

ประสิทธิภาพของฟิล์มบางที่เคลือบโลหะผสมเซอร์คาลอยร์-4 ในท่อหุ้มเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้า นิวเคลียร์ ต่อการกำบังรังสีแกมมา นิวตรอน โปรตอน และแอลฟา

The Efficiency of Thin Films Applied to Zircaloy-4 Alloys in Fuel Cladding Pipe of Nuclear Power Plant Against Gamma, Neutron, Proton and Alpha Shielding

สุนันทศักดิ์ ระวังวงศ์^{1*}, พันธศักดิ์ กล้ากล่อมจิตร², ภาวัต ผ่องอำไพ², พศวีร์ ลิ้มเกียรติเชิดชู²,
พรพิพัฒน์ แนนน้อย², จุมพล ขอบขำ³, กิตติศักดิ์ ศรีวงศ์ษา^{4,5,6}, อรอนงค์ แชมเล็ก^{4,5}, วรณา วัฒนา⁷
Sunantasak Ravangvong^{1*}, Punsak Glumglomchit², Pawat Pongampai²,
Possawee Limkiatcherdchoo², Pronpipath Neamnoi², Chumphon Khobkham³,
Kittisak Sriwongsa^{4,5,6}, Onanong Chaemlek^{4,5}, Wanna Wattana⁷

¹สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

¹Division of Science and Technology, Faculty of Science and Technology Phetchaburi Rajabhat University
โรงเรียนหัวหินวิทยาลัย

²Huahinvithayalai School

³สำนักวิชาศึกษาทั่วไป มหาวิทยาลัยธนบุรี

³Faculty of Engineering, Thonburi University

⁴คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

⁴Faculty of Education, Silpakorn University

⁵ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

⁵Department of Physics, Faculty of Science, Silpakorn University

โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยศิลปากร

⁶The demonstration school of Silpakorn University

⁷สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

⁷Division of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Phetchaburi Rajabhat University

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติการกำบังรังสีไอออไนซ์ชนิดที่ไม่มีประจุไฟฟ้าและมีประจุไฟฟ้าของโลหะผสมเซอร์คาลอยร์-4 (Zircaloy-4) หนา 500 นาโนเมตร ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบาง Al_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , NiO , Nb_2O_5 และ Y_2O_3 หนา 200 นาโนเมตร โดยค่าพารามิเตอร์สำหรับการกำบังรังสีไอออไนซ์ชนิดที่ไม่มีประจุไฟฟ้า ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล เลขอะตอมยังผล และผลรวมภาคตัดขวางนิวตรอนพลังงานสูง ที่ช่วงพลังงานรังสีแกมมา 10^{-3} – 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ในขณะที่การกำบังรังสีไอออไนซ์ชนิดที่มีประจุไฟฟ้าได้วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับความเสียหาย ได้แก่ ค่าไอออนกระเจิงกลับของอนุภาคแอลฟาและโปรตอน

* Corresponding author : sunantasak.rav@mail.pbru.ac.th

พลังงานจลน์ 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติในการกำบังรังสีไอออนไนซ์ชนิดที่ไม่มีประจุไฟฟ้า ได้แก่ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล เลขอะตอมยังผล พบว่า ฟิล์มบาง Y_2O_3 มีค่าทั้งสองสูงที่สุดทำให้ทราบว่าฟิล์มบาง Y_2O_3 มีคุณสมบัติในการกำบังรังสีไอออนไนซ์ชนิดที่ไม่มีประจุไฟฟ้าดีที่สุด ในขณะที่ฟิล์มบาง NiO มีคุณสมบัติการกำบังนิวตรอนพลังงานสูงดีที่สุด และฟิล์มบาง Al_2O_3 มีคุณสมบัติในการลดความเสียหายที่เกิดขึ้นจากรังสีไอออนชนิดที่มีประจุไฟฟ้าได้ดีที่สุด

คำสำคัญ: ฟิล์มบาง รังสีไอออนไนซ์ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล

Abstract

This research has been studied uncharged and charged ionizing radiation shielding for Zircaloy-4 which thick 500 nm. This sample was coated with thin film Al_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , NiO, Nb_2O_5 and Y_2O_3 , which was thick 200 nm. The parameters for uncharged ionizing radiation such as mass attenuation coefficient, effective atomic number and fast neutron removal cross section were simulated at energy 10^{-3} – 10^5 MeV. While parameters for charged ionizing radiation such as back-scattered ions of alpha particles and proton were determined at kinetic energy 10 keV. The results for uncharged ionizing radiation found that the mass attenuation coefficient and effective atomic number values for Y_2O_3 thin film had the highest. These results indicated that Y_2O_3 thin film was excellent uncharged ionizing radiation shielding. While NiO thin film was excellent fast neutron shielding. For charged ionizing radiation shielding properties, the results indicated that Al_2O_3 thin film was the best damage reduction properties.

Keywords: Thin film, Ionizing radiation, Mass attenuation coefficient

1. บทนำ

พลังงานนิวเคลียร์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด (Brook & Bradshaw, 2015) ในประเทศที่พัฒนาแล้วพลังงานนิวเคลียร์จะถูกนำมาประยุกต์ใช้งานด้านการผลิตกระแสไฟฟ้า (Fiore, 2006) ประเทศไทยเป็นอีกหนึ่งประเทศที่มีอัตราการใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นหัวข้อหนึ่งที่มีทุกครั้งที่การจัดประชุมของกระทรวงพลังงานคือ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ แต่ยังมีติดปัญหาหลายด้าน เช่น ความรู้ความเข้าใจของประชากรในประเทศ และยังขาดแคลนแรงงานที่จะปฏิบัติงานในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ เป็นต้น วิศวกรรมด้านวัสดุกำบังรังสีเป็นอีกสาขาหนึ่งที่น่าสนใจที่จะทำงานควบคู่ไปกับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โดยในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์วัสดุป้องกันประสิทธิภาพสูงเป็นสิ่งจำเป็นเนื่องจากมีทั้งระดับของรังสีและ

อุณหภูมิที่สูงมาก (Kim, 2009) หนึ่งในปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสี คือ การสึกกร่อนของสวนผลิตไอน้ำ ส่วนที่แลกเปลี่ยนความร้อน และชุดเชื้อเพลิง ในเครื่องปฏิกรณ์แบบใช้น้ำแรงดันสูง (pressurized water reactors; PWRs) ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการไหล และอันตรกิริยาระหว่างรังสีไอออนไนซ์กับวัสดุตัวกลาง ปัญหานี้เป็นปัญหาสำคัญเนื่องจากความเสียหายที่เกิดจากการสึกกร่อนในท่อช่องเชื้อเพลิงอาจทำให้เกิดการทะลุและการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสี ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อผู้ที่ปฏิบัติงานในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ในช่วงสองสามทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการคาดการณ์ความเสียหายจากการสึกกร่อนด้วยแบบจำลองตัวเลขที่ตีพอสมควรสำหรับท่อระบบผลิตไอน้ำในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ (Morandin & Sauvé, 2003) มีการพัฒนารูปแบบการสึกกร่อนหลายรูปแบบภายใต้สภาวะการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบแรงดันน้ำทั่วไป (Blau, 2014; Kim, 2009; Rubiolo & Young, 2009) อย่างไรก็ตามการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเหล่านี้มีปัญหาหลักเนื่องจากไม่มีข้อมูลการสึกกร่อนของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ใช้งานอยู่ และยังไม่มีการทดสอบการสึกกร่อนที่น่าพอใจที่สามารถจำลองสภาพของเครื่องปฏิกรณ์จริงได้ วิธีการหุ้มแกนเชื้อเพลิงเป็นอีกวิธีที่น่าสนใจมากเพื่อช่วยลดการสึกกร่อนของท่อระบบผลิตไอน้ำในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ วัสดุหุ้มเชื้อเพลิงที่ใช้งานในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ปัจจุบันทำจากโลหะผสมเซอร์โคเนียม ในระหว่างการใช้งานแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์จะถูกจุ่มลงในน้ำซึ่งส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนและซึมเข้าของไฮโดรเจน ดังนั้นโลหะผสมที่จะนำมาใช้ในแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์จะต้องสามารถลดปรากฏการณ์ทั้งสองให้เหลือน้อยที่สุด (Motta et al., 2015) โลหะผสมเซอร์โคเนียมเป็นที่ต้องการอย่างมาก เนื่องจากมีความต้านทานการกัดกร่อนสูง และสามารถลดความเสียหายจากเทอร์มัลนิวตรอนได้ดี อย่างไรก็ตามความต้านทานการสึกกร่อนของโลหะผสมเซอร์โคเนียมมีค่าต่ำกว่าโลหะผสมนิกเกิล ดังนั้นในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาโลหะผสมเซอร์โคเนียมให้มีประสิทธิภาพในการต้านทานการสึกกร่อนที่ดีขึ้น เพื่อนำมาใช้เป็นท่อหุ้มเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบใช้น้ำแรงดันสูง จากปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบฟิชชันที่มีรังสีพลังงานต่าง ๆ (Cho et al., 1998; Fu et al., 2000; Lin et al., 2016; Qu et al., 2016; Sabol, 2005) การเคลือบฟิล์มบางเป็นอีกวิธีหนึ่งในการลดการสึกกร่อน แต่ปัญหาหลักเกี่ยวกับการเคลือบฟิล์มบางคือความหนา เนื่องจากความหนาโดยทั่วไปของท่อหุ้มเชื้อเพลิงมีค่าน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร ดังนั้นฟิล์มบางที่นำมาเคลือบจะต้องมีความหนาระดับนาโนเมตร ฟิล์มบาง Al_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , NiO , Nb_2O_5 , และ Y_2O_3 ถูกนำมาใช้เคลือบกับท่อหุ้มเชื้อเพลิง โดยฟิล์มบางเหล่านี้มีความหนาอยู่ระหว่าง 200–250 นาโนเมตร จากเดิม 75 นาโนเมตร เนื่องจากมีความทนทาน และทนต่อการสึกกร่อนสูง (Chou et al., 1991; Edlou et al., 1993; Tang et al., 2017)

เพื่อศึกษาความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับท่อหุ้มเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์และคุณสมบัติการกำบังรังสีจากเหตุการณ์การดูดกลืนรังสีนิวตรอนที่ได้มาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบฟิชชัน ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อธาตุของท่อหุ้มเชื้อเพลิงดูดกลืนนิวตรอนทำให้เกิดการสลายตัวแล้วปลดปล่อยรังสีแกมมา แอลฟา เบตา และโปรตอนออกมา เช่น เทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) เมื่อทำอันตรกิริยากับท่อหุ้มเชื้อเพลิงแล้วจะ

ปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา นิวตรอนพลังงานสูง (fast neutron) เมื่อทำอันตรกิริยากับท่อหุ้มเชื้อเพลิงแล้วจะปลดปล่อย แอลฟา และโปรตรอนออกมา ทั้งรังสีแกมมา อนุภาคแอลฟา และอนุภาคโปรตรอน จะสร้างความเสียหายให้กับท่อหุ้มเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เทอร์มัลนิวตรอนและนิวตรอนพลังงานสูงเป็นผลผลิตที่เกิดมาจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และถูกนำมาใช้งานเพื่อรักษาเนื้องอก ภาพฉายนิวตรอน วิเคราะห์ประเภทของธาตุ และจำนวนปริมาณธาตุในวัสดุตัวอย่างใด ๆ โปรแกรม WinXCom เป็นโปรแกรมหนึ่งที่สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของวัสดุตัวอย่าง โดยค่าที่คำนวณมาได้นี้จะบ่งบอกถึงโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาทั้งหมดระหว่างรังสีแกมมากับวัสดุตัวอย่าง ค่าที่ได้ดังกล่าวจะบ่งบอกถึงคุณสมบัติในการกำบังรังสีของวัสดุตัวอย่าง และโปรแกรมการหยุดและช่วงของไอออนในสสาร (stopping and range of ions in matter; SRIM) เป็นโปรแกรมที่มีการจำลองการส่งผ่านของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า (Ziegler et al., 2010) SRIM เป็นโปรแกรมที่ใช้ออนติคาร์โลเป็นฐาน และมีโครงสร้างพื้นฐานที่มีอิทธิพลสูงมากเพื่อใช้ในการวัดผลของรังสี จำนวนการสูญเสียพลังงานและอัตราความเสียหายของอนุภาคจะถูกจำลองขึ้นมาด้วยโปรแกรมนี้ ผลของรังสีที่กระทำต่อวัสดุจะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของรังสี และจำนวนของพลังงาน (Ziegler, 2004) โดยทั่วไปแล้วโปรแกรมนี้จะคำนวณอันตรกิริยาของไอออนกับสสาร และคำนวณถึงปริมาณทางกายภาพต่าง ๆ ที่เป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยานี้ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกตัวอย่างโลหะผสมเซอร์คาลอย-4 (Zircaloy-4) โดยมีค่าความหนา 500 นาโนเมตร ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบาง Al_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , NiO , Nb_2O_5 และ Y_2O_3 ที่ความหนา 200 นาโนเมตร โปรแกรม WinXCom จะนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับคุณสมบัติในการกำบังรังสีไอออนในซันดิตที่ไม่มีประจุไฟฟ้า ได้แก่ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล เลขอะตอมยังผล และผลรวมภาคตัดขวางนิวตรอนพลังงานสูง ที่ช่วงพลังงานรังสีแกมมา 10^{-3} – 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ โปรแกรม SRIM จะนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับความเสียหาย และคุณสมบัติในการกำบังรังสีไอออนในซันดิตที่มีประจุไฟฟ้าได้แก่ ค่าไอออนกระเจิงกลับของอนุภาคแอลฟาและโปรตรอนที่พลังงานจลน์ 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ผลที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ได้ เช่น การตรวจเอกซเรย์คอมพิวเตอร์นิวตรอน (Neutron computed tomography) การใช้รังสีรักษาด้วยนิวตรอนพลังงานสูง (Fast neutron radiotherapy) การถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน (Neutron radiography) การรักษามะเร็งด้วยเทคนิคการจับเทอร์มัล และอีพิเทอร์มัลนิวตรอน (Thermal and epithermal neutrons neutron capture therapy) เป็นต้น

2. วิธีการทดลอง

2.1 การกำบังรังสีไอออนในซันดิตที่ไม่มีประจุไฟฟ้า

การศึกษานิวตรอนกิริยาโฟตอนของตัวอย่างโลหะผสมเซอร์คาลอย-4 (Zircaloy-4) หนา 500 นาโนเมตร ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบาง Al_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , NiO , Nb_2O_5 และ Y_2O_3 ที่ความหนา 200 นาโนเมตร ที่ช่วงพลังงานรังสีแกมมา 10^{-3} – 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ด้วยโปรแกรม WinXCom ซึ่งการคำนวณค่า

สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (mass attenuation coefficient: μ_m) ของธาตุ สารประกอบ หรือสารผสม คำนวณได้จากกฎการผสม (mixture rule) ตามสมการ (1) (Kirdsiri et al., 2012; Limkitjaroenporn et al., 2012)

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

เมื่อ w_i คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุหรือสารประกอบ และ $(\mu_m)_i$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุแต่ละชนิด

ค่าเลขอะตอมยังผล (effective atomic number: Z_{eff}) คือ ค่าเฉลี่ยของเลขอะตอมในสารที่เป็นสารประกอบหรือของผสม และนิยามได้จากสมการ (2) (Intom et al., 2020; Issa et al., 2017; Kaur et al., 2018)

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_{t,a}}{\sigma_{t,el}} \quad (2)$$

โดยที่ $\sigma_{t,a}$ คือ ภาคตัดขวางรวมของอันตรกิริยาทั้งหมดต่ออะตอมซึ่งมีสมการ (3)

$$\sigma_{t,a} = \frac{\mu_m}{N_A \sum (w_i / A_i)} \quad (3)$$

และ $\sigma_{t,el}$ คือ ภาคตัดขวางรวมของอันตรกิริยาทั้งหมดต่ออิเล็กตรอนซึ่งมีสมการ (4)

$$\sigma_{t,el} = \frac{1}{N_A} \sum \frac{f_i A_i}{Z_i} (\mu_m)_i \quad (4)$$

เมื่อ N_A คือ เลขอะโวกาโดร มีค่าเท่ากับ 6.02×10^{23}

A_i คือ เลขมวลของธาตุแต่ละชนิดในสาร

Z_i คือ เลขอะตอมของธาตุแต่ละชนิดในสาร

f_i คือ อัตราส่วนของจำนวนอะตอมของธาตุแต่ละชนิดในสารต่อมวล 1 กรัม กับจำนวนอะตอมทั้งหมดของสารต่อมวล 1 กรัม

ผลรวมภาคตัดขวางนิวตรอนพลังงานสูง (Fast neutron removal cross section: Σ_R) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการใช้พิจารณาการกำบังนิวตรอนพลังงานสูง ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากเอกสารอ้างอิง (Issa et al., 2017; Oto et al., 2015; Singh et al., 2014)

2.2 การกำบังรังสีไอออนไนซ์ชนิดที่มีประจุไฟฟ้า

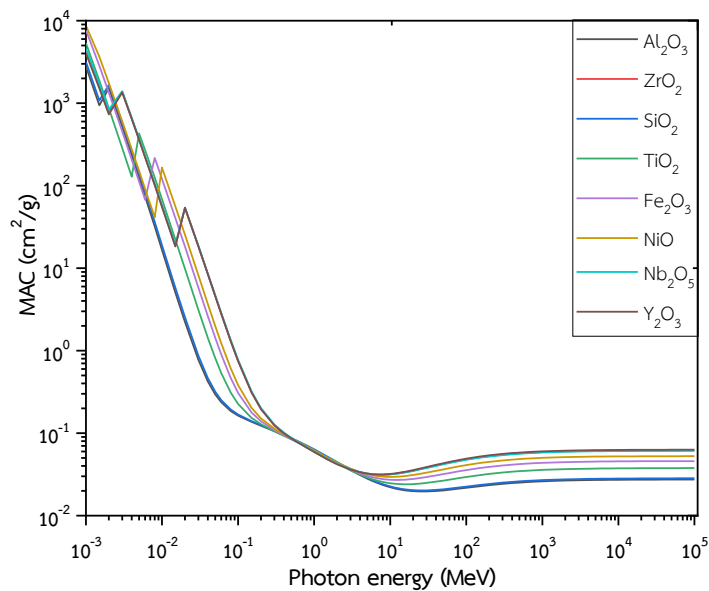
ในการวิจัยคุณสมบัติการกำบังรังสีไอออนไนซ์ชนิดที่มีประจุไฟฟ้า ในครั้งนี้จะใช้โปรแกรม SRIM ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้มอนติคาร์โลเป็นฐาน และมีโครงสร้างพื้นฐานที่มีอิทธิพลสูงมากเพื่อใช้ในการวัดผลของรังสี จำนวนการสูญเสียพลังงานและอัตราความเสียหายของอนุภาคจะถูกจำลองขึ้นมาด้วยโปรแกรมนี้ ผลของรังสีที่กระทำต่อวัสดุจะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของรังสี และจำนวนของพลังงาน ซึ่งสามารถจำลองได้จากเอกสารอ้างอิง (Blau, 2014; Dhal et al., 2020)

3. ผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ตัวอย่างโลหะผสมเซอร์คาลอยร์-4 (Zircaloy-4) โดยมีค่าความหนา 500 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความหนาของโลหะผสมที่นำไปใช้เป็นท่อหุ้มเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Sabol, 2005; Tang et al., 2017) ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบาง Al_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , NiO , Nb_2O_5 และ Y_2O_3 ที่ความหนา 200 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความหนาต่ำสุดของฟิล์มบางที่ใช้หุ้มโลหะผสมที่ใช้งานด้านท่อหุ้มเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Edlout et al., 1993; Chou et al., 1991) จะนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติในการกำบังรังสีไอออนชนิดที่ไม่มีประจุและมีประจุไฟฟ้า

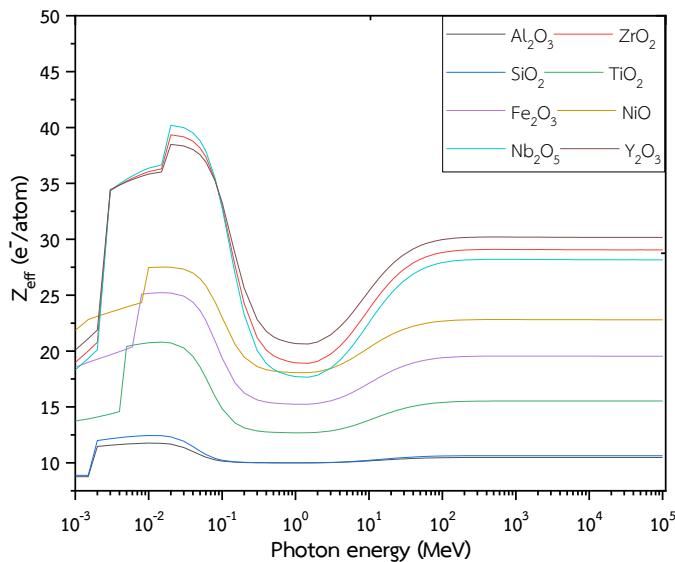
3.1 พารามิเตอร์ที่มีคุณสมบัติในการกำบังรังสีไอออนชนิดที่ไม่มีประจุไฟฟ้า

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (mass attenuation coefficient: μ_m) ของตัวอย่างกับช่วงพลังงานรังสีแกมมา 10^{-3} – 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ พบว่า ลักษณะของกราฟมีแนวโน้มลดลงตามระดับพลังงานรังสีแกมมาที่เพิ่มมากขึ้น ดังภาพที่ 1 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมาจากการเกิดอันตรกิริยาแบ่งออกได้ 3 ปรากฏการณ์ตามช่วงพลังงาน คือ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก (photoelectric effect) ที่พลังงานรังสีแกมมาต่ำกว่า 200 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) ที่พลังงานรังสีแกมมา 200 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ถึง 4 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และการผลิตคู่ (Pair production) จะเกิดที่พลังงานรังสีแกมมา 4 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ เป็นต้นไป จากการวิเคราะห์พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระดับพลังงานรังสีแกมมาเพิ่มมากขึ้นตามความสัมพันธ์ $E^{-3.5}$ และในช่วงนี้กราฟไม่ต่อเนื่องซึ่งตกในช่วงขอบเขตการดูดกลืนในช่วง K- และ L- ของธาตุ Al (K: 1.560×10^{-3} MeV), Zr (L3: 2.222×10^{-3} MeV, L2: 2.307×10^{-3} MeV, L1: 2.532×10^{-3} MeV, K: 1.800×10^{-2} MeV), Si (K: 1.839×10^{-3} MeV), Ti (K: 4.966×10^{-3} MeV), Fe (K: 7.112×10^{-3} MeV), Ni (L1: 1.008×10^{-3} MeV, K: 8.333×10^{-3} MeV), Nb (L3: 2.370×10^{-3} MeV, L2: 2.465×10^{-3} MeV, L1: 2.698×10^{-3} MeV, K: 1.899×10^{-2} MeV) และ Y (L3: 2.080×10^{-3} MeV, L2: 2.155×10^{-3} MeV, L1: 2.373×10^{-3} MeV, K: 1.704×10^{-2} MeV) ในขณะที่การกระเจิงแบบคอมป์ตันจะมีค่าลดลงอย่างช้า ๆ เมื่อระดับพลังงานรังสีแกมมาเพิ่มมากขึ้นตามความสัมพันธ์ E^{-1} และลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของการผลิตคู่ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลเพิ่มขึ้นจนเกือบคงที่อีกครั้งเมื่อพลังงานรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นถึงระดับพลังงานตามความสัมพันธ์ $\log E$ จากภาพแสดงให้เห็นว่า ฟิล์มบาง Y_2O_3 มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล สูงสุดซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางตัวนี้มีคุณสมบัติในการกำบังรังสีได้ดีที่สุด (Agar et al., 2019)



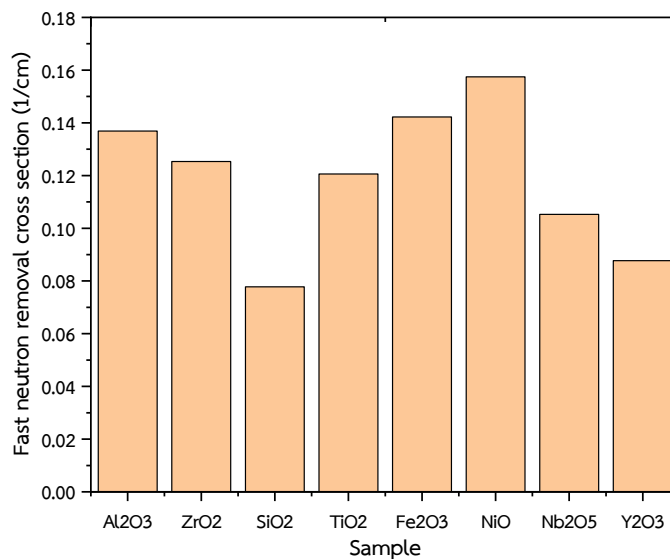
ภาพที่ 1 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างโลหะผสมเซอร์โคเลอร-4 ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบาง Al_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , NiO , Nb_2O_5 และ Y_2O_3 กับระดับพลังงานรังสีแกมมาในช่วง 10^{-3} – 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

เลขอะตอมยังผล (effective atomic number: Z_{eff}) ของตัวอย่างในช่วงพลังงานรังสีแกมมา 10^{-3} – 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในภาพที่ 2 พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก โดยพบจุดสูงสุดของค่าเลขอะตอมยังผล ที่พลังงานรังสีแกมมา 2×10^{-2} เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ในช่วง 2×10^{-2} – 4×10^{-1} เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ จนถึงจุดต่ำสุดในช่วง 1×10^0 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงการกระเจิงแบบคอมป์ตัน หลังจากนั้นค่าเลขอะตอมยังผลจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับพลังงานสูงขึ้น และเริ่มคงที่จากช่วงระดับพลังงานมากกว่า 1×10^2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ เป็นต้นไป ซึ่งเป็นช่วงการผลิตคู่เป็นอันตรกิริยาหลัก จากภาพแสดงให้เห็นว่า ฟิล์มบาง Y_2O_3 มีค่าเลขอะตอมยังผลสูงสุดซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางตัวนี้มีคุณสมบัติในการกำบังรังสีได้ดีที่สุด (Dong et al., 2017) และในช่วงพลังงาน 10^0 – 10^1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ พบว่า Nb_2O_5 มีเลขอะตอมยังผลน้อยกว่า NiO เนื่องจาก Nb_2O_5 มีโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาแบบคอมป์ตันน้อยกว่า NiO โดย Nb_2O_5 มีโอกาสเกิดอันตรกิริยาแบบคอมป์ตันในภาคตัดขวางเท่ากับ 5.83×10^{-2} – 1.41×10^{-2} ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และ NiO มีโอกาสเกิดอันตรกิริยาแบบคอมป์ตันที่ภาคตัดขวางเท่ากับ 1.49×10^{-2} ตารางเซนติเมตรต่อกรัม



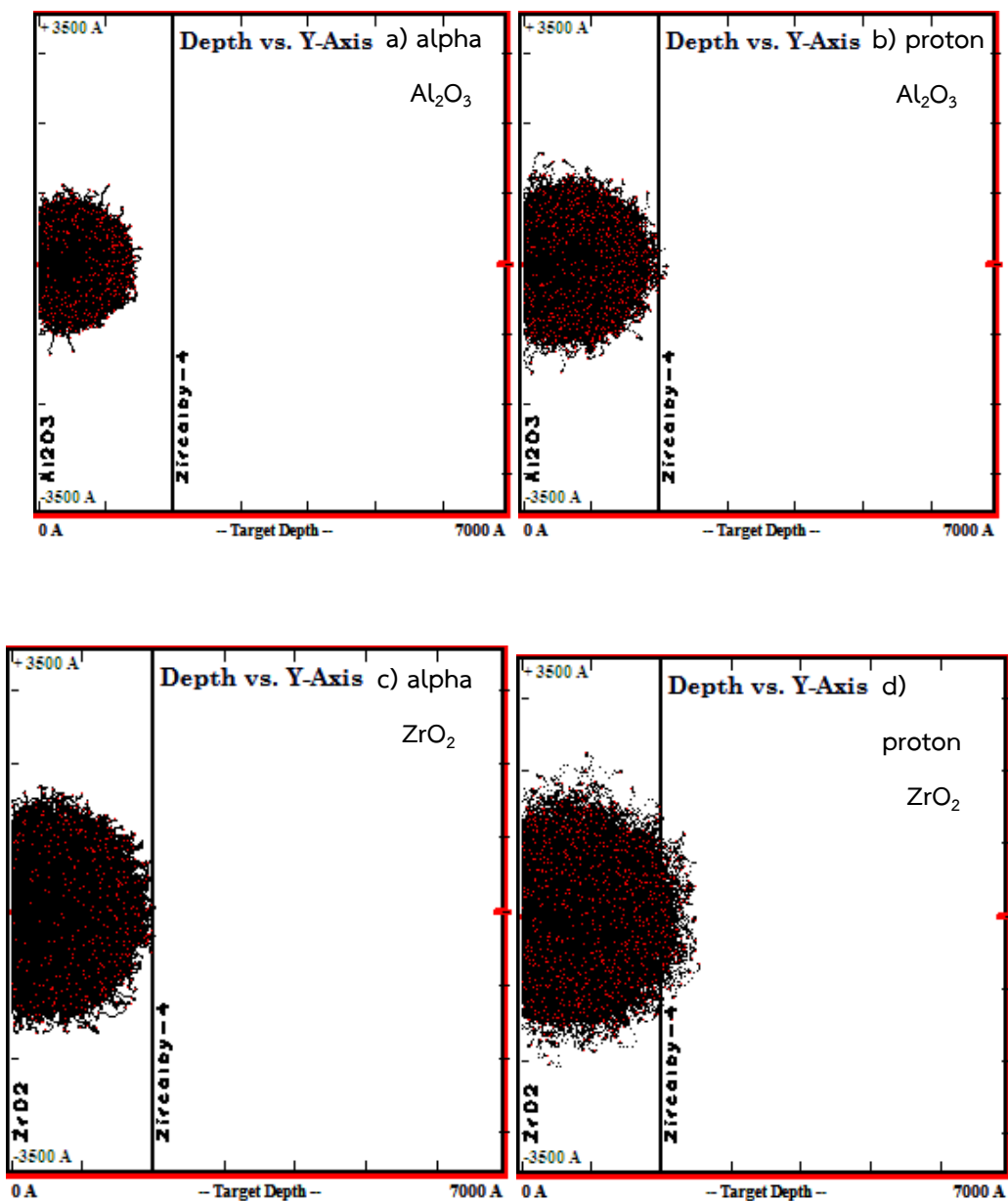
ภาพที่ 2 เลขอะตอมยังผลของตัวอย่างโลหะผสมเซอร์คัลอยร์-4 ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบาง Al_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , NiO , Nb_2O_5 และ Y_2O_3 กับระดับพลังงานของรังสีแกมมาในช่วง 10^{-3} – 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

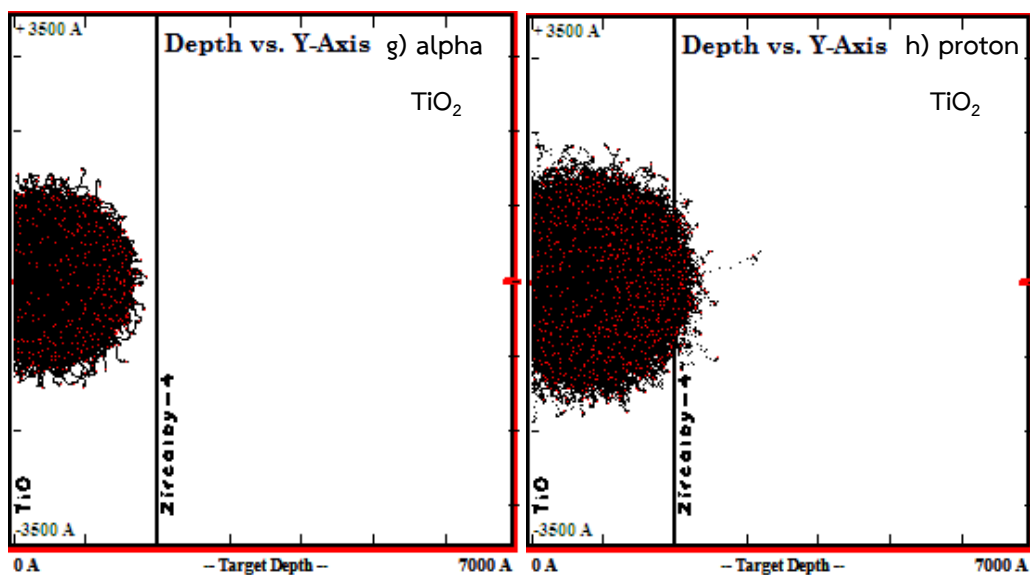
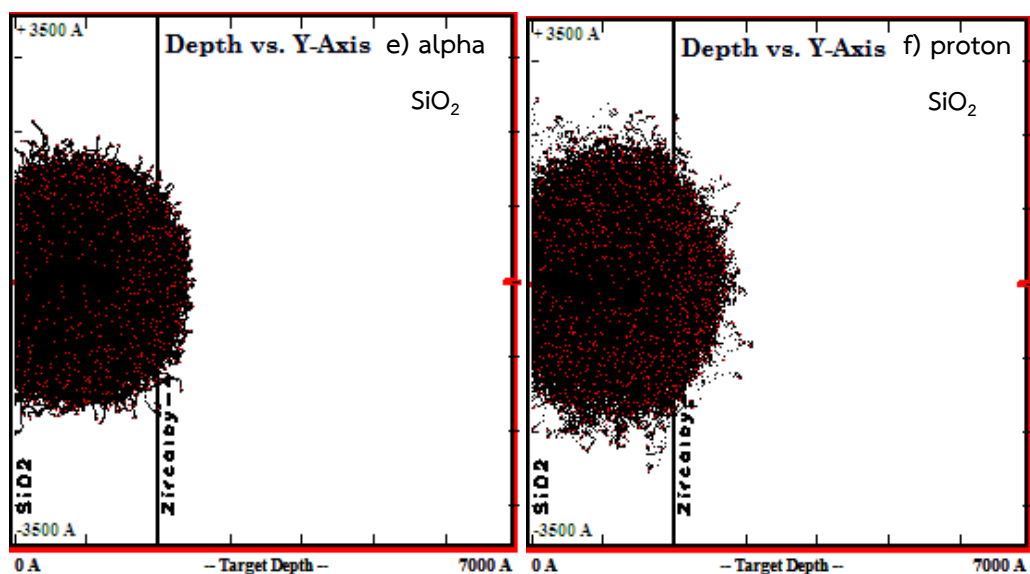
การกำบังนิวตรอนพลังงานสูงของตัวอย่าง พบว่าค่า Fast neutron removal cross sections: Σ_R พบว่าฟิล์มบาง NiO มีค่าสูงที่สุดนั้นแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางดังกล่าวมีคุณสมบัติในการกำบังนิวตรอนพลังงานดี ที่สุด

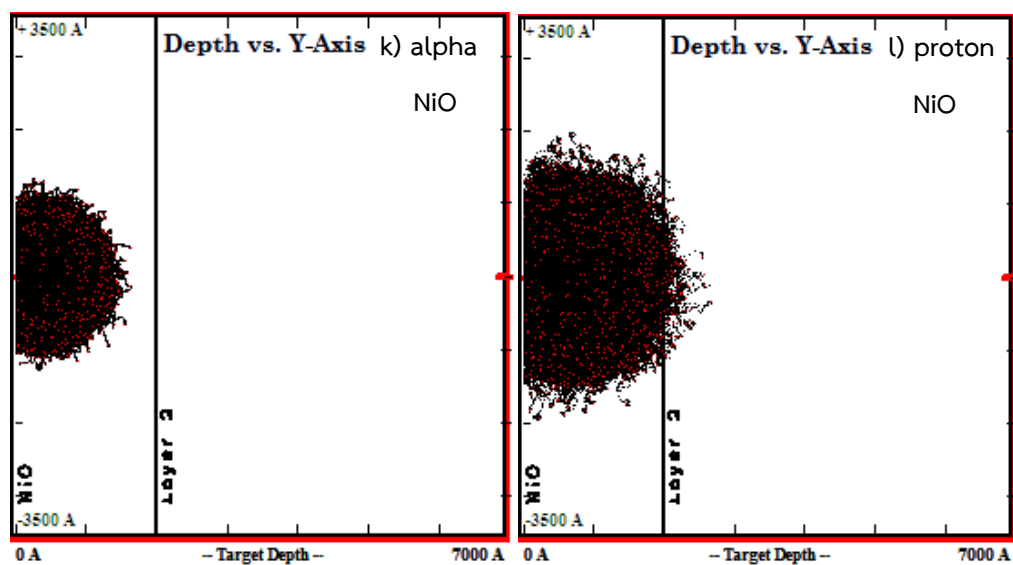
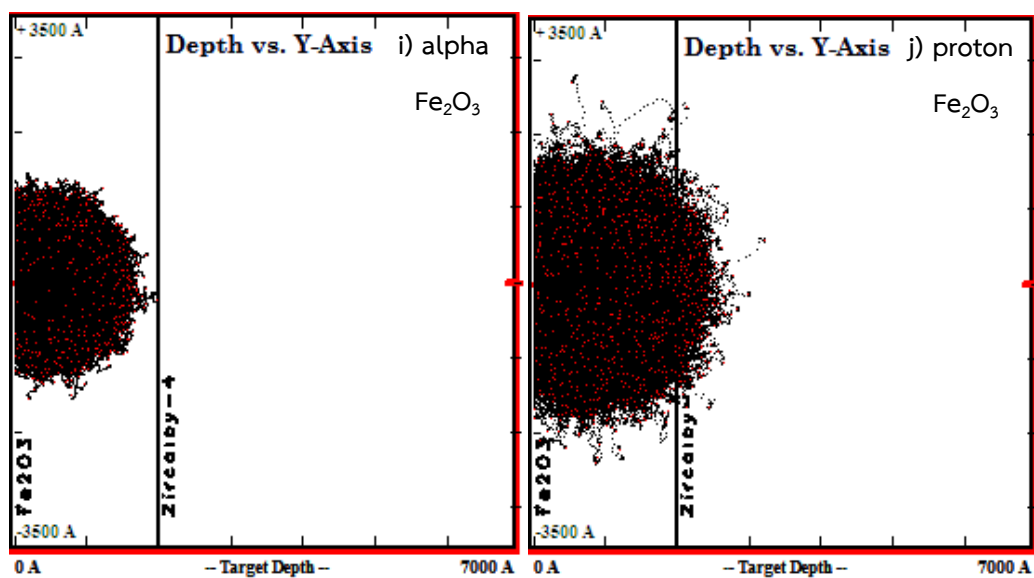


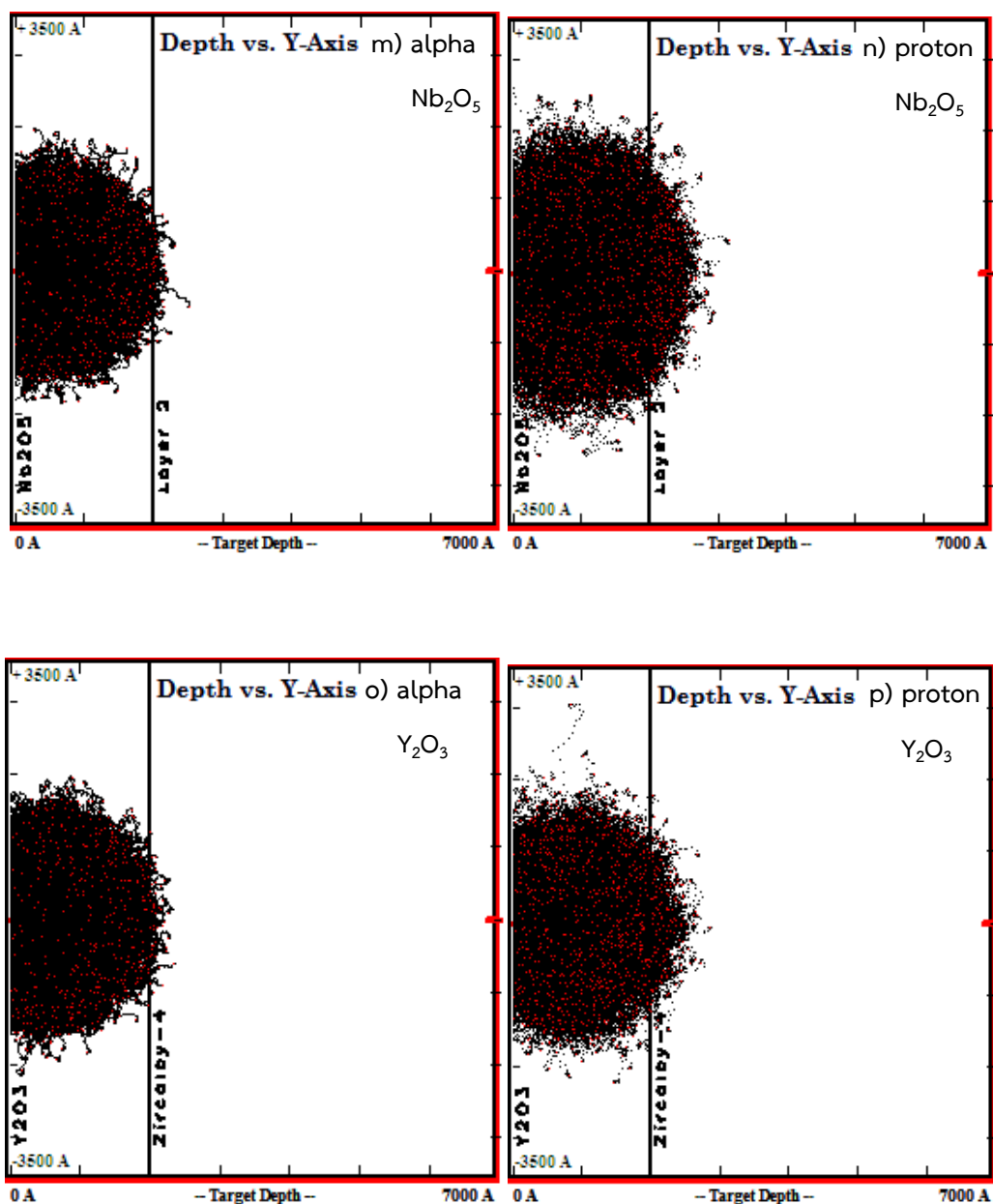
ภาพที่ 3 การกำบังนิวตรอนพลังงานสูงของตัวอย่างโลหะผสมเซอร์คัลอยร์-4 ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบาง Al_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , NiO , Nb_2O_5 และ Y_2O_3

พารามิเตอร์ที่มีคุณสมบัติในการกำบังรังสีไอออนชนิดที่มีประจุไฟฟ้า









ภาพที่ 4 (a-p) การจำลองสถานการณ์เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า (แอลฟา และโปรตอน) ผ่านเข้าไปในฟิล์มบางที่มีความหนา 200 นาโนเมตร ที่พลังงาน 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์

ภาพที่ 4 เป็นข้อมูลที่ได้มาจากการจำลองสถานการณ์เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าผ่านเข้าไปในฟิล์มบางที่มีความหนา 200 นาโนเมตร ถูกคำนวณที่พลังงาน 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ โปรแกรม SRIM ใช้รุ่นอำนาจหยุดยั้งปี 2008 และมีการจำลองมากกว่า 10,000 ไอออน ความเสียหายที่จะถูกคำนวณจะขึ้นอยู่กับการคำนวณโดยละเอียดพร้อมกับความเสียหายทั้งหมด ประเภทของไอออนที่นำมาศึกษาในครั้งนี้ คือ อนุภาคแอลฟา และ

อนุภาคโปรตอน ที่มีมวลเท่ากับ 4.003 และ 1.008 amu ตามลำดับ ถูกจำลองสถานการณ์โดยให้อิออนทั้งสองที่พลังงาน 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ผ่านเข้าไปชนในแนวตั้งฉากกับอะตอมของฟิล์มบางตัวอย่างทั้ง 8 ในภาพที่ 4 นี้เป็นการแสดงเส้นทางเดินของอิออนที่พลังงาน 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ โดยทั่วไปแทร็กอิออนจะเริ่มจำลองสถานการณ์ในชั้นแรก แทร็กอิออนที่แสดงด้วยจุดสีแดงในภาพ แสดงให้เห็นว่าอิออนหนึ่งกระทบกับอะตอมของตัวอย่างฟิล์มบางจากเป้าหมายและมีการสร้างช่องว่างที่สอดคล้องกันขึ้น ช่องว่างที่สร้างขึ้นเหล่านี้แสดงด้วยจุดสีดำซึ่งเป็นผลจากการหดตัว (recoil) ของอะตอมของตัวอย่างฟิล์มบาง กระบวนการนี้เรียกว่า การหดตัวแบบต่อเนื่อง (recoil cascade) ผลจากการศึกษา พบว่า ชั้นตัวอย่างฟิล์มบางถูกเจาะโดยอะตอมของไฮโดรเจนบนผิวของตัวอย่างฟิล์มบางลึกมากกว่าของอะตอมของฮีเลียม หลังจากที่อะตอมของฟิล์มบางตัวอย่างถูกกระแทกอย่างหนักด้วยอิออนโปรตอน และแอลฟาแล้วพลังงานอิออนจำนวนมากจะสูญเสียไป พลังงานที่ส่งผ่านจะต่ำลงอย่างมากก็ต่อเมื่ออะตอมของฟิล์มบางตัวอย่างและมวลอิออนที่ตกกระทบมีความแตกต่างกันมาก หลังจากการชนกันแบบไบนารีเพียงครั้งเดียวจะเกิดการต่อเนื่อง (cascade) สีดำขึ้น ซึ่งมีความเป็นไปได้สูงที่โมเมนต์และการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอิออนจะเกิดขึ้น ในการชนกันแต่ละครั้งจะทำให้เกิดช่องว่างเกิดขึ้น การหดตัวของอะตอม Al, Zr, Si, Ti, Fe, Ni, Nb และ Y จะเริ่มขึ้นทันทีซึ่งอาจทำให้เกิดตำแหน่งที่เป็นช่องว่างประมาณ 1,000 ตำแหน่ง ดังนั้นการชนกันของการต่อเนื่องและอะตอมของฟิล์มบางตัวอย่างที่หดตัวจึงมีอิทธิพลอย่างมากต่อการปรับเปลี่ยนสิ่งต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเหล่านี้ จากการศึกษาเพิ่มเติม พบว่า ค่าอิออนกระเจิงกลับ (back-scattered ions) ของอนุภาคโปรตอนที่พลังงาน 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของฟิล์มบาง Al_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , NiO , Nb_2O_5 และ Y_2O_3 เท่ากับ 1024, 4057, 947, 2088, 3992, 4976, 4504 และ 3618 อิออน ตามลำดับ และค่าอิออนกระเจิงกลับของอนุภาคแอลฟาที่พลังงาน 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของฟิล์มบาง Al_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , NiO , Nb_2O_5 และ Y_2O_3 เท่ากับ 2669, 13549, 2959, 5920, 9241, 11491, 11698 และ 13462 อิออน ตามลำดับ ผลที่ได้จากการทดลองครั้งนี้เห็นชัดเจนว่าค่าอิออนกระเจิงกลับของอนุภาคแอลฟามีค่าสูงกว่าของอนุภาคโปรตอน ซึ่งส่งผลทำให้อนุภาคแอลฟามีอำนาจทะลุทะลวงต่ำกว่าของอนุภาคโปรตอน ยิ่งไปกว่านั้นจากแบบจำลองนี้ยังแสดงให้เห็นว่า ชั้นของฟิล์มบางบางชนิดมันถูกเจาะผ่านทะลุเข้าไปที่ผิวของโลหะผสมเซอร์คาลอยร์-4 แต่อิออนเหล่านี้ยังไม่สามารถส่งผ่านโลหะผสมเซอร์คาลอยร์-4 ได้ ดังนั้นการเคลือบฟิล์มบางจะช่วยลดความเสียหายที่เกิดขึ้นจากรังสีอิออนชนิดที่มีประจุไฟฟ้าได้ และฟิล์มบาง Al_2O_3 มีประสิทธิภาพต่อการลดความเสียหายที่เกิดขึ้นจากรังสีอิออนชนิดที่มีประจุไฟฟ้าได้ดีที่สุด นี่เป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่สำคัญที่ฟิล์มบางนี้ถูกเลือกให้นำมาเคลือบโลหะผสมเซอร์โคเนียม ในท่อหุ้มเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาสมบัติการกำบังรังสีอิออนชนิดที่ไม่มีประจุไฟฟ้าและมีประจุไฟฟ้าของโลหะผสมเซอร์คาลอยร์-4 (Zircaloy-4) ที่ความหนา 500 นาโนเมตร ซึ่งถูกเคลือบด้วยฟิล์มบาง Al_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , NiO , Nb_2O_5 และ Y_2O_3 ที่ความหนา 200 นาโนเมตร โดยค่าพารามิเตอร์สำหรับการกำบังรังสีอิออนชนิดที่ไม่มีประจุไฟฟ้า (uncharged ionizing radiation) ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (mass attenuation coefficient) เลขอะตอมยังผล (effective atomic number) และผลรวมภาคตัดขวางนิวตรอน

พลังงานสูง (fast neutron removal cross section) ที่ช่วงพลังงานรังสีแกมมา 10^{-3} – 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ในขณะที่การกำบังรังสีไอออไนซ์ชนิดที่มีประจุไฟฟ้า (charged ionizing radiation) ได้วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับความเสียหาย ได้แก่ ค่าไอออนกระเจิงกลับของอนุภาคแอลฟาและโปรตอนทีพลังงานจลน์ 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับคุณสมบัติในการกำบังรังสีไอออไนซ์ชนิดที่ไม่มีประจุไฟฟ้า ได้แก่ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล เลขอะตอมยังผล พบว่า ฟิล์มบาง Y_2O_3 มีค่าทั้งสองสูงที่สุดนั้นแสดงว่าฟิล์มบาง Y_2O_3 มีคุณสมบัติในการกำบังรังสีไอออไนซ์ชนิดที่ไม่มีประจุไฟฟ้าดีที่สุด ในขณะที่ฟิล์มบาง NiO มีคุณสมบัติการกำบังนิวตรอนพลังงานสูงดีที่สุด และคุณสมบัติในการลดความเสียหายที่เกิดขึ้นจากรังสีไอออนชนิดที่มีประจุไฟฟ้าผลการวิจัยพบว่าค่าไอออนกระเจิงกลับของอนุภาคแอลฟามีค่าสูงกว่าของอนุภาคโปรตอน ซึ่งส่งผลทำให้อนุภาคแอลฟามีอำนาจทะลุทะลวงต่ำกว่าของอนุภาคโปรตอน และจากแบบจำลองนี้ยังแสดงให้เห็นว่าชั้นของฟิล์มบางบางชนิดนั้นถูกเจาะผ่านทะลุเข้าไปที่ผิวของโลหะผสมเซอร์คาลอยร์-4 แต่ไอออนเหล่านี้ไม่สามารถส่งผ่านโลหะผสมเซอร์คาลอยร์-4 ได้ ดังนั้นการเคลือบฟิล์มบางจะช่วยลดความเสียหายที่เกิดขึ้นจากรังสีไอออนชนิดที่มีประจุไฟฟ้าได้ และฟิล์มบาง Al_2O_3 มีประสิทธิภาพต่อการลดความเสียหายที่เกิดขึ้นจากรังสีไอออนชนิดที่มีประจุไฟฟ้าได้ดีที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรีสำหรับความร่วมมือและการสนับสนุนงานวิจัยนี้จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- Agar, O., Kavaz, E., Altunsoy, E. E., Kilicoglu, O., Tekin, H. O., Sayyed, M. I., Erguzel, T. T., & Tarhan, N. (2019). Er_2O_3 effects on photon and neutron shielding properties of TeO_2 - Li_2O - ZnO - Nb_2O_5 glass system. *Results in Physics*, 13, 102277. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102277>
- Blau, P. J. (2014). A multi-stage wear model for grid-to-rod fretting of nuclear fuel rods. *Wear*, 313(1-2), 89-96. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.02.016>
- Brook, B. W., & Bradshaw, C. J. A. (2015). Key role for nuclear energy in global biodiversity conservation. *Conservation biology*, 29(3), 702-712. <https://doi.org/10.1111/cobi.12433>
- Cho, K. H., Kim, T. H., & Kim, S. S. (1998). Fretting wear characteristics of Zircaloy-4 tube. *Wear*, 219(1), 3-7. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00164-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00164-1)
- Chou, T. C., Nieh, T. G., McAdams, S. D., & Pharr, G. M. (1991). Microstructures and mechanical properties of thin films of aluminium oxide. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 25(10), 2203-2208. [https://doi.org/10.1016/0956-716X\(91\)90001-H](https://doi.org/10.1016/0956-716X(91)90001-H)
- Dhal, S., Patro, A., Swain, M., Supraja, K., & Rath, P. K. (2020). Simulation of very-low energy alkali ion (≤ 10 KeV) induced effects on Al_2O_3 micro flakes. *Indian Journal of Science and Technology*, 13(21), 2111-2118. <https://doi.org/10.17485/IJST/v13i21.97>

- Dong, M. G., Sayyed, M. I., Lakshminarayana, G., Ersundu, M. Ç., Ersundu, A. E., Nayar, P., & Mahdi, M. A. (2017). Investigation of gamma radiation shielding properties of lithium zinc bismuth borate glasses using XCOM program and MCNP5 code. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 468, 12-16. <https://doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2017.04.018>
- Edlou, S. M., Smajkiewicz, A., & Al-Jumaily, G. A. (1993). Optical properties and environmental stability of oxide coatings deposited by reactive sputtering. *Applied optics*, 32(28), 5601-5605. <https://doi: 10.1364/AO.32.005601>
- Fiore, K. (2006). Nuclear energy and sustainability: Understanding ITER. *Energy Policy*, 34(17), 3334-3341. <https://doi: 10.1016/j.enpol.2005.07.008>
- Fu, Y., Wei, J., & Batchelor, A. W. (2000). Some considerations on the mitigation of fretting damage by the application of surface-modification technologies. *Journal of Materials Processing Technology*, 99(1-2), 231-245. [https://doi: 10.1016/S0924-0136\(99\)00429-X](https://doi: 10.1016/S0924-0136(99)00429-X)
- Intom, S., Kalkornsurapranee, E., Johns, J., Kaewjaeng, S., Kothan, S., Hongtong, W., Chaiphaksa, W., & Kaewkhao, J. (2020). Mechanical and radiation shielding properties of flexible material based on natural rubber/ Bi_2O_3 composites. *Radiation Physics and Chemistry*, 172, 108772. <https://doi: 10.1016/j.radphyschem.2020.108772>
- Issa, S. A. M., & Mostafa, A. M. A. (2017). Effect of Bi_2O_3 in borate-tellurite-silicate glass system for development of gamma-rays shielding materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 302-310. <https://doi: 10.1016/j.jallcom.2016.10.207>
- Issa, S. A. M., Sayyed, M. I., Zaid, M. H. M., & Matori, K. A. (2017). A Comprehensive Study on Gamma Rays and Fast Neutron Sensing Properties of GAGOC and CMO Scintillators for Shielding Radiation Applications. *Journal of Spectroscopy* 2017, 1-9. <https://doi:10.1155/2017/9792816>
- Kaur, P., Singh, D., & Singh, T. (2018). Gamma rays shielding and sensing application of some rare earth doped lead-alumino-phosphate glasses. *Radiation Physics and Chemistry*, 144, 336-343. <https://doi: 10.1016/j.radphyschem.2017.09.018>
- Kim, K. T. (2009). The study on grid-to-rod fretting wear models for PWR fuel. *Nuclear Engineering and Design*, 239(12), 2820-2824. <https://doi: 10.1016/j.nucengdes.2009.08.018>
- Kirdsiri, K., Kaewkhao, J., & Limsuwan, P. (2012). Photon interaction in borate glass doped with Bi_2O_3 at different energies. *Procedia Engineering*, 32, 727-733. <https://doi:10.1016/j.proeng.2012.02.004>
- Limkitjaroenporn, P., Kaewkhao, J., Chewpraditkul, W., & Limsuwan, P. (2012). Mass attenuation coefficient and effective atomic number of Ag/Cu/Zn alloy at different photon energy by Compton scattering technique. *Procedia Engineering*, 32, 847-854. <https://doi:10.1016/j.proeng.2012.02.022>

- Lin, Y., Cai, Z., Chen, Z., Qian, H., Tang, L., Xie, Y., & Zhu, M. (2016). Influence of diameter–thickness ratio on alloy Zr-4 tube under low-energy impact fretting wear. *Materials Today Communications*, 8, 79-90. <https://doi: 10.1016/j.mtcomm.2016.06.003>
- Morandin, G. D. & Sauvé, R. G. (2003). Probabilistic assessment of fretting wear in steam generator tubes under flow induced vibrations. *American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division*, 465, 117-125. <https://doi:10.1115/PVP2003-2081>
- Motta, A. T., Couet, A., & Comstock, R. J. (2015). Corrosion of zirconium alloys used for nuclear fuel cladding. *Annual Review of Materials Research*, 45, 311-343. <https://doi:10.1146/annurev-matsci-070214-020951>
- Oto, B., Yildiz, N., Korkut, T., & Kavaz, E. (2015). Neutron shielding qualities and gamma ray buildup factors of concretes containing limonite ore. *Nuclear Engineering and Design*, 293, 166-175. <https://doi: 10.1016/j.nucengdes.2015.07.060>
- Qu, J., Cooley, K. M., Shaw, A. H., Lu, R. Y., & Blau, P. J. (2016). Assessment of wear coefficients of nuclear zirconium claddings without and with pre-oxidation. *Wear* 356-357, 17-22. <https://doi: 10.1016/j.wear.2016.02.020>
- Rubiolo, P. R., & Young, M. Y. (2009). On the factors affecting the fretting-wear risk of PWR fuel assemblies. *Nuclear Engineering and Design*, 239, 68-79. <https://doi:10.1016/j.nucengdes.2008.08.021>
- Sabol, G. P. (2005). “ZIRLO™-An alloy development success,” 14th International Symposium on Zirconium in Nuclear Industry. *ASTM STP 1467*, 3-24. <https://doi: 10.1520/STP375005>
- Singh, V. P., Badiger, N. M., & El-Khayatt, A. M. (2014). Study on γ -ray exposure buildup factors and fast neutron-shielding properties of some building materials. *Radiation Effects and Defects in Solids: Incorporating Plasma Science and Plasma Technology*, 169(6), 547-559. <https://doi: 10.1080/10420150.2014.905942>
- Tang, C., Stueber, M., Juergen, Seifert, M. J., & Steinbrueck, M. (2017), Protective coatings on zirconium-based alloys as accident-tolerant fuel (ATF) claddings. *Corrosion Reviews*, 35(3). 141-165. <https://doi: 10.1515/correv-2017-0010>
- Ziegler, J. F. (2004). Srim-2003, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 219-220, 1027-1036. <https://doi:10.1016/j.nimb.2004.01.208>
- Ziegler, J. F., Ziegler, M. D., & Biersack, J. P. (2010). SRIM - The stopping and range of ions in matter (2010). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 268(11-12). 1818-1823. <https://doi:10.1016/j.nimb.2010.02.091>