

การศึกษาการทำแบบจำลองการระเหยสารด้วยเลเซอร์บนตะกั่วเทลลูไรด์ A Study of Laser Ablation Simulation on Lead Telluride

ธนพล ขอบขำ^{1*} วรวิทย์ โกลลาทิพย์¹ นริส ประทินทอง² และทศวัลย์ คัมภีระพันธ์³

**Tanaphon Khokham^{1*} Voravit Kosalathip¹ Naris Pratinthong² and
Taswal Kumpeerpun³**

Received: October 6, 2023; Revised: November 21, 2023; Accepted: November 22, 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสร้างแบบจำลองการระเหยสารด้วยเลเซอร์ (Laser Ablation) บนวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก คือ ตะกั่วเทลลูไรด์ (Lead Telluride: PbTe) การเปลี่ยนของอุณหภูมิเกิดจากการระเหยด้วยลำแสงเลเซอร์บน PbTe เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.5 และ ANSYS 2021 R1 ในการทำวิจัยกำหนดให้กำลังของเลเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงระหว่าง 10 ถึง 40 W ในขณะที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเลเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงจาก 1000 ถึง 4000 rpm ผลการสร้างแบบจำลองพบว่า ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเลเซอร์ค่าหนึ่ง อุณหภูมิบน PbTe เพิ่มขึ้นเมื่อกำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันที่ให้กำลังของเลเซอร์คงที่ อุณหภูมิสูงสุดลดลงเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของเลเซอร์เพิ่มขึ้น แหล่งความร้อนเคลื่อนที่แบบจุด (Moving Point Heat Source) ของเลเซอร์ที่ 20 W ให้อุณหภูมิสูงสุดสูงกว่าจุดหลอมเหลวของ PbTe เล็กน้อย อาจส่งผลในการสร้างอนุภาคนาโนของ PbTe ทั้งสองโปรแกรมมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกันไม่ถึง 10 % จึงสามารถใช้ในการสร้างและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการระเหยสารด้วยเลเซอร์ให้สมบูรณ์และดียิ่งขึ้นไปอีก

คำสำคัญ : ตะกั่วเทลลูไรด์; วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก; การระเหยสารด้วยเลเซอร์; แบบจำลอง; ระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

¹ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

² คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³ ศูนย์บูรณาการเทคโนโลยีเพื่ออุตสาหกรรมไทย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

¹ Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi

² School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi

³ Thai Industry Technology Integrating Center, King Mongkut's University of Technology Thonburi

* Corresponding Author, Tel. 09 4493 8310, E - mail: guy.tanaphon@gmail.com

Abstract

This objective of this research was to study the simulation of laser ablation on thermoelectric material (Lead Telluride: PbTe). The temperature change caused by laser beam ablation on PbTe target was simulated using both COMSOL Multiphysics 5.5 and ANSYS 2021 R1 finite element analysis software packages. The laser power varied between 10 to 40 W, while the speeds ranged from 1000 to 4000 rpm. The results showed that at any given laser speed, the local maximum temperature on PbTe increased with an increase in the laser power. The maximum temperature decreased with an increase in the laser speed at a constant laser power. The moving point heat source of laser at 20 W gave the maximum temperature, which was slightly higher than the melting point of PbTe, potentially resulting in the generation of PbTe nanoparticles. The results obtained from both software differed by about 10 %. Both software can be used to simulate completely and even more effective in the future.

Keywords: Lead Telluride; Thermoelectric Material; Laser Ablation; Simulation; Finite Element Methods

บทนำ

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติถ้าให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ และถ้าให้ความแตกต่างของอุณหภูมิต่างกันระหว่างด้านสองด้านของตัววัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจะได้กระแสไฟฟ้าออกมาโดยประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นขึ้นอยู่กับค่า Figure of Merit (ZT) โดยที่ $ZT = S^2 \sigma T / k$ เมื่อ S , σ , k และ T คือ สัมประสิทธิ์ซีเบค สภาพการนำไฟฟ้า สภาพการนำความร้อน และอุณหภูมิ ตามลำดับ โดยที่คุณสมบัติของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีนั้น ค่าสภาพการนำไฟฟ้าควรมีค่าสูง และค่าสภาพการนำความร้อนควรมีค่าที่ต่ำ

การระเหยสารและการสังเคราะห์อนุภาคนาโนด้วยเลเซอร์นั้น เป็นการสังเคราะห์เชิงฟิสิกส์ ได้ผลเร็วและไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมเพราะไม่ได้ใช้สารเคมีในการสังเคราะห์ การสังเคราะห์ด้วยเลเซอร์นั้นสามารถประยุกต์ได้หลายอย่าง ดังตัวอย่างงานวิจัย การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของตะกั่วเทลลูไรด์ (PbTe) ผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำด้วยเลเซอร์แบบพัลส์ (Pulse Laser) โดยใช้ Nd: YAG Laser ตามความยาวคลื่นที่ 266 532 และ 1064 nm โดยที่ความยาวคลื่นที่ 1064 nm ส่งผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของตะกั่วเทลลูไรด์ให้มีขนาดเล็กที่สุดที่เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโนอยู่ในช่วง 4 - 6 nm [1] การเตรียมผงนาโนเทอร์โมอิเล็กทริกในน้ำโดยใช้ Nd: YAG Laser ที่ความยาวคลื่น 532 nm [2] การศึกษาโครงสร้างเชิงจุลภาค และคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางซิงค์ซาลาเลนไนต์ (ZnSe) ที่เคลือบโดยการระเหยสารด้วยเลเซอร์ในระบบสุญญากาศ โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์แบบต่อเนื่อง (CW-CO₂ Laser) โดยฟิล์มบางที่ได้นั้นมีกระบวนการอบอ่อน (Anneal) ที่อุณหภูมิ 100 200 และ 300 °C พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการอบอ่อนเพิ่มขึ้น จะทำให้ขนาดของผลึก (Crystallite Size) ของฟิล์มบางซิงค์ซาลาเลนไนต์มีการเพิ่มขึ้น และค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy Band Gap) จะลดลงเมื่ออุณหภูมิในการอบอ่อนเพิ่มขึ้น [3] แต่ไม่สามารถรู้ได้ว่าขณะที่เลเซอร์สังเคราะห์วัสดุให้เป็นอนุภาคนาโนนั้น อุณหภูมิของเลเซอร์สังเคราะห์มีค่าเท่าใด แต่การสร้างแบบจำลองจะทำให้รู้อุณหภูมิขณะที่เลเซอร์สังเคราะห์วัสดุ

การสร้างแบบจำลองมีประโยชน์อย่างมาก ช่วยให้คาดการณ์ผลการทดลอง หรือกระบวนการผลิตล่วงหน้าได้ ทำให้ลดโอกาสความผิดพลาดในการทดลอง หรือความผิดพลาดในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมได้ การสร้างแบบจำลองการให้ความร้อนด้วยแหล่งพลังงานความร้อนจากเลเซอร์ ซึ่งจะมีประโยชน์ในงานด้านการตัดด้วยเลเซอร์ การเชื่อมด้วยเลเซอร์ มีตัวอย่างงานวิจัยสร้างแบบจำลองการหลอมผงอัลลอยด์ AISi10Mg

ให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเลเซอร์ ใช้การสร้างแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม ANSYS 17.0 โดยมีการศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์เป็น 70 100 130 160 และ 190 W และการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเลเซอร์เป็น 100 200 300 400 และ 500 mm/s พบว่าที่กำลังของเลเซอร์ และความเร็วของเลเซอร์ที่แตกต่างกัน มีผลกับอุณหภูมิของเลเซอร์ในการหลอมผงอัลลอยด์ [4] การศึกษาการสร้างแบบจำลองการเชื่อมเหล็กเฟสคู่ (DP 600 steel) และอลูมิเนียมอัลลอยด์ 6061 (AA 6061) ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ให้เป็นเนื้อเดียวกัน ด้วยเลเซอร์ไดโอดกำลังสูงแบบต่อเนื่อง และมีการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นพลังงานเลเซอร์ (Laser Energy Density) เป็น 371 J/mm^2 ที่ความเร็วเลเซอร์เป็น 8 mm/s และที่ความหนาแน่นพลังงานเลเซอร์เป็น 297 J/mm^2 ที่ความเร็วเลเซอร์เป็น 10 mm/s พบว่าเมื่อความหนาแน่นพลังงานเลเซอร์เพิ่มขึ้น อุณหภูมิก็จะเพิ่มขึ้น และความลึกและความกว้างของรอยเชื่อมที่ได้จากการทำแบบจำลอง และจากการทดลองมีความแตกต่างอยู่เล็กน้อย [5]

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าสร้างแบบจำลองของการให้ความร้อนด้วยเลเซอร์นั้นมีประโยชน์มาก ดังนั้นจะทำการศึกษการสร้างและพัฒนาแบบจำลองของการระเหยด้วยเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์แบบต่อเนื่องที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์ และความเร็วในการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์ เสมือนแหล่งความร้อนเคลื่อนที่แบบจุดบนตะกั่วเทลลูไรด์ที่เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อหาอุณหภูมิในการหลอมเหลวขณะที่ลำแสงเลเซอร์เคลื่อนที่บนตะกั่วเทลลูไรด์ การหลอมเหลวจะส่งผลต่อกระบวนการระเหยสารโดยการฉายเลเซอร์เพื่อให้เกิดพลาสมา โดยใช้ระเบียบวิธีการ ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลอง ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.5 และ ANSYS 2021 R1 และเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากผลอุณหภูมิขณะที่ลำแสงเลเซอร์เคลื่อนที่บนตะกั่วเทลลูไรด์ที่ได้จากการทำแบบจำลองระหว่างสองโปรแกรม เพื่อเป็นแนวทางในการทดลองการสังเคราะห์พลาสมาของตะกั่วเทลลูไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์

วิธีการวิจัย

1. สมการการถ่ายโอนความร้อน

การศึกษาการทำแบบจำลองจะศึกษาผ่านสมการการถ่ายโอนความร้อน โดยการผันความร้อนใน 3 มิติ ซึ่งอธิบายอุณหภูมิ (T) ที่เป็นฟังก์ชันกับ x, y, z และเวลา (t) ดังสมการที่ (1) [6]

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \nabla T - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \quad (1)$$

เทอม $\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$ เป็นเทอมสะสมความร้อนภายในวัสดุที่ขึ้นกับเวลา เทอม $\rho C_p u \nabla T$ เป็นเทอม

ที่มีการแพร่ทางความร้อนเนื่องจากแหล่งความร้อนที่เคลื่อนที่ (Moving Heat Source) หรือลำเลเซอร์ (Laser Beam) ที่เคลื่อนที่ และเทอม $\nabla \cdot (k \nabla T)$ เป็นเทอมการนำความร้อนภายในตะกั่วเทลลูไรด์

โดยที่

ρ	คือ	ความหนาแน่นของตะกั่วเทลลูไรด์ (kg/m^3)
C_p	คือ	ความจุความร้อนของตะกั่วเทลลูไรด์ ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)
T	คือ	อุณหภูมิ (K)
k	คือ	การนำความร้อนของตะกั่วเทลลูไรด์ ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)

โดยลำแสงที่ฉายลงผิวของตะกั่วเทลลูไรด์ จะเป็นการสร้างความร้อน โดยรูปแบบของฟังก์ชันความร้อน โดยของฟังก์ชันความร้อนโดยลำแสงเลเซอร์มีรูปแบบการกระทำตัวแบบแบบเกาส์เซียน (Gaussian Laser Beam)

โดยมีสมการดังสมการที่ (2) [4]

$$q = \frac{2AP}{\pi r_0^2} e^{-\frac{2r^2}{r_0^2}} \quad (2)$$

เมื่อลำแสงเลเซอร์กระทบกับตะกั่วเทลลูไรด์ จะเกิดการดูดกลืน และการสะท้อนของแสง จะทำให้เกิดเป็นแหล่งความร้อน (Heat Source) ตามกฎของเบียร์ - แลมเบิร์ต (Beer-Lambert Law) ดังสมการที่ (3)

$$q = A(1 - R) \frac{2P}{\pi r_0^2} e^{-\frac{2r^2}{r_0^2}} \quad (3)$$

โดยที่

P	คือ	กำลังของเลเซอร์ (W)
A	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของตะกั่วเทลลูไรด์
R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของตะกั่วเทลลูไรด์
r_0	คือ	รัศมีของลำแสงเลเซอร์ (m)
r	คือ	ระยะระหว่างลำแสงเลเซอร์และตะกั่วเทลลูไรด์ (m)

เงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับอุณหภูมิที่เวลา $t = 0$ ให้เป็นดังสมการที่ (4)

$$T(x, y, z, t) /_{t=0} = T_0 = 300K \quad (4)$$

การถ่ายโอนความร้อนจากแต่ละด้านของชิ้นงาน ยกเว้นด้านล่างของชิ้นงาน เป็นดังสมการที่ (5)

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial Z} \right) = \varepsilon \sigma (T^4 - T_s^4) + h(T - T_0) \quad (5)$$

การสูญเสียพลังงานความร้อนจากด้านข้างของตัวตะกั่วเทลลูไรด์ เนื่องจากการนำพาความร้อน (Convection Heat Transfer) จากอากาศ ดังสมการที่ (6) [17] ซึ่งในการทดลองการหมุนของเป้าที่ติดกับตะกั่วเทลลูไรด์จะทำให้การนำพาความร้อนเป็นแบบ Force Convection ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ [8]

$$q = h(T - T_0) \quad (6)$$

โดยที่

h	คือ	สัมประสิทธิ์การนำพาความร้อน ($W / m^2 \cdot K$)
T	คือ	อุณหภูมิด้านบนของตะกั่วเทลลูไรด์ (K)
T_0	คือ	อุณหภูมิอากาศรอบ ๆ (K)

และมีการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีจากตะกั่วเทลลูไรด์ ไปรอบ ๆ ผิวของ Chamber ที่ไว้รองรับผงนาโนที่หลุดออกมาจากการสังเคราะห์ ดังสมการที่ (7)

$$q = \varepsilon \sigma (T^4 - T_s^4) \quad (7)$$

โดยที่

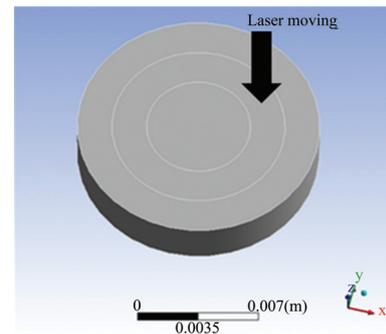
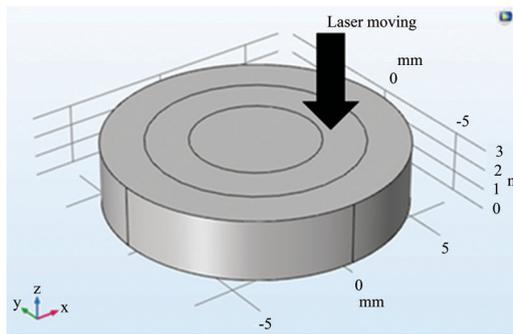
- ε คือ emissivity ของตะกั่วเทลลูไรด์
 σ คือ Stefan-Boltzmann Constant
 T_s คือ อุณหภูมิที่ผิว Chamber มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศรอบ ๆ ประมาณ 310 K

ที่ด้านล่างของตะกั่วเทลลูไรด์ ไม่มีการสูญเสียความร้อน เป็นดังสมการที่ (8) [4]

$$\left[k \left(\frac{\partial T}{\partial Z} \right) \right]_{Z=0} = 0 \quad (8)$$

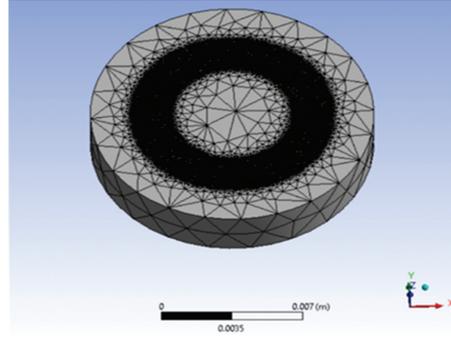
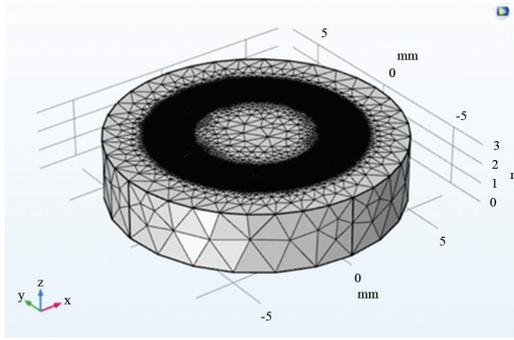
2. การออกแบบจำลอง

การออกแบบจำลองนั้นใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.5 และโปรแกรม ANSYS 2021 R1 ในการทำแบบจำลอง รูปร่างของตะกั่วเทลลูไรด์สำหรับทำแบบจำลองเป็นรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 มิลลิเมตร และหนา 3 มิลลิเมตร สภาพรอบ ๆ ของตะกั่วเทลลูไรด์อยู่ในอากาศ ทำให้สามารถมีการนำพาความร้อนจากอากาศได้ ลำแสงเลเซอร์ยิงไปยังด้านบนของตะกั่วเทลลูไรด์ และเคลื่อนที่ที่ระยะรัศมี 4 มิลลิเมตร และได้ทำการแบ่งโดเมนด้านบนของชิ้นงานออกเป็นสองโดเมน โดยโดเมนหนึ่งมีการสร้างเส้นทางที่เลเซอร์มีการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 1



(ก) การแบ่งโดเมนโดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics (ข) การแบ่งโดเมนโดยโปรแกรม ANSYS
รูปที่ 1 รูปร่างของตะกั่วเทลลูไรด์ที่มีการแบ่งเป็น 2 โดเมน จากทั้งสองโปรแกรม

และใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ในการสร้าง Mesh แต่ละโดเมน โดยที่โดเมนที่ให้เลเซอร์เคลื่อนที่ทำ Mesh แบบ Ultrafine Mesh ส่วนโดเมนที่เหลือได้ทำการทำ Mesh แบบ Coarse Mesh วัตถุประสงค์เพื่อลดเวลาในการทำแบบจำลอง [9] โดยรูปร่างของ Mesh ที่สร้างคือ Tetrahedral ดังรูปที่ 2 และสาเหตุที่ใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.5 และโปรแกรม ANSYS 2021 R1 ในการทำแบบจำลอง เพราะทั้งสองโปรแกรมนี้ เป็นโปรแกรมที่มีการคำนวณที่มีค่าผิดพลาดน้อย และเป็นโปรแกรมที่นิยมในการทำแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยสมบัติทางความร้อนของตะกั่วเทลลูไรด์ แสดงดังตารางที่ 1 และพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับแบบจำลอง แสดงดังตารางที่ 2



(ก) Mesh โดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics (ข) Mesh โดยโปรแกรม ANSYS
 รูปที่ 2 Tetrahedral Mesh บนชิ้นงานจากทั้งสองโปรแกรม

ตารางที่ 1 สมบัติทางความร้อนของตะกั่วเทลลูไรด์ [10] - [14]

Properties of PbTe	Values
Thermal conductivity (k), W/mK	2.141
Density (ρ), kg/m^3	8150
Specific heat capacity (C_p), J/kgK	155
Emissivity (ε)	0.8
Melting point, K	1190
Convection heat transfer coefficient (h), $W/m^2 \cdot K$	10

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา

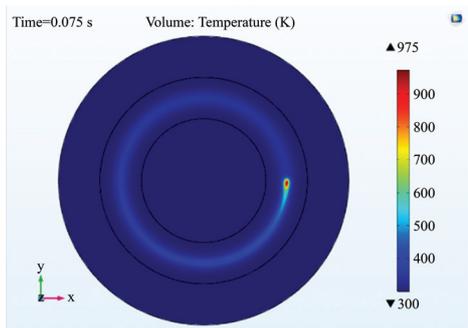
Parameters	Values
Laser Power (W)	10, 20, 30 และ 40
Laser spot size (mm)	0.2
Absorption coefficient	0.8
Scanning speed (rpm)	1000, 2000, 3000 และ 4000
Time (s)	0.075
Reflection coefficient	0.2

ผลการวิจัย

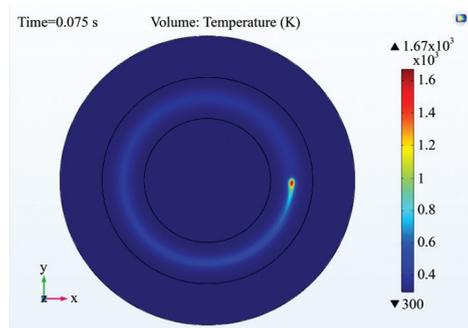
1. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์

เมื่อแสงเลเซอร์กระทบบนตะกั่วเทลลูไรด์ และให้ลำแสงเลเซอร์เคลื่อนที่หมุนด้วยความเร็ว 4000 rpm เวลาในการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์เป็น 0.075 วินาที โดยมีการเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์เป็น 10, 20, 30 และ 40 W เพื่อหาลำแสงเลเซอร์ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของตะกั่วเทลลูไรด์ โดยสอดคล้องกับการทดลองของ [16] จากอุณหภูมิที่ได้จะเห็นได้ว่าเมื่อกำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้น อุณหภูมิก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังรูปที่ 3 เป็นอุณหภูมิบนตะกั่วเทลลูไรด์ โดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดประมาณ 975, 1670, 2400 และ 3060 K และรูปที่ 4 เป็นอุณหภูมิบนตะกั่วเทลลูไรด์ โดยโปรแกรม ANSYS อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดประมาณ 915.43, 1627.7, 2291.5 และ 2955.4 K ตามลำดับ เมื่อกำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้น ทำให้ฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux) เพิ่มขึ้นด้วยตามสมการที่ (2) เพราะฟลักซ์

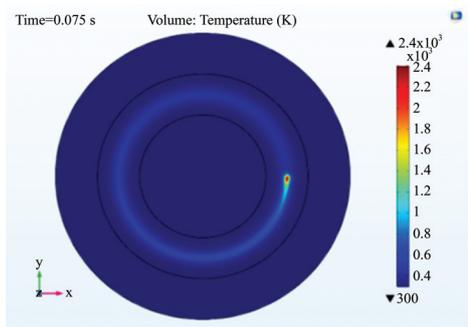
ความร้อนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังของเลเซอร์ [4]



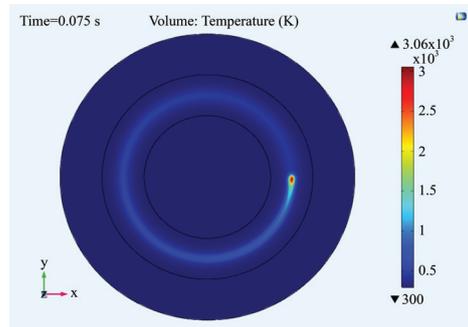
(ก) กำลังเลเซอร์ 10 W



(ข) กำลังเลเซอร์ 20 W

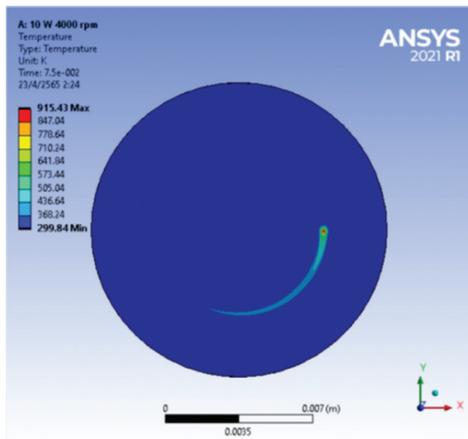


(ค) กำลังเลเซอร์ 30 W

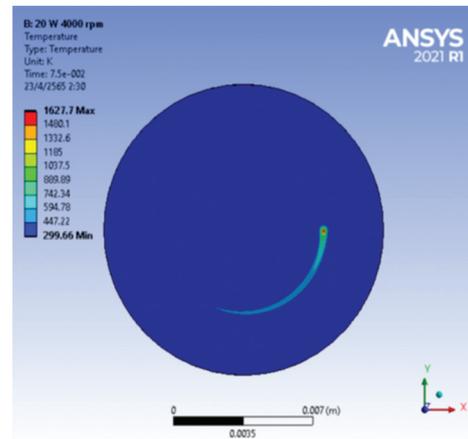


(ง) กำลังเลเซอร์ 40 W

รูปที่ 3 อุณหภูมิบนตะกั่วเทลลูไรด์ โดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics ที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังเลเซอร์ 10 - 40 W

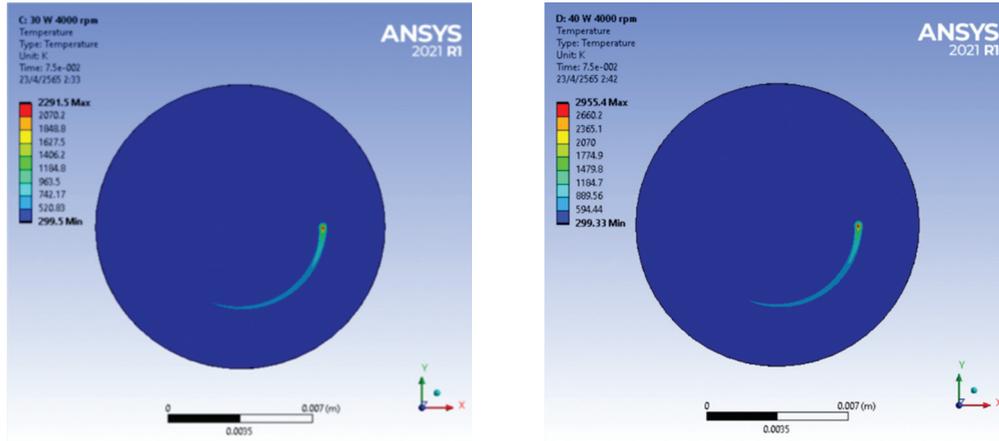


(ก) กำลังเลเซอร์ 10 W



(ข) กำลังเลเซอร์ 20 W

รูปที่ 4 อุณหภูมิบนตะกั่วเทลลูไรด์ โดยโปรแกรม ANSYS ที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังเลเซอร์ 10 - 40 W

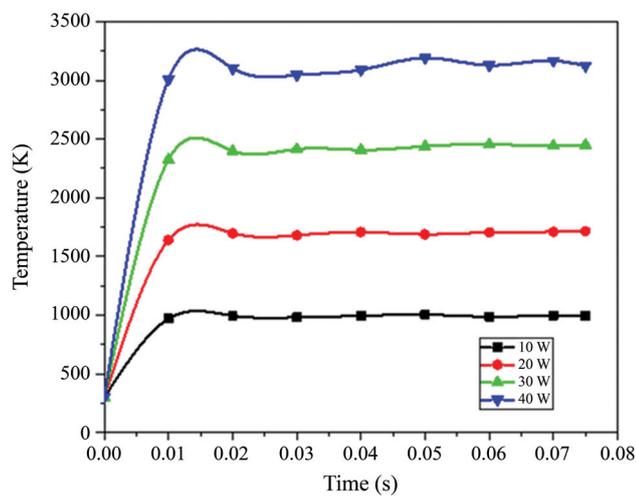


(ค) กำลังเลเซอร์ 30 W

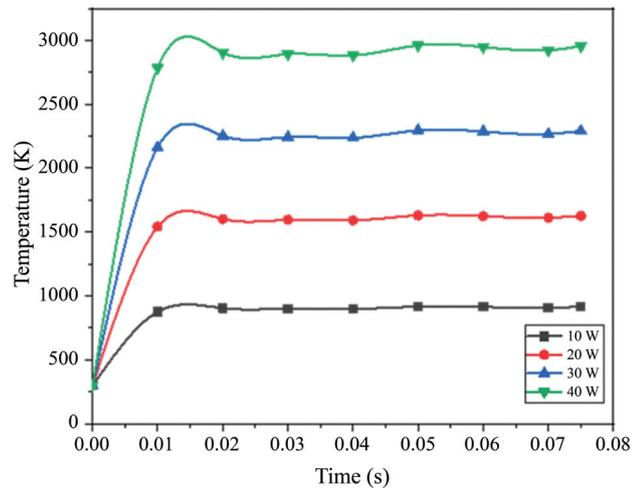
(ง) กำลังเลเซอร์ 40 W

รูปที่ 4 อุณหภูมิบนตะกั่วเทลลูไรด์ โดยโปรแกรม ANSYS ที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังเลเซอร์ 10 - 40 W (ต่อ)

จากรูปที่ 5 และรูปที่ 6 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดกับเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์ โดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics และ ANSYS กับเวลาในการเคลื่อนที่ของเลเซอร์ ตั้งแต่ 0 ถึง 0.075 วินาที ที่จุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ของเลเซอร์ที่ 0 วินาที อุณหภูมิเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงกำลังเลเซอร์เป็น 300 K จะเห็นว่าช่วงของอุณหภูมิสูงสุดที่กำลังเลเซอร์ 20 W ทั้งโปรแกรม COMSOL Multiphysics และ ANSYS มีค่ามากกว่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลว (Melting Point) ของตะกั่วเทลลูไรด์เล็กน้อย อาจส่งผลให้อนุภาคนาโนที่หลุดออกมาจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการระเหยด้วยเลเซอร์มีขนาดเล็กที่สุด



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและเวลาโดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics ที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์

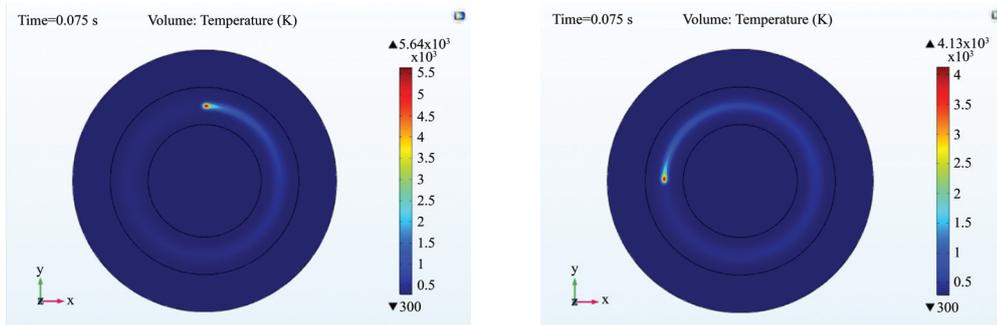


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและเวลาโดยโปรแกรม ANSYS ที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์

และความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์เป็น 10 20 30 และ 40 W จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics และโปรแกรม ANSYS แตกต่างกัน 9.14, 5.44, 6.9 และ 6.66% ตามลำดับ

2. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์

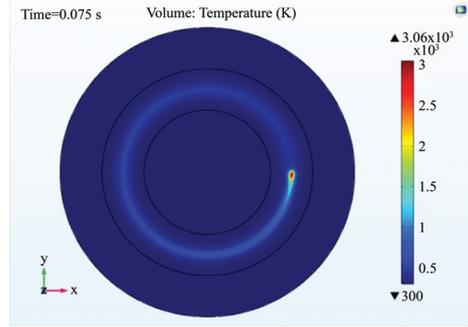
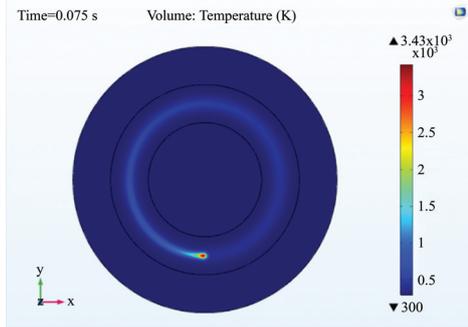
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์เป็น 1000 2000 3000 และ 4000 rpm โดยให้กำลังของเลเซอร์คงที่ที่ 40 W และเวลาในการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์เป็น 0.075 วินาที เพื่อหาความเร็วรอบที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ท่อนาโนของตะกั่วเทลลูไรด์ โดยสอดคล้องกับการทดลองของ [8] สังเกตได้ว่าเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์เพิ่มขึ้น อุณหภูมิจะค่อย ๆ ลดลงดังรูปที่ 7 เป็นอุณหภูมิบนตะกั่วเทลลูไรด์ โดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดประมาณ 5640 4130 3430 และ 3060 K และรูปที่ 8 เป็นอุณหภูมิบนตะกั่วเทลลูไรด์ โดยโปรแกรม ANSYS อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดประมาณ 5292.3 3915.1 3328.7 และ 2955.4 K ตามลำดับ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์จะส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ [13] จนทำให้อุณหภูมิลดลง



(ก) ความเร็วรอบ 1000 rpm

(ข) ความเร็วรอบ 2000 rpm

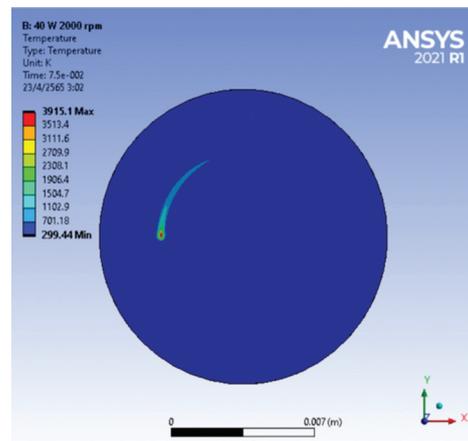
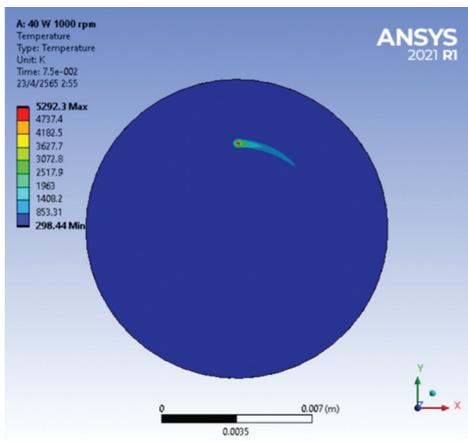
รูปที่ 7 อุณหภูมิบนตะกั่วเทลลูไรด์ โดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของลำแสงเลเซอร์



(ค) ความเร็วรอบ 3000 rpm

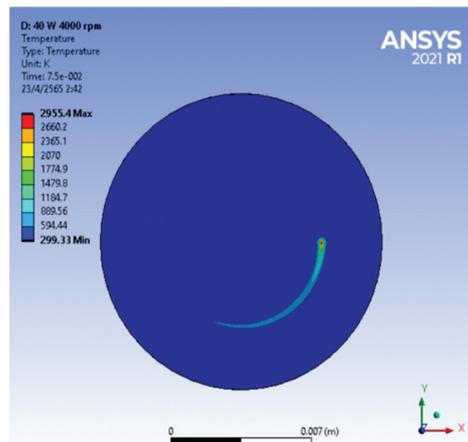
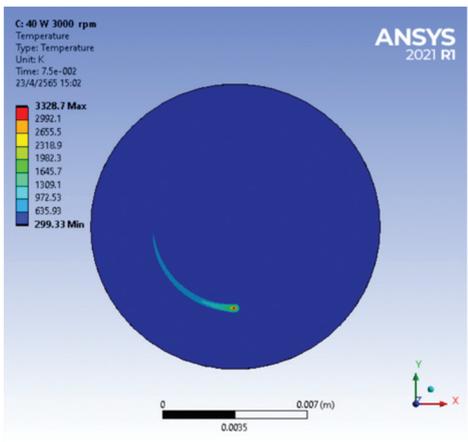
(ง) ความเร็วรอบ 4000 rpm

รูปที่ 7 อุณหภูมิบนตะกั่วเทลลูไรด์ โดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของลำแสงเลเซอร์ (ต่อ)



(ก) ความเร็วรอบ 1000 rpm

(ข) ความเร็วรอบ 2000 rpm



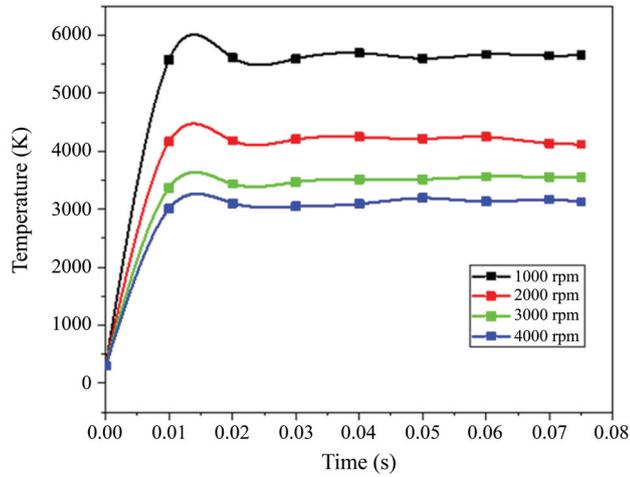
(ค) ความเร็วรอบ 3000 rpm

(ง) ความเร็วรอบ 4000 rpm

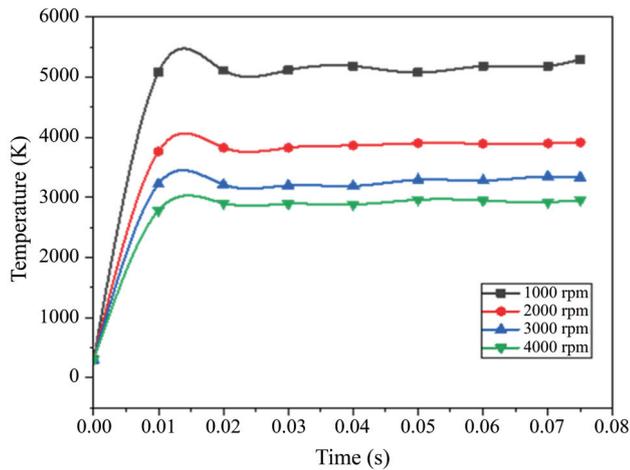
รูปที่ 8 อุณหภูมิบนตะกั่วเทลลูไรด์ โดยโปรแกรม ANSYS ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของลำแสงเลเซอร์

จากรูปที่ 9 และรูปที่ 10 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดกับเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์ โดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics และ ANSYS กับเวลาในการเคลื่อนที่ของเลเซอร์ตั้งแต่ 0 ถึง 0.075 วินาที จะเห็นว่าช่วงของอุณหภูมิสูงสุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์ทั้งโปรแกรม COMSOL Multiphysics และ ANSYS อุณหภูมิมีค่า

มากกว่าจุดหลอมเหลวของตะกั่วเทลลูไรด์มาก อาจส่งผลให้อนุภาคนาโนที่หลุดออกมาจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการระเหยด้วยเลเซอร์มีขนาดใหญ่จนเกินไป



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและเวลาโดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์

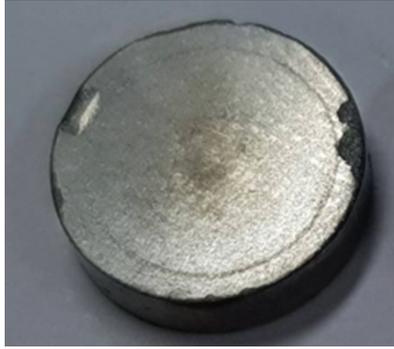


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและเวลาโดยโปรแกรม ANSYS ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์

และความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์เป็น 1000 2000 3000 และ 4000 rpm จากการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics และโปรแกรม ANSYS แตกต่างกัน 8.8 8.09 7.0 และ 6.66% ตามลำดับ

3. การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการสร้างแบบจำลอง

เมื่อทำการยิงเลเซอร์ไปที่ตะกั่วเทลลูไรด์ จะเห็นว่าที่กำลังเลเซอร์ 10 W ความเร็วรอบ 4000 rpm รอยที่เกิดขึ้นบนตะกั่วเทลลูไรด์นั้นเห็นได้ไม่ชัด ซึ่งสอดคล้องกับผลของแบบจำลองคือ อุณหภูมิไม่ถึงจุดหลอมเหลวของตะกั่วเทลลูไรด์ แต่ที่กำลังเลเซอร์ 20 W ความเร็วรอบ 4000 rpm และที่กำลังเลเซอร์ 40 W ความเร็วรอบ 4000 rpm รอยที่เกิดขึ้นบนตะกั่วเทลลูไรด์จะมีความชัดขึ้น ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลของแบบจำลองคือ อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลวของตะกั่วเทลลูไรด์ ดังรูปที่ 11



(ก) กำลังเลเซอร์ 10 W ความเร็วรอบ 4000 rpm

(ข) กำลังเลเซอร์ 20 W ความเร็วรอบ 4000 rpm



(ค) กำลังเลเซอร์ 40 W ความเร็วรอบ 4000 rpm

รูปที่ 11 รอยที่เกิดจากการยิงเลเซอร์บนตะกั่วเทลลูไรด์ที่มีการเพิ่มกำลังของเลเซอร์

สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาการทำแบบจำลองการระเหยสารด้วยเลเซอร์บนตะกั่วเทลลูไรด์ (PbTe) ที่มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์ และการเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์ สรุปได้ดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์ เมื่อกำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิที่เลเซอร์กระทบบนตะกั่วเทลลูไรด์เพิ่มขึ้น และที่กำลังเลเซอร์ 20 W ทั้งโปรแกรม COMSOL Multiphysics และโปรแกรม ANSYS ช่วงอุณหภูมิสูงสุดที่ได้มีค่ามากกว่าจุดหลอมเหลวของตะกั่วเทลลูไรด์เล็กน้อย อาจส่งผลให้อนุภาคนาโนที่หลุดออกมาจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการระเหยด้วยเลเซอร์มีขนาดเล็กที่สุด

2. การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์ ทั้งโปรแกรม COMSOL Multiphysics และโปรแกรม ANSYS เมื่อความเร็วการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์เพิ่มขึ้น จาก 1000 จนถึง 4000 rpm จะส่งผลให้มีการกระจายตัวของอุณหภูมิ จะทำให้อุณหภูมิลดลง และช่วงอุณหภูมิสูงสุดที่ได้มีค่ามากกว่าจุดหลอมเหลวของตะกั่วเทลลูไรด์มาก อาจส่งผลให้อนุภาคนาโนที่หลุดออกมาจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการระเหยด้วยเลเซอร์มีขนาดใหญ่

3. การสร้างแบบจำลองของการระเหยสารด้วยเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์แบบต่อเนื่องบนตะกั่วเทลลูไรด์ (PbTe) จากทั้งโปรแกรม COMSOL Multiphysics และโปรแกรม ANSYS นั้นมีความแตกต่างจากผลของอุณหภูมิที่ได้ทั้งการเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์เป็น 9.1 5.44 6.9 และ 6.66 % และการเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์เป็น 8.8 8.09 7.0 และ 6.66 % ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าทั้งสองโปรแกรมให้ผลที่สอดคล้องกันมี error จากการจำลองต่างกันไม่เกิน 10 % ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [7] ที่มีความแตกต่างระหว่างโปรแกรม COMSOL Multiphysics และโปรแกรม ANSYS ไม่เกิน 10 % ทั้งนี้ด้วยข้อจำกัดของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการรัน สามารถใช้ทั้งสองโปรแกรมนี้ในการสร้างแบบจำลอง

การระเหยสารด้วยเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์แบบต่อเนื่องบนตะกั่วเทลลูไรด์ได้ และสามารถใช้ทั้งสองโปรแกรมนี้ ในการพัฒนาการสร้างแบบจำลองของการระเหยสารด้วยเลเซอร์ให้สมบูรณ์และดียิ่งขึ้นไปอีก

4. การเปรียบเทียบผลการทดลอง กับผลของแบบจำลอง เมื่อกำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้นจะเห็นรอยบน ตะกั่วเทลลูไรด์ชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับผลของแบบจำลองคือ เมื่อกำลังเลเซอร์เป็น 10 W ความเร็วรอบ 4000 rpm รอยที่เกิดขึ้นบนตะกั่วเทลลูไรด์นั้นเห็นได้ไม่ชัด ซึ่งสอดคล้องกับผลของแบบจำลองคือ อุณหภูมิไม่ถึง จุดหลอมเหลวของตะกั่วเทลลูไรด์ แต่เมื่อกำลังเลเซอร์เป็น 20 W และ 40 W ความเร็วรอบ 4000 rpm รอยที่เกิดขึ้นบนตะกั่วเทลลูไรด์จะมีความชัดเจน ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลของแบบจำลองคือ อุณหภูมิ เกินจุดหลอมเหลวของตะกั่วเทลลูไรด์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่อำนวยความสะดวกทางด้านโปรแกรม ANSYS 2021 R1 สำหรับงานวิจัยนี้

References

- [1] Chubilleau, C., Lenoir, B., Migot, S., and Dauscher, A. (2011). Laser Fragmentation in Liquid Medium: A New Way for the Synthesis of PbTe Nanoparticles. **Journal of Colloid and Interface Science**. Vol. 357, Issue 1, pp. 13-17. DOI: 10.1016/j.jcis.2011.01.057
- [2] Kosalathip, V., Dauscher, A., Lenoir, B., Migot, S., and Kumpeerapun, T. (2008). Preparation of Conventional Thermoelectric Nanopowders by Pulsed Laser Fracture in Water: Application to the Fabrication of a pn Hetero-Junction. **Applied Physics A**. Vol. 93, pp. 235-240. DOI: 10.1007/s00339-008-4650-8
- [3] Phae-ngam, W., Suchat, S., Kumpeerapun, T., and Kosalathip, V. (2014). Influence of Air Annealing on the Structural, Morphology and Optical Properties of ZnSe Thin Films by CW-CO₂ Laser Evaporation. **Advanced Materials Letters**. Vol. 9, Issue 5, pp. 496-500. DOI: 10.5185/amlett.2014.4577
- [4] Samantaray, M., Sahoo, S., and Thatoi, D. (2018). Computational Modeling of Heat Transfer and Sintering Behavior During Direct Metal Laser Sintering of AlSi10Mg Alloy Powder. **Comptes Rendus Mecanique**. Vol. 346, Issue 11, pp. 1043-1054. DOI: 10.1016/j.crme.2018.08.006
- [5] Indhu, R., Loganathan, S., Vijayaraghavan, L., and Soundarapandian, S. (2018). A Study on Continuous Beam Laser Welding of Dissimilar Materials Using Multi-Physics Simulation. **Materials Science**. COMSOL Conference 2020
- [6] Said-Bacar, Z., Leroy, Y., Antoni, F., Slaoui, A., and Fogarassy, E. (2011). Modeling of CW Laser Diode Irradiation of Amorphous Silicon Films. **Applied Surface Science**. Vol. 257, Issue 12, pp. 5127-5131. DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.11.025
- [7] Luo, D., Wang, R., Yan, Y., Sun, Z., Zhou, W., and Ding, R. (2021). Comparison of Different Fluid-Thermal-Electric Multiphysics Modeling Approaches for Thermoelectric Generator Systems. **Renewable Energy**. Vol. 180, pp. 1266-1277. DOI: 10.1016/j.renene.2021.09.033
- [8] Phae-Ngam, W., Kosalathip, V., Kumpeerapun, T., Limsuwan, P., and Dauscher, A. (2011). Preparation and Characterization of Tellurium Nano-particles by Long Pulsed Laser Ablation. **Advanced Materials Research**. Vol. 214. pp. 202-206. DOI: DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.214.202

- [9] Caiazzo, F. and Alfieri, V. (2018). Simulation of Laser Heating of Aluminum and Model Validation via Two-Color Pyrometer and Shape Assessment. **Materials**. Vol. 11, Issue 9, p. 1056. DOI: 10.3390/ma11091506
- [10] El-Sharkawy, A. A., Abou EI-Azm, A. M., Kenawy, M. I., Hillal, A. S., and Abu-Basha, H. M. (1983). Thermophysical Properties of Polycrystalline PbS, PbSe, and PbTe in the Temperature Range 300-700 K. **International Journal of Thermophysics**. Vol. 4, pp. 261-269
- [11] Hwang, J. -Y., Kim, E. S., Hasan, S. W., Choi, S. -M., Lee, K. H., and Kim, S. W. (2015). Reduction of Lattice Thermal Conductivity in PbTe Induced by Artificially Generated Pores. **Advances in Condensed Matter Physics**. Vol. 2015, pp. 1-6. DOI: 10.1155/2015/496739
- [12] Dughaish, Z. H. (2002). Lead Telluride as a Thermoelectric Material for Thermoelectric Power Generation. **Physica B: Condensed Matter**. Vol. 322, Issue 1-2, pp. 205-223. DOI: 10.1016/S0921-4526(02)01187-0
- [13] Shatma, P., Dubey, A. K., and Pandey, A. K. (2014). Numerical Study of Remperature and Stress Fields in Laser Cutting of Aluminium Alloy Sheet. **Procedia Materials Science**. Vol. 5, pp. 1887-1896. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.510
- [14] Kosky, P., Balmer, R., Keat, W., and Wise, G. (2013). **Exploring Engineering**. Academic Press
- [15] Hitesh, D. V., Santhanakrishnan, S., Harimkar, S. P., Sandra, K. S. B., and Dahotre, N. B. (2013). One-Dimensional Multipulse Laser Machining of Structural Alumina: Evolution of Surface Topography. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. Vol. 68, pp. 69-83. DOI: 10.1007/s00170-012-4709-8
- [16] Phae-ngam, W., Kosalathip, V., Kumpeerapun, T., Limsuwan, P., and Dauscher, A. (2011). Synthesis and Characterize of $\text{Bi}_{0.6}\text{Sb}_{1.4}\text{Te}_3$ Nano-particles from Long Pulsed Laser Ablation. **Journal of Applied Sciences**. Vol. 11, Issue 21, pp. 3625-3629. DOI: 10.3923/jas.2011.3625.3629
- [17] Linsen, S. and Guoquan, S.(2012). Temperature Field Simulation of Laser Drilling in ANSYS. Advances in Intelligent Systems Research. In **Proceedings of the 1st International Conference on Mechanical Engineering and Material Science (MEMS 2012)**. DOI: 10.2991/mems.2012.139