แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการตัดโลหะด้วยเลเซอร์

A MATHEMATICAL MODEL OF LASER CUTTING OF METALS

ธนภูมิ สงวนพันธุ์
ภชนก สังข์เกษม
วรัญชัย ไชยปัญญา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการตัดโลหะด้วยเลเซอร์

A MATHEMATICAL MODEL OF LASER CUTTING OF METALS

ธนภูมิ สงวนพันธุ์
ภชนก สังข์เกษม
วรัญชัย ไชยปัญญา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A MATHEMATICAL MODEL OF LASER CUTTING OF METALS

TANAPUM SA-NGUANPAN
PHACHANOK SANGKASEM
WARUNCHAI CHAIPANYA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN RAIL TRANSPORTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์

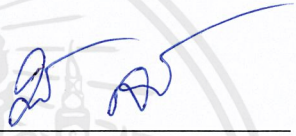
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการตัดโลหะด้วยเลเซอร์

A MATHEMATICAL MODEL OF LASER CUTTING OF METALS

ผู้จัดทำ

1. นาย ธนภูมิ สงวนพันธุ์ รหัสประจำตัว 56010545
2. นาย ภชนก สังข์เกษม รหัสประจำตัว 56010903
3. นาย วรัญชัย ไชยปัญญา รหัสประจำตัว 56011071



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.มธุรส สุชาตะวัฒน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการตัดโลหะด้วยเลเซอร์

นายธนภูมิ สงวนพันธุ์ 56010545
นายภชนก สังข์เกษม 56010903
นายวรัญชัย ไชยปัญญา 56011071
ดร.มธุรส สุชาตะวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

กระบวนการตัดโลหะด้วยเลเซอร์นั้นเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและยากต่อการควบคุมคุณภาพของรอยตัดให้เป็นไปตามต้องการ เนื่องจากคุณภาพของรอยตัดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น กำลังของแสงเลเซอร์ ความเร็วในการตัด ความหนาของชิ้นงาน ชนิดของโลหะ และชนิดของแก๊สเป็นต้น โครงงานนี้เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการตัดโลหะด้วยเลเซอร์ โดยพิจารณาสมการสมดุลมวล, สมการสมดุลพลังงาน และสมการสมดุลโมเมนตัม ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือจะช่วยให้สามารถทำนายคุณภาพรอยตัดให้เป็นไปตามต้องการได้ นอกจากนี้โครงงานฉบับนี้ได้ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อคุณภาพรอยตัด แล้วนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่มีผู้ทำการศึกษาก่อนหน้า เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MATHEMATICAL MODEL OF LASER CUTTING

Tanapum	Sa-nguanpan	56010545
Phachanok	Sangkasem	56010903
Warunchai	Chaipanya	56011071
Dr.Maturose	Suchatawat	Advisor

Year 2559

Abstract

Laser cutting of metals is a complex process. In practice, it is difficult to control the cut kerf quality due to several variables are involved. These include laser power, cutting speed, workpieces thickness, type of metals and type of gas, etc. In this project, a mathematical model of laser cutting of metals is developed from the mass balance, energy balance and momentum balance equations. The results of the mathematical model enable us to predict the cut kerf quality. This project also studies on the effects of some variables on the cut kerf striations formation. The results of the mathematical model are verified by comparing them with the experimental results reported in the literature.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก ดร.มธุรส สุชาตะวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณ คณาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ถ่ายถอดความรู้ให้เป็นอย่างดีตลอดระยะเวลาที่เข้ารับการศึกษา และขอบคุณ ศาสตราจารย์ Alexander Kaplan ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการดำเนินการวิจัยนี้

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูข้าพเจ้ามาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณและขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายธนภูมิ สงวนพันธุ์
นายภชนก สังข์เกษม
นายวรัญชัย ไชยปัญญา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VI

สารบัญรูป.....VII

รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....IX

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความสำคัญของปริญญานิพนธ์.....1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....1

1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....1

1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....2

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....2

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....3

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....3

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....5

บทที่ 3 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการตัดโลหะด้วยเลเซอร์.....8

3.1 แบบจำลองกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างการตัดโลหะด้วยเลเซอร์.....8

3.2 สมการสมดุลมวล.....9

3.3 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม.....10

3.4 สมการอนุรักษ์พลังงาน.....11

3.5 ขั้นตอนการคำนวณ.....13

3.6 แผนผังขั้นตอนการคำนวณ.....15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล.....16

4.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล..... 16

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 28

5.1 สรุปผลการวิจัย.....28

5.2 วิจารณ์ผลจากแบบจำลอง..... 28

5.3 ข้อเสนอแนะ..... 28

ภาคผนวก..... ...29

ภาคผนวก ก..... 30

บรรณานุกรม..... 32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 คุณสมบัติทางความร้อนของเหล็กกล้า.....16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

3.1 แสดงส่วนที่เป็นชั้นของเหลวที่เกิดในกระบวนการตัดโลหะด้วยเลเซอร์.....8

3.2 แสดงภาพตัดข้างของรูปที่ 3.1 เพื่อให้เห็นการไหลในรอยตัด..... 9

3.3 โปรแกรม Mathematica สำหรับตัวแปรที่สามารถปรับค่าได้..... 13

3.4 โปรแกรม Mathematica สำหรับตัวแปรคุณสมบัติต่างๆ..... 14

3.5 โปรแกรม Mathematica สำหรับสมการสมดุลมวล, สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน..... 14

3.6 โปรแกรม Mathematica การแก้ปัญหาเพื่อหาตัวแปรไม่ทราบค่า..... 15

3.7 แผนผังขั้นตอนการคำนวณเพื่อหาตัวแปรไม่ทราบค่า..... 15

4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นโลหะเหลวของเหล็กกับความเร็วที่ผิวของชั้นโลหะ.....17

4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลวกับเวลา.....18

4.3 กราฟความสัมพันธ์ความเร็วของชั้นโลหะเหลวกับเวลา.....18

4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวโลหะกับเวลา.....19

4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลวกับความเร็วในการตัด.....20

4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของชั้นโลหะเหลวกับความเร็วในการตัด.....20

4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวโลหะกับความเร็วในการตัด..... 21

4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลวกับความหนาของชิ้นงาน. 22

4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของชั้นโลหะเหลวกับความหนาของชิ้นงาน..... 22

4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวโลหะกับเวลา..... 23

4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ดูดซับของแสงเลเซอร์กับพลังงานของแสงเลเซอร์..... 24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลวกับพลังงานของแสงเลเซอร์ 25

4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความระหว่างหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลวกับพลังงานของแสงเลเซอร์.....26

4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลวกับพลังงานของแสงเลเซอร์ 26

4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวโลหะกับพลังงานของแสงเซอร์..... 27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A_m คือ ค่าการดูดซับสูงสุดของ Fresnel

$\frac{c_f}{2}$ คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ตำแหน่งผิว

D คือ ความหนาของชิ้นงาน (m)

h_f คือ ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (J/kg)

H_m คือ เอนทัลปีของจุดหลอมเหลว

$\Delta H|_{T(t)}$ คือ คือ เอนทัลปีของปฏิกิริยา (J/kg)

$I(r,z)$ คือ ความเข้มข้นของแสงเลเซอร์ (W/m^2)

$\dot{m}_{cv}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลโลหะเหลวที่เหลืออยู่ในปริมาตรควบคุม (kg/s)

$\dot{m}_{in}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลโลหะแข็งที่กลายเป็นโลหะเหลว (kg/s)

$\dot{m}_{out}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลโลหะเหลวที่ถูกดันออกจากรอยตัดในรูปหยดของของเหลว (kg/s)

$\dot{m}_{out,FeO}$ คือ อัตราการเกิดสนิมที่บริเวณระหว่างแก๊สกับโลหะเหลว (kg/s)

P_a คือ พลังงานจากแสงเลเซอร์ที่ดูดซับไว้ได้ (W)

P_{cv} คือ พลังงานที่เหลืออยู่ในปริมาตรควบคุม (W)

P_{exo} คือ พลังงานจากการคายความร้อน (W)

P_l คือ พลังงานของโลหะเหลวที่บริเวณหน้าตัด (W)

P_m คือ พลังงานในการเปลี่ยนสถานะ (W)

Re คือ Reynolds Number

T_a คือ อุณหภูมิของแก๊สภายในกระบอกเลเซอร์ (K)

$T_f(t)$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวของชั้นโลหะเหลว (K)

$T_l(t)$ คือ อุณหภูมิที่ผิวของชั้นโลหะเหลว (K)

u_g คือ ความเร็วที่ผิวของชั้นโลหะเหลวบริเวณระหว่างแก๊สและโลหะเหลว (m/s)

U_∞ คือ ความเร็วบริเวณ free-stream (m/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_c คือ ความเร็วในการตัด (m/s)

$V_m(t)$ คือ ความเร็วเฉลี่ยของโลหะเหลว (m/s)

w_0 คือ รัศมีของแสงเลเซอร์ที่ตำแหน่งเอว (m)

$w(z)$ คือ รัศมีของแสงเลเซอร์ที่ตำแหน่ง z (m)

w_k คือ ความกว้างของรอยตัด (m)

x_b คือ ระยะจากศูนย์กลางเลเซอร์ถึงขอบล่างของหน้าตัด (m)

x_t คือ ระยะจากศูนย์กลางเลเซอร์ถึงขอบบนของหน้าตัด (m)

อักษรกรีก

ρ_e คือ ความหนาแน่นที่ขอบของบริเวณขอบเขต (kg/m^3)

ρ_l คือ ความหนาแน่นของโลหะเหลว (kg/m^3)

ρ_s คือ ความหนาแน่นของโลหะแข็ง (kg/m^3)

$\delta_l(t)$ คือ ความหนาของชั้นโลหะเหลว (m)

τ_g คือ ความเค้นเฉือนบริเวณระหว่างแก๊สและโลหะเหลว (kg/s)

τ_l คือ ความเค้นเฉือนบริเวณระหว่างโลหะเหลวและโลหะแข็ง (kg/s)

μ_l คือ ความหนืดพลวัตของโลหะเหลว (Ns/m^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญของปริญญานิพนธ์

ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมแปรรูปโลหะมีการเติบโตและพัฒนาอย่างรวดเร็ว ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ยานยนต์ และอากาศยาน มีจำนวนมากที่เป็นชิ้นงานขนาดเล็ก จึงจำเป็นที่ขั้นตอนในการผลิตการตัดสามารถตัดชิ้นงานให้ไม่เกิดรอยริ้ว หรือเกิดรอยตัดขนาดเล็กที่สุด เพื่อให้ขั้นตอนการประกอบสามารถประกอบชิ้นงานได้พอดี ทำให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพในการทำงานได้ดีและปลอดภัย โดยการตัดที่เหมาะสมที่สุดคือการตัดด้วยเลเซอร์ เนื่องจากการตัดด้วยเลเซอร์เกิดการเสียดสีน้อย, มีความเร็วในการตัดสูง, ไม่มีการสะสมความร้อนในชิ้นงานทำให้โอกาสในการบิดตัวของชิ้นงานต่ำและเกิดรอยตัดขนาดเล็กกว่าการตัดด้วยวิธีอื่น คุณภาพของรอยตัดมีผลมาจากปัจจัยหลายอย่าง อาทิเช่น กำลังจากเลเซอร์, ความเร็วในการตัด, ความหนาของชิ้นงาน, ชนิดของโลหะ, ชนิดของแก๊สเป็นต้น จึงเป็นที่มาของโครงงานในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อรอยตัดเนื่องจากการตัดด้วยเลเซอร์ และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะช่วยลดการลองผิดลองถูกในการตัดโลหะด้วยเลเซอร์จริง รวมทั้งใช้วิเคราะห์ผลของตัวแปรที่มีผลต่อการตัดโลหะด้วยเลเซอร์

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการตัดโลหะด้วยเลเซอร์
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรอยตัดของชิ้นส่วนโลหะด้วยเลเซอร์

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. แบบจำลองจะไม่มีการระเหยกลายเป็นไอของโลหะจากการตัดด้วยเลเซอร์
2. แบบจำลองจะไม่มีการสะสมของชั้นโลหะบริเวณเหลวบริเวณขอบล่างของรอยตัด
3. การกระจายของลำแสงเลเซอร์เป็นแบบ Gaussian
4. การกระจายของลำแสงเลเซอร์เป็นแบบทรงกระบอก
5. ชั้นสนิมที่เกิดขึ้นไม่มีผลต่อค่าการดูดซับพลังงานของแสงเลเซอร์ และจุดหลอมเหลวของชิ้นงาน
6. จุดโฟกัสของแสงเลเซอร์วางอยู่บนผิวของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1. การศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข 2 มิติ
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวพิจารณาวัสดุที่ทำการตัดเป็นโลหะเท่านั้น
3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวพิจารณาแก๊สที่จ่ายเป็นออกซิเจน

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูล บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. สร้างแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายกระบวนการตัดโลหะด้วยเลเซอร์
3. แก้สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
4. ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลงานวิจัยที่ทำการศึกษามาก่อนหน้านี้
5. ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรอยตัดของการตัดชิ้นส่วนโลหะด้วยเลเซอร์
6. สรุปผลการศึกษาและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาเรื่องการตัดโลหะเลเซอร์ จำเป็นต้องมีความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเลเซอร์ กฎสมดุลมวล กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม และกฎการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งจะกล่าวในบทนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับเลเซอร์ [7],[8]

LASER ที่เราใช้ๆกันอยู่นี้เป็นคำที่ย่อมาจาก Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation หมายถึง กระบวนการที่ทำให้รังสีมีการแผ่แบบกระตุ้น คือมีทิศทางและการถ่ายทอดพลังงานที่แน่นอน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงชั้นพลังงานของอิเลคตรอน จากชั้นที่สูงกว่าลงสู่วงโคจรของอิเลคตรอนปกติ โดยมีช่วงคลื่นแบบเดียวกัน เป็นรังสีขนาน และมีกำลังสูงกว่ารังสีทั่วๆไป โดยโรงงานที่รับผลิตงานโลหะใช้เลเซอร์ในการตัดงาน ซึ่งเลเซอร์ที่ใช้ตัดงาน คือ CO_2Laser ซึ่งสามารถตัดโลหะที่มีความบางไปจนถึงมีความหนามากๆ ได้ ซึ่งมักจะอยู่ในช่วง 0.5 - 15 มิลลิเมตร โดยการปรับความเข้มของลำแสงด้วยเลนส์ที่อยู่ในปลายท่อเลเซอร์ จนได้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางลำแสงตามสเปคที่กำหนด ก่อนจะทำการยิงแสงลงบนวัสดุเพื่อทำการตัด ซึ่งเมื่อทำการตัด จะมีเนื้อวัสดุส่วนหนึ่งที่หลอมละลาย (Melt) หลุดออกไป และเกิดเป็นร่องแยกระหว่างชิ้นงานกับตัววัสดุส่วนอื่นๆ แต่ทั้งนี้ยิ่งวัสดุที่มีความหนามาก ก็จะมีอัตราสิ้นเปลืองปริมาณแก๊สมากขึ้น และยิ่งหนามากก็ต้องใช้ความเร็วในการเดินหัวตัดที่ช้าลงไปด้วยตามลำดับ และที่สำคัญคือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานที่มากขึ้นด้วย

คุณสมบัติของแสงเลเซอร์

ลักษณะเด่นที่สำคัญของแสงเลเซอร์คือ การเป็น Coherent Light คุณสมบัติของ coherency นี้ทำให้แสงเลเซอร์ทำงานได้แตกต่างไปจากแสงทั่ว ๆ ไป เนื่องจากเป็นแสงที่มีลักษณะสมบัติเฉพาะตัว ง่ายต่อการระบุแยกออกจากแสงอื่น ๆ ที่เป็นแบ็คกราวด์ ความเป็นระเบียบของคลื่นส่งผลให้เกิดคุณสมบัติอีกหลาย ๆ อย่างตามมา เช่นการมีแสงสีเดียว (Monochromatic) การมีทิศทางที่แน่นอน (Directionality) และมีความเข้มสูง (High Intensity) การนำเอาแสงเลเซอร์ไปใช้ประโยชน์นั้นจึงอาจอาศัยคุณสมบัติเด่น ๆ เหล่านี้อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลาย ๆ อย่างรวม ๆ กัน

1. Coherency คือความเป็นระเบียบของคลื่น คลื่นจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันโดยมีเฟสเหมือนกัน (In Phase) จึงมีหน้าคลื่น (Wave Front) พร้อมกันเปรียบเสมือนกับแถวทหารที่เดินเป็นระเบียบเป็นหน้ากระดานพร้อม ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การทดลองของยังค์ (Young's Experiment) เราจะมีวิธีการใดที่จะพิสูจน์ว่าแสงชนิดใดเป็น Coherent Light การทดลองที่มีชื่อเสียงอันหนึ่งที่สามารถใช้พิสูจน์ข้อเท็จจริงนี้ได้ ได้แก่ การทดลองของ Young ซึ่งเป็นการทดลองทางแสงที่ชี้ให้เห็นถึงผลลัพท์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการจัดระเบียบของคลื่น Young ได้ทำการทดลองนี้กับแสงจากหลอดไฟธรรมดา

3. แสงสีเดียว (Monochromatic Light) แสงเลเซอร์มีคุณสมบัติเป็นแสงสีเดียวเพราะเป็นแสงที่เปล่งออกมาจากการเปลี่ยนชั้นพลังงานที่เป็นชั้นพลังงานเดี่ยว (Discrete Energy Levels) ในระบบอะตอมหรือโมเลกุล ความถี่ของแสงมีค่าแน่นอนตามผลต่างของชั้นพลังงานทั้งสอง และยังมีส่วนในการเร้าให้เกิด Stimulated Emission โดยอาศัยกลไกของการขยายสัญญาณแสงด้วย Optical Cavity จึงเกิดแสงที่มีความถี่เดียวกันอีกจำนวนมาก

4 การมีทิศทางที่แน่นอน (Directionality) เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ให้แสงเป็นลำขนานความขนาดของลำแสงดีเลิศมี Beam Divergence เพียงเล็กน้อย

2.1.2 การตัดด้วยเลเซอร์

การตัดด้วยเลเซอร์ (Laser Cutting) [1] เป็นกระบวนการตัดโดยใช้ความร้อนโดยจะทำการหลอมเหลววัสดุและทำให้กลายเป็นไอโดยใช้ความร้อนจากแสงเลเซอร์ ซึ่งกระบวนการนี้อาจต้องใช้แก๊สช่วยในการกำจัดเศษโลหะที่หลอมเหลวออก กระบวนการสร้างแสงเลเซอร์นี้ จะประกอบไปด้วย แหล่งพลังงาน, สารกำเนิดเลเซอร์, ท่อเลเซอร์, ระบบการนำรังสี ซึ่งจะให้ช่วงความยาวคลื่นและกำลังที่แตกต่างกันไป ทั้งนี้การตัดด้วยเลเซอร์สามารถใช้กับงานที่รูปร่างซับซ้อน เพราะเครื่องตัดเลเซอร์สามารถนำเข้า CAD ได้ โดยตรง เหมาะกับงานที่มีลักษณะที่ต้องผลิตคราวละมากๆ เพราะจะทำให้เกิดการคุ้มทุนต่อการตัด มีราคาต่อชิ้นที่ถูกลง รวมถึงนิยมให้การตัดงานตามแบบเพื่อทำต้นแบบ เพื่อนำงานมาทดสอบขึ้นรูปก่อนจะนำไปทำแม่พิมพ์ผลิตงานต่อไป ซึ่งงานที่ได้จากการตัดเลเซอร์นั้นจะมีขอบที่เนียนเรียบและคม แต่อาจมีรอยไหม้ให้สังเกตเห็นได้ แต่เนื่องจากเลเซอร์เป็นลำแสง ดังนั้นจึงอาจมีปัญหาจากการสะท้อนบนพื้นผิววัสดุที่มีความมันวาว เช่น สแตนเลส ซึ่งมักแก้ปัญหาโดยการเคลือบผิวเพื่อลดความเงา รวมถึงขนาดของรูที่เล็กที่สุดที่เครื่องสามารถทำได้ โดยปกติจะอยู่ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูประมาณ 1-3 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับความหนาของงานโดยรวมที่ตัด และขึ้นอยู่กับสเปคของเครื่อง

โดยที่จะพิจารณาการตัดโลหะด้วยเลเซอร์นั้นจะเน้นไปที่รอยการตัดของชิ้นงาน เนื่องจากจุดนี้มีส่วนของโลหะที่หลอมเหลวซึ่งเกิดจากความร้อนของแสงเลเซอร์ เศษโลหะเหลวจะใช้แก๊สเป่าเพื่อกำจัดออกจากรอยตัด ถ้าเกิดใช้เวลานานเกินไปจะทำให้รอยของการตัดมีการเกิดรอยขรุขระจากเศษโลหะเหลวที่แห้งติดอยู่ ทำให้รอยตัดไม่เรียบเนียน และไม่ได้คุณภาพ การพิจารณานั้นมีสมการสาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่จำเป็นต้องใช้นั่นก็คือ สมการสมดุลมวล, สมการสมดุลโมเมนตัม และสุดท้ายสมการสมดุลพลังงาน

1. สมการสมดุลมวลมาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลโลหะในระบบซึ่งจะมีส่วนหนึ่งเป็นอัตรามวลของโลหะเข้าสู่ระบบกับอัตรามวลของโลหะที่ออกจากระบบ

2. สมการสมดุลโมเมนตัมมาจากการพิจารณาความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นที่ผิวรอยต่อระหว่างโลหะแข็งและโลหะเหลว

3. สมการสมดุลพลังงานมาจากพลังงานของแสงเลเซอร์ที่ถูกดูดซับรวมกับอัตราของพลังงานที่ถูกคายออกซึ่งจะก่อให้เกิดพลังงานความร้อนแฝงที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะ อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่ถูกเก็บไว้ในระบบ และพลังงานจากแสงเลเซอรทั้งหมด

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wee และ Li [1] ได้พิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการในการตัดโลหะด้วยเลเซอร์ โดยวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อรอยตัดด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ 2 มิติพบว่า

1. ความหนาของชั้นโลหะเหลวซึ่งเกิดจากการหลอมเหลวมีอิทธิพลอย่างมากต่อรูปแบบของรอยตัด

2. ความหนาของชิ้นงานแปรผันตรงกับความหนาของชั้นโลหะเหลวและความเร็วที่ผิวของชั้นโลหะ

3. ความหนาชั้นโลหะเหลวแปรผันตรงกับความหนาของชิ้นงาน

4. พลังงานจากแสงเลเซอร์ที่ดูดซับไว้ได้แปรผันตรงกับกำลังเลเซอร์ แต่แปรผกผันกับความหนาของชิ้นงาน

5. ความหนาของชั้นโลหะเหลวของสนิมแปรผกผันกับความเร็วในการตัด แต่แปรผันตรงกับความหนาของชิ้นงาน

โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่พิจารณาการการระเหยกลายเป็นไอของโลหะจากการตัดด้วยเลเซอร์ พิจารณาสมการสมดุลมวล สมการสมดุลพลังงาน และสมการสมดุลโมเมนตัม การกระจายลำแสงเลเซอร์เป็นแบบ Gaussian และการเกิดชั้นสนิมของโลหะหลอมเหลวไม่มีผลต่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chen และ Yao [2] ได้ศึกษากลไกของการหลอมเหลว และการเกิดริ้วรอยจากการตัดด้วยเลเซอร์บนแผ่นเหล็ก โดยกล่าวถึงชั้นของโลหะเหลวซึ่งเกิดจากการหลอมเหลวทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่มีผลให้เกิดริ้วบนรอยตัดพบว่า

1. การเกิดริ้วเกิดจากการได้รับผลกระทบจากลักษณะการแกว่งของชั้นของเหลวซึ่งมีผลมาจากการหลอมเหลวบนหน้ารอยตัดขณะถูกเป่าเพื่อให้ไม่เหลือชั้นของเหลวบนชิ้นงาน ซึ่งจะเกิดพร้อมๆกับการเกิดออกซิเดชันและการแลกเปลี่ยนความร้อน

2. ความเร็วในการตัดจะเป็นตัวกำหนดว่าชั้นของเหลวจะแยกออกหรือเกิดคลื่นบนหน้าตัด

3. ความเร็วในการตัดมีค่าต่ำทำให้ชั้นของเหลวจะหลอมเหลวออกบนชิ้นงาน เมื่อความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้นถึงจุดๆ หนึ่ง จะเกิดคลื่นด้านบนของชั้นของเหลวที่หลอมเหลวออกมาบนชิ้นงาน ซึ่งส่งผลให้การกำจัดชั้นของเหลวที่หลอมเหลวและอัตราเร่งของการเกิดออกซิเดชั่นเพิ่มขึ้นในทันที เป็นผลให้รูปแบบที่จะเกิดขึ้นเป็นวงกลมบนขอบการตัด

Li และคณะ [3] ได้พิจารณาการตัดโลหะให้ไม่เกิดรอยริ้วที่เกิดจากการตัดแผ่นเหล็กกล้าด้วยเลเซอร์ ผลของการเกิดริ้วจะทำให้พื้นผิวของชิ้นงานหยาบทำให้คุณภาพการตัดลดลง ในการศึกษาการเกิดริ้วจะทำการตรวจสอบเพื่อทราบถึงลักษณะการตัดแผ่นเหล็กกล้าหนา 2 มิลลิเมตร โดยกำหนดกำลังที่ใช้ของเลเซอร์มีค่า 1000 วัตต์ และพิจารณาเงื่อนไขในการตัดที่ความเร็วการตัดที่สูง พบว่าจากแบบจำลองที่เสนอได้ทำนายความในการตัดวิกฤตสำหรับการตัดเพื่อไม่ให้เกิดริ้ว โดยสามารถสังเกตุได้ว่าจะเกิดริ้วขึ้นมาอีก เมื่อใช้ความเร็วในการตัดที่เหนือความเร็วในการตัดวิกฤต และผลจากการคาดการณ์เป็นที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับผลทดลอง

Kaplan [4] ได้ศึกษาถึงกระบวนการตัดโลหะด้วยแสงเลเซอร์ โดยอธิบายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งประกอบไปด้วยสมการสมดุลมวล, สมการสมดุลโมเมนตัม และสมการสมดุลพลังงาน และกำหนดชั้นของเหลวบริเวณหน้าตัดเป็นส่วนที่ควบคุมปริมาตร พบว่า

1. ความกว้างของรอยตัดลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วในการตัดในระหว่างการนำความร้อน แต่มุมของหน้าตัด และการดูดซับพลังงาน รวมถึงความหนา, ความเร็ว และอุณหภูมิของชั้นของเหลวจะเพิ่มขึ้น

2. สำหรับโลหะบาง ความเร็วในการตัดที่สูงสามารถเพิ่มอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนที่ส่งผ่านผิว ทำให้เกิดการหลอมเหลวที่หน้าตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สำหรับการตัดด้วยความเร็วที่สูง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนโลหะสามารถระเหยกลายเป็นไอ สามารถทำให้ความกว้างของรอยตัดขยายออกได้

4. ในการตัดเลเซอร์ด้วยแก๊สออกซิเจน โลหะเหลวทั้งหมดจะเกิดปฏิกิริยาที่ความเร็วที่ต่ำ แต่เมื่อเพิ่มความเร็ว ชั้นสนิมจะบางกว่าชั้นโลหะเหลว

5. อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงจาก 100% ที่ความเร็วต่ำ

6. การเพิ่มความดันของแก๊สจะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา และขีดจำกัดความเร็วจะเพิ่มขึ้น ยกเว้นเมื่อขีดจำกัดถูกจำกัดโดยความเข้มข้นของเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการตัดโลหะด้วยเลเซอร์

3.1 แบบจำลองกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างการตัดโลหะด้วยเลเซอร์

แบบจำลองนี้จะพิจารณาที่รอยตัดของชิ้นงาน โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ ในการตัด ซึ่งจะให้แสงเลเซอร์ที่มีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ สมมติฐานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์มีดังนี้

1. แบบจำลองจะไม่มีการระเหยกลายเป็นไอของโลหะจากการตัดด้วยเลเซอร์

2. แบบจำลองจะไม่มีการสะสมของชั้นโลหะบริเวณเหลวบริเวณขอบล่างของรอยตัด

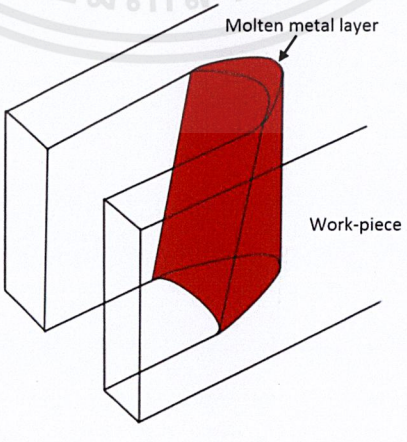
3. การกระจายของลำแสงเลเซอร์เป็นแบบ Gaussian

4. การกระจายของลำแสงเลเซอร์เป็นแบบทรงกระบอก

5. ชั้นสนิมที่เกิดขึ้นไม่มีผลต่อค่าการดูดซับพลังงานของแสงเลเซอร์ และจุดหลอมเหลวของชิ้นงาน

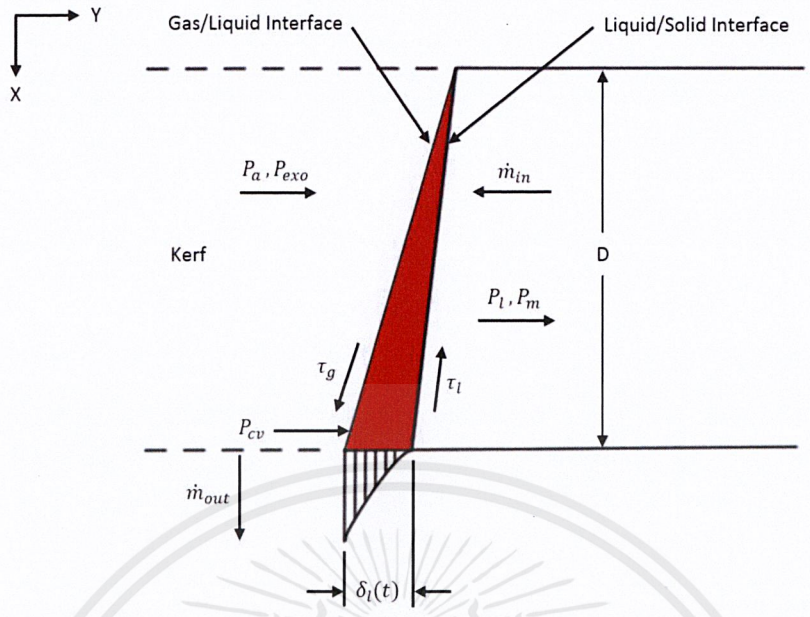
6. จุดโฟกัสของแสงเลเซอร์วางอยู่บนผิวของชิ้นงาน

ภาพจำลองกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างการตัดโลหะด้วยเลเซอร์ จากในรูปจะเห็นว่าภายในรอยตัดมีชั้นของของผสมระหว่างของแข็งกับของเหลว และของเหลวกับไอ จากนั้นโลหะเหลวจะถูกเป่าออกโดยแก๊ส ดังรูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 แสดงส่วนที่เป็นชั้นของเหลวที่เกิดในกระบวนการตัดโลหะด้วยเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงภาพตัดข้างของรูปที่ 3.1 เพื่อให้เห็นการไหลในรอยตัด

3.2 สมการสมดุลมวล

การตัดโลหะด้วยเลเซอร์ จะเกิดการหลอมเหลวของโลหะจากสถานะของแข็งกลายเป็นสถานะของเหลว โลหะเหลวจะถูกดันออกมาในรูปของหยดของของเหลว สมการสมดุลมวลสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\dot{m}_{in} + \dot{m}_{out} = \dot{m}_{cv} \tag{1}$$

เมื่อ $\dot{m}_{in}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลโลหะแข็งที่กลายเป็นโลหะเหลว (kg/s)

$\dot{m}_{out}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลโลหะเหลวที่ถูกดันออกจากรอยตัดในรูปหยดของของเหลว (kg/s)

$\dot{m}_{cv}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลโลหะเหลวที่เหลืออยู่ในปริมาตรควบคุม (kg/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลโลหะแข็งที่กลายเป็นโลหะเหลวสามารถหาได้จาก

$$\dot{m}_{in} = \rho_s w_k D V_c \tag{2}$$

เมื่อ ρ_s คือ ความหนาแน่นของโลหะแข็ง (kg/m^3)

w_k คือ ความกว้างของรอยตัด (m)

D คือ ความหนาของชิ้นงาน (m)

V_c คือ ความเร็วในการตัด (m/s)

อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลโลหะเหลวที่ถูกดันออกจากรอยตัดในรูปหยดของของเหลวสามารถหาได้จาก

$$\dot{m}_{out} = \int_0^{\delta_l(t)} V_m(t) \rho_l w_k dy \tag{3}$$

เมื่อ $\delta_l(t)$ คือ ความหนาของชั้นโลหะเหลว (m)

$V_m(t)$ คือ ความเร็วเฉลี่ยของโลหะเหลว (m/s)

ρ_l คือ ความหนาแน่นของโลหะเหลว (kg/m^3)

อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลโลหะเหลวที่เหลืออยู่ในปริมาตรควบคุมสามารถหาได้จาก

$$\dot{m}_{cv} = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}\rho_l w_k D \delta_l(t)\right) \tag{4}$$

3.3 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

ขอบเขตของการพิจารณาอยู่ในบริเวณควบคุมปริมาตร โดยโมเมนตัมของแก๊สจะเคลื่อนตัวเฉือนกับชั้นโลหะเหลว จนเกิดความเค้นเฉือนขับโลหะเหลวออกจากรอยตัด โดยสมการสมดุลโมเมนตัมสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\tau_g + \tau_l = 0 \tag{5}$$

เมื่อ τ_g คือ ความเค้นเฉือนบริเวณระหว่างแก๊สและโลหะเหลว (kg/s)

τ_l คือ ความเค้นเฉือนบริเวณระหว่างโลหะเหลวและโลหะแข็ง (kg/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้นเฉือนบริเวณระหว่างแก๊สและโลหะเหลวสามารถหาได้จาก

$$\tau_g = \left(\frac{c_f}{2}\right)_e \rho_\infty U_\infty \quad (6)$$

เมื่อ $\frac{c_f}{2}$ คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ตำแหน่งผิว

ρ_e คือ ความหนาแน่นที่ขอบของบริเวณขอบเขต (kg/m^3)

U_∞ คือ ความเร็วบริเวณ free-stream (m/s)

ความเค้นเฉือนบริเวณระหว่างโลหะเหลวและโลหะแข็งสามารถหาได้จาก

$$\tau_l = \mu_l \frac{u_g}{\delta_l(t)} \quad (7)$$

เมื่อ μ_l คือ ความหนืดพลวัตของโลหะเหลว (Ns/m^2)

u_g คือ ความเร็วที่ผิวของชั้นโลหะเหลวบริเวณระหว่างแก๊สและโลหะเหลว (m/s)

โดย สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ตำแหน่งผิวสำหรับการไหลแบบราบเรียบสามารถมาได้จาก

$$\frac{c_f}{2} = \frac{0.664}{\sqrt{Re}} \quad (8)$$

และ Reynolds Number หาได้จาก

$$Re = \frac{\rho_e V_m(t) D}{\mu_e} \quad (9)$$

3.4 สมการอนุรักษ์พลังงาน

สมการสมดุลพลังงานจะพิจารณาจากพลังงานที่เพิ่มขึ้น และลดลง โดยสมการจะสมดุลเมื่อมีตัวแปรที่เพิ่มพลังงาน เท่ากับตัวแปรที่ลดพลังงาน โดยสมการสมดุลพลังงานสามารถเขียนได้ดังนี้

$$P_a + P_{exo} = P_l + P_m + P_{cv} \quad (10)$$

เมื่อ P_a คือ พลังงานจากแสงเลเซอร์ที่ดูดซับไว้ได้ (W)

P_{exo} คือ พลังงานจากการคายความร้อน (W)

P_l คือ พลังงานของโลหะเหลวที่บริเวณหน้าตัด (W)

P_m คือ พลังงานในการเปลี่ยนสถานะ (W)

P_{cv} คือ พลังงานที่เหลืออยู่ในปริมาตรควบคุม (W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานจากแสงเลเซอร์ที่ดูดซับไว้ได้สามารถหาได้จาก [6]

$$P_a = A_m \int_0^{x_t} I(r, z = 0) r\pi dr + A_m \int_{x_b}^{0} I(r, z = D) r\pi dr \quad (11)$$

เมื่อ A_m คือ ค่าการดูดซับสูงสุดของ Fresnel มีค่าเท่ากับ 0.41 [4]

$I(r, z)$ คือ ความเข้มข้นของแสงเลเซอร์ (W/m^2)

x_t คือ ระยะจากศูนย์กลางเลเซอร์ถึงขอบบนของหน้าตัด (m)

x_b คือ ระยะจากศูนย์กลางเลเซอร์ถึงขอบล่างของหน้าตัด (m)

w_0 คือ รัศมีของแสงเลเซอร์ที่ตำแหน่งเอว (m)

$w(z)$ คือ รัศมีของแสงเลเซอร์ที่ตำแหน่ง z (m)

โดยความเข้มข้นของแสงเลเซอร์หาได้จาก [6]

$$I(r, z) = \frac{2P}{\pi w(z)^2} exp\left(\frac{-2r^4}{\pi w(z)^2}\right) \quad (12)$$

พลังงานจากการคายความร้อนสามารถหาได้จาก

$$P_{exo} = \dot{m}_{out,FeO} \Delta H|_{T(t)} \quad (13)$$

เมื่อ $\dot{m}_{out,FeO}$ คือ อัตราการเกิดสนิมที่บริเวณระหว่างแก๊สกับโลหะเหลว (kg/s)

$\Delta H|_{T(t)}$ คือ คือ เอนทัลปีของปฏิกิริยา (J/kg)

โดยพิจารณาจาก [5]

$$\dot{m}_{out,FeO} = 0.26\dot{m}_{out} \quad (14)$$

พลังงานของโลหะเหลวที่บริเวณหน้าตัดสามารถหาได้จาก [1]

$$P_l = V_m(t)\delta_l(t)w_k\rho_l\left[c_{p,l}\left(T_f(t) - T_m\right)\right] \quad (15)$$

เมื่อ $T_f(t)$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวของชั้นโลหะเหลว (K)

โดยอุณภูมิเฉลี่ยที่ผิวของโลหะเหลวสามารถหาได้จาก

$$T_f(t) = \frac{T_l(t) + T_m}{2} \quad (16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $T_l(t)$ คือ อุณหภูมิที่ผิวของชั้นโลหะเหลว (K)

พลังงานในการเปลี่ยนสถานะสามารถหาได้จาก

$$P_m = \rho_e V_c D w_k (c_{p,l} T_l(t) - c_{p,g} T_a) \quad (17)$$

เมื่อ T_a คือ อุณหภูมิของแก๊สภายในกระบอกเลเซอร์ (K)

H_m คือ เอนทัลปีของจุดหลอมเหลว

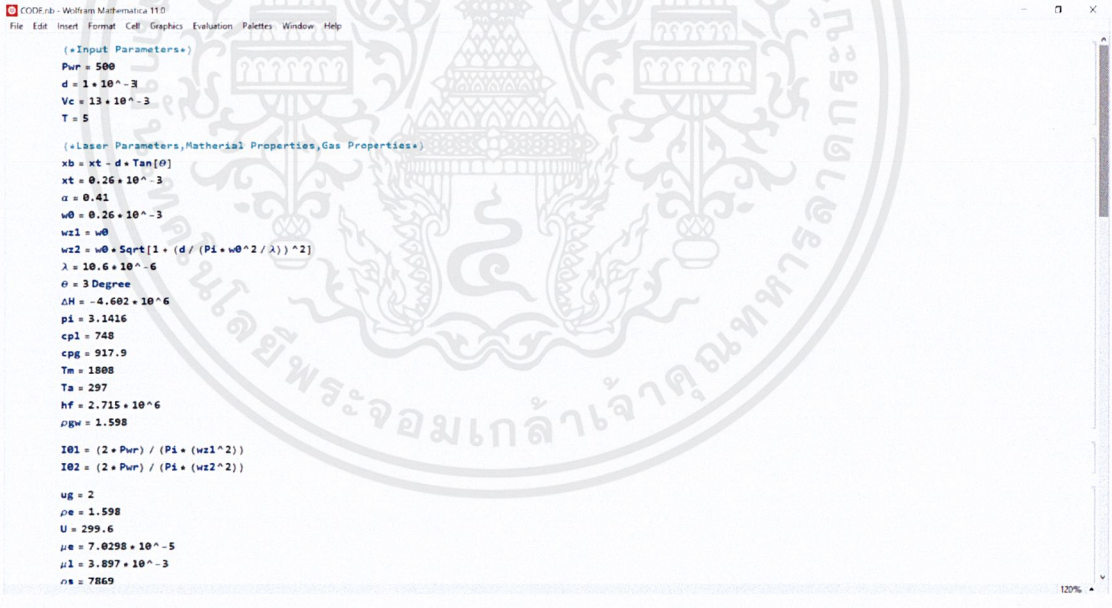
พลังงานที่เหลืออยู่ในปริมาตรควบคุมสามารถหาได้จาก

$$P_{cv} = \dot{m}_{cv} c_{p,l} T_f + \dot{m}_{cv} h_f \quad (18)$$

เมื่อ h_f คือ ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (J/kg)

3.5 ขั้นตอนการคำนวณ

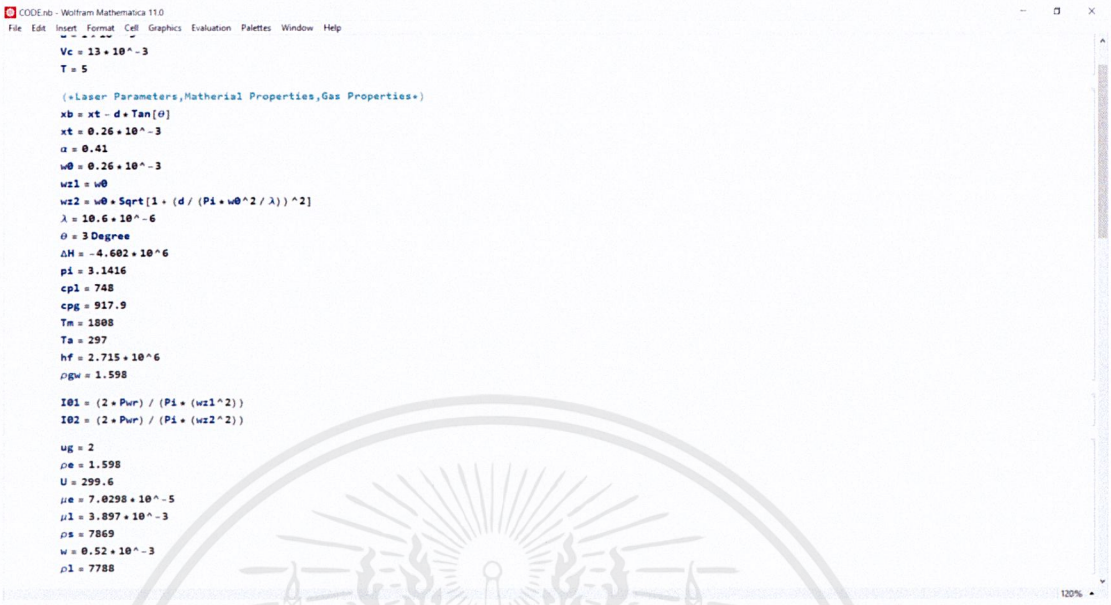
1. พิมพ์ตัวแปรที่สามารถปรับค่าได้ ลงไปในโปรแกรม Mathematica และบันทึกค่า



รูปที่ 3.3 โปรแกรม Mathematica สำหรับตัวแปรที่สามารถปรับค่าได้

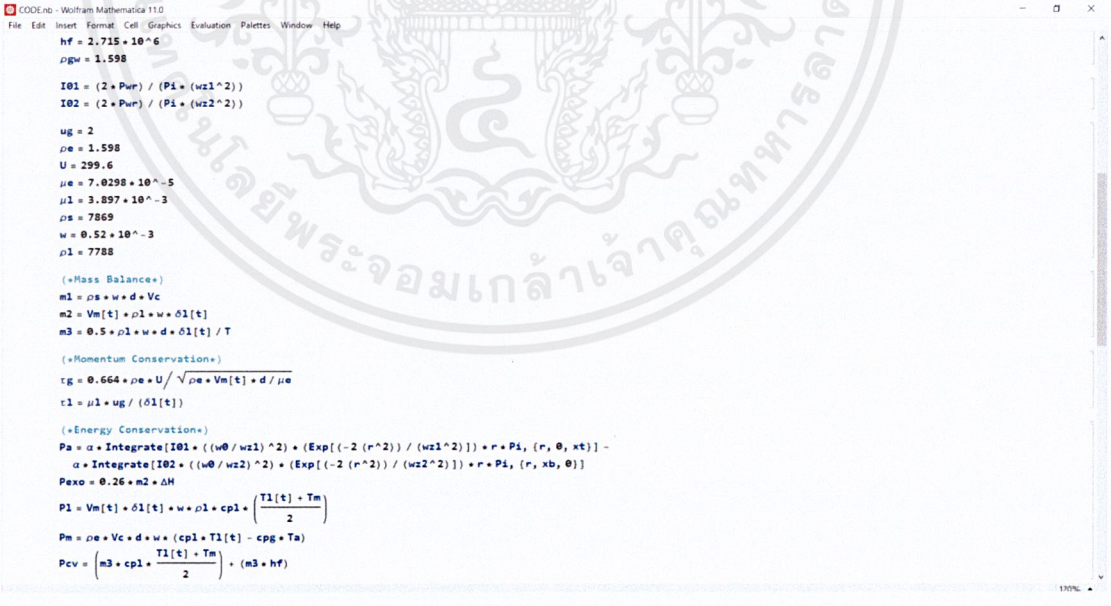
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. พิมพ์ค่าคุณสมบัติของวัสดุ, คุณสมบัติของเลเซอร์ และ คุณสมบัติของแก๊ส ลงไปในโปรแกรม Mathematica และบันทึกค่า



รูปที่ 3.4 โปรแกรม Mathematica สำหรับตัวแปรคุณสมบัติต่างๆ

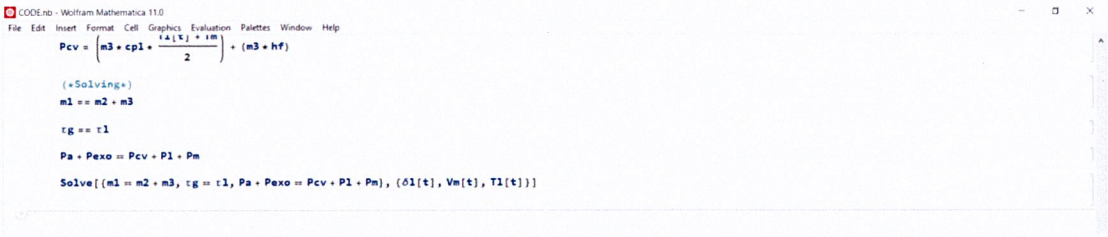
3. พิมพ์สมการสมดุลมวล, สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน และบันทึกค่า



รูปที่ 3.5 โปรแกรม Mathematica สำหรับสมการสมดุลมวล, สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน

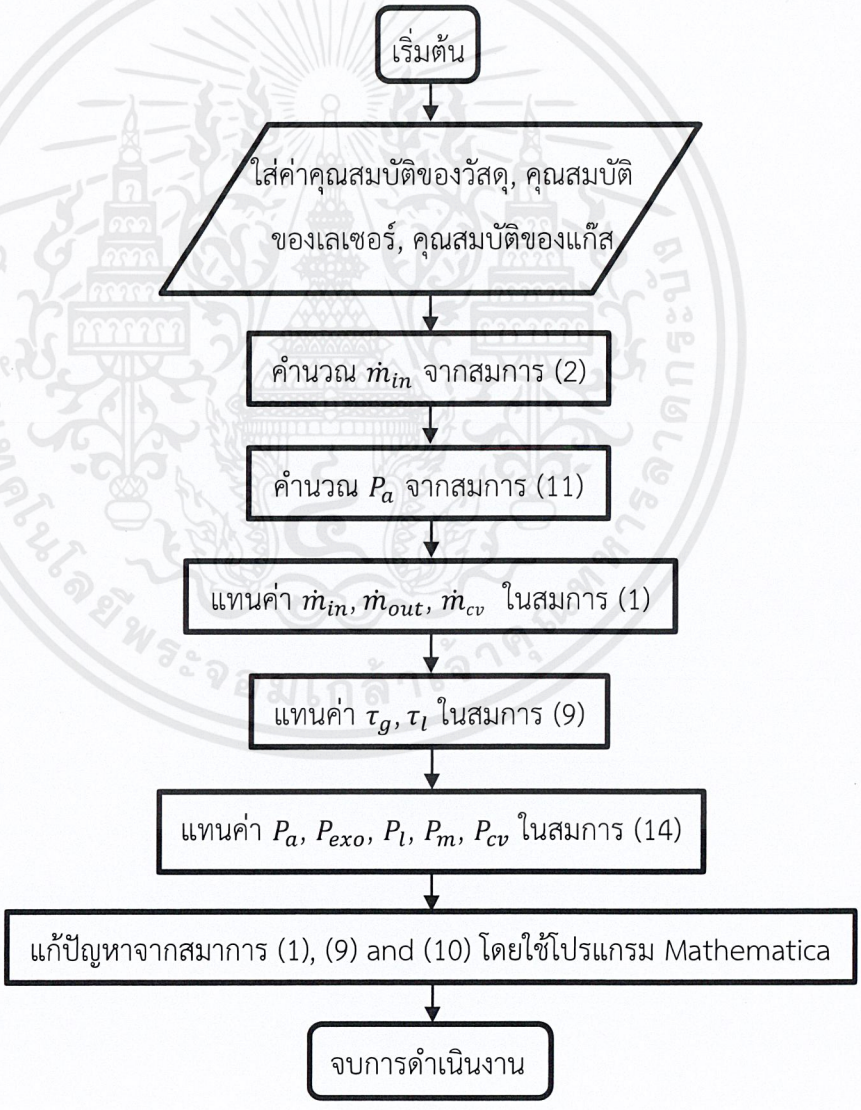
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. แก้ปัญหาจากสมการสมดุลมวล, สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน เพื่อหาตัวแปรไม่ทราบค่าได้แก่ ความหนาของชั้นโลหะเหลว, ความเร็วของโลหะเหลว และ อุณหภูมิที่ผิวของโลหะเหลว



รูปที่ 3.6 โปรแกรม Mathematica การแก้ปัญหาเพื่อหาตัวแปรไม่ทราบค่า

3.6 แผนผังขั้นตอนการคำนวณ



รูปที่ 3.7 แผนผังขั้นตอนการคำนวณเพื่อหาตัวแปรไม่ทราบค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

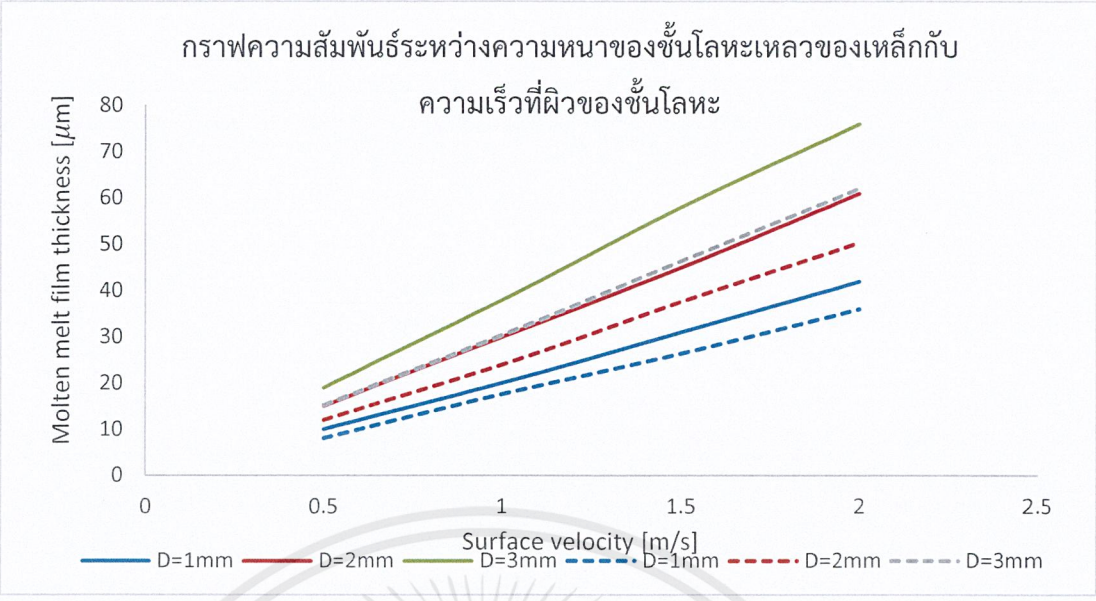
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการตัดด้วยเลเซอร์นั้นจะเลือกใช้วัสดุของชิ้นงานที่ถูกตัดเป็นเหล็กกล้า ซึ่งมีคุณสมบัติตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางความร้อนของเหล็กกล้า

คุณสมบัติของวัสดุ	เหล็กกล้า
ความหนาแน่นสถานะของแข็ง, ρ_s (kg/m^3)	7800
ความหนาแน่นสถานะของเหลว, ρ_l (kg/m^3)	6980
ความร้อนจำเพาะของของแข็ง, $c_{p.\ s}$ (J/kg K)	628
ความร้อนจำเพาะของของเหลว, $c_{p.\ l}$ (J/kg K)	748
จุดหลอมเหลว, T_m (K)	1808
ความหนืดพลวัตของโลหะเหลว, μ_l (Ns/m^2)	3.897×10^{-3}
ค่าการดูดซับสูงสุดของ Fresnel, A_m	0.41

โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการตัดโลหะด้วยเลเซอร์ ต้องมีการแก้สมการสมดุลมวล สมดุลโมเมนตัม และสมดุลพลังงาน แต่สมการทั้งสามนั้นเป็นสมการเชิงอนุพันธ์จึงมีการเลือกใช้โปรแกรม Wolfram Mathematica มาช่วยในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ โดยจากผลของแบบจำลองทางตณิตศาสตร์ที่ได้มานั้น สามารถอธิบายได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

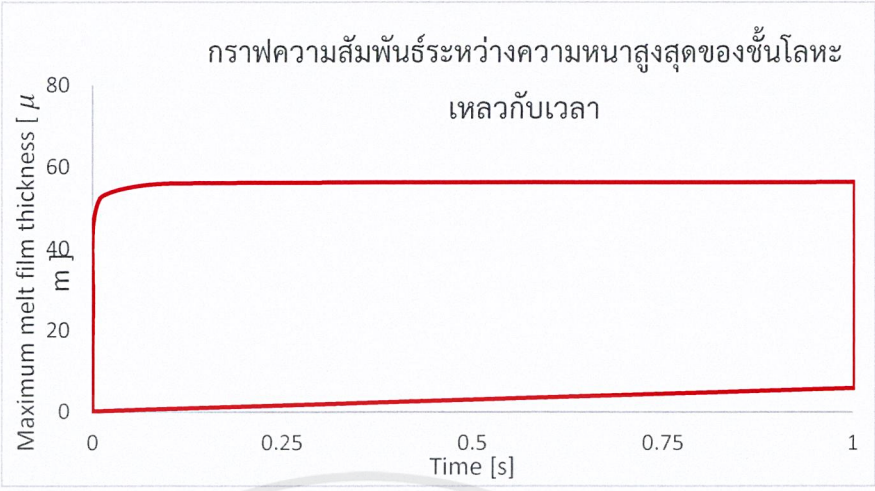


รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นโลหะเหลวของเหล็กกับความเร็วที่ผิวของชั้นโลหะ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นโลหะเหลวของเหล็กกับความเร็วที่ผิวของชั้นโลหะที่ได้จากคำนวณแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วของผิวโลหะเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนาของชั้นโลหะเหลวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยความเร็วที่ผิวของโลหะเท่ากับ 2 เมตรต่อวินาที จะทำให้เกิดความหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลว [1]

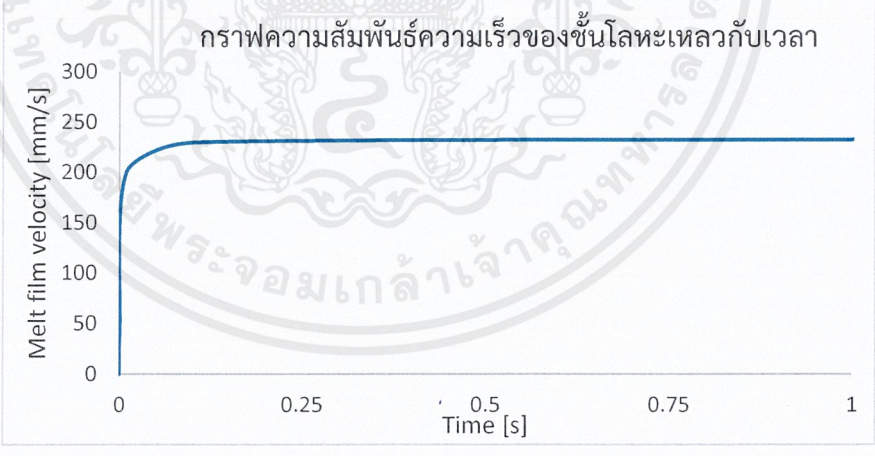
จากการเทียบผล[1] ที่ค่าความหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลว ค่าความคลาดเคลื่อนที่ความหนาสูงสุดของชิ้นงาน 1 มิลลิเมตร คือ 16.67% ค่าความคลาดเคลื่อนที่ความหนาสูงสุดของชิ้นงาน 2 มิลลิเมตร คือ 17.37% ค่าความหนาสูงสุดของชิ้นงาน 3 มิลลิเมตร คือ 18.42% โดยค่าความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลวกับเวลา

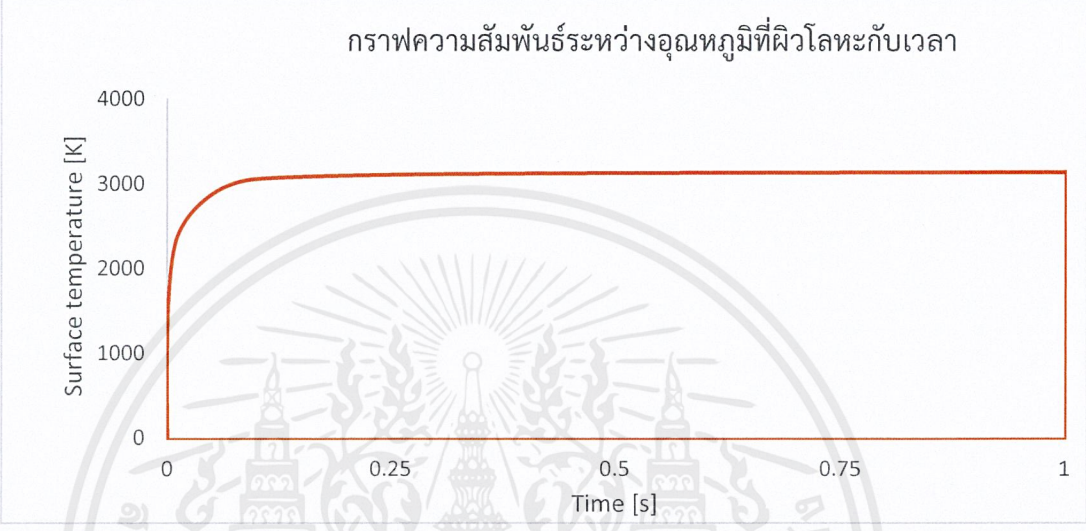
กราฟจะมีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะคงตัว ที่มีค่าความหนาของสูงสุดของชั้นโลหะเหลวประมาณ 56.36 ไมโครเมตร โดยใช้ P = 500 วัตต์ , V_c = 13 มิลลิเมตรต่อวินาที , ความหนาของชิ้นงาน = 1 มิลลิเมตรกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลวกับเวลาที่ได้จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจากจุดเริ่มต้นถึงเวลา 0.1 วินาที



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ความเร็วของชั้นโลหะเหลวกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

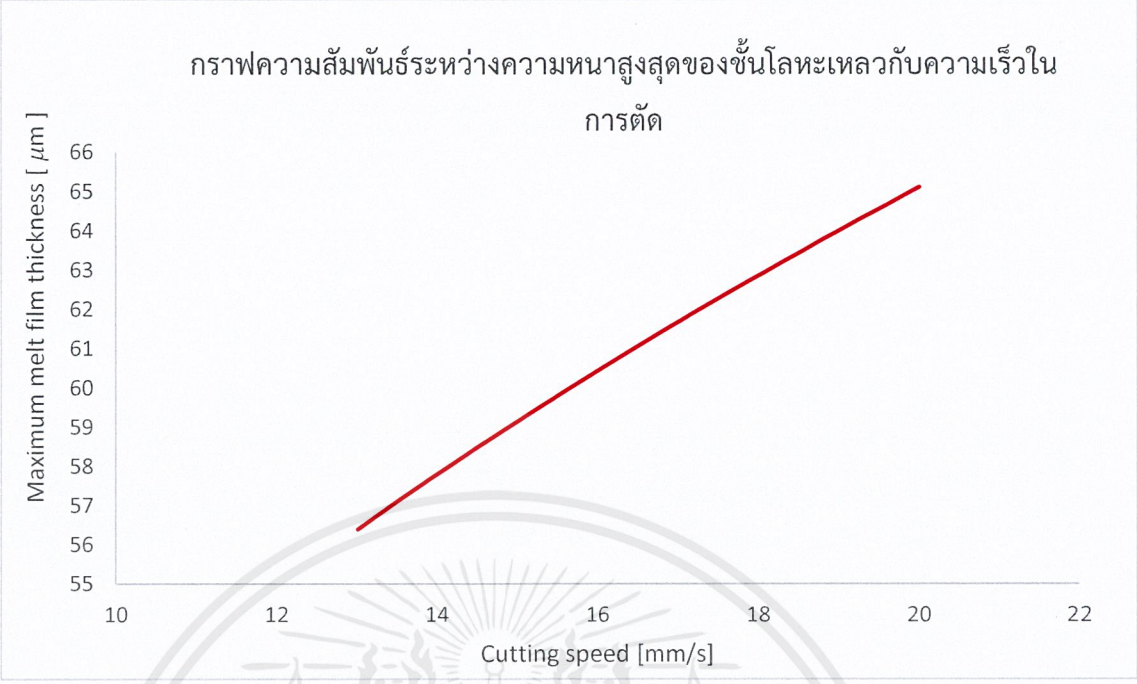
ความสัมพันธ์ความเร็วของชั้นโลหะเหลวกับเวลาที่ได้จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจากจุดเริ่มต้นถึงเวลา 0.1 วินาที กราฟจะมีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะคงตัว ที่มีค่าความเร็วของชั้นโลหะเหลวประมาณ 232.5 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยใช้ P = 500 วัตต์ , V_c = 13 มิลลิเมตรต่อวินาที , ความหนาของชิ้นงาน = 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวโลหะกับเวลา

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวโลหะกับเวลาที่ได้จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจากจุดเริ่มต้นถึงเวลา 0.1 วินาที กราฟจะมีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะคงตัว ที่มีค่าของอุณหภูมิที่ผิวโลหะประมาณ 3136 เคลวิน โดยใช้ P = 500 วัตต์ , V_c = 13 มิลลิเมตรต่อวินาที , ความหนาของชิ้นงาน = 1 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลวกับความเร็วในการตัด

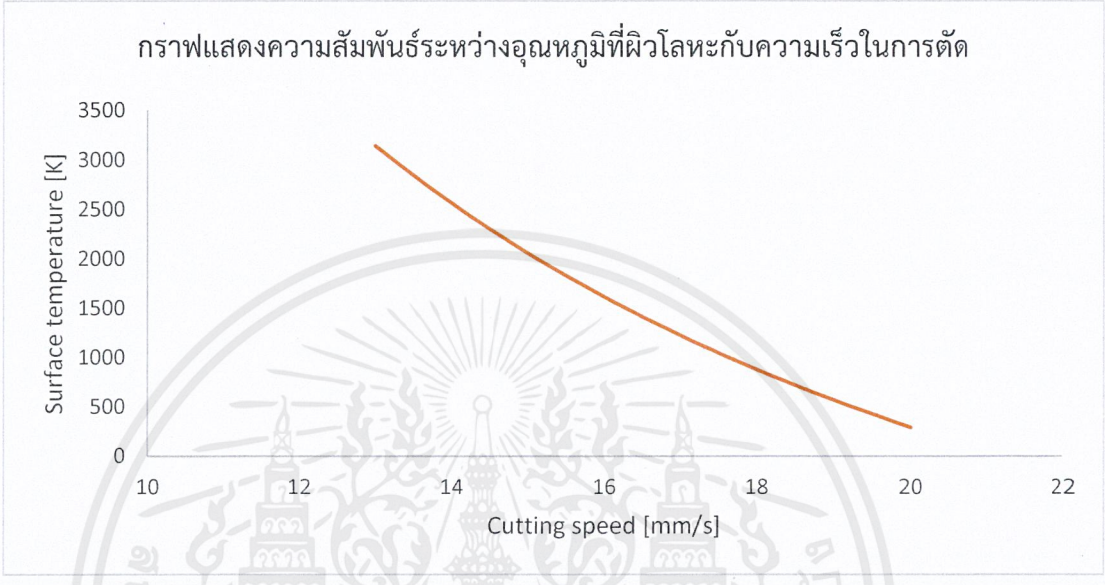
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลวกับความเร็วในการตัดที่ได้จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าหากความเร็วในการตัดมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสูงสูงสุดของชั้นโลหะเหลวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยใช้ P = 500 วัตต์ , V_c = 13 มิลลิเมตรต่อวินาที , ความหนาของชิ้นงาน = 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของชั้นโลหะเหลวกับความเร็วในการตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

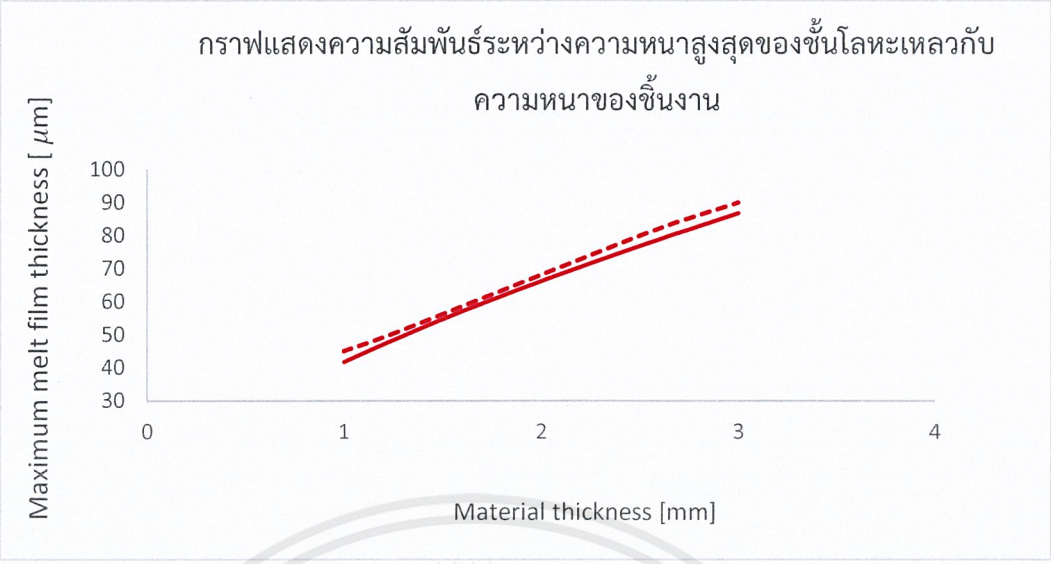
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของชั้นโลหะเหลวกับความเร็วในการตัดที่ได้จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า ค่าของความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วของชั้นโลหะเหลวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจาก โดยใช้ P = 500 วัตต์ , V_c = 13 มิลลิเมตรต่อวินาที , ความหนาของชิ้นงาน = 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวโลหะกับความเร็วในการตัด

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวโลหะกับความเร็วในการตัดที่ได้จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า ค่าของความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าของอุณหภูมิที่ผิวโลหะลดลง เนื่องจากค่าความเร็วในการตัดจะแปรผันตรงกับพลังที่สูญเสียของระบบจึงเป็นผลให้ค่าอุณหภูมิที่ผิวโลหะลดลง โดยใช้ P = 500 วัตต์ , V_c = 13 มิลลิเมตรต่อวินาที , ความหนาของชิ้นงาน = 1 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลวกับความหนาของชิ้นงาน

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลวกับความหนาของชิ้นงาน จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่าความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยใช้ P = 500 วัตต์ , V_C = 13 มิลลิเมตรต่อวินาที , ความหนาของชิ้นงาน = 1 มิลลิเมตร

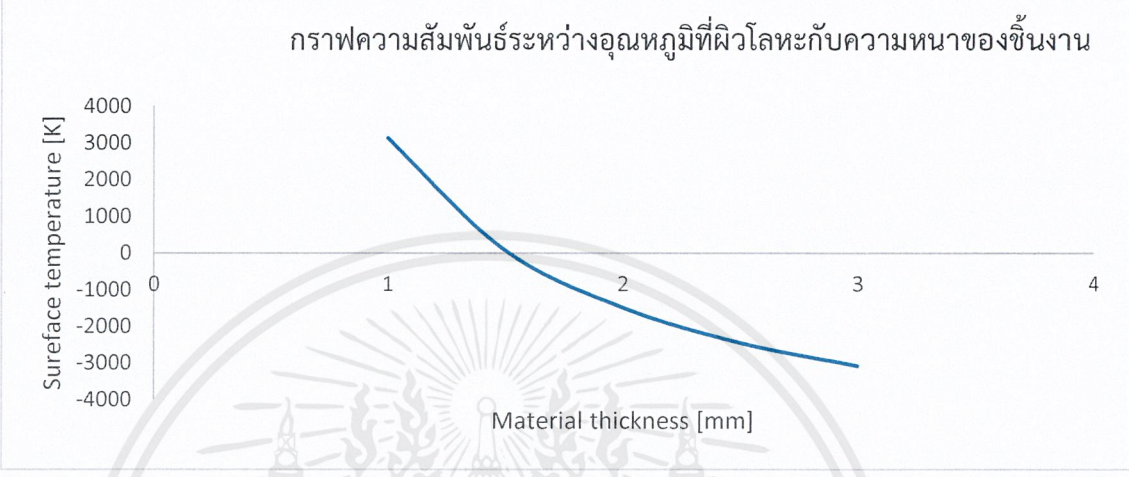
จากการเทียบผล [9] ค่าความคลาดเคลื่อนที่ความหนา 1 มิลลิเมตรเท่ากับ 7.82 % ค่าความคลาดเคลื่อนที่ความหนา 2 มิลลิเมตรเท่ากับ 5.67 % ค่าความคลาดที่ความหนา 3 มิลลิเมตรเท่ากับ 4.65% โดยค่าความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของชั้นโลหะเหลวกับความหนาของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

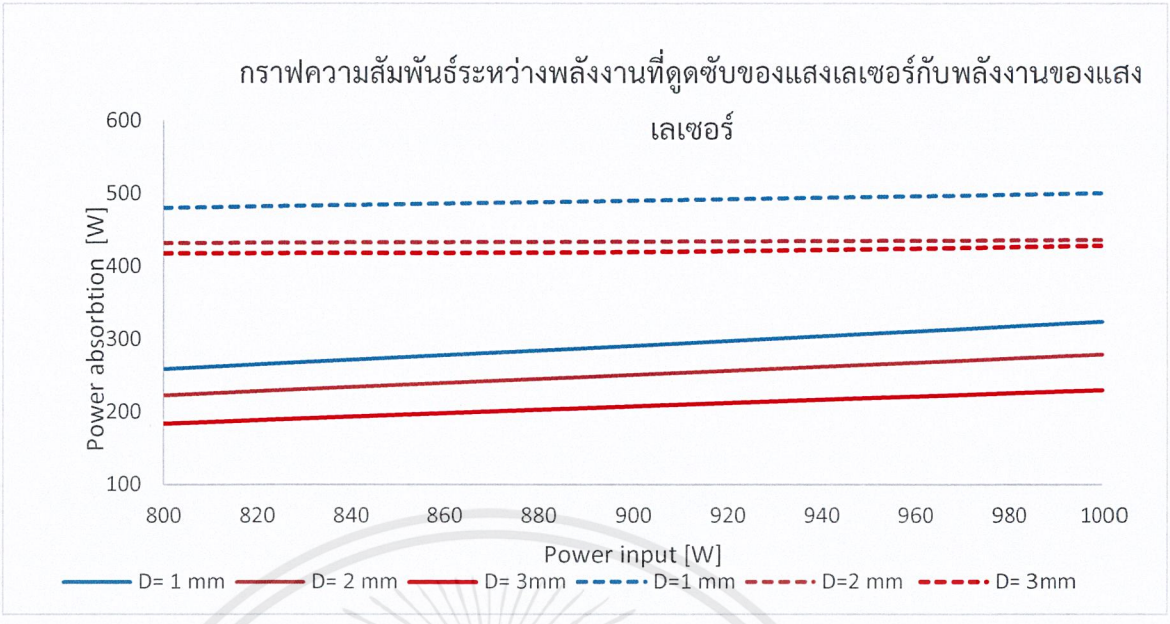
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของชั้นโลหะเหลวกับความหนาของชิ้นงานจากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่าความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเร็วของชั้นโลหะเหลวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยใช้ P = 500 วัตต์ , V_c = 13 มิลลิเมตรต่อวินาที , ความหนาของชิ้นงาน = 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวโลหะกับเวลา

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวโลหะกับความหนาของชิ้นงาน จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าหากใช้ความหนาของชิ้นงานเท่ากับ 1 มิลลิเมตรจะได้ค่าของอุณหภูมิที่ผิวของโลหะ 3134 เคลวิน โดยใช้ P = 500 วัตต์ , V_c = 13 มิลลิเมตรต่อวินาที , ความหนาของชิ้นงาน = 1 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าเกิน 1808 เคลวินเป็นจุดหลอมเหลวของโลหะ ทำให้สามารถทำนายได้ว่าที่ความหนา 1 มิลลิเมตรหากใช้กำลังของแสงเลเซอร์ 500 วัตต์จะเกิดการหลอมเหลวทำให้เกิดชั้นความหนาของโลหะเหลว และ หากความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าอุณหภูมิที่ผิวของโลหะลดลงซึ่งแสดงให้เห็นว่าจะไม่เกิดการหลอมเหลว หากต้องการให้เกิดการหลอมเหลวจำเป็นต้องเพิ่มกำลังของแสงเลเซอร์ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ดูดซับของแสงเลเซอร์กับพลังงานของแสงเลเซอร์

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ดูดซับของแสงเลเซอร์กับพลังงานของแสงเลเซอร์ จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานของแสงเลเซอร์มากขึ้นจะทำให้ค่าพลังงานที่ดูดซับของแสงเลเซอร์เพิ่มขึ้นด้วย โดยความหนาของชิ้นงานยิ่งสูงขึ้นจะทำให้พลังงานที่ดูดซับของแสงเลเซอร์มีแนวโน้มลดลง

จากการเทียบผล [1] ค่าความคลาดเคลื่อนพลังงานของแสงเลเซอร์ที่ 800 วัตต์ ความหนาของชิ้นงาน 1 มิลลิเมตรจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 46.04 % ความหนาของชิ้นงาน 2 มิลลิเมตรจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 48.37 % ความหนาของชิ้นงาน 3 มิลลิเมตรจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 55.98 %

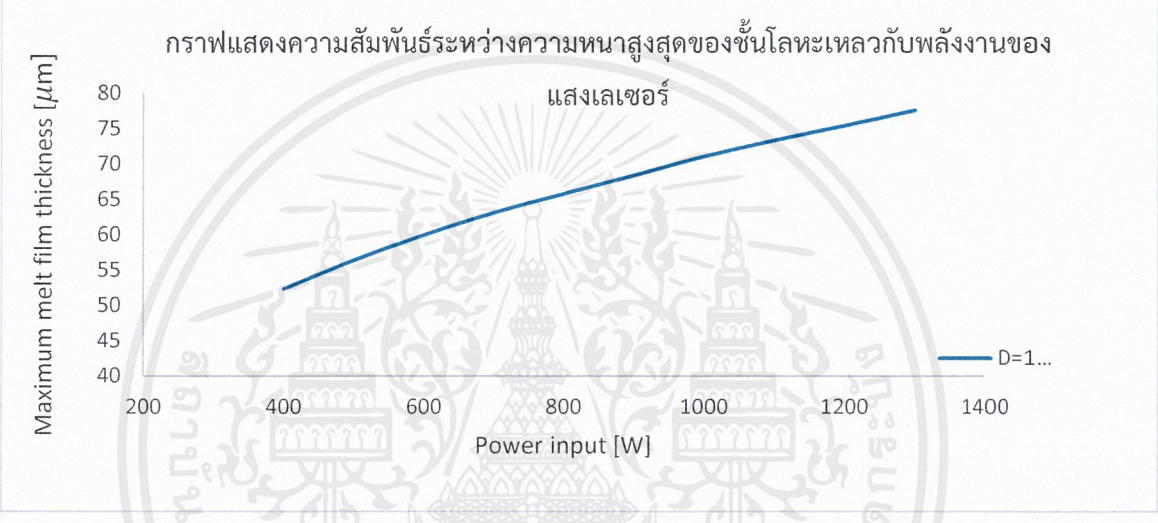
ค่าความคลาดเคลื่อนพลังงานของแสงเลเซอร์ที่ 900 วัตต์ ความหนาของชิ้นงาน 1 มิลลิเมตรจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 40.64 % ความหนาของชิ้นงาน 2 มิลลิเมตรจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 42.17 % ความหนาของชิ้นงาน 3 มิลลิเมตรจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 50.47 %

ค่าความคลาดเคลื่อนพลังงานของแสงเลเซอร์ที่ 1000 วัตต์ ความหนาของชิ้นงาน 1 มิลลิเมตรจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 35.20 % ความหนาของชิ้นงาน 2 มิลลิเมตรจะมีค่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลาดเคลื่อนเท่ากับ 36.01 % ความหนาของชิ้นงาน 3 มิลลิเมตรจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 46.26 %

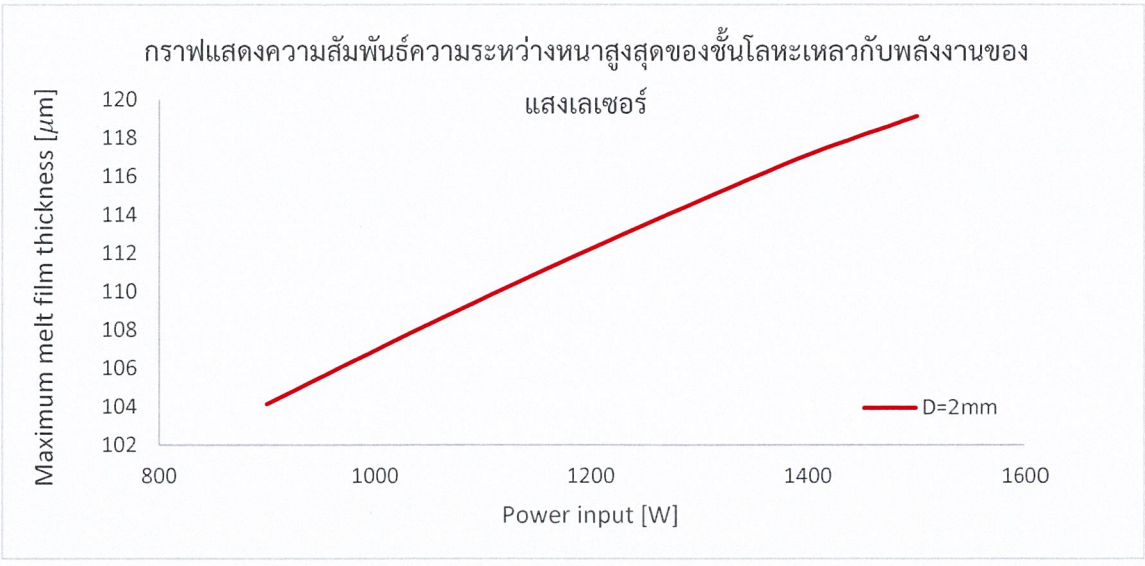
การที่มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากสภาวะการใช้งานและตัวแปรที่ไม่ทราบค่าทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อน แต่ผลการทดลองมีแนวโน้มที่คล้ายกันคือ ความหนาของชิ้นงานที่บาง จะทำให้เกิดพลังงานที่ดูดซับสูงกว่าชิ้นงานที่หนากว่าและค่าแนวโน้มค่าของความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อพลังงานของแสงเลเซอร์เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลวกับพลังงานของแสงเลเซอร์

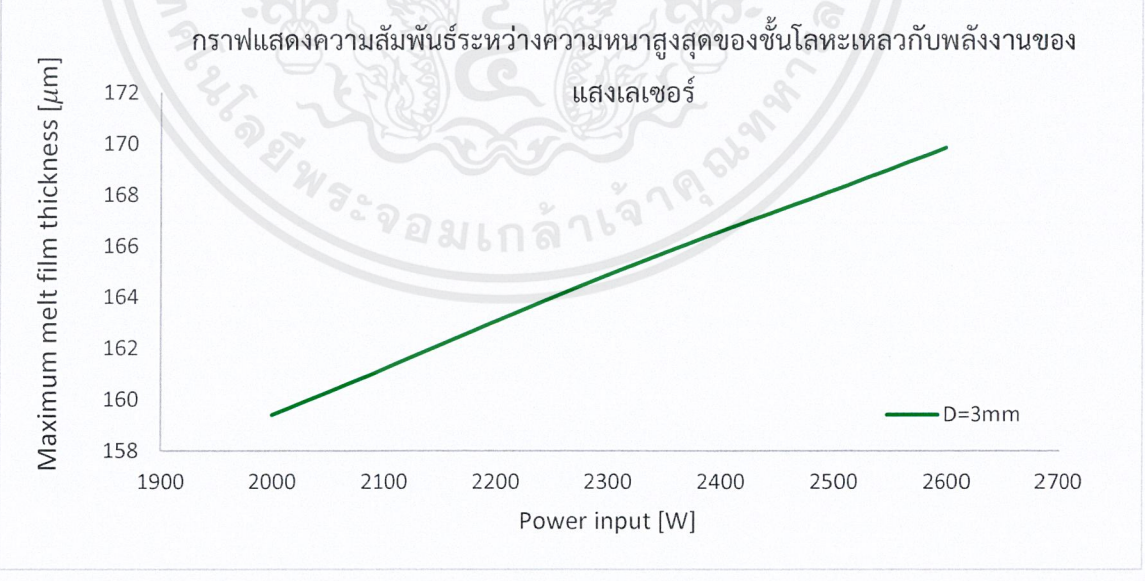
กราฟแสดงความสัมพันธ์ความหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลวกับพลังงานของแสงเลเซอร์ จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานของแสงเลเซอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยใช้ P = 500 วัตต์ , V_c = 13 มิลลิเมตรต่อวินาที , ความหนาของชิ้นงาน = 1 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความระหว่างหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลวกับพลังงานของแสงเลเซอร์

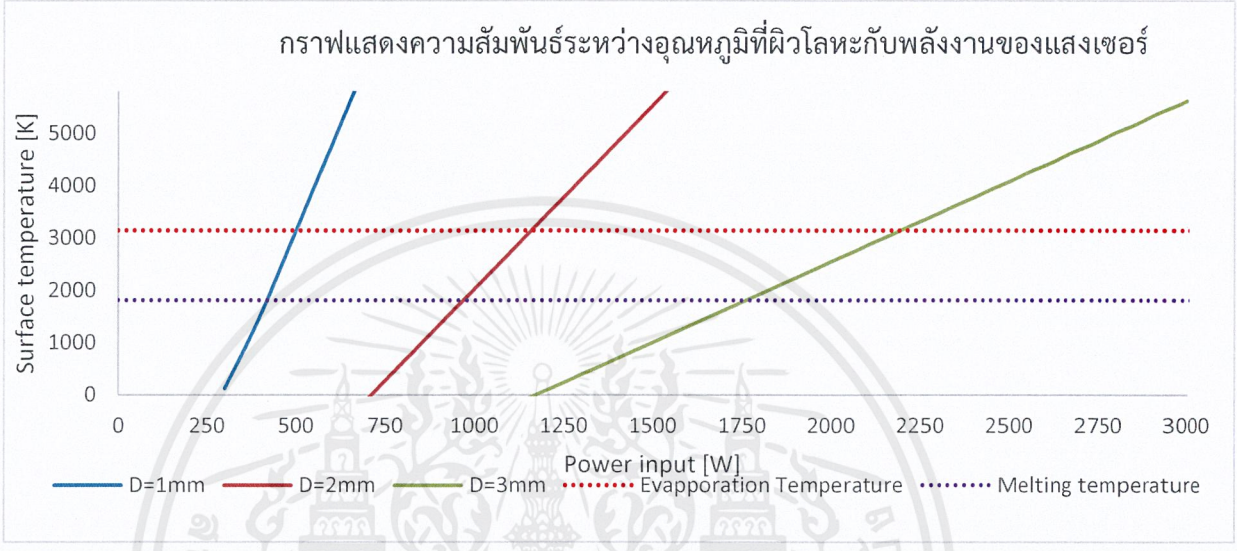
กราฟแสดงความสัมพันธ์ความหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลวกับพลังงานของแสงเลเซอร์ จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานของแสงเลเซอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยใช้ P = 500 วัตต์ , V_C = 13 มิลลิเมตรต่อวินาที , ความหนาของชิ้นงาน = 2 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลวกับพลังงานของแสงเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ความหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลวกับพลังงานของแสงเลเซอร์ จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานของแสงเลเซอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนาสูงสุดของชั้นโลหะเหลวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยใช้ P = 500 วัตต์ , V_c = 13 มิลลิเมตรต่อวินาที , ความหนาของชิ้นงาน = 3 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวโลหะกับพลังงานของแสงเซอร์

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวโลหะกับพลังงานของแสงเซอร์ จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า หากชิ้นงานที่ใช้มีความหนาที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้พลังงานของแสงเลเซอร์ที่ใช้ต้องมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาที่เพิ่มขึ้นหากใช้พลังงานของแสงเลเซอร์เท่าเดิมจะทำให้อุณหภูมิที่ผิวของโลหะลดลง หากอุณหภูมิที่ผิวลดลงต่ำกว่า 1808 เคลวิน โลหะจะไม่เกิดการหลอมละลายทำให้จำเป็นต้องเพิ่มพลังงานของแสงเลเซอร์เพื่อให้เกิดการหลอมละลาย โดยใช้ V_c = 13 มิลลิเมตรต่อวินาที

ช่วงการใช้งานของพลังงานของแสงเลเซอร์ที่ทำให้เกิดการหลอมละลาย ความหนาของชิ้นงาน 1 มิลลิเมตร ต้องใช้พลังงานของแสงเลเซอร์เท่ากับ 400-500 วัตต์ ความหนาของชิ้นงาน 2 มิลลิเมตร ต้องใช้พลังงานของแสงเลเซอร์เท่ากับ 1000-1200 วัตต์ ความหนาของชิ้นงาน 3 มิลลิเมตร ต้องใช้พลังงานของแสงเลเซอร์เท่ากับ 1800-2200 วัตต์ หากอุณหภูมิที่ผิวโลหะมากกว่า 3143 เคลวิน จะส่งผลให้โลหะมีแนวโน้มเกิดการระเหยกลายเป็นไอ จึงจำเป็นต้องมีช่วงการใช้งานของพลังงานของแสงเลเซอร์กับความหนาของชิ้นงานควบคุมคุณภาพของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงงานนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการตัดโลหะด้วยเลเซอร์ โดยแบบจำลองนี้ได้ พิจารณาเป็นการตัดเหล็กกล้า (mild steel) ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ และใช้แก๊สออกซิเจนในการช่วยกำจัดชั้นโลหะเหลว เพื่อคำนวณตัวแปรไม่ทราบค่าอันได้แก่ ความหนาของชั้นโลหะเหลว, ความเร็วของชั้นโลหะเหลว และอุณหภูมิที่ผิวของโลหะเหลว จากสมการสมดุลมวล , สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงานด้วยโปรแกรม Mathematica ผลที่ได้พบว่า

1. ชั้นโลหะเหลวจะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 0.05 วินาที
2. ชั้นโลหะเหลวจะมีค่าสูงสุดเมื่อความเร็วที่ผิวของชั้นโลหะเหลวมีค่าเข้าสู่สูงสุด
3. ค่าความคลาดเคลื่อนมีผลมาจากตัวแปรไม่ทราบค่าบางค่า ได้แก่ ค่าการดูดซับของโลหะ, ความกว้างของรอยตัด, รัศมีของเอวของแสงเลเซอร์, ความหนาของชั้นสนิมของโลหะเหลว และตำแหน่งของจุดโฟกัส
4. ถ้าความเร็วในการตัดน้อยกว่าความเร็วของชั้นโลหะเหลวจะเกิดรอยริ้วบริเวณรอยตัด
5. อุณหภูมิที่ผิวของชั้นโลหะเหลวจะมากกว่าจุดหลอมเหลวของเหล็กกล้าหรือที่ 1808 เคลวิน
6. ค่าของชั้นโลหะเหลวประมาณเป็นค่าความหยาบของรอยตัด

5.2 วิจารณ์ผลจากแบบจำลอง

โครงงานนี้เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการตัดโลหะด้วยเลเซอร์ และทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรอยตัดเพื่อลดการลองผิดลองถูก พัฒนาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข 2 มิติ เมื่อเปรียบเทียบผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และ ผลการทดลองที่มีผู้ศึกษาไว้ก่อนหน้านี้พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำขึ้นมีผลใกล้เคียงกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และ ผลการทดลองที่มีผู้ศึกษาไว้ก่อนหน้านี้ ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยที่เกิดจากปัจจัยบางอย่างเช่น ค่าการดูดซับของโลหะ, ความกว้างของรอยตัด, รัศมีของเอวของแสงเลเซอร์, ความหนาของชั้นสนิมของโลหะเหลว และ ตำแหน่งของจุดโฟกัส

5.3 ข้อเสนอแนะ

ถ้ามีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตควรศึกษาตัวแปรที่ไม่มีสมการทางคณิตศาสตร์อธิบายไว้ได้อย่าง ความกว้างของรอยตัด หรือการเพิ่มสมการเกี่ยวกับแก๊สที่ช่วยในการกำจัดชั้นโลหะเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

โปรแกรมในการคำนวณ

```
(*Input Parameters*)
Pwr = 500
d = 1 * 10^-3
Vc = 13 * 10^-3
T = 5

(*Laser Parameters,Matherial Properties,Gas Properties*)
xb = xt - d * Tan[θ]
xt = 0.26 * 10^-3
α = 0.41
w0 = 0.26 * 10^-3
wz1 = w0
wz2 = w0 * Sqrt[1 + (d / (Pi * w0^2 / λ))^2]
λ = 10.6 * 10^-6
θ = 3 Degree
ΔH = -4.602 * 10^6
pi = 3.1416
cpl = 748
cpg = 917.9
Tm = 1808
Ta = 297
hf = 2.715 * 10^6
ρgw = 1.598

I01 = (2 * Pwr) / (Pi * (wz1^2))
I02 = (2 * Pwr) / (Pi * (wz2^2))

ug = 2
ρe = 1.598
U = 299.6
μe = 7.0298 * 10^-5
μl = 3.897 * 10^-3
ρs = 7869
w = 0.52 * 10^-3
ρl = 7788
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
(*Mass Balance*)
m1 = ρs * w * d * Vc
m2 = Vm[t] * ρl * w * δl[t]
m3 = 0.5 * ρl * w * d * δl[t] / T

(*Momentum Conservation*)
τg = 0.664 * ρe * U / √(ρe * Vm[t] * d / μe)
τl = μl * ug / (δl[t])

(*Energy Conservation*)
Pa = α * Integrate[I01 * ((w0 / wz1) ^2) * (Exp[(-2 (r^2)) / (wz1^2)]) * r * Pi, {r, 0, xt}] -
  α * Integrate[I02 * ((w0 / wz2) ^2) * (Exp[(-2 (r^2)) / (wz2^2)]) * r * Pi, {r, xb, 0}]
Pexo = 0.26 * m2 * ΔH
Pl = Vm[t] * δl[t] * w * ρl * cpl * ((Tl[t] + Tm) / 2)
Pm = ρe * Vc * d * w * (cpl * Tl[t] - cpg * Ta)
Pcv = (m3 * cpl * (Tl[t] + Tm) / 2) + (m3 * hf)
(*Solving*)
m1 == m2 + m3

τg == τl

Pa + Pexo == Pcv + Pl + Pm

Solve[{m1 == m2 + m3, τg == τl, Pa + Pexo == Pcv + Pl + Pm}, {δl[t], Vm[t], Tl[t]}]
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] L. M. Wee and L. Li. An analytical model for striation formation in laser cutting, Applied Surface Science, Vol. 247, 15 July 2005, pp. 277-284.

[2] K. Chen and Y. L. Yao. Striation formation and melt removal in the laser cutting process, Journal of Manufacturing Systems, Vol. 18, 1999, pp. 43-53.

[3] L. Li, M. Sobih and P.L. Crouse. Striation-free laser cutting of mild steel sheets, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 56, 2007, pp. 193-196.

[4] A. F. H. Kaplan. An analytical model of metal cutting with a laser beam, Journal of Applied Physics, Vol. 79, No. 5.

[5] G.K.L. Ng. An analytical model for laser drilling incorporating effects of exothermic reaction, pulse width and hold geometry, International Journal of Heat and Mass Transfer, pp. 1358-1374.

[6] Dr. Rüdiger Paschotta. Gaussian Beams, URL: https://www.rp-photonics.com. access on 14/11/2016.

[7] วิรุฬหกกลับ. แสงเลเซอร์, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา http://www.vcharkarn.com. เข้าดูเมื่อวันที่ 1/6/2560.

[8] กองฝึกอบรม กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. การตัดด้วยเลเซอร์และพลาสมาอาร์ค, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา http://www.dede.go.th. เข้าดูเมื่อวันที่ 1/6/2560.

[9] M.J. Hsu. Analytical and experimental studies of advanced laser cutting techniques, Retrospective Theses and Dissertations, pp. 10374.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้