

กระบวนการขึ้นรูป สมบัติเชิงกล และสมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอน  
ของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

**Process, Mechanical and Neutron-shielding Properties  
of UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composites**

ดลฤดี โตเย็น (Donruedee Toyen)\* เอกชัย วิมลมาลา (Ekachai Wimolmala)\*\*

ดร.เกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง (Dr.Kiadtisak Saenboonruang)\*\*\*

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอน โดยใช้วัสดุพอลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูง (Ultra-high-molecular-weight polyethylene; UHMWPE) ที่มีอะตอมไฮโดรเจนปริมาณที่สูงและสมบัติเชิงกลที่ดี นอกจากนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำบังอนุภาคนิวตรอนให้กับวัสดุ UHMWPE โดยการเติมสารตัวเติมซาแมเรียมออกไซด์ (Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ที่มีค่าภาคตัดขวางกับอนุภาคนิวตรอนที่สูง ที่ปริมาณ 0 - 50 %wt ผลการวิจัยพบว่า การผสมด้วยกระบวนการอัดรีดวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติเชิงกลโดยรวมสูงกว่าการอัดขึ้นรูปร้อนด้วยระบบแรงดันเพียงอย่างเดียว และพบว่าการเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ไม่มีผลต่อสมบัติด้านความต้านทานแรงดึงมากนัก แต่เปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุ และความเหนียว มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารตัวเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่เพิ่มขึ้น และพบว่าการเพิ่มปริมาณสารตัวเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และความหนาชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้มีสมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบสามารถลดทอนอนุภาคนิวตรอนได้สูงที่สุดที่ปริมาณการเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 50%wt ที่ความหนา 25 mm

**ABSTRACT**

This work aimed to develop a neutron-shielding material using Ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE) that has high hydrogen contents and excellent mechanical properties. Furthermore, in order to improve neutron-shielding properties, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, which has high neutron absorption cross section was added to UHMWPE with contents varied from 0 – 50 %wt. Results showed that the process with extrusion and compression molding gave the UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites higher mechanical properties than the process with only compression molding. In particular, the addition of Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> to UHMWPE did not significantly change tensile modulus but decrease elongation at break and toughness, while the increase in Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content to 50%wt with the sample thickness of 25 mm had the highest neutron-shielding properties.

**คำสำคัญ:** วัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอน ซาแมเรียมออกไซด์ พอลิเอทิลีน

**Keywords:** Neutron-shielding material, Samarium oxide, Polyethylene

\* นิสิต หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

\*\* รองศาสตราจารย์ กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF) สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

\*\*\* ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

## บทนำ

ในปัจจุบัน ได้มีการนำอนุภาคนิวตรอนมาประยุกต์ใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย ทั้งทางด้านการแพทย์ ด้านการเกษตร และด้านอุตสาหกรรม เช่น การถ่ายภาพด้วยอนุภาคนิวตรอน (Hawkesworth, 1977) และการรักษาโรคมะเร็งโดยการบำบัดด้วยการจับยึดนิวตรอน (Boron Neutron Capture Therapy; BNCT) (Barth et al., 1992) เป็นต้น เนื่องจากอนุภาคนิวตรอนซึ่งมีมวลประมาณ 1.0087 amu เป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ ทำให้ไม่เกิดแรงในสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก ทำให้อนุภาคนิวตรอนมีความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางต่างๆ ได้ดีกว่ารังสีชนิดอื่น นอกจากนี้ อนุภาคนิวตรอนสามารถเข้าทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของเซลล์ในร่างกายได้โดยตรง ที่อาจก่อให้เกิดอันตรายอย่างมากต่อร่างกายของผู้รับ โดยอันตรายจากการได้รับอนุภาคนิวตรอนเมื่อเปรียบเทียบกับรังสีแกมมาไอออนชนิดอื่นสามารถพิจารณาได้จากค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนักตามชนิดของรังสี (Radiation weighting factor) (Valentin, 2003) ซึ่งอนุภาคนิวตรอนมีค่าอยู่ระหว่าง 5-20 ซึ่งมีค่าสูงกว่ารังสีแกมมาไอออนประเภทอื่น ดังนั้น การใช้งานและป้องกันอันตรายจากอนุภาคนิวตรอนจึงเป็นเรื่องสำคัญต่อผู้ปฏิบัติงานทางด้านรังสี ซึ่งวิธีการป้องกันอันตรายจากรังสีตามหลักการของ ALARA (As Low As Reasonably Achievable) นอกจากการใช้เวลาทำงานกับรังสีให้น้อยที่สุด และอยู่ห่างจากต้นกำเนิดรังสีมากที่สุดแล้ว การใช้วัสดุกำบังรังสีที่มีประสิทธิภาพมีความสำคัญอย่างยิ่ง ในกรณีที่ผู้ปฏิบัติงานมีความจำเป็นต้องทำงานใกล้กับต้นกำเนิดรังสีเป็นระยะเวลานาน ซึ่งโดยทั่วไปวัสดุที่นิยมใช้ในการกำบังอนุภาคนิวตรอนเป็นวัสดุที่ประกอบไปด้วยธาตุไฮโดรเจนในอัตราส่วนสูง เช่น พาราฟิน น้ำ ยางไม้ หรือพอลิเอทิลีน (PE) ทั้งนี้เนื่องจากธาตุไฮโดรเจนสามารถเกิดอันตรกิริยาการชนแบบยืดหยุ่นกับอนุภาคนิวตรอนได้ อนุภาคนิวตรอนสามารถถ่ายเทพลังงานให้กับอะตอมของไฮโดรเจนในอัตราที่สูง ส่งผลทำให้ความเร็วและพลังงานของอนุภาคนิวตรอนลดลงอย่างรวดเร็ว (Cember, 2000)

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการนำพอลิเมอร์ชนิดพอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) เป็นวัสดุสำหรับหน่วงหรือลดพลังงานของอนุภาคนิวตรอน (Mari-Hakimabad et al., 2008) หรือนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นมวลโมเลกุลสูง (High-density polyethylene; HDPE) เป็นวัสดุในการกำบังอนุภาคนิวตรอน (Shin et al., 2014) แต่ทั้งนี้พบว่า การใช้ PE หรือ HDPE นั้น จำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีความหนาแน่นมากกว่า 40 เซนติเมตร จึงจะสามารถกำบังอนุภาคนิวตรอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Mari-Hakimabad et al., 2008) ซึ่งความหนาแน่นของวัสดุที่มากนี้อาจไม่เหมาะต่อการนำไปใช้งานจริง ดังนั้นเพื่อเป็นการกำบังอนุภาคนิวตรอนอย่างมีประสิทธิภาพ และการลดความหนาแน่นของวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอน จึงมีการเติมสารตัวเติมที่มีค่าภาคตัดขวางกับอนุภาคนิวตรอน (Neutron cross-section) ที่สูง เช่น โบรอนออกไซด์ ( $B_2O_3$ ) (Özdemir et al., 2017) หรือซาแมเรียมออกไซด์ ( $Sm_2O_3$ ) (Wang et al., 2015) ในวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอน

โดยในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัย มีความสนใจศึกษาและพัฒนาวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอนจากพอลิเอทิลีนประเภท Ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE) ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักมวลโมเลกุลสูงประมาณ 3.5 ล้านกรัมต่อโมล และมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความแข็งแรงสูง ด้านทานการสึกหรอที่ดี สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ต่ำ ทนทานการกัดกร่อนต่อสารเคมีได้ดี และมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูง (Kurtz, 2004) และเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการกำบังอนุภาคนิวตรอนให้กับ UHMWPE ได้มีการเติมสารตัวเติม  $Sm_2O_3$  ที่มีองค์ประกอบ Sm ซึ่งเป็นธาตุที่มีค่าภาคตัดขวางกับอนุภาคนิวตรอนที่สูง (ประมาณ 5922.56 barn) (NIST, 2017) แต่กระบวนการขึ้นรูปวัสดุ UHMWPE ทำได้ค่อนข้างจำกัด ดังนั้นคณะผู้วิจัย มีความสนใจถึงกระบวนการขึ้นรูปที่ทำให้สารตัวเติม  $Sm_2O_3$  กระจายตัวใน UHMWPE ได้ดี โดยการกระจายตัวของ  $Sm_2O_3$  จะส่งผลต่อสมบัติเชิงกล และประสิทธิภาพการกำบังอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ โดยคาดหวังว่างานวิจัยนี้อาจจะเป็นทางเลือกใหม่ การนำไปใช้งานวัสดุกำบังรังสีที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อหน่วยงานที่มีการใช้รังสี เช่น โรงพยาบาล ศูนย์วิจัยนิวเคลียร์

สถาบันการศึกษาต่างๆ และเป็นการลดการนำเข้าวัสดุกำบังรังสีจากต่างประเทศ ที่มีราคาค่อนข้างสูง เป็นการนำความรู้ด้านวัสดุศาสตร์ไปใช้ในงานทางด้านรังสีเพิ่มขึ้น

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษากระบวนการขึ้นรูป และปริมาณของสารตัวเติม  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  ในวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE ที่มีต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอน
2. เพื่อศึกษาผลของความหนาของแผ่นวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/ $\text{Sm}_2\text{O}_3$  ที่มีต่อสมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอน

### วิธีการวิจัย

การศึกษากระบวนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/ $\text{Sm}_2\text{O}_3$  ดังนี้

- วิธีที่ 1: กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน (Compression molding): โดยทำการผสมสารตัวเติม  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  ที่ปริมาณ 50%wt กับผง UHMWPE ด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วสูง (High speed mixer) เป็นเวลา 1 นาที และทำการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบในแม่พิมพ์ ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน ที่อุณหภูมิ 185°C แรงดันปิดแม่พิมพ์ 150 kg/cm<sup>2</sup> เวลา 14 นาที ดังแสดงรายละเอียดตามตารางที่ 1 และตรวจสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM

- วิธีที่ 2: การผสมด้วยกระบวนการอัดรีด (Extrusion process): โดยทำการผสมสารตัวเติม  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  ที่ปริมาณ 50%wt กับผง UHMWPE ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) อุณหภูมิในการผสมแต่ละโซน ดังนี้ 185, 180, 175, 170 °C จาก Die zone ที่มีการเติมน้ำมันพาราฟิน (Paraffin oil) เพื่อทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricant) เป็นการช่วยลดความหนืดของ UHMWPE และทำให้กระจายตัวของ  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  ในวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE ได้ดีในขั้นตอนของการอัดรีด จากนั้นนำเม็ดพลาสติกที่ผ่านการผสม แช่ในสารละลายเฮกเซน (n-Hexane) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และอบที่อุณหภูมิ 80 °C เพื่อนำความชื้นและสารละลายเฮกเซนออกจากชิ้นงาน จากนั้นจึงนำเม็ดพลาสติกที่ผ่านการอบทำการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบในแม่พิมพ์ ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดันที่อุณหภูมิ 185°C แรงดันปิดแม่พิมพ์ 150 kg/cm<sup>2</sup> เวลา 14 นาที ดังแสดงรายละเอียดตามตารางที่ 1

### ตารางที่ 1 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุดิบ / สารเคมี / เกรด	ผู้จำหน่าย/ผู้ผลิต
UHMWPE / 3.5 ล้าน กรัมต่อโมล	PTT Public Co., Ltd., Thailand.
$\text{Sm}_2\text{O}_3$ / 99.99%	Richest Group, Shanghai, China.
Paraffin oil / commercial grade	Facobis Co., Ltd., Thailand.
n-Hexane / 100% w/w	Chemipan Corporation, Thailand.

### การปรับเปลี่ยนปริมาณ $\text{Sm}_2\text{O}_3$ และการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/ $\text{Sm}_2\text{O}_3$

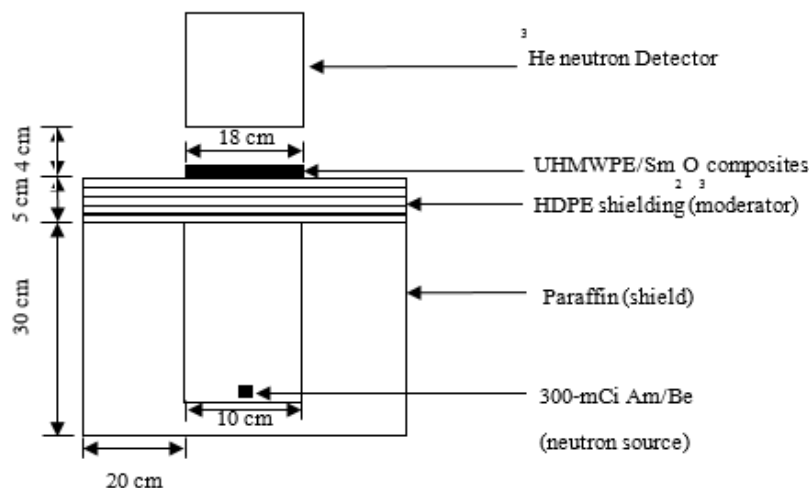
เลือกกระบวนการเตรียมที่เหมาะสม โดยทำการผสมสารตัวเติม  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  ที่ปริมาณ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50%wt จากนั้นเตรียมขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM และสมบัติการก้ำบังอนุภาคนิวตรอน ขนาด กว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ 18 cm x 18 cm x 5 mm ด้วยเครื่องขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน

### ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ

นำแผ่นวัสดุเชิงประกอบที่ได้ทดสอบลักษณะทางกายภาพ และลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) จากบริษัท Philips รุ่น XL30 ประเทศญี่ปุ่น และทดสอบสมบัติเชิงกลด้านมอดูลัสแรงดึง (Tensile modulus) การต้านทานแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) ตามมาตรฐาน ASTM D638-14 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine จากบริษัท Shimadzu รุ่น Autograph AG-I 5kN ประเทศญี่ปุ่น โดยใช้ความเร็วในการดึง 100 mm/min ส่วนสมบัติด้านความเหนียว (Toughness) ของวัสดุเชิงประกอบได้จากการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรง (Force) กับระยะทางการยืดตัว (Displacement) ส่วนการทดสอบค่าความแข็ง (Hardness) ตามมาตรฐาน ASTM D2240-03 (Shore D) ด้วยเครื่อง Hardness Tester รุ่น GS-719G จากบริษัท Teclock ประเทศญี่ปุ่น

### ขั้นตอนการทดสอบสมบัติในการก้ำบังอนุภาคนิวตรอน

การทดสอบการก้ำบังอนุภาคนิวตรอน โดยหาค่าอัตราส่วนจำนวนอนุภาคนิวตรอนหลังและก่อนวัสดุก้ำบัง (Neutron transmission) ของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/ $\text{Sm}_2\text{O}_3$  ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณของ  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  ตั้งแต่ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50%wt และปรับเปลี่ยนความหนาของชิ้นงาน ตั้งแต่ 5, 10, 15, 20 และ 25 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยในงานวิจัยนี้ใช้ระบบการวัดอนุภาคนิวตรอนแบบ Integral counting system โดยทำการนับวัดจำนวน 3 ครั้งต่อชิ้นงาน หาค่าเฉลี่ยของ Neutron transmission อุปกรณ์การทดสอบการก้ำบังอนุภาคนิวตรอนของชิ้นงาน ดังแสดงโดยไดอะแกรมในภาพที่ 1



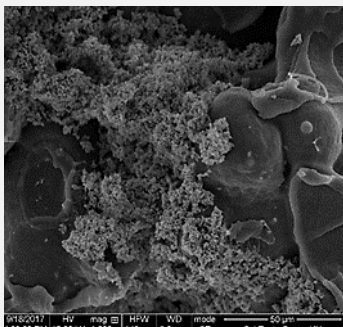
ภาพที่ 1 ไดอะแกรมแสดง อุปกรณ์การทดสอบสมบัติการก้ำบังอนุภาคนิวตรอน

**ผลการวิจัย**

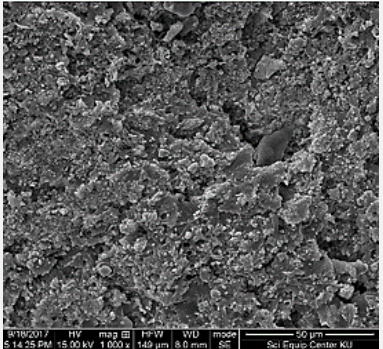
**กระบวนการผสมและการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่ได้จากการผสมและอัดขึ้นรูประบบแรงดัน (วิธีที่ 1) ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลงเมื่อมีการเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในปริมาณ 50 %wt โดยเฉพาะสมบัติการยืดตัว ณ จุดขาด และสมบัติการต้านทานแรงดึงของวัสดุ และเมื่อตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่า Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอในวัสดุเชิงประกอบ โดยมีการเกาะกลุ่มกันของสารตัวเติมอย่างชัดเจน แต่เมื่อเปรียบเทียบการผสมด้วยกระบวนการอัดรีด (วิธีที่ 2) และขึ้นรูประบบแรงดันวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าวัสดุ UHMWPE บริสุทธิ์มีค่าต้านทานแรงดึงต่ำกว่าวัสดุ UHMWPE ที่ได้จากการอัดขึ้นรูประบบแรงดัน ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการอัดรีดมีการใช้ความร้อนและแรงเฉือน (Shear force) ในขณะการผสมอาจทำให้เกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุล UHMWPE ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุมีค่าลดลง แต่เมื่อมีการเติมสารตัวเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE พบว่าสมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากการอัดรีดมีค่าสูงกว่าการขึ้นรูปด้วยระบบแรงดันเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการอัดรีดด้วยสกรู มีแรงเฉือนและเกิดความร้อนเกิดขึ้นระหว่างตัววัสดุ UHMWPE กันเอง และระหว่างตัววัสดุ UHMWPE กับพื้นผิวของกระบอกและเกลียวหนอนกู่ ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบ UHMWPE มีความเหนียวลดลง สามารถผสมกับสารตัวเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี จากการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> พบว่า Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> กระจายตัวได้ดีสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Fang et al., 2006) ดังนั้น จากผลเปรียบเทียบกระบวนการผสม คณะวิจัยฯ จึงเลือกกระบวนการอัดรีดวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE ที่มีสารตัวเติม ก่อนทำการขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน เพื่อขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอนต่อไป

**ตารางที่ 2** สมบัติเชิงกลและภาพ SEM แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุ UHMWPE และวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> จากกระบวนการขึ้นรูประบบแรงดัน

Mechanical properties	Compression Process		Morphology: SEM
	UHMWPE	50% Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Tensile modulus (MPa)	280.2 ± 17.4	344.1 ± 1.4	 <p>ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ด้วยกระบวนการขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน (กำลังขยาย 1000 เท่า)</p>
Tensile strength (MPa)	29.5 ± 0.3	10.5 ± 2.2	
Elongation at break (%)	756 ± 40	16 ± 4	
Hardness (shore D)	55 ± 2	60 ± 1	
Toughness (kJ/m <sup>2</sup> )	38.9 ± 3.0	0.06 ± 0.03	

ตารางที่ 3 สมบัติเชิงกลและภาพ SEM แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุ UHMWPE และวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่เตรียมโดยกระบวนการอัดรีดร่วมกับกระบวนการขึ้นรูประบบแรงดัน

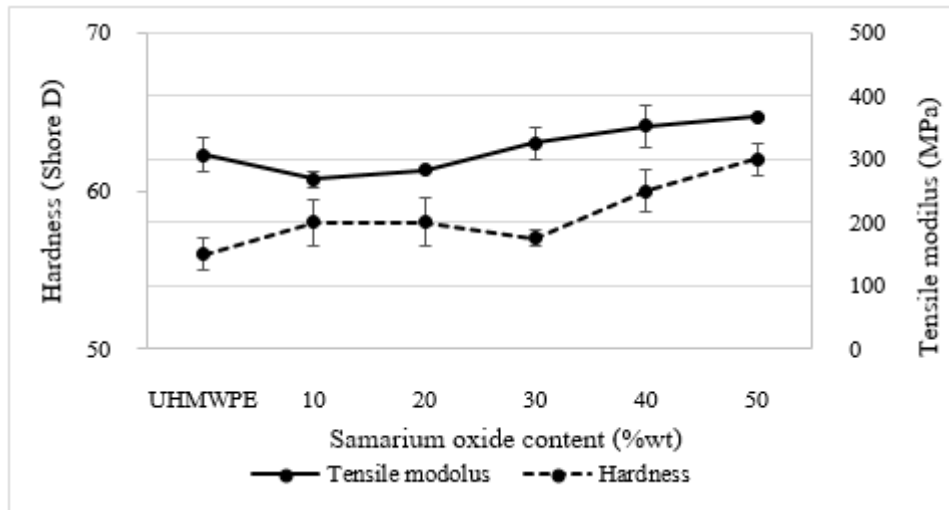
Mechanical properties	Extrusion Process		Morphology: SEM
	UHMWPE	50% Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Tensile modulus (MPa)	306.9 ± 26.8	366.5 ± 4.4	 <p>ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ด้วยกระบวนการอัดรีดและขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน (กำลังขยาย 1000 เท่า)</p>
Tensile strength (MPa)	25.9 ± 1.2	20.0 ± 0.7	
Elongation at break (%)	1059 ± 99	117 ± 8	
Hardness (shore D)	56 ± 1	62 ± 1	
Toughness (kJ/m <sup>2</sup> )	10.9 ± 1.6	1.57 ± 0.07	

**สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่ปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

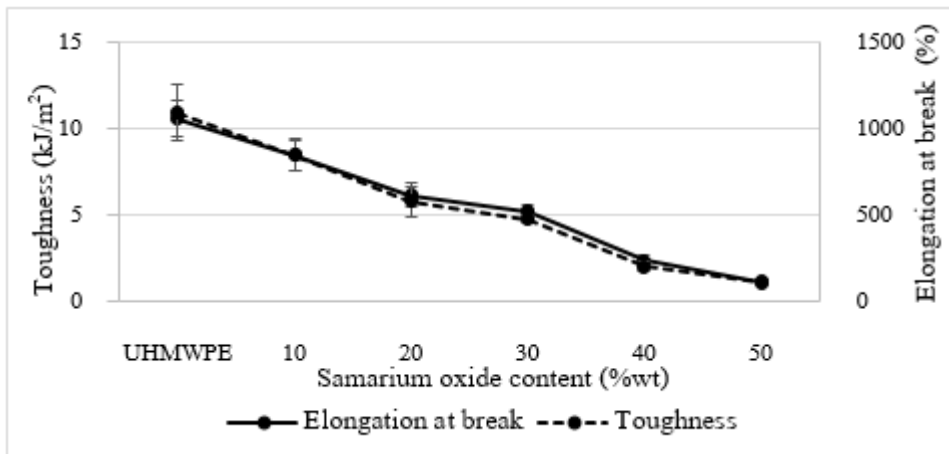
สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณของสารตัวเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 %wt พบว่าค่ามอดูลัสแรงดึง (Tensile modulus) และค่าความแข็ง (Hardness) มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2 ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็นอนุภาคที่มีความแข็ง (Rigidity) จึงส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น (Fang et al., 2006) ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) และค่าความเหนียว (Toughness) ดังแสดงในภาพที่ 3 พบว่าการเติมสารตัวเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด และมีความเหนียวมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณ Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่เพิ่มมากขึ้น เข้าไปแทนที่พอลิเมอร์ที่เป็นวัสดุหลัก ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบมีการยืดตัวและสมบัติความยืดหยุ่นลดลง และสมบัติความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE ที่เติมสารตัวเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ดังแสดงในภาพที่ 4 ที่ปริมาณ 10 %wt มีค่าความต้านทานแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลง (มีค่าเท่ากับ 26 MPa) และเมื่อเติมปริมาณ Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ไม่สามารถเกิดอันตรกิริยากับ UHMWPE ได้ และอาจเกิดการเกาะกลุ่มกันของสารตัวเติมด้วยตัวเอง (Filler-filler interaction) จึงส่งผลต่อการยึดเกาะระหว่างสารตัวเติมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ลดลง

**สมบัติการกักน้ำรังสีของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และความหนาของชิ้นงาน**

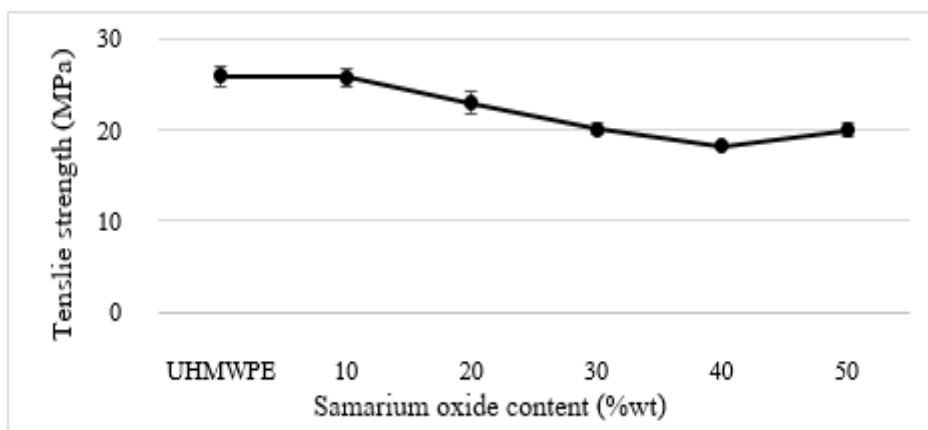
สมบัติการกักน้ำรังสีของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ดังแสดงในภาพที่ 5 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ส่งผลทำให้สมบัติการกักน้ำรังสีของอนุภาคนิวตรอนเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารตัวเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่เพิ่มขึ้น โดยวัสดุ UHMWPE บริสุทธิ์ ที่ความหนา 25 mm มีค่า Neutron transmission เท่ากับ 0.819 ± 0.002 และเมื่อเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ปริมาณตั้งแต่ 10-50 %wt ในวัสดุ UHMWPE ทำให้ค่า Neutron transmission ลดลงตามปริมาณสารตัวเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่เพิ่มขึ้น



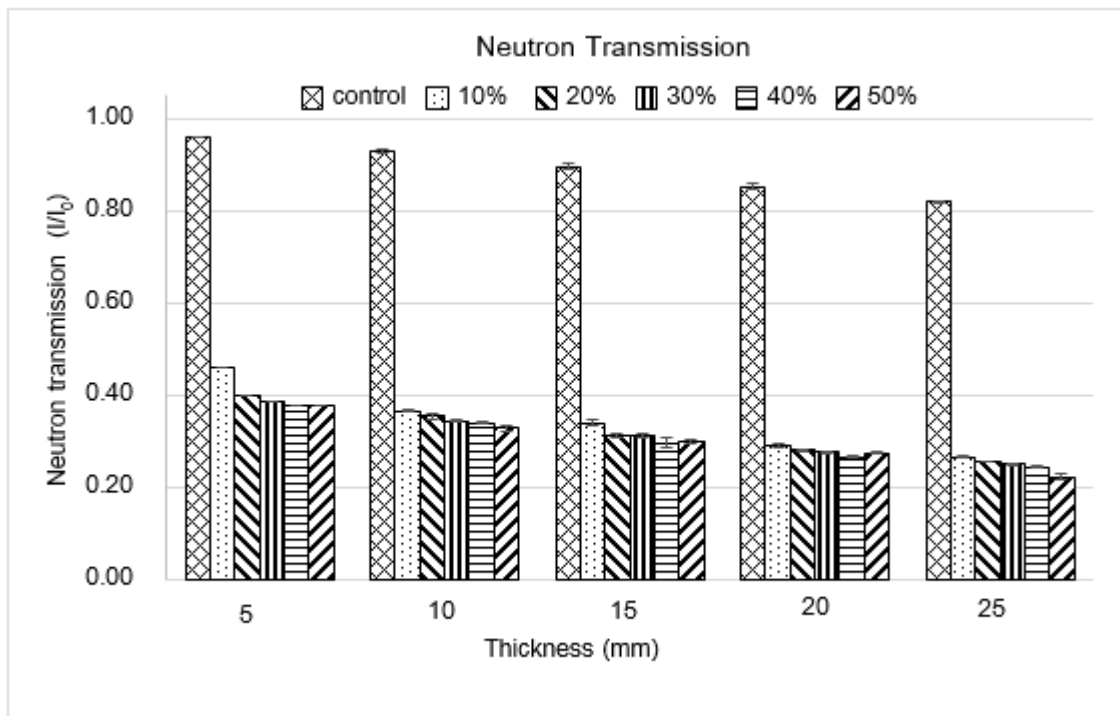
ภาพที่ 2 ค่ามอดูลัสแรงดึง (Tensile modulus) และค่าความแข็ง (Hardness) ของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่ปริมาณสารตัวเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ตั้งแต่ 0 - 50 %wt



ภาพที่ 3 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) และค่าความเหนียว (Toughness) ของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่ปริมาณสารตัวเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ตั้งแต่ 0 - 50 %wt



ภาพที่ 4 ค่าความต้านแรงดึง (Tensile strength) ของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่ปริมาณสารตัวเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ตั้งแต่ 0 - 50 %wt



ภาพที่ 5 สมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่ปริมาณ Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่ปรับเปลี่ยนความหนาขึ้นงาน

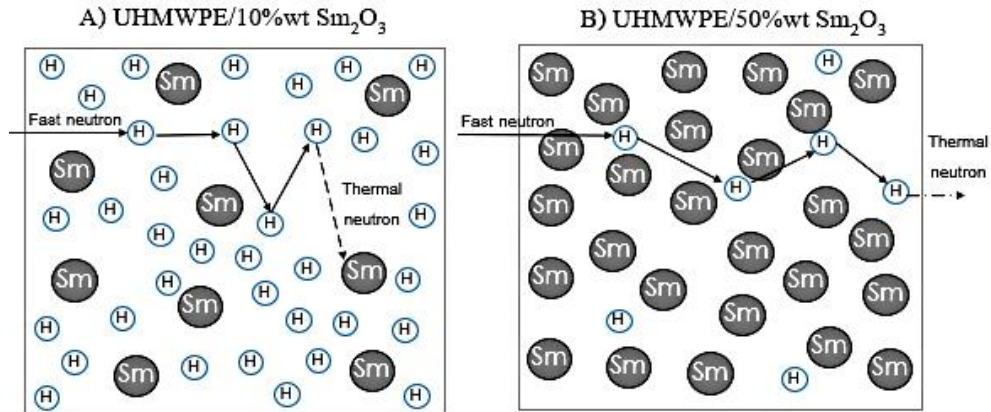
โดยมีค่าเท่ากับ  $0.264 \pm 0.001$ ,  $0.254 \pm 0.006$ ,  $0.248 \pm 0.003$ ,  $0.242 \pm 0.003$  และ  $0.221 \pm 0.007$  ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีค่าในการดูดกลืนนิวตรอนที่สูง (Wang et al., 2015) ดังนั้น เมื่อเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติในการกำบังรังสีที่เพิ่มขึ้น

เมื่อปรับเปลี่ยนความหนาของวัสดุเชิงประกอบ ส่งผลต่อค่า Neutron transmission ลดลงตามความหนาที่เพิ่มขึ้น โดยวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่มีสารตัวเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่ปริมาณ 50 %wt ที่ความหนา 5-25 mm มีค่า Neutron transmission เท่ากับ  $0.378 \pm 0.006$ ,  $0.328 \pm 0.005$ ,  $0.298 \pm 0.002$ ,  $0.274 \pm 0.006$  และ  $0.221 \pm 0.007$  ตามลำดับ โดยพบว่าวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่มีสารตัวเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ปริมาณ 50 %wt ที่ความหนา 25 mm สามารถลดทอนอนุภาคนิวตรอนได้ประมาณ 78% ซึ่งแสดงถึงสมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอนมากที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่มีปริมาณของ Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> น้อย แต่ทั้งนี้พบว่าปริมาณของ Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่เพิ่มขึ้น สามารถกำบังอนุภาคนิวตรอนให้เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่วัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่มีปริมาณของ Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่มาก (มีอัตราส่วนของ Sm ที่สูง) แต่กลับทำให้วัสดุเชิงประกอบมีอัตราส่วนของอะตอมไฮโดรเจน ซึ่งจำเป็นในการลดทอนพลังงานของอนุภาคนิวตรอนมีจำนวนลดลง ส่งผลทำให้อนุภาคนิวตรอนพลังงานสูง (Fast neutron) ที่ผ่านเข้ามาที่วัสดุเชิงประกอบไม่สามารถลดทอนพลังงานลงให้เป็นนิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutron) ได้เพียงพอที่เกิดอันตรกิริยากับสารตัวเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ได้ จึงส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำบังอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณของ Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มาก มีค่ามากกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณของ Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> น้อยกว่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังแสดงในภาพจำลองการกำบังอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่มีสารตัวเติม Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่ปริมาณน้อย (อะตอมของไฮโดรเจน



ที่มาก) และวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/ $\text{Sm}_2\text{O}_3$  ที่มีปริมาณ  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  มาก (อะตอมของไฮโดรเจนที่น้อย) ดังแสดงในภาพที่ 6A และ 6B ตามลำดับ



ภาพที่ 6 แบบจำลองการกำบังอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/ $\text{Sm}_2\text{O}_3$  ที่มีปริมาณของ  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  ดังนี้ A) 10% wt และ B) 50 %wt

### อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

1. กระบวนการอัดรีดวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/ $\text{Sm}_2\text{O}_3$  และขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการขึ้นรูปรีดร้อนระบบแรงดัน ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติเชิงกลโดยรวมสูงกว่ากระบวนการผสมและอัดขึ้นรูปรีดร้อนด้วยแรงดันเพียงอย่างเดียว
2. วัสดุเชิงประกอบ UHMWPE/ $\text{Sm}_2\text{O}_3$  ที่มีปริมาณของ  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  10%wt มีสมบัติเชิงกลด้านค่าความต้านทานแรงดึงที่ไม่เปลี่ยนแปลง เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด และความเหนียว มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารตัวเติม  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  ที่เพิ่มขึ้น
3. การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสี  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  ในวัสดุเชิงประกอบ และความหนาของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์แผ่นกำบังรังสี ส่งผลทำให้ Neutron transmission มีค่าลดลง โดยวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE ที่เติม  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  ที่ปริมาณ 50%wt ที่ความหนา 25 mm สามารถลดทอนอนุภาคนิวตรอนได้สูงที่สุด (~78 %)

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF) คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง และเครื่องมือในการทดสอบ

**เอกสารอ้างอิง**

- Ahmad M, Wahit M, Kadir MRA, Dahlan KZO. Mechanical, rheological, and bioactivity properties of ultra high-molecular-weight polyethylene bioactive composites containing polyethylene glycol and hydroxyapatite. *Sci World J* 2012; 474851.
- Barfh RF, Soloway AH, Fairchild RG, Brugger RM. Boron neutron capture therapy for cancer. *Realities. Cancer* 1992; 70(12): 2995-3007.
- Cao X, Xue X, Jiang T, Li Z, Ding Y, Li Y, et al. Mechanical properties of UHMWPE/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite shielding material. *J Rare Earth* 2010; 28: 482-484.
- Cember H. *Introduction to Health Physics (4th Edition)*. New York: McGraw-Hill Professional Publishing; 2000.
- Fang L, Leng Y, Gao P. Processing and mechanical properties of HA/UHMWPE nanocomposites. *Biomaterials* 2006; 27(20): 3701-3707.
- Hawkesworth MR. Neutron radiography: Equipment and methods. *At Energy Rev* 1997; 15(2): 169-220.
- Herman C. *Introduction to Health Physics (4th Edition)*. New York: McGraw-Hill Professional Publishing; 2000.
- Kurtz SM. *High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement*. Netherland: Elsevier/Academic Press; 2004.
- Miri-Hakimabadi H, Izadi-Najafabadi R, Vejdani-Noghreiyani A. An Optimum Landmine Detection System Using Polyethylene Moderator and <sup>241</sup>Am-Be as a Neutron Source. *Asian J Exp Sci* 2008; 22(1): 153-158.
- NIST center for neutron research. Neutron scattering lengths and cross sections [online] 2017 [cited 2017 Dec 20]. Available from: <https://www.ncnr.nist.gov/resources/n-lengths>.
- Özdemir T, Akbay IK, Reyhancan IA. Flexible neutron shielding composite material of EPDM rubber with boron trioxide: Mechanical, thermal investigations and neutron shielding tests. *Radiat Phys Chem* 2017; 131(Supplement C): 7-12.
- Shin JW, Lee JW, Yu SG, Baek BK, Hong JP, Seo YS, et al. Polyethylene/boron-containing composites for radiation shielding. *Thermochimica Acta* 2014; 585(Supplement C): 5-9.
- Valentin J. Relative biological effectiveness (RBE), quality factor (Q) and radiation weighting factor (wR): ICRP Publication 92. *Annals of the ICRP* 2003; 33(4): 121.
- Wang P, Tang X, Chai H, Chen D, Qiu Y. Design, fabrication, and properties of a continuous carbon-fiber reinforced Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/polyimide gamma ray/neutron shielding material. *Fusion Eng Design* 2015; 101(Supplement C): 218-225.