีปัญหาที่พบโดยทั่วไปหลังการเจาะ เช่นการเกิดผลกระทบร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) ในพื้นที่บริเวณรอบๆรูเจาะ อีกทั้งผิวรูเจาะไม่เรียบซึ่งเป็นปัญหาจากเนื้อวัสดุเหลวที่ถูกขจัดออกจากรู แข็งตัวบริเวณรอบๆรูเจาะ ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีการเจาะอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้รูเจาะคุณภาพดี ลดปัญหาที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้การเจาะด้วยเลเซอร์

การประยุกต์ใช้		ชนิดของเลเซอร์, เทคนิคการเจาะ	ประโยชน์
รูระบายความร้อนที่ Turbine blades, Vanes และ Combustion chambers (Prima Power Laserdyne) [2]		Nd:YAG (Percussion drilling & Trepanning)	ระบายความร้อนในส่วนของ Turbine Engine ในเครื่องบิน และเพิ่ม ประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงของ เครื่องยนต์ ลดเสียง ลดการปล่อย NOx และ CO
รูเจาะบน Ceramic และ Mettalic coatings (SIEMENS gas turbine) [3]		Flash-lamp pumped Nd:YAG Lasers (Percussion drilling & trepanning)	รูระบายความร้อนบนวัสดุที่ถูกเคลือบของ ใบพัดกังหัน
Inkjet nozzles [4]		Excimer Laser	รูเจาะบน Polyimide polymer foils เพื่อ Nozzle arrays ของ Ink-jet printer cartridges มีอัตราการเจาะสูง ชิ้นงานมี คุณภาพดี และไม่เกิด HAZ
Laser micromachining metal (Potomac) [5]		IR laser	เจาะบนวัสดุพวก Stainless Steel, Copper, Nitinol, Tantalum, Gold, Aluminum
เลเซอร์กำลังสูงสำหรับ Geothermal drilling (Foro Energy, Inc.) [6]		20 kW Fiber laser	ใช้เลเซอร์เจาะหิน โดยความร้อนจาก เลเซอร์ทำให้เกิดการอ่อนตัว และการแตก ของหิน แล้วจึงทำการเจาะทางกลเพื่อนำ ชั้นหินออก
Via drilling (PRECO, Coherent) [7]		The CO ₂ laser, Ultraviolet laser	Laser via drilling หรือ Microvia drilling สามารถเจาะรูขนาด 0.20mm ถึง 0.025mm
Laser drilling for fuel injection components (Oxford Lasers) [8]		Nd:YAG lasers (Trepanning)	เจาะหัวฉีดสำหรับ Gasoline และ Diesel และ Fuel filter เพื่อให้เชื้อเพลิงที่ถูกฉีด เป็นฝอยละเอียด
อุปกรณ์ทางการแพทย์ [9]		CO ₂ Lasers	รูเจาะบนสายสวน, Polymer sheets, 3-D บอลลูนขยายหลอดเลือด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเจาะด้วยเลเซอร์มีกลไกการเจาะที่เกิดขึ้นซับซ้อน เพราะในระหว่างการเจาะนั้น อุณหภูมิที่สูงทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะอย่างรวดเร็วและเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้นมาก และยังมีปัจจัยมากมายส่งผลต่อคุณภาพรูเจาะได้แก่ พลังงานของเลเซอร์ รูปแบบพัลส์ของเลเซอร์ ความยาวคลื่น ความถี่ ความถี่ของลำแสง วัสดุ ความหนาของชิ้นงาน ระยะโฟกัส และการใช้แก๊สช่วยเป็นต้น เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพ เพื่อให้การเจาะมีประสิทธิภาพดีที่สุด จะต้องเลือกค่าของตัวแปรและกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อการเจาะที่เหมาะสม การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถช่วยทำนายรูปแบบการเจาะของโลหะด้วยเลเซอร์ และอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเจาะได้ โดยกำหนดตัวแปรที่ต้องการศึกษา แทนการสร้างการทดลองจริงซึ่งมีค่าใช้จ่ายและใช้เวลาในการศึกษาผลการทดลองนานกว่าการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ เมื่อรวมผลของช่วงพักระหว่างพัลส์ (pulse off) เข้าในการพิจารณาด้วย
2. เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. ลักษณะการกระจายตัวของลำแสงเลเซอร์ในกระบวนการเจาะโลหะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ (top-hat uniform beam profile) ส่งผลให้ลักษณะของรูเจาะเป็นแบบทรงกระบอก ข้อสมมติฐานนี้ใช้ได้ดีสำหรับลำแสงเลเซอร์ที่เกิดจากเครื่องชนิด Nd:YAG
2. การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นในทิศทางตามแนวแกนของลำแสงเลเซอร์เป็นหลัก (one-dimensional heat transfer)
3. พิจารณาชิ้นงานที่เป็นโลหะเท่านั้น
4. การแปรผันของพลังงานแสงเลเซอร์ตามเวลา (beam temporal profile) เป็นแบบสี่เหลี่ยม (rectangular)
5. แก๊สออกซิเจนที่ถูกใช้เป็นแก๊สช่วยในกระบวนการเจาะ มีส่วนช่วยในการเพิ่มความเร็วของการเจาะ (ผลของความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างออกซิเจนกับโลหะเหลว) และยังช่วยกำจัดไอโลหะที่เกิดขึ้นบริเวณเหนือผิวรูเจาะออกไปจากแนวลำแสงเลเซอร์อีกด้วย (เนื่องจากไอโลหะดังกล่าวสามารถขัดขวางและดูดซับพลังงานเลเซอร์ที่ส่งไปยังชิ้นงานได้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีเชิงวิเคราะห์แบบ 1 มิติ (1D analytical method) สำหรับทำนายการเจาะเหล็กกล้าละมุน (mild steel) ด้วยเลเซอร์ชนิด Nd:YAG
2. วิธีการเจาะเป็นแบบหลายพัลส์ (percussion drilling) โดยพิจารณาช่วง pulse off รวมอยู่ในแบบจำลองด้วย
3. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำได้โดยการเทียบกับผลการศึกษาในอดีต

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ทบทวนวรรณกรรมและศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับช่วง Solid heating
3. ศึกษาและตรวจสอบผลที่ได้เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับช่วง Solid heating
4. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายความลึกของรูเจาะที่เกิดขึ้นในช่วง Drilling
5. ศึกษาและตรวจสอบผลที่ได้เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายความลึกของรูเจาะที่เกิดขึ้นในช่วง Drilling
6. ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลการทดลองจริง
7. ศึกษาผลของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กำลังสูงสุด ความกว้างพัลส์ และ ความถี่ของพัลส์
8. สรุปผลและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักกลไกของการเจาะด้วยเลเซอร์

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับเลเซอร์

เลเซอร์ (laser) เป็นศัพท์ที่ย่อมาจากคำว่า Light amplification by stimulated emission of radiation ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้กำเนิดแสงลักษณะเฉพาะออกมา ลำแสงนั้นจะถูกปล่อยออกมาโดยการขยายแสงผ่านกระบวนการกระตุ้นการแผ่รังสีจากตัวกลาง ลำแสงเลเซอร์มีคุณสมบัติหลากหลายและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายทางขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของลำแสงเลเซอร์ที่ปล่อยออกมา

คุณสมบัติเฉพาะของลำแสงเลเซอร์ที่แตกต่างจากแสงชนิดอื่น คือ ความเป็นอาพันธ์ (coherence) กล่าวคือ ทุกๆคลื่นที่ถูกปล่อยออกมาจะมีเฟสเดียวกัน จึงทำให้สามารถปล่อยแสงที่มีขนาดเล็ก และโฟกัสไปยังจุดเล็กๆได้โดยที่มีความเข้มของแสงสูง ในขณะที่เดียวกันก็มีการลู่ออกของแสงน้อยทำให้ได้กำลังที่ส่งออกมาได้ รวมทั้งยังสามารถให้ลำแสงได้ในระยะไกลและมีทิศทางที่แน่นอนอีกด้วย

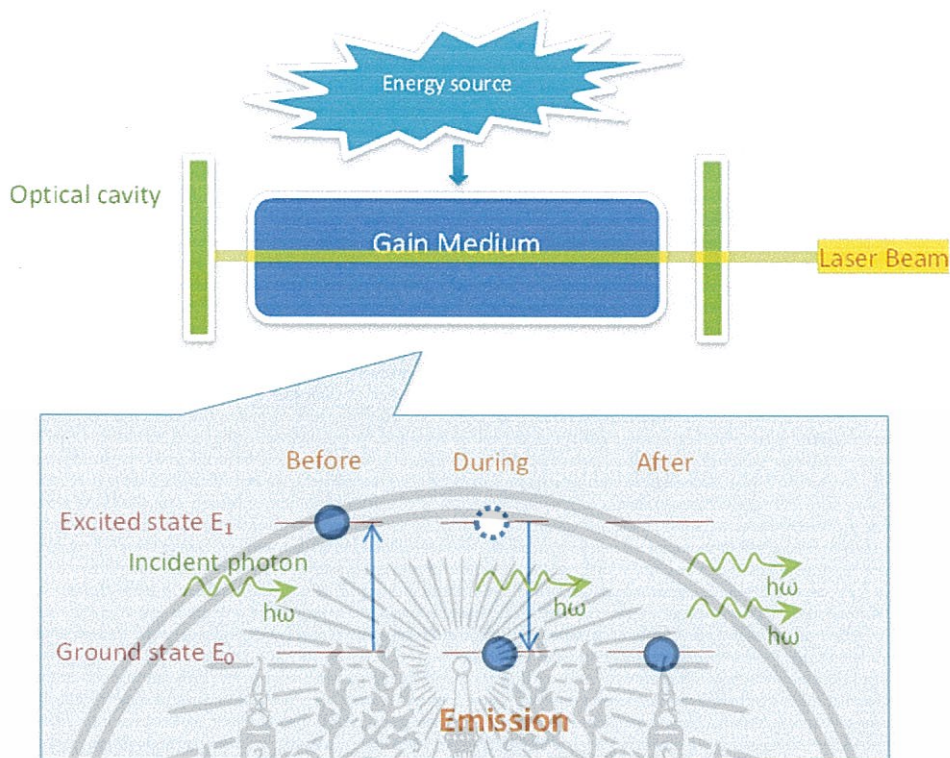
อุปกรณ์ให้กำเนิดแสงเลเซอร์มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่

1. ตัวกลางเลเซอร์ (gain medium) เป็นส่วนที่ประกอบด้วยอะตอมของสสารที่ใช้ในการกำเนิดลำแสงเลเซอร์ ซึ่งมีหลายสถานะ ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส เป็นต้น
2. แหล่งพลังงาน (energy source) ที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนชั้นพลังงาน
3. Optical cavity ประกอบด้วยกระจก 2 บานวางในตำแหน่งหัวและท้ายของตัวกลางเลเซอร์ แสงจะสะท้อนกลับไปมาและผ่านตัวกลางเป็นการขยายแสง โดยที่กระจกด้านหนึ่งจะมีรูที่สามารถให้ลำแสงนั้นลอดผ่านออกมาได้เป็นลำแสงเลเซอร์

กระบวนการเกิดลำแสงเลเซอร์

เลเซอร์เกิดจากการให้พลังงานแก่ตัวกลางเพื่อไปกระตุ้นอะตอมที่อยู่ในระดับพลังงานต่ำให้เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานสูงขึ้นเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าประชากรผกผัน จากนั้นทำการฉายแสงที่มีพลังงานเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานที่เปลี่ยนไป เพื่อให้อะตอมนั้นคายพลังงานที่ดูดกลืนเอาไว้ ออกมาเกิดแสงที่มีขนาดเท่ากับระหว่างแสงที่ฉายเข้าไปและแสงที่เกิดจากการคายพลังงานทำให้เกิดการขยายสัญญาณแสง เมื่อแสงสะท้อนไปมาผ่านตัวกลางและได้รับการกระตุ้นมากเข้า ความเข้มแสงก็จะมีค่ามากพอและสามารถให้แสงเลเซอร์ออกมาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของเครื่องกำเนิดเลเซอร์และกระบวนการเกิดลำแสงเลเซอร์

ชนิดของแสงเลเซอร์สามารถแบ่งได้ตามลักษณะตัวกลางให้กำเนิดแสงเลเซอร์ โดยสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้

1. เลเซอร์ก๊าซ (gas laser)

ตัวกลางเป็นก๊าซหรือก๊าซผสมชนิดต่างๆ เช่น He-Ne Laser, CO₂ Laser, Xenon Laser เป็นต้น

2. เลเซอร์ของแข็ง (solid laser)

ตัวกลางมีลักษณะเป็นผลึกของแข็งที่มีการใส่สารเจือปนลงไป เช่น Nd; YAG Laser มีสารนีโอดีเนียมเจือปน, Ruby Laser มีสารโครเมียมเจือปน เป็นต้น

3. เลเซอร์ของเหลว (dye laser)

ตัวกลางเป็นของเหลวส่วนมากมักใช้สีย้อมผ้านำมาผสมน้ำและแอลกอฮอล์ สารที่ใช้เช่น Rhodamin 6G Laser เป็นต้น

4. เลเซอร์สารกึ่งตัวนำ (semiconductor laser)

ใช้สารกึ่งตัวนำเป็นตัวกลาง นำไดโอดมาเป็นตัวกลางเลเซอร์ชนิดต่างๆ เช่น indium (III) phosphide, gallium (III) arsenide เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ Nd; YAG Laser เป็นเลเซอร์ที่มีตัวกลางเป็นผลึกของแข็งของ Yttrium-aluminum garnet ($Y_3Al_5O_{12}$) หรือที่เรียกว่า YAG และใช้ Nd^{3+} เป็นสารเจือปนประมาณ 1% โดยน้ำหนัก เลเซอร์ชนิดนี้มักจะถูกกระตุ้นโดยใช้หลอดไฟแฟลช หรือ เลเซอร์ไดโอด โดยทั่วไปจะปล่อยคลื่นความยาว 1064 นาโนเมตรในย่านแสงอินฟราเรด มีกำลังเฉลี่ย 3-1000 วัตต์ และสามารถให้แสงได้ทั้งแบบพัลส์และแบบต่อเนื่อง เลเซอร์ชนิดนี้จะให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อใช้ร่วมกับ Second harmonic crystal ซึ่งทำให้เกิดความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร เป็นแสงสีเขียวที่มีขนาดเล็กและมีกำลังสูงสุดถึง 2000 วัตต์ สามารถใช้ในงานเจาะวัสดุที่มีความแข็งได้ ปริมาณของสารเจือปนจะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับ การนำเลเซอร์ไปใช้ประโยชน์ โดยเลเซอร์แบบพัลส์จะมีปริมาณสารเจือปนมากกว่าแบบต่อเนื่อง [10]

2.2 กลไกการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์

เทคนิคการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ในอุตสาหกรรมในปัจจุบัน มี 4 แบบคือ

1. Single-pulse drilling

เป็นการเจาะโดยใช้เพียงหนึ่งพัลส์ด้วยพลังงานสูง เหมาะกับงานที่ต้องการรูเจาะจำนวนมากในเวลาการผลิตสั้นๆ และงานที่ต้องการรูเจาะขนาดเล็กกับชิ้นงานที่มีความบาง น้อยกว่า 1 mm [11] เนื่องจากต้องการให้เกิดรูเจาะภายในหนึ่งพัลส์ จึงต้องใช้พลังงานที่สูงมาก เป็นผลให้คุณภาพรูเจาะไม่ดีเนื่องจากได้รับความร้อนมากเกินไป

2. Percussion drilling

เป็นการเจาะด้วยพัลส์สั้นๆ ติดต่อกัน มีการสลับระหว่างช่วงให้เลเซอร์ (pulse on) และช่วงพักระหว่างพัลส์ (pulse off) ซึ่งกินระยะเวลา นานกว่าช่วง pulse on เทคนิคนี้ใช้พลังงานน้อยกว่าต่อหนึ่งพัลส์เมื่อเทียบแบบการเจาะแบบพัลส์เดี่ยว ทำให้ได้รูเจาะที่มีความแม่นยำ มีรูขนาดเล็กกว่า ลึกกว่า สามารถเจาะวัสดุที่มีความหนา เพราะเป็นการให้ลำแสงเลเซอร์ซ้ำๆ ด้วยพลังงานที่ไม่มากเกินไป นิยมใช้ Nd:YAG ในการเจาะแบบ percussion เพราะให้พลังงานในการเจาะสูงในแต่ละพัลส์ เหมาะสำหรับการเจาะรูระบายความร้อนในใบพัดกังหัน หรือห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์ที่มีรูเจาะถึง 40,000 – 50,000 รู [11] อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของเทคนิคนี้คือ การเกิด recast layer ซึ่งเป็นการแข็งตัวของเนื้อวัสดุที่หลอมเหลวและตกค้างอยู่ภายในรูเจาะ

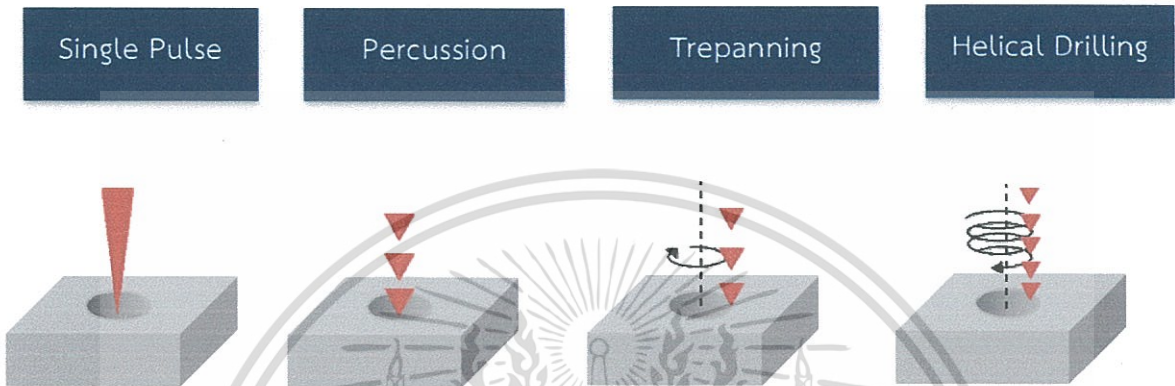
3. Trepanning drilling

สำหรับการเจาะเพื่อให้รูขนาดใหญ่ โดยเจาะรูนำร่อง (pilot hole) ก่อน จากนั้นจึงเจาะด้วยพัลส์สั้นๆ เป็นวงกลมรอบๆ รูนำร่องเพื่อขยายเส้นผ่านศูนย์กลาง เสมือนการตัดชิ้นงานโดยการตัดขยายเป็นวงกว้างมากขึ้น โดยทั่วไปแล้ว การเจาะแบบ trepanning ทำให้ได้รูเจาะที่มีคุณภาพดีกว่าแบบ percussion แต่ใช้เวลาในการเจาะนานกว่า นิยมใช้เลเซอร์ชนิด CO_2 และ Nd:YAG สำหรับการเจาะด้วยเทคนิคนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Helical drilling

เป็นการเจาะด้วยการหมุนหัวเลเซอร์เป็นวงกลม และไม่มี การเจาะรูนำร่อง มีเส้นทางการเจาะเป็นแบบเกลียว โดยเลเซอร์จะทำให้เกิดรูกลิ้งไปเป็นเกลียวในชิ้นงาน หรือขุดเกลียว ทำให้ได้รูขนาดใหญ่ และทำให้เกิดการเจาะทะลุได้เร็วกว่าเทคนิค trepanning แต่ทั้ง helical และ trepanning ใช้เวลาในการเจาะนานและมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการเจาะแบบ percussion [12]



รูปที่ 2.2 แสดงกลไกการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ทั้ง 4 แบบ

การเจาะโลหะด้วยเลเซอร์แบบหลายพัลส์ (percussion laser drilling) ถูกนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นการเจาะด้วยพัลส์สั้นๆ ประกอบด้วยช่วง pulse on โดยเมื่อลำแสงเลเซอร์ตกกระทบกับผิวชิ้นงาน ผิวชิ้นงานจะดูดซับพลังงานไว้บางส่วนขึ้นอยู่กับอัตราการสะท้อนของพื้นผิวชิ้นงานและความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ ซึ่งผิวโลหะที่ดูดซับพลังงานความร้อนจากลำแสงเลเซอร์จะมีอุณหภูมิที่ผิวเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่ทำให้ผิวของโลหะเปลี่ยนสถานะ เป็นของเหลวและเป็นไอบางส่วน ส่วนของชิ้นงานที่กลายเป็นไอนั้น จะถูกแก๊สช่วยเป่าไล่ออก เพื่อไม่ให้สะสมเป็นกลุ่มไอบางลำแสงเลเซอร์จากนั้นจะเป็นช่วง pulse off เกิดการลดลงของอุณหภูมิที่พื้นผิวของรูเจาะ ในส่วนที่เป็นของเหลว ที่ค้างอยู่ในรูเจาะ อาจเกิดการแข็งตัวในระหว่างช่วง pulse off และจะถูกให้ความร้อน สลับกับช่วงพักระหว่างพัลส์ บริเวณเนื้อผิวชิ้นงานด้านบนก็จะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ และในส่วนล่างมีการนำความร้อน เกิดการหลอมเหลวจนสุดความลึกของชิ้นงานและทะลุออกไป กลายเป็นรูเจาะทะลุ

เนื่องด้วยการเจาะโลหะแบบหลายพัลส์ มีกลไกการเจาะที่ซับซ้อน และมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพรูเจาะ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กำลังสูงสุด (peak power)

Peak power คือกำลังสูงสุดโดยเลเซอร์ในหนึ่งพัลส์ สามารถหาได้จาก

$$P_{peak} = \frac{E}{t_{on}} \quad (1)$$

โดยที่ E คือ พลังงานของเลเซอร์ต่อหนึ่งพัลส์ (pulse energy)

t_{on} คือ ความกว้างช่วงพัลส์ (pulse width)

2. ความเข้มของแสงเลเซอร์ (laser intensity, I_0)

คือกำลังของแสงเลเซอร์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่ลำแสงตกกระทบ

$$I_0 = \frac{P_{peak}}{\pi r_b^2} \quad (2)$$

โดยที่ r_b คือ รัศมีของลำแสงเลเซอร์ (m)

การเลือกปรับค่าพลังงานในการเจาะแต่ละครั้งเป็นเรื่องสำคัญ หากต้องการรูเจาะขนาดใหญ่สามารถเลือกกำลังสูงสุดมากๆ ได้ อีกทั้งความลึกจากการเจาะในแต่ละพัลส์เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มพลังงานของเลเซอร์ แต่ถ้าหากใช้ความกว้างช่วงพัลส์มากเกินไปจนความพอดี ทำให้เกิดการหลอมเหลวของเนื้อชิ้นงานมากเกินไป และทำให้ได้รูเจาะที่มีปากรูกว้างเกินไป [13]

3. ความกว้างของช่วงพัลส์ (pulse width) และความถี่ของพัลส์ (pulse frequency)

ความกว้างช่วงพัลส์ หรือ t_{on} คือระยะเวลาของช่วง pulse on หรือเวลาที่เลเซอร์ใช้ในการฉายลำแสงในแต่ละพัลส์ หากการเจาะมี pulse width นานไป ทำให้เกิดการหลอมเหลวมากเกินไป ทำให้ได้รูเจาะใหญ่เกินความต้องการ การเลือกช่วง pulse width ที่เหมาะสม ทำให้ลดความเสียหายที่เกิดขึ้นจาก HAZ และลดการเกิด recast layer [13] ส่วนความถี่ของพัลส์นั้น คือจำนวนการให้ลำแสงเลเซอร์ในหนึ่งวินาที หาได้จากส่วนกลับของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในหนึ่ง cycle ถ้าเพิ่มความถี่ของพัลส์ ทำให้ช่วง pulse off สั้นลง ทำให้เจาะได้เร็วขึ้น

4. คุณสมบัติของวัสดุ (material properties)

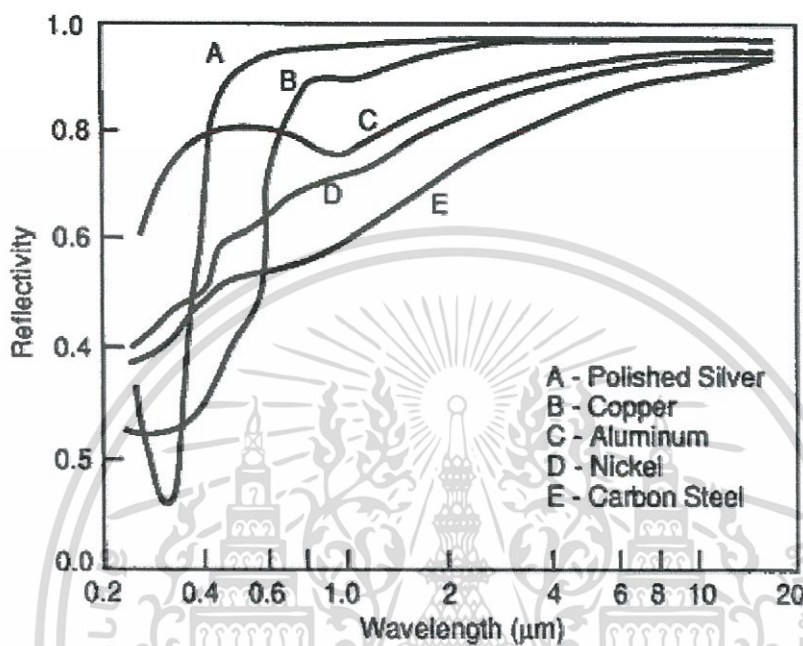
วัสดุแต่ละชนิดมีคุณสมบัติจำเพาะที่แตกต่างกัน สำหรับโลหะนั้น คุณสมบัติของผิวโลหะที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการดูดซับพลังงานจากลำแสงเลเซอร์คือ ค่าการดูดซับพลังงาน (absorptivity) ของโลหะมีผลต่อค่าความเข้มของแสงเลเซอร์ที่ชิ้นงานดูดซับได้หรือ I_{abs} ที่หาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{abs} = AI_0 = (1 - R)I_0 \quad (3)$$

โดยที่ R คือ ค่าการสะท้อนของโลหะ

A คือ ค่าการดูดซับพลังงานของโลหะ



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนกับความยาวคลื่นสำหรับโลหะบางชนิด [14]

ปริมาณที่พลังงานจากแสงเลเซอร์ที่โลหะดูดซับได้ ดูจากค่า $1 - R$ ของโลหะแต่ละชนิด ในรูปที่ 2.4 เลเซอร์ CO_2 มีความยาวคลื่น $10.6 \mu\text{m}$ พบว่าที่ความยาวคลื่นเท่านี้ โลหะมีค่าการสะท้อนเข้าใกล้ 1 ทำให้มีค่า $1 - R$ น้อยมากๆ ดังนั้นจึงดูดซับพลังงานจากแสงเลเซอร์เข้าสู่โลหะได้น้อย ส่วนเลเซอร์ Nd:YAG มีความยาวคลื่น $1.064 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่โลหะสามารถดูดซับพลังงานได้ดีกว่า ดังนั้น Nd:YAG ที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า ทำให้โลหะสามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่า จึงเหมาะกับงานที่ต้องให้ความร้อนกับโลหะมากๆ

นอกจากนี้ ยังมีคุณสมบัติอื่นๆของโลหะที่ส่งผลต่อกระบวนการเจาะได้แก่ ค่าการนำความร้อนของโลหะ (k) ค่าการแพร่ความร้อนของโลหะ (α) เป็นต้น

5. แก๊สช่วย (assist gas)

แก๊สช่วยถูกปล่อยลงมาล้อมรอบลำแสงเลเซอร์ในขณะการเจาะ มีหน้าที่ช่วยขับไล่โอโลหะที่เกิดขึ้นขณะการเจาะ ไม่ให้ขัดขวางลำแสงเลเซอร์ และช่วยดันเนื้อโลหะเหลวออกจากรูเจาะสำหรับการเจาะที่เกิดจริง รวมทั้งป้องกันเลนส์ของอุปกรณ์เลเซอร์โดยแรงดันที่เกิดขึ้นจากแก๊สช่วยรอบๆ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกซิเจนที่ถูกนำมาใช้เป็นแก๊สช่วย ส่งผลให้เพิ่มอัตราการเจาะเพราะการเกิด oxidation ระหว่างโลหะกับออกซิเจน ทำให้เกิด oxide และมีพลังงานปล่อยออกมา เป็น exothermic reaction ความร้อนที่ออกมานี้ ช่วยเป็นแหล่งความร้อนเพิ่มส่งผลให้เจาะได้เร็วขึ้น แต่ชั้น oxide ที่เกิดขึ้น ส่งผลต่อการดูดซับความร้อนของเลเซอร์ที่ผิวชิ้นงานและยังส่งผลต่อคุณภาพรูเจาะ นอกจากนี้ ก๊าซไนโตรเจนและอาร์กอนยังถูกนำมาใช้เป็นแก๊สเฉื่อย สำหรับการเจาะที่ต้องการคุณภาพผิว โดยการเลือกพิจารณาการใช้แก๊สช่วยยังขึ้นกับวัสดุชิ้นงานที่ใช้ คุณภาพรูเจาะที่ต้องการ และความคุ้มค่าต่อการผลิตอีกด้วย

สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้เลือกกำลังสูงสุด ความกว้างช่วงพัลส์ และความถี่ของพัลส์มาศึกษาดูผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้ต่อการเจาะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์แบบหลายพัลส์

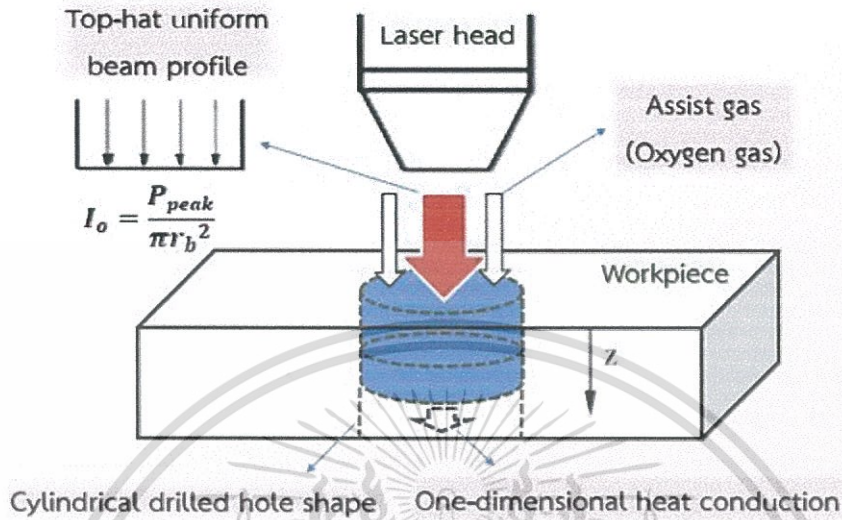
3.1 การวิเคราะห์กระบวนการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์

สำหรับการเริ่มต้นศึกษาเกี่ยวกับการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ เพื่อให้การวิเคราะห์ง่ายขึ้นและเข้าใจถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างการเจาะง่ายขึ้นนั้น แบบจำลองจึงถูกพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานภายใต้สมมติฐาน ดังแสดงในรูปที่ 3.1

1. ลักษณะการกระจายตัวของลำแสงเลเซอร์ในกระบวนการเจาะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอหรือคงที่ทั้งพิกัดและเวลา (top-hat uniform spatial and temporal beam profile) [15] เนื่องจากสอดคล้องกับชนิดของเลเซอร์ที่ใช้คือ Nd:YAG Type ส่งผลให้ลักษณะของรูเจาะเป็นแบบทรงกระบอก
2. การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นในทิศทางตามแนวแกนของลำแสงเลเซอร์เป็นหลัก (one-dimensional heat transfer) จึงวิเคราะห์ว่าการเจาะเป็นกระบวนการแบบ 1 มิติ (one dimensional process)
3. แก๊สออกซิเจนที่ถูกใช้เป็นแก๊สช่วยในกระบวนการเจาะ มีส่วนช่วยในการเพิ่มความเร็วของการเจาะ (ผลของความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างออกซิเจนกับโลหะเหลว) และยังช่วยกำจัดไอโลหะที่เกิดขึ้นที่บริเวณเหนือผิวรูเจาะออกไปจากแนวลำแสงเลเซอร์อีกด้วย (เนื่องจากไอโลหะดังกล่าวสามารถขัดขวางและดูดซับพลังงานเลเซอร์ที่ส่งไปยังชิ้นงานได้)
4. พิจารณาว่าไม่มีปฏิกิริยาระหว่างลำแสงเลเซอร์กับไอโลหะเกิดขึ้น เนื่องจากแก๊สช่วยจะช่วยให้ไอโลหะที่เกิดขึ้นบริเวณเหนือผิวรูเจาะออกไป ฉะนั้นจึงไม่มีพลังงานของแสงเลเซอร์ถูกดูดซับไว้ในไอโลหะที่เกิดขึ้นบริเวณเหนือผิวรูเจาะ
5. พิจารณาเฉพาะชิ้นงานที่เป็นโลหะเท่านั้น นั่นคือ ลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบชิ้นงาน มีบางส่วนที่เกิดการสะท้อนกลับและส่วนที่เหลือถูกดูดซับไว้ในชิ้นงาน โดยไม่เกิดการส่งผ่าน (transmit) ของลำแสงออกไปจากชิ้นงานในทิศทางใดๆ
6. พิจารณาว่าค่าการดูดซับพลังงานของผิวชิ้นงาน (surface absorptivity) จุดหลอมเหลว (melting point) และจุดเดือด (boiling point) มีค่าคงที่
7. พิจารณาว่าไม่มีพลาสมาเกิดขึ้น (no plasma generation) [15] ในกระบวนการเจาะ ฉะนั้นจะพิจารณาว่าชิ้นงานอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว และไอโลหะเท่านั้น
8. พิจารณาว่าไม่มีคลื่นกระแทกเกิดขึ้น (no shock waves generation) ในกระบวนการเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

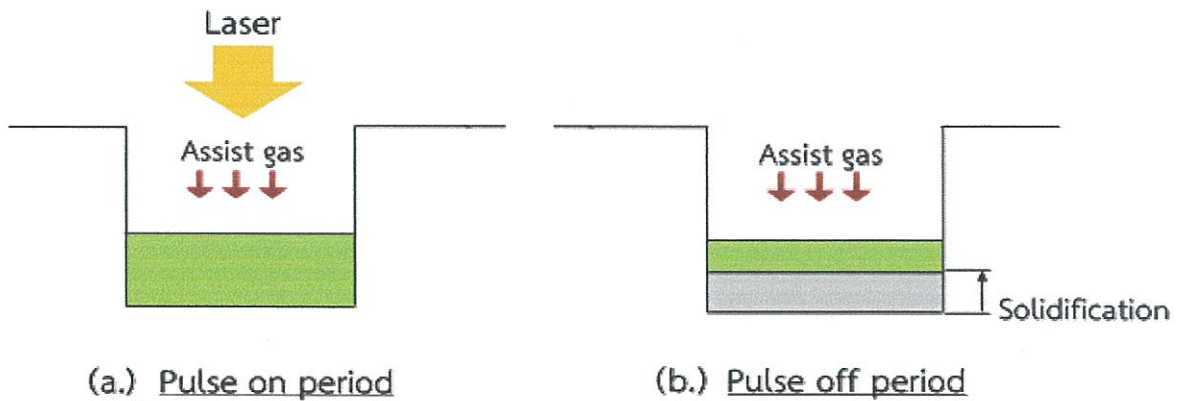
9. ไม่คิดผลจากการสะท้อนกลับไปมาของลำแสงเลเซอร์ภายในผนังรูเจาะ (no multiple-reflection along hole wall)



รูปที่ 3.1 แสดงสมมติฐานของแบบจำลองของการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์สำหรับการศึกษาในครั้งนี้

สำหรับกระบวนการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงการให้ความร้อน (pulse on period) และช่วงพักระหว่างพัลส์ (pulse off period) โดยในช่วง pulse on เมื่อลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบนชิ้นงาน ผิวโลหะจะดูดซับพลังงานความร้อนจากลำแสงเลเซอร์จนทำให้อุณหภูมิที่ผิวของโลหะ (T_s) เพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature, T_m) ทำให้ผิวของโลหะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว หรือจากของเหลวกลายเป็นไอเมื่ออุณหภูมิที่ผิวของโลหะ (T_s) เพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิจุดเดือด (boiling temperature, T_b) และเมื่อโลหะเริ่มเกิดการหลอมเหลวหรือกลายเป็นไอ ไอโลหะที่เกิดขึ้นที่บริเวณเหนือผิวรูเจาะนี้จะถูกกำจัดออกไปจากรูเจาะเนื่องจากผลของแก๊สช่วย ส่วนโลหะเหลวที่เกิดขึ้นจะค้างอยู่ภายในรูเจาะ เกิดเป็นชั้นของโลหะเหลวนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (a.)

ส่วนในช่วง pulse off ภายใต้แบบจำลองนี้ จะพิจารณาว่าชั้นโลหะเหลวที่เกิดขึ้นในช่วง pulse on นั้นจะเกิดการเย็นตัวลงซึ่งทำให้บริเวณรอยต่อระหว่างของแข็งและของเหลวเกิดการแข็งตัวย้อนกลับขึ้นมาจากชั้นของของแข็งเดิมนั่นเอง โดยที่ชั้นของของเหลวที่เกิดขึ้นในช่วงนี้ถูกแสดงดังรูปที่ 3.2 (b.) และกลไกการเจาะดังกล่าวจะดำเนินสลับกันไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้ความลึกของรูเจาะตามที่ต้องการ



รูปที่ 3.2 แสดงกลไกในการเกิดรูเจาะภายใต้สมมติฐานของแบบจำลองนี้

(a.) รูเจาะในช่วง pulse on (b.) รูเจาะในช่วง pulse off

3.2 แบบจำลองของช่วงก่อนที่ผิวชิ้นงานจะเกิดการหลอมเหลว (Solid heating stage before melting)

โดยในการศึกษาการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์นี้ ก่อนอื่นเราต้องพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานที่เป็นของแข็งหรือก่อนที่ผิวชิ้นงานจะเกิดการหลอมเหลวนั้นเอง โดยที่การให้ความร้อนกับชิ้นงานที่เป็นของแข็ง ก่อนที่จะเกิดการหลอมเหลวนั้น สามารถเขียนสมการการนำความร้อนในของแข็งได้ดังนี้

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad (4)$$

เงื่อนไขเริ่มต้น;

$$T_{s,on,i} = T_{s,off,i-1} \quad (5)$$

เมื่อ α_s คือ การแพร่ความร้อนของโลหะที่เป็นของแข็ง (m^2/s)

$T_{s,on,i}$ คือ อุณหภูมิผิวเริ่มต้นของช่วง pulse on นี้ (K)

$T_{s,off,i-1}$ คือ อุณหภูมิผิวสุดท้ายหลังจบช่วง pulse off ก่อนหน้า (K)

เงื่อนไขขอบเขต;

กรณี pulse on ;
$$I_{abs} = -k_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial z} \right) \quad (6)$$

กรณี pulse off ;
$$h_g (T_g - T_{s,on}) = -k_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial z} \right) \quad (7)$$

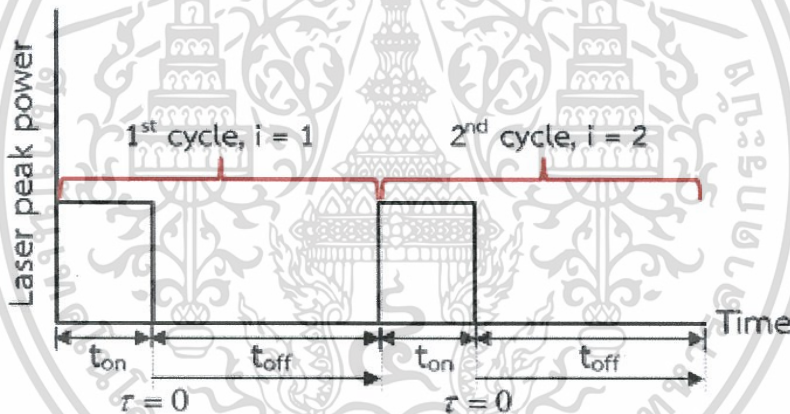
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$I_{abs} = A_s I_0 = A_s \left(\frac{P_{peak}}{\pi r_b^2} \right) \quad (8)$$

เมื่อ	I_{abs}	คือ ความเข้มของแสงเลเซอร์ที่โลหะดูดซับ (W/m^2)
	k_s	คือ การนำความร้อนของโลหะที่เป็นของแข็ง ($W/m \cdot K$)
	h_g	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแก๊สช่วย ($W/m^2 \cdot K$)
	T_g	คือ อุณหภูมิของแก๊สช่วย (K)
	A_s	คือ การดูดซับพลังงานของโลหะที่เป็นของแข็ง
	I_0	คือ ความเข้มของแสงเลเซอร์ (W/m^2)
	P_{peak}	คือ กำลังสูงสุดของเลเซอร์ (W)
	r_b	คือ รัศมีของลำแสงเลเซอร์ (m)

โดยที่ช่วง pulse on, t_{on} และช่วง pulse off, t_{off} ในแต่ละรอบของการทำงาน ถูกแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ช่วงของ pulse on และ pulse off ในแต่ละรอบการทำงานของเลเซอร์

เมื่อแก้สมการ (4) ประกอบกับเงื่อนไขที่กำหนดให้ จะได้คำตอบที่แสดงถึงอุณหภูมิที่ผิวของโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างการให้ความร้อนกับชิ้นงานที่เป็นของแข็ง ดังแสดงในสมการต่อไปนี้ [16,17]

สำหรับกรณี pulse on;

$$T_{s,on,i} = T_{s,off,i-1} + \frac{2I_{abs}}{k_s} \sqrt{t_{on} \alpha_s / \pi} \quad (9)$$

เมื่อ t_{on} คือ ช่วงเวลาของการให้ความร้อน (s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณี pulse off;

$$T_{s,off,i} = T_{s,on,i} + (T_g - T_{s,on,i}) \left[1 - \left[\exp \frac{t_{off} \alpha_s h_g^2}{k_s^2} \right] \times \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{h_g \sqrt{t_{off} \alpha_s}}{k_s} \right) \right] \right] \\ + (T_g - T_{s,on,i}) \left[1 - \left[\exp \frac{t_{off} \alpha_s}{r_b^2} \right] \times \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{t_{off} \alpha_s}}{r_b} \right) \right] \right] \quad (10)$$

เมื่อ t_{off} คือ ช่วงเวลาที่หยุดพักการให้ความร้อนระหว่างพัลส์ (s)

3.3 แบบจำลองของช่วงหลังจากที่ผิวชิ้นงานเกิดการหลอมเหลว (Drilling stage after melting)

3.3.1 ช่วงการให้ความร้อน (pulse on period during drilling stage)

สำหรับในช่วงการให้ความร้อนนี้ หลังจากผิวของโลหะได้รับพลังงานจากลำแสงเลเซอร์จนเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะคือมีทั้งของเหลวและไอเกิดขึ้น โดยไอโลหะที่เกิดขึ้นที่บริเวณเหนือผิวรูเจาะนั้น จะถูกกำจัดออกไปจากรูเจาะเนื่องจากผลของแก๊สช่วย ส่วนโลหะเหลวที่เกิดขึ้นจะอยู่ภายในรูเจาะ เกิดเป็นชั้นของโลหะเหลวนั้นเอง และเพื่อหาชั้นของของเหลวที่ใช้แสดงถึงตำแหน่งความลึกของรูเจาะที่เกิดขึ้นในช่วง pulse on นี้ เราจะพิจารณาจากสมการการอนุรักษ์พลังงานที่บริเวณรอยต่อระหว่างของเหลว-ไอ (liquid-vapor interface, z_v) และที่บริเวณรอยต่อระหว่างของแข็ง-ของเหลว (solid-liquid interface, z_m) ดังแสดงในรูปที่ 3.4

โดยสมการการอนุรักษ์พลังงานที่บริเวณรอยต่อนั้น มีดังนี้
ที่ liquid-vapor interface, z_v ;

$$I_{abs} + \rho_l H_{ox} \eta_{ox} \dot{z}_m + k_l \frac{T_m - T_{l0,on}}{(z_m - z_v) t_{on}} - h_g (T_{l0,on} - T_g) = \rho_l L_v \dot{z}_v \quad (11)$$

โดยที่ h_g คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแก๊สช่วย ($W/m^2 \cdot K$) ซึ่งหาได้จาก [15]

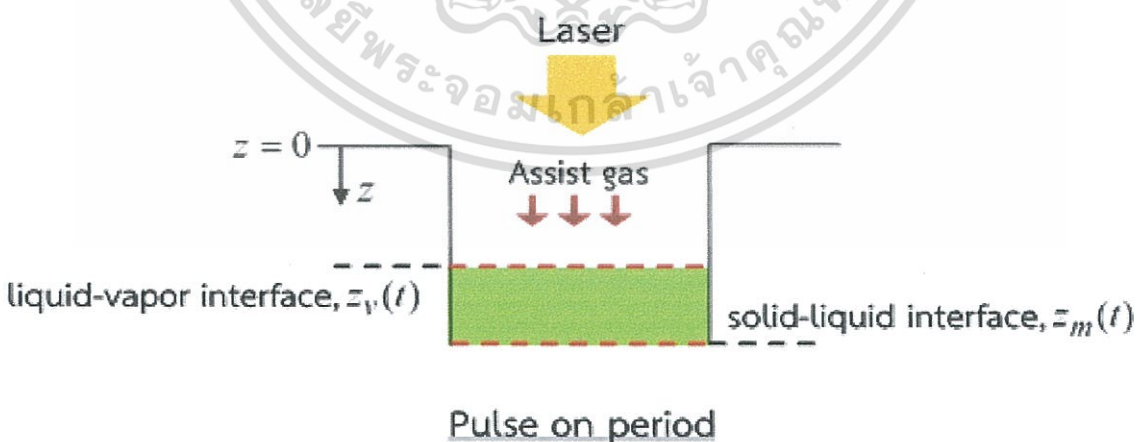
$$h_g = \frac{k_g}{2r_b} (C_c \operatorname{Re}^{n_c} \operatorname{Pr}^{1/3}) \quad (12)$$

Re คือ Reynolds number

$$\operatorname{Re} = \frac{\rho_g v_g 2r_b}{\mu_g} \quad (13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	I_{abs}	คือ ค่าความเข้มของแสงเลเซอร์ที่โลหะดูดซับ (W/m^2)
	ρ_l	คือ ค่าความหนาแน่นของโลหะที่เป็นของเหลว (kg/m^3)
	H_{ox}	คือ เอนทัลปีของการออกซิเดชัน ($=4354403.587 J/kg$ [18])
	η_{ox}	คือ ประสิทธิภาพของการเกิดออกซิเดชัน ($=0.26$ ได้มาจากการทดลอง [18])
	k_l	คือ ค่าการนำความร้อนของโลหะที่เป็นของเหลว ($W/m \cdot K$)
	T_m	คือ อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะ (K)
	$T_{l0,on}$	คือ อุณหภูมิผิวของโลหะเหลวในช่วงการให้ความร้อน (K)
	t_{on}	คือ ช่วงเวลาของการให้ความร้อน (s)
	T_g	คือ อุณหภูมิของแก๊สช่วย (K)
	L_v	คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (kJ/kg)
	k_g	คือ ค่าการนำความร้อนของแก๊สช่วย ($W/m \cdot K$)
	C_c	คือ ค่าคงที่ได้จากการทดลอง ($=0.228$ [19])
	m_c	คือ ค่าคงที่ได้จากการทดลอง ($=0.731$ [19])
	Pr	คือ Prandtl number
	r_b	คือ รัศมีของลำแสงเลเซอร์ (m)
	ρ_g	คือ ค่าความหนาแน่นของแก๊สช่วย (kg/m^3)
	v_g	คือ ค่าความเร็วการไหลของแก๊สช่วย (m/s)
	μ_g	คือ ค่าความหนืดของแก๊สช่วย ($N \cdot s/m^2$)



รูปที่ 3.4 Schematic diagram ของแบบจำลองช่วง pulse on

ที่ solid-liquid interface, z_m ;

$$-k_l \frac{T_m - T_{l0,on}}{(\dot{z}_m - \dot{z}_v)t_{on}} + k_s \frac{T_0 - T_m}{2\sqrt{\alpha_s t_{on}}} = \rho_s L_m \dot{z}_m \quad (14)$$

เมื่อ	k_s	คือ ค่าการนำความร้อนของโลหะที่เป็นของแข็ง ($W/m \cdot K$)
	T_0	คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของโลหะ (K)
	α_s	คือ ค่าการแพร่ความร้อนของโลหะที่เป็นของแข็ง (m^2/s)
	ρ_s	คือ ค่าความหนาแน่นของโลหะที่เป็นของแข็ง (kg/m^3)
	L_m	คือ ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (kJ/kg)

โดยที่ $T_{l0,on}$ คือ อุณหภูมิผิวของโลหะเหลวในช่วงการให้ความร้อน (K) ซึ่งหาได้จาก [20,27]

$$T_{l0,on} = I_{abs} \sqrt{\frac{4t_{on}}{\pi \rho_l c_{eff} k_l}} \quad (15)$$

c_{eff} คือ ความจุความร้อนประสิทธิผล

$$c_{eff} = c_{ps} + \frac{L_m}{T_m} \quad (16)$$

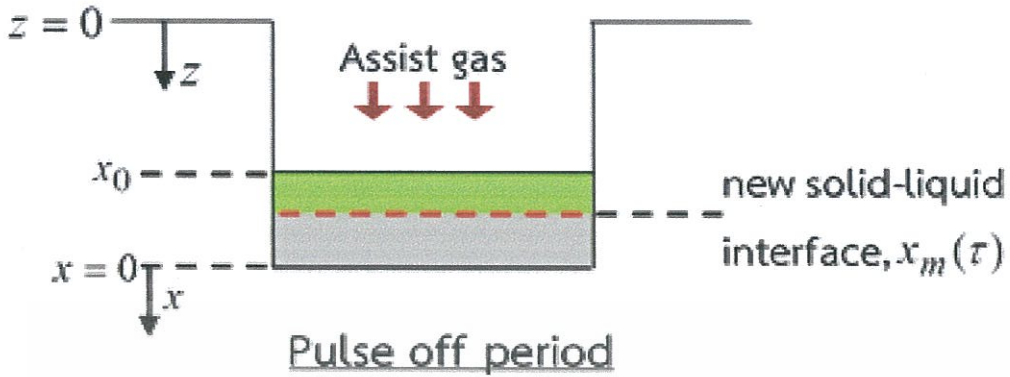
เมื่อ c_{ps} คือ ความร้อนจำเพาะของโลหะที่เป็นของแข็ง ($J/kg \cdot K$)

และเมื่อแก้สมการที่ (11), (14) จะทำให้ทราบถึงตำแหน่งความลึกของรูเจาะ (z_m, z_v) ในช่วง pulse on ได้นั่นเอง

3.3.2 ช่วงพักระหว่างพัลส์ (pulse off period during drilling stage)

ส่วนในช่วง pulse off ภายใต้แบบจำลองนี้จะพิจารณาว่าชั้นโลหะเหลวที่เกิดขึ้นในช่วง pulse on นั้นจะเกิดการเย็นตัวลงซึ่งทำให้บริเวณรอยต่อระหว่างของแข็งและของเหลวเกิดการแข็งตัวย้อนกลับขึ้นมาจากรอยต่อของส่วนที่เป็นของแข็งและของเหลว ($z_m(t)$) เกิดเป็นชั้นของแข็งใหม่หรือรอยต่อระหว่างของแข็ง-ของเหลวใหม่ (new solid-liquid interface, $x_m(\tau)$) นั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และเพื่อหาตำแหน่งของรอยต่อระหว่างของแข็ง-ของเหลวใหม่ ($x_m(\tau)$) ที่เกิดขึ้นในช่วง pulse off นี้ จำเป็นจะต้องพิจารณาสมการการอนุรักษ์พลังงานที่บริเวณรอยต่อระหว่างของแข็ง-ของเหลวใหม่ ($x_m(\tau)$) ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 Schematic diagram ของแบบจำลองช่วง pulse off

เงื่อนไขเริ่มต้น;

$$T_l(x_0, \tau) = T_{l0,off}(\tau) \quad (17)$$

$$T_l(x_m(\tau), \tau) = T_s(x_m(\tau), \tau) = T_m \quad (18)$$

$$T_s(\infty, \tau) = T_0 \quad (19)$$

$$x_m(0) = 0 \quad (20)$$

เงื่อนไขขอบเขต;

$$-k_l \frac{\partial T_l(x, \tau)}{\partial x} + k_s \frac{\partial T_s(x, \tau)}{\partial x} = \rho_s L_m \frac{dx_m(\tau)}{d\tau} \quad (21)$$

เมื่อ x คือ ระยะตามแนวแกนในการวิเคราะห์ช่วง pulse off

τ คือ เวลาในช่วง pulse off ; $0 \leq \tau \leq t_{off}$

โดยที่ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ (temperature profile) ในของแข็งและของเหลว อาจจะถูกสมมุติในรูปแบบดังต่อไปนี้ เพื่อให้สัมพันธ์กับเงื่อนไขขอบเขตข้างต้น

$$T_l(x, \tau) = T_{l0,off}(\tau) - B_1 \operatorname{erf} \left(\frac{x - x_0}{2\sqrt{\alpha_l \tau}} \right) \quad (22)$$

$$T_s(x, \tau) = T_0 + B_2 \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_s \tau}} \right) \quad (23)$$

โดยที่ $T_{l0,off}$ คือ อุณหภูมิผิวของโลหะเหลวในช่วงพักระหว่างพัลส์ (K) ซึ่งหาได้จาก [21] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{I0,off}(\tau) = T_{I0,on} + (T_g - T_{I0,on}) \left[1 - \left[\exp\left(\frac{\tau \alpha_l h_g^2}{k_l^2}\right) \times \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{h_g \sqrt{\tau \alpha_l}}{k_l}\right) \right] \right] \right] \quad (24)$$

เมื่อ α_l คือ การแพร่ความร้อนของโลหะที่เป็นของเหลว (m^2)

และเพื่อหาคำตอบของรอยต่อระหว่างของแข็ง-ของเหลวใหม่ ($x_m(\tau)$) ของช่วง pulse off ในรูปแบบข้างต้น สมการที่ใช้หาคำตอบต้องอยู่ในรูปดังต่อไปนี้ [22];

$$x_m(\tau) = \xi \sqrt{4\tau \sqrt{\alpha_l \alpha_s}} \quad (25)$$

โดยเมื่อ $x = x_m(\tau)$ ในสมการ (22), (23) จะสามารถจัด B_1, B_2 ได้ในรูปดังต่อไปนี้

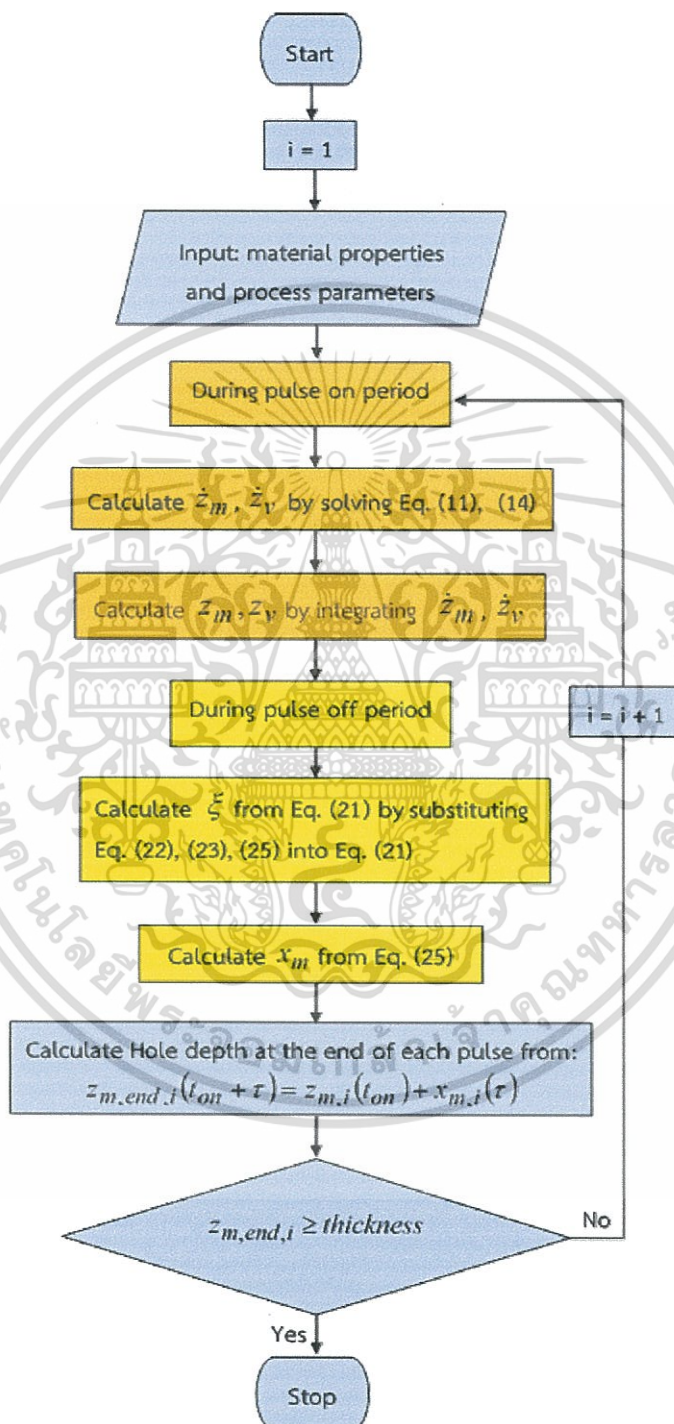
$$B_1 = \frac{T_{I0,off}(\tau) - T_m}{\operatorname{erf}\left[\frac{-x_0 + 2\xi \sqrt{\tau \sqrt{\alpha_l \alpha_s}}}{2\sqrt{\alpha_l \tau}}\right]} \quad (26)$$

$$B_2 = \frac{T_m - T_0}{\operatorname{erfc}\left[\left(\frac{\alpha_l}{\alpha_s}\right)^{\frac{1}{4}} \xi\right]} \quad (27)$$

จากสมการข้างต้นเราสามารถหาค่า ξ ซึ่งเป็นค่าคงที่ ที่ต้องใช้ในการหาคำตอบในสมการ (25) ได้โดยการแทนสมการที่ (26) ลงใน (22) และแทน (27) ลงใน (23) จากนั้นแทนสมการ (22), (23), (25) ลงในสมการเงื่อนไขขอบเขตที่ (21) เพื่อหาค่า ξ แล้วจากนั้นให้นำค่า ξ ที่แก้ได้ไปใช้แทนลงในสมการที่ (25) เพื่อหาคำตอบของรอยต่อระหว่างของแข็ง-ของเหลวใหม่ ($x_m(\tau)$) ที่เกิดขึ้นในช่วง pulse off นั้นเอง

3.4 ขั้นตอนการคำนวณแบบจำลอง

เราสามารถหาตำแหน่งความลึกของรูเจาะหลังจากพัลส์การเจาะใดๆ ได้โดยขั้นตอนตามที่แสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงขั้นตอนการหาตำแหน่งความลึกของรูเจาะหลังจากพัลส์การเจาะใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางความร้อนของเหล็กกล้าอะลูมิเนียม [23]

คุณสมบัติทางความร้อนของเหล็กกล้าอะลูมิเนียม	
ค่าความหนาแน่นของโลหะที่เป็นของแข็ง, ρ_s (kg/m^3)	7800
ค่าความหนาแน่นของโลหะที่เป็นของเหลว, ρ_l (kg/m^3)	6980
ค่าความร้อนจำเพาะของโลหะ, c_{ps} ($J/kg \cdot K$)	628
ค่าการนำความร้อนของโลหะที่เป็นของแข็ง, k_s ($W/m \cdot K$)	68.5776
ค่าการนำความร้อนของโลหะที่เป็นของเหลว, k_l ($W/m \cdot K$)	36.5473
ค่าการแพร่ความร้อนในโลหะที่เป็นของแข็ง, α_s (m^2/s)	0.014×10^{-3}
ค่าการแพร่ความร้อนของโลหะที่เป็นของเหลว, α_l (m^2/s)	0.007×10^{-3}
อุณหภูมิเริ่มต้นของโลหะ, T_0 (K)	300
อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะ, T_m (K)	1808
อุณหภูมิจุดเดือดของโลหะ, T_{vap} (K)	3100
ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว, L_m (kJ/kg)	276
ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ, L_v (kJ/kg)	6088

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางความร้อนของแก๊สออกซิเจน (O_2) ที่ถูกใช้เป็นตัวช่วย [24-26]

คุณสมบัติทางความร้อนของแก๊สออกซิเจน (O_2)	
ค่าความหนาแน่นของแก๊สช่วย, ρ_g (kg/m^3)	1.3007
ค่าการนำความร้อนของแก๊สช่วย, k_g ($W/m \cdot K$)	0.0259
ค่าความหนืดของแก๊สช่วย, μ_g ($N \cdot s/m^2$)	2.01×10^{-5}
ความเร็วการไหลของแก๊สช่วย, v_g (m/s)	377
อุณหภูมิของแก๊สช่วย, T_g (K)	300
Prandtl number, Pr	0.73

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรทางกระบวนการ

ตัวแปรทางกระบวนการ	
Pulse width, t_{on} (ms)	1, 1.5, 2
Pulse frequency, f (Hz)	50, 100, 200
Laser peak power, P_{peak} (kW)	3, 4, 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

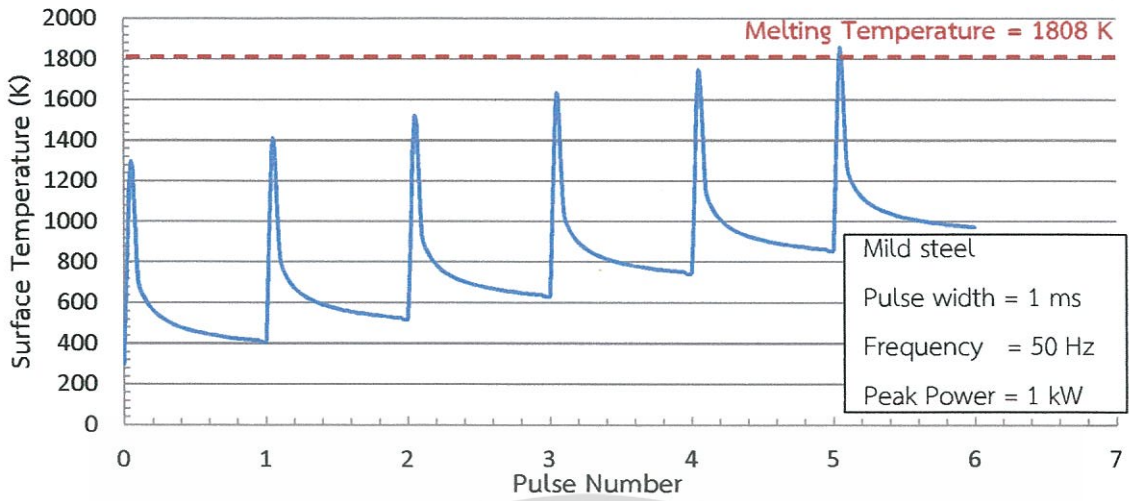
บทที่ 4

ผลจากแบบจำลองและวิเคราะห์ข้อมูล

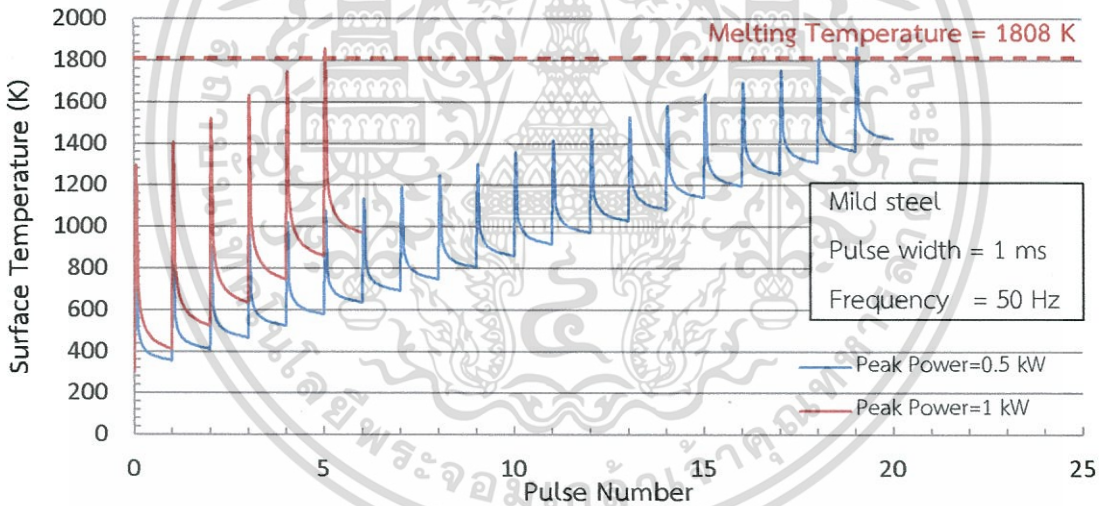
ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการเจาะโลหะด้วย เลเซอร์แบบหลายพัลส์ โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนั้น สามารถศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และความลึกของรูเจาะได้ ทั้งในช่วงการให้ความร้อนและช่วงพัก ระหว่างพัลส์ ซึ่งแบบจำลองประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ แบบจำลองในช่วงให้ความร้อนแก่โลหะแข็ง หรือช่วงก่อนที่ผิวชิ้นงานจะเกิดการหลอมเหลว ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของชิ้นงานก่อนที่จะเกิดการหลอมเหลว และแบบจำลองในช่วงการเจาะโลหะหรือช่วงหลังจากที่ผิวชิ้นงานเกิดการหลอมเหลว ซึ่งจะถูกใช้เพื่อศึกษาถึงความลึกของรูเจาะที่เกิดขึ้น

4.1 ผลจากแบบจำลองในช่วงให้ความร้อนแก่โลหะแข็ง (Solid heating stage before melting)

กำหนดความถี่ของลำแสงเลเซอร์ 50 Hz กำลังสูงสุดที่ 1 kW โดยมีช่วง pulse on 1 ms และ pulse off 19 ms เมื่อให้เลเซอร์พัลส์แรก อุณหภูมิพื้นผิวของวัสดุเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง pulse on ด้วยการนำความร้อน จากนั้นเมื่อเข้าสู่ช่วง pulse off อุณหภูมิผิววัสดุลดลงเนื่องจากไม่ได้รับความร้อนรวมทั้งมีการพาความร้อนจากแก๊สช่วยแต่อุณหภูมิยังคงมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิเริ่มต้น เมื่อเข้าสู่ช่วง pulse on ครั้งที่สอง อุณหภูมิผิวหลังจากได้รับความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นสูงกว่าครั้งแรก เนื่องจากอุณหภูมิเริ่มต้นของพัลส์ที่สองมีค่าสูงกว่าในกว่าพัลส์แรก การให้ความร้อนดำเนินต่อไปสลับกับช่วง pulse off อย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งอุณหภูมิผิวเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของวัสดุ วัสดุเริ่มเกิดการหลอมละลายและเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว ดังแสดงในรูปที่ 4.1

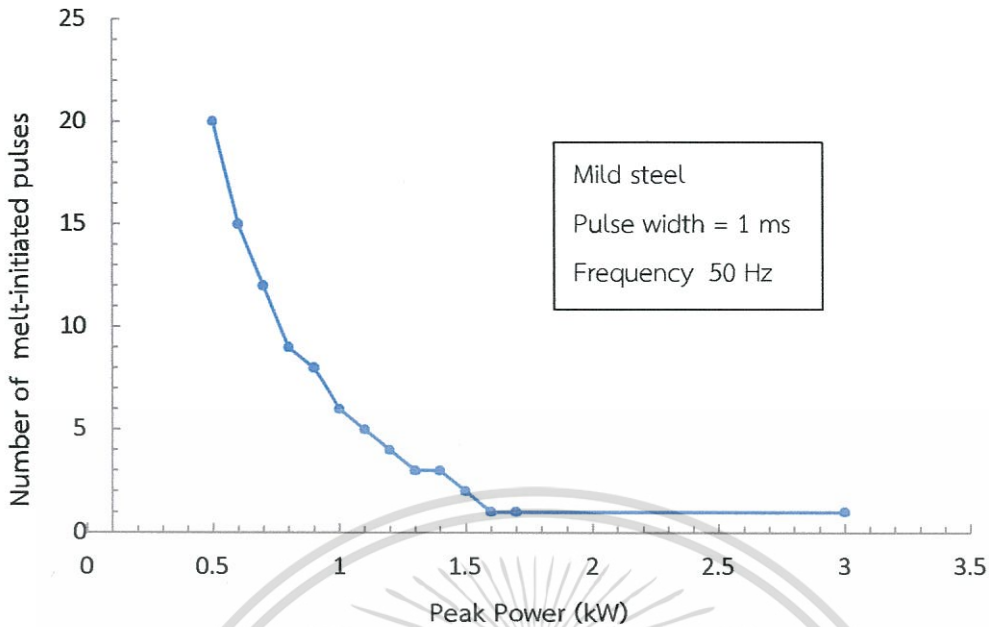


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวของรูเจาะก่อนเกิดการหลอมเหลวกับจำนวนพัลส์



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวของรูเจาะก่อนเกิดการหลอมเหลวกับเวลาที่กำลังสูงสุดของเลเซอร์ เท่ากับ 0.5 และ 1 kW

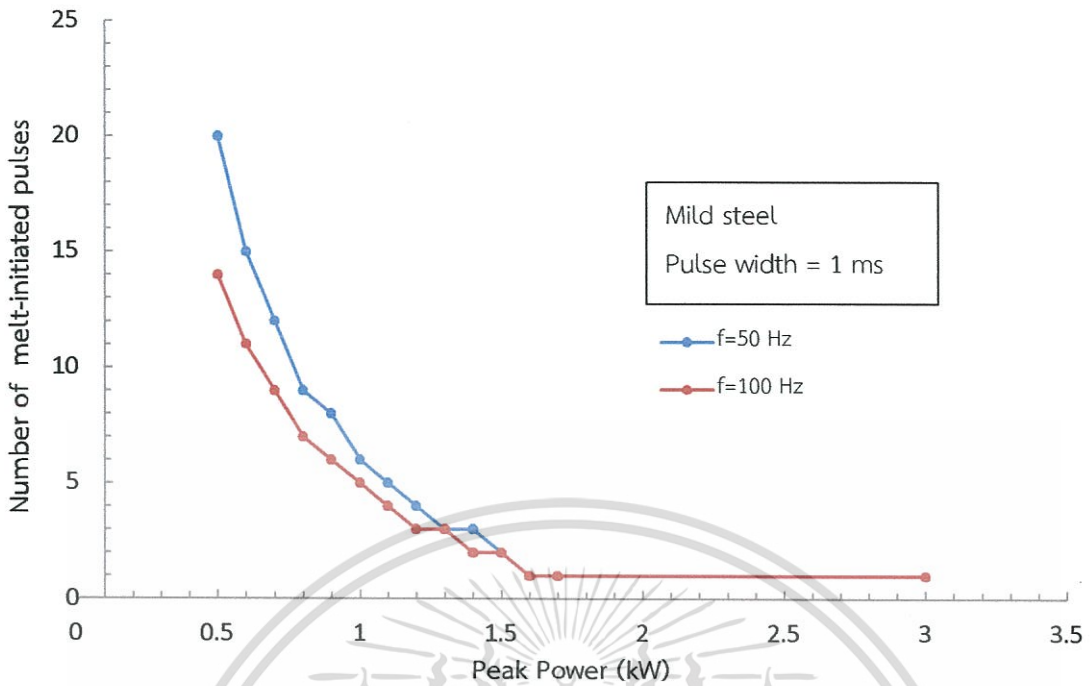
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



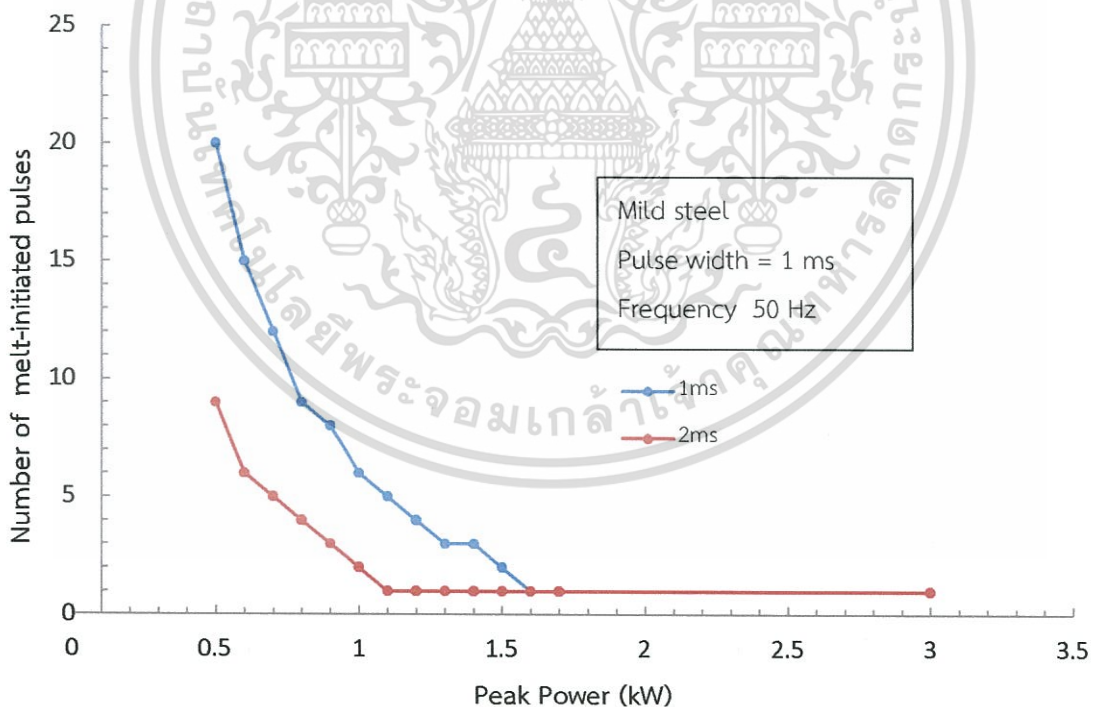
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัลส์ที่ทำให้เกิดการหลอมเหลวกับกำลังสูงสุดของเลเซอร์

จากรูปที่ 4.2 เปรียบเทียบจำนวนพัลส์ที่ต้องใช้เพื่อทำให้เหล็กกล้าอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นถึงจุดหลอมเหลว กำลังสูงสุดของพัลส์ที่พิจารณาคือ 0.5 kW และ 1 kW ผลที่ได้เมื่อพัลส์มีค่า 1 kW จะใช้จำนวนพัลส์น้อยกว่า กรณีที่ใช้พัลส์ซึ่งมีค่า 0.5 kW เนื่องจากเมื่อค่ากำลังสูงสุดเพิ่มขึ้น ชิ้นงานจะดูดซับพลังงานจากลำแสงเลเซอร์ได้มากขึ้น และเมื่อศึกษาผลของค่ากำลังสูงสุดของเลเซอร์ที่ค่าอื่นๆ สามารถสรุปได้ว่าจำนวนพัลส์ลดลงอย่างรวดเร็วและมีค่าเข้าใกล้ 1 เมื่อค่ากำลังสูงสุดของเลเซอร์มีค่ามาก แสดงว่าในการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ที่มีค่ากำลังสูงสุดของลำแสงเลเซอร์มากสามารถใช้เพียงพัลส์เดียว อุณหภูมิก็ถึงจุดหลอมเหลวของโลหะได้ ดังรูปที่ 4.3

และเมื่อพิจารณาที่ความถี่ของลำแสงเลเซอร์ เช่น ที่ 50 Hz และ 100 Hz ถ้าความถี่ของลำแสงเลเซอร์เพิ่มขึ้น ช่วงเวลาทั้งหมดของแต่ละพัลส์จะลดลง และเนื่องจากกำหนดให้ระยะเวลาของช่วง pulse on เท่าเดิม ความถี่จึงส่งผลให้ระยะเวลาในช่วง pulse off ลดลง เมื่อช่วง pulse off มีค่าลดลง อุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานจะลดลงไม่มาก เมื่อเทียบกับการเจาะที่ใช้ความถี่ต่ำกว่า ดังนั้น เมื่อความถี่ของลำแสงเลเซอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิผิวในแต่ละพัลส์เพิ่มขึ้นมากกว่าและเข้าสู่จุดหลอมเหลวได้เร็วกว่าหรือใช้จำนวนพัลส์ที่จะทำให้อุณหภูมิผิวเพิ่มขึ้นถึงจุดหลอมเหลวน้อยกว่านั่นเอง ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัลส์ที่ทำให้เกิดการหลอมเหลวกับกำลังสูงสุดของเลเซอร์ที่ความถี่เท่ากับ 50 และ 100 Hz



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัลส์ที่ทำให้เกิดการหลอมเหลวกับกำลังสูงสุดของเลเซอร์ที่ช่วง pulse on เท่ากับ 1ms และ 2ms

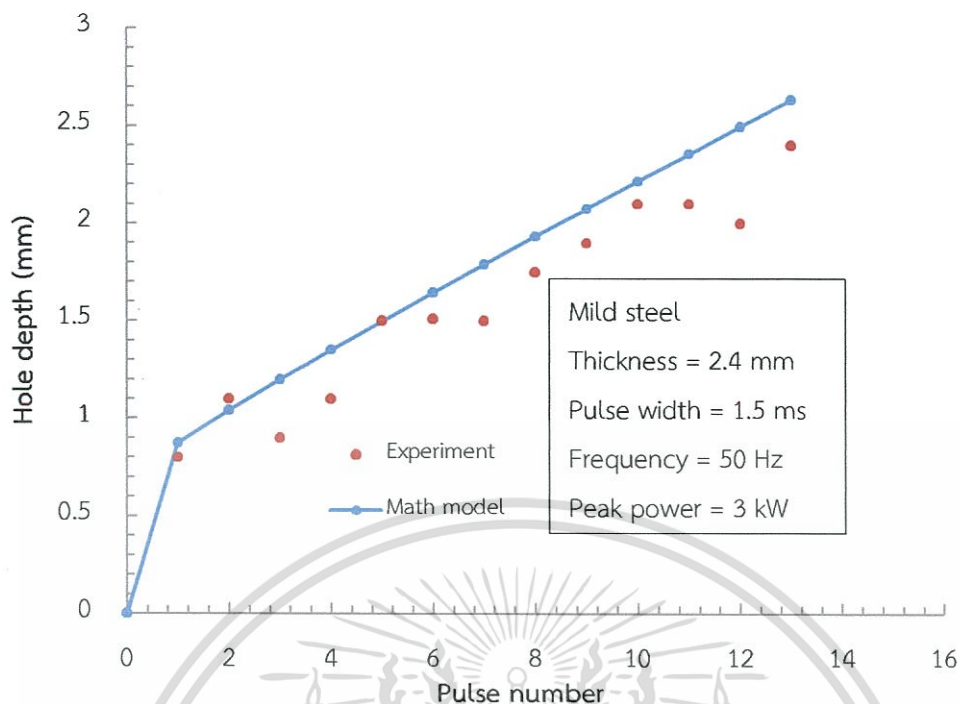
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากรูปที่ 4.5 แสดงผลของความกว้างของช่วง pulse on (pulse width) ที่มีต่อการเจาะ โดยเมื่อพิจารณาที่ pulse width 1 ms และ 2 ms จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาของช่วง pulse on ขึ้นงานจะได้รับพลังงานจากเลเซอร์ได้มากขึ้น ส่งผลให้การเพิ่มของอุณหภูมิในแต่ละพัลส์ จะเพิ่มขึ้นและเข้าสู่จุดหลอมเหลวได้เร็วขึ้น หรือเมื่อ pulse width เพิ่มขึ้นจะทำให้จำนวนพัลส์ที่ใช้ในการหลอมเหลวมวลชิ้นงานลดลง

4.2 ผลจากแบบจำลองช่วงการเจาะโลหะ (Drilling stage after melting)

หลังจากศึกษาผลของตัวแปรต่างๆในช่วงของการให้ความร้อนก่อนเกิดการหลอมเหลว ทั้งหมดดังที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว เราได้ทำการศึกษาในช่วงถัดไปตั้งแต่ชิ้นงานเริ่มเกิดการหลอมเหลว และกลายเป็นไอ จนกระทั่งเกิดเป็นรูเจาะตามความลึกที่ต้องการ เมื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ช่วงหลังเกิดการหลอมเหลวตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ จากผลการศึกษาพบว่าในช่วงให้ความร้อน โลหะเหลวจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการหลอมเหลวและระเหย กลายเป็นรูเจาะ ส่วนในช่วงพักระหว่างพัลส์ โดยสมมติฐานจากแบบจำลอง เราพิจารณาว่าชั้นของเหลวที่เกิดขึ้นจะเกิดการเย็นตัวลงซึ่งทำให้บริเวณรอยต่อระหว่างของแข็งและของเหลวเกิดการแข็งตัวย้อนกลับขึ้นมา แต่อย่างไรก็ตาม ผลจากแบบจำลองพบว่า ชั้นของเหลวที่เกิดขึ้นสามารถทำให้ชั้นโลหะแข็งที่อยู่ติดกันหลอมเหลวต่อไปได้ หรือทำให้บริเวณรอยต่อระหว่างของแข็งและของเหลวเกิดการเคลื่อนที่ต่อไปนั่นเอง ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจาก การที่อัตราการนำความร้อนจากชั้นโลหะเหลวไปสู่ชั้นโลหะของแข็งที่อยู่ติดกันมากกว่าอัตราการเย็นตัวลงของชั้นโลหะเหลว แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่อัตราการเย็นตัวลงของชั้นโลหะเหลวนี้นั้นมากกว่าอัตราการนำความร้อนจากชั้นโลหะเหลว ก็จะทำให้รอยต่อระหว่างของแข็งและของเหลวเกิดการแข็งตัวย้อนกลับขึ้นมา

จากนั้นนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวมาตรวจสอบความถูกต้อง โดยทำการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลการทดลองจริงที่เคยมีผู้ศึกษาไว้ก่อนหน้านี้ [28] ดังแสดงในรูปที่ 4.6 เมื่อเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นกับผลการทดลองจริงแล้ว พบว่าแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อน 13.1% เปอร์เซนต์ ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลมาจากสมมติฐานในแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อทำให้การวิเคราะห์กระบวนการเจาะเข้าใจง่ายขึ้น และเพื่อให้แบบจำลองพัฒนาได้ง่ายขึ้นนั่นเอง แต่ในกระบวนการเจาะที่เกิดขึ้นจริงอาจมีผลจากตัวแปรอื่นๆ เช่น พลาสมา คลื่นกระแทก และการสะท้อนกลับป้อนกลับของลำแสงเลเซอร์ที่ผนังของรูเจาะ เป็นต้น อีกทั้งผลการทดลองจริงที่นำมาเปรียบเทียบอาจมีความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างทำการทดลอง

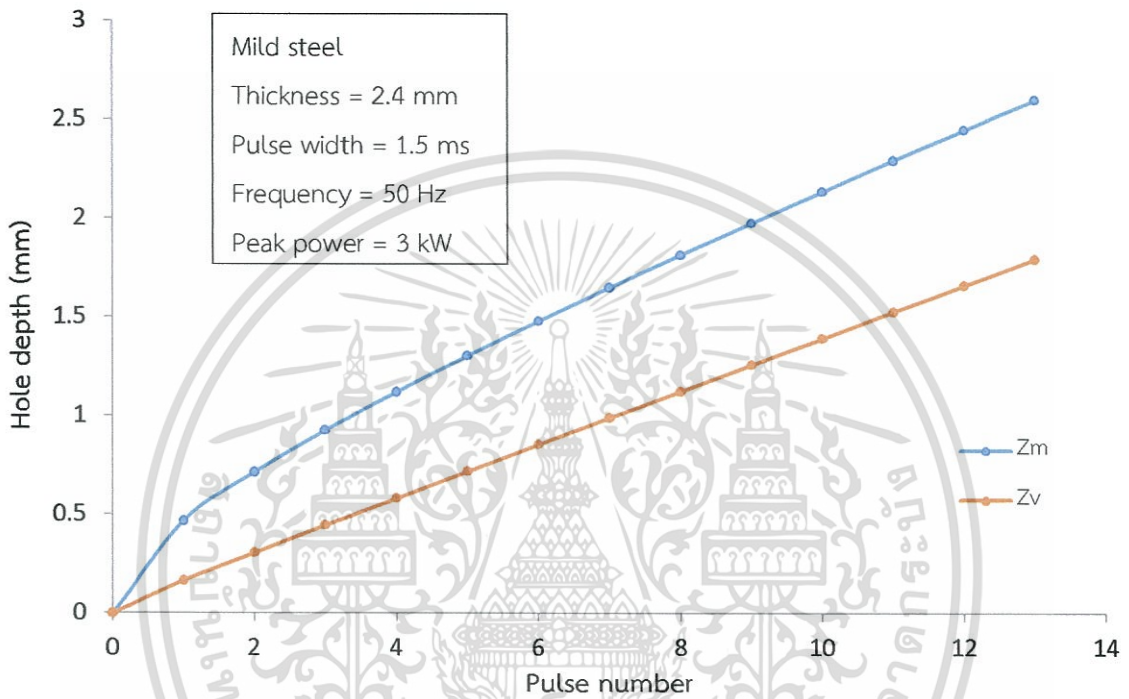


รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบความลึกของรูเจาะที่จุดสิ้นสุดในแต่ละพัลส์ระหว่างผลจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นและผลจากการทดลองจริง

จากกราฟในช่วงแรกความเร็วในการเจาะสูงมาก เนื่องจากชิ้นงานได้รับพลังงานจากลำแสงเลเซอร์อย่างเต็มที่วัสดุจะเริ่มหลอมละลายอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และเมื่อเข้าสู่ช่วง pulse off จะหยุดรับพลังงานจากลำแสงเลเซอร์ ชิ้นโลหะหลอมเหลวด้านบนจะถ่ายเทความร้อนออกไปหรือถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ชิ้นโลหะแข็ง ก่อให้เกิดชั้นระหว่างของแข็งและของเหลวใหม่ เมื่อให้ความร้อนในพัลส์ถัดไปความลึกของรูเจาะก็จะเพิ่มขึ้น แต่เพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง อันเป็นผลมาจากการถ่ายเทความร้อนของชิ้นโลหะเหลวในช่วง pulse off ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปอัตราเร็วในการเจาะจะลดลงเรื่อยๆ

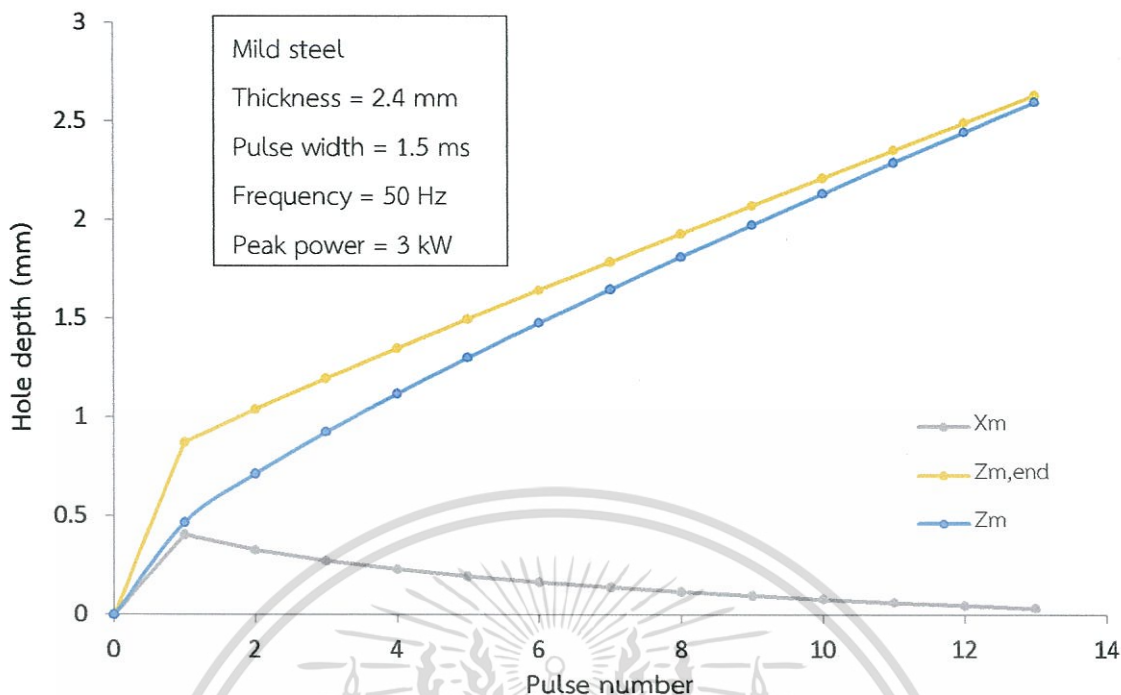
จากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชิ้นโลหะเหลวที่เกิดขึ้นในช่วง pulse on นั่นคือผลต่างระหว่างชิ้นโลหะแข็งและโลหะเหลว และการเปลี่ยนแปลงชั้นของเหลวในช่วง pulse off หรือชั้น x_m ที่เกิดขึ้น จากกราฟพบว่าเมื่อจำนวนพัลส์เพิ่มขึ้น ชิ้นงานจะได้รับความร้อนสะสมเพิ่มขึ้นทำให้เกิดชิ้นโลหะเหลวหนาขึ้น และขณะเดียวกันในช่วง pulse off ชิ้นโลหะเหลวจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาหรือเกิดชั้น x_m ขึ้นนั่นเอง โดยหากความหนาของชิ้นโลหะเหลวในช่วง pulse on มีค่าน้อย ความร้อนจากผิวโลหะเหลวจะถูกถ่ายเทเข้าสู่ชิ้นโลหะแข็งที่อยู่ติดกันได้มาก ก่อให้เกิดการหลอมเหลวต่อไปได้มาก โดยค่า x_m จะมีค่าเป็นบวก และเมื่อความหนาของชิ้นโลหะเหลวเพิ่มขึ้น ความร้อนจากผิวโลหะเหลวจะถูกถ่ายเทผ่านชิ้นโลหะเหลวนี้อีกก่อน ให้ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ชิ้นโลหะแข็งที่อยู่ติดกันนั้นเหลือน้อยลง ดังนั้นชิ้นโลหะแข็งจะเกิดการหลอมเหลวในอัตราที่ลดลงหรือหลอมเหลวได้น้อยลง และเมื่อถึงจุดที่ความหนาของชิ้นโลหะเหลวมากพอที่จะทำให้เกิดการ

ร้อนจากผิวโลหะเหลวมีไม่เพียงพอที่จะหลอมเหลวชั้นโลหะแข็งที่อยู่ติดกันต่อไปได้นั้น ที่จุดนั้น อุณหภูมิของรอยต่อจะลดลงและจะทำให้เกิดการแข็งตัวย้อนกลับขึ้นมา ซึ่งค่า x_m ที่ได้จะเป็นค่าติดลบ โดยรูปที่ 4.8 แสดงถึงตำแหน่งความลึกของรูเจาะในแต่ละพัลส์ซึ่งเกิดจากผลรวมของความลึกของชั้นโลหะเหลวที่เกิดขึ้นในช่วง pulse on กับชั้น x_m ที่เกิดขึ้นในช่วง pulse off



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นของเหลวและชั้นของเหลวที่เปลี่ยนไปในช่วง pulse off

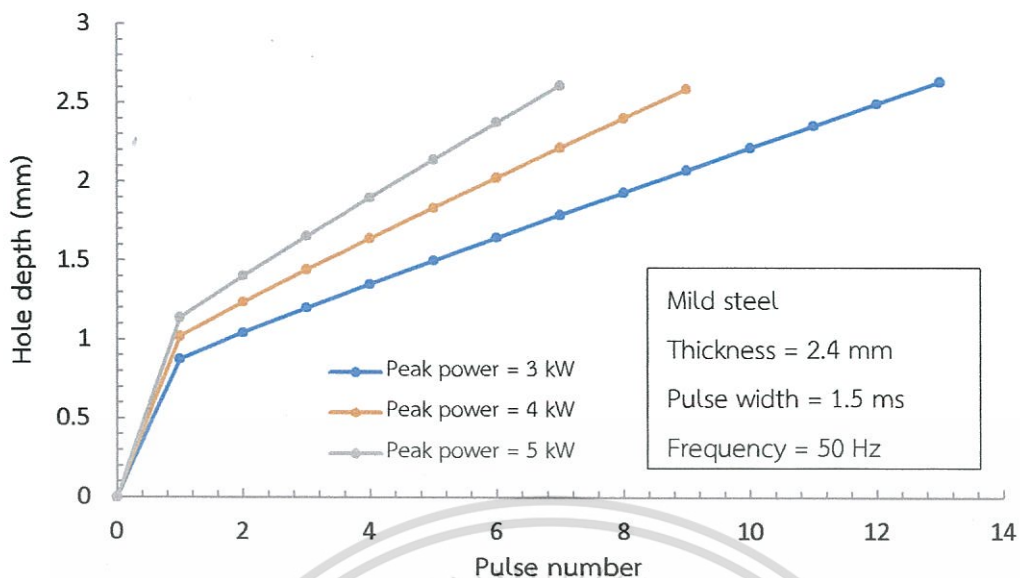
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความลึกของรูเจาะที่เกิดขึ้นในช่วง pulse on, pulse off และที่จุดสิ้นสุด pulse

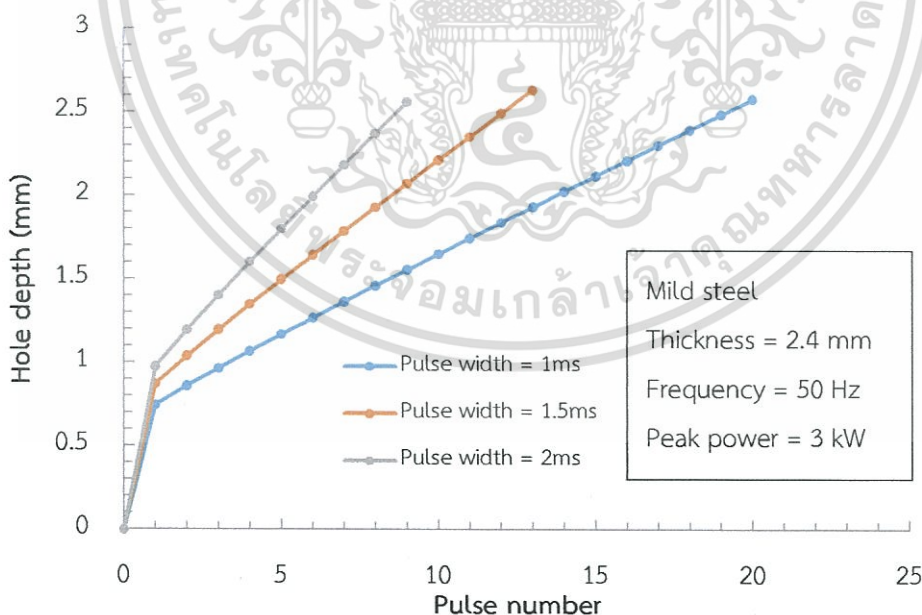
หลังจากได้ทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้ว จึงได้ทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความลึกของรูเจาะต่อไป ดังนี้

เมื่อเพิ่มค่ากำลังสูงสุดของเลเซอร์ ส่งผลให้ชิ้นงานได้รับพลังงานความร้อนจากเลเซอร์มากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงจุดหลอมเหลวและกลายเป็นไอได้เร็วยิ่งขึ้น จึงสามารถเจาะชิ้นงานตามความลึกที่ต้องการโดยใช้จำนวนพัลส์น้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ที่กำลังสูงสุด 3 kW ต้องใช้จำนวนพัลส์ทั้งหมด 12 พัลส์เพื่อที่จะเจาะชิ้นงานให้ทะลุได้ แต่เมื่อเพิ่มกำลังสูงสุดเป็น 4 kW จะใช้แค่เพียง 8 พัลส์เท่านั้น และที่ 5 kW จะใช้แค่เพียง 6 พัลส์เท่านั้น



รูปที่ 4.9 ผลของกำลังสูงสุดของเลเซอร์ที่มีต่อความลึกของรูเจาะ

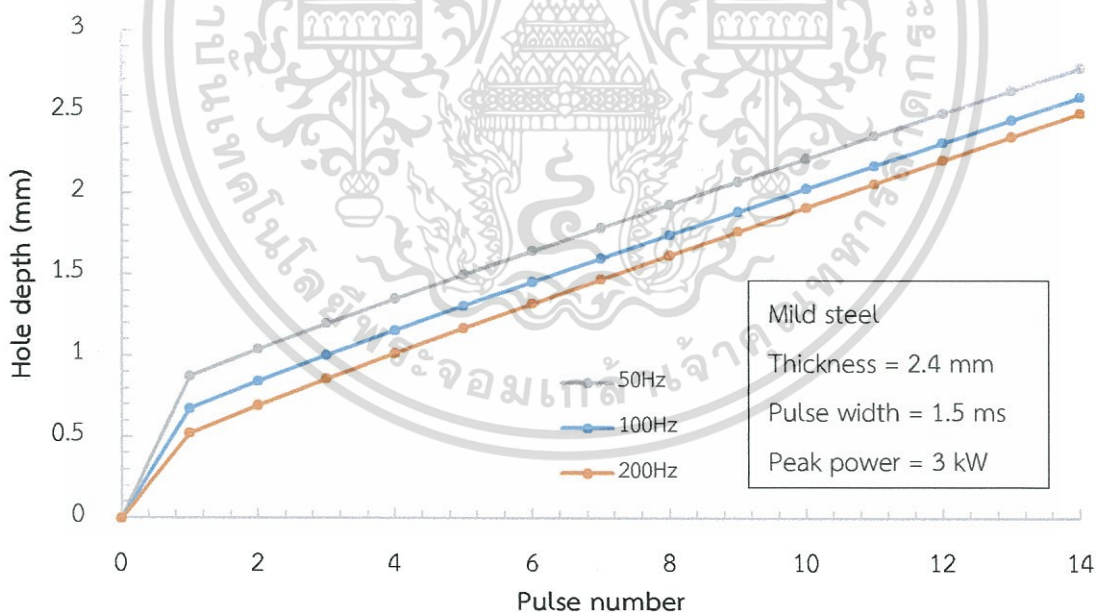
เมื่อเพิ่มความกว้างของพัลส์เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อกระบวนการเจาะ พบว่าเมื่อความกว้างของพัลส์เพิ่มขึ้น เลเซอร์จะให้ความร้อนแก่ชิ้นงานได้นานขึ้นเกิดการหลอมเหลวและกลายเป็นไอมากขึ้น ทำให้รูเจาะมีความลึกเพิ่มขึ้น และจำนวนพัลส์ที่ใช้ในการเจาะทะลุนั้นลดลง โดยที่ 1 ms, 2 ms และ 3 ms มีจำนวนพัลส์ที่ใช้ในการเจาะทะลุคือ 18, 11 และ 8 พัลส์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ผลของความกว้างของพัลส์ในช่วงให้ความร้อนต่อความลึกของรูเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากความถี่ของการให้แสงเลเซอร์ต่อความลึกของรูเจาะได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.11 ความถี่ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการเพิ่มขึ้นของความลึกของรูเจาะในช่วง pulse off ลดลง เนื่องจากความกว้างช่วง pulse off มีค่าน้อยลง ทำให้ชั้นโลหะเหลวที่อยู่ภายในรูเจาะถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ชั้นของแข็งที่อยู่ติดกันได้น้อยลงด้วย ดังนั้นเมื่อเพิ่มความถี่ อัตราการเจาะจะลดลง เช่น ที่ความถี่ 50 Hz ใช้จำนวนพัลส์ 12 พัลส์ในการเจาะชิ้นงานหนา 2.4 มิลลิเมตรให้ทะลุ แต่เมื่อเจาะด้วยความถี่ 100 Hz จำนวนพัลส์ที่ใช้ในการเจาะทะลุจะเพิ่มขึ้นเป็น 13 พัลส์ และที่ความถี่ 200 Hz จำนวนพัลส์ที่ใช้ในการเจาะทะลุจะเพิ่มขึ้นเป็น 14 พัลส์ อย่างไรก็ตาม จากกราฟผลของกำลังสูงสุด ผลของความกว้างพัลส์ และผลของความถี่ พบว่ากำลังสูงสุดและความกว้างพัลส์จะมีอิทธิพลต่อการเจาะในช่วง pulse on เป็นหลัก โดยเมื่อกำลังสูงสุดและความกว้างพัลส์เพิ่มขึ้น ชิ้นงานจะได้รับพลังงานมากขึ้นจึงทำให้อัตราการเจาะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่ในทางกลับกันเนื่องจากความถี่นั้นส่งผลเฉพาะต่อระยะเวลาในช่วง pulse off ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนออกจากโลหะเหลวภายในรูเจาะ โดยถึงแม้ว่าความถี่จะเพิ่มขึ้น แต่ชิ้นงานก็ยังได้รับพลังงานมาจากช่วง pulse on เท่าเดิม ทำให้ความถี่มีผลต่ออัตราการเจาะน้อยมากซึ่งสอดคล้องกับกราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นขนานกัน ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ผลของความถี่ของพัลส์ต่อความลึกของรูเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เราได้ทำการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยรวมช่วงพักระหว่างพัลส์ (pulse off period) เข้าในการพิจารณาด้วย เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและความสามารถในการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์แบบหลายพัลส์ (percussion laser drilling) โดยเราได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างการให้ความร้อนกับชิ้นงานที่เป็นของแข็ง (solid heating stage before melting) และทำนายความลึกของรูเจาะที่เกิดขึ้นในช่วงของการเจาะ (drilling stage after melting) ให้มีความแม่นยำเมื่อเทียบกับผลการทดลองจริง

โดยสำหรับการให้ความร้อนกับชิ้นงานที่เป็นของแข็ง คือในช่วงก่อนที่ชิ้นงานจะเกิดการหลอมเหลวนั้น ซึ่งพบว่าผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ผิวของโลหะ (T_s) นั้น สรุปได้ดังต่อไปนี้

1. กำลังสูงสุด (peak power) ของพัลส์เลเซอร์ เมื่อกำลังสูงสุดของพัลส์เพิ่มขึ้นทำให้พลังงานความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานมากขึ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้ชิ้นงานถึงจุดหลอมเหลวนั้นจึงลดลง
2. ความกว้างของช่วงพัลส์ (pulse width) เห็นได้ว่าการเพิ่มความกว้างของพัลส์ ทำให้พลังงานความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานมากขึ้นในแต่ละพัลส์ ส่งผลให้อุณหภูมิสูงถึงจุดหลอมเหลวได้เร็วขึ้น
3. ความถี่ของพัลส์ ส่งผลต่อระยะเวลาของ pulse off ในแต่ละช่วง ดังนั้น เมื่อเพิ่มความถี่จะใช้เวลาเพื่อเพิ่มอุณหภูมิถึงจุดหลอมเหลวน้อยลง

ส่วนในช่วงของการเจาะซึ่งเกิดขึ้นหลังจากที่ชิ้นงานเริ่มหลอมเหลวนั้น ผลที่ได้พบว่าสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาแล้วมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 13.1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงที่มีผู้ศึกษาไว้ก่อนหน้านี้
2. กำลังสูงสุดของพัลส์เลเซอร์ที่มีค่ามากขึ้นส่งผลให้รูเจาะมีความลึกมากขึ้นตามลำดับ และจำนวนพัลส์ที่ใช้ในการเจาะโลหะให้ได้ความลึกตามกำหนดจะมีค่าลดลง เนื่องจากพลังงานความร้อนที่เลเซอร์ส่งมายังชิ้นงานมีค่ามากขึ้น
3. ความกว้างของพัลส์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความลึกของรูเจาะเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากเมื่อแสงเลเซอร์ตกกระทบชิ้นงานนานขึ้น ก็จะทำให้มีพลังงานจากแสงเลเซอร์ตกกระทบชิ้นงานมากขึ้น

4. ความถี่ของการให้แสงเลเซอร์มีผลต่อกระบวนการเจาะเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อเทียบกับผลของกำลังสูงสุดและความกว้างของพัลส์ โดยเมื่อความถี่มีค่ามากขึ้น ในช่วงพักระหว่างพัลส์ ชั้นโลหะเหลวจะถ่ายเทความร้อนสู่ชั้นโลหะแข็งได้น้อยลง ส่งผลให้เจาะได้ช้าลง

5.2 วิจารณ์ผลจากแบบจำลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้พัฒนาขึ้นโดยใช้วิธีเชิงวิเคราะห์แบบ 1 มิติ (1D analytical method) เพื่อทำนายความลึกของรูเจาะ และศึกษาผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อกระบวนการเจาะ ผลจากแบบจำลองพบว่าแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อน 13.1% เมื่อเทียบกับผลการทดลองจริง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสมมติฐานของแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อให้การวิเคราะห์กระบวนการเจาะง่ายขึ้นและนอกจากนี้ยังมีผลของตัวแปรอื่นๆที่ไม่ได้นำมาคิดรวมในแบบจำลอง อาทิเช่น ผลของพลาสมาต่อการดูดซับพลังงานจากเลเซอร์ และผลของการสะท้อนกลับไปมาของลำแสงเลเซอร์ที่ผนังของรูเจาะ เป็นต้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อให้ผลของการทำนายความลึกของรูเจาะมีความแม่นยำมากขึ้นนั้น กลไกอื่นๆที่อาจจะเกี่ยวข้องในกระบวนการเจาะโลหะด้วยเลเซอร์ควรจะถูกนำมาพิจารณาในแบบจำลองด้วยดังนี้

1. พิจารณาผลของพลาสมาต่อการดูดซับพลังงานจากเลเซอร์
2. พิจารณาผลของการสะท้อนกลับไปมาของลำแสงเลเซอร์ที่ผนังของรูเจาะ

นอกจากนี้แบบจำลองนี้ได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองเพียง 1 ตัวอย่างเท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้แบบจำลองมีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้นควรเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลการทดลองจริงที่มีหลากหลายเงื่อนไขมากขึ้น

ภาคผนวก

ในส่วนของภาคผนวกนี้ จะแสดงชุดคำสั่งและตัวตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้ในการแก้สมการในแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น โดยการใช้โปรแกรม Wolfram Mathematica 10.4

```
ClearAll;
```

```
(* At conditions 1.5ms/3000W/50Hz *)
```

```
ton = 1.5 * 10^-3;
```

```
Ppeak = 3000;
```

```
rb = 257 * 10^-6 ;
```

```
I0 = Ppeak / (π * rb^2) ;
```

```
As = 0.22;
```

```
Al = 1.05 * 0.22;
```

```
Iabs = Al I0;
```

```
αs = 0.014 * 10^-3;
```

```
αl = 0.007 * 10^-3;
```

```
ρs = 7800;
```

```
ρl = 6980;
```

```
cs = 628;
```

```
cl = 748;
```

```
ks = αs * ρs * cs;
```

```
kl = αl * ρl * cl;
```

```
Lm = 276 * 10^3;
```

```
Lv = 6088 * 10^3;
```

```
Hox = 4354403.587;
```

```
nox = 0.26;
```

```
Tm = 1808;
```

```
T0 = 300;
```

```
Tg = 300;
```

```
ceff = cs +  $\frac{Lm}{Tm}$ ;
```

```
Tl0on = Iabs *  $\sqrt{\frac{4 * ton}{\pi * \rho l * ceff * kl}}$ 
```

```
vg = 377 ;
```

```
ρg = 1.3007 ;
```

```
μg = 2.01 * 10^-5;
```

```
Reynolds = ρg * vg * 2 * rb / μg ;
```

```
kg = 0.0259;
```

```
Cc = 0.228 ;
```

```
nc = 0.73 ;
```

```
Pr = 0.73;
```

```
hg =  $\frac{kg}{2 * rb} * Cc * (Reynolds^nc) * (Pr^(1/3))$  ;
```

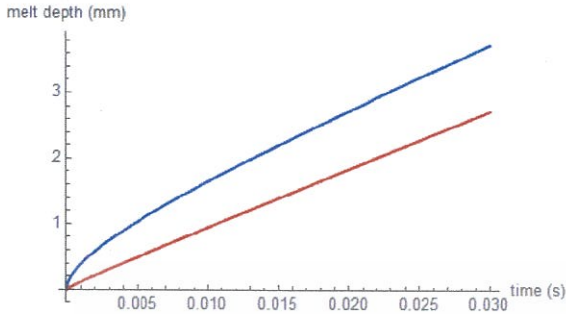
```
zenergybalance = Iabs + ρl * Hox * nox * vm + kl *  $\frac{Tm - Tl0on}{(vm - vv) * ton}$  - hg * (Tl0on - Tg) == ρl * Lv * vv ;
```

```
zenergybalance = -kl *  $\frac{Tm - Tl0on}{(vm - vv) * ton}$  + ks *  $\frac{T0 - Tm}{2 * \sqrt{\alpha s * ton}}$  == ρs * Lm * vm;
```

```
Solve[{zenergybalance, zenergybalance}, {vv, vm}]
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
zm[t_] := Integrate[vz2[t], t];
zv[t_] := Integrate[vv2[t], t];
Plot[{zm[t], zv[t]}, {t, 0, 0.030}, PlotStyle -> {Blue, Red}, AxesLabel -> {"time (s)", "melt depth (mm)"}]
```



$$ceff = cs + \frac{Lm}{Tm};$$

$$Tl0on = Iabs * \sqrt{\frac{4 * ton}{\pi * \rho l * ceff * kl}};$$

$$Tl0off = Tl0on + (Tg - Tl0on) \left[1 - \left(e^{-\frac{toff * a l^4 h g^2}{kl^2}} \right) * \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{hg * \sqrt{toff * al}}{kl} \right) \right) \right];$$

$$B1 = \frac{Tl0off - Tm}{\operatorname{erf} \left[\frac{(zm - zv) + (2 * \xi + \sqrt{toff * al * as})}{2 * \sqrt{al * toff}} \right]};$$

$$B2 = \frac{Tm - T0}{\operatorname{erfc} \left[\left(\frac{al}{as} \right)^{0.25} * \xi \right]};$$

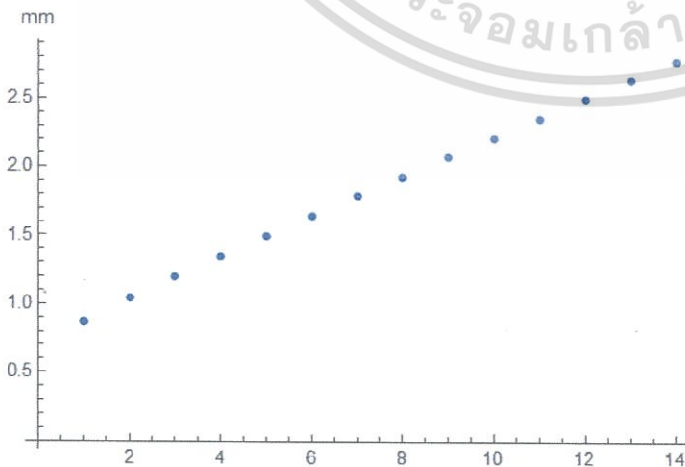
$$Tl = Tl0off - B1 * \operatorname{erf} \left(\frac{x - (zv - zm)}{2 * \sqrt{al * toff}} \right);$$

$$Ts = T0 + B2 * \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2 * \sqrt{as * toff}} \right);$$

$$xoff = \xi * \sqrt{4 * toff * al * as};$$

$$\operatorname{solve}[-(kl * D[Tl, x]) + (ks * D[Ts, x]) == \rho s + Lm * D[xoff, toff], \xi]$$

```
Plot[{zm * 1000 + xoff * 1000}, {1, 2, 3, ...}, "Millimeters", AxesLabel -> Automatic]
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

appendixb - Wolfram Mathematica 10.4
File Edit Insert Format Cell Graphics Evaluation Palettes Window Help
Wolfram Mathematica PRODUCT TRIAL Learning Center Help Contact Us Buy Mathematica

ClearAll;

In[14]= zvenergybalance = Iabs + ρl * Hox * nox * vm + kl *  $\frac{Tm - Tl0on}{(vm - vv) * ton} - hg * (Tl0on - Tg) == \rho l * Lv * vv ;$ 
zenergybalance = -kl *  $\frac{Tm - Tl0on}{(vm - vv) * ton} + ks * \frac{T0 - Tm}{2 * \sqrt{as} * ton} == \rho s * Lm * vm;$ 
Solve[{zvenergybalance, zenergybalance}, {vv, vm}]

Out[16]= {{vv ->  $\frac{1}{2 Lv \rho l} \left( 2 Iabs + 2 hg Tg - 2 hg Tl0on + \frac{ks T0 \sqrt{ton as}}{ton as} - \frac{ks Tm \sqrt{ton as}}{ton as} + \frac{4 Hox Iabs nox \rho l}{4 Lv \rho l - 4 Hox nox \rho l + 4 Lm \rho s} + \frac{4 hg Hox nox Tg \rho l}{4 Lv \rho l - 4 Hox nox \rho l + 4 Lm \rho s} - \frac{4 hg Hox nox Tl0on \rho l}{4 Lv \rho l - 4 Hox nox \rho l + 4 Lm \rho s} - \frac{2 ks Lv T0 \sqrt{ton as} \rho l}{ton as (4 Lv \rho l - 4 Hox nox \rho l + 4 Lm \rho s)} + \frac{6 Hox ks nox T0 \sqrt{ton as} \rho l}{ton as (4 Lv \rho l - 4 Hox nox \rho l + 4 Lm \rho s)} + \frac{2 ks Lv Tm \sqrt{ton as} \rho l}{ton as (4 Lv \rho l - 4 Hox nox \rho l + 4 Lm \rho s)} - \frac{6 Hox ks nox Tm \sqrt{ton as} \rho l}{ton as (4 Lv \rho l - 4 Hox nox \rho l + 4 Lm \rho s)} + \frac{2 Hox ks Lv nox T0 \sqrt{ton as} \rho l^2}{Lm ton as \rho s (4 Lv \rho l - 4 Hox nox \rho l + 4 Lm \rho s)} - \frac{2 Hox^2 ks nox^2 T0 \sqrt{ton as} \rho l^2}{Lm ton as \rho s (4 Lv \rho l - 4 Hox nox \rho l + 4 Lm \rho s)} - \frac{2 Hox ks Lv nox Tm \sqrt{ton as} \rho l^2}{Lm ton as \rho s (4 Lv \rho l - 4 Hox nox \rho l + 4 Lm \rho s)} - \frac{2 Hox^2 ks nox^2 Tm \sqrt{ton as} \rho l^2}{Lm ton as \rho s (4 Lv \rho l - 4 Hox nox \rho l + 4 Lm \rho s)} \right)}$ 
}

```

```

appendixb - Wolfram Mathematica 10.4
File Edit Insert Format Cell Graphics Evaluation Palettes Window Help
Wolfram Mathematica PRODUCT TRIAL Learning Center Help Contact Us Buy Mathematica

vm ->  $\left( \frac{2 ks Lv T0 \sqrt{ton as} \rho l}{ton as} - \frac{2 Hox ks nox T0 \sqrt{ton as} \rho l}{ton as} - \frac{2 ks Lv Tm \sqrt{ton as} \rho l}{ton as} + \frac{2 Hox ks nox Tm \sqrt{ton as} \rho l}{ton as} - 4 Iabs Lm \rho s + 4 hg Lm Tg \rho s - 4 hg Lm Tl0on \rho s + \frac{4 ks Lm T0 \sqrt{ton as} \rho s}{ton as} - \frac{4 ks Lm Tm \sqrt{ton as} \rho s}{ton as} + \sqrt{\left( \frac{1}{ton} 4 Lm \left( -\frac{ks^2 T0^2}{as} + \frac{2 ks^2 T0 Tm}{as} - \frac{ks^2 Tm^2}{as} - \frac{2 Iabs ks T0 \sqrt{ton as}}{as} - \frac{2 hg ks T0 Tg \sqrt{ton as}}{as} + \frac{2 hg ks T0 Tl0on \sqrt{ton as}}{as} - \frac{2 Iabs ks Tm \sqrt{ton as}}{as} - \frac{2 hg ks Tg Tm \sqrt{ton as}}{as} - \frac{2 hg ks Tl0on Tm \sqrt{ton as}}{as} + 4 kl Lv Tl0on \rho l - 4 kl Lv Tm \rho l \right) \rho s (4 Lv \rho l - 4 Hox nox \rho l + 4 Lm \rho s)} + \left( -\frac{2 ks Lv T0 \sqrt{ton as} \rho l}{ton as} + \frac{2 Hox ks nox T0 \sqrt{ton as} \rho l}{ton as} + \frac{2 ks Lv Tm \sqrt{ton as} \rho l}{ton as} - \frac{2 Hox ks nox Tm \sqrt{ton as} \rho l}{ton as} - 4 Iabs Lm \rho s - 4 hg Lm Tg \rho s + 4 hg Lm Tl0on \rho s - \frac{4 ks Lm T0 \sqrt{ton as} \rho s}{ton as} + \frac{4 ks Lm Tm \sqrt{ton as} \rho s}{ton as} \right)^2 \right) / (2 Lm \rho s (4 Lv \rho l - 4 Hox nox \rho l + 4 Lm \rho s)) \}$ 

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Untitled-2* - Wolfram Mathematica 10.4

File Edit Insert Format Cell Graphics Evaluation Palettes Window Help

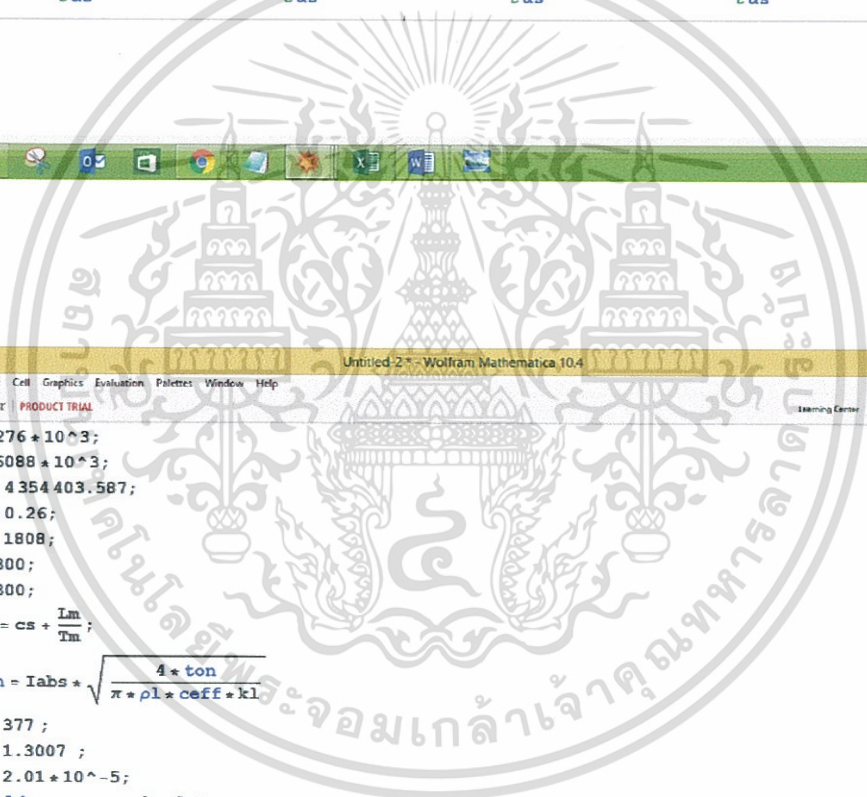
Wolfram Mathematica | PRODUCT TRIAL

Learning Center | Help | Contact Us | Buy Mathematica

$$vv1[t_] := \frac{1}{2 L_v \rho_L} \left(2 I_{abs} + 2 h T_g - 2 h T_{l0} + \frac{k_s T_0 \sqrt{t a s}}{t a s} - \frac{k_s T_m \sqrt{t a s}}{t a s} + \frac{4 H_{ox} I_{abs} n_{ox} \rho_L}{4 L_v \rho_L - 4 H_{ox} n_{ox} \rho_L + 4 L_m \rho_s} + \dots \right)$$

$$vm1[t_] := \frac{1}{2 L_m \rho_s (4 L_v \rho_L - 4 H_{ox} n_{ox} \rho_L + 4 L_m \rho_s)} \left(\frac{2 k_s L_v T_0 \sqrt{t a s} \rho_L}{t a s} - \frac{2 H_{ox} k_s n_{ox} T_0 \sqrt{t a s} \rho_L}{t a s} - \frac{2 k_s L_v T_m \sqrt{t a s} \rho_L}{t a s} + \frac{2 H_{ox} k_s n_{ox} T_m \sqrt{t a s} \rho_L}{t a s} + \dots \right)$$

$$vv2[t_] := \frac{1}{2 L_v \rho_L} \left(2 I_{abs} + 2 h T_g - 2 h T_{l0} + \frac{k_s T_0 \sqrt{t a s}}{t a s} - \frac{k_s T_m \sqrt{t a s}}{t a s} + \frac{4 H_{ox} I_{abs} n_{ox} \rho_L}{4 L_v \rho_L - 4 H_{ox} n_{ox} \rho_L + 4 L_m \rho_s} + \dots \right)$$

$$vm2[t_] := \frac{1}{2 L_m \rho_s (4 L_v \rho_L - 4 H_{ox} n_{ox} \rho_L + 4 L_m \rho_s)} \left(\frac{2 k_s L_v T_0 \sqrt{t a s} \rho_L}{t a s} - \frac{2 H_{ox} k_s n_{ox} T_0 \sqrt{t a s} \rho_L}{t a s} - \frac{2 k_s L_v T_m \sqrt{t a s} \rho_L}{t a s} + \frac{2 H_{ox} k_s n_{ox} T_m \sqrt{t a s} \rho_L}{t a s} + \dots \right)$$


Untitled-2* - Wolfram Mathematica 10.4

File Edit Insert Format Cell Graphics Evaluation Palettes Window Help

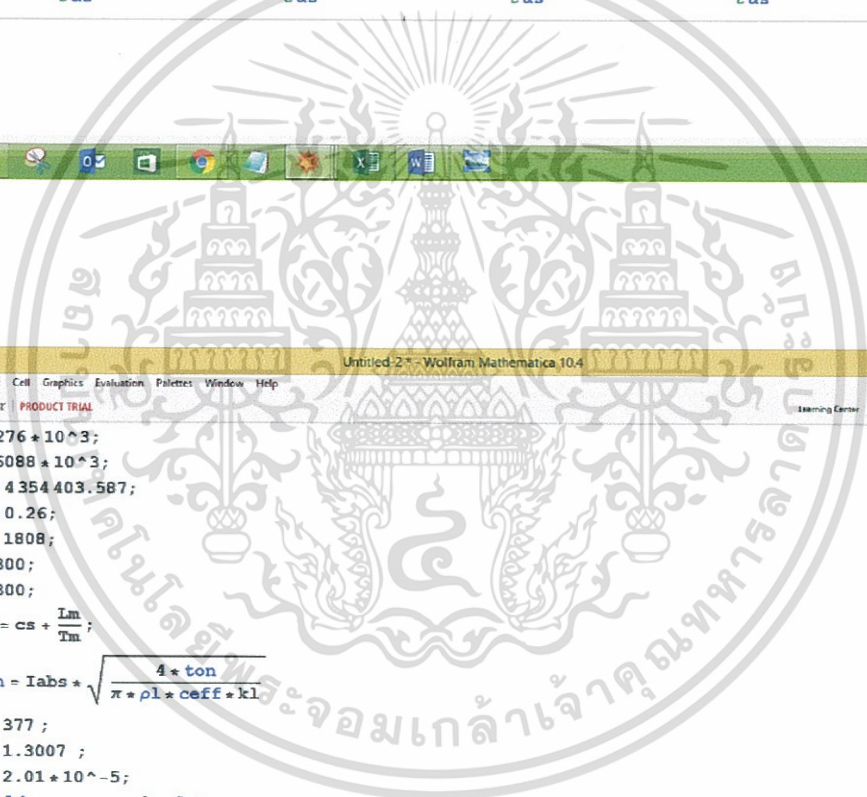
Wolfram Mathematica | PRODUCT TRIAL

Learning Center | Help | Contact Us | Buy Mathematica

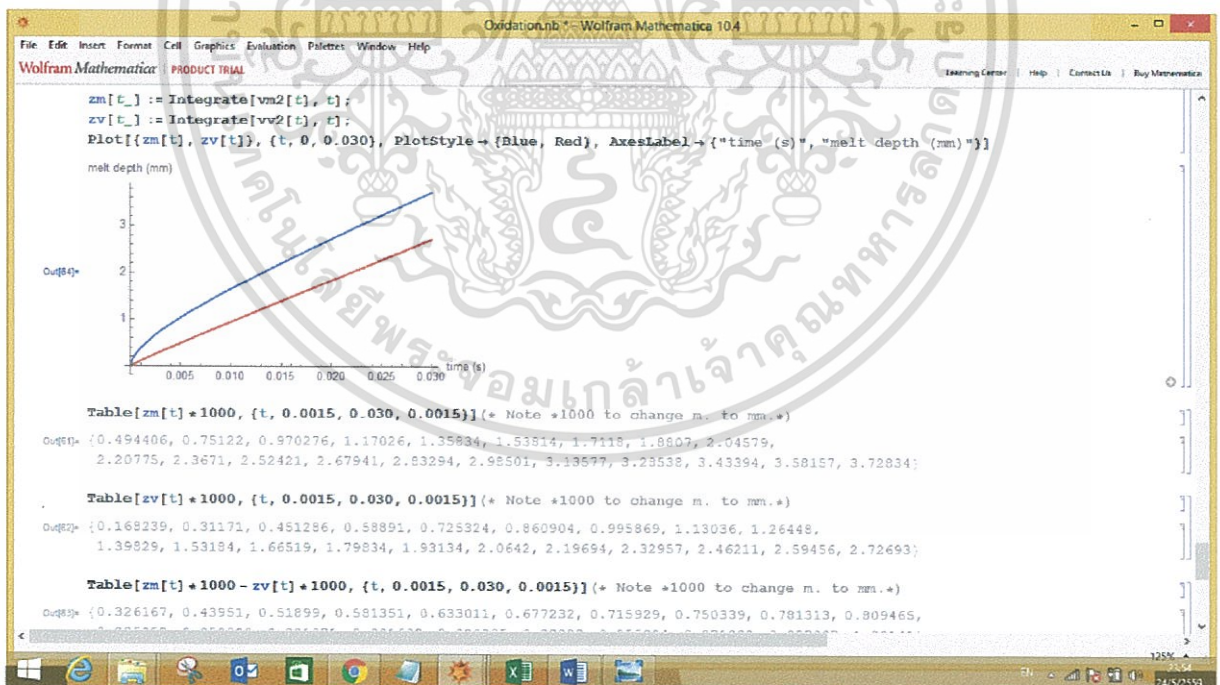
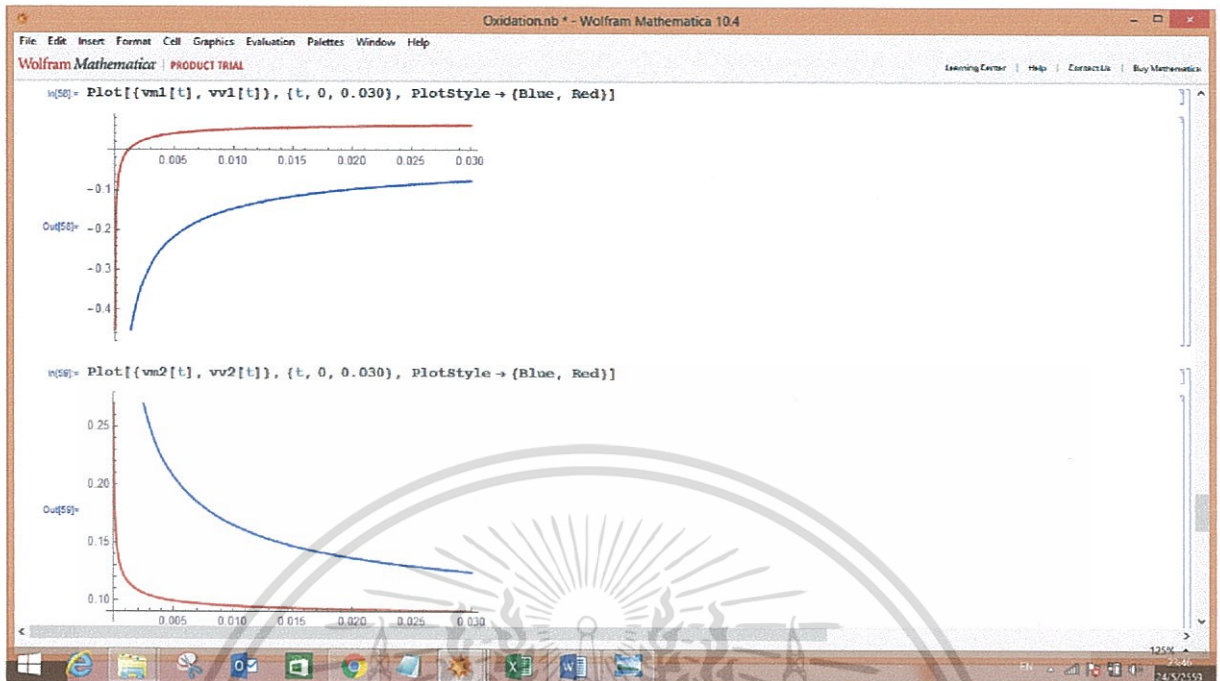
```

Lm = 276 * 10^3;
Lv = 6088 * 10^3;
Hox = 4354403.587;
nox = 0.26;
Tm = 1808;
T0 = 300;
Tg = 300;
ceff = cs +  $\frac{Lm}{Tm}$ ;
Tl0on = Iabs *  $\sqrt{\frac{4 * ton}{\pi * \rho_l * ceff * kl}}$ ;
vg = 377;
\rho_g = 1.3007;
\mu_g = 2.01 * 10^-5;
Reynolds = \rho_g * v_g * 2 * r_b / \mu_g;
kg = 0.0259;
Cc = 0.228;
nc = 0.73;
Pr = 0.73;
hg =  $\frac{kg}{2 * r_b} * Cc * (Reynolds^nc) * (Pr^(1/3))$ ;

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Untitled-3 - Wolfram Mathematica 10.4
File Edit Insert Format Cell Graphics Evaluation Palettes Window Help
Wolfram Mathematica PRODUCT TRIAL Learning Center Help Contact Us Buy Mathematica

ClearAll;

ceff = cs +  $\frac{I_m}{T_m}$ ;

Tl0on = Iabs *  $\sqrt{\frac{4 * ton}{\pi * \rho l * ceff * kl}}$ ;

Tl0off = Tl0on + (Tg - Tl0on)  $\left[ 1 - \left( e^{-\frac{toff * \alpha l * hg^2}{kl^2}} \right) * \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{hg * \sqrt{toff * \alpha l}}{kl} \right) \right) \right]$ ;

B1 =  $\frac{Tl0off - Tm}{\operatorname{erfc} \left[ \frac{(zm - zv) + (2 * \xi * \sqrt{toff * \alpha l * as})}{2 * \sqrt{\alpha l * toff}} \right]}$ ;

B2 =  $\frac{Tm - T0}{\operatorname{erfc} \left[ \left( \frac{\alpha l}{as} \right)^{0.25} * \xi \right]}$ ;

Tl = Tl0off - B1 *  $\operatorname{erf} \left( \frac{x - (zv - zm)}{2 * \sqrt{\alpha l * toff}} \right)$ ;

Ts = T0 + B2 *  $\operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2 * \sqrt{\alpha l * toff}} \right)$ ;

xoff =  $\xi * \sqrt{4 * toff * \alpha l * as}$ ;
solve[-(kl * D[Tl, x]) + (ks * D[Ts, x]) ==  $\rho s * I_m * D[xoff, toff]$ ,  $\xi$ ]

```

```

Untitled-3 - Wolfram Mathematica 10.4
File Edit Insert Format Cell Graphics Evaluation Palettes Window Help
Wolfram Mathematica PRODUCT TRIAL Learning Center Help Contact Us Buy Mathematica

Table[zm * 1000, {t, 0.0015, 0.030, 0.0015}] (*Note zm at 3000W/50Hz/1.5mson/18.5msoff*)
{0.4944064382670769, 0.751220197520673, 0.9702757917404328, 1.1702604721387646,
1.358335415799476, 1.5381354124277389, 1.7117976213399715, 1.880700332161257,
2.0457911675923715, 2.207753073285538, 2.367096383923602, 2.5242135597151045,
2.6794135459379262, 2.8329443057658317, 2.985008139244571, 3.135772417349052,
3.285377299277207, 3.4339414051532215, 3.5815660670926137, 3.728338569420375}

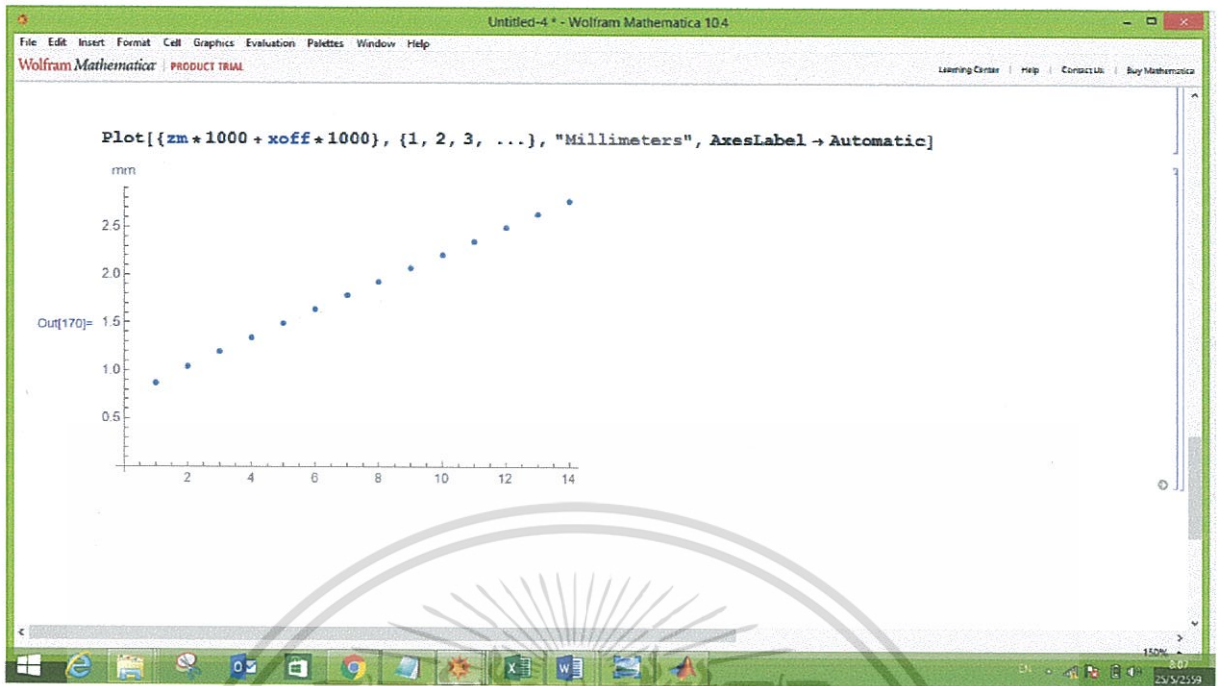
Table[zv * 1000, {t, 0.0015, 0.030, 0.0015}] (*Note zv at 3000W/50Hz/1.5mson/18.5msoff*)
{0.16823949377834535, 0.31171023274059595, 0.45128608155218414, 0.5889099405695005,
0.7253239342866713, 0.8609035416519579, 0.9958688279227621, 1.1303612581320446,
1.264477763087556, 1.3982880179796233, 1.5318438441537023, 1.665185001885791,
1.7983426726745304, 1.931341796251166, 2.06420264819114, 2.1969419437810522, 2.329573630507819,
2.4621094697421073, 2.594559472005185, 2.726932228242021}

Table[xoff * 1000, {toff, 0.0185, 0.37, 0.0185}] (*Note xoff at 3000W/50Hz/1.5mson/18.5msoff*)
{0.405789149, 0.326594969, 0.272008336, 0.229747107, 0.195129947, 0.165786021, 0.140329206,
0.117872976, 0.097802399, 0.079690473, 0.063199894, 0.048078079, 0.034147774,
0.021235012, ...}

Table[zm * 1000 + xoff * 1000, {toff, 0.0185, 0.37, 0.0185}] (*Note xoff at 3000W/50Hz/1.5mson/18.5msoff*)
{0.873920149, 1.041490969, 1.198631336, 1.350447107, 1.498909947, 1.645026021, 1.789389206,
.932382976, 2.074282399, 2.215270473, 2.355489894, 2.495058079, 2.634067774, 2.772585012, ...}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Turbine blade.
Retrieved December 20, 2015 from
https://en.wikipedia.org/wiki/Turbine_blade
- [2] Nd:YAG Lasers.
Retrieved December 8, 2015 from
<http://www.convergent-photonics.com/nd-yag-pulse-lasers/>
- [3] Laser drilling in gas turbine blades.
Retrieved December 8, 2015 from
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/latj.201190024/pdf>
- [4] Drilling Ink-Jet Printer Nozzles with UV Excimer Lasers.
Retrieved December 8, 2015 from
<https://www.coherent.com/Applications/>
- [5] Laser Micromachining.
Retrieved December 8, 2015 from
<http://www.potomac-laser.com/services/core/laser-micromachining/>
- [6] J. Hecht, HIGH-POWER LASERS: Fiber lasers drill for oil.
Retrieved December 8, 2015 from
<http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-48/issue-12/world-news/high-power-lasers-fiber-lasers-drill-for-oil.html>
- [7] Laser via drilling.
Retrieved December 8, 2015 from
<http://www.precoinc.com/capabilities/microvia.html>
- [8] D. Karnakis, Optimization of the Laser Drilling Process for Fuel Injection Components.
Retrieved December 8, 2015 from
https://www.researchgate.net/publication/255607788_Optimization_of_the_Laser_Drilling_Process_for_Fuel_Injection_Components
- [9] Laser Drilling
Retrieved December 8, 2015 from
http://www.qmed.com/sites/default/files/Resonetics.Laser_drilling.1.2013.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] Department of physics, Faculty of science, Mahidol University. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเลเซอร์. Retrieved September 16, 2015 from http://www.sc.mahidol.ac.th/scpy/Optics/basic_laser2.html
- [11] N.B. Dahotre and S. Harimkar, *Laser Fabrication and Machining of Materials*. London: Springer, 2008.
- [12] S. Dhar, N. Saini, R. Purohit, “A review on laser drilling and its Techniques,” *Proceedings: International Conference on Advances in Mechanical Engineering-2006*, (AME 2006), December 1-3, 2006.
- [13] C.Y. Yeo, S.C. Tam, S. Jana, and M.W.S. Lau, “A technical review of the laser drilling of aerospace materials,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 42, pp. 15-49, 1993.
- [14] J.F. Ready, *Industrial Applications of Lasers*. San Diego: Academic Press, 1997.
- [15] D.K.Y. Low, L. Li, and P.J. Byrd, “Hydrodynamic Physical Modeling of Laser Drilling,” *Transactions of the ASME*, vol. 124, pp. 852-862, 2002.
- [16] H.S. Carslaw and J.C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, 2nd ed, Oxford University Press, 1986
- [17] Y. Yan, L. Ji, Y. Bao, and Y. Jiang, “An experimental and numerical study on laser percussion drilling of thick-section alumina”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, pp.1257–1270, 2012.
- [18] G.K.L. Ng, P.L. Crouse, and L. Li, “An Analytical Model for Laser Drilling Incorporating Effects of Exothermic Reaction, Pulse Width and Hole Geometry,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 49, pp. 1358-1374, 2006.
- [19] R.E. Wagner, “Laser Drilling Mechanics,” *Journal of Applied Physics*, vol. 45, pp. 4631-4637, 1974.
- [20] S. Sankaranarayanan, H. Emminger, and A. Kar. “Energy loss in the plasma during laser drilling,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol 32, 1991.
- [21] J.P. Holman, *Heat Transfer*, 9th ed. Boston: McGraw-Hill, 2002.
- [22] J.M. Dowden, *The Mathematics of Thermal Modeling: An Introduction to the Theory of Laser Material Processing*. Florida: Chapman & Hall/CRC, 2001.
- [23] V. Semak and A. Matsunawa, “The Role of Recoil Pressure in Energy Balance during Laser Materials Processing,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 30, pp. 2541-2552, 1997.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] Y.S. Touloukian, P.E. Liley, and S.C. Saxena, “Thermophysical Properties of Matter: Thermal Conductivity.” vol. 3, Y.S.Touloukian and C.Y.Ho, Eds., ed New York: IFI/Plenum, 1970.
- [25] Y.S. Touloukian, S.C. Saxena, and P. Hestermans, “Thermophysical Properties of Matter: Viscosity.” vol. 11, Y.S.Touloukian and C.Y.Ho, Eds., ed New York: IFI/Plenum, 1970.
- [26] P.E. Liley, *Properties of Nonmetallic Fluid Elements*, McGraw-Hill/CINDAS Data Series on Material Properties vol. III-2. New York: McGraw-Hill, 1981.
- [27] D. Zeng, W.P. Latham, and A. Kar, “Two-Dimensional Model for Melting and Vaporization during Optical Trepanning,” *Journal of Applied Physics*, vol. 97, pp. 104912-1-7, 2005.
- [28] J. Paolo DAVIM, *Laser in Manufacturing*. Wiley-ISTE, 2012.

