

# การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีเกี่ยวกับคุณสมบัติการกำบังรังสีไอออนไนซ์ของโลหะผสมทังสเตนเป็นหลักที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบฟิวชัน

## Theoretical Analysis of Ionizing Radiation Shielding Properties of Tungsten Based Alloy Used in Fusion Nuclear Reactor

กิตติศักดิ์ ศรีวงศ์ษา<sup>1\*</sup> พันธศักดิ์ กล้ากล่อมจิตร<sup>2</sup> ภูพา เทียนสมบุญ<sup>2</sup> ศุภวิชญ์ เลี่ยมนาค<sup>2</sup>  
ธนโชติ คำคล้าย<sup>2</sup> และสุนันทศักดิ์ ระวังวงศ์<sup>3</sup>

Kittisak Sriwongsa<sup>1\*</sup> Punsak Glumglomchit<sup>2</sup> Phupa Tiensomboon<sup>2</sup>

Suppawit Liamnark<sup>2</sup> Thanachot Kamkhlay<sup>2</sup> and Sunantasak Ravangvong<sup>3</sup>

*Received: May 21, 2022; Revised: July 5, 2022; Accepted: July 5, 2022*

### บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติการกำบังรังสี นิวตรอนพลังงานสูง และรังสีไอออนไนซ์ประเภทที่มีประจุไฟฟ้า (อนุภาคโปรตอน และแอลฟา) ของโลหะผสมทังสเตนจำนวน 6 ตัวอย่าง ได้แก่ MT-17C MT-17F MT-175 MT-18C MT-18F และ MT-185 โดยคุณสมบัติการกำบังรังสีที่พิจารณาคือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass Attenuation Coefficient:  $\mu_m$ ) เลขอะตอมยังผล (Effective Atomic Number:  $Z_{eff}$ ) ค่าความหนาครึ่งค่า (Half Value Layer: HVL) และระยะทางอิสระเฉลี่ย (Mean Free Path: MFP) ซึ่งค่าเหล่านี้ถูกคำนวณด้วยโปรแกรม Phy-X/PSD ที่ช่วงพลังงาน  $10^{-3}$  ถึง  $10^5$  เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ ในขณะที่การกำบังนิวตรอนพลังงานสูงได้พิจารณาค่า Fast Neutron Removal Cross Sections:  $\Sigma_R$  ที่คำนวณด้วยทฤษฎีความหนาแน่นย่อย และรังสีไอออนไนซ์ประเภทที่มีประจุไฟฟ้า (อนุภาคโปรตอน และแอลฟา) ได้ศึกษาในช่วงพลังงาน 0.1 ถึง 15 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ ด้วยโปรแกรม SRIM รุ่น 2013 ซึ่งค่าที่นำมาวิเคราะห์ คืออำนาจศักย์หยุดยั้งมวลรวม (Mass Stopping Power: MSP) และค่าช่วงคาดการณ์เฉลี่ย (Project Ranged: PR) ผลการศึกษาพบว่า โลหะผสมทังสเตน MT-185 มีคุณสมบัติการกำบังรังสี นิวตรอนพลังงานสูง และรังสีไอออนไนซ์ประเภทที่มีประจุไฟฟ้า (อนุภาคโปรตอน และแอลฟา) ดีที่สุด

คำสำคัญ : การกำบังรังสี; นิวตรอนพลังงานสูง; รังสีไอออนไนซ์; โลหะผสมทังสเตน

<sup>1</sup> คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

<sup>2</sup> โรงเรียนหัวหินวิทยาลัย ประจวบคีรีขันธ์

<sup>3</sup> คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

<sup>1</sup> Faculty of Education, Silpakorn University, Nakhon Pathom

<sup>2</sup> Huahinwitthayalai School, Prachuapkhirikhan

<sup>3</sup> Faculty of Science and Technology, Phetchaburi Rajabhat University

\* Corresponding Author, Tel. 08 5215 8754, E - mail: sunantasak.rav@mail.pbru.ac.th

## Abstract

The aim of this research was to study the radiation, fast neutron and charge particles of ionizing radiation (protons and alpha particles) shielding properties of tungsten-based alloys for 6 samples, namely MT-17C, MT-17F, MT-17S, MT-18C, MT-18F, and MT-18S. The radiation shielding properties were discussed based on mass attenuation coefficient ( $\mu_m$ ), effective atomic number ( $Z_{eff}$ ), half value layer (HVL) and mean free path (MFP) values. These values were calculated using Phy-X/PSD program at energy ranging between  $10^{-3}$  -  $10^5$  MeV. Fast neutron shielding properties were explained by fast neutron removal cross sections ( $\Sigma_R$ ) which were determined using partial density. For charge, particles of ionizing radiation (protons and alpha particles) were simulated using SRIM program, version 2013, at energy ranging between 0.1 - 15 MeV. The parameters analyzed were mass stopping power (MSP) and project ranged (PR). The results revealed that MT-18S tungsten-based alloy had an excellent radiation, fast neutron and charge particles of ionizing radiation (protons and alpha particles) shielding properties.

**Keywords:** Radiation Shielding; Fast Neutron; Ionizing Radiation; Tungsten-Based Alloys

## บทนำ

การตระหนักถึงความสำคัญด้านเศรษฐกิจและระบบนิเวศวิทยาด้านการประยุกต์ใช้พลังงานไฟฟ้า แม้จะมี โศกนาฏกรรมที่เชอร์โนบิลและฟูกูชิมะ แต่มนุษยชาติยังให้ความสำคัญกับการพัฒนาพลังงานนิวเคลียร์เพื่อนำมาผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าเป็นลำดับแรก เนื่องจากยังไม่มีพลังงานไฟฟ้าที่ถูกลงและบริสุทธิ์ต่อระบบนิเวศวิทยา พลังงานนิวเคลียร์ช่วยให้เข้าถึงพลังงานสะอาด มีอัตราในการผลิตที่คงที่ และราคาไม่แพง บรรเทาผลกระทบด้านลบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เป็นส่วนสำคัญของการผสมผสานพลังงานของโลกและการทำงาน คาดว่าพลังงานนิวเคลียร์จะเติบโตในทศวรรษหน้า [1] ด้วยการขยายแหล่งพลังงานหมุนเวียนและการเปลี่ยนเชื้อเพลิงจากถ่านหินเป็นก๊าซ การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานนิวเคลียร์ที่สูงขึ้นมีส่วนทำให้การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ทั่วโลกอยู่ที่ 33 จิกะตัน ในปี ค.ศ. 2019 [2] เนื่องจากการผลิตพลังงานในปัจจุบันคิดเป็น 66 % ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลก พลังงานนิวเคลียร์ถือเป็นทรัพยากรที่สำคัญในการจัดการก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศและสภาพอากาศที่เกี่ยวข้อง เห็นได้ชัดว่าพลังงานนิวเคลียร์มีอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำ ซึ่งเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนผ่านไปสู่พลังงานสะอาด ในปี พ.ศ. 2561 พลังงานนิวเคลียร์ผลิตไฟฟ้ามากกว่า 11 เปอร์เซ็นต์ของโลก ในคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC) แสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานนิวเคลียร์มีอัตราเพิ่มขึ้นมากกว่าสองถึงสามเท่าในปัจจุบัน [3]

เมื่อปลายปี พ.ศ. 2560 จำนวนเครื่องปฏิกรณ์พลังงานนิวเคลียร์ที่ใช้งานมีจำนวนทั้งหมด 448 เครื่อง มีกำลังการผลิตทั่วโลกที่ 392 จิกะวัตต์ ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 1.2 จิกะวัตต์ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2559 [2] ปัจจุบัน 30 ประเทศใช้พลังงานนิวเคลียร์ และ 28 ประเทศกำลังพิจารณา วางแผน หรือทำงานอย่างเร่งด่วนเพื่อจัดตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในประเทศ ข้อดีของพลังงานนิวเคลียร์ในแง่ของสภาพอากาศ การลดการเปลี่ยนแปลงความมั่นคงด้านพลังงาน สิ่งแวดล้อมและนโยบายด้านเศรษฐกิจและสังคมเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้หลาย ๆ ประเทศให้ความสนใจที่จะใช้พลังงานนิวเคลียร์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

วิศวกรรมวัสดุด้านพลังงานนิวเคลียร์มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ วัสดุโครงสร้างและวัสดุหุ้มเชื้อเพลิงเป็นตัวกำหนดการทำงานที่ปลอดภัยและประหยัดของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ เป็นที่รู้กันว่าวัสดุโครงสร้างและวัสดุหุ้มเชื้อเพลิงจะได้รับความเสียหายจากการฉายรังสีและอุณหภูมิที่สูงซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาค สมบัติเชิงกล และแม้กระทั่งขนาดภายนอกของส่วนประกอบโครงสร้าง [4] - [5] ข้อจำกัดหนึ่งของกระบวนการในการเผาไหม้เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ คือ ความต้านทานการแผ่รังสีของวัสดุสำหรับหุ้มและท่อของส่วนประกอบย่อยของเชื้อเพลิง ความเสียหายของวัสดุโครงสร้างและวัสดุหุ้มเชื้อเพลิงที่เกิดจากการฉายรังสีในระดับจุลภาคและมหภาคเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างรังสีกับอะตอม ความเข้มของปริมาณรังสี แหล่งกำเนิดรังสี ฯลฯ [5] - [6] การพัฒนาวัสดุที่ทนต่อรังสีจึงเป็นส่วนสำคัญของพลังงานนิวเคลียร์สมัยใหม่ และเป็นเป้าหมายทางวิทยาศาสตร์หรือทางเทคนิคที่สำคัญมาก ความทนทานต่อรังสีและการเผาไหม้ที่สูงเป็นความท้าทายทางวิทยาศาสตร์ที่มีผลกระทบทางเทคโนโลยีที่น่าสนใจ ทังสเตน (W) เป็นสารตั้งต้นสำหรับส่วนประกอบที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบฟิวชัน เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวที่สูง (3695 K) และมีการนำความร้อนที่สูง [7] - [8] ทังสเตนเป็นโลหะทนไฟใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมที่มักจะอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง และสิ่งนี้เกิดขึ้นจากจุดหลอมเหลวสูง การนำความร้อนที่ดี และมีความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิสูง [9] การใช้ทังสเตนและโลหะผสมทังสเตนสำหรับไดเวอร์เตอร์ที่ระบายความร้อนด้วยฮีเลียมและป้องกันอันตรกิริยาที่จะเกิดขึ้นจากฮีเลียมไอออนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ได้มีการศึกษาและตรวจสอบมาหลายปีแล้ว [10] - [17] คุณสมบัติของทังสเตนและโลหะผสมทังสเตนในเครื่องปฏิกรณ์ฟิวชันถูกนำมาวิเคราะห์ถึงการใช้งานและความปลอดภัย [18] แต่ปัจจัยหนึ่งที่ยังไม่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์และกล่าวถึง คือ คุณสมบัติการกำบังรังสีไอออนในช่องโลหะที่มีประจุไฟฟ้าและไม่มีประจุไฟฟ้าของโลหะผสมทังสเตน เมื่อนำโลหะผสมทังสเตนไปประยุกต์ใช้งานจริงในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์จำเป็นอย่างยิ่งที่ควรศึกษาถึงคุณสมบัติด้านการกำบังรังสีทั้งสองประเภท เนื่องจากรังสีทั้งสองจะเข้าไปทำอันตรกิริยาภายในอะตอมของโลหะผสมทังสเตน (สร้างความเสียหายระดับจุลภาค)

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาคุณสมบัติการกำบังรังสีไอออนในช่อง 2 ประเภท คือ ประเภทที่ไม่มีประจุไฟฟ้าและประเภทที่มีประจุไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากเหตุการณ์เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบฟิวชันเนื่องจากทริเทียม (Tritium) กับดิวเทอเรียม (Deuterium) โลหะผสมทังสเตนเป็นหลัก (Tungsten-Based Alloys) จะถูกนำมาวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติการกำบังรังสีแกมมา นิวตรอนพลังงานสูง อนุภาคโปรตอน และแอลฟา โดยรังสีไอออนในช่องประเภทที่ไม่มีประจุไฟฟ้า (รังสีแกมมา) ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการที่นิวตรอนทำอันตรกิริยากับวัสดุโลหะผสมทังสเตน จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Phy-X/PSD ที่ช่วงพลังงาน  $10^{-3}$  ถึง  $10^5$  เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงพลังงานที่มากพอที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านอื่น ๆ พารามิเตอร์หลัก ได้แก่ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass Attenuation Coefficient:  $\mu_m$ ) เลขอะตอมยังผล (Effective Atomic Number:  $Z_{eff}$ ) ค่าความหนาครึ่งค่า (Half Value Layer: HVL) และระยะทางอิสระเฉลี่ย (Mean Free Path: MFP) นิวตรอนพลังงานสูงดำเนินการโดยใช้ทฤษฎีความหนาแน่นย่อย รังสีไอออนในช่องประเภทที่มีประจุไฟฟ้า (อนุภาคโปรตอน และแอลฟา) จะนำมาวิเคราะห์ที่ช่วงพลังงาน 0.1 ถึง 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ โดยช่วงพลังงานดังกล่าวเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบฟิวชันในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ [19] - [22] พารามิเตอร์ต่าง ๆ จะถูกนำมาวิเคราะห์โดยโปรแกรม SRIM รุ่น 2013 ซึ่งพารามิเตอร์ที่นำมาวิเคราะห์ในครั้งนี้ ได้แก่ อำนาจศักยภาพหยุดยั้งเชิงมวล (Mass Stopping Power: MSP) และค่าช่วงคาดการณ์เฉลี่ย (Project Ranged: PR) โดยตัวอย่างวัสดุที่เป็นโลหะผสมทังสเตนเป็นหลัก (Tungsten-Based Alloys) ที่นำมาวิเคราะห์ ได้แก่ MT-17C, MT-17F, MT-17S, MT-18C, MT-18F และ MT-18S

## วิธีการศึกษา

### 1. คุณสมบัติด้านการกำบังรังสีกัมมาในชั้นที่ไม่มีประจุไฟฟ้า

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ด้านการกำบังรังสี ได้แก่ การหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass Attenuation Coefficient:  $\mu_m$ ) สามารถคำนวณได้โดยใช้ซอฟต์แวร์ Phy-X/PSD ซึ่งจะบอกถึงโอกาสของอัตราการเกิดอันตรกิริยาของโฟตอนต่อตัวกลางทั้งแบบอันตรกิริยารวมและอันตรกิริยาลดทอนของแต่ละธาตุและสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลได้ตาม “กฎการผสม (Mixture rule)” จากสมการที่ (1) [23]:

$$\mu_m = \sum w_i (\mu_m)_i \quad (1)$$

เมื่อ

$w_i$  แทนสัดส่วนโดยน้ำหนักของแต่ละธาตุ  
 $(\mu_m)_i$  แทนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแต่ละธาตุ

ค่า  $(\mu_m)_i$  สามารถนำไปหาภาคตัดขวางเชิงอะตอม (Atom Cross-Section:  $\sigma_a$ ) และภาคตัดขวางเชิงอิเล็กตรอน (Electron Cross-Section:  $\sigma_{el}$ ) ได้จากสมการที่ (2) และ (3) [23]:

$$\sigma_a = \frac{I}{N_A} \sum f_i A_i (\mu_m)_i \quad (2)$$

$$\sigma_{el} = \frac{I}{N_A} \sum \frac{f_i A_i}{Z_i} (\mu_m)_i \quad (3)$$

เมื่อ

$N_A$  แทนเลขอาโวกาโดร  
 $f_i$  แทนสัดส่วนจำนวนอะตอม  
 $A_i$  แทนมวลอะตอมของแต่ละธาตุ  
 $Z_i$  แทนเลขอะตอมของแต่ละธาตุ

เลขอะตอมยังผล (Effective Atomic Number:  $Z_{eff}$ ) สามารถหาได้จากสมการที่ (4) [23]:

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_a}{\sigma_{el}} \quad (4)$$

ค่าความหนาครึ่งค่า (Half Value Layer: HVL) คือ ความหนาของวัสดุที่ลดความเข้มของรังสีแกมมาลง 50 % และค่าเส้นทางอิสระเฉลี่ย (Mean Free Path: MFP) จะเปลี่ยนตามระยะทางเชิงเส้นและเป็นระยะทางเฉลี่ยที่รังสีแกมมาผ่านตัวอย่างวัสดุก่อนที่จะเกิดอันตรกิริยากับวัสดุซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (5) และ (6) [24]:

$$HVL = \frac{0.693}{\mu} \quad (5)$$

$$MFP = \frac{1}{\mu} \quad (6)$$

โดย  $\mu$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น หาได้จาก  $\mu = \mu_m \rho$  และ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของวัสดุตัวกลาง

## 2. คุณสมบัติด้านการกำบังนิวตรอนพลังงานสูง

ความน่าจะเป็นของอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับตัวกลางสามารถอภิปรายกันในภาคตัดขวางของการกำจัดที่มีประสิทธิภาพผลจุลภาค (Macroscopic Effective Removal Cross-Section) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (7) [24]:

$$\Sigma_R = \sum_i w_i \left( \frac{\Sigma_R}{\rho} \right)_i \quad (7)$$

โดย  $\left( \frac{\Sigma_R}{\rho} \right)_i$  ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) และ  $w_i$  คือ ภาพตัดขวางการกำจัดมวลขององค์ประกอบแต่ละธาตุและความหนาแน่นย่อย ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) ตามลำดับ

## 3. คุณสมบัติด้านการกำบังรังสีก่อกอไอออนในชั้นชนิดที่มีประจุไฟฟ้า

อัตราการสูญเสียพลังงาน  $dE/dx$  ของรังสีก่อกอไอออนในชั้นชนิดที่มีประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านโลหะผสมเอนโทรปีสูง  $W_x\text{TaTiVCr}$  ถูกกำหนดโดยอันตรกิริยาของคูลอมบ์ที่ถูกป้องกัน (Screened Coulomb Interactions) กับอะตอมและอิเล็กตรอนของโลหะผสมเอนโทรปีสูง  $W_x\text{TaTiVCr}$  กลไกในการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ 1) การชนนิวเคลียส ซึ่งพลังงานจะถูกส่งผ่านในลักษณะการเคลื่อนที่เชิงเส้นหรือเปลี่ยนที่ (Translatory Motion) ไปยังอะตอมของโลหะผสมทังสเตนเป็นฐานโดยรวม และ 2) การชนกันทางอิเล็กตรอนิกส์ ซึ่งเกิดจากอนุภาคที่เคลื่อนที่ได้กระตุ้นหรือปล่อยอิเล็กตรอนของอะตอมออกมา อัตราการสูญเสียพลังงาน  $dE/dx$  หรืออำนาจค้ำยักหยุดยั้งมวลรวม สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (8) [23]:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{dE}{dx} \Big|_n + \frac{dE}{dx} \Big|_e \quad (8)$$

โดย  $-\frac{dE}{dx} \Big|_n$  และ  $-\frac{dE}{dx} \Big|_e$  คือ อัตราการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการหยุดแบบนิวเคลียร์ และ อัตราการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการหยุดแบบอิเล็กตรอนิกส์ ตามลำดับ

รังสีก่อกอไอออนในชั้นชนิดที่มีประจุไฟฟ้าที่ทะลุผ่านเข้าไปในตัวกลางจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางแบบสุ่ม โดยสูญเสียพลังงานจากการหยุดด้วยนิวเคลียร์และอิเล็กตรอนิกส์ เนื่องจากปริมาณการฝังมักจะสูงกว่า 1,012 ไอออนต่อตารางเมตร เส้นทางทะลุผ่านของรังสีก่อกอไอออนในชั้นชนิดที่มีประจุไฟฟ้าจึงสามารถคาดการณ์ได้โดยใช้วิธีการทางสถิติ ความลึกเฉลี่ยของรังสีก่อกอไอออนในชั้นชนิดที่มีประจุไฟฟ้าที่ทะลุผ่านเข้าไปในตัวกลางเรียกว่า ช่วงที่คาดการณ์เฉลี่ย (Projected Range: PR) ซึ่งสัมพันธ์กับช่วง  $R$  ที่เป็นระยะทางจริงที่รังสีก่อกอไอออนในชั้นชนิดที่มีประจุไฟฟ้าทะลุผ่านเข้าไปในตัวกลางจนหยุดนิ่ง จะอยู่ระหว่าง 10 นาโนเมตรถึง 1 ไมโครเมตร สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (9) [23]:

$$PR \cong \frac{R}{1 + (M_2 / 3M_1)} \quad (9)$$

โดย  $M_2$  คือ มวลของเป้าหมาย

อำนาจค์ยหุคยักรวมและช่วงที่คาคการณเจลลย สามารถค่านวณได้โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ The Stopping and Ion Ranges in Matter (SRIM; <http://www.srim.org>)

## ผลการศึกษา

โลหะผสมทั้งสเดนที่ใช้ในการศึกษาสมบัติการกำบังรังสีไอออนในซัชนคที่ไม่มีประจุไฟฟ้าและมีประจุไฟฟ้า ซึ่งองค์ประกอบสัดส่วนทางเคมีแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนองค์ประกอบทางเคมี (โมลเปอร์เซ็นต์) ของตัวอย่างโลหะผสมทั้งสเดน

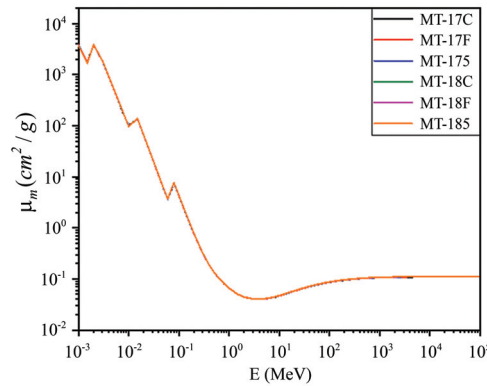
| Code   | Mol (%) |         |         |         | Density (g/cm <sup>3</sup> ) |
|--------|---------|---------|---------|---------|------------------------------|
|        | W (74)  | Ni (28) | Cu (29) | Fe (26) |                              |
| MT-17C | 90.00   | 6.00    | 4.00    | -       | 17.00                        |
| MT-17F | 90.00   | 7.00    | -       | 3.00    | 17.00                        |
| MT-17S | 92.50   | 5.25    | -       | 2.25    | 17.50                        |
| MT-18C | 95.00   | 3.50    | 1.50    | -       | 18.00                        |
| MT-18F | 95.00   | 3.50    | -       | 1.50    | 18.00                        |
| MT-18S | 97.00   | 2.10    | -       | 0.90    | 18.50                        |

### 1. คุณสมบัติด้านการกำบังรังสีก้อไอออนในซัชนคที่ไม่มีประจุไฟฟ้า

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ( $\mu_m$ ) ของโลหะผสมทั้งสเดนที่ค่านวณได้จากโปรแกรม Phy-X/PSD ที่ช่วงพลังงานโฟตอน  $10^{-3}$  -  $10^5$  เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect: PE) การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton Scattering: CS) และการผลิตคู่ (Pair Production: PP) เป็นอันตรกิริยาหลักที่ใช้อธิบายค่า  $\mu_m$  ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยการแบ่งช่วงพลังงานของ โฟตอนเป็น 3 ช่วง คือช่วงพลังงานต่ำ (น้อยกว่า 0.4 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์) ช่วงพลังงานปานกลาง (ระหว่าง 0.4 - 3 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์) และช่วงพลังงานสูง (มากกว่า 3 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์) ที่ช่วงพลังงานต่ำ ค่า  $\mu_m$  ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อพลังงานโฟตอนเพิ่มขึ้นซึ่งปรากฏการณ์ PE แปรผกผันกับพลังงานโฟตอน ( $E^{-3.5}$ ) และที่ช่วงนี้ลักษณะกราฟมีรอยหยักไม่ต่อเนื่องซึ่งเกิดจากพลังงานในช่วงนั้นตกอยู่ในชั้นขอบการดูดกลืน (Absorption Edge) ของธาตุต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2 ช่วงพลังงานปานกลางค่า  $\mu_m$  เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่ง CS เป็นอันตรกิริยาหลัก และค่า  $\mu_m$  แปรผกผันกับพลังงาน ( $\alpha E^{-1}$ ) จากนั้นค่า  $\mu_m$  ค่อนข้างจะคงที่ ซึ่ง PP เป็นอันตรกิริยาหลัก โดยค่า  $\mu_m$  จะแปรผันตรงกับ  $\log E$  อีกทั้งตัวอย่างโลหะผสมทั้งสเดน MT-18S มีค่า  $\mu_m$  สูงสุดในบรรดาตัวอย่างโลหะผสมทั้งสเดนทั้งหมด เนื่องจากตัวอย่างโลหะผสมทั้งสเดนนี้มีความหนาแน่นมากที่สุดและมีส่วนผสมของทั้งสเดน (W) ซึ่งมีเลขอะตอมสูงที่สุด (74) เป็นผลทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างโฟตอนกับวัสดุมากที่สุดนำมาซึ่งกำบังรังสีได้ดีที่สุด [23]

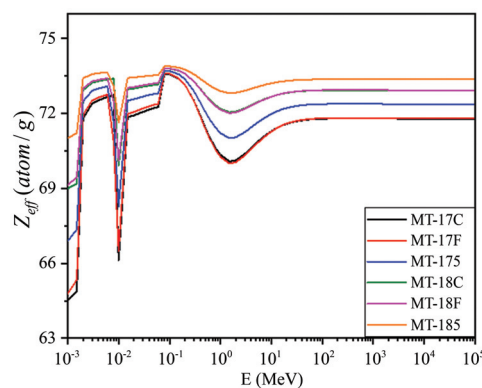
ตารางที่ 2 ชั้นขอบเขตการดูดกลืนพลังงาน (Absorption Edge) (keV)

| ธาตุ | เลขอะตอม | M5   | M4   | M3   | M2   | M1   | L3   | L2   | L1   | K     |
|------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Fe   | 26       |      |      |      |      |      |      |      |      | 7.11  |
| Ni   | 28       |      |      |      |      |      |      |      | 1.01 | 8.33  |
| Cu   | 29       |      |      |      |      |      |      |      | 1.10 | 8.98  |
| W    | 74       | 1.81 | 1.87 | 2.28 | 2.58 | 2.82 | 1.02 | 1.15 | 1.21 | 69.53 |



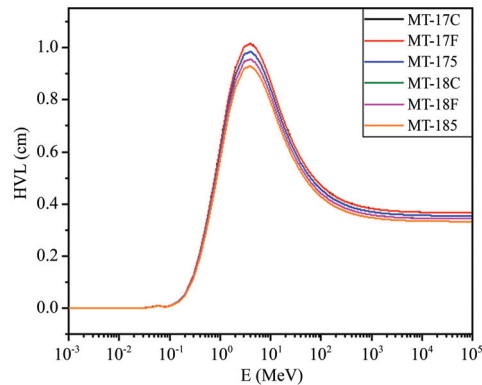
รูปที่ 1 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างโลหะผสมทังสเตนในช่วงพลังงาน  $10^{-3} - 10^5$  เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

เมื่อพิจารณารูปที่ 2 แสดงค่าเลขอะตอมยังผล ( $Z_{\text{eff}}$ ) ของโลหะผสมทังสเตนในช่วงพลังงาน  $10^{-3} - 10^5$  เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ โดยค่านี้แสดงถึงคุณลักษณะของโอกาสของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างวัสดุตัวกลางและรังสี ถ้าค่านี้สูงหมายความว่าวัสดุนั้นมีโอกาสของการเกิดอันตรกิริยาที่สูงทำให้มีความสามารถกำบังรังสีได้ดีตามไปด้วย ค่า  $Z_{\text{eff}}$  จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของโลหะผสมทังสเตน จากรูปจะเห็นได้ว่าตัวอย่างโลหะผสมทังสเตน MT-18S มีค่า  $Z_{\text{eff}}$  สูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่า  $\mu_m$  นอกจากนี้กราฟยังมีค่าสูงสุดไม่เกินค่าเลขอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลัก คือ ทังสเตนที่มีเลขอะตอม 74 อีกด้วย [23]

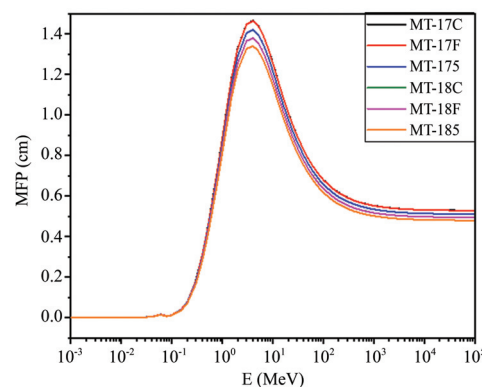


รูปที่ 2 เลขอะตอมยังผลของตัวอย่างโลหะผสมทังสเตนในช่วงพลังงาน  $10^{-3} - 10^5$  เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

ความหนาครึ่งค่า (Half Value Layer: HVL) และระยะทางอิสระเฉลี่ย (Mean Free Path: MFP) ของโลหะผสมทังสเตนที่ระดับพลังงานในช่วง  $10^{-3} - 10^5$  เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ดังรูปที่ 3 และ 4 พบว่าตัวอย่างโลหะผสมทังสเตน MT-18S มีค่าต่ำกว่าโลหะผสมทังสเตนตัวอย่างอื่น ๆ นั่นแสดงว่าโลหะผสมทังสเตนตัวอย่างนี้มีคุณสมบัติการกำบังรังสีดีกว่าตัวอย่างอื่น ๆ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกำบังรังสีได้ [24]



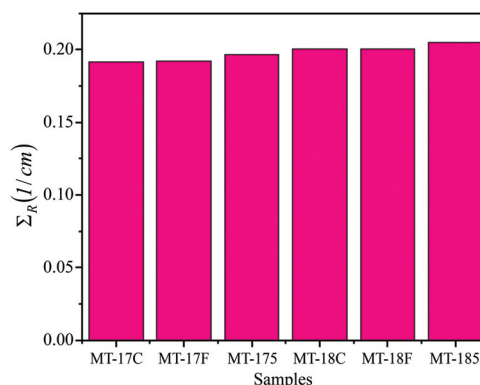
รูปที่ 3 ค่าความหนาครึ่งค่าของตัวอย่างโลหะผสมทั้งสแตนที่ช่วงพลังงาน  $10^{-3} - 10^5$  เมกะอิเล็กตรอนโวลต์



รูปที่ 4 ระยะทางอิสระเฉลี่ยของตัวอย่างโลหะผสมทั้งสแตนที่ช่วงพลังงาน  $10^{-3} - 10^5$  เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

## 2. คุณสมบัติด้านการกำบังนิวตรอนพลังงานสูง

การกำบังนิวตรอนพลังงานสูง (Fast Neutron Removal Cross Sections:  $\Sigma_R$ ) ของโลหะผสมทั้งสแตน ดังรูปที่ 5 พบว่าค่า  $\Sigma_R$  ของตัวอย่างโลหะผสมทั้งสแตน MT-185 มีค่าสูงที่สุดซึ่งเป็นผลมาจากในตัวอย่างนี้มีองค์ประกอบของธาตุทั้งสแตน (W) มากที่สุด และนั่นแสดงว่าตัวอย่างโลหะผสมทั้งสแตน MT-185 นี้มีคุณสมบัติในการกำบังนิวตรอนพลังงานสูงดีที่สุดใน [24]

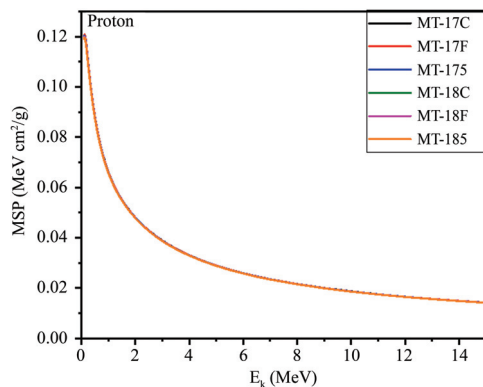


รูปที่ 5 การกำบังนิวตรอนพลังงานสูงของโลหะผสมทั้งสแตน

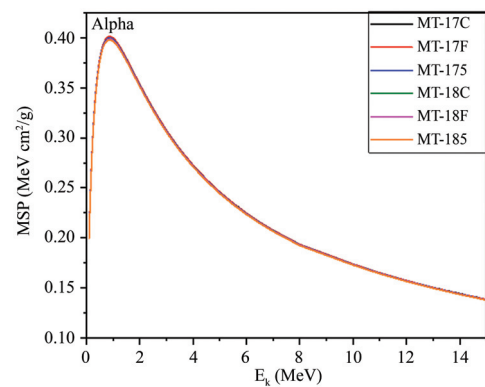
## 3. คุณสมบัติด้านการกำบังรังสีแกมมาในวัสดุที่มีประจุไฟฟ้า

เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า เช่น โปรตอนและแอลฟา ผ่านเข้าไปในวัสดุ จะเกิดการชนกับนิวเคลียสและอิเล็กตรอนในตัวอย่างวัสดุนั้น ๆ โดยการชนนี้อ่อนนุ่มจะสูญเสียพลังงานจลน์ (Energy kinetic:  $E_k$ )

ทั้งหมดในวัสดุ เรียกว่า อำนาจกักรังสีหยุดยั้งเชิงมวล (Mass Stopping Powers: MSP) ซึ่งการสูญเสียพลังงานนั้นขึ้นอยู่กับพลังงาน มวล และเลขอะตอมของอนุภาค รวมทั้งมวลเลขอะตอม และความหนาแน่นของวัสดุ การคำนวณหาค่า MSP ของอนุภาคโปรตอน และแอลฟา ของตัวอย่างโลหะผสมทังสเตนที่พลังงาน 0.1 - 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ดังรูปที่ 6 พบว่า ค่า MSP ของอนุภาคแอลฟาสูงกว่าของอนุภาคโปรตอน เนื่องจากอนุภาคโปรตอนมีประจุไฟฟ้าที่น้อยกว่าแต่มีความเร็วมากกว่าอนุภาคแอลฟา ซึ่งค่า MSP แปรผันตรงกับปริมาณประจุไฟฟ้า แต่แปรผกผันกับกำลังสองของความเร็ว และตัวอย่างโลหะผสมทังสเตน MT-185 มีค่าต่ำสุด [25]



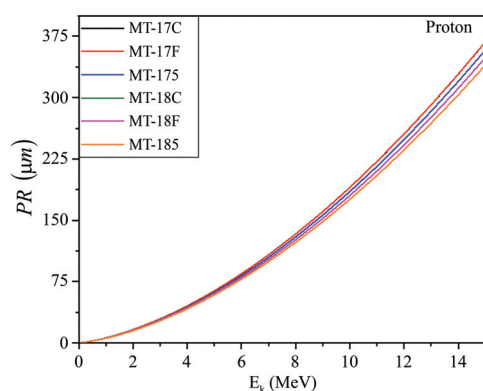
(ก) อำนาจกักรังสีหยุดยั้งเชิงมวล Proton



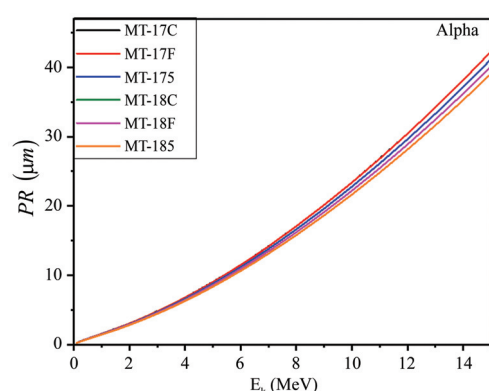
(ข) อำนาจกักรังสีหยุดยั้งเชิงมวล Alpha

รูปที่ 6 อำนาจกักรังสีหยุดยั้งเชิงมวลของอนุภาคโปรตอนและแอลฟาที่พลังงาน 0.1 - 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าผ่านเข้าไปภายในวัสดุก่อนสูญเสีย  $E_k$  ทั้งหมด ซึ่งการคาดการณ์อนุภาคที่เคลื่อนที่ช้าลงอย่างต่อเนื่องนั้น เรียกว่า ช่วงที่คาดการณ์เฉลี่ยของอนุภาค (Projected Range: PR) ซึ่งเป็นค่าที่สำคัญเกี่ยวกับการกักรังสีของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าซึ่งถ้าคำนวณได้ค่าความสามารถการกักรังสีของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าได้ดี ค่า PR ของอนุภาคโปรตอนและแอลฟาในตัวอย่างโลหะผสมทังสเตน ดังรูปที่ 7 พบว่า โลหะผสมทังสเตน MT-185 มีค่า PR ต่ำที่สุด แสดงว่าตัวอย่างนี้มีความสามารถในการกักรังสีของอนุภาคโปรตอนและแอลฟาได้ดีที่สุด เพราะว่าการดูดกลืนอนุภาคโปรตอนและแอลฟาได้ดีกว่าตัวอย่างโลหะผสมทังสเตนตัวอื่น ๆ [23]



(ก) ช่วงคาดการณ์เฉลี่ยของ Proton



(ข) ช่วงคาดการณ์เฉลี่ยของ Alpha

รูปที่ 7 ช่วงคาดการณ์เฉลี่ยของอนุภาคโปรตอนและแอลฟาที่พลังงาน 0.1 - 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

## สรุป

การศึกษาสมบัติการกักรังสีของโลหะผสมทังสเตนจำนวน 6 ตัวอย่าง ได้แก่ MT-17C, MT-17F, MT-17S, MT-18C, MT-18F และ MT-185 โดยพารามิเตอร์ที่พิจารณาคือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล

(Mass Attenuation Coefficient:  $\mu_m$ ) เลขอะตอมยังผล (Effective Atomic Number:  $Z_{\text{eff}}$ ) ค่าความหนาครึ่งค่า (Half Value Layer: HVL) และระยะทางอิสระเฉลี่ย (Mean Free Path: MFP) ด้วยโปรแกรม Phy-X/PSD ที่ช่วงพลังงาน  $10^{-3}$  ถึง  $10^5$  เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ ผลการศึกษาพบว่า โลหะผสมทังสแตน MT-185 มีคุณสมบัติการกำบังรังสีที่ดีที่สุด ในขณะที่การกำบังนิวตรอนพลังงานสูง (Fast Neutron Removal Cross Sections:  $\Sigma_R$ ) ที่คำนวณด้วยทฤษฎีความหนาแน่นย่อย พบว่าโลหะผสมทังสแตน MT-185 มีการกำบังดีที่สุด และรังสีไอออนไนซ์ประเภทที่มีประจุไฟฟ้า (อนุภาคโปรตอน:  $H^+$  และแอลฟา:  $He^{4+}$ ) ที่ศึกษาในช่วงพลังงาน 0.1 ถึง 15 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ ด้วยโปรแกรม SRIM รุ่น 2013 ซึ่งค่าที่นำมาวิเคราะห์ คืออำนาจศักยภาพหยุดยั้งมวลรวม (Mass Stopping Power: MSP) และค่าช่วงคาดการณ์เฉลี่ย (Project Ranged: PR) พบว่าโลหะผสมทังสแตน MT-185 มีคุณสมบัติการกำบังรังสีไอออนไนซ์ประเภทที่มีประจุไฟฟ้าได้ดีที่สุด

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศิลปากร สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ Thailand Science Research and Innovation (TSRI) ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้

## References

- [1] Chu, S. and Majumdar, A. (2012). Opportunities and Challenges for a Sustainable Energy Future. **Nature**. Vol. 488, Issue 7411, pp. 294-303. DOI: 10.1038/nature11475
- [2] IAEA, International Atomic Energy Agency. (2018). **Nuclear Technology Review**. Vienna, Austria
- [3] The Intergovernmental Panel on Climate Change. (2001). **Future Work Program of the IPCC**. Geneva, Switzerland
- [4] A Course of Lectures Nuclear Energy Delivered by Specialists of the National Atomic Energy Generating Company Energy Atom. (2019). **The Odessa National Polytechnic University**. Odessa, Ukraine
- [5] Was, G. S. (2007). **Fundamentals of Radiation Materials Science: Metals and Alloys**. Springer, Berlin
- [6] Voyevodin, V. N. and Neklyudov, I. M. (2006). **Evolution of the Structure-Phase State and Radiation Resistance of Structural Materials**. Kiev, Naukova Dumka (in Russian)
- [7] Bolt, H., Barabash, V., Krauss, W., Linke, J., Neu, R., Suzuki, S., Yoshida, N., and ASDEX Upgrade Team. (2004). Materials for the Plasma-Facing Components of Fusion Reactors. **Journal of Nuclear Materials**. Vol. 329-333, Part A, pp. 66-73. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2004.04.005
- [8] Rieth, M., Doerner, R., Hasegawa, A., Ueda, Y., and Wirtz, M. (2019). Behavior of Tungsten Under Irradiation and Plasma Interaction. **Journal of Nuclear Materials**. Vol. 519, pp. 334-368. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2019.03.035
- [9] Neu, R., Riesch, J., Coenen, J. W., Brinkmann, J., Calvo, A., Elgeti, S., García-Rosales, C., Greuner, H., Hoeschen, T., Holzner, G., Klein, F., Koch, F., Linsmeier, C., Litnovsky, A., Wegener, T., Wurster, S., and You, F. H. (2016). Advanced Tungsten Materials for Plasma-Facing Components of DEMO and Fusion Power Plants. **Fusion Engineering and Design**. Vol. 109-111, Part A, pp. 1046-1053. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2016.01.027

- [10] Pamela, J., Bécoulet, A., Borba, D., Boutard, J., Horton, L., and Maisonnier, D. (2009). Efficiency and Availability Driven R&D Issues for DEMO. **Fusion Engineering and Design**. Vol. 84, Issues 2-6, pp. 194-204. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2009.02.028
- [11] Maisonnier, D., Campbell, D., Cook, I., Di Pace, L., Giancarli, L., Hayward, J., Li Puma, A., Medrano, M., Norajitra, P., Roccella, M., Sardain, P., Tran, M. Q., and Ward, D. (2007). Power Plant Conceptual Studies in Europe. **Nuclear Fusion**. Vol. 47, Issue 11, pp. 1524-1532. DOI: 10.1088/0029-5515/47/11/014
- [12] Norajitra, P., Abdel-Khalik, S. I., Giancarli, L. M., Ihli, T., Janeschitz, G., Malang, S., Mazul, I. V., and Sardain, P. (2008). Divertor Conceptual Designs for a Fusion Power Plant. **Fusion Engineering and Design**. Vol. 83, Issues 7-9, pp. 893-902. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2008.05.022
- [13] Janeschitz, G. (2001). Plasma-Wall Interaction Issues in ITER. **Journal of Nuclear Materials**. Vol. 290-293, pp. 1-11. DOI: 10.1016/S0022-3115(00)00623-1
- [14] Bolt, H., Barabash, V., Federici, G., Linke, J., Loarte, A., Roth, J., and Sato, K. (2002). Plasma Facing and High Heat Flux Materials - Needs for ITER and Beyond. **Journal of Nuclear Materials**. Vol. 307-311, Part 1, pp. 43-52. DOI: 10.1016/S0022-3115(02)01175-3
- [15] Wittlich, K., Hirai, T., Compan, J., Klimov, N., Linke, J., Loarte, A., Merola, M., Pintsuk, G., Podkovyrov, V., Singheiser, L., and Zhitlukhin, A. (2009). Damage Structure in Divertor Armor Materials Exposed to Multiple ITER Relevant ELM Loads. **Fusion Engineering and Design**. Vol. 84, Issues 7-11, pp. 1982-1986. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2008.11.049
- [16] Hirai, T., Pintsuk, G., Linke, J., and Batilliot, M. (2009). Cracking Failure Study of ITER-Reference Tungsten Grade Under Single Pulse Thermal Shock Loads at Elevated Temperatures. **Journal of Nuclear Materials**. Vol. 390-391, pp. 751-754. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2009.01.313
- [17] Roth, J., Tsitrone, E., Loarte, A., Loarer, T., Counsell, G., Neu, R., Philipps, V., Brezinsek, S., Lehnen, M., Coad, P., Grisolia, C., Schmid, K., Krieger, K., Kallenbach, A., Lipschultz, B., Doerner, R., Causey, R., Alimov, V., Shu, W., Ogorodnikova, O., Kirschner, A., Federici, G., Kukushkin, A., and EFDA PWI Task Force, ITER PWI Team, Fusion for Energy, 1TPA SOL/D1V. (2009). Recent Analysis of Key Plasma Wall Interactions issues for ITER. **Journal of Nuclear Materials**. Vol. 390-391, pp. 1-9. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2009.01.037
- [18] Rieth, M., Boutard, J. L., Dudarev, S. L., Ahlgren, T., Antusch, S., Baluc, N., Barthe, M. F., Becquart, C. S., Ciupinski, L., Correia, J. B., Domain, C., Fikar, J., Fortuna, E., Fu, C. C., Gaganidze, E., Galán, T. L., García-Rosales, C., Gludovatz, B., Greuner, H., Heinola, K., Holstein, N., Juslin, N., Koch, F., Krauss, W., Kurzydowski, K. J., Linke, J., Linsmeier, C., Luzginova, N., Maier, H., Martinez, M. S., Missiaen, J. M., Muhammed, M., Muñoz, A., Muzyk, M., Nordlund, K., Nguyen-Mann, D., Norajitra, P., Opschoor, J., Pintsuk, G., Pippan, R., Ritz, G., Romaner, L., Rupp, D., Schaublin, R., Schlosser, J., Uytendhouwen, I., Van der Laan, J. G., Veleva, L., Ventelon, L., Wahlberg, S., Willaime, F., Wurster, S., and Yar, M. A. (2011). Review on the EFDA Programme on Tungsten Materials Technology and Science. **Journal of Nuclear Materials**. Vol. 417, Issues 1-3, pp. 463-467. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2011.01.075

- [19] Causey, R. A. (2002). Hydrogen Isotope Retention and Recycling in Fusion Reactor Plasma-Facing Components. **Journal of Nuclear Materials**. Vol. 300, Issues 2-3, pp. 91-117. DOI: 10.1016/S0022-3115(01)00732-2
- [20] Moak, C. D. (1953). A Study of the  $H^3 + He^3$  Reactions. **Physical Review Journal Archive**. Vol. 92, Issue 2, p. 383. DOI: 10.1103/PhysRev.92.383
- [21] Kühn, B. and Schlenk, B. (1963). Winkelverteilungen für die reaction  $He^3 + T$ . **Nuclear Physics**. Vol. 48, pp. 353-360. DOI: 10.1016/0029-5582(63)90174-3
- [22] Nocken, U., Quast, U., Richter, A., and Schrieder, G. (1973). The Reaction  $^3H(^3He, d)^4He$  at very low energies: energy dependent violations of the Barshay-Temmerisospin theorem and highly excited states in  $^6Li$ . **Nuclear Physics A**. Vol. 213, Issue 1, pp. 97-106. DOI: 10.1016/0375-9474(73)90184-X
- [23] Sriwongsa, K., Glumglomchit, P., Limkiatcherdchoo, R., Kinchokawat, A., Tantiwatcharakultorn, I., Ravangvong, S., and Khobkham, C. (2021). Simulation of  $Gd_2O_3$ - $TeO_2$ - $B_2O_3$  Glass System to Investigate the Ionizing Radiation Shielding Properties. **Rajamangala University of Technology Krungthep**. Vol. 15, Issue 12, pp. 70-83. (in Thai)
- [24] Sriwongsa, K., Glumglomchit, P., Wananuraksakul, T., Pimprakhon, A., Hanchana, T., and Ravangvong, S. (2020). Simulation of Shielding Parameters of Some High Entropy Alloys Containing Energies for Gamma Ray and Fast Neutron. **Research Journal Rajamangala University of Technology Thanyaburi**. Vol. 19, Issue 2, pp. 97-105. (in Thai)
- [25] Ravangvong, S., Glumglomchit, P., Proprsserd, P., Keawkrid, T., Thiantanakorn, T., Khobkham, C., and Sriwongsa, K. (2022). The Study of Damage Caused by Proton and Alpha Particles on the Surface of Alloys Used as Structures in Nuclear Reactors. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 15, No. 1, pp. 38-47