



วัสดุกำบังนิวตรอนเร็วแบบใหม่ที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชั้นของยางพารา
 ยางสังเคราะห์เอสบีอาร์และโบรอนออกไซด์ (B_2O_3)
 และชั้นของยางพาราและเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)

New Fast Neutron Shielding Material Composing of Alternating
 Layers of Natural Rubber, SBR and Boron Oxide (B_2O_3) and
 Layers of Natural Rubber and Iron(III) Oxide (Fe_2O_3)

ชญาณิช จำปี¹ และ ดุลยพงศ์ วงศ์แสง^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

*Corresponding author, E-mail: doonyapong.w@chula.ac.th

บทคัดย่อ

นิวตรอนถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ซึ่งนิวตรอนเป็นอนุภาคที่เป็นกลาง ไม่มีประจุไฟฟ้า จึงมีอำนาจทะลุทะลวงสูง การทำงานเกี่ยวกับต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน ต้องมีความระมัดระวังเป็นพิเศษ โดยเฉพาะอย่างยิ่งนิวตรอนเร็วจากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน ดังนั้นการใช้วัสดุกำบังรังสีนิวตรอนจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งในการป้องกันอันตรายจากรังสีนิวตรอนที่มีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนโดยใช้โปรแกรม Mote Carlo N Particle (MCNP) เพื่อเลือกวัสดุ และรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับเป็นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน โดยใช้วัสดุหลักที่มีภายในประเทศไทย โดยกำหนดให้มีความหนาของวัสดุที่ 10 ซม. ผลการออกแบบพบว่าวัสดุที่สามารถกำบังรังสีนิวตรอนในย่านของนิวตรอนเร็ว ($10^{-2} - 100$ MeV) ได้ดีที่สุด ได้แก่ วัสดุ 4 ชั้นที่ประกอบด้วยชั้นของยางพารา (NR) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) 100 part per hundred rubber (phr) หนาชั้นละ 2.5 ซม. สลับกับชั้นของยางพาราผสมกับยางสังเคราะห์เอสบีอาร์ (SBR) ในอัตราส่วน 1:1 และโบรอนออกไซด์ (B_2O_3) 5 phr หนาชั้นละ 2.5 ซม. และเมื่อเปรียบเทียบผลการกำบังรังสีนิวตรอนของวัสดุกำบังในรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ทรงกระบอก และทรงกลม ที่มีปริมาตรเท่ากัน พบว่าวัสดุกำบังทรงกลมสามารถกำบังรังสีนิวตรอนได้ดีที่สุด โดยสามารถลดทอนรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีได้ร้อยละ 43 จากนั้นจึงทำการทดลองขึ้นรูปชั้นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน และนำไปถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเพื่อดูการกระจายตัวของวัสดุตกผลึกและกระเจิงรังสีนิวตรอนที่เติมลงไปในส่วนผสมของยาง

ซึ่งพบว่าการกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ดังนั้นวัสดุกำบังรังสีนี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผู้ใช้งานเกี่ยวกับรังสีนิวตรอนได้ดี

ABSTRACT

Neutrons have been widely used in many applications. Since neutrons have no electric charge, they can travel through electron cloud and directly interact with the atomic nucleus. Exposure to free neutrons can be hazardous especially fast neutrons from neutron source. Therefore, using neutron shielding material is very important. Optimized flexible and lightweight neutron shielding materials were designed using the Monte Carlo N-Particle (MCNP) code. Thicknesses of 10 cm were tested for neutron shielding performances. Simulation results indicated that the shielding material with four alternating layers of NR with 100 phr iron (III) oxide (Fe_2O_3) and of NR and SBR blend (1:1) with 5 phr boron oxide (B_2O_3) were most suitable for fast neutron shielding. The neutron shielding material of a spherical shape exhibits the best performance (43% neutron attenuation) compared with cuboid and cylindrical shapes. The optimum neutron shielding material design was fabricated and good homogeneity of the material was verified by neutron radiography. Therefore, this neutron shielding material can be utilized in neutron source applications.

คำสำคัญ: นิวตรอนเร็ว ยางพาราธรรมชาติ ยางเอสปีอาร์ โบรอนออกไซด์ (B_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)

Keywords: Fast neutron, MCNP, Natural rubber, SBR, Boron oxide (B_2O_3), Iron (III) oxide (Fe_2O_3)

บทนำ

ปัจจุบันมีการนำนิวตรอนมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายทั้งทางด้านการแพทย์ ด้านการเกษตร และด้านอุตสาหกรรม ยกตัวอย่างเช่น การใช้นิวตรอนในการผลิต สารเภสัชภัณฑ์ที่ใช้ทางด้านเวชศาสตร์ นิวเคลียร์ การปรับปรุงพันธุ์พืช การตรวจสอบความชื้น การถ่ายภาพวัสดุที่มีเลขอะตอมต่ำด้วยนิวตรอนเป็นต้น ซึ่งนิวตรอนเป็นอนุภาคที่เป็นกลาง ไม่มีประจุไฟฟ้า จึงมีอำนาจทะลุทะลวงสูง เนื่องจากสามารถผ่านกลุ่มหมอกอิเล็กทรอนิกส์ของอะตอมไปทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสได้โดยตรง นอกจากนั้นนิวตรอนยังสามารถถ่ายโอนพลังงานเกือบทั้งหมดให้กับนิวเคลียสของธาตุที่มีมวลใกล้เคียงกับมวลของนิวตรอน ซึ่งนิวเคลียสของ

ไฮโดรเจนที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในร่างกายของสิ่งมีชีวิต มีขนาดใกล้เคียงกับมวลของนิวตรอน ดังนั้นเมื่อนิวตรอนทำอันตรกิริยากับเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิตจึงส่งผลให้นิวเคลียสของไฮโดรเจนได้รับพลังงานส่วนใหญ่จากนิวตรอนแล้วเคลื่อนที่ออกไปด้วยความเร็วสูงเหมือนกับอนุภาคโปรตอน ซึ่งมี Linear Energy Transfer (LET) สูง ทำให้อะตอมของเนื้อเยื่อเกิดการแตกตัวได้สูงเช่นกัน (Shultis, 2010) จึงทำให้ในการทำงานเกี่ยวกับต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน ต้องมีความระมัดระวังเป็นพิเศษ นอกจากใช้เวลาให้สั้นที่สุดและทำงานในระยะทางที่ห่างจากต้นกำเนิดรังสีให้มากที่สุดแล้ว วัสดุที่ใช้กำบังรังสีก็นับว่ามีส่วนสำคัญเป็นอย่างมาก นิวตรอนสามารถถูกดูดกลืนได้ดีในธาตุหรือวัสดุที่มีค่า

ภาคตัดขวางหรือโอกาสการดูดกลืนนิวตรอนสูง (High neutron absorption cross section) แต่นิวตรอนเหล่านี้ต้องเป็นนิวตรอนที่อยู่ในย่านเทอร์มัลนิวตรอน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการหน่วงความเร็วของนิวตรอนเร็วจากต้นกำเนิดให้เป็นเทอร์มัลนิวตรอน เพื่อให้โอกาสการดูดกลืนในวัสดุดูดกลืนนิวตรอนสูงขึ้น โดยมักใช้วัสดุที่มีความหนาแน่นของอะตอมไฮโดรเจนในวัสดุอยู่สูง

หลายงานวิจัยได้ทำการศึกษาและผลิตวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนโดยใช้พอลิเมอร์เป็นวัสดุหลักร่วมกับวัสดุที่มีค่าโอกาสการดูดกลืนนิวตรอนสูง แต่เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำบังรังสีนิวตรอนในย่านของเทอร์มัลนิวตรอน ($10^{-8} - 10^{-2}$ MeV) ได้แก่ วัสดุที่ทำจากพอลิเอทิลีน (Polyethylene) หรือ อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin) ผสมกับแร่ที่มีสารประกอบโบรอน เช่น Ilmenite และ Colemanite เป็นต้น (Abdo et al., 2003; Okuno, 2005) นอกจากนั้นวัสดุหลักที่ทำจากคอนกรีตร่วมกับแร่ Colemanite หรือแร่ hematite ก็ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการทำเป็นโครงสร้างอาคารที่สามารถกำบังได้ทั้งรังสีนิวตรอนและรังสีแกมมา (Gencel et al., 2010; Gencel, 2012) แต่วัสดุที่ทำมาจากของแข็งเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดของขนาดที่ค่อนข้างใหญ่และมีน้ำหนักมาก นอกจากนั้นยังมีความยืดหยุ่นต่ำ

อย่างไรก็ตามมีการศึกษาการผลิตวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนจากวัสดุไฮโดรคาร์บอนพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง ได้แก่ ยางพาราธรรมชาติ ที่มีส่วนผสมของกรดบอริก (Boric acid; H_3BO_3) และโบรอนคาร์ไบด์ (Boron Carbide; B_4C) แต่เป็นวัสดุที่กำบังรังสีนิวตรอนได้ดีในย่านของเทอร์มัลนิวตรอนเท่านั้น (Gwaily et al., 2002)

จึงมีความสนใจที่ศึกษาและผลิตวัสดุที่สามารถกำบังรังสีนิวตรอนได้ในย่านของนิวตรอนเร็ว (0.1 – 100 MeV) เนื่องจากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนมักให้รังสีในย่านของนิวตรอนเร็ว โดยใช้วัสดุหลักที่สามารถผลิตได้ในประเทศไทย ซึ่งหลายพื้นที่ในประเทศไทยมีการเพาะปลูกยางพาราเป็นจำนวนมาก ซึ่งยางพาราธรรมชาติเป็นหนึ่งในวัสดุพอลิเมอร์ไฮโดรคาร์บอนที่มีความยืดหยุ่นสูง มีไฮโดรเจนที่สามารถหน่วงความเร็วนิวตรอนได้ดีอยู่ในปริมาณมาก นอกจากนั้นยังพบว่าทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยมีการสำรวจพบแร่บอราไซต์ (Boracite) ที่พบได้พร้อมกับแร่ไพฑูรย์ (Crosby, 2007; Suwanich, 2010) ซึ่งมีโบรอนเป็นส่วนประกอบ ซึ่งโบรอนนี้โดยเฉพาะโบรอน-10 (B-10) เป็นธาตุที่มีค่าโอกาสการดูดกลืนเทอร์มัลนิวตรอนสูง

ดังนั้นการผลิตวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนนี้ นอกจากจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งานรังสีนิวตรอนแล้ว ยังเป็นการสนับสนุนให้มีการใช้วัตถุดิบที่ผลิตได้ในประเทศไทยอีกด้วย

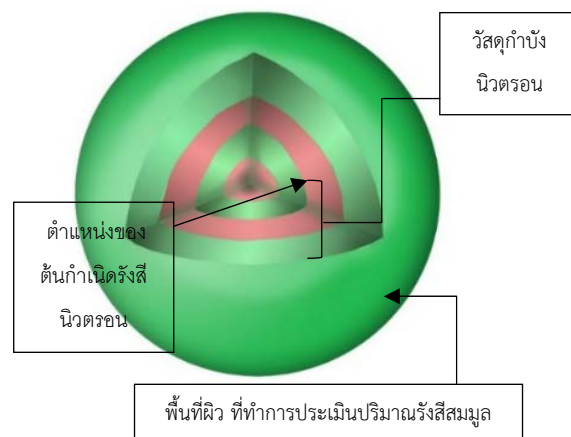
วิธีดำเนินงานวิจัย

1. การออกแบบวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนโดยการจำลองด้วย โปรแกรม Monte Carlo N particle (MCNP)

ทำการกำหนดและเลือกวัสดุหลักที่จะนำมาผลิตวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนโดยพิจารณาจาก ความเหมาะสมกับการใช้งาน และราคาที่สมเหตุสมผล ซึ่งทำการเปรียบเทียบชนิดของวัสดุและรูปแบบต่างๆ โดยกำหนดให้สารตัวเติม ได้แก่ B_2O_3 , PbO_2 และ Fe_2O_3 ที่เป็นตัวดูดกลืนนิวตรอนและกระเจิงนิวตรอน (Neutron absorber /Neutron scatter material) มีปริมาณที่เท่ากันที่ 40 phr ในแต่ละตัวอย่าง นอกจากนั้นยังมีวัสดุที่ทำจาก โบรอน และเหล็ก เพื่อ

นำมาเปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 1 (แม้ว่าธาตุแกดโดลิเนียมจะเป็นธาตุที่สามารถกักรังสีนิวตรอนได้ดีแต่ในงานวิจัยนี้ แกดโดลิเนียมไม่ได้ถูกเลือกมาพิจารณาเนื่องจากมีราคาที่สูง) โดยทำการสร้างแบบของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนในเบื้องต้นที่จะคำนวณในโปรแกรม MCNP เป็นรูปแบบทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 1 (Jumpee, 2015) โดยกำหนดให้มีต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนเร็วแบบจุด (Point source) พลังงาน 0.1 – 100 MeV วางอยู่ในจุดศูนย์กลางของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนทรงกลมที่มีรัศมีหรือความหนาของวัสดุจากจุดศูนย์กลาง 10 ซม. และพิจารณาอัตราปริมาณ

รังสีสมมูล (Dose equivalent rate/source strength ; (rem/hr)/source strength) ที่บริเวณพื้นผิวด้านนอกทั้งหมดของทรงกลม ทั้งในส่วนของรังสีนิวตรอนและรังสีแกมมาที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างรังสีนิวตรอนกับวัสดุกำบัง (Secondary gamma ray) ที่ถูกลดทอนได้มากที่สุดหลังจากผ่านวัสดุกำบัง การออกแบบวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนในเบื้องต้นให้เป็นรูปทรงกลมเนื่องจากเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าอนุภาคนิวตรอนทุกตัวที่เกิดขึ้นที่ตรงกลางของวัสดุกำบังสามารถทำอันตรกิริยากับวัสดุกำบังก่อนที่จะออกนอกระบบไป



รูปที่ 1 ลักษณะของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนทรงกลมที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพการกำบังรังสีนิวตรอนด้วย MCNP

เมื่อได้รูปแบบและชนิดของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่เหมาะสมแล้ว จึงทำการประเมินเปรียบเทียบปริมาณของวัสดุ Neutron absorber และ Neutron scatter ว่าปริมาณเท่าใดจึงจะทำให้ได้วัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด

จากนั้นนำผลที่ได้ทั้งหมดข้างต้นมาประเมินการกำบังรังสีเมื่อมีส่วนประกอบของแผ่นโลหะชนิดต่างๆ ที่มีความหนา 1 มม. เป็นโครงสร้างเสริมร่วมด้วย แล้วจึงทำการออกแบบให้มีรูปร่างลักษณะที่แตกต่างกัน

ใน รูปทรงสี่เหลี่ยม ทรงกระบอก และทรงกลม ทั้งที่มีแผ่นโลหะและไม่มีแผ่นโลหะเป็นโครงสร้างเสริม เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำบังรังสีนิวตรอนของรูปทรงต่างๆ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการทำเป็นภาชนะบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอนที่สามารถกำบังรังสีนิวตรอนได้

2. การขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน

หลังจากการประเมินประสิทธิภาพการกำบังรังสีนิวตรอนของวัสดุต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 ด้วยโปรแกรม MCNP แล้ว จากนั้นจึงนำผลที่ได้มาทดลอง

ขึ้นรูปชิ้นงานจริง โดยทำการผสมส่วนผสมของยางและสารเคมียางรวมทั้งวัสดุ Neutron absorber และ Neutron scatter ทั้งหมดด้วยเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว และ 20 นิ้ว ด้วยความเร็วรอบต่ำ (18 รอบต่อนาที) โดยมีอัตราเร็วของลูกกลิ้งหน้าและหลังเท่ากับ 1:4 และใช้ระยะเวลาในการผสมยางแต่ละชิ้นงาน 25 นาที ซึ่งส่วนผสมและสารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูปแสดงไว้ในตารางที่ 2 เมื่อผสมยางเรียบร้อยแล้ว เก็บยางไว้ในที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการคงรูปยางให้มีลักษณะเป็นแผ่น (ความหนา 0.2 ซม. สำหรับนำไปทดสอบคุณสมบัติของยาง และความหนา 2.5 ซม. เพื่อใช้เป็นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน) ด้วยการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ โดยทำวงแม่พิมพ์ที่มียางคอมพาวด์อยู่ภายในลงบนแผ่นกวดอัดความร้อน (heating plates) ของเครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก (hydraulic press) ที่สามารถเลื่อนขึ้นลงได้ โดยใช้ความร้อน $160 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ด้วยแรงกด 4 MPa สำหรับเวลาที่ใช้ในการกดอัดขึ้นรูป ขึ้นอยู่กับชนิดของยางคอมพาวด์ ดังแสดงไว้ในส่วนท้ายของตารางที่ 2

เมื่อได้ชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนแล้ว ทำการประเมินการกระจายตัวของวัสดุ Neutron absorber และ Neutron scatter ในเนื้อยาง โดยการถ่ายภาพชิ้นงานด้วยรังสีนิวตรอน (neutron radiography) เป็นเวลา 4 นาที โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย TRR-1/M1 TRIGA-type ที่สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ซึ่งมีนิวตรอนฟลักซ์ (neutron flux) และ Cd ratio ที่ตำแหน่งของตัวรับภาพ ประมาณ $9 \times 10^5 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ และ 100 ตามลำดับ โดยใช้แผ่นรับภาพนิวตรอน (neutron imaging plate) ชนิด ND 2040 เป็นตัวรับภาพ จากนั้นจึงทำการอ่านภาพและ

สร้างภาพจาก neutron imaging plate ด้วยเครื่องอ่านภาพ BAS 25

ผลการวิจัยและการวิจารณ์ผลการวิจัย

1. ประสิทธิภาพวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่จำลองด้วยโปรแกรม Monte Carlo N particle (MCNP)

1.1 การเปรียบเทียบชนิดของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน

ผลการจำลองการกำบังรังสีนิวตรอนของวัสดุชนิดต่างจาก MCNP พบว่า ชิ้นงานตัวอย่างหมายเลข 10 (sample No. 10) ที่ประกอบด้วยชิ้นงาน 4 ชั้นของ $\text{NR+SBR+Fe}_2\text{O}_3/\text{NR+SBR+B}_2\text{O}_3$ สามารถกำบังรังสีได้ดีที่สุดเมื่อประเมินอัตราปริมาณรังสีสมมูลรวมทั้งรังสีนิวตรอนและรังสีแกมมาทุติยภูมิที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนเร็วและวัสดุกำบัง ดังแสดงให้เห็นในกราฟแท่งในรูปที่ 2 การที่ Sample No.10 สามารถกำบังรังสีนิวตรอนได้ดีที่สุดเนื่องจากในการจำลองการเกิดอันตรกิริยาในโปรแกรม MCNP ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนเป็นรังสีในย่านของนิวตรอนเร็ว ($0.1 - 100 \text{ MeV}$) ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องถูกลดทอนพลังงานให้อยู่ในย่านของเทอร์มัลนิวตรอนก่อนจึงจะสามารถถูกดูดกลืนด้วยโบรอน-10 ซึ่งยางเป็นไฮโดรคาร์บอนพอลิเมอร์ที่มีองค์ประกอบของไฮโดรเจนอยู่ในปริมาณสูง ทำให้สามารถลดทอนพลังงานจากนิวตรอนเร็วจนกลายเป็นเทอร์มัลนิวตรอนด้วยอันตรกิริยาแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) นอกจากนั้นวัสดุนี้ยังมีชั้นของวัสดุที่มีส่วนประกอบของเหล็กจาก Fe_2O_3 ซึ่งเป็นธาตุที่มีค่าโอกาสการชนกับนิวตรอนเร็วสูง ($\sigma_{t,1 \text{ MeV}} = 5.19 \text{ barn}$) ด้วยอันตรกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering) ทำให้สามารถลดทอนพลังงานจากนิวตรอนเร็วเป็นเทอร์มัลนิวตรอนได้อีกทางหนึ่ง ทำให้เทอร์มัลนิวตรอนเหล่านี้ถูกดูดกลืนด้วยโบรอน-10 ที่เป็นส่วนประกอบ

ของ B_2O_3 ต่อไป นอกจากนั้น เหล็กยังสามารถลดทอนรังสีแกมมาทุติยภูมิได้บางส่วนอีกด้วย เนื่องจากเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมค่อนข้างสูง แม้ว่าตะกั่วจาก PbO_2 จะเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมสูงที่สามารถลดทอนรังสีแกมมาได้ดี แต่เมื่อพิจารณาคุณสมบัติการลดทอนนิวตรอนพบว่ายังมีคุณสมบัติที่ต่ำกว่าเหล็ก เนื่องจากมีค่าโอกาสการชนกับนิวตรอนเร็ว ($\sigma_{t;1\text{ MeV}} = 4.39 \text{ barn}$) ต่ำกว่าเหล็กอยู่พอสมควร ดังนั้นเมื่อพิจารณาอัตราปริมาณรังสีสมมูลโดยรวมทั้งนิวตรอน และรังสีแกมมา ทำให้วัสดุที่มีส่วนประกอบ PbO_2 สามารถกำบังรังสีได้น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่มี Fe_2O_3 เป็นส่วนประกอบ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความสามารถของยางวัสดุกำบังที่มีส่วนประกอบของทั้ง B_2O_3 และ Fe_2O_3 ในปริมาณที่เท่ากัน แต่มีการจัดเรียงรูปแบบของวัสดุที่แตกต่างกัน (Sample No. 5, 10 และ 11) พบว่า วัสดุที่กำบังรังสีนิวตรอนได้ดีที่สุด คือวัสดุที่ถูกจัดเรียงเป็นชั้นสลับของ Sample No. 10 ที่มีชั้นของยางผสมกับ Fe_2O_3 อยู่ติดกับต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน ต่อด้วยชั้นของยางผสมกับ B_2O_3 สลับกับชั้นของยางผสม Fe_2O_3 และชั้นของยางผสม B_2O_3 ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มโอกาสให้นิวตรอนเร็วที่เกิดจากต้นกำเนิดรังสีทำอันตรกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นกับเหล็กในชั้นแรกก่อนเพื่อลดทอนพลังงานของนิวตรอนเร็วให้เป็นเทอร์มัลนิวตรอน ในขณะเดียวกันนิวตรอนเร็วก็สามารถทำอันตรกิริยาแบบยืดหยุ่นกับอะตอมไฮโดรเจนในเนื้อยาง เพื่อลดทอนและถูกดูดกลืนในอะตอมไฮโดรเจนตามลำดับอีกทางหนึ่ง จากนั้นเทอร์มัลนิวตรอนจึงถูกดูดกลืนด้วย B-10 ใน B_2O_3 ในชั้นถัดไปของวัสดุ และนิวตรอนเร็วที่เหลือก็ยังสามารถทำ

อันตรกิริยาแบบไม่ยืดหยุ่นกับเหล็กในชั้นถัดไปเรื่อยๆ ดังเช่นที่เกิดกับวัสดุสองชั้นแรก

เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุยางที่ผสมทั้ง B_2O_3 และ Fe_2O_3 เป็นเนื้อเดียวกัน (Sample No. 5) พบว่ามีคุณสมบัติการกำบังรังสีนิวตรอนที่ดีกว่า Sample No.10 เนื่องจากนิวตรอนเร็วมีระยะทางอิสระเฉลี่ย (Mean free path) ในไฮโดรคาร์บอนพอลิเมอร์ประเภทยางประมาณ 2.6 ซม. ดังนั้นวัสดุกำบังบริเวณที่ติดกับต้นกำเนิดรังสีที่มีปริมาณของเหล็กอยู่น้อยจึงไม่สามารถลดทอนพลังงานของนิวตรอนเร็วให้เป็นเทอร์มัลนิวตรอนได้ดีพอ ดังนั้น B-10 ที่ผสมอยู่จึงไม่สามารถดูดกลืนนิวตรอนเร็วได้ เมื่อนิวตรอนเร็วเข้าทำอันตรกิริยากับวัสดุกำบังในชั้นที่ห่างจากต้นกำเนิดรังสีออกไปจนถูกลดทอนเป็นเทอร์มัลนิวตรอนแล้ว จึงเหลือปริมาณของ B-10 ในระยะนั้นๆ ไม่มากพอที่จะสามารถดูดกลืนเทอร์มัลนิวตรอนได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

เมื่อพิจารณาวัสดุ Sample No. 14 และ 15 ได้แก่ โบรอนและเหล็กตามลำดับ พบว่ามีความสามารถในการกำบังรังสีนิวตรอนดีกว่าวัสดุที่มียางเป็นส่วนประกอบ แม้ว่าโบรอนจะมีค่าโอกาสการดูดกลืนนิวตรอนในย่านเทอร์มัลนิวตรอนสูง แต่เนื่องจากต้นกำเนิดรังสีที่ใช้ในการจำลองนี้ใช้รังสีของย่านนิวตรอนเร็ว จึงทำให้โบรอนไม่สามารถดูดกลืนนิวตรอนได้ดีนัก สำหรับเหล็ก แม้จะสามารถลดทอนพลังงานจากนิวตรอนเร็วไปเป็นเทอร์มัลนิวตรอนได้ดีระดับหนึ่ง แต่ก็ไม่ดีเท่ากับวัสดุที่มีไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบ ดังนั้นเหล็กหรือโบรอนเพียงอย่างเดียวจึงมีความสามารถในการกำบังรังสีนิวตรอนน้อยกว่าวัสดุที่ทำจากยาง

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบหลักที่นำมาพิจารณาประสิทธิภาพของการกำบังรังสีนิวตรอนเร็วของวัสดุกำบัง (ผสม B_2O_3 , PbO_2 และ Fe_2O_3 ชนิดละ 40 phr)

ตัวอย่างที่	จำนวนชั้น	ส่วนประกอบ	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ปริมาณของธาตุต่างๆ (part per hundred rubber; phr)						
				H	C	B-10	B-11	O	Fe	Pb
0	0	No material (อากาศ)	0.00120	อากาศ *						
1	1	NR+SBR	0.987	10.378	89.622	-	-	-	-	-
2	1	NR+SBR+B ₂ O ₃	1.210	10.378	89.622	2.460	9.963	27.577	-	-
3	1	NR+SBR+PbO ₂	1.343	10.378	89.622	-	-	5.351	-	34.649
4	1	NR+SBR+Fe ₂ O ₃	1.301	10.378	89.622	-	-	12.023	-	13.988
5	1	NR+SBR+B ₂ O ₃ +PbO ₂	1.273	10.378	89.622	1.230	4.982	16.464	-	17.325
6	1	NR+SBR+B ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	1.254	10.378	89.622	-	-	19.800	-	27.977
วัสดุหลายชั้น (Multi-layer samples)										
		Layer 1	Layer 2	Layer 3			Layer 4		Layer 5	
7	4	Sample 2	Sample 3	Sample 2			Sample 3		-	
8	4	Sample 2	Sample 4	Sample 2			Sample 4		-	
9	4	Sample 3	Sample 2	Sample 3			Sample 2		-	
10	4	Sample 4	Sample2	Sample4			Sample 2		-	
11	5	Sample 2	Sample 3	Sample 2			Sample 3		Sample 2	
12	5	Sample 2	Sample 4	Sample 4			Sample 4		Sample 2	
13	5	Sample 3	Sample 2	Sample 3			Sample 2		Sample 3	
วัสดุเปรียบเทียบ (Comparative materials)										
		ส่วนประกอบ	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ร้อยละของแต่ละ isotope						
14	1	Boron (B)	7.874	B-10 = 19.9			B-11 = 80.1			
15	1	Iron (Fe)	2.34	Natural Fe = 100						

* (McConn, 2011) Air's composition (weight fraction) ; Carbon : Nitrogen : Oxygen : Argon
0.000124 : 0.755268 : 0.231781 : 0.012827

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบที่ใช้ในการขึ้นรูปยาง

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)			
	Layer 1 (1.1)	Layer 2 (2.1)	Layer 3 (3.1)	Layer 4 (4.1)
NR	50 (100)	50 (100)	50 (100)	50 (100)
SBR1502	50 (0)	50 (0)	50 (0)	50 (0)
ZnO	5	5	5	5
Steric acid	2	2	2	2
Wingstay-L	1	1	1	1
B ₂ O ₃	0	10	0	10
Fe ₂ O ₃	100	0	100	0
MBTS ^a	1.2	1.2	1.2	1.2
TMTD ^b	1	1	1	1
DPG ^c	0.5	0.5	0.5	0.5
Sulfur	2.5	2.5	2.5	2.5
Compression molded time (นาที)	4	15	4	15

^a Dibenzothiazyl disulphide, ^b Tetramethylthiuramdisulphide, ^c Diphenyl Guanidine

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีหลังวัสดุกำบังชนิดต่างๆ และพลังงานของรังสีนิวตรอน ดังแสดงในรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าวัสดุ Sample No.10 (กราฟเส้นสีชมพู) เป็นวัสดุที่สามารถลดทอนรังสีนิวตรอนเร็วได้ดี โดยเมื่อพิจารณาที่ย่านของนิวตรอนเร็ว (พลังงาน 0.1 – 100 MeV) พบว่าทุกวัสดุสามารถลดทอนพลังงานของนิวตรอนเร็วได้ดีใกล้เคียงกัน เนื่องจากมียางเป็นส่วนประกอบหลักที่มีไฮโดรเจนที่สามารถลดทอนพลังงานของนิวตรอนเร็วเพื่อเปลี่ยนไปเป็นเทอร์มัลนิวตรอนได้ดี แต่ Sample No. 4 (กราฟเส้นประสีแดงเข้ม) เป็นวัสดุที่สามารถลดทอนพลังงานของนิวตรอนเร็วได้ดีที่สุด เนื่องจากมีส่วนประกอบของเหล็กในปริมาณที่มากที่สุดซึ่งสามารถทำอันตรกิริยาแบบไม่ยืดหยุ่นกับนิวตรอนเร็วเพื่อช่วยลดพลังงานเป็นเทอร์มัลนิวตรอนร่วมด้วย สังเกตได้จากกราฟของปริมาณรังสีที่มีค่าลดลงในย่านนิวตรอนเร็วและเปลี่ยนไปเป็นนิวตรอนในย่านเทอร์มัลนิวตรอนและอีพิเทอร์มัลนิวตรอนมากขึ้น (10^{-8} – 10^{-2} MeV) และเมื่อ

พิจารณาประสิทธิภาพของวัสดุต่างๆ ที่ย่านพลังงาน 10^{-8} – 10^{-2} MeV พบว่าวัสดุที่สามารถลดทอนนิวตรอนในย่านนี้ (ได้จากอันตรกิริยาของนิวตรอนและไฮโดรคาร์บอนพอลิเมอร์) ได้ดีที่สุดคือ Sample No. 2 (กราฟสีน้ำเงิน) ที่มีส่วนประกอบของ B₂O₃ ในปริมาณที่มากที่สุด เนื่องจาก B-10 สามารถดูดกลืนนิวตรอนได้ดีในย่านของเทอร์มัลนิวตรอน แต่เมื่อพิจารณาปริมาณรังสีนิวตรอนโดยรวมในทุกย่านพลังงาน จึงทำให้วัสดุกำบัง Sample No.10 ที่มีทั้งส่วนประกอบของ Fe และ B-10 สามารถลดทอนรังสีนิวตรอนได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ

1.2 การประเมินปริมาณของวัสดุดูดกลืนนิวตรอนและกระเจิงนิวตรอน

เมื่อได้รูปแบบและชนิดของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ดีที่สุดแล้วซึ่งก็คือ Sample No.10 จึงทำการประเมินว่าในแต่ละชั้นของวัสดุกำบังควรใช้ปริมาณของ Fe₂O₃ และ B₂O₃ เท่าใดตามลำดับ ผลการวิจัยพบว่าปริมาณของ Fe₂O₃ และ B₂O₃ ในแต่ละชั้นที่

100 phr และ 5 phr ตามลำดับ ให้ผลการกำบังรังสีนิวตรอนได้ดีที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4 เหตุผลที่กำหนดให้ปริมาณของ Fe_2O_3 ที่ใช้ในการประเมิณเปรียบเทียบสูงสุดที่ 100 phr เนื่องจากเป็นปริมาณที่ทำให้ส่วนผสมของยางมีความแข็งแรงมากจนขาดคุณสมบัติความยืดหยุ่น

1.3 การเปรียบเทียบชนิดของแผ่นโลหะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการลดทอนนิวตรอน

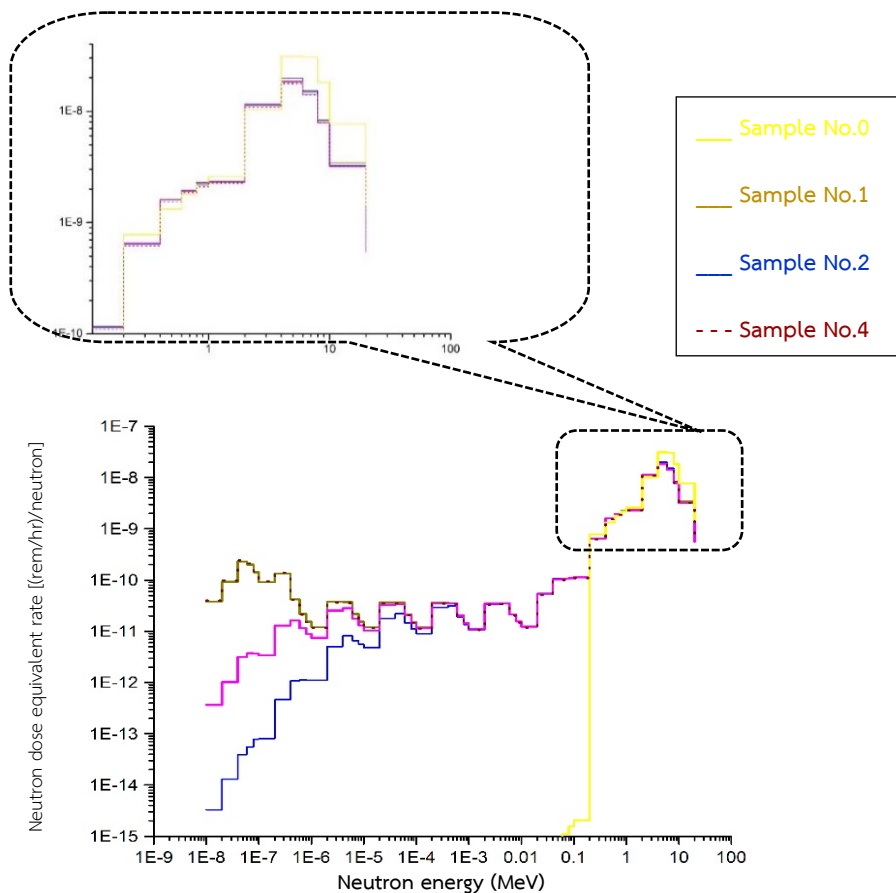
เมื่อทำการเปรียบเทียบวัสดุกำบังนี้เมื่อมีแผ่นโลหะชนิดต่างๆ ที่ความหนา 1 มม. เข้ามาเป็นส่วนประกอบเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มความสามารถในการกำบังรังสีโดยรวมทั้งนิวตรอนและแกมมา พบว่าเมื่อเพิ่มขึ้นของแคดเมียมทั้งด้านหน้า (ติดกับต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน) และด้านหลังของวัสดุกำบัง (พื้นผิวด้านนอก) สามารถลดทอนรังสีโดยรวมได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยสามารถลดทอนรังสีได้เพิ่มอีกประมาณร้อยละ 2.8 เนื่องจากแคดเมียมเป็นโลหะที่มีค่า Thermal neutron cross section absorption สูง ($\sigma_{a,E=0.0253 \text{ eV}}=2462 \text{ barn}$) จึงสามารถดูดกลืนเทอร์มัลนิวตรอนที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนเร็วจากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนกับวัสดุกำบังได้ดี แม้ว่าแผ่นแคดเมียมด้านหน้าจะเป็นบริเวณที่ติดกับต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่มีเพียงนิวตรอนเร็วเท่านั้น ดังนั้นในด้านนี้แผ่นแคดเมียมจึงไม่ได้ทำหน้าที่ในการกำบังรังสีนิวตรอนเร็วโดยตรงแต่อย่างไรก็ตามเมื่อนิวตรอนเร็วทำอันตรกิริยากับวัสดุกำบัง ก็จะทำให้รังสีนิวตรอนถูกลดทอนพลังงานจนเป็นเทอร์มัลนิวตรอนออกมาในทุกทิศทางและสามารถถูกดูดกลืนในแคดเมียมต่อไป จึงทำให้ผลจากการประเมิณพบว่าเมื่อใช้แผ่นแคดเมียมเป็นโครงสร้างเสริมเข้าไปทั้งด้านหน้าและด้านหลังของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนให้ผลการกำบังรังสีได้ดีกว่าเมื่อใช้เพียงด้านหลังเพียงอย่างเดียว นอกจากนั้นยังเป็นธาตุที่

มีเลขอะตอมสูง ($Z = 48$) จึงสามารถลดทอนรังสีแกมมาฟิสิกส์ได้ดีอีกด้วย

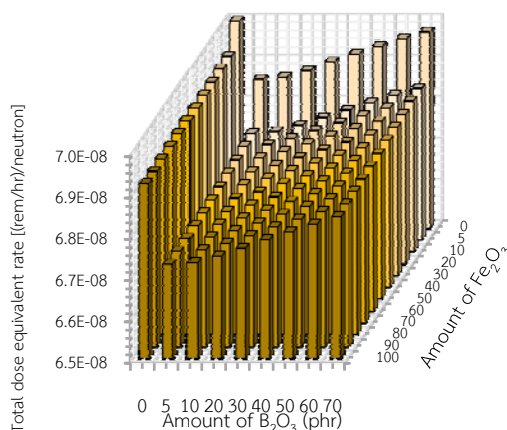
อย่างไรก็ตามแม้การเพิ่มโครงสร้างของแผ่นแคดเมียมไปกับวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน จะช่วยลดทอนนิวตรอนได้เพิ่มขึ้นแต่ก็ได้เพียงแค่ประมาณร้อยละ 2.8 เท่านั้น จึงอาจไม่คุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

1.4 การเปรียบเทียบรูปทรงของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำบังรังสี

เมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการกำบังรังสีของวัสดุนี้ในรูปทรงต่างๆ ได้แก่ ทรงสี่เหลี่ยม ทรงกระบอก และทรงกลม ที่มีปริมาตรเท่ากัน ทั้งที่มีแผ่นแคดเมียมและไม่มีแผ่นแคดเมียมเป็นส่วนประกอบ โดยประเมิณจากอัตราปริมาณรังสีสมมูลบริเวณพื้นผิวทั้งหมดของวัสดุกำบัง ผลที่ได้คือแม้ว่าวัสดุในแต่ละรูปทรงจะมีความสามารถกำบังรังสีได้ใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าวัสดุทรงกลมสามารถกำบังรังสีได้ดีที่สุด ดังแสดงในกราฟแท่งในรูปที่ 6 เนื่องจากวัสดุกำบังในปริมาตรที่เท่ากัน วัสดุทรงสี่เหลี่ยมจะมีความหนาของชิ้นงานในแต่ละด้านน้อยที่สุด รองลงมาได้แก่ วัสดุทรงกระบอก โดยที่วัสดุทรงกลมจะมีความหนาของวัสดุโดยรอบมากที่สุด ดังแสดงภาพเปรียบเทียบในรูปที่ 7 นอกจากนั้น วัสดุทรงกลมจะมีความหนาของวัสดุกำบังโดยรอบต้นกำเนิดรังสีในความหนาที่เท่ากันทุกทิศทาง ทำให้อนุภาคนิวตรอนทุกตัวสามารถทำอันตรกิริยากับวัสดุกำบังได้ในระยะทางที่มากเท่าๆ กันทุกทิศทาง ซึ่งต่างจากทรงสี่เหลี่ยมและทรงกระบอก ที่จะมีระยะหรือความหนาของวัสดุกำบังที่หนากว่าด้านอื่นๆ ในบริเวณมุมของแต่ละด้านเท่านั้น นอกจากนี้พบว่าเมื่อวัสดุกำบังมีส่วนประกอบของแผ่นแคดเมียมทั้งด้านหน้าและหลังวัสดุกำบังโดยมีความหนาด้านละ 1 มม. พบว่าสามารถลดทอนรังสีได้เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 2



รูปที่ 3 กราฟโปรไฟล์แสดงความสัมพันธ์ของอัตราปริมาณรังสีนิวตรอนสมมูลหลังวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนชนิดต่างๆ และพลังงานของรังสีนิวตรอน (MeV) (มุมซ้ายบน: ภาพขยายของกราฟในช่วงพลังงานของนิวตรอนเร็ว (0.1 – 100 MeV))



รูปที่ 4 อัตราปริมาณรังสีสมมูลรวม (นิวตรอนและแกมมา) ที่พื้นผิวของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนทรงกลม (Sample No.10) ที่ปริมาณ (Part per hundred rubber; phr) ของวัสดุดูดกลืนนิวตรอนและวัสดุกระเจิงนิวตรอนต่างๆ

2. การขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน

เมื่อทดลองขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุกำบังในแต่ละชั้นทั้งที่มีส่วนประกอบของยางที่มีส่วนผสมของยางพาราธรรมชาติ (NR) กับยางสังเคราะห์สไตรีนบิวตาไดอีน (SBR) (layer 1, 2, 3 และ 4) และส่วนประกอบของยางที่ใช้ยางพาราธรรมชาติ (NR) เพียงชนิดเดียว (layer 1.1, 2.1, 3.1 และ 4.1) และนำไปทดสอบคุณสมบัติของยางด้านความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) และความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) พบว่าวัสดุที่มีส่วนประกอบของ Fe_2O_3 100 phr ผสมกับยางพาราธรรมชาติ (NR) ให้คุณสมบัติของยางที่ดีกว่าส่วนผสมที่มีทั้ง NR/SBR แต่สำหรับวัสดุที่มีส่วนผสมของ B_2O_3 10 phr แม้ว่าจะมีปริมาณที่น้อย แต่เนื่องจาก B_2O_3 เป็นวัสดุที่มีความเป็นกรด ($\text{pH} \sim 4$) จึงมีความเป็นพิษต่อ NR ส่งผลให้ยางไม่สามารถคงรูปได้ ทำให้ส่วนประกอบของยางที่มีการผสมของ NR/SBR มีคุณสมบัติของยางที่ดีกว่าเพราะหมู่ styrene ใน SBR มีความทนต่อกรดมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีคุณสมบัติที่ดีกว่าชิ้นงานที่ไม่มี

B_2O_3 เป็นส่วนประกอบ นอกจากนั้น เมื่ออนุภาคของ B_2O_3 ที่อยู่บริเวณพื้นผิวของวัสดุสัมผัสกับความชื้นในอากาศ จะทำให้เปลี่ยนเป็นผลึกของกรดบอริก (Boric acid) ทำให้ชิ้นงานของวัสดุกำบังในชั้นนี้เสื่อมคุณภาพได้ง่าย จึงทำการห่อหุ้มวัสดุในชั้นนี้ด้วยยางพาราคงรูปในสูตรทั่วไปที่ใช้ในเชิงพาณิชย์เพื่อเพิ่มความทนทานของวัสดุ

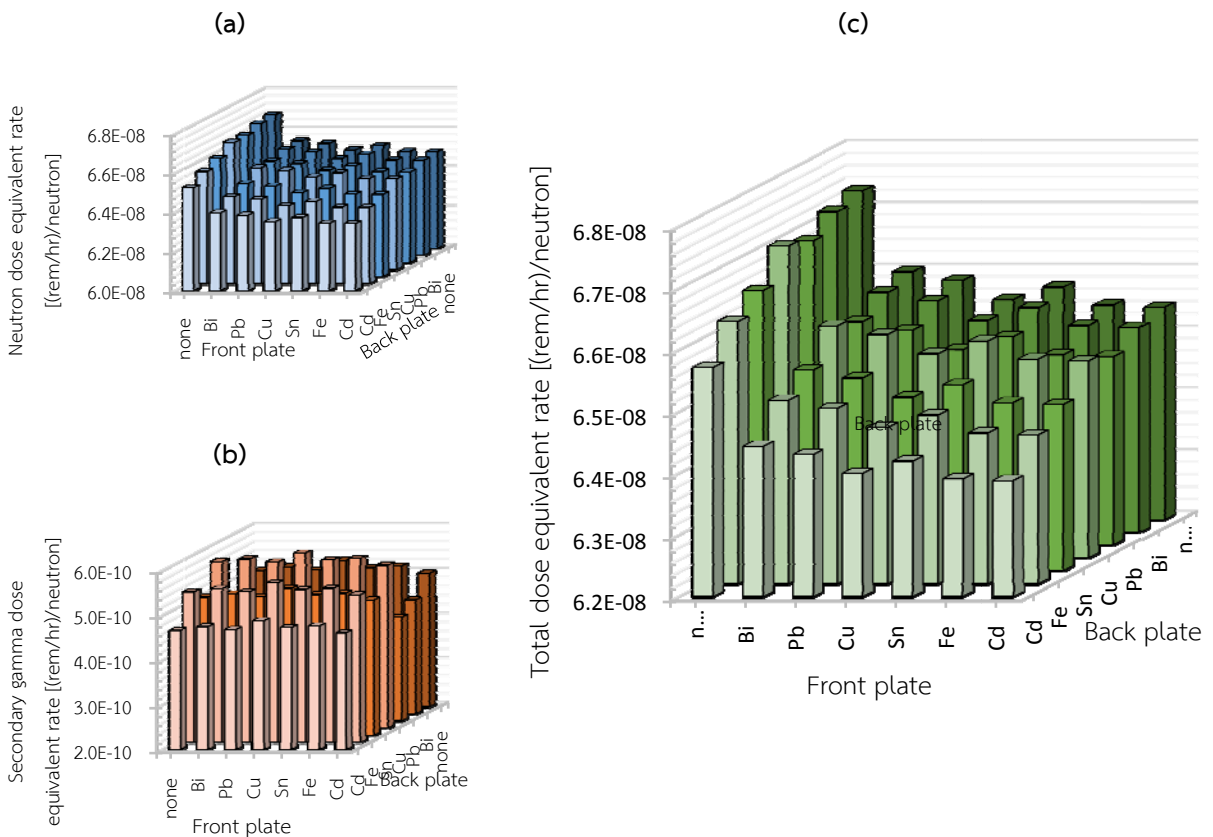
จากนั้นทำการตรวจสอบการกระจายตัวของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ขึ้นรูปแล้วเสร็จ (รูปที่ 8(a)) โดยการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน พบว่าอนุภาคต่างๆ ของ Fe_2O_3 และ B_2O_3 สามารถกระจายได้อย่างสม่ำเสมอในชิ้นงานของยางคงรูป ดังแสดงในรูปที่ 8(b) และ กราฟดังรูปที่ 9 ที่แสดงโปรไฟล์ของค่านับวัดความเข้มของภาพถ่ายรังสีนิวตรอนของชิ้นงาน การในแต่ละตำแหน่งของโปรไฟล์มีค่าไม่เท่ากันเนื่องจาก ความไม่สม่ำเสมอของลำนิวตรอนที่ใช้ในการถ่ายภาพรังสีซึ่งแสดงให้เห็นดังกราฟโปรไฟล์และภาพถ่ายรังสีนิวตรอนในขณะที่ไม่ขึ้นงาน ดังรูปที่ 10(a) และ 10(b) ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้

ว่ามีการกระจายของอนุภาคต่างๆ ในภาพที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยสังเกตจากค่านับวัด (count) ความเข้มของภาพ ในแต่ละตำแหน่ง (Lane 1-5) ที่มีค่าใกล้เคียงกัน

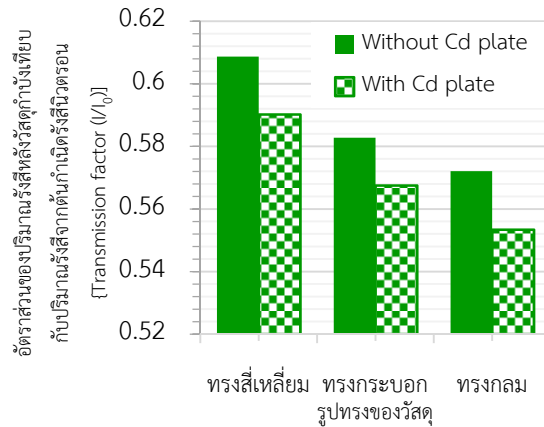
บทสรุป

สามารถออกแบบวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่มีความยืดหยุ่นจากส่วนประกอบหลักที่ทำมาจากยางพาราธรรมชาติด้วยโปรแกรม Monte Carlo N particle (MCNP) ที่มีความหนา 10 ซม. โดยชั้นงานที่สามารถกำบังรังสีนิวตรอนเร็ว (0.1 – 100 MeV) ได้ดีที่สุดได้แก่ ชั้นงาน 4 ชั้น ที่ประกอบด้วย ชั้นของ NR ผสมกับ Fe_2O_3 100 phr สลับกับชั้น ของ NR ผสมกับ

SBR ในอัตราส่วน 1:1 และ B_2O_3 5 phr โดยเมื่อใช้แผ่นโลหะแคดเมียมหนา 1 ซม. หุ้มโดยรอบทั้งด้านหน้าและด้านหลังวัสดุกำบังนี้จะทำให้สามารถลดทอนรังสีได้เพิ่มขึ้นอีกประมาณร้อยละ 2.8 และวัสดุกำบังรังสีทรงกลมสามารถกำบังรังสีนิวตรอนได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุรูปทรงสี่เหลี่ยมและทรงกระบอกในปริมาตรที่เท่ากัน และสามารถสามารถขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อนำไปใช้งานได้จริงโดยมีการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆในเนื้ออย่างได้อย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงสามารถนำวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนนี้เป็นอีกหนึ่งทางเลือกเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในการกำบังรังสีนิวตรอนหรือผลิตเป็นภาชนะสำหรับบรรจุต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนได้

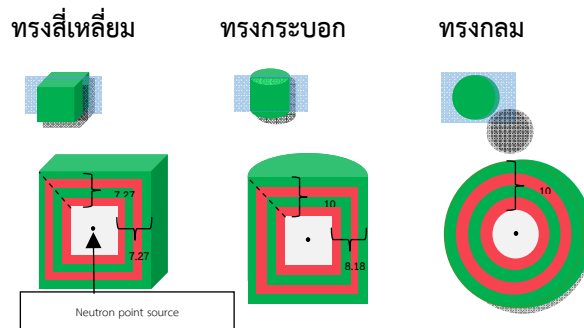


รูปที่ 5 กราฟแท่งแสดงการลดทอนปริมาณรังสีนิวตรอน (a) รังสีแกมมาทุติยภูมิ หรือ โฟตอน (b) และ ปริมาณรังสีรวมทั้งนิวตรอนและโฟตอน (c) ของวัสดุกำบังที่มีแผ่นโลหะแต่ละชนิดเป็นโครงสร้างเพิ่มเติม

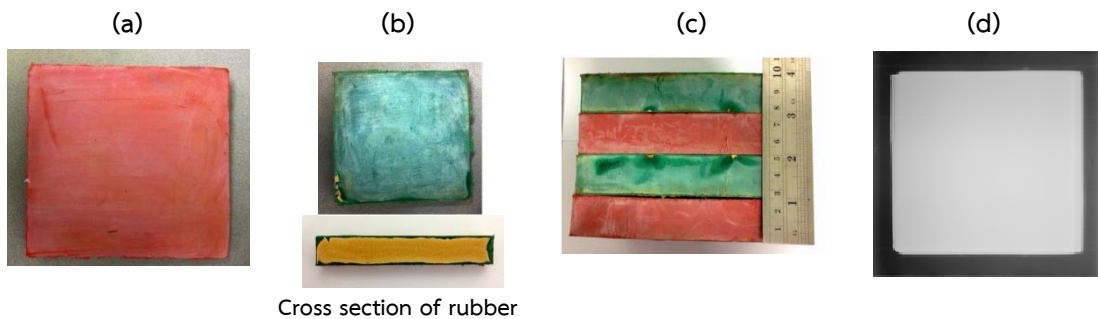


รูปที่ 6 กราฟแท่งแสดงอัตราส่วนของปริมาณรังสีหลังวัสดุกับังเทียบกับปริมาณรังสีจากต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนของวัสดุกับังรังสีรูปทรงต่างๆทั้งที่มีและไม่มีแผ่นโลหะแคดเมียมเป็นส่วนประกอบ

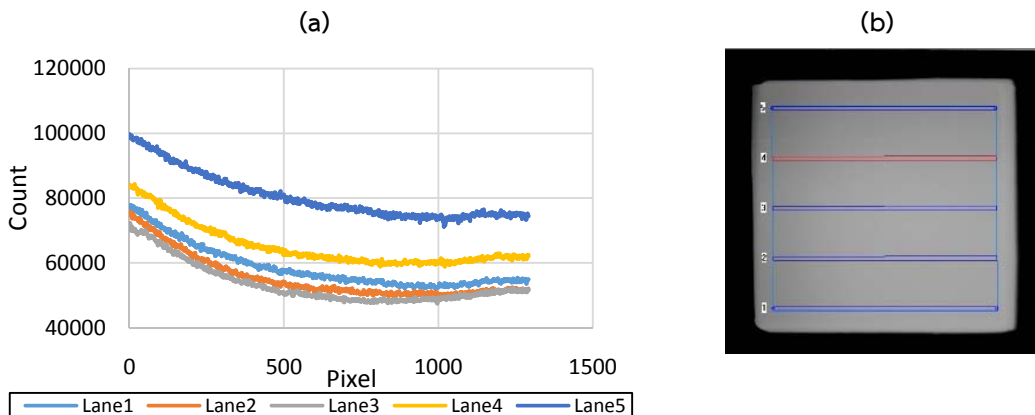
*หมายเหตุ : กราฟต่างๆไม่ได้แสดงค่า standard deviation (SD) เนื่องจากเป็นผลการคำนวณจากรหัสคอมพิวเตอร์เชิงสถิติ (Team, X.-M.C., 2003)



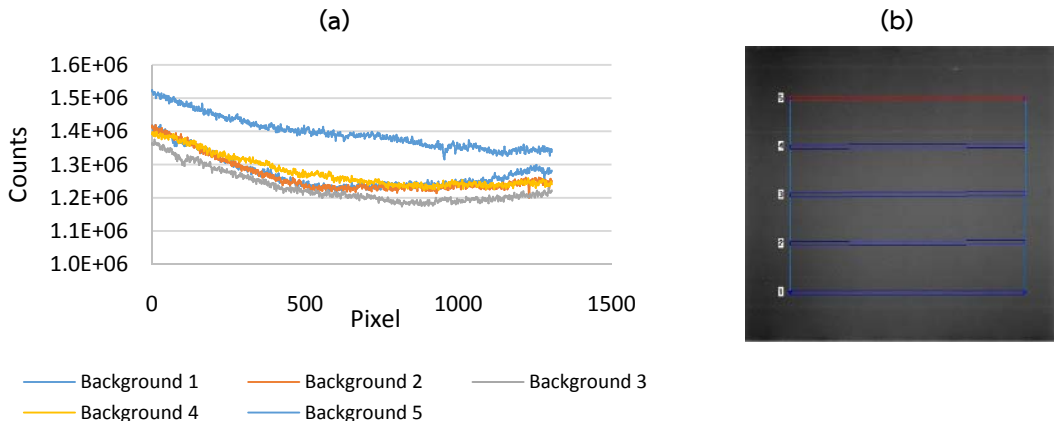
รูปที่ 7 แผนภาพแสดงรูปทรงของวัสดุกับังรังสีนิวตรอนที่ใช้ในการจำลองการกับังรังสีด้วยโปรแกรม MCNP



รูปที่ 8 (a) ภาพถ่ายชิ้นงานวัสดุกับังรังสีนิวตรอนด้านหน้าของชั้นของ NR+Fe₂O₃ 100 phr
 (b) ชั้นของ NR+SBR+B₂O₃ 5 phr
 (c) ด้านข้างที่ขึ้นรูปเป็นแผ่นหนาแผ่นละ 2.5 ซม. รวมความหนาทั้งหมด 10 ซม.
 (4 layers: sample#10)
 (d) ภาพถ่ายด้วยรังสีนิวตรอนของวัสดุกับังทางด้านหน้า (วัสดุแต่ละชั้นมีขนาด กว้าง 15 ซม. ยาว 15 ซม.)



รูปที่ 9 (a) กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่านับวัดความเข้มของภาพถ่ายนิวตรอนของวัสดุกำบังรังสีนิวตรอนที่ตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นรับภาพในตำแหน่งต่างๆ ดังรูป (b)



รูปที่ 10 (a) กราฟแสดงโปรไฟล์ของค่านับวัดความเข้มของภาพถ่ายนิวตรอน บนแผ่นรับภาพโดยไม่มีชิ้นงานวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน และ (b) ภาพที่แสดงตำแหน่งของบริเวณที่ทำการแสดงโปรไฟล์ค่านับวัดความเข้มของภาพ

เอกสารอ้างอิง

- Abdo, A.E., M.A.E.-S. and Gaber, F.A. (2003). Utilization of ilmenite/epoxy composite for neutrons and gamma rays attenuation. *Annals of Nuclear Energy* 30: 175–187.
- Crosby, K.S. (2007). Geology of the Udon Thani Potash (Sylvinite) Deposits with an Overview for Development of a Sustainable Potassium Resource for Thailand. *Proceedings of the International Conference on Geology of Thailand: Towards Sustainable Development and Sufficiency Economy*. 96-103.
- Gençel, O., M.N., Çelik, O., Yalman, K. and Bayram, D. (2010). Selenium and vitamin E modulates radiation-induced liver toxicity in pregnant and nonpregnant rat: effects of colemanite and hematite shielding. *Biological Trace Element Research* 135: 253-263.
- Gencel, O., W.B., Ozel, C. and Filiz, M. (2010). An investigation on the concrete properties

- containing colemanite. *International Journal of Physical Sciences* 5(3): 216-225.
- Gencel, O. (2012). Gamma and neutron shielding characteristics of concretes containing different colemanite proportions. *Nuclear Science and Technology* 41-49.
- Gwaily, S.E., M.M.B., Hassan, H.H. and Madani, M. (2002). Natural rubber composites as thermal neutron radiation shields I. B4C/NR composites. *Polymer Testing* 21: 123-133.
- Gwaily, S.E., M.M.B., Hassan, H.H. and Madani, M. (2002). Natural rubber composites as thermal neutron radiation shields II — H3BO3/NR composites. *Polymer Testing* 21: 513-517.
- Jumpee, C. and Wongsawaeng, D. (2015). Innovative neutron shielding materials composed of natural rubber-styrene butadiene rubber blends, boron oxide and iron(III) oxide *Journal of Physics : conference Series*. 611.
- McConn, R.J., C.G., Pagh, R., Rucker, R. and Williams III, R. (2011). Radiation Portal Monitor: Project Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling. pp. 18, The U.S. Department of Homeland Security U.S. Customs and Border Protection and Domestic Nuclear Detection Office.
- Okuno, K. (2005). Neutron shielding material based on colemanite and epoxy resin. *Radiation Protection Dosimetry* 115: 258-261.
- Suwanich, P. (2010). Geology and geological structure of potash and rock salt deposits in Chalerm Phrakiat district, Nakhon Ratchasima province in Northeastern Thailand. *Kasetsart Journal: Natural Science* 44: 1058 - 1068.
- Shultis, J. K. (2010). Radiation Shielding and Radiological Protection. In *Handbook of nuclear engineering* (Cacuci, D.G., ed): Springer Science & Business Media: 13-26.
- Team, X.-M.C. (2003). MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5 Volume I: Overview and Theory. University of California, Los Alamos National Laboratory.

