

การศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นจากอนุภาคโปรตอน และแอลฟา บริเวณผิว
ของโลหะผสมที่ใช้เป็นโครงสร้างในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

The Study of Damage Caused by Proton and Alpha Particles on the Surface of Alloys Used as Structures in Nuclear Reactors

สุนันทศักดิ์ ระวังวงศ์¹ พันธุ์ศักดิ์ กล่ากล่อมจิตร² ภัทรนันท์ โปธิประเสริฐ² ทัดพิชา แก้วเกิด²
ธนพร เทียนธนากร² จุมพล ขอบขำ³ และกิตติศักดิ์ ศรีวงศ์ษา^{4*}

Sunantasak Ravangvong¹ Punsak Glumglomchit² Pattaranan Proprsserd²
Tatpicha Keawkrid² Thanapon Thiantanakorn² Chumphon Khobkham³
and Kittisak Sriwongsa^{4*}

Received: November 4, 2021; Revised: February 11, 2022; Accepted: March 8, 2022

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาของอนุภาคโปรตอน (H^+) และแอลฟา (He^{2+}) กับโลหะผสม TiVNbTa, TiVZrTa และ TiVCrTa ด้วยโปรแกรม Stopping of Ion Ranges in Matter (SRIM) เวอร์ชัน 2013 ซึ่งโปรแกรมนี้ใช้เทคนิคการประมาณค่าการชนแบบโมนารี โดยการศึกษาที่ได้วิเคราะห์ค่าการกระจายไอออน (Ion Distribution) และช่วงไอออน (Ion Ranges) ที่พลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ในขณะที่พารามิเตอร์ ได้แก่ อำนาจศักย์หยุดยั้งมวล (Mass Stopping Power) ดำเนินการในช่วงพลังงาน 1 - 1,000 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ผลการวิจัยค่าการกระจายไอออนของอนุภาคโปรตอน และแอลฟากับโลหะผสมทั้งสามที่ระดับพลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ความลึก 12 ไมโครเมตร พบว่าอนุภาคโปรตอนมีอำนาจทะลุทะลวงและสร้างความเสียหายในบริเวณผิวของโลหะผสมทั้งสามได้มากกว่าอนุภาคแอลฟา และค่าช่วงไอออนก็สอดคล้องกับค่าการกระจายไอออน ในขณะที่ค่าอำนาจศักย์หยุดยั้งมวลของโลหะผสม TiVZrTa มีค่าค่าที่สุด แสดงให้เห็นว่าโลหะผสมตัวอย่างนี้มีความสามารถในการกำบังอนุภาคโปรตอน (H^+) และแอลฟา (He^{2+}) ดีที่สุด

คำสำคัญ : การกระจายไอออน; ช่วงไอออน; อำนาจศักย์หยุดยั้งมวล; โลหะผสม

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

² โรงเรียนทิวหินวิทยาลัย ประจวบคีรีขันธ์

³ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี

⁴ คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

¹ Faculty of Science and Technology, Phetchaburi Rajabhat University

² Huahinvitthayalai School, Prachuapkhirikhan

³ Faculty of Engineering, Thonburi University

⁴ Faculty of Education, Silpakorn University

* Corresponding Author, Tel. 08 6742 1969, E - mail: sriwongsa_k@silpakorn.edu

Abstract

The aim of this work is to study the damage from proton (H^+) and alpha (He^{2+}) particles interaction with TiVNbTa, TiVZrTa and TiVCrTa alloys using stopping of ion ranges in matter (SRIM) program version 2013. This program is based on the binary collision approximation technique. The Ion distribution and Ion values ranging at 1 MeV while Mass stopping power parameters at energy ranging 1 - 1,000 MeV were analyzed. The results of ion distribution for H^+ and He^{2+} particles with all alloys at 1 MeV of energy and penetration depth of 12 μm showed that H^+ particles had more penetrating and damaging effect on the surface regions of the three alloys than He^{2+} particles and the ion ranges values corresponding to the ion distribution values. The mass stopping power for TiVZrTa alloy had the lowest value. These results indicated that TiVZrTa alloy was excellent H^+ and He^{2+} shielding.

Keywords: Ion Distribution; Ion Ranges; Mass Stopping Power; Alloy

บทนำ

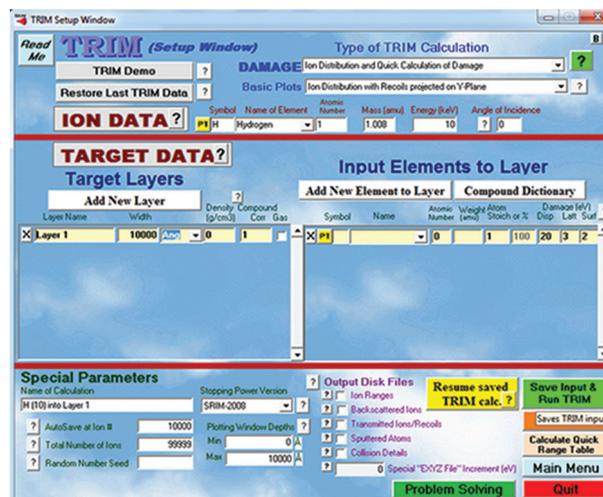
โลหะผสมที่มีเอนโทรปีสูง หมายถึงโลหะผสมที่ประกอบด้วยธาตุหลักมากกว่าห้าชนิดผสมกันในเศษส่วนที่เท่ากัน หรือใกล้เคียงกัน [1] - [14] โลหะผสมเอนโทรปีสูงจำนวนมากมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม เช่น ทนต่ออุณหภูมิที่สูง มีความแข็งแรง และความเหนียวที่มากกว่าโลหะและโลหะผสม มีความยืดหยุ่นที่ดี [1], [3] และยังมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี เช่น ความเป็นตัวนำและแม่เหล็กยิ่งยวด และทนต่อการกัดกร่อนอย่างมีนัยสำคัญ [5] ซึ่งคุณสมบัติที่กล่าวถึงนี้สามารถดำเนินการได้โดยการแทนที่องค์ประกอบหนึ่งหรือหลายองค์ประกอบในองค์ประกอบของโลหะผสมเอนโทรปีสูง แต่ทั้งนี้เป็นไปได้ยากที่จะใช้ประโยชน์จากโลหะผสมที่มีเอนโทรปีสูง (High Entropy Alloys; HEAs) ในเชิงพาณิชย์ เช่น การใช้งานด้านโครงสร้างทางวิศวกรรมนั้นส่วนใหญ่จะใช้เหล็กกล้า โลหะผสมอะลูมิเนียม หรือโลหะผสมแมกนีเซียม ซึ่งถือว่าเป็นโครงสร้างหลักที่นิยมนำมาใช้งาน เนื่องจากโลหะผสมที่มีเอนโทรปีสูงไม่สามารถแข่งขันในด้านราคา หรือคุณสมบัติเฉพาะได้ แต่อย่างไรก็ตาม โลหะผสมที่มีเอนโทรปีสูงเป็นโลหะผสมที่นำมาประยุกต์ใช้งานในโครงสร้างทางวิศวกรรมสำหรับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟิวชันและโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟิชชัน Gen-IV ใช้สำหรับการหุ้มฉนวนเชื้อเพลิงที่ทนต่ออุบัติเหตุ (Accident-Tolerant Fuel; ATF) สำหรับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟิชชัน Gen-III และ Gen-IV งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับโลหะผสมเอนโทรปีสูงสำหรับการใช้งานด้านนิวเคลียร์ยังคงมีจำนวนงานวิจัยค่อนข้างจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนของโลหะผสมเอนโทรปีสูงที่ถูกผลิตขึ้น ในเดือนมิถุนายน ค.ศ. 2020 พบว่ามีบทความไม่เกิน 100 ฉบับที่พิจารณาโลหะผสมเอนโทรปีสูงสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านนิวเคลียร์ บทความโดยส่วนมากจะเน้นที่การออกแบบโลหะผสม และการตอบสนองต่อความเสียหายจากการฉายรังสี เมื่อเทียบกับเอกสารประมาณ 4,000 ฉบับที่ตีพิมพ์ในขอบเขตงานด้านโลหะผสมเอนโทรปีสูง [15] คุณสมบัติพื้นฐานของโลหะผสมเอนโทรปีสูงที่จะนำมาใช้ร่วมกับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบฟิชชันและฟิวชันรุ่นต่อไปมีแนวโน้มว่าจะแตกต่างกันไปตามการออกแบบของเครื่องปฏิกรณ์และส่วนประกอบเฉพาะที่ ซึ่งอาจจะเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิที่สูง การกัดกร่อน ความเค้น และฟลักซ์ความร้อน อย่างไรก็ตาม ยังมีพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับวิศวกรที่ต้องออกแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ นั่นคือความเสียหายที่เกิดจากการฉายรังสี ความเสียหายจากการฉายรังสีที่เกิดขึ้นในโลหะผสมไม่เพียงแต่ขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของอนุภาคที่ตกกระทบ (เช่น อิเล็กตรอน นิวตรอน โปรตอนหรือไอออนหนัก) และพลังงานของอนุภาคที่ตกกระทบเท่านั้น แต่ยังรวมถึงลักษณะของวัสดุที่ถูกฉายรังสีด้วย (เช่น น้ำหนักอะตอม ความแข็งแรง

ของพันธะ โครงสร้างผลึก องค์ประกอบและโครงสร้างจุลภาค) ตลอดจนอุณหภูมิของการฉายรังสี ความเสียหายของโลหะผสมจากการฉายรังสีเป็นเรื่องที่มีความซับซ้อนอย่างมาก [16] - [17] เมื่อพิจารณากรณีที่นิวตรอนมีพลังงาน (เช่น ที่มีพลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ หรือมากกว่า) ผ่านเข้าไปทำอันตรกิริยากับอะตอมในโลหะผสม การชนกันระหว่างนิวตรอนกับอะตอมอาจส่งผลให้อะตอมเคลื่อนตัวออกจากตำแหน่งแลตทิซด้วยพลังงานจลน์ ผลที่ได้ส่งผลให้บริเวณผิวของโลหะผสมเอนโทรปีสูงเกิดความเสียหายขึ้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเสียหายที่จะเกิดขึ้นจากอนุภาคโปรตอน และแอลฟา ที่ผ่านเข้าไปทำอันตรกิริยากับอะตอมในแลตทิซที่อยู่บริเวณผิวของตัวอย่างโลหะผสมเอนโทรปีสูงที่ถูกนำมาใช้ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งโลหะผสมเอนโทรปีสูง ได้แก่ TiVNbTa, TiVZrTa, TiVCrTa [18] การดำเนินการทำโดยใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ SRIM ซึ่งโปรแกรมซอฟต์แวร์ดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์และจำลองถึงเหตุการณ์ที่อนุภาคทั้งสองผ่านเข้าไปทำอันตรกิริยาในโลหะผสมเอนโทรปีสูงทั้งสาม ซึ่งพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการอธิบายความเสียหายที่เกิดจากอนุภาคทั้งสอง ได้แก่ การกระจายไอออน (Ion Distribution) ใน 2 มิติ ช่วงไอออน (Ion Ranges) ดำเนินการที่พลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และค่าอำนาจศัภย์หยุดยั้งมวล (Mass Stopping Power) ที่ช่วงพลังงาน 1 - 1,000 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

โลหะผสม TiVNbTa: 0.22Ti-0.22V-0.25Nb-0.31Ta (%wt), TiVZrTa: 0.24Ti-0.24V-0.15Zr-0.37Ta (%wt), TiVCrTa: 0.23Ti-0.29V-0.25Cr-0.24Ta (%wt) ที่ศึกษาในครั้งนี้จะถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติการกักเก็บรังสีไอออนในชั้นชนิดที่มีประจุไฟฟ้า ได้แก่ อนุภาคโปรตอน และอนุภาคแอลฟา ซึ่งพารามิเตอร์ที่จะถูกวิเคราะห์คือ การกระจายไอออน (Ion Distribution) ใน 2 มิติ ช่วงไอออน (Ion Ranges) ที่พลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และอำนาจศัภย์หยุดยั้งมวล (Mass Stopping Power) ที่ช่วงพลังงาน 1 - 1,000 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ด้วยโปรแกรม Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM) Version 2013 (รูปที่ 1) ที่ได้รับการประมวลโดยใช้รหัสตามวิธีการของมอนติคาร์โล [19] โดยโปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณการหยุดของไอออนและช่วงของไอออนในวัสดุโดยใช้คุณสมบัติทางกลศาสตร์ควอนตัมของการชนกันของไอออนกับอะตอมและยังใช้ในการอธิบายความเสียหายจากรังสีที่เกิดจากไอออนกับวัสดุ [20]



รูปที่ 1 โปรแกรม Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM) Version 2013

การกำบังรังสีไอออนในซ์ประเภทที่มีประจุไฟฟ้า (อนุภาคโปรตอน และแอลฟา)

อัตราการสูญเสียพลังงานของไอออนในตัวอย่างโลหะผสมแบ่งออกเป็นสองกลไกที่แตกต่างกันของการสูญเสียพลังงาน ได้แก่ พลังงานที่ถ่ายโอนโดยไอออนไปยังนิวเคลียสของตัวอย่างโลหะผสม (เรียกว่า การหยุดนิวเคลียร์) และพลังงานที่ถ่ายโอนโดยไอออนไปยังอิเล็กตรอนของตัวอย่างโลหะผสม (เรียกว่า การหยุดแบบอิเล็กตรอนิก) ความสำคัญสัมพัทธ์ของกระบวนการของอันตรกิริยาต่าง ๆ ระหว่างไอออนกับตัวกลางของตัวอย่างโลหะผสมจะขึ้นอยู่กับความเร็วของไอออนเป็นส่วนใหญ่ รวมถึงจะขึ้นอยู่กับประจุของไอออน และเลขอะตอมยังผลของตัวอย่างโลหะผสม

อำนาจค้ำยักหยุดยั้งมวล คือ ค่าที่ใช้ในการบอกอัตราการสูญเสียพลังงาน รังสีก่อไอออน ีประเภที่มีประจุไฟฟ้าเป็นค่าที่ใช้ในการพิจารณาเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ในการกำบังรังสีประเภทนี้ ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (1) ของ Bethe-Bloch

$$-\frac{dE}{dx}\bigg|_e = \frac{2\pi k_0^2 Z^2 e^4 n}{mc^2 \beta^2} \left[\ln \frac{2mc^2 \beta^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right] \quad (1)$$

เมื่อ

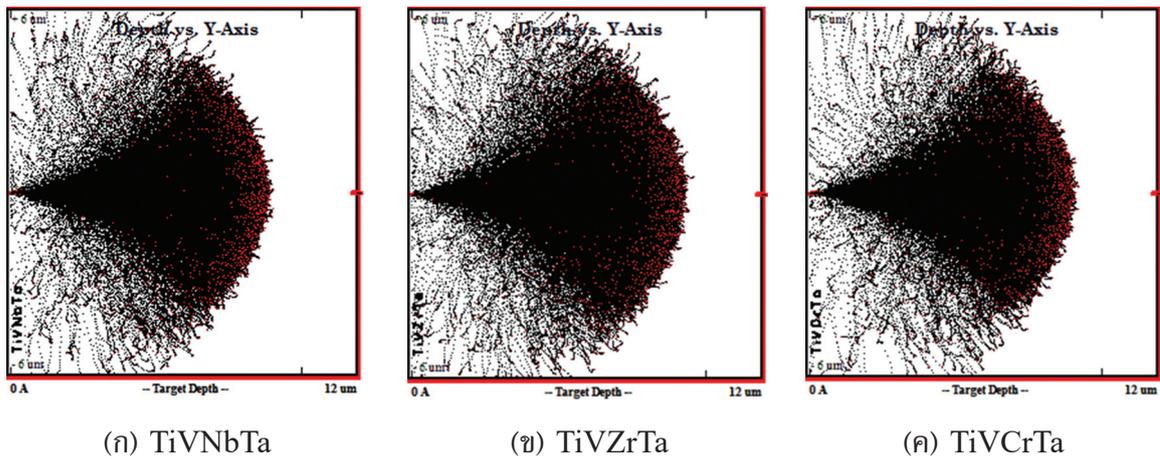
| | | |
|--------------------------|-----|--------------------------------|
| $-\frac{dE}{dx}\bigg _e$ | คือ | อัตราการสูญเสียพลังงาน |
| Z | คือ | เลขอะตอม |
| e | คือ | ค่าประจุไฟฟ้า |
| m | คือ | มวล |
| c | คือ | ค่าความเร็วแสง |
| β | คือ | ความเร็วของไอออน |
| I | คือ | พลังงานไอออนเฉลี่ย [20] - [21] |

ผลการทดลองและอภิปรายผล

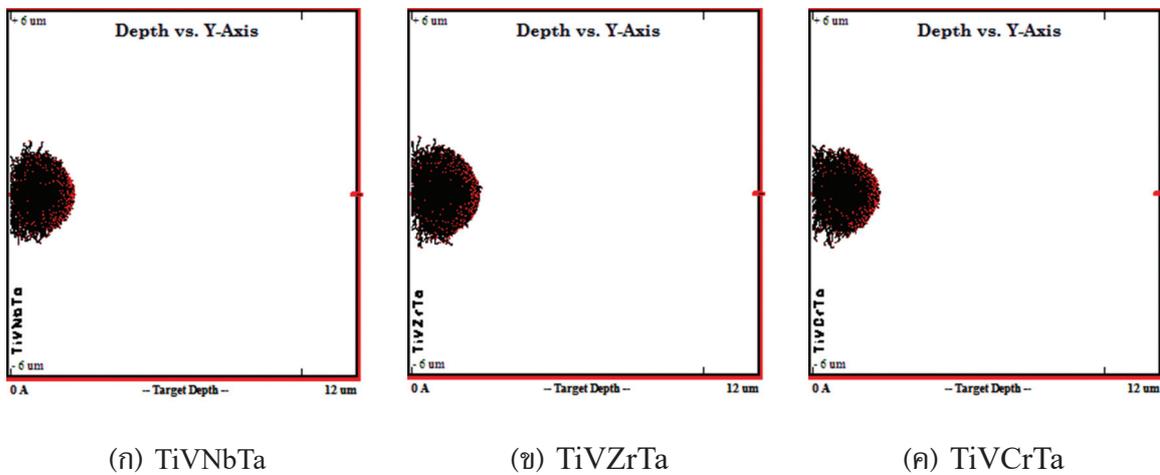
ความเสียหายจากการกระจายของอนุภาคโปรตอน และแอลฟา

ในการศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นจากอนุภาคโปรตอน และแอลฟา ที่ผ่านเข้าไปทำอันตรกิริยากับอะตอมในแลตทิซที่อยู่บริเวณผิวของตัวอย่างโลหะผสมเอนโทรปีสูงที่ถูกนำมาใช้ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งโลหะผสมที่ศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ TiVNbTa, TiVZrTa, TiVCrTa โดยรูปที่ 2 และ 3 แสดงแบบจำลองสถานการณ์ที่เกิดขึ้นโดยการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรเจกไทล์ไอออน (โปรตอน และแอลฟา) จำนวน 99999 ไอออนกับโลหะผสมทั้งสามที่ระดับพลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และที่ความลึก 12 ไมโครเมตร โดยเป็นเหตุการณ์ที่โปรเจกไทล์ไอออนผ่านเข้าไปตกกระทบแบบตรง (ทำมุม 0 องศา) ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ SRIM พบว่า อนุภาคโปรตอนสามารถผ่านเข้าไปในโลหะผสมทั้งสามลึกกว่าอนุภาคแอลฟา โดยจุดสีแดงแสดงถึงการชนกันระหว่างโปรเจกไทล์ไอออนกับอะตอมในโลหะผสมทั้งสาม และจุดสีดำแสดงถึงช่องว่างหรือช่วงการยุบตัวของอะตอมในโลหะผสมทั้งสาม ช่องว่างนี้เกิดจากการที่อะตอมในโลหะผสมทั้งสามหลุดออกไปเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรเจกไทล์ไอออนกับอะตอมในแลตทิซภายในบริเวณผิวของโลหะผสมทั้งสาม ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า การยุบตัวแบบซันบันได (Recoil Cascade) [22] และเหตุผลที่อนุภาคโปรตอนสามารถผ่านเข้าไปได้ลึกกว่าอนุภาคแอลฟา เพราะอนุภาคโปรตอนมีมวลน้อยกว่าอนุภาคแอลฟา ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าอนุภาคโปรตอนสามารถสร้างความเสียหายที่บริเวณผิวของโลหะผสมทั้ง

สามมากกว่าอนุภาคแอลฟา ยิ่งไปกว่านั้นจากการวิเคราะห์พบว่า โลหะผสม TiVNbTa มีไอออนสะท้อนกลับเท่ากับ 50 และ 62 ไอออน สำหรับอนุภาคโปรตอนและอนุภาคแอลฟา โลหะผสม TiVZrTa มีไอออนสะท้อนกลับเท่ากับ 65 และ 83 ไอออน สำหรับอนุภาคโปรตอนและอนุภาคแอลฟา และโลหะผสม TiVCrTa มีไอออนสะท้อนกลับเท่ากับ 38 และ 56 ไอออน สำหรับอนุภาคโปรตอนและอนุภาคแอลฟา ซึ่งเป็นอีกหนึ่งเหตุผลที่สะท้อนให้เห็นว่าอนุภาคโปรตอนมีอำนาจทะลุทะลวงและสร้างความเสียหายในบริเวณผิวของโลหะผสมทั้งสามได้มากกว่าอนุภาคแอลฟา



รูปที่ 2 การกระจายของอนุภาคโปรตอนที่พลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

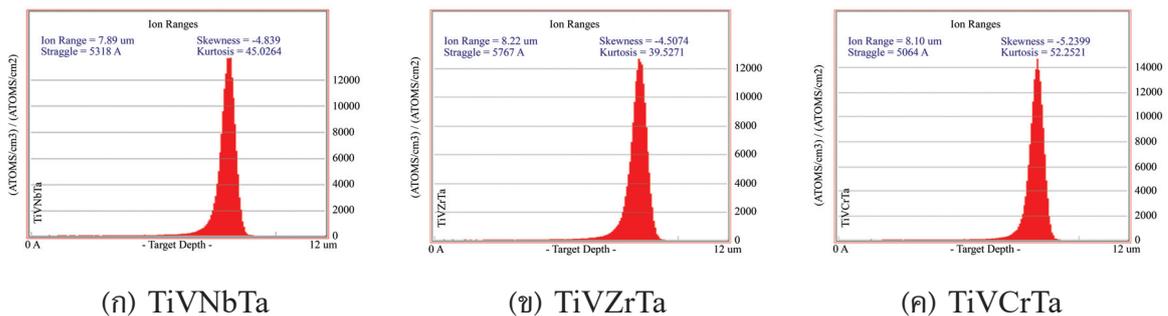


รูปที่ 3 การกระจายของอนุภาคแอลฟาที่พลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

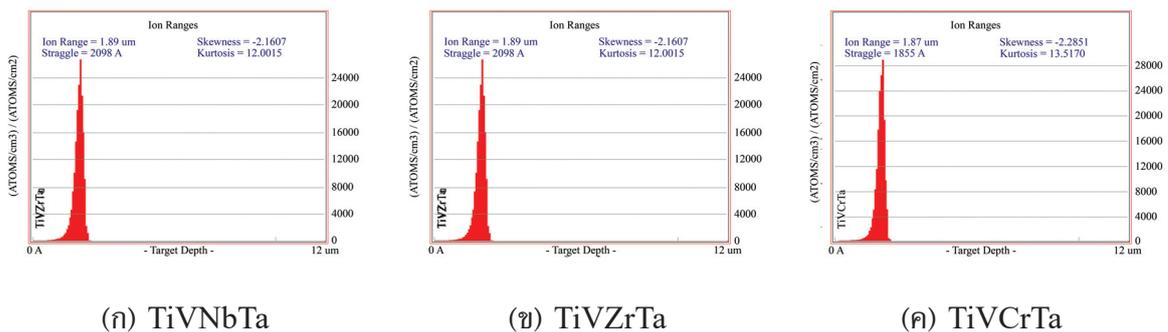
โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรเจกไทล์ไอออนกับอะตอมในบริเวณผิวของโลหะผสมจากอนุภาคโปรตอน และแอลฟา

รูปที่ 4 และ 5 แสดงให้เห็นถึงช่วงของไอออนที่ระดับพลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นผลจากการวิเคราะห์ที่ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ SRIM โดยช่วงของไอออนเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดที่บ่งบอกถึงโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรเจกไทล์ไอออนกับอะตอมในบริเวณผิวของโลหะผสมทั้งสาม เมื่อโปรเจกไทล์ไอออนที่มีพลังงานจลน์ทะลุผ่านเข้าไปในโลหะผสมทั้งสาม โปรเจกไทล์ไอออนที่ผ่านเข้าไปจะผ่านการหยุดแบบอิเล็กตรอนิกส์ (อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับโปรเจกไทล์ไอออน) และการหยุดแบบนิวเคลียร์ (อันตรกิริยาระหว่างนิวเคลียสกับโปรเจกไทล์ไอออน) โปรเจกไทล์ไอออนที่ผ่านเข้าไปจะมีความเร็วลดลงในช่วงที่มีพลังงานสูง เนื่องจากเกิดการหยุดแบบอิเล็กตรอนิกส์ซึ่งเป็นการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่นทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานจลน์ขึ้น เมื่อพลังงานโปรเจกไทล์ไอออนลดลงโอกาสในการเกิดการชนกันแบบนิวเคลียร์จะเพิ่มมากขึ้น

ซึ่งเป็นการชนหลักที่ทำให้โปรเจกไทล์ไอออนชะลอตัวลงในระหว่างการชนกับอะตอมในแลตทิซภายในบริเวณผิวของโลหะผสมทั้งสาม ทำให้บริเวณผิวของโลหะผสมเกิดความเสียหาย หรือยุบตัวลง เหตุการณ์นี้ทำให้อะตอมโดยรอบเกิดการชนกันเพิ่มขึ้นภายในอะตอมของโลหะผสมทั้งสาม ส่งผลทำให้บริเวณผิวของโลหะผสมทั้งสามเกิดความเสียหาย [22] - [23] จากผลการวิเคราะห์พบว่า โลหะผสม TiVNbTa มีช่วงของไอออนของอนุภาคโปรตอนเท่ากับ 7.89 ไมโครเมตร อนุภาคแอลฟาเท่ากับ 1.89 ไมโครเมตร โลหะผสม TiVZrTa มีช่วงไอออนของอนุภาคโปรตอนเท่ากับ 8.22 ไมโครเมตร อนุภาคแอลฟาเท่ากับ 1.89 ไมโครเมตร และโลหะผสม TiVCrTa มีช่วงไอออนของอนุภาคโปรตอนเท่ากับ 8.10 ไมโครเมตร อนุภาคแอลฟาเท่ากับ 1.87 ไมโครเมตร ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับรูปที่ 2 และ 3



รูปที่ 4 ช่วงไอออนของอนุภาคโปรตอนที่พลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

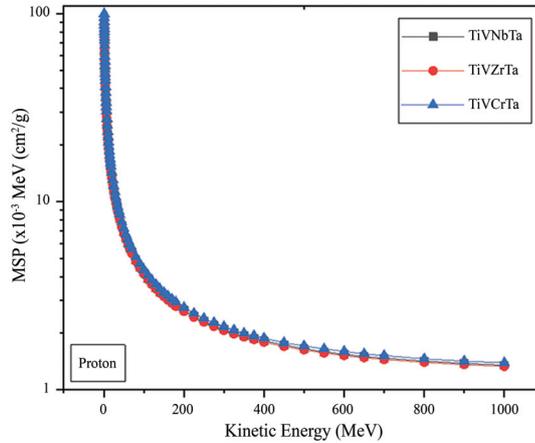


รูปที่ 5 ช่วงไอออนของอนุภาคแอลฟาที่พลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

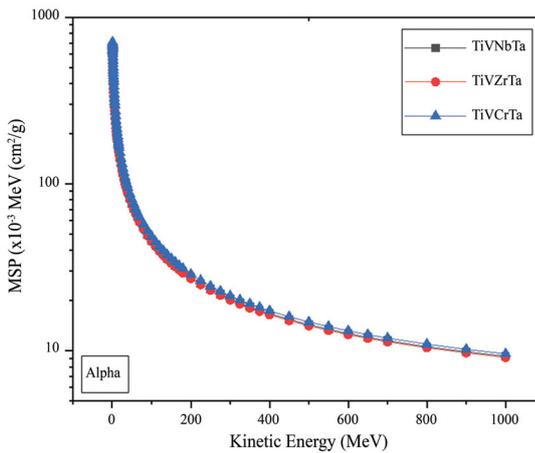
อำนาจค์กัณฑ์หยุดยั้งมวลของอนุภาคโปรตอน และอนุภาคแอลฟา

อำนาจค์กัณฑ์หยุดยั้งมวล (Mass Stopping Power) ของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า คือ ค่าเฉลี่ยการสูญเสียพลังงานเชิงเส้นของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าใด ๆ (อนุภาคโปรตอน และอนุภาคแอลฟา) ที่เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุต่อความหนาของมวลสำหรับอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า อำนาจค์กัณฑ์หยุดยั้งมวลเกิดจากการชนกันของอิเล็กตรอนและการชนกันของนิวเคลียสภายในเนื้อวัสดุ ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานจนเพิ่มขึ้น จนในที่สุดอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าก็จะสูญเสียพลังงานจนทั้งหมดในระดับความลึกที่แน่นอนในเนื้อวัสดุที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านการคำนวณค่าของอำนาจค์กัณฑ์หยุดยั้งมวลของอนุภาคโปรตอน และอนุภาคแอลฟา ของโลหะผสมทั้งสามที่ช่วงพลังงานจลน์ของอนุภาค 1 - 1,000 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ดังรูปที่ 6 และ 7 ผลจากการศึกษาพบว่าอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าทั้งสองมีแนวโน้มของอำนาจค์กัณฑ์หยุดยั้งมวลของโลหะผสมทั้งหมดคล้ายกัน กล่าวคืออำนาจค์กัณฑ์หยุดยั้งมวลจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงพลังงานจลน์ของอนุภาคค่าหนึ่ง จากนั้นจะค่อย ๆ ลดค่าลงตามพลังงานที่เพิ่มขึ้น โดยโลหะผสม TiVCrTa มีค่าอำนาจค์กัณฑ์หยุดยั้งมวลมากที่สุด และวัสดุโลหะผสม TiVZrTa มีค่าอำนาจค์กัณฑ์หยุดยั้งมวลน้อยที่สุด และค่าอำนาจค์กัณฑ์หยุดยั้งมวลของอนุภาคแอลฟาสูงกว่าอนุภาคโปรตอน ผลที่เกิดขึ้นนี้เพราะอนุภาคแอลฟามีประจุไฟฟ้าที่มากกว่าและมีความเร็วที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับอนุภาคโปรตอน อำนาจค์กัณฑ์หยุดยั้งมวลจะแปรผันตามจำนวนประจุไอออนและแปรผกผันกับกำลังสอง

ของความเร็วที่พลังงานจลน์เท่ากับอนุภาคแอลฟามีความเร็วน้อยกว่าโปรตอนควบคู่ไปกับประจุที่เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้อนุภาคแอลฟามีอำนาจค์ยั้หยุดยั้งมวลมากกว่าของอนุภาคโปรตอน ดังนั้นสำหรับพลังงานจลน์ของอนุภาคทั้งสองค่าอำนาจค์ยั้หยุดยั้งมวลจึงมีแนวโน้มตามลำดับ $TiVCrTa > TiVNbTa > TiVZrTa$ [24]



รูปที่ 6 ค่าอำนาจค์ยั้หยุดยั้งมวลของอนุภาคโปรตอนที่พลังงาน 1 - 1,000 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ของ TiVNbTa, TiVZrTa, TiVCrTa



รูปที่ 7 ค่าอำนาจค์ยั้หยุดยั้งมวลของอนุภาคแอลฟาที่พลังงาน 1 - 1,000 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ของ TiVNbTa, TiVZrTa, TiVCrTa

สรุปผล

จากการศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาของอนุภาคโปรตอน (H^+) และแอลฟา (He^{2+}) ที่ผ่านเข้าไปทำอันตรกิริยากับอะตอมในแลคทีซที่อยู่บริเวณผิวของตัวอย่างโลหะผสมเอนโทรปีสูง ได้แก่ โลหะผสม TiVNbTa, TiVZrTa และ TiVCrTa ด้วยโปรแกรม Stopping of Ion Ranges in Matter (SRIM) Version 2013 ซึ่งพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการอธิบายความเสียหายที่เกิดจากอนุภาคทั้งสอง ได้แก่ การกระจายไอออน (Ion Distribution) ใน 2 มิติ ช่วงไอออน (Ion Ranges) ดำเนินการที่พลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และค่าอำนาจค์ยั้หยุดยั้งมวล (Mass Stopping Power) ที่ช่วงพลังงาน 1 - 1,000 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ โดยการศึกษาพบว่าค่าการกระจายไอออน (Ion Distribution) ที่ความลึก 12 ไมโครเมตร และช่วงไอออน (Ion Ranges) ที่พลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ มีความสอดคล้องกัน คือ อนุภาคโปรตอนมีอำนาจทะลุทะลวงและสร้างความเสียหายในบริเวณผิวของโลหะผสมทั้งสามได้มากกว่าอนุภาคแอลฟา โดยค่าอำนาจค์ยั้

หยุดยั้งมวล (Mass Stopping Power) ในช่วงพลังงาน 1 - 1,000 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ พบว่าค่าอำนาจจลน์หยุดยั้งมวลรวมของโลหะผสม TiVZrTa มีค่าต่ำที่สุด และ TiVCrTa มีค่าสูงที่สุด ซึ่งนั่นแสดงให้เห็นว่าโลหะผสม TiVZrTa นั้นมีความสามารถในการกำบังอนุภาคโปรตอน (H^+) และแอลฟา (He^{2+}) ดีที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยเป็นอย่างดี

References

- [1] Yeh, J. W., Chen, S. K., Lin, S. J., Gan, J. Y., Chin, T. S., Shun, T. T., and Chang, S. Y. (2004). Nanostructured High Entropy Alloys with Multiple Component Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes. **Advanced Engineering Materials**. Vol. 6, Issue 5, pp. 299-303. DOI: 10.1002/adem.200300567
- [2] Zhang, Y., Zuo, T. T., Tang, Z., Gao, M. C., Dahmen, K. A., Liaw, P. K., and Lu, Z. P. (2014). Microstructures and Properties of High-Entropy Alloys. **Progress in Materials Science**. Vol. 61, pp. 1-93. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2013.10.001
- [3] Tsai, M. H. and Yeh, J. W. (2014). High-Entropy Alloys: A critical Review. **Materials Research Letters**. Vol. 2, Issue 3, pp. 107-123. DOI: 10.1080/21663831.2014.912690
- [4] Miracle, D. B., Miller, J. D., Senkov, O. N., Woodward, C., Uchic, M. D., and Tiley, J. (2014). Exploration and Development of High Entropy Alloys for Structural Applications. **Entropy**. Vol. 16, Issue 1, pp. 494-525. DOI: 10.3390/e16010494
- [5] Tang, Z., Huang, L., He, W., and Liaw, P.K. (2014). Alloying and Processing Effects on the Aqueous Corrosion Behavior of High Entropy Alloys. **Entropy**. Vol. 16, Issue 2, pp. 895-911. DOI: 10.3390/e16020895
- [6] Geantă, V., Voiculescu, I., Miloşan, I., Istrate, B., and Mateş, I. M. (2018). Chemical Composition Influence on Microhardness, Microstructure and Phase Morphology of $Al_xCrFeCoNi$ High Entropy Alloys. **Revista de Chimie**. Vol. 69, Issue 4, pp. 798-801. DOI: 10.37358/RC.18.4.6203
- [7] Geantă, V., Voiculescu, I., Stefănoiu, R., Chereches, T., Zecheru, T., Matache, L., and Rotariu, A. (2018). Dynamic Impact Behaviour of High Entropy Alloys Used in the Military Domain. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. Vol. 374, p. 012041. DOI: 10.1088/1757-899X/374/1/012041
- [8] Geantă, V., Voiculescu, I., Istrate, B., Vrânceanu, D. M., Ciocoiu, R., and Cotruţ, C. M. (2018). The Influence of Chromium Content on the Structural and Mechanical Properties of $AlCr_xFeCoNi$ High Entropy Alloys. **International Journal of Engineering Research in Africa**. Vol. 37, pp. 23-28. DOI: 10.4028/www.scientific.net/jera.37.23
- [9] Voiculescu, I., Geanta, V., Vasile, I. M., Ştefănoiu, R., and Tonoiu, M. (2013). Characterisation of Weld Deposits Using as Filler Metal a High Entropy Alloy. **Journal of Optoelectronics and Advanced Materials**. Vol. 15, No. 7-8, pp. 650-654

- [10] Voiculescu, I., Geantă, V., Ștefănoiu, R., Patroi, D., and Binchiciu, H. (2013). Influence of the Chemical Composition on the Microstructure and Microhardness of AlCrFeCoNi High Entropy Alloy. **Revista de Chimie**. Vol. 64, Issue 12, pp. 1441-1444
- [11] Geantă, V., Cherecheș, T., Lixandru, P., Voiculescu, I., Ștefănoiu, R., Dragnea, D., Zecheru, T., and Matache, T. (2017). Virtual Testing of Composite Structures Made of High Entropy Alloys and Steel. **Metals**. Vol. 7, Issue 11, p. 496. DOI: 10.3390/met7110496
- [12] Csaki, I., Ștefănoiu, R., Geanta, V., Voiculescu, I., Sohaciu, M. G., Popescu, G., and Serghiuta, S. (2016). Researches Regarding the Processing Technique Impact on the Chemical Composition, Microstructure and Hardness of AlCrFeCoNi High Entropy Alloy. **Revista de Chimie**. Vol. 67, No. 7, pp. 1373-1377
- [13] Fazakas, E., Varga, B., Geantă, V., Berecz, T., Jenei, P., Voiculescu, I., Coșniță, M., and Ștefănoiu, R. (2019). Microstructure, Thermal, and Corrosion Behavior of the AlAgCuNiSnTi Equiatomic Multicomponent Alloy. **Materials**. Vol. 12, Issue 6, p. 926. DOI: 10.3390/ma12060926
- [14] Popescu, G., Ghiban, B., Popescu, C. A., Rosu, L., Truscă, R., Carcea, I., Soare, V., Dumitrescu, D., Constantin, I., Olaru, M. T., and Carlan, B. A. (2018). New TiZrNbTaFe High Entropy Alloy Used for Medical Applications. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. Vol. 400, Issue 2, p. 022049
- [15] Pickering, E. J., Carruthers, A. W., Barron, P. J., Middleburgh, S. C., Armstrong, D. E. J., and Gandy, A. S. (2012). High-Entropy Alloy for Advanced Nuclear Applications. **Entropy**. Vol. 23, Issue 1, p. 98. DOI: 10.3390/e23010098
- [16] Was, G. S. (2007). **Fundamentals of Radiation Materials Science**. 1st ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany
- [17] Zinkle, S. J. (2012). **Radiation-Induced Effects on Microstructure**. In *Comprehensive Nuclear Materials*. Vol. 1, pp. 65-98
- [18] Kareer, A., Waite, J. C., Li, B., Couet, A., Armstrong, D. E. J., and Wilkinson, A. J. (2019). Short Communication: ‘Low Activation, Refractory, High Entropy Alloys for Nuclear Applications’. **Journal of Nuclear Materials**. Vol. 526, p. 151744. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2019.151744
- [19] Ziegler, J. F., Ziegler, M. D., and Biersack, J. P. (2010). SRIM - The Stopping and Range of Ions in Matter. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**. Vol. 268, Issue 11-12, pp. 1818-1823. DOI: 10.1016/j.nimb.2010.02.091
- [20] Kamislioglu, M. (2021a). Research on the Effects of Bismuth Borate Glass System on Nuclear Radiation Shielding Parameters. **Results in Physics**. Vol. 22, p. 103844. DOI: 10.1016/j.rinp.2021.103844
- [21] Kamislioglu, M. (2021b). An Investigation Into Gamma Radiation Shielding Parameters of the (Al:Si) and (Al+Na):Si-doped International Simple Glasses (ISG) Used in Nuclear Waste Management, Deploying Phy-X/PSD and SRIM Software. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**. Vol. 32, pp. 12690-12704. DOI: 10.1007/s10854-021-05904-8

- [22] Dhal, S., Patro, A., Rath, P. K., Supraja, K., and Swain, M. (2020). Simulation of Very-low Energy Alkali Ion (≤ 10 KeV) Induced Effects on Al_2O_3 Micro Flakes. **Indian Journal of Science and Technology**. Vol. 13, Issue 21, pp. 2111-2118. DOI: 10.17485/IJST/v13i21.97
- [23] Nath, D. and Das, R. (2021). Surface and Displacement Damage Engineering on CdSe Nanocrystalline Thin Film by Swift Heavy Ag Ions: A Theoretical Investigation by SRIM/TRIM Package. **Vacuum**. Vol. 190, p. 110293. DOI: 10.1016/j.vacuum.2021.110293
- [24] Sriwongsa, K., Glumglomchit, P., Sualuang, B., Arunoros, P., Pansuay, M., Ravangvong, S., and Khobkham, C. (2022). Shielding of Uncharged and Charged Radiation of $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ Glass System. **Naresuan University Journal: Science and Technology**. Vol. 30, No. 1, pp. 109-119. DOI: 10.14456/nujst.2022.9